

Multimedia-Internet

José M.^a Rivadeneyra

2. Edizioa

oman la zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

CIP. Unibertsitateko Biblioteka

Rivadeneira, José María, 1966-

Multimedia-Internet [Recurso electrónico] / José M^a Rivadeneira. – 2. ed. – Datos. – [Leioa]: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, Argitalpen Zerbitzua = Servicio Editorial, 2023. – 1 recurso en línea : PDF (164 p.). – (Unibertsitateko Eskuliburuak = Manuales Universitarios)

Modo de acceso: World Wide Web

Incluye bibliografía.

ISBN: 978-84-1319-583-4.

1. Internet. 2. Medios audiovisuales.

(0.034)681.324

UPV/EHUko Euskara Zerbitzuak sustatua eta zuzendua, Euskarazko ikasmaterialgintza sustatzeko deialdiaren bitartez.



ISBN: 978-84-1319-583-4

Hitzaurrea

Liburu honen lehen argitaraldia egin nuenetik igaro dira lau urte, eta iritsi da bere edukia berrikusteko garaia. Urte hauetan unibertsitateko ikasketetan erabili izan da liburua, eta erabilera horrek azaleratu egin ditu hobetzeko zenbait alderdi. Saihetsezinak suertatzen diren eguneraketak daude bigarren edizio honetan: ariketen bilduma berrikusita dago, zaharkituta geratu diren RFC agirien erreferentziak ordezkatu egin dira, eta erabilerarik gabeko euskarazko termino berriei nagusitu diren beste termino batzuek hartu diete tokia. Horrez gain, eduki berriak ere gehitu ditut, eta teknologikoki zaharkituta geratu direnak baztertu. Gehikuntza nagusiak streaming protokoloei, CDN sareei, eta ICE protokoloari dagozkie. Baztertuen artean, aipatzekoak dira ADSL teknologia, PIM-DM protokoloa eta LEDBAT algoritmoa. Azkenik, hainbat gairen azalpenak berregituratu ditut, edukiak beste era batean ordenatuta; aldaketarik handiena multicast teknologiaren azalpenean dago, lehen streamingari buruzko kapituluan zegoena laugarren kapitulura eraman baita.

Bestela, horrelako liburu baten beharrak hor dirau; hau da, euskarazko Informatika Ingeniaritzako eta antzeko ikasketetan horrelako liburuen sostengua behar da. Liburuak balio erantsia du gure testuinguruan: *euskaraz* dago idatzita, ez da beste hizkuntza batean idatzitako liburu baten itzulpena. Horretan datza bere bigarren helburua, egindako lanari zentzua benetan ematen diona: euskara idatzia zabaldu, orain arte inoiz urratu ez dituen bideetan. Oso gutxi daukagu idatzita, euskaraz, Internet- eta multimedia-teknologiaren inguruan. Hutsune hori betetzera etorri zen liburua orain dela lau urte, teknologia horien inguruan lan egiten duten, dibertitzen diren, eta ikasten edo irakasten duten euskaldunei bidea samurrago egitera. Liburu honi esker euskaldunoi errazagoa egiten bazaigu multimedia-Internetarako teknologiaz hitz egitea eta idaztea, helburua beteta dago.

Norentzat den liburu hau

Helburu akademikoa izanik, liburua bereziki interesatuko zaie Internet- eta multimedia-teknologiak ikasten dituztenei. Oso aproposa da Ingeniaritza Informatikoa ikasten dutenentzat, baita Telematika eta Telekomunikazioko unibertsitate-tituluetan ibiltzen direnentzat ere. Irakaskuntza tekniko ertainetan ere oso erabilgarria izango da liburua, batez ere irakasleen prestakuntzan, euskaraz idatzitako testuen eskasia kontuan harturik.

Hala ere, saiatu naiz liburua ahal den irakurterazena egiten, hezkuntza-esparrutik harago joateko eta erabilgarria izan dadin gaian sakondu nahi duen edozein euskaldunentzat. Multimedia-Internet barrutik ezagutzeko jakin-mina duen edozeinentzat idatzi dut liburua.

Edukia eta egitura

Interneten testuinguruan *multimedia* terminoa erabiltzen dugunean, funtsean, streaming- eta telefonia-aplikazioez ari gara. Ez dira Interneteko multimedia-aplikazio bakarrak, baina bai nagu-

siak, mugitzen duten trafiko kantitateari dagokionez, eta baita erabiltzen dituzten teknikei erreparatzen badiegu ere. Horregatik, liburuak bi aplikazio sorta horien azterketa du ardatz. Lehenengo kapituluan, TCP/IP protokolo multzoaren eta Interneten beste oinarri teknologikoak laburbiltzen dira, gaia ondo menderatzen ez duen irakurleak beharrezko ezaguerak bereganatu ditzan. Multimedia-aplikazioen ezaugarriak eta soinuaren eta bideo digitalaren oinarriak ere lantzen dira hasierako kapituluan. Bigarren kapitulua streaming-teknologiari buruzkoa da. Hirugarrenean, telefoniaren aro berriaren teknologia azaltzen da. Laugarren kapituluak sare-azpiegiturak ditu ardatz. Azpiegitura horiek datu-zerbitzuetarako diseinatu ziren bere garaian, eta ez multimediarako. Interneteko multimedia-aplikazioak bereganatu ahal izateko, azpiegiturretan egindako hobekuntzak jasotzen dira azken kapitulu horretan.

Erabilitako formatuei buruz

Hiru motatako testu bereziak topatuko dituzu idazki honetan: **beltzez** idatziriko hitzak, *letra etzanez* daudenak eta *courier* estilokoak. **Beltzez** dauden terminoak garrantzi berezikoak dira. Letra *etzana* erabili dut erdarazko terminoak idazteko (gehienak ingelesezkoak) eta arrazoiren bategatik esanahi berezia duten hitzak nabarmentzeko. Azkenik, *courier* estiloan daude protokoloen komandoak, kode zatiak, fitxategien izenak eta antzekoak.

Irakurlearen ekarpenak

Irakurlearen komentarioak eta gomendioak ongi hartuko ditut. Esadazue, zuen ustez, zer sartu beharko nukeen hurrengo edizio batean eta zer ez, zertan zaudeten gustura liburuarekin eta zertan ez. Mesedez, bidaliezazkidazue zuen mezuak mmi@ehu.eus helbidera.

Eskerrak

Lehenik eta behin, funtsezkoa izan da Donostiako Informatika Fakultateko irakasle euskaldun asko aspalditik egiten ari den lan izugarria Informatika arloan hiztegi teknikoa sortzeko. Denak beti prest agertu dira laguntzeko eta nire zalantzak argitzeko. Bereziki eskertu nahi diot bere lana Alex Mendiburu irakasleari; zenbait adierazpen argiago daude berari esker.

UPV/EHU euskal unibertsitate publikoaren baliabideak eta azpiegiturak erabili ditut liburua idazteko. Interneten denok erabiltzeko moduan dauden baliabide linguistikoko asko erabili ditut, baina *Elhuyarek* argitaratutako hiztegia izan da gehien kontsultatu dudana. Mila esker bi instituzio horiei.

Irudi gehienak neuk sortuak dira, lehenengo kapituluko batzuk izan ezik. Beste irudi horiek egileek domeinu publikoari emanak dira. Egile horiei ere nire esker ona azaldu nahi diet: Lucas V. Barbosa (1.11 irudiaren egilea), Bas Duineveld (1.13 irudiarena), Eadweard Muybridge (1.14 irudiarena), Alex Khristov (1.16 irudiarena), Petteri Aimonen (1.17 irudiarena) eta egile ezezagunak (1.9 irudiarena, 1.10 irudiarena, 1.12 irudiarena, gero nik egokitua eta euskaratua, eta 1.15 irudiarena).

Testua idazteko, LibreOffice 6.0.7.3 erabili dut, Ubuntu 18.04 sistema batean. Testuaren ortografia berrikusteko, Xuxen zuzentzaile automatikoa erabili dut, eta, irudiak sortzeko, Dia 0.97 diagrama-editorea. Software hori guztia garatu, itzuli eta eskura jarri digutenei, eskerririk asko.

Edukien aurkibidea

1. Internet eta multimedia-aplikazioak	8
1. Interneten deskribapena	8
1.1. Egitura fisikoa	8
1.2. TCP/IP protokoloak	10
1.3. Internet bidezko transmisioaren ezaugarriak	13
2. Multimedia-aplikazioak Interneten	16
2.1. Bideo/audio streaminga	17
2.2. IP bidezko telefonia	18
2.3. Sare bidezko bideo-jokoak	19
3. Soinu digitala	20
3.1. Seinale analogikoen digitalizazioa	20
3.2. Trinkoketa, kodetzeko formatuak, kodetzaileak eta kontainerrak	25
3.3. Soinuaren kodeketa	28
3.4. Ahotsaren kodeketa	31
3.5. Audio-kodetzaileak	34
4. Bideo digitala	36
4.1. Irudien digitalizazioa	36
4.2. Bideo-kodeketarako sistemak	38
Laburpena	43
1. kapituluko ariketak: audioa eta bideoa Interneten	44
2. Bideoa eta telebista Interneten	48
1. Streaming-teknikaren oinarriak	49
1.1. Internet bidezko bideo eta telebistarako osagaiak	49
1.2. Internet bidezko bideo eta telebistarako ereduak	50
1.3. Streaming-sistemen osagaiak	51
1.4. IP zerbitzua eta bideoaren kalitatea	52
1.5. Aurrekarga (<i>buffering</i>) eta hasieratzeko atzerapena	53
1.6. Garraio-mailako zerbitzuak	55

2. CDN-sareak eta streaminga	56
2.1. Oinarrizko funtzionamendua	57
2.2. Zerbitzari taldea aukeratzeko estrategiak	59
3. Streaming-protokoloak	62
3.1. Hasierako streaming-protokoloak	63
3.2. HTTP bidezko streaming-protokoloak	65
3.3. Atzerapen baxuko streaming-protokoloak	68
4. P2P streaminga	69
4.1. P2P streamingaren erakargarritasuna	70
4.2. P2P streamingerako aukerak	71
4.3. P2P streamingaren mugak	73
5. Multicast-streaminga	75
Laburpena	77
2. kapituluko ariketak: streaminga	79
3. IP telefonia	83
1. Sarrera	83
1.1. Media- eta kontrol-kanalak	84
1.2. IP telefoniaren erabilerak	85
2. Media-kanalak	86
2.1. Banda-zabalera	86
2.2. Atzerapena	87
2.3. Galerak	89
2.4. Media-kanaletarako protokoloak	92
3. Kontrol-kanalerako protokoloak	95
3.1. SIP	95
3.2. Beste protokolo batzuk	99
4. Internet bidezko telefonia	103
4.1. NAT eta su-hesiak	103
4.2. IP telefoniaren eta TDM telefono-sareen arteko komunikazioa	106
4.3. Identifikadoreen arteko lotura	107
5. IP telefonia enpresetan	111
5.1. Migraziorako aukerak	113
Laburpena	116
3. kapituluko ariketak: IP telefonia	117

4. Multimediarako sare-teknologiak	121
1. Multicast-teknologia	122
1.1. Multicast-kontzeptuak	122
1.2. Multicast-helbideak	124
1.3. Multicast-trafikoa birbidaltzea	126
1.4. Multicast-domeinuen arteko hutsunea eta AMT tunelak	132
2. QoS mekanismoak	133
2.1. Traffic Management	133
2.2. Trafiko-ingeniaritza (<i>Traffic Engineering</i>)	139
3. Banda zabaleko sarbide-sareak	143
3.1. Zuntz optiko bidezko sareak	143
3.2. Kablerik gabeko sarbide-sareak	147
Laburpena	152
4. kapituluko ariketak: multimediarako sare-teknologiak	154
Bibliografia	159
Hitz-zerrenda	161

Internet eta multimedia-aplikazioak

Kapitulu hau ikasi eta gero, honako kontzeptu hauek ondo ezagutu beharko ditu irakurleak:

- Interneten eta TCP/IP protokolo multzoaren oinarriak.
 - Internet bidezko komunikazioaren ezaugarriak.
 - Zer diren streaminga eta VoIPa.
 - Digitalizazioaren urratsak.
 - Audioa eta ahotsa kodetzeko teknika nagusiak.
 - Bideoa kodetzeko teknika eta estandar nagusiak.
-

Interneten erabilerari buruzko estatistikek diotenez, gero eta gehiagotan erabiltzen dugu sarea multimedia-aplikazioetarako. Filmak, bideoak, eta irratiko eta telebistako saioak gero eta gutxiagotan ikusten ditugu betiko telebistan edo irratan, Internet bidez jasotzen baititugu. Era berean, betiko telefono-sarea ere tokia uzten ari zaio Interneti. Skype eta halako programak ez dira arrotzak dagoeneko, edonork erabiltzen baititu. Hau da, telekomunikazio-zerbitzuen mundua goitik behera aldatzen ari da. Lehen, zerbitzu bakoitzak bere sarea zuen, eta hori zen aukera bakarra zerbitzu hori eduki ahal izateko: telebista-zerbitzuak jasotzeko, telebistarako telekomunikazio-sarea eta telebista ikusteko ekipoak erabiltzen genituen; telefonoz hitz egiteko, telefono-sarea, eta, formatu digitaleko informazioa trukatzeko eta lortzeko, Internet. Baina teknologia horietako bat besteak fagozitatzen ari da, eta, orain, sare bakar batek ematen ditu zerbitzu guztiak. Internet da sare hori.

Audioa eta bideoa Internet bidez jasotzea nahiko kontu zaharra da, baina 2000. urte ingurutik aurrera hasi zen etengabe hazten denbora errealeko audio eta bideoen trafikoa Interneten. Bi gertaerak bultzatu dute hazkunde hori. Alde batetik, konputagailuak askoz ahaltsuagoak dira, eta, ondorioz, mikrofonoak eta kamerak gehitu zaizkie, irudiak eta soinuak jaso, prozesatu eta igor ditzaten. Beste alde batetik, Internetek duen transmisio-ahalmena nabarmen igo da, bai sarearen muinean (hornitzaileen barruko sareetan eta beren arteko loturetan), bai erabiltzaileen Interneterako sarbideetan.

Interneten deskribapen labur bat eginez hasiko dugu kapitulu hau. Internet eta TCP/IP teknologia ezagutzen dituenak baztertu dezake hasierako zati hau, eta zuzenean hurrengora igaro: zer den multimedia-aplikazio bat, eta nola sailkatzen ditugun aplikazio horiek. Gero, audioaren eta bideoaren digitalizazioa aztertuko dugu, behar-beharrezkoa baita Internet bidezko multimediarako.

1. Interneten deskribapena

1.1. Egitura fisikoa

Internet mundu osoan zehar barreiatutako milioika gailu elektroniko elkarrekin lotzen dituen sare informatikoa da. Orain dela ez asko arte, elkarrekin lotutako gailu horiek konputagailuak zi-

ren, hau da, PCak eta zerbitzariak, nagusiki. Haatik, gero eta gehiagotan, beste mota bateko gailu batzuk ere konektatzen ditugu Internetera: telefonoak, tabletak, telebistak, web-kamerak, etxeko tresnak... Izan ere, beti erabili izan dugun *konputagailu-sarea* terminoak desegokia dirudi Internet izendatzeko. Gaur egun, egokiagoa da *gailuen Internetaz* mintzatzea.

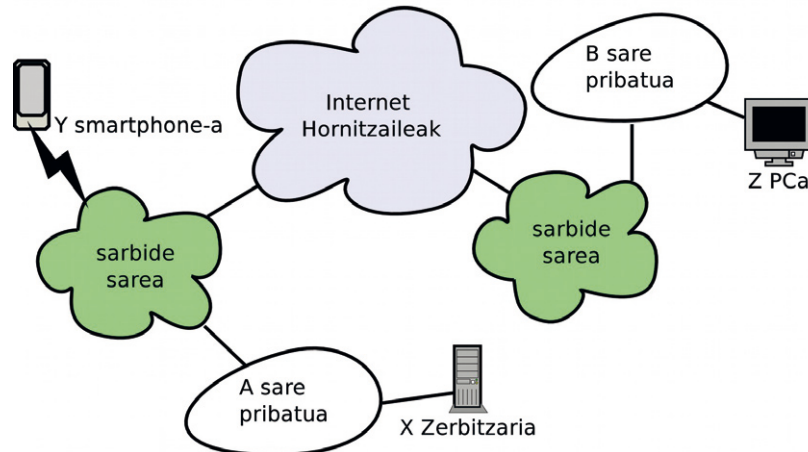
Gailuek sarea erabiltzen dute beren artean «hitz egiteko» (informazioa eta aginduak trukatzeko, alegia), eta, horrela, gailu horiek erabiltzen dituzten gizakiei zerbitzuak emateko. Sarea beste gailu askok eta beren arteko konexioek osatzen dute. Sare barruko gailu horiek, askotan konputagailu bereziak direnak, sare-gailuak deituko ditugu. Haien artean, kontzentragailuak, kommutagailuak, eta bereziki garrantzitsuak diren **bideratzaileak** ditugu (ingelesez *router* denez, euskaraz ere askotan *routera* entzungo dugu). Sare-gailuen arteko konexio gehienak kable bidezkoak dira (kobrezkoa, zuntz optikokoak, kable ardazkidekoak...), baina kablerik gabekoak ere hor daude.

Berez, Internet ez da sare bat, sarek osatutako sarearte bat baizik. Hau da, milioika sare elkarrekin lotuta. Munduaren beste puntan dagoen konputagailu bateraino heltzeko, gure makinatik ateratzen den informazioak honako sare hauek zeharkatuko ditu (ikusi 1.1 irudia):

- Gure sarea (jatorrizko sarea) eta helburu den gailuaren sarea (helburuko sarea). Halakoak erakunde, enpresa edo partikularren sareak izango dira. Hor daude fisikoki konektatuta (kable edo uhinen bidez) jatorrizko eta helburuko gailuak. Batzuetan, etxeko edo enpresa txiki bateko sare lokala izango da, konputagailu gutxi batzuk **kommutagailu** (edo *switch*) baten bidez elkaturik osatuta. Beste batzuetan, erakunde baten egoitzetako sare lokalak telekomunikazio-konpainia bati kontratatutako konexioen bidez osatutako sarearte izango da. Betiere, Interneti lotutako sare pribatuak dira.
- Erabiltzaileen sareak Internetera lotzen ditugu **Internet-hornitzaileen** bidez. Internet-hornitzaileak izendatzeko, **ISP** akronimoa erabiltzen da, ingelesetik hartuta (*Internet Service Provider*). Internet-hornitzaileen sareak elkarrekin lotuta daude informazioa edozein saretatik beste edozein saretara eraman ahal izateko. Badaude ISP txikiak (edo Internet txikizkariak) eta handiak (edo Internet handizkariak). Txikizkariak zuzenean ematen diete Interneterako sarrera erabiltzaileen sareei. Handizkariak ISP txikiei ematen diete zerbitzua, haien arteko trafikoa mugituz.
- Erabiltzaileen sareak edo ekipoak eta Internet-hornitzaileak lotzen dituzten sareak **sarbide-sareak** dira. Sarbide-sare mota asko dago. Adibidez, etxean eta enpresa txikietan telefono klasikoak edo kable bidezko telebista konektatzeko erabili izan ditugun sareak ere badira Interneterako sarbide-sareak. Sare horiek hartzen ditugu gure ISP-raino ailegatzeko, xDSL, DOCSIS edo FTTH teknologiak erabiliz. Etxekoak baino transmisio-behar handiagoak dituzten erakunde eta enpresen sareen kasuan, Interneterako sarbiderako espresuki eskaintzen diren beste konexio batzuk kontratatzen dituzte telekomunikazio-konpainietan. Horretarako, zenbait aukera teknologiko dituzte. Badago aukera erabiltzaileen ekipoak zuzenean zenbait sarbide-saretara konektatzeko, erabiltzailearen inongo sare pribaturik igaro gabe. Hori da normalean egiten dena tabletekin eta smartphoneekin, Internet zuzenean atzitzen baitute 3G (UMTS teknologia erabiliz), 4G (LTE teknologia) edo 5G sareen bidez.

Sarbide-sareen garrantzia izugarria da: sarbide txarra badugu, jai dugu Interneten.

1.1. irudian, Interneti lotutako hiru gailu agertzen dira, X, Y eta Z izenekoak. X zerbitzaria eta Z PCa sare pribatuetan daude kokatuta (etxeko edo laneko Ethernet sarea izan daiteke). Y smartphonea, aldiz, zuzenean konektatuta dago Internetera, sarbide-sare baten bidez, inongo sare lokalik gabe.



1.1. irudia. Erabiltzaileen sareak, sarbide-sareak eta Internet.

1.2. TCP/IP protokoloak

Interneten dauden gailu guztiek TCP/IP protokoloak erabiltzen dituzte beren artean komunikatzeko. Protokolo horiek definitzen dute zer formatu eman behar zaion informazioari Interneten zehar bidaltzeko eta zer urrats egin behar diren informazio hori beste aldera heltzeko. TCP/IP multzoan, protokolo asko daude, ez soilik TCP eta IP, baina bi horien izenak hartu dira multzo osoa izendatzeko. Atal honetan ikusiko dugu nola erabiltzen diren protokolo horiek Interneten.

Funtzionamendu orokorra

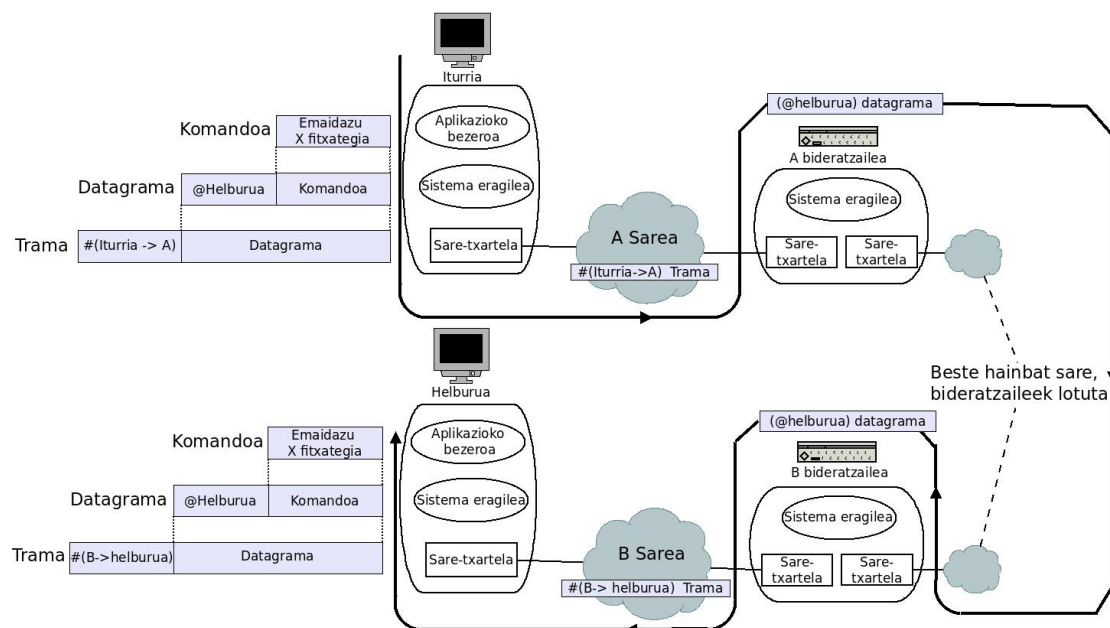
Demagun bi konputagailu ditugula eta fitxategi bat eraman nahi dugula batetik bestera, Internet bidez. Horretarako, aplikazio bat erabiliko dugu, bi programek osatuta: bata konputagailu batean egikarrituko da, eta bestea beste konputagailu batean. Aplikazio bat sarearen bidez lotutako konputagailuetan egikaritzen diren programa desberdinek osatzen dutenean, **aplikazio banatua** edo sare-aplikazio bat dela esaten dugu. Askotan (baina ez beti), aplikazioaren zati bati **bezero** deritzaio, eta besteari **zerbitzari**. Demagun gure zerbitzariak bezeroari bidaliko diola fitxategia, weben egiten den bezala. Horretarako, honako urrats hauek beteko dira:

1. Hasteko, bezeroak zerbitzariari eskatu beharko dio fitxategia bidaltzeko. Horretarako, komando bat sortu behar du, zer fitxategi nahi duen azalduz, eta zerbitzariari helarazi. Beste xehetasun pila bat ere azaldu behar dizkio zerbitzariari, baina azalpen honetarako ez ditugu behar. Komando horren formatua fitxategiak deskargatzeko protokoloak definitzen du. Adibidez, webaren kasuan, HTTP da protokolo hori, eta bezeroak (*arabatzzaile* edo *nabigatzaile* deritzaio) bidaltzen dituenak HTTP komandoak dira.
2. Gure bezeroak bere makinaren sistema eragileari emango dio eraikitako komandoa, sarean zehar bidal dezan. Sistema eragileak komandoari gehituko dio bere helburura ailegatzeko bidaian beharko duen informazioa. Datu asko dira, baina garrantzitsuenak bi hauek dira: zerbitzariaren makina Internet osoan identifikatzen duen IP helbidea, eta helburuko makinan abiatuta dauden aplikazioen artean gure zerbitzaria identifikatzen duen portua. Aplikazioak sortutako komandoak eta sistema eragileak bidaiarako gehitutako informazioak sare sare ibiliko den **datagrama** osatzen dute. Datagramak Interneten dabilen informazioaren unitatea dira. Errepide-sarearekin analogia egiten badugu, makinaren arteko konexioak errepideak dira, eta datagramak, berriz, ibilgailuak. Beraz, Interneten dabilen informazioa datagramatan banatuta dago. Edo, beste era batean esanda, Internet bidez zerbait bidali nahi badugu, lehenik zatitu eta datagramatan sartu behar dugu zerbait hori. Gure ahotsa, Interneten, datagramatan dago sartuta, baita ikusitako filmak edo deskargatutako web-orriak ere. IP protokoloak definitzen du datagramen formatua.

3. Sistema eragileak dagokion sare-txartelari emango dio datagrama bakoitza, makinatik atera dezan, eta txartel horri esango dio zein den datagramaren bideko hurrengo makina, sare berean. Sare-txartelak datagramari gehituko dio hurrengo makinaraino ailegatzeko behar duen informazioa, eta, horrela, sare fisikoan zehar bidaltzeko behar den datu-egitura bat sortuko du, **trama** izenekoa. Adibidez, datagrama Ethernet sare batean zehar bidaltzeko, Ethernet formatuko trama bat sortu, eta bitez bit isuriko du sarean.
4. Sare berean dagoen hurrengo makinak trama jasoko du; hortik, barruan daraman datagrama erauziko du; bere helburuko IP helbidea aztertuko du; horren arabera ebatziko du zein den bideko hurrengo makina, eta prozesua errepikatuko du: trama berri bat sortu, eta hurrengo makinari bidaliko dio biak lotzen dituen sare fisikoaren bidez.

Horrela, sareaz sare, azkenean, datagrama bere helburura helduko da, hots, zerbitzaria egikaritzen duen makinaraino. Deskribatu dugun bide hori 1.2. irudian agertzen da. Behin zerbitzariaren makinara iritsita, horko sistema eragileak erauziko du datagramaren barruan dagoen komandoa, eta portuak identifikatzen duen aplikazioari —adibidez, web-zerbitzariari— emango dio. Zerbitzariak, eskatutakoa bezeroari bidaltzeko, fitxategia zatitu, datagramatan sartu, eta, banan-banan, sistema eragileari emango dizkio datagrama horiek, kontrako bidean bidal ditzan.

Bideko urrats bakoitzean dauden makinak bideratzaileak dira. Bideratzailearen lanak berebiziko garrantzia du informazioa bere helburura hel dadin. Oso arraroa da bideratzaile batek datagrama bat nahastea eta behar ez den bidetik birbidaltzea. Aldiz, ez da hain arraroa bideratzaile batera datagrama gehiegi heltzea aldi berean eta guztiei kasu egiteko ezinean ibiltzea bideratzailea. Orokorrean, prozesa ditzakeen baino datagrama gehiago heltzen badira bideratzaile batera, kongestioa edo **buxadura** sortuko da; hau da, bideratzaileak gainezka egingo du. Egoera horretan, datagrama batzuk baztertu egin beharko dira. Hortaz, datagrama horiek ez dira helburura ailegatuko, eta informazioa sarean galduko da. Hori onartezina baldin bada aplikazioarentzat, TCP protokoloa erabili beharko du aplikazio horrek Interneten zehar ezer bidaltzean. TCPk kontrolatuko du ea ateratako datagrama guztiak beste aldera heltzen diren, eta, heltzen ez badira, kopiak bidaliko ditu, denak ailegatzea lortu arte. Aplikazio batzuek, aldiz, ez dute behar TCPk galerak kontrolatzeko ematen duen zerbitzu hori, eta protokolo arinago bat erabiltzen dute informazioa sarean zehar bidaltzeko, UDP izenekoa.



1.2 irudia. Informazio-ibilbidea Interneten. Iturrian sortutako datagrama saltoka dabil, sareaz sare, sare bakoitzari dagokion tramaren barruan. Helburuan, datagramak garraiatzen duen komandoa emango zaio aplikazioko beste aldeari (irudian, zerbitzariari).

TCP/IP mailak

Interneten TCP/IP sare batean erabiltzen diren protokolo guztiak mailaka antolatuta daude. Lehen ikusi dugun bezala, goian dagoen protokolo batek sortutako informazio-unitatea azpian dagoen beste protokolo batek jaso eta kapsulatzen du bere informazio-unitate propioan. Adibidez, datagramak tramatan sartzen dira sarera bidali ahal izateko.

Zehazki, TCP/IP munduan, honako lau maila hauetan sailkatzen dira protokoloak (ikusi 1.3. irudia):

- Aplikazio-maila

Aplikazio-mailan biltzen dira sare-aplikazioak, hau da, gure ordenagailu eta terminalan instalatzen eta egikaritzen ditugun programak: web-arakatzailerak eta web-zerbitzariak, IP telefoniarako softwarea, mezuak trukatzeko aplikazioak... Normalean, erabiltzaileok aplikazio horien bezeroak erabiltzen ditugu, eta sarean dauden beste ordenagailuetan egikaritzen dira aplikazio horien zerbitzariak. Aplikazio bereko zati horien artean, hitz egiteko aplikazio-mailako protokoloak erabiltzen dira. Aplikazioa sortzen duenak definitu beharko du bere aplikazioaren osagaien arteko harremanetarako bete beharreko protokoloa: webean, HTTP definitu zuten, eta, gaur egun, beste aplikazio askotan ere erabiltzen da; streaming-aplikazioetan, kasurako. Posta elektronikorako, SMTP, POP3 eta IMAP definitu dira. IP telefonian, SIP erabiltzen da gehien, eta, uneko mezularitzarako, oso erabiliak dira XMPP edo bere eratorriak.

- Garraio-maila

Garraio-mailako protokoloek aplikazioei ematen diete zerbitzua, hau da, aplikazioek erabiltzen dituzte. Haien lana da aplikazioko zati batek sortutako mezuak (komandoak eta beren erantzunak; adibidez, bideo bati dagokion bit-segida) beste makina batean dagoen aplikazio bereko beste zati bati helaraztea. Aplikazio batek nahi badu bere mezuak arin eramatea, garraio-mailako UDP protokoloa erabiltzea aukeratuko du, eta horrela azalduko dio bere sistema eragileari bidali behar den informazioa ematean. Aldiz, arin baino gehiago informazioa ondo ailegatuko dela bermatzea baldin bada aplikazio horren kezka nagusia, garraio-mailan TCP protokoloa erabiltzea aukeratuko du.

- IP maila

Garraio-mailako protokolo guztiek erabiltzen dute IP zerbitzua informazioa beste makinaino helarazteko Interneten zehar. Maila honetan, alde batetik, IP protokoloa dugu, eta, beste alde batetik, haren laguntzaileak diren beste protokolo guztiak: ICMP, ARP, IGMP... Garraioan ez bezala, IP mailan zerbitzu bakarra dago, IP protokoloak eta haren laguntzaileak ematen dutena. Hau da, garraio-mailako protokoloek aukera bakarra dute: denek erabiltzen dute IPk ematen duen zerbitzua; ez dago alternatibarik. IP protokoloak definitzen du nolakoa den Interneten zehar ibiliko diren datagramen formatua. IP mailari sarearte-maila ere baderitzo.

- Sare-maila

Datagramak fisikoki bidaltzeko, trama batean kapsulatu behar dira, eta trama osatzen duten bitak fisikoki transmititu. Sare-teknologia bakoitzak definitzen du nolakoa den trama hori eta bitak nola bidaltzen diren fisikoki. Hortaz, ez da gauza bera gure ordenagailu eramangarritik wifisarguneraino joateko gure datagramak erabiliko duen trama, eta sargunetik gure ISParen sarreraino hartuko duena. Sare-teknologia bakoitzak definitzen du sare hori erabiltzeko bete behar den protokoloa: 802.11, Ethernet, PPP...

Mailakako antolaketa horrek abantaila handia du: ez dago menpekotasunik maila desberdineko protokoloen artean. Izan ere, TCP/IP teknologia eta haren gainean garatu diren aplikazio asko xx. mendeko 80ko hamarkadakoak dira, baina, hala ere, egungo sare-teknologiak erabiltzen dituzte, ezer aldatu beharrik izan gabe. Are gehiago, aplikazio berriak garatu dira TCP/IP zahar

horren gainean, eta ederki dabilta. Eta aplikazio gehiago ere etorriko dira, denak TCP/IP protokolo-metaren gainean eraikiak.

Aplikazioa	HTTP, SIP, SMTP, POP3, IMAP, XMPP ...
Garraioa	TCP, UDP ...
IP (Sareartea)	IP, ICMP, ARP, IGMP ...
Sarea	Ethernet, 802.11, PPP ...

1.3 irudia. TCP/IP mailak eta protokoloak.

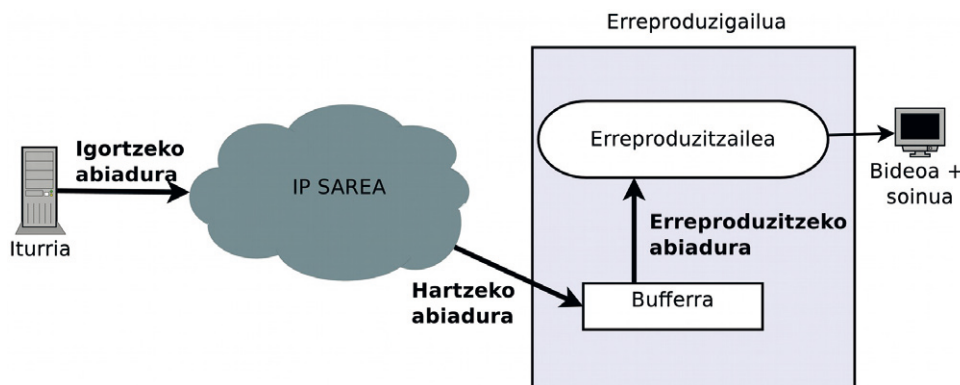
1.3. Internet bidezko transmisioaren ezaugarriak

Internetek informazioa makina batetik bestera eramateko balio digu. Gustatuko litzaiguke nahi dugun informazio guztia berehala eramatea, inongo atzerapenik gabe, eta bit bat bera ere galdu gabe. Baina errealitatea oso bestelakoa da: sareak mugatzen du zenbat bit eraman dezakegun segundoero mutur batetik bestera; horretarako hartzen duen denbora-tartea oso aldakorra izan daiteke, eta, gainera, batzuetan, datagramak bidean galtzen ditu.

Abiaduraz

Demagun film bat ikusten ari garela Internet bidez. Gero aztertuko ditugu hobeto horrelako sare-aplikazio baten ezaugarriak; oraingoz, nahikoa da jakitea egiten duguna dela, funtsean, film horren irudiak eta soinuak garraiatzen dituzten datagramak saretik jasotzea eta gure konputagailuan erreproduzitzea. Horretarako, erreproduzitzailerak bit kopuru minimo bat jaso behar du segundoero. Hori da **erreproduzitzeko abiadura**. Abiadura hori seinalearen eta bere kodeketaren araberakoa da. Orokorrean, soinuak askoz abiadura txikiagoa behar du bideoak baino; baina, aldi berean, elkarrizketa telefoniko baterako kodetutako soinua erreproduzitzeko, CD (*Compact Disc*) kalitatearekin grabatutako kontzertu bat entzuteko baino askoz bit gutxiago beharko ditugu segundoero.

Erreproduzitzailerak behar duen abiaduran elikatu ahal izateko, bi eragileren menpe gaude: datagramak sortzen dituen iturria eta datagrama horiek erreproduzitzailera eraman behar dituen sarea; Internet, alegia. P2P aplikazioetan, konputagailu talde bat izaten da iturria, baina, azalpenak argitzearren, igorlea zerbitzari bakar bat dela hartuko dugu (egun, kasu gehienetan horrela egiten da). Igorleak sareari datagramak eman behar dizkio erreproduzitzeko abiaduran, gutxienez. Horretarako, igorleak duen sare-txartelak ahalmen fisikoa behar du erreproduzitzeko abiaduran transmititzeko. Normalean, erreproduzitzeko abiadura eta **igortzeko abiadura** berdinak izango dira. Beste aldean, datagramak jaso behar dituen makinako sare-txartelak ere gai izan behar du saretik bitak jasotzeko erreproduzitzeko abiaduran, gutxienez.



1.4 irudia. Abiadurak, sare bidezko erreprodukzio batean.

Erreproduzizailea elikatzeko bigarren eragilea sarea da. Kontuan hartu behar dugu igorlearen eta hartzailearen artean Internet osoa dagoela. Aurreko atalean ikusi dugunez, Internet sare askok osatutako sarearte bat da, eta, berez, sare-konexio fisiko asko zeharkatu behar dituzte datagramak beren bidean. Horrelako konexioen artean transmisio-abiadura txikiena duenak baldintzatuko du sareak emango duen abiadura. Hori izango da botila-lepoa, eta horrek ezarriko du zein izango den **sare-abiadura** filma erreproduzitzeko aplikazioan. Abiadura hori izendatzeko, askotan erabiltzen da ingelesezko *throughput* hitza. Beste alde batetik, sare-konexio bakar batek duen transmisiorako ahalmenari (hau da, lor dezakeen transmisio-abiadurari) **banda-zabalera** ere esaten zaio.

Sarearen portaera ura banatzeko sarearena bezalakoa da. Demagun Interneten ibiltzen diren bitak ur tantak direla eta konputagailuen arteko konexioak, berriz, ur-hodiak. Etxe batean jasotzen dugun ur-emaria ez da izango gure etxea sarearekin lotzen duen hodiaren zabalerrari dago-kiona, ezta ur-iturriak sarean isurtzen duen emaria ere, baizik eta iturriaren eta gure etxearen arteko bidean dagoen hodirik estuenari dagokion emaria. Hori bai, ur-sarean bezala, Interneten ere, kasu gehienetan, iturriaren eta gure etxearen artean dagoen konexiorik mantsoena gure etxearen eta ISParen artekoa izaten da, hau da, sarbide-sarearena. Eta zer gertatzen da sarean trafiko handia badabil, gure igorlearen eta hartzailearen artekoaz gain? Hori da, berez, errealitatea. Orduan, sarearen ahalmena trafiko guztiaren artean banatzen da. Horrek aplikazio batek saretik lortuko duen abiadura aldakorra izatea eragiten du: deskarga baten botila-lepoa hartzailearen sare-konexioa izan daiteke une batean, eta, segituan, deskarga horren bidean dagoen beste linea botila-lepo bilakatu daiteke. Orokorrean, Internetek ez du bermatzen zenbat b/s lortuko dituen aplikazio batek. Horri **best effort** zerbitzua esaten zaio.

Bideoak abiadura handia behar du alde guztietan: igorlean, sarean eta hartzailean. Igorleak abiadura handian jaso, prozesatu eta bidali behar ditu irudiak. Sareak abiadura handia behar du igorleek txertatutako trafiko guztia garraiatzeko. Eta hartzaileak ere abiadura handia behar du bere Internet-sarbidean, eta jasotako bideoa behar den abiaduran erreproduzitzeko gai ere izan behar du. Azken bi hamarkadetan, teknologiak abiadura-premia horiek guztiak ase ditu, Internet bidezko bideoa eta telebista horrela ahalbidetuz. Telefoniaren kasua, aldiz, desberdina izan da: ahotsa garraiatzeko behar den abiadura bazegoen, bideoaren kasuan baino askoz lehenago, baina Internet moduko sare batek eragin dezakeen atzerapen ezegonkorrak oztopatu egin du Internet bidezko telefoniaren hedapena.

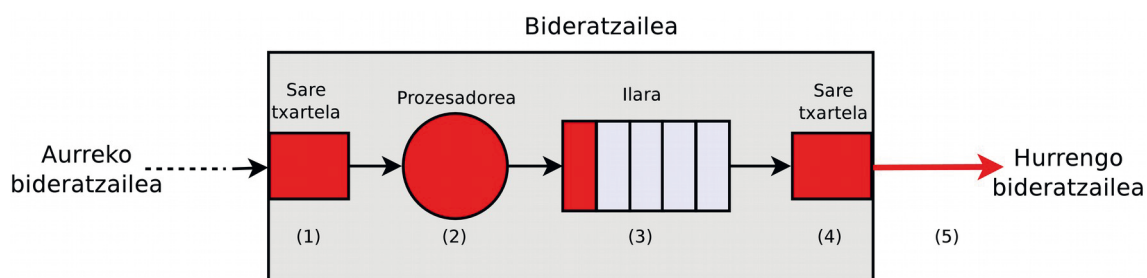
Atzerapenaz

Behin audioa eta bideoa garraiatzeko behar den banda-zabalera edukita, arazoa **atzerapena** da. Dakigunez, datagramak zenbait makina bisitatuko ditu Interneteko bidaian zehar: konputagailu batetik aterako da, bideratzailez bideratzaile ibiliko da saltoka, eta, azkenean, helburuko makinara helduko da. Bidaia horretako urrats bakoitzean, honako atzerapen hauek izango ditu datagramak:

- Prozesatzeko denbora: datagrama birbidali behar duen bideratzaile bakoitzak (baita datagrama sortu duen makinak ere) datagrama horren goiburukoa aztertu behar du, zer lineatetik birbidali behar duen ebazteko.
- Ilaran emandako denbora: behin ebazita nondik birbidali datagrama, linea horretatik transmititu behar diren datagramen ilaran sartuko da datagrama. Ilara hori, azken finean, memoria zati bat da, buffer bat, eta sare-txartelak handik hartzen du transmititu behar duena. Nolabait, datagrama itxarongela batean sartzen da, transmititua izateko txanda ailegatzen zaion arte, gu medikuarenean egoten garen bezala. Gogoratu bideratzaile batek hainbat linea eta, berez, sare-txartel izan ditzakeela. Haietako bakoitzak ilara propioa izango du. Baliteke ilara batean gurea baino lehenago sartu diren datagrama asko egotea eta, beraz, denbora asko igaro behar izatea transmititua izan arte, eta, bitartean, aldameneko ilara hutsik egotea. Ilaran emandako denbora hori une horretako sare-trafikoaren nondik norakoaren araberrakoa da. Ondorioz, ez dago bermatuta zenbatekoa izango den datagrama batek ilaran emango duen denbora Interneten zeharreko ibilaldian.

- Transmittzeko denbora: behin txanda helduta, datagrama transmitituko da. Horretarako beharko den denborak bi zati ditu: alde batetik, linea lortzeko denbora, eta, bestetik, datagrama fisikoki transmititzeko denbora. Linea lortzeko denbora transmisio-bidea sare bereko beste nodoekin partekatu bada agertzen da soilik; bestela, denbora hori zeroa da. Adibidez, wifi-sare batean, gure datagrama transmititzeko, bermatu behar dugu sare bereko beste inor ez dela transmititzen ari aldi berean; bestela, bi datagramek talka egingo lukete, eta biak galduko lirateke. Hori ekiditeko, transmisio-bidea partekatzeko protokoloak erabiltzen dira, edo, ingelesezko akronimoa erabilita, **MAC protokoloak** (*Medium Access Control*). Protokolo horiek egikaritzeak ere denbora hartzen du. Aldiz, Ethernet konmutatu batean —*switchen* bidezkoetan, alegia—, sareko nodo bakoitzak ez du inorekin partekatzen bere kablea, ez du MAC protokolorik egikaritu behar, eta transmititzeko denbora transmisio fisikoak hartzen duen denbora besterik ez da. Transmisio fisikorako denbora bidali behar den bit kopuruaren eta sare-txartelaren abiaduraren arabera da, zehazki I/A , non I bidali beharreko informazio kantitatea den, bitetan, eta A txartelaren transmisio-abiadura fisikoa, b/s-tan.
- Hedatzeko denbora: bit bat transmititzeko denbora bit hori linean *jartzeko* denbora da, hau da, bit hori seinale elektriko, argizko seinale edo uhin elektromagnetiko bilakatzeko denbora; hurrenez hurren, kobrezko hari baten bidez, zuntz optiko baten bidez edo antena baten bidez beste makina batera helarazteko. Baina, behin kablean, zuntzean edo espazioan jarrita, seinale horrek denbora bat beharko du beste makina batera heltzeko. Hori da *hedatzeko* denbora, erabilitako transmisio-bidearen arabera. Zuntz optikoan, argia 300.000 km/s-ko abiadura hedatzen da, uhin elektromagnetikoen abiadura bertsuan (azken finean, argia uhin elektromagnetikoa ere bada), eta seinale elektrikoak, kobrezko hari batean, zertxobait mantsoago ibiltzen dira. Nolanahi ere, oso abiadura handiak direnez, seinalea hedatzeko denbora oso laburra izaten da.
- Hartzeko denbora: bitak hurrengo makinari heltzean, saretik jaso behar dira. Horretarako behar den denbora igorleak datagrama fisikoki transmititzeko emandako denbora bera da.

Bideko nodo guztietan eta haien arteko lineetan emandako denborak **sare-atzerapena** osatzen dute. Ibilaldiko nodo bakoitzean emandako denbora aldakorra izaten da. Kasu gehienetan, hedatzeko denbora arbuigarria da. Soilik satellite bidezko komunikazioetan izaten da esanguratsua hedatzeko denbora, seinaleak milaka kilometro egin behar dituelako. Transmisio-denbora ere arbuigarria izan ohi da, gaur egun erabiltzen diren transmisio-abiadura fisikoak nahiko altuak baitira, bereziki sare lokaletan. Prozesatzeko denbora ere txikia izaten da. Azkenik, ilaran emandako denbora gelditzen zaigu. Oso aldakorra izaten da, eta, askotan, handiena izango da, nabarmen.



1.5 irudia. Sare-atzerapenaren osagaiak. (1) Hartzeko denbora, (2) Prozesatzeko denbora, (3) ilaran emandako denbora, (4) Transmittzeko denbora, (5) Hedatzeko denbora.

Sare-atzerapen handia arazoa izaten da soilik komunikazioaren bi muturren arteko elkarrekin maila altua bada; telefono bidezko elkarrizketak, kasurako. Inoiz satellite bidezko elkarrizketaren batean parte hartu duenak badaki zenbateraino kaltetzen duen komunikazioa segundo erdiko atzerapenak. Aldiz, bideo bat ikusterakoan, atzerapen osoak hasteko unea besterik ez du

atzeratzen; segundo erdi atzeratuta ikusten hasteak ez du garrantzirik bi orduko film batean. Baina saretik jasotako datagramen arteko tartea aldatzeak, hau da, atzerapenaren aldakortasunak, eragina izan dezake erreproduzitutako soinuaren eta bideoaren kalitatean.

Galeraz

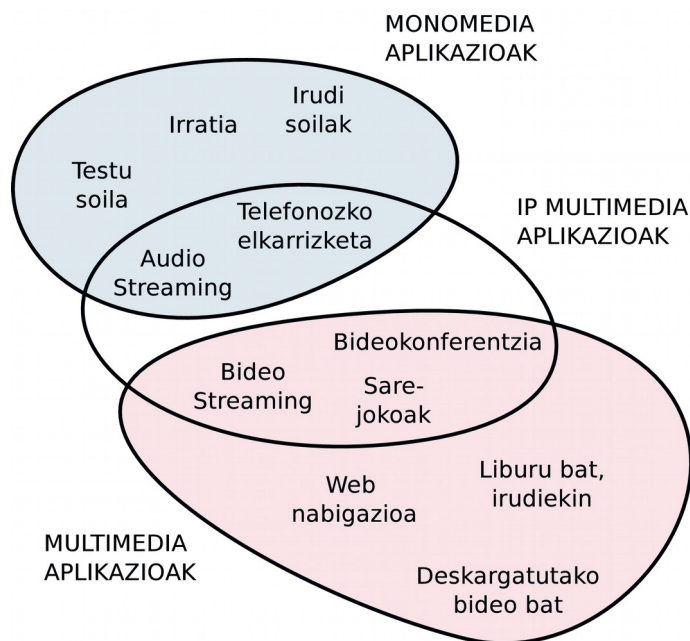
Nola gal daitezke datagramak Interneten? Zenbait eratan gerta daiteke datagrama bat ez hel-tzea helburura, baina nagusia transmititzeko ilarekin dago lotuta, lehen azaldu dugun bezala. Ikusi dugunez, datagramak, transmititua izateko, bere txanda iritsi arte zain egon behar du ilaran. Ilara hori, azken finean, buffer bat da, eta, berez, datagramak ostatatzeko ahalmen mugatua du. Demagun linea batetik A datagrama segundoero transmiti dezakegula; hau da, linea horren igortzeko abiadura A datagrama/s dela. Eta demagun linea horri dagokion ilaran —bufferrean, alegia— batez beste B datagrama sartzen ari direla segundoero. $A > B$ betetzen bada, ilarara heltzen diren datagrama berriek ilara hutsa aurkituko dute, eta itxaron gabe transmitituko dira. Kontrakoa suertatzen bada (hau da, $A < B$), orduan, atera baino azkarrago sartuko dira datagramak ilarara. Ondorioz, gero eta datagrama gehiago egongo dira ilaran, transmititzeko zain. B abiadura jaisten ez bada, azkenean, ilara beteko da; hau da, bufferra beteko da. Zer gertatzen da, orduan, beste datagrama bat heltzen bada linea horretatik transmititua izateko? Bi aukera daude: edo tokirik gabe dagoen datagrama hori baztertua izango da, edo jadanik ilaran zegoen beste datagrama batek bere tokia utzi beharko dio heldu berriari, eta, noski, hain egokia izan den datagrama hori baztertua izango da. Kasu gehien-gehienetan, lehenengo aukera hartzen dute bideratzaileek, baina, nolahi ere, datagramaren bat galduko da. Deskribatutako egoera gorago aipatu dugun kongestioa edo buxadura da, egun Interneten datagramak galtzeko lehenengo arrazoia.

2. Multimedia-aplikazioak Interneten

Adiera zorrotzean, *multimedia* hitzak esan nahi du informazioa adierazteko era desberdinak erabiltzea aldi berean. Beraz, telefono bidezko elkarrizketa bat ez litzateke sartuko definizio horretan, soinua besterik ez baita erabiltzen informazioa azaltzeko. Aldiz, liburu hau bera multimedia kategorian sartuko genuke, testua eta irudiak erabiltzen dituelako aldi berean. Baina, testu honetan, Internet erabiltzen duten multimedia-aplikazioei erreparatu nahi diegu, ez liburu fisikoei, eta, bai, aldiz, telefoniari. Beraz, beste definizio bat behar dugu. Honako hau hartuko dugu:

Multimedia Interneten: soinua, bideoa eta animazioak Internet bidez eta unean erreproduzitzeko garraiatzen dituzten aplikazioak.

Beraz, multimediaz ari garenean, sare-aplikazio batzuei buruz ari gara; zehazki, soinua edo bideoa Interneteko txoko batetik bestera eramaten dituztenei buruz. Definizio horretan, telefono bidezko elkarrizketa ere sartzen da, nahiz eta soinua besterik ez bidali, testu edo irudiekin konbinatu gabe. Baina, adi, definizioan, denbora errearen osagaia ere sartu dugu, garraiatutako seinalea unean bertan erreproduzitu behar baita; jaso bezain laster, alegia. Hortaz, filmak edo abestiak deskargatzeko erabilitako aplikazio bat ez da sartuko gure multimediararen definizioan, soinua eta irudiak batera garraiatzen baditu ere. Soilik gizaki bat ari bada aplikazioa erabiltzen, eta aplikazioak garraiatutako soinu edota irudien zain badago gizaki hori, multimediatzat hartuko dugu aplikazio hori testu honetan. Hau da, gurea multimedia interaktiboa da. Honako talde hauetan sailkatuko ditugu multimedia-Interneteko aplikazio interaktiboak: (1) bideo/audio-streaminga, (2) IP bidezko elkarrizketak (VoIP), eta (3) sare-joko interaktiboak (*on line gaming*). Haietako bakoitzak baditu bere beharrak, eta kontuan hartzekoak dira guztiak ere. Jarraian zehaztuko dugu nolakoa den aplikazio bakoitza, eta, hurrengo bi kapituluetan, streamingean eta IP telefoniaren inguruko teknika berezietan sakonduko dugu.



1.6 irudia. Multimedia, monomedia eta IP multimedia.

2.1. Bideo/audio-streaminga

Orokorrean, bideo edo audioak Internet bidez ikusteko edo entzuteko aplikazioak sartuko ditugu atal honetan. Streaming-aplikazioetan, erreproduzizaileak ez du itxaroten bideo edo audio osoa jaso arte erreproduzitzen hasteko; seinalea jasotzen hasi eta gutxira abiatuko du erreprodukzioa. Portaera horretan datza streaming-sistemen eta ohiko deskarga-sistemen arteko aldea. Filmak edo abestiak jaisteko aplikazioak ez dira sartzen liburu honetan aztertuko ditugun multimedia-aplikazioetan, ez baitira erreproduzitzen deskargatu ahala. Hau da, ez dira denbora errealekoak; ez dira unean bertan erreproduzitzen, baizik eta deskarga amaitu ondoren erabiltzaileak erabakitzen duen unean. Deskargatu eta gero, orduak, egunak edo hilabeteak igaro daitezke deskargatutakoa erreproduzitu arte, eta, orduan, erreprodukzioa *off line* egingo da, hau da, sareak ez du parte hartuko. Streaming-aplikazioetan, aldiz, ez da itxaron behar deskarga amaitu arte erreproduzitzen hasteko, eta sarearen parte-hartzea funtsezkoa da arazorik gabe erreproduzitzeko.

Streaming-sistemen arazo nagusiak bi dira. Lehenengoa, bideo-streamingen kasuan, zerbitzariaren eta erreproduzizailearen artean behar den banda-zabalera nahikoa izatea da. Arazo horri aurre egiteko, bi bide uztartzen dira: alde batetik, sare-azpiegitura eta -teknologia hobeetan inbertitzea, eta, bestetik, bideoa transmititzeko behar den abiadura jaistea, trinkoketaren bidez. Sare-azpiegituren eta -teknologiaren gaia azken kapituluaren jorratuko dugu. Kapitulu honetan, trinkoketa landuko dugu, bideo-kodeketa aztertzerakoan.

Streaming-sistemen bigarren arazoa da behin erreprodukzioa hasita etenik ez sortzea. Horretarako, zerbitzariak igorritako bit-korronteak (*stream* bat da) garaiz heldu behar du erreproduzitzailera, bit bakoitza dagokion unean erreproduzi dadin. Berandu iristea ez heltzea bezala da; ez du ezertarako balio. Horretarako, sareak zera lortu behar du: *stream*aren abiadura erreproduzitzeko behar den abiaduraren adinakoa izatea, gutxienez. Arazoa Interneten izaeran datza: IP protokoloak ez du bermatzen aplikazio batek sarean lortuko duen abiadura zein izango den, eta, abiadura horretan, gorabeherak suertatzen dira, sarean une bakoitzean dagoen trafikoaren arabera. Hortaz, aldi baterako abiaduraren beherakada batek eragin dezake bideo-seinalea garraiatzen duten datagramak atzeratzea, seinalea garaiz ez heltzea erreproduzitzailera eta, azkenean, irudia edo soinua

geldiaraztea. Hori eragozteko, *aurrekarga* (*buffering, prefetching*) deritzon teknika erabiltzen da Interneten; bigarren kapituluan aurkeztuko dugu.

Streaming erak

Telebista eta irrati konbentzionaletan bezala, streaming-sistemen bidez hedatutako saioak aurretik grabatutakoak (*stored streaming*) edo unean gertatutakoak (*live streaming*) izan daitezke. Audio hutsa (normalean, musika) banatzeko streaming-sistemak bideoa banatzeko sistema berak dira, baina askoz ere transmisio-abiadura txikiagoa erabiltzen dute.

Aurretik grabatutako bideo- edo irrati-saioak banatzeko streaming-sistemak, betiko telebistaz gain, VoD sistemak (*Video on Demand*) ere ordezkatzeko ari dira. Ez da harritzekoa, VoD banaketa oinarrituta baitago telebista banatzeko sare berberetan (batez ere kable- eta satelite-sareetan oinarrituta), eta, azken finean, sare horiek ari da Internet ordezkatzeko. Erabiltzailearen ikuspuntutik, streaminga grabatuta jasotzea telebista-, musika- edo bideo-erreproduzigailu bat erabiltzea bezalakoa da, baina, telebista- edo DVD-gailuaren ordez (edo beste formatu batzuetarako gailuen ordez), Interneti lotutako gailu bat (PC, smart TV, telefonoa, tableta...) erabiltzen dute. Betiko telebistarekin edo irratiarekin alderatuta, ikusleak aukeratzen du zer eta noiz ikusi nahi duen, saioen programazioaren eta ordutegi baten menpe egon gabe. Gainera, ikusleak kontrolatzen du noiz egin eten bat, halakorik egin nahi badu, edota aurrerago eta atzerago joan erreproduzioan, bideo-erreproduzigailu konbentzionaletan egiten duen era berean. Adi: benetan «era berean» izateko, ikusleak horrelako botoi bat sakatzen duenetik eskatutakoa gauzatzen den arte, ezin da segundoren bat baino gehiago igaro. Hau da, badago denbora errealean egindako elkarrekintza bat streaming-zerbitzariaren eta erabiltzailearen artean.

Irrati eta telebista konbentzionaletan ez bezala, unean gertatutakoa Internet bidezko streaming eran jasotzeko badu zailtasun teknologiko propioa. Streaminga zuzeneko izanik, streaming grabatuekin alderatuz, sarerako baldintzak gogortzen ditu. Streaming grabatuan, erabiltzaileak onartzen du zertxobait itxarotea «play» botoia sakatzen duenetik saioa ikusten hasten den arte. Hamar segundo itxarotea, adibidez, ez da gehiegizkoa ikusle askorentzat. Baina, zuzeneko ekitaldi bat transmititzen ari bada, ikusleak atzerapenarekiko duen tolerantzia asko jaisten da. Olinpiadetako 100 metroko lasterketako finala ikustean, ikusle askok ez dute gertatutakoa pantailan jaso nahi 10-15 segundo geroago. Eta nekez onartuko dute hamar segundo itxarotea ikusten ari diren kanala aldatzen duten bakoitzean, hau da, *zapping* egiten dutenean. Internet bidezko telebista, beraz, sentikorragoa da atzerapenarekiko, eta horrek badu eragina lehen aipatu dugun aurrekarga (*buffering*) erabiltzean.

Seinalea hartzaile askori aldi berean helarazi behar zaionean (*broadcasted streaming* edo *web-casting*), oso onuragarria da IP multicast helbideak erabiltzea. Zoritzarrez, soilik uneko saioetan suertatzen da aldi berean hartzaile asko izatea, eta ez VoD erako streamingean, egun trafikoa gehiena sortzen duena izanik.

Sortutako trafikoa kantitateari erreparatzen badiogu, bideo-streaminga da, egun, Interneteko *killer application*. Zenbait neurketaren arabera, XXI. mendearen bigarren hamarkadaren hasieran, YouTube-tik eta antzeko webguneetatik sarean sartutako trafikoa aise gaitu zuen fitxategiak konpartitzeko P2P aplikazioena.

2.2. IP bidezko telefonia

Bideoarekin eta telebistarekin gertatzen den bezala, telefonia-zerbitzuetan ere betiko sare telefonikoa ari da ordezkatzeko Internet. **IP telefoniari**, askotan, **VoIP** ere esaten zaio (*Voice over IP*). Kontzeptu berean sartuko ditugu bideokonferentzia-zerbitzuak, zeinetan, ahotsaz gain, solaskideen irudia ere bidaltzen den.

Internet bidezko telefonian, garrantzi handikoa da sareko atzerapena. Halako aplikazioetan, solaskideen arteko elkarrekintza eta sinkronizazioa oso handiak direnez, sentikortasun handia dute atzerapenarekiko, bideo-streamingean baino askoz gehiago. Bi laguneko edo gehiagoko elkarriketa batean, ezin dira ehunka milisegundo baino gehiago igaro kide batek hitz egiten duenetik edo mugitzen denetik beste solaskideek hark egindakoa jasotzen duten arte. Ahotsari dagokionez, atzerapena 150 milisegundo baino txikiagoa denean, gizakiak ez du hautematen; 150 eta 400 milisegundo tartekoak onargarriak dira, eta, 400 milisegundo baino altuagoa denean atzerapena, eragina onartezina da elkarriketan.

Beste alde batetik, telefonian, onargarria da bidalitako bit batzuk ez heltzea beren helburura; hau da, galerak onargarriak dira, betiere atalase bat gainditzen ez bada. Galdutako bit horiek klik batzuk besterik ez dute eragingo aditzen den soinuan, atzemandako kalitatea askorik kaltetu gabe. Irudiei dagokienez ere, puntu batzuk lausotu egingo dira, baina kontuan hartu behar da bideokonferentzia batean espero dugun kalitatea ez dela film bati exijituko dioguna.

Ezaugarri horiek, atzerapenarekiko sentikortasun handia eta galerekiko tolerantzia, Interneten ohikoak izan diren datu-aplikazioen kontrakoak dira. Izan ere, beste aplikazio horietan pentsatuz diseinatu ziren batez ere Internet eta TCP/IP protokoloak, eta ez telefonia eta halako aplikazioetarako. Web-nabigazioak, posta elektronikoa, fitxategien trukaketak eta halakoek **trafiko malgua** eragiten dute Interneten. Hau da, datagramen arteko atzerapenaren aldakortasuna onartzen du trafiko horrek, aplikazioaren funtzionamendua arriskuan jarri gabe. Aldiz, datu-aplikazio horietan, onartezina da bit bat bera ere sarean galtzea. Ondorioz, Internet hobeto egokitzen da galerekiko sentikortasun handia eta atzerapenarekiko tolerantzia duten aplikazioetara, eta, aldiz, telefoniak arazo bereziak topatuko ditu Interneten ondo ibiltzeko. Hala eta guztiz ere, sare-ingeniariek irtenbideak asmatu dituzte IP zerbitzuaren gainean telefonia-zerbitzuak emateko, hasieran desegokia zirudien arren. Hirugarren kapituluan aztertuko ditugu.

2.3. Sare bidezko bideo-jokoak

Sare-jokoak bideo-jokoak dira, baina haien euskarria ez da bideo-kontsola isolatu bat, baizik eta Interneti edo sare lokal bati konektatuta dagoen konputagailu, bideo-kontsola edo mugikor bat. Sarearen erabilerari dagokionez, bi motatako sare-jokoak bereizten dira: zerbitzari bidezkoak (*cloud gaming* edo *gaming on demand*) eta zerbitzari gabekoak.

Zerbitzari bidezko jokoetan, jokalaria zerbitzarian dauden jokoak atzeman eta egikaritzen ditu, eta, gainera, beste jokalarik batzuekin batera aritu daiteke partida berean. Zerbitzariak streaming eran igortzen dizkie jokalariei beren pantailetan eta bozgorailuetan erreproduzitu behar duten seinalea, bideo-streamingetan bezala. Eta jokalariek zerbitzariari igortzen dizkiete beren jokalariak; normalean, pantailan agertzen den irudi baten mugimendu sinpleak besterik ez. Hala, jokalaria ez du bideo-kontsolarik erosi behar, ezta jokorik ere. Nahikoa du PC bat eta Internetarako konexioa (zerbitzariak, ziur asko, kuota bat eskatuko dio jokatzeagatik). Teknikoki, sareari dagokionez, zerbitzari bidezko sare-jokoak streaming-sistemak bezalakoak dira, eta, beraz, ez diegu arreta berezirik jarriko liburu honetan.

Zerbitzari gabeko sare-jokoetan, jokalaria bere betiko bideo-kontsola erabiltzen du, baina Interneti konektatuz badu aukera beste jokalariekin batera ibiltzeko. Horrelakoetan, sarearen lana da parte-hartzaileen arteko sinkronizazioari eustea: jokalarik bakoitzak egiten duenaren berri eraman behar die Internetek beste jokalariei. Sareari dagokionez, halako jokoek badute antza bideokonferentziekin. Partaideen artean elkarrekintza handia dago, eta, berez, atzerapenarekiko sentikortasun handia dute. Izan ere, jokalarik batek besteek baino atzerapen handiagoarekin jasotzen baditu joko-eremuan gertatzen direnak, desabantaila sortzen da. Baina, bideokonferentzietan ez bezala, bidalitako soinuak eta irudiak ez dira denbora errealean kamera eta mikrofono

batetik jasotako seinaleak, baizik eta programa batek sortutako animazioak. Horrek asko errazten du dena, animazioek eskatzen duten banda-zabalera askoz txikiagoa baita benetako irudiak eta soinuak baino. Animazio baten aldaketak (aurretik definitutako mugimenduak eta soinuak) azaltzeko, ez da irudirik edo soinurik bidali behar; nahikoa da jokalariaren makinak mugimendu edo soinu horiek gauzatzeko agindua jasotzea. Ondorioz, halako jokoek sareari eskatzen dioten zerbitzu-maila askoz arinagoa da, edo, beste era batean esanda, jokoaren eskakizunak aise betetzen ditu sareak. Betiko TCP/IP teknologia erabiliz, eta banda-zabalera handirik behar izan gabe, Internetek jokalariai asetzen ditu. Berez, zerbitzaririk gabeko sare-jokoei ere ez diegu arreta gehiagorik jarriko.

3. Soinu digitala

Soinua uhin bat da, airean hedatzen diren presio-aldaketek eragina. Gure tinpanoak aldaketa horiek atzeman, uhin mekaniko bilakatu, eta burmuinari helarazten dizkio. Tinpanoak, beraz, naturan sortutako uhinak atzeman, eta gure burmuina kitzikatzen duten seinale bilakatzen ditu. Antzekoa egiten dute mikrofonoek ere: soinu-uhinak atzeman, eta haien baliokideak diren seinale elektriko bilakatzen dituzte. *Baliokidea* hitzaren ordez *analogo* hitza erabiltzen badugu, agian hobeto ulertuko dugu zer den **seinale analogiko** bat: naturan sortutakoaren berdintsua dena, eta, naturan bezala, balio posible infinituak dituena. Adibidez, DO izeneko nota musikala 261,63 Hz-eko soinu-uhina dela adostu dute musikariek¹. Mikrofono batek 261,63 Hz-eko korrante elektriko (edo maiztasun analogo, bihurketa-funtzio bat erabiliz) bihurtuko du soinu-uhin hori. Era berean, edozein maiztasunetako soinuak maiztasun analogoko korrante elektriko bat eragingo du mikrofonoan. Horregatik, hain zuzen ere, esaten da mikrofonoek sortutako seinale elektriko *analogikoa* dela, hau da, jatorrizko soinu-uhinaren antzekoa.

Irrati-sistema zaharretan, mikrofonoek sortutako seinale elektriko analogikoak uhin elektromagnetiko bilakatzen dira, urrutira hedatu ahal izateko. Bigarren bihurketa hori antena igorleak egiten du. Hartzaileren irratiek kontrako prozesua betetzen dute; hau da, beren antenatik jasotako uhin elektromagnetikoa seinale elektriko bilakatzen dute, eta, gero, seinale elektriko hori soinu bihurtzen dute bozgorailuan. Prozesu horretan agertzen diren seinale guztiek izaera analogikoari eusten diote, hau da, jatorrizko soinuaren ezaugarri berak dituzte.

Interneten, aldiz, seinale analogikoak ezin dira bere horretan garraiatu, datagramek bateko eta zero seinaleak besterik ezin baitute eraman. Lehenago, seinale horiek digitalizatu egin behar dira, hau da, zero eta bateko segida bilakatu. Hala ere, digitalizazioa ez zen asmatu irudiak eta soinua Internet bidez transmititzeko, baizik eta seinale analogikoei tratamendu digitala emateko, Internet eta TCP/IP protokoloak asmatu baino lehenago.

3.1. Seinale analogikoen digitalizazioa

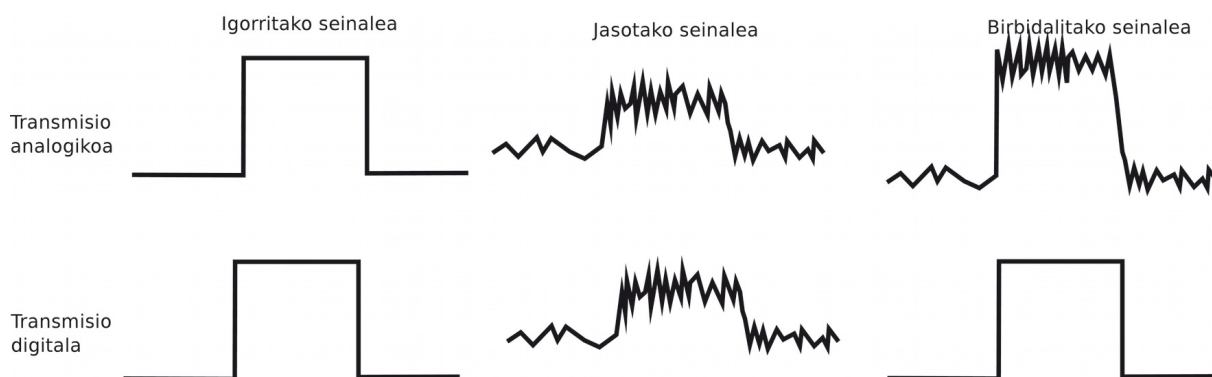
Seinale analogikoarekin alderatuta, seinale digitalak bi abantaila ditu nagusiki:

- Kamerak edo mikrofonoak lortutako seinalearen kalitateari eusten zaio transmisioan zehar, seinalea bere jatorrizko formarekin birsor daitekeelako. Adibidez, demagun bateko bat ordezkatzeko volt bateko seinale elektriko erabiltzen dugula, eta, zero bat ordezkatzeko, -1 voltetako seinalea. Bateko bat bidaltzen badugu kable batetik, seinalea fisikoki higitzen denez bidaian, ka-

¹ Berez, maiztasun hori *DO zentralari* dagokio. Hainbat zortzidun gora edo behera dauden notak ere DO dira.

blearen beste muturrean dagoen gailu elektronikoak atzemango duen seinale elektrikoa ez da volt batekoa izango, baizik eta zertxobait ahulagoa. Demagun jasotako seinalea 0,85 voltetako dela. Hartzaileak bat edo zero zenbakiekin lotu behar du kablean atzemandako tentsio hori. Hau da, asmatu behar du ea jatorrizko tentsioa -1 edo 1 zen. 0,85etik balio gertuena denez, 1 zela aukeratuko du, eta, gehien-gehienetan, asmatu egingo du, eta batekoa jaso duela biltegitratuko du. Berriz bidali behar badu, volt bateko seinalea igorriko du, eta ez jaso duen 0,85 voltetako. Hau da, seinalea birsortu egiten da (ikus 1.7 irudia). Seinale analogikoekin, hori ez da posible, ezinezkoa baita jakitea zein zen jatorrizko seinalea, aukerak infinituak direlako, eta ez, seinale digitalean bezala, gutxi batzuk. Berez, ezinezkoa da jasotako seinalean bidaiak eragindako higidura berreskuratzea, eta, seinale analogikoa birtransmititzen den bakoitzean, kalitatea galtzen du.

- Zenbakiekin gauza ikaragarriak egin daitezke. Seinale fisikoekin lan egitea, aldiz, askoz zailagoa eta mugatuagoa da. Seinale digitalak zenbakiak direnez, prozesamendu digitala aplika dakieke, bere abantaila guztiekin. Adibidez, seinale digitalizatua konprima daiteke, eta, horrela, seinalea transmititzeko behar den banda-zabalera asko murriztu. Edo transmisioan eragindako erroreak berreskuratzeko kodeak eta teknikak ere erabil daitezke. Edo, hain zuzen ere, Internet eta harko pakete-kommutazioko sareen bidez transmiti daitezke zeroko eta bateko segida bilakaturako seinale horiek.



1.7 irudia. Transmisio analogikoa eta digitala. Transmisio digitalean seinalea birsortzen da birtransmisio bakoitzean, metatutako zarata, distorsioa eta atenuazioa garbituta. Analogikoan, aldiz, seinalea berrindartu daiteke, baina, horrela, jasotako deformazioak ere indartu egiten dira.

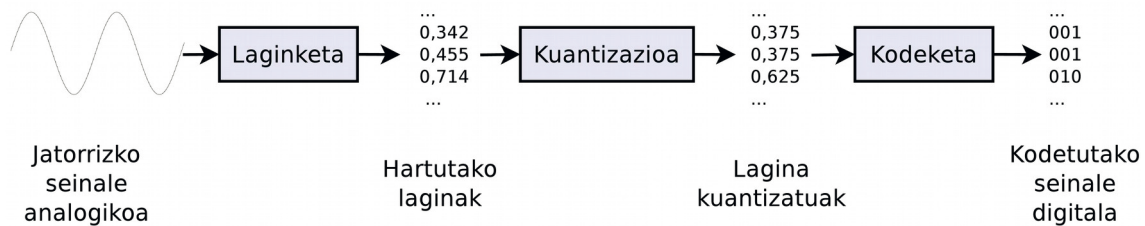
Seinale analogikoak digitalizatzeko, 1.8 irudian dituzun hiru urratsak bete behar dira: laginketa, kuantizazioa, eta kodeketa.

Laginketa

Digitalizazioaren lehenengo urratsa da jasotako seinale analogikoaren laginak hartzea. Lagin horiek abiadura finko batean hartzen dira, **laginketa-abiadura** deiturikoan. Laginketa-maiztasuna ere deitzen zaio, eta, maiztasun guztietan bezala, haren neurria hertza (Hz) da: segundoero mila lagin hartzen baditugu, laginketa-abiadura 1.000 Hz da. Gero, kuantizazioaren bidez, lagin horiek zenbaki bilakatu, eta datagrametan transmitituko ditugu. Hartzailearen bozgorailuak laginak erreproduzitzen, emaitza jatorrizko soinua izango da.

Lagin bakoitza zenbaki bilakatu, eta zenbaki hori transmititu behar badugu, zenbat eta lagin gehiago hartu segundoero, orduan eta transmisio-abiadura handiagoa beharko dugu digitalizaturako seinale hori transmititzeko. Banda-zabalera baliabide kritikoa denez, ahalegina egin behar da haren erabilera optimizatzeko; hau da, laginketa-abiadura minimizatu behar dugu. Galdera honako hau da: zein da laginketa-abiadura minimoa seinalea ondo erreproduzitzeko beraren laginetatik abiatuta?

Erantzuna **laginketa-teoreman** dago. Teorema horrek, era informalean, honela dio: M Hz maiztasun altuena duen seinale bat bere laginetatik abiatuta berreraiki nahi badugu, $2M$ lagin hartu behar da segundoero. Lagin gutxiago hartzen badugu, berreskuratutako seinalea desitxuraturata egongo da. $2M$ baino lagin gehiago hartzea alferrikako lana da, ez baitugu emaitza hobetuko: nahikoa da laginketa-abiadura $2M$ baino pixka bat handiagoa izatea, berreraikitako seinalea jatorrizkoaren kopia zehatza izateko. M balioari Nyquist muga edo Nyquist maiztasuna deritzo, laginketa-teoremaren sortzaile nagusietako baten oroimenez.



1.8 irudia. A/D bihurketaren urratsak.

Gure kasuan, soinua digitalizatu nahi badugu, zehaztu behar dugu zein maiztasuneko soinuak jaso eta erreproduzitu nahi ditugun, hau da, zehaztu behar dugu zein den teoremako M -ren balioa. Telefoniaren kasuan, soilik gizakiaren ahotsa digitalizatu nahi dugu, hau da, gure ahots-kordek sor dezaketen soinua. Gure sistema fonikoak 60 eta 7.000 Hz arteko soinuak sortzen ditu, gutxi gorabehera, baina, solaskideak esandakoa ulertzeko eta ahotsa norena den ezagutzeko, nahikoa da 3.400 Hz artekoak besterik ez jasotzea. Beraz, laginketa-teorema aplikatuz, nahikoa da 6.800 lagin hartzea segundoero digitalizatutako ahotsa era ulergarrian berreraikitzeko. Telefonia-sistemetan, zertxobait harago joaten dira, eta 8 kHz-etan hartzen dira ahotsaren laginak. Musika digitalizatu nahi badugu, laginketarako muga gure belarriak ezartzen du. Helduen kasuan, nekez entzungo dugu 16 kHz-etik gorako soinurik; umeek, aldiz, beren tinpanoak oraindik soinu gogorrik jaso ez duen heinean, 22 kHz-erainoko soinuak atzeman ditzakete. Beraz, zertarako hartu laginak 44,1 kHz baino azkarrago? Hori da kalitate altuko soinua digitalizatuzko erabiltzen den laginketa-abiadura.

Kuantizazioa eta kodeketa

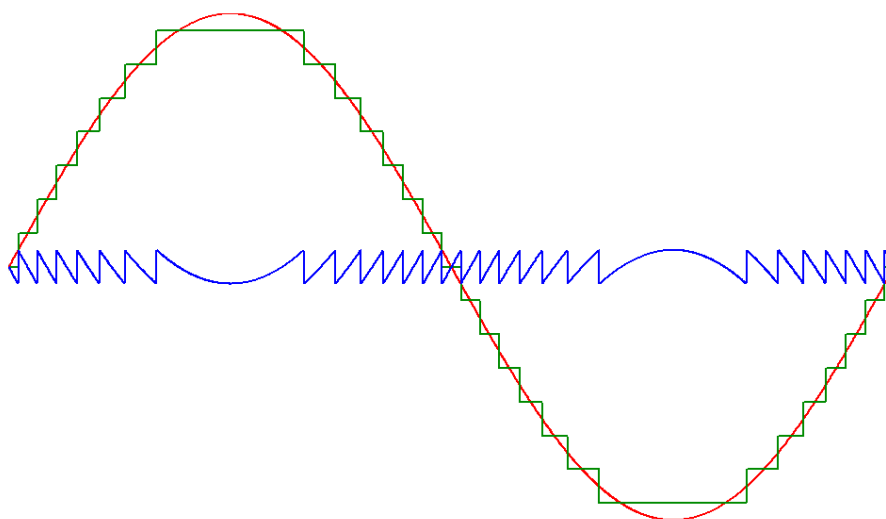
Neurtutako lagin bakoitzaren balioa era digitalean grabatzeko edota transmititzeko, bit kopuru finkoa duen kode bat erabili beharko dugu. Adibidez, erabil ditzakegu 3 bit lagin bakoitza era digitalean azaltzeko. Kasu horretan, 8 balio izango ditugu hartutako laginak izan ditzakeen balio infinituak kodetzeko. Adibidearekin jarraituz, demagun jatorrizko seinale analogikoa 0 eta 2 volt artekoa dela. Tarte horretan dagoen balio erreal posibleen kopurua infinitua da, baina, gure 3 biteko kodearekin, soilik 8 balio azaldu ditzakegu. Nolabait, seinaleko benetako balio posible infinitu horiek 8 balio digitalean mapatu behar ditugu. Horixe egin dugu 1.1 taulan, lagineko benetako balioari gertuen duen kuantizatutako balioa esleituta, eta kuantizazio-balio horri 3 biteko kode digitala lotuta. Fisikariek kuantizazio esaten diote balio kopuru mugagabe bat beste balio kopuru mugatu batez ordezkatzeari. Matematikariek, aldiz, **diskretizazio** esaten diote, seinale jarraitu bat seinale diskretu batez ordezkatzeko. Kanean, biribiltzea esaten diogu prozesu horri. Seinaleen digitalizazioan, fisikarien hiztegia nagusitu da, eta, beraz, seinalearen kuantizazioaz mintzatuko gara.

Garrantzitsua da honetaz ohartzea: digitalizazio-prozesuaren emaitzak irudikatzen duen seinalea ez da jatorrizko seinalea, baizik eta kuantizatutako seinalea. Eta, ondorioz, balio digitaleatik berreskuratutako seinalea ere ez da jatorrizkoa izango, baizik eta haren kuantizazioa. Hori dela eta, behin seinalea digitalizatuta, ezin da berriz jatorrizkoa berreskuratatu. Hortaz, kontuz ibili behar da kuantizazioak eragindako desitxuraztea ez nabaritzeko. 1.9 irudian duzu jatorrizko seinale bat, eta digitalizazioan sortu den seinale kuantizatua, benetan erreproduzitu ahal izango dugun bakarra behin digitalizatu eta gero.

1.1 taula. 3 bitekin egindako kuantizazioa eta 3 biteko kodeketa, jatorrizko seinalea 0 eta 2 volt artekoa izanik.

Jatorrizko seinalearen balio-tartea (volt)	Esleitutako kuantizazio-balioa (volt)	Kodeketa digitala
[0 → 0,25)	0,125	000
[0,25 → 0,5)	0,375	001
[0,5 → 0,75)	0,625	010
[0,75 → 1)	0,875	011
[1 → 1,25)	1,125	100
[1,25 → 1,5)	1,375	101
[1,5 → 1,75)	1,625	110
[1,75 → 2]	1,875	111

Kuantizazioak eragindako kalteari **kuantizazio-errore** edo **kuantizazio-distortsio** deritzo. 1.1 taulako adibidean, hartutako lagina 0,112 voltetako bada, 0,125 voltetako balitz bezala digitalizatu da, eta, beraz, kuantizazio-errorea 0,013 voltetako izango da. Atzemandako laginari balio diskretua emateko zenbat eta bit gehiago erabili, orduan eta txikiagoa izango da kuantizazio-errorea. Hau da, kuantizazioan errorea gutxitzearen prezioa bitetan ordaintzen da: zorrotasun handiagoa nahi izanez gero, bit gehiago beharko ditugu seinalea digitalizatzeko; beraz, memoria gehiago beteko du grabatzen badugu, eta abiadura handiagoa beharko da seinale hori transmititzen badugu. Digitalizazio-prozesuetan, lagineko erabilitako bit kopuruari *bit-sakonera* deitzen zaio orokorrean, eta, soinuaren kasuan, *audioaren bit-sakonera* edo *ahotsaren bit-sakonera* terminoak ere erabiltzen dira (batzuetan, *audio-sakonera* eta *ahots-sakonera* ere bai). Aplikazio bakoitzean bermatu behar da bit-kontsumoaren eta kalitatearen arteko oreka; hau da, bilatu behar da zein den erabil dezakegun bit-sakonera minimoa, erreproduzitu nahi dugun seinalearen kalitateari eusteko. Zerbitzu telefonikoan, nahikoa da 8 bit erabiltzea telefonian exijitzen den kalitatea lortzeko. Musika grabatuak telefoniak baino kalitate handiagoa behar duenez, 16 bit erabiltzen dira lagindutako seinalea kuantizatzeke.

**1.9 irudia.** Jatorrizko seinalea (sinusoide jarraitua), bere kuantizazioa (sinusoidea eskailera moduan), eta eragindako errorea.

Kuantizazioa egiteko erarik zuzenena eta errazena **kuantizazio uniforme**a da. Hala, jatorrizko seinalearen balio posibleen tartea tamaina bereko tartetean banatzen da, eta tarte bakoitzari erdian gelditzen den kuantizazio-balioa esleitzen zaio, 1.1 taulako adibidean egin den eran. Horrela eginez, kuantizazio-errorea era uniformean banatzen da lagin posible guztien artean (hortik dator *uniforme* izena). Horrela egitea ondo dago jatorrizko seinalearen balioak agertzeko probabilitatea berdina denean, edo, behintzat, probabilitate hori ezezaguna badugu. Hori gertatzen da, hain zuzen, kontzertu bat grabatzen dugunean, instrumentu asko agertzen direlako eta sortutako soinuak asko eta oso ezberdinak izan daitezkeelako. Telefono bidezko elkarrizketa batean, aldiz, gizakien ahotsa digitalizatu behar dugu, ez beste soinurik, eta, gure ahotsaren kasuan, sor daitezkeen soinu guztiak ez dira agertzen probabilitate bereekin. Hori profitatuz, kuantizazio-errorea minimiza daiteke gehien agertzen diren soinuetan, gutxitan agertzen diren soinuen lepotik. Hori lortzeko, **kuantizazio ez-uniforme**a erabiltzen da: kuantizazio-balio bakoitzari dagokion jatorrizko seinalearen tartearen tamaina tarte horrek agertzeko duen probabilitatearen arabera da. Gutxitan agertzen diren balioen tarteak handiak dira, eta maiz agertzen direnenak, aldiz, txikiak. Digitalizatutako seinalean, batez besteko kuantizazio-errorea gutxituko dugu erabilitako bit kopurua handitu gabe. Telefonian erabilitako 256 kuantizazio-balioak² esleitzeko erabiltzen diren kuantizazio-funtzioak logaritmikoak dira: A-legea eta μ -legea. Bata Europan eta munduko toki gehienetan erabiltzen da, eta bestea, Ipar Amerikan eta Japonian. Orokorrean, 8 biteko kuantizazio logaritmikoa erabiliz lortzen den ahotsaren kalitatea 12 biteko kuantizazio uniformearekin lortzen denaren parekoa da. Nolabait, kalitate bera lortzeko, % 33 bit gutxiago behar dira, edo, sarearen ikuspuntutik, % 33 banda-zabalera gutxiago behar da era logaritmikoan kuantizatutako ahotsa transmititzeko, era uniformean kuantizatutakoa transmititzeko baino. 1.2 taulan, kuantizazio uniforme eta ez-uniforme alderatzen dira 4 voltetako seinale batentzat, 3 bit erabiliz. Ezkerreko kasuan, kuantizazio uniforme erabili denean, tarte guztiek dute seinalean agertzeko probabilitate bera. Eskuinean, aldiz, $[0 \rightarrow 0,6)$ tarte txikiak 0,5eko probabilitatea metatzen du, eta $[0,6 \rightarrow 4]$ artean dauden beste lagin guztien artean banatu behar dute agertzeko gelditzen den beste 0,5eko probabilitatea. Horregatik, 0 eta 0,6 volt artean 4 kuantizazio-balio erabiltzen dira taulan, eta 0,6 eta 4 volt artean, beste lau.

1.2 taula. Ezkerrean, kuantizazio uniforme; eskuinean, ez-uniforme.

Jatorrizko seinalearen balio-tartea (volt)	Agertzeko probabilitatea	Esleitutako kuantizazio-balioa	Kodeketa digitala	Jatorrizko seinalearen balio-tartea (volt)	Agertzeko probabilitatea	Esleitutako kuantizazio-balioa	Kodeketa digitala
$[0 \rightarrow 0,5)$	0,125	0,25	000	$[0 \rightarrow 0,1)$	0,125	0,05	000
$[0,5 \rightarrow 1)$	0,125	0,75	001	$[0,1 \rightarrow 0,2)$	0,125	0,15	001
$[1 \rightarrow 1,5)$	0,125	1,25	010	$[0,2 \rightarrow 0,4)$	0,125	0,3	010
$[1,5 \rightarrow 2)$	0,125	1,75	011	$[0,4 \rightarrow 0,6)$	0,125	0,5	011
$[2 \rightarrow 2,5)$	0,125	2,25	100	$[0,6 \rightarrow 1)$	0,125	0,8	100
$[2,5 \rightarrow 3)$	0,125	2,75	101	$[1 \rightarrow 1,7)$	0,125	1,35	101
$[3 \rightarrow 3,5)$	0,125	3,25	110	$[1,7 \rightarrow 2,6)$	0,125	2,15	110
$[3,5 \rightarrow 4]$	0,125	3,75	111	$[2,6 \rightarrow 4]$	0,125	2,3	111

² Gogoratu telefonian 8 bit erabiltzen direla kodeketarako: $2^8=256$ kuantizazio-balioak.

Kuantizazioa eta kodeketa bi prozesu bereizezin dira, biak batera egin behar baitira. Horregatik, testu askotan, kodeketa kuantizazioaren barnean hartzen da, eta digitalizazioa bi urratsetara mugatzen da: laginketa eta kuantizazioa.

Transmisio digitala eta linea-kodeak

Behin digitalizatuta, hasierako seinale analogikoa bit-segida bilakatu dugu. Hurrengo urratsa izango da bit-segida hori nonbaitera bidaltzea, hor grabatu eta gordetzeko, edo erreproduzitu izateko. Transmittitu beharreko zeroko eta bateko horien forma fisikoa zein izango den definitzen dute linea-kodeak. Sinpleena kodeketa unipolarra da, non tentsio elektriko positiboak bateko bita adierazten baitu eta zero volteko tentsioak zeroko bita.

Kodeketa unipolarra nahikoa da konputagailu baten barneko txartelen arteko komunikaziorako, baina beste distantzia handiagoetako seinale elektrikoaren transmisioetan arazo fisikoak agertzen dira. Adibidez, bateko bit asko jarraian transmitituz gero, linean kondentsadore efektu bat eragiten da, eta, gero, zeroko bat transmititu behar denean, lineak daraman tentsio elektrikoa aldatzeak denbora gehiago hartuko du. Hau da, zailagoa suertatzen da zeroko bat linean jartzea bateko askoren ondoren baldin bada, eta kontrakoa. Horrek eragin zuzena du transmisio-abiaduran: bit gutxiago jar dezakegu linean segundoero. Beste alde batetik, trantsizioak beharrezkoak dira bit-sinkronizaziorako ere, hau da, hartzaileak bereizi ahal izateko non hasten den eta bukatzen den bit bakoitza. Kontu fisiko horiengatik, transmisiorako kode unipolarra baino egokiagoak diren beste linea-kode pilo bat asmatu eta erabiltzen dira, transmisio-erroreak gutxitu, abiadura handitu, eta hardwarea sinpleagoa egiten dutenak. Adibide batzuk dira NRZ (*Non Return to Zero*), AMI (*Alternate Mark Inversion*), edo Manchester kodeak. Adi ibili ez nahasteko kodeketa hau, seinale digitalizatuen transmisio fisikorako egiten dena, eta lehen azaldu dugun kodeketa, seinale analogiko bat digitalizatzeko prozesuaren amaieran egiten dena, kuantizazioarekin batera.

3.2. Trinkoketa, kodetzeko formatuak, kodetzaileak eta kontainerrak

Trinkoketa

Telefono bidezko elkarrizketa batean, ahotsaren 8.000 lagin hartzen baditugu segundoero eta kuantizatutako lagin bakoitza 8 bit erabiliz kodetzen badugu, 64.000 b/s-ko abiadura beharko dugu elkarrizketa hori transmititzeko. Era berean, 44,1 kHz-etan hartzen baditugu kontzertu baten laginak, eta 16 biteko audio-sakonera erabiltzen badugu, 705,6 kb/s beharko dugu era monoauralean bidaltzen badugu, eta bikoitza, 1,411 Mb/s alegia, estereoan bidaliz gero. Egungo Interneten abiadura horiek lortzea ez da zaila, baina aldi bereko milaka telefono-elkarrizketari eutsi behar zaienean sarean, askoz hobe da soinu bit-segida horiek trinkotzen baditugu. Zer esanik ez bideoaz ari garenean, non sortutako bit-jarioak askoz mardulagoak baitira.

Trinkotze-prozesuak bi motatakoak izan daitezke: galeradunak eta galerarik gabekoak. Galerarik gabeko trinkotzeak informazio kantitate bera gordetzen du bit gutxiago erabiliz. Horretarako, jatorrizko datuen erredundantziak kentzen ditu. Audioaren kasuan, erredundantziarik handiena denborazko erredundantzia izaten da, hau da, soinu bera denboran errepikatzea. Kasu horretan, denbora-tarte batean errepikatutako lagin guztiak kodetu ordez, lagin bakarra eta lagin hori zenbat aldiz errepikatzen den kodetzen da. Erredundantzia estatistikoa ere ken daiteke trinkotzean. Kasu horretan, gehien agertzen diren balioak kodetzeko, bit gutxiago erabiltzen ditugu. Hori egiten du, hain zuzen, Huffman kodeketak, ager daitezkeen balioen probabilitateak ezagunak direnean. Galerarik gabeko trinkotze-prozesua itzulgarria da, hots, jatorrizkoa berreskura daiteke trinkotutako kodetik. Informazioaren % 100i eu-

tsi behar zaionean, ezinbestekoa da galerarik gabeko trinkotzea erabiltzea. Datuetan, adibidez, disko batek duena konprimatu behar dugunean, galerarik gabeko trinkotze-sistema bat erabiliko dugu.

Trinkotze galeraduna, aldiz, ez da itzulgarria, prozesuan informazioa galtzen baita. Horrela izanik, galdutako informazio hori ezin da esanguratsua izan, edo, beste era batean esanda, trinkotutako seinalearen kalitatea ez da izango jatorrizkoarena baino txikiagoa, edo, behintzat, nabarmen txikiagoa. Hori da trinkotze galeraduna gauzatzeko algoritmoen erroka: informazio arbuigarria identifikatzea. Horretarako, ondo ezagutu behar da nolakoa den gizakiak duen seinalearen pertzepzioa, guretzat esanguratsua zer den eta zer ez baloratzeko. Lortutako trinkotze-maila askoz altuagoa izaten da sistema galeradunetan galerarik gabekoetan baino, kalitaterik galdu gabe edo ia galdu gabe. Audioaren eta bideoaren trinkoketan bi sistemak erabiltzen dira normalean: lehenik, erredundantziak baztertzen dira, eta, gero, trinkotze galeraduna ere erabiltzen da, esanguratsua ez den informazioa kentzeko.

Trinkotze-sistema bat aukeratzean, simetria da kontuan hartu behar den beste ezaugarri bat. Algoritmo simetrikoetan, denbora bera behar da trinkotzeko eta destrinkotzeko. Asimetrikoetan, aldiz, trinkoketa askoz mantsoagoa izaten da, baina haren saria emaitzetan datza: trinkotze-maila altuagoa lortzen da. Simetrikoak, arinagoak, denbora errealeko aplikazioetan erabiltzen dira, hau da, telefonian eta zuzenean transmititutako ekitaldietan (*live streaming*). Trinkotutako audioa biltegitzeko eta, gero, erreproduzitzeko, algoritmo asimetrikoak erabiltzen dira.

Kodetzeko formatuak

Trinkotze-sistema bakoitzak lotuta du bere kodetzeko formatua eta formatu hori nola lortu deskribatzen duen espezifikazio teknikoa. Espezifikazio tekniko horiek estandarrak dira formatua edozeinek erabili ahal izatea nahi denean, edo agiri pribatuak izango dira norberak erabiltzeko soilik garatutako sistemak badira. Estandarren artean ere bi kategoria bereizi ditzakegu: alde batetik, erakunde publiko batek sortutakoa, *de iure* estandarrak edo estandar ofizialak direnak, eta, bestetik, talde pribatuek sortutakoak, *de facto* estandar bilakatzen direnak beren erabilera zabalitzen denean. Adibidez, soinua kodetzeko formatuak dira AAC, Vorbis eta SILK, baina AAC estandar ofizial bat da, ISO eta IEC erakundeek sortua (*International Standards Organization/International Electrotechnical Commission*), Vorbis *de facto* estandarra da, Xiph.Org fundazioak egina, eta SILK pribatua da, Skype konpainiak garatua bere Internet bidezko telefonia-zerbitzuan erabiltzeko (egun, bere erabilera baimendu du jabeak, eta Interneteko estandarra den Opus kodetze formatuan integratuta dago).

Kodetzeko formatu batek definitzen du nola egin behar den trinkoketa, baina ez ditu definitzen horretarako erabiliko diren algoritmo guztiak. Horrela, formatu horren inplementazio desberdinek badute zertan lehiatu eta hobetu. Adibidez, audioa trinkotzean garrantzi handia du horretarako erabiliko den eredu psikoakustikoak (segituan hitz egingo dugu psikoakustikari buruz), baina formatuek ez dute definitzen zein eredu erabili behar den, soilik diote nola kendu eredu psikoakustikoaren arabera arbuigarria den informazioa. Era berean, bideoa trinkotzean funtsezkoa da ondo aurreikustea irudien mugimendua, baina bideoa trinkotzeko formatuetan ez da definitzen nola egin aurreikuspen hori.

Kodetzaileak

Soinua edo bideoa formatu batean trinkotzeko gai den sistema baten inplementazioek kodetzaile izena hartu zuten bere garaian, trinkotze-lanari erreferentziarik egin gabe. Horren ondorioz, multimediaren munduan nahastuta agertzen dira maiz kodetzea eta trinkotzea kontzeptuak, eta oso zabalduta dago trinkotze-prozesuari *kodetzea* deitzea. Informatikan, aldiz, fitxategi baten ta-

maina txikitu nahi denean, *trinkotu* edo *konprimatu* egiten dugu, konpresore bat erabilia. Multimedien, kodetzaile baino maizago ikusiko dugu ingelesezko terminoa, *codec*, *coder* eta *decoder* hitzetatik osatua. Edozein kasutan, berriz, adi ibili nomenklaturarekin, multimediaiko arloan kodetzaile batek ez baitu digitalizazioaren amaierako kodeketa egiten, ezta bitak transmititu ahal izateko linea-kodeketa ere; kodetzaile batek, batez ere, digitalizazio-prozesutik jasotako bit-segida konprimatzen du.

Kodeketaren eta trinkotzearen arteko nahasmena ez da bakarria gaia jorratzen denean. *Kodetzaile* terminoaren erabilera ere ez dago bateratua; maiz irakurriko eta entzungo dugu kodetzailea izendatzea kodetzeko formatu bat, baina, zorrotza izanik, kodetzailea da formatu hori lortzen duen trinkotze-sistemaren implementazioa, bedi softwarearen edo hardwarearen bidez, eta ez bere espezifikazio teknikoa. Adibidez, AVC *kodetzaileaz* entzungo dugu, baina, berez, AVC bideoa trinkotzeko formatu bat da, H.264/MPEG-4 espezifikazioan definitua. Aldiz, AVC formaturako kodetzaileetako bat OpenH.264 softwarea da.

Kontainerrak

Digitalizatutako seinalea erreproduzitu ahal izateko, erreproduzitzailerak jakin behar du zein den seinalea kodetzeko erabilitako formatua. Horrela jakingo du nola destrinkotu behar duen jasotzen duen bit-jarioa, eta, gero, nola interpretatu eta erreproduzitu behar duen destrinkotutako seinale hori. Alegia, jakingo du zein den digitalizazioan erabilitako laginketa-abiadura eta bit-sakonera, baita ere nola egin den kuantizazioa eta kodeketa, edo, soinuaren kasuan, zenbat audio-kanal sortu diren. Soinu edo irudi hutsen kasuan, nahikoa izan daiteke informazio horrekin, baina multimedia-zerbitzuetan bideoa, soinua eta testua nahasten dira, eta seinale desberdin horiek era sinkronizatuan erreproduzitu behar dira, irudiak dagozkien soinuekin eta azpitituluekin batera bistartzeko. Sinkronizaziorako informazio hori ere behar du erreproduzitzailerak. Digitalizazioari, trinkoketari eta sinkronizazioari buruzko informazio hori guztia kodetutako seinaleei gehituko zaie formaturen bat jarraituz. Formatu horiei *kontainerrak* edo *edukiontziak* deritze (*container* edo *wrapper format*), eta hamaika daude, ezauzgarri desberdinekin:

- Kontainer asko garatzen dira kodetze-formatu bati lotuta, formatu horren media garraiatzeko; baina, kasu gehienetan, ez dira gero mugatzen media-formatu horretara, eta hainbat kodetze formatu garraiatzeko balio dute (hortik datorkie *kontainer* izena, kodetze-formatu desberdinak garraiatzeko ontzi bakarrak direlako). Adibidez, MP4 kontainerrak (berez, *ISO/IEC base media file format* edo *ISOBMFF* izeneko kontainera), bere definizioan MPEG-4 bideo-kodeketarekin lotuta badago ere, egungo kodetze-formatu gehienetarako balio du. Kontrako adibidea JIF kontainera da, JPEG kodetze-formatuan dauden irudietarako bakarrik balio du eta.
- Kontainer batzuk monomedia dira; adibidez, aipatutako JIF, soilik JPEG irudi estatikoen zat, edo XMF kontainera, soilik musikarako. Baina egun multimedia-kontainerrak erabiltzen dira gehien, era desberdinetako seinaleak batera hartzen dituztenak, baita digitalizazio-eta trinkoketa-algoritmo asko eusteko gai direnak ere. Horietan ditugu bideoarekin (WebM, Ogg, MP4, AVI, DivX, VOB, Matroska, Flash...) eta telefonia-multimediarekin lotutakoak (3GP, 3G2...).
- Bideorako erabiltzen diren multimedia-kontainer guztiek ez dute balio streaming-zerbitzuetarako; zehazki, egun oraindik erabiltzen diren zaharren batzuek ez dute balio (AVI edo VOB kontainerrak, kasu).
- Trinkotu gabeko seinaleak ere erabiltzen dira, gehienetan digitalizatutako jatorrizko soinua edo bideoa gordetzeko eta, gero, zerbitzu bakoitzaren arabera prozesatzeko eta trinkotzeko. Kontainer batzuk jatorrizko seinale horiek bakarrik gordetzeko erabiltzen dira; adibidez, AIFF, trin-

kotu gabeko ahotserako erabiltzen dena. WAV kontainerra ere, nahiz eta seinale trinkotueta-rako balio, normalean trinkotu gabeko ahotserako erabiltzen da.

Kontuan izan erreproduzizaile batek kontainer batean dagoena erreproduzitu ahal izateko, kontainerak duen formatua ezagutzeaz gain, seinalea digitalizatzeko eta trinkotzeko erabilitako sistemak ere ezagutu beharko dituela.

3.3. Soinuaren kodeketa

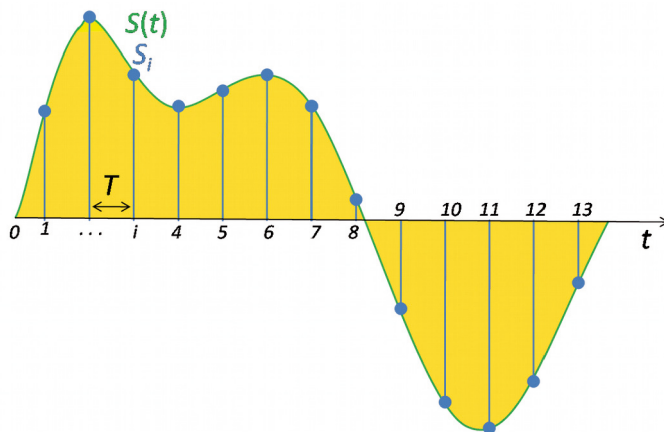
Soinu-kodetzaileen ezaugarri nagusiak hiru hauek dira: azkartasuna, transmisio-abiadura, eta ahotsaren kalitatea. Azkartasuna neurtzeko, kodetzaileak eragindako atzerapena erabiltzen da (*delay*). Parametro hori funtsezkoa da denbora errealeko aplikazioetan, kodeketak eragindako atzerapenak eragotz baitezake aplikazioaren funtzionamendua eta erabilgarritasuna. Transmisio-abiadurak adierazten du kodetzaileak denbora errealean sortutako bit-jarioa. Trinkotu gabeko kodeketan laginketa-abiadurak eta bit-sakonerak definitzen dute zein izango den abiadura hori (adibidez, PCM kodeketan), baina beste kodeketa guztietan trinkoketa da transmisio-abiaduran eragin handiena duen parametroa. Soinuaren kalitateari dagokionez, berriz, laginketa-abiadurak eta bit-sakonerak definitzen dute kalitate-maila hori. Kasu honetan, hala ere, trinkoketak ere eragin dezake amaierako kalitatean, kalterako, oso abiadura txikia lortu nahi denean.

Digitalizatutako soinu-laginak kodetzeko sistema asko garatu dira. Hemen bi taldetan sailkatuko ditugu, kodetu behar den soinuaren arabera: ahotsa kodetzeko sistemak, batez ere telefonian erabiltzen direnak, eta audioa kodetzekoak, musika edo gizakiak entzun ditzakeen beste edozein soinu, orokorrean, kodetzeko erabiliak. **Audio** terminoa erabiltzen dugunean, gizakiaren belarriak atzeman dezakeen soinuaz ari gara; hau da, 20 Hz eta 22 kHz arteko soinuak, gutxi gorabehera. Ahotsaren kasuan, 60 Hz eta 7 kHz artean daude soinuak, baina, telefonia-sistema klasikoetan, laginketak 3.400 edo 3.500 Hz arteko soinuetara mugatzen du digitalizatutakoa, nahikoa baita hitz egindakoa ulertzeko.

Egun erabiltzen diren soinurako kodeketa-sistema gehienak maiztasunen kodeketan, psikoa-kustikan eta LPC (*Linear Predictive Coding*) tekniketan oinarritzen dira.

Maiztasunen kodeketa

Seinale bat deskribatzeko, bi aukera ditugu: seinale horren izaera denboraren edo maiztasunen arabera deskribatzea. Lehenengo modua suertatzen zaigu naturalena, gure bizitza eta atzematzen ditugun gertaera guztiak denbora batean kokatzen baititugu. Horrela, soinu bat deskribatzeko, soinu horrek une bakoitzean duen balioa (airean eragindako presioa) azaltzen dugu, seinale elektriko baten bidez (laginketan sortutako seinale analogikoa) edo bit batzuen bidez (digitalizatutako seinalea). Denborazko deskribapena grafikoki egiteko, 1.10 irudian agertzen den funtzioa bezalakoak erabiltzen ditugu: abzisa-ardatzean denbora azaltzen da, eta ordenatu-ardatzak soinuaren balioa erakusten du, denboraren arabera. Seinale analogikoen digitalizazio-prozesua azaldu dugunean, denborazko eskema horri jarraitu diogu.



1.10 irudia. Denboran hartutako laginen bidez deskribatutako seinalea. $S(t)$ = seinalea, denboraren arabera; $S_i = i$ unean hartutako laginaren balioa. T = laginen arteko denbora tarte (periodoa).

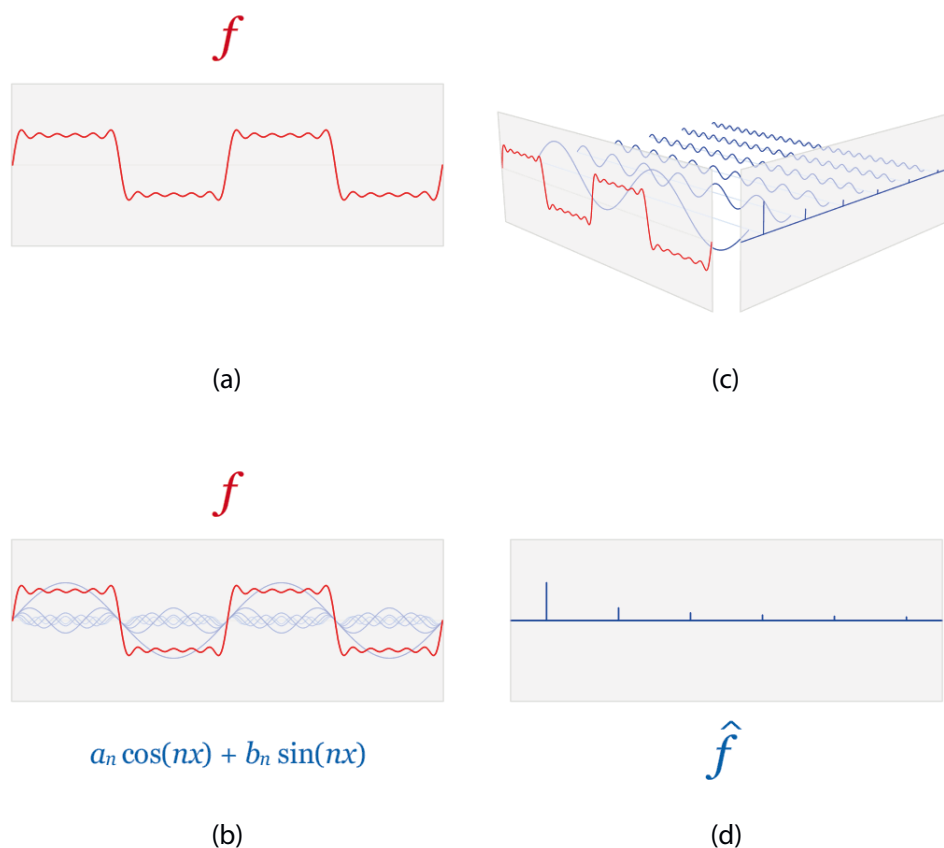
Baina, XIX. mendearen hasieran, edozein funtzio periodiko zenbait sinu- eta kosinu-funtzioren batura dela aurkitu zuen Fourier matematikariak. Ideia hori honela idazten da:

$$s(t) = k + \sum_{n=1} A_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1} B_n \cos(2\pi nft)$$

non f funtzio periodiko horren maiztasuna den, A_n eta B_n baturan agertzen diren sinu eta kosinuen anplitudeak, eta k konstante bat. Baturan agertzen diren maiztasun guztiak funtzioaren oinarria den f maiztasunaren multiploak dira. Batura osatzen duten maiztasun horiei *harmonikoak* ere baderitze. Infinitua izan daitekeen batura baten bidez funtzioak azaltzeko era horri *Fourierren analisi* deritzo. Seinale fisikoei dagokienez, gakoa honetan datza: denboraren arabera egindako seinalearen deskribapenetik abiatuta, maiztasunen arabera deskribapena lor dezakegu, goiko formula erabiliz. Bihurketa horri *Fourierren transformata* deritzo. Nahiz eta hasiera batean soilik funtzio periodikoetarako definituta egon, denboran mugatutako funtzio ez-periodikoetan ere erabil daiteke, funtzioa etengabe errepikatuko dela jotzen badugu. Hau da, seinalea 0 eta T segundoen artean soilik gertatzen bada ere, adierazpen matematikorako har dezakegu T eta $2T$ unean artean seinalea berriz gertatzen dela, baita $3T$ eta $4T$ artean ere, eta abar, etengabe. Artifizio horri esker, Fourierren analisia erabil dezakegu errealitatean gertatzen diren seinaleak aztertzeko, nahiz eta periodikoak ez izan, errealitatean fenomeno guztiak baitira denboran mugatuak.

Fourierren analisiak ikaragarriko garrantzia du soinuaren izaera ulertzeko, baita haren tratamenduan ere. Fourierren analisisian datza laginketa-teorema ere; Fourierri esker, soinuak maiztasun sorta gisa deskriba ditzakegu, denbora-tarte batean hartutako lagin sortaren orde. Seinale baten denbora- eta maiztasun-irudikapenen arteko erlazioa hobeto ulertzeko, begiratu 1.11 irudien seriea. Hasierako (a) irudian, f seinalearen denbora-irudikapena dugu. Hurrengoan, (b) irudian, berriz, f seinalea denboran; baina, orain, haren harmonikoak ere agertzen dira. Irudian ez dira ondo bereizten, baina sei harmoniko dira. Seiak batuz gero, jatorrizko f seinalea dugu. Hurrengo irudian, (c)-n, bi irudikapenak agertzen dira: denboraren arabera, ezkerrean, eta maiztasunaren arabera, eskuinean. Orain bai, garbi ikusten dira sei harmonikoak, baita nola maiztasun-irudikapena bakoitzaren pisuaren arabera den ere. Harmoniko nagusiak du pisu handiena; horregatik dauka marrarik altuena maiztasun-irudikapenean. Azkenik, (d) irudian, f seinalearen maiztasuneko irudikapen soila ageri da. Beraz, denbora-tarte batean izandako soinua bi eratan deskriba dezakegu: tarte horren une bakoitzean soinuak duen

balioaren bidez, edo soinua osatzen duten harmonikoen pisuen bidez. Soinua bere maiztasunen bidez azaltzen dugunean, aukera asko zabaltzen zaizkigu tratamendurako, eta, gainera, bit gutxiago behar izaten dira seinalearen maiztasunak kodetzeko, seinalearen denborazko balioak kodetzeko baino.

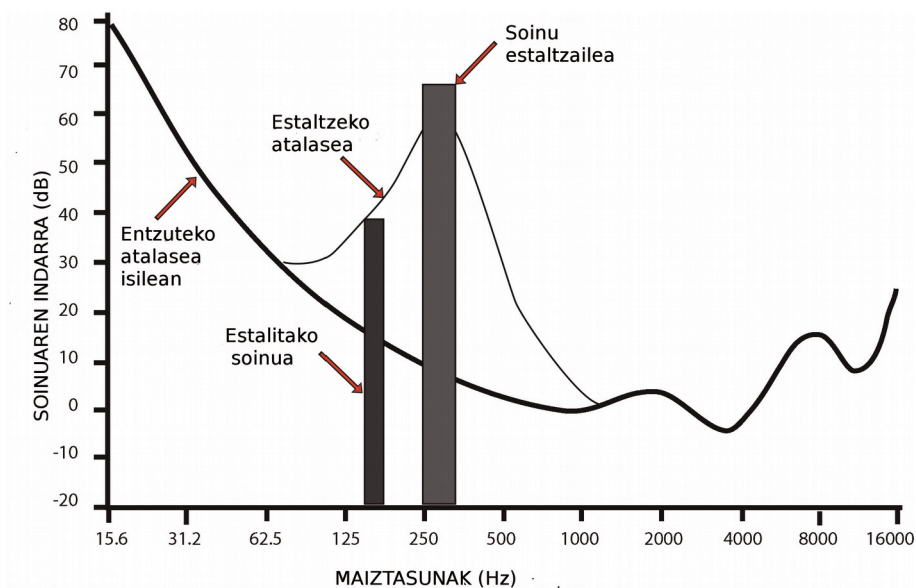


1.11 irudia. Seinale baten denborazko eta maiztasuneko irudikapenak. (a) Seinalea denboran zehar. (b) Seinalearen Fourier osagaiak, denboran. (c) Denborazko eta maiztasuneko irudikapenen arteko erlazioa. (d) Seinalearen Fourier transformazioa, maiztasunetan. Domeinu publikoko irudia. Jatorrizko animazioa ikus daiteke hemen: commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier_transform_time_and_frequency_domains.gif.

Maiztasunen kodeketa erabiltzen duten kodetzaileentzat berebiziko garrantzia du denborazko seinaletik bere espektroa lortzeko prozedura azkarra izateak. Horretarako gehien erabiltzen den teknika MDCT izenekoa da (*Modified Discrete Cosine Transform*).

Psikoakustika

Gizakiak duen soinuaren pertzepzioaren azterketa zientifikoa da psikoakustika. Zehatzago, atzemandako soinuarekin lotura duten erantzun psikologiko eta fisiologikoak aztertzen ditu. Orain arte, soilik gure tinpanoaren lana hartu dugu kontuan soinua aztertzean, baina burmuinaren lana ere hor dago. Gure soinuaren pertzepzioa burmuinak eraikitzen du, belarriak igortzen dituen nerbio-bulkadetak astinduta. Psikoakustikaz baliatuko gara burmuinaren erantzuna noiz izango den hutsala identifikatzeko; hau da, gure burmuinak jasotako soinuko zer harmonikori ez dion erreparatuko jakiteko, eta, ondorioz, harmoniko horiek ez kodetzeko. Horrela, bit gutxiago beharko ditugu soinua biltegitratzeko eta transmititzeko.



1.12 irudia. Psikoakustika: soinuen estalketa. Marra lodiak isiltasunean entzun ditzakegun soinuen indar-atalasea azaltzen du, maiztasunen arabera. 250 Hz-ko soinua eragindako indar-atalase berria marra meheak irudikatzen du. 150 Hz inguruan dagoen soinua entzungo dugu isiltasunean, baina ez 250 Hz-ko soinua badago aldi berean.

Adibidez, psikoakustikak aztertzen du zein maiztasun desagerrarazten dituen estalketa fenomenoak. Soinu-estalketa suertatzen da maiztasun bateko soinua beste maiztasun batekoa estaltzen duenean. Hori da 1.12 irudiak azaltzen duena.

Normalean, psikoakustika maiztasunen araberako kodeketarekin batera erabiltzen da. Lehenago, jatorrizko seinalea hainbat azpiseinaletan deskonposatzen da, maiztasunen arabera, Fourierren transformazio azkarra erabiliz. Horri *azpibandetako kodeketa* deritza (*SBC, Sub-Band Coding*). Gero, azpiseinale bakoitza kodetzen da bere eredu psikoakustikoa kontuan hartuta, hau da, burmuinak baztertuko dituen maiztasunak kodetu gabe.

LPC (*Linear Predictive Coding*)

LPC teknikak seinalea baino sinpleagoa den bere modelo batekin ordezkatzeko dute. Kodetutako modelo jatorrizko seinalea baino sinpleagoa den bezala, askoz bit gutxiago behar dira kodetzeko. Ahotsa kodetzeko gehien erabiltzen den teknika da, *vocoder* erako kodetzaileetan, baina audioa kodetzeko ere erabiltzen da.

3.4. Ahotsaren kodeketa

Ahotsaren kodeketak baditu bi berezitasun audioarekin alderatuta, banda-zabalera txikiagoa behar izateaz gain. Alde batetik, ahotsaren kodeketa telefoniarako egiten denez, denbora errealean egin behar da kodeketa eta deskodeketa. Audioaren kasuan, aldiz, gehienetan soilik deskodeketa egin behar da denbora errealean, aurretik grabatutako iturri bat erreproduzitzen baita. Audioa biltegitratzea bada egindako kodeketaren helburua, behar adina denbora har dezake kodetzaileak. Bere denbora errealeko izaeratik, ahotsa kodetzeko sistemek azkartasunari eman behar diote lehentasuna, eta, batzuetan, trinkotzeko ahalmena sakrifikatzen dute. Ahotsaren eta audioaren kodeketen arteko bigarren aldea bi soinua horien izaeraren ondorioa da. Gizakiak sortzen duen soinua audioa baino sinpleagoa da, eta haren ezaugarriak oso ezagunak dira. Horrek zenbait optimizazio lortzen lagunduko du digitalizazio-prozesu osoan. Adibidez, azaldu dugun kuantizazio ez-uniformea gi-

zakiaren ahotsaren digitalizazioan erabil daiteke, bai baitakigu zer probabilitaterekin agertzen den soinu bakoitza hitz-jario batean. Audioaren kasuan, ez ditugu probabilitate horiek ezagutzen, eta, ondorioz, bit gehiago kontsumitzen duen kuantizazio uniforme dugu aukera bakarra.

Ahotsaren kodeketaren helburua izango da hizketaren ulergarritasunari eta haren izaera atseginari eustea. Ulergarritasunari eustea hizketaren edukari baino gehiagori dagokio, hizlariaren emozioak, doinua, tinbrea eta abar ere garrantzitsuak baitira. Hala ere, gerta daiteke jasotako hizketa ulergarria izatea, baina desatsegina. Hori gertatzen da, adibidez, kodeketa mantsoegia denean, elkarrizketaren sinkronizazioa kaltetzeraino. Ahotsari dagokionez, erreferentziazko kalitatea zerbitzu telefoniko tradizionalak emandakoa da (ingelesez, *toll quality*). Kalitate hori da ahotsaren 0 eta 4.000 Hz arteko maiztasunak besterik digitalizatzen ez dituen, 8 kHz laginketa abiadura erabiliz. Horregatik, *banda estuko ahotsa* ere baderitzo (*narrowband*, ikusi 1.3 taula). Telefoniaren aro analogikoan ohitu ginen kalitate horrekin, eta, digitalizazioaren garaian, hori izan da erreferentzia eta abiapuntua. Ahotsa kodetzeko lehenengo estandarrak, G.711 izenekoak, kalitate hori ematen zuen 64 kb/s eta 8 biteko sakonera erabilita ($8.000 \text{ lagin/s} \times 8 \text{ bit} = 64 \text{ kb/s}$). Ahotsa kodetzeko geroko formatuak saiatzen dira, gutxienez, kalitate horri eusten, eta, aldi berean, ahal den transmisio-abiadura txikiena erabiltzen. Trinkoketa teknikei esker, kodetzaileek ahalbidetu dute 4 kHz-eko banda baino harago joatea, laginketa-abiadura handituz baina erabilitako transmisio-abiadura handitu gabe, edo baita transmisio-abiadura gutxituta ere. Digitalizatutako ahots-banda handitzearekin batera, lortutako kalitatearen nomenklatura bat garatu da. Ikusi nomenklatura hori 1.3 taulan.

1.3 taula. Soinua digitalizatzean erabilitako banden izendapena. RFC 7587 agiritik hartuta.

Laburdura	Izena	Banda-zabalera (Hz)	Laginketa-abiadura
NB	Narrowband	0- 4.000	8 kHz
MB	Mediumband	0- 6.000	12 kHz
WB	Wideband	0- 8.000	16 kHz
SWB	Super-Wideband	0-12.000	24 kHz
FB	Fullband	0-20.000	48 kHz

Ahots-kodetzaile modernoek jatorrizko seinalea aztertzen dute, erredundantziak gutxitzen edo guztiz garbitzen saiatzen dira, eta gelditzen dena ahal den bit gutxienarekin kodetzen dute, lortutako seinale digitala erreproduzitzean eragingandako soinua ahal den hoberena izan dadin. Prozesuari zifratzea gaineratu dakioke, komunikazioaren konfidentziasuna bermatzeko.

Gehienetan, bi taldetan sailkatzen dira ahotsa kodetzeko sistemak: uhin-kodetzaileak (*waveform coders*) eta iturriko kodetzaileak (*source coders*). Azken horiei *vocoders* ere baderitze. Orokorrean, uhin-kodetzaileek banda-zabalera handiagoa behar dute, baina prozesamendu-ahalmen txikiagoa seinalea igortzean eta hartzean. Beste alde batetik, iturriko kodetzaileek askoz transmisio-abiadura txikiagoa behar dute, kasu gehienetan ahotsaren kalitatea ia kaltetu gabe. Uhin-kodetzaileak telefonia tradizionalan erabiltzen dira gehien (zirkuitu-kommutazio bidezko telefonia eta DECT haririk gabeko telefonia). Baina Interneten, non banda-zabaleraren erabilera optimizatzen den, LPC teknike-tan oinarritutako iturriko kodetzaileak dira nagusiak.

Uhin-kodetzaileak

Uhin-kodetzaileek laginek deskribatutako uhina kodetzen dute. Bi motatakoak dira: denboran deskribatutako uhina kodetzen dutenak (*time-domain waveform coders*) eta kodeketa maiztasunen arabera egiten dutenak. Azken horiei kodetzaile espektralak ere baderitze (*spectral waveform coders*).

Denbora-kodetzaileak hartutako laginen balioak kodetzen dituzte. Hori egiteko erarik sinpleena **PCM** izeneko da (*Pulse Code Modulation*), non kodetutako seinalea digitalizazioaren

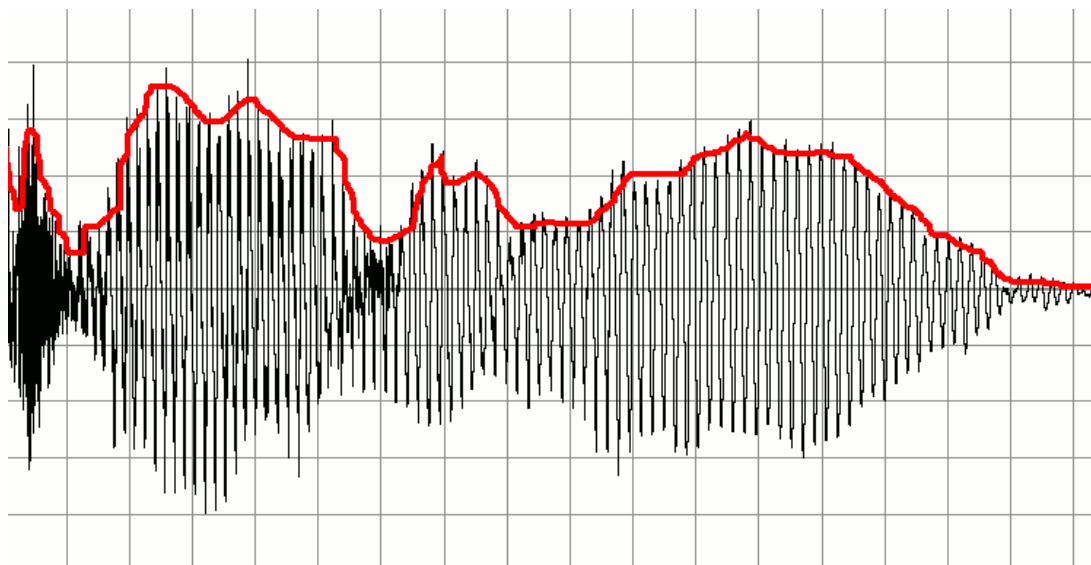
emaitza gordina baita, trinkotu gabe. Hala ere, kuantizazio ez-uniformea erabilia 14 biteko sako-neraren kalitatea lortzen du lagineko 8 bit bakarrik erabilia. PCM hobetzeko asmoz garatu zen kodeketa diferentziala, non ez baitira zuzenean laginen balioak kodetzen, laginen arteko aldea baik. Ahotsaren laginen balioak pixkanaka aldatzen direnez, kodetu beharreko balio posibleen tar-tea txikiagoa da, eta, ondorioz, PCMrekin lortutako kalitate bera lor dezakegu bit-sakonera txi-kiagoa erabilia, laginen arteko aldea kodetzen badugu. Denborazko kodeketa diferentzial nagusia ADPCM izenekoa da (*Adaptative Differential PCM*). PCM familiako bi erak garbi bereizteko, ha-sierako PCMri LPCM (*Linear PCM*) deitzen hasi ziren PCM diferentziala definitu zenean. Ahotsa-ren denborazko kodeketarako formatu estandarizatu nagusiak ITUk egindakoak dira (*Internatio-nal Telecommunicatios Union*). Honako hauek dira:

- G.711. PCM kodeketaren estandarizazioa da. Ohiko formatua da zirkuitu-kommutazio bidezko telefonia digitalizatuan, zeinetan sarbideko banda-zabalera ez baita arazo izaten behin deia eza-rrita. Haren ohiko aldaeran, 8 kHz-etan hartzen dira laginak, eta, gero, 8 bitetan kuantizatzen dira, era logaritmikoan. Guztira, 64 kb/s behar dira, baina badaude bit gehiago behar dituzten G.711 estandarraren aldaerak. 0,125 ms-ko atzerapena eragiten du. Laginak ehun eta hirurogei-naka biltzen dira 20 milisegundoero, 160 horiek batera datagrama batean bidaltzeko edo agiri batean grabatzeko.
- G.726. ADPCM kodeketarako estandarra da, ADPCM aldaera desberdinak definitzen zituzten G.721 eta G.723 espezifikazioak ordezkatu zituena. Aukera desberdinak eskaintzen ditu, 2, 3, 4 edo 5 biteko sakonera eta 16 eta 40 kb/s abiadura erabiliz. G.726 estandarra erabiltzen da, bere 32 kb/s-ko aldaeran, sare telefonikoen nazioarteko loturetan eta DECT haririk gabeko telefonoetan.
- G.722. Estandar honek ere ADPCM erabiltzen du; baina telefono-ahotsaren betiko 4 kHz-eko ban-daren orde, banda handiko 7 kHz-eko harmonikoak jasotzen dituen digitalizazio-sistemarako dago definituta (*wideband* 1.3 taulan). Ahotsaren harmoniko gehiago hartzeko, eta laginketa-teo-rema jarraituz, laginketa-maiztasuna 16 kHz da. Kuantizaziorako erabilitako bit kopuruaren ara-bera, abiadura 48, 56 edo 64 kb/s da. SBC teknika ere erabiltzen du, jatorrizko seinalea bi azpibanda-tan zatitzen baitu horietako bakoitza kodetu baino lehen. Beheko azpibandan (0 eta 4 kHz artekoan) kontzentratzen denez seinalearen informazio gehiena, askoz bit gehiago hartzen dira azpibanda hori kodetzeko bestea (4 eta 8 kHz artekoa) kodetzeko baino.

Maiztasunen araberako kodeketan, denboran lagindutako seinalearen harmonikoak ateratzen dituzte, eta, gero, harmoniko horiek kodetzen dituzte. Horrela lan egiten duen kodetze-sistema bat G722.1 estandarra da. Izenak horrela iradokitzen badu ere, G722.1 ez da G722 kodeketaren aldaera bat. Biek amankomunean duten ezaugarri bakarra, egilea ITU izateaz gain, biak banda zabaleko ko-detze-sistemak izatea da (*wideband*, 1.3 taulan).

Iturriko kodetzaileak (Vocoders)

Iturriko kodetzaileek jatorrizko seinalea bere inguratzailearekin modelatu (*spectral envelope*), eta inguratzaile hori kodetzen dute, jatorrizko uhinaren orde. Azkar aldatzen den seinale baten mugei jarraitzen dien beste seinale bat, askoz leunagoa, seinale horren **inguratzailea** da. Horren adibidea duzu 1.13 irudian. Inguratzailea jatorrizko seinalea baino leunagoa denez, askoz bit gu-txiago behar dira kodetzeko. Horri esker, iturriko kodetzaileek ikaragarriko trinkoketa-maila lor-tzen dute, eta, ondorioz, oso erabiliak dira telefonia mugikorrean eta Internet bidezko telefonian, zeinetan ezinbestekoa baita ahal den transmisio-ahalmen gutxien erabiltzea. Gehien erabiltzen di-renak LPC teknikan daude oinarrituta. Adibidez, VoIPrako oso erabilia den **G.729** estandarraren muina CELP (*Code-Excited Linear Prediction*) da, eta telefonia mugikorrean oso erabilia den AMR-WB kodeketak (G722.2 ITUren nomenklaturan) ACELP algoritmoa erabiltzen du (*Algebraic Code-Excited Linear Prediction*). G.729 kodetutako ahotsa 10 ms-ko zatitan bidaltzen da, zati bakoitza datagrama batean, horretarako 8 kb/s soilik erabiliz.



1.13 irudia. Seinale baten inguratzaila.

3.5. Audio-kodetzaileak

Audio-kodetzaile bati exijitutako soinuaren kalitatea ahots-kodetzaile bati exijitutakoa baino askoz handiagoa izaten da, helburua ez delako izaten soilik ondo bereiztea hitzak diskurtso batean, baizik eta erreproduzitutako soinuak jatorrizkoaren ahal den antza handiena izatea. Hau da, goi-fidelitatea nahi dugu (*high fidelity* edo *hi-fi*). Horrek dakar audio-kodetzaileek sortutako bit-jarioek transmisio-abiadura handiagoak behar izatea, erreprodukzioan audio-kanal gehiago erabiltzen direlako, laginketa egitean gure entzumenak atzeman ditzakeen maiztasun guztiak jaso behar direlako, eta kuantizazioak eragindako errorea atzeman ezina bilakatu nahi izango dugulako, bit-sakonera handiagoa erabiliz.

Kanal kopuruari dagokionez, grabatutako audiorik sinpleena bozgorailu bakar batean erreproduzitzekoa da (soinu monoaurala). Baina entzuten ditugun benetako soinuak ez datoz askotan iturri bakar batetik, iturri askok igorritako soinuen konbinazioak baitira. Adibidez, kontzertu batean jasotzen dugun soinua instrumentu bakoitzaren kokalekuaren arabera da, eta ez dira berdinak izango ezkerretik eta eskuinetik jasotzen ditugun audio-seinaleak. Gure esperientzia auditibo hori imitatu nahian asmatu zuten erreprodukzio estereofonikoa, bi bozgorailutan erreproduzitzeko pentsatuta. Bozgorailu bakoitzean erreproduzitzen den grabatutako soinuari *kanala* edo *pista* deritzo. Grabazio estereofonikoa egitean, analogikoa zein digitala, bi kanal horiek grabatu behar dira. Digitalizazioari dagokionez, horrek suposatzen du une bakoitzean ez dugula lagin bat grabatu behar, bi baizik. Soinu estereofonikotik harago joanda, soinu inguratzaila ere garatu da (*surround sound*), hainbat kanal erabilia: soinu kuadrafonikoa (4 kanal), 5.1 soinua (6 kanal, zine-aretoetan eta *home cinema* sistemetan oso erabilia), 7.1 soinua (8 kanal), 16.2 (18 kanal)... Zenbat eta kanal gehiago, orduan eta b/s gehiago behar.

Laginketa-abiadurari eta bit-sakonerrari dagokionez, audio digitalean oso erabiliak dira CD estandarrari dagozkion 44,1 kHz eta 16 bit. Hala ere, hori ez da audioaren digitalizazioan erabiltzen den aukera bakarra. 48 kHz erabiltzen dira DVDtan, eta testuinguru profesionaletan laginketa-abiadura handiagoak ere erabiltzen dira, aurreko bi horien biderkadurak izaten direnak. Orokorrean, *goi-definizioko audio* terminoa (*high-definition audio*, *high-resolution audio*, edo *HD audio*) erabiltzen da 44,1 kHz/16 bit ez diren konbinazio altuagoak izendatzeko. Aurkitu ditza-kegu 88,2 kHz, 96 kHz, 176,4 kHz eta 192 kHz-eko laginketa-abiadurak, eta 24 edo 32 bit-sakon-nerak. Jakinda gure belarriek ez dituztela atzematzen 20 kHz baino altuagoak diren maiztasunak,

eta laginketa-teorema kontuan hartuta, ez al da lan alperra 44,1 kHz baino laginketa-abiadura altuagoa erabiltzea? Digitalizatutakoa gero zuzenean erreproduzitzekoa bada, bai, lan alperra da. Baina digitalizatutako soinua, askotan, prozesatua izango da erreproduzitu baino lehen. Soinu digitalizatuari ezarritako tratamendu horiek handietsi ditzakete digitalizazio-prozesuan eragindako erroreak, eta, horregatik, laginketa-abiadura Nyquist mugatik harago hartzen da. Teknika honi *gainlaginketa* deitzen zaio (*oversampling*), eta, berari esker, badago digitalizatutako seinaleak prozesatzea soinua kalitateari eutsita. Behin prozesamendua eginda, azpilaginketa ezartzen zaio audioari (*downsampling*), erreproduzitu edo transmititu ahal izateko gure belarriak behar duen abiaduran, eta ez gehiagoan.

1.4 taula. Oso erabiliak diren audioa kodetzeko sistema batzuk. MPEG kontainerra bideorako da, baina MP3 soinua besterik ez duenean, MP3 deritzo.

Izen laburtua	Izen osoa	Ohiko kontainerrak
AAC	Advanced Audio Coding	MP4, ADTS, 3GP
MP3	MPEG-1 Audio Layer III	MP4, ADTS, 3GP, MPEG
Opus	Opus	WebM, MP4, Ogg
Vorbis	Vorbis	WebM, Ogg
FLAC	Free Lossless Audio Codec	FLAC, MP4, Ogg

Testu hau idaztean gehien erabiltzen diren audioa kodetzeko sistemak 1.4 taulan dituzu. AAC (*Advanced Audio Coding*) MP3 (*MPEG Audio Layer 3*) estandarren ordezkoa da. Bit kopuru bera erabiliz, soinua kalitate handiagoa lortzen du AACk bere aurrekoak baino. AAC MPEG-4 estandar multzoaren zati bat da, estandar multzo horren audioaren kodeketarako aukera lehenetsia, hain zuzen ere (MPEG estandarretan audio eta bideoaren kodeketa lantzen da). Era berean, MP3 MPEG-1 taldearen hirugarren atala da (hortik dator kio 3 zenbakia izenari), audio-trinkoketa hartzen duena. MPEG-2 estandarretan bi aukerak daude audiorako: MP3 eta AAC. AAC da audio formatu lehenetsia hainbat telefonotarako, telebista zein irrati digitalerako sistemetan eta jokoetarako kontsoletan.

AACk trinkotze galeraduna egiten du, baina, psikoakustikari esker, galdutako informazioak ez du apenas eraginik izango gizakiak atzemandako soinua kalitatean. Funtsean, ahotsaren kodeketan erabilitako uhin-kodeketa bera egiten da AAC estandarrean. Laburrean, honako urrats hauek egiten dira soinua AAC erabiliz kodetzeko:

1. Seinale analogikoaren laginketa egiten da, 8 eta 96 kHz arteko abiaduran. Askotan, 44,1 kHz aukera hartzen da, CD kalitatearen parekoa lortzeko.
2. Kuantizatutako laginak denbora-tartetan banatzen dira, eta egindako bloke bakoitza maiztasunaren arabera azaltzen da, MDCT bihurketa erabiliz. Hau da, denbora-laginetatik maiztasun-laginetara igaro, eta maiztasun bakoitzaren indarra kodetuko da.
3. Azterketa psikoakustikoa egiten da, estalitako maiztasunak kentzeko.
4. Maiztasunak kodetzen dira Huffman kodeketa estatistikoa erabiliz, bit kopurua murrizteko.

AACk duen handicap bat bere patente bidezko erabilera da. Oztopo hori ez dute bere lehia-kide diren Vorbis eta Opus kodetzailiek, biak libreak baitira. Beren arteko erlazioa MP3ren eta AACren artekoa bezalakoa da; hau da, Opus da Vorbisen ordezkoa, eta, berez, hobea. MP3 bezala, Vorbis zaharkituzat jota dago, baina oraindik erabiltzen da. AACrekin alderatuta, Opusek duen abantailarik handienetako bat bere latentzia baxua da, 5 ms-koa izan daitekeena (AACk lortzen duen baxuena 20 ms da, bere AAC-Low Delay aldaeran).

FLAC kodetzailea da galeraduna ez den taulako bakarra. Horregatik, lor dezakeen trinkotze-maila besteena baino baxuagoa da, baina, beste alde batetik, egokiena da musika artxibatzeke eta segurtasun-kopiak sortzeko. Konpresore orokorrak baina hobea da audioa trinkotzeko, horretarako espresuki diseinatuta dagoelako.

4. Bideo digitala

Argia uhin elektromagnetiko bat da, eta gure begiek atzematen dituzten irudiak objektuek islatutako argia dira. Gure begiek atzeman dezaketen argia izpi infragorrien eta ultramoreen artekoa da, edo, beste era batean esanda, gutxi gorabehera 400 THz eta 800 THz arteko uhin elektromagnetikoak dira. Tarte horretan dauden uhinak multzoka sailkatu ditugu, maiztasunaren arabera, eta multzo bakoitzari kolore bat esleitu diogu. Adibidez, 530 eta 580 THz artean dagoen argia kolore berdearekin lotzen du gure burmuinak. Gure betsareak, naturan sortutako uhinak atzeman, eta gure burmuinak interpretatzeko moduko nerbio-seinale bilakatzen ditu. Antzekoa egiten dute bi-deokamerek ere: irudiak osatzen dituzten uhin elektromagnetikoak atzeman, eta haien baliokideak diren seinale elektriko analogiko bilakatzen dituzte. Gero, soinuarekin egiten den bezala, seinale analogiko hori digitalizatzen da, era eraginkorragoan biltegitatu, transmititu eta prozesatu ahal izateko.

4.1. Irudien digitalizazioa

Digitalizatutako irudiak bi eratakoak izan daitezke: denboran zehar estatikoak direnak, eta dinamikoak (hau da, mugimendua agertzen dutenak). Lehenengoan adibideak argazkiak edo margolanak dira. Bigarrenak animazioak eta bideoak dira, eta haiei erreparatuko diegu testu honetan. Bien digitalizazioak lotuta daude, mugimendua duten irudien digitalizazioa irudi estatikoen digitalizazioan oinarritzen baita. Horren arrazoia gizakiaren ikusmen-sistemaren funtzionamenduan datza. Pertsiana baten zirrikituen atzetik gurdien mugimenduei begiratzean, Roget zientzialari ingelesa gurpilek eragindako efektu optikoaz jabetu zen, 1824. urtean. Ematen zuen gurpilek aurrera egiten zutela biratu gabe, *cowboyen* filmetako diligentzien gurpilekin gertatzen den antzera. Geroxeago, 1832. urtean, Plateau belgikarrak irudi estatikoak bata bestearen atzetik irudikatuz irudiaren mugimendua lortzen zuen lehenengo gailua eraiki zuen: fenakistiskopia (ikus 1.14 irudia). Hari esker, zinearen oinarria jarrita zegoen. Irudi estatikoen segida baten orde, mugitzen ari den irudi bakarra atzematen du gure ikusmen-sistemak. Irudi estatiko bakoitzari **fotograma** deritzo (ingelesez, **frame**³ edo, bestela, *picture* ere esaten zaio). Fotogramen kopurua segundoero azaltzeko, FPS (*Frames Per Second*, fotograma-abiadura) edo hertzak (Hz, fotograma-maiztasuna) erabiltzen dira. Mugimendua atzemateko, gutxienez 12-15 Hz-ekoa (edo 12-15 FPS) izan behar du fotogramen maiztasunak, eta eroso ikusteko 16 Hz da, gutxi gorabehera, behar den minimoa. Zinema mutuan, 22-26 Hz erabiltzen ziren, eta, zinema estandarrean, 24 Hz erabiltzen dira (irudi bakoitza bi aldiz agertzen da, keinada edo *flickeringa* ekiditeko). Betiko telebistan, 25 Hz erabiltzen dira (30 Hz AEBn eta Japonian).

Aro analogikoan, fotogramak analogikoak ziren. Egun, irudi estatiko digitalizatuak dira. Irudi estatikoak digitalizatzeko, kamerako objektibotik sartutako argiak milaka fotodiodok osatutako matrizean eragiten du. Fotodiodo bakoitzak irudiko lagin bat jasotzen du, irudiko puntu bati dagokiona. Jasotako argindarra zenbaki bilakatzen du; hau da, irudiaren zati bakoitza zenbaki bilakatzen dute fotodiodoek. Hori asmatu zuten fisikariek Nobel saria jaso zuten horregatik 2009. ur-

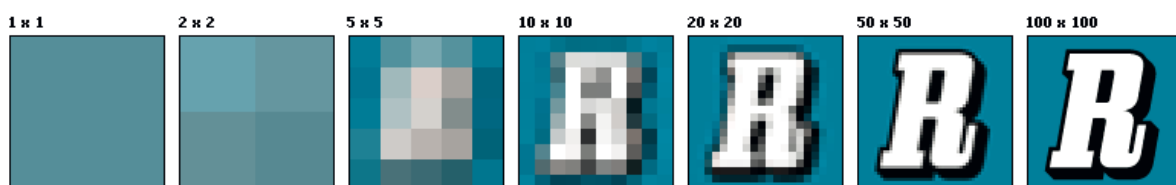
³ Adi, ez du zerikusirik konputagailu-sareetan bidaltzen diren tramekin, nahiz eta biak *frame* deitu ingelesez.

tean, asmakizuna 40 urte lehenago egin bazuten ere. Fotodiodo bakoitzak hartutako laginari **pixel** deritzo (ingelesezko *picture* eta *element* hitzen elkarketaren ondoriozko hitza). Izen horretatik eratorri da *pixelazio* terminoa, irudi digitalizatuan egindako zatiketa atzematea azaltzen duena. Bere gehienezko bereizmenean lan egiten duen pantaila batean, kolorea eman dakioken pantailako zatirik txikiena da pixela.



1.14 irudia. Fenakistiskopia.

Horrela digitalizatutako irudi batek duen pixel kopuruak ezartzen du irudiaren bereizmen-maila: zenbat eta pixel gehiago, orduan eta bereizmen handiagoa. **Bereizmena** *zabalera x altuera* eran azaltzen da, eta biderkadura horren osagai bakoitza pixeletan neurtzen da. Film bat ikusteko erabili behar den bereizmena ez da bera izango, esate baterako, telefono batean, telebista-pantaila batean edo zinema-areto batean. Oso lotuta dago pantailaren tamainarekin, ikuslearekiko distantziarekin, eta erreproduzitzean lortu nahi dugun kalitatearekin. Digitalizatzerakoan bereizmen egokia aukeratzeko, kontuan hartu behar dugu pixelaren tamaina ez dela bera izango 5×3 zentimetroko koadro batean erreproduzitu behar badugu irudia (adibidez, txartel batean agertzen den argazkia), edo 5×3 metroko poster erraldoi batean inprimatu behar badugu. Txartel batean inprimatzeko argazkia bada, nahikoa izango da 640×480 bereizmena; baina bereizmen horrekin poster erraldoian inprimatzen badugu, pixelazioa nabaria izango da ikuslea oso distantzia handian ez badago.



1.15 irudia. Irudi bera bereizmen desberdinekin erreproduzituruta. Bereizmen eskaseko irudietan nabaria da pixelazioa.

Pixel bakoitza kodetzeko erabilitako bit kopurua da digitalizatutako irudiaren kalitatean eta kostuan eragin handia duen hurrengo parametroa. Pixel bakoitzeko bit bakarra erabiliz gero, bi kolore besterik ezingo ditugu erabili irudian: zuria eta beltza. Kalitate handiko zuri-beltzeko bideoa kodetzeko, 8 bit erabiltzen dira, hau da, 256 gris-maila. Bideoa koloretan digitalizatzeko oinarritzko sistema RGB da (*Red Green Blue*), non pixel bakoitzeko 24 bit erabiltzen baitira, 8 bit erabilia oinarritzko kolore bakoitzeko (gorria, berdea, eta urdina). Zortzi biteko hiru osagai horiekin, 16 milioi konbinazio inguru sor daitezke, gure ikusmenak bereiz ditzakeen koloreak baino gehiago. Pixel bakoitzeko erabilitako bit kopurua izendatzeko, bpp akronimoa (*bits per pixel*) edo **kolorearen sakonera** terminoak erabiltzen dira. Adibidez, RGB sisteman, 24 biteko kolorearen sakonera erabiltzen da normalean.

DVD formatuan, 720×576 bereizmena erabiltzen da. Beraz, DVD bideo bat transmititu nahiko bagenu 24 biteko sakonera erabiliz, 1,2 MB baino gehiago beharko genuke fotograma bakoitzeko. 25 fotograma segundoero bidalita, ia 250 Mb/s-ko transmisio-abiadura beharko genuke bideo hori Interneten transmititzeko. Abiadura hori bideo-transmisio bakar bati esleitzea pentsaezina denez, argi dago bideo digitalizatuaren trinkoketa oso handia lortzea ezinbestekoa dela bideoak Interneten banatu nahi baditugu. Zorionez, hamarkadetan ikertzaileek egindako lan bikainak utzitako trinkotze-algoritmoek eta teknikiek Internet bidezko bideoak banatzeko modua ekarri dute. Audioan bezala, bideoa trinkotzeari *bideo-kodeketa* deritzo.

4.2. Bideo-kodeketarako sistemak

Bideo-kodeketarako sistema ugari badaude ere, sistema guztiek bi urrats egiten dituzte beti bideoa trinkotzeko: fotograma estatikoen erredundantzia espazialak ezabatu, eta, mugimendua kodetzean, fotogramen arteko denbora-erredundantzia kendu. Lehenengorako, Fourierren analisisan oinarritako DCT (*Discrete Cosine Transform*) bihurketa izaten da teknika nagusia, eta, bigarrenarako, mugimenduaren konpentsazioa (*motion compensation*).

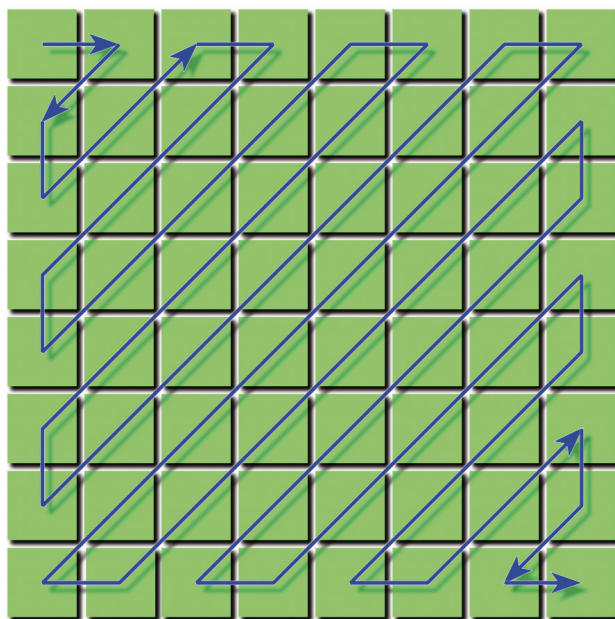
Irudi estatikoen kodeketa

Erredundantzia espaziala fotograma batean elkarrekin dauden pixelek balio bera dutenean aurkitzen dugu. Balio bereko pixel horiek guztiak kodetzea baino laburragoa izaten da balio hori behin bakarrik kodetzea eta zer pixeletan azaldu behar duen zehazteko informazioa gehitzea. Baina irudien erredundantzia espazialaren tratamendua harago doa, eta gure ikusmenak atzematen ez duen informazio guztia kentzen saiatzen da. Soinuaren digitalizazioan bezala, Fourierren analisisa eta DCT bihurketa funtsezkoak dira bideoaren kodeketan, gure ikusmenak atzemango ez dituen detaileak ezabatzeko digitalizatutako seinaletik. Irudian egindako iragazketa gehiegizkoa balitz, gero erreproduzitu ahal izango dugun irudia lausotuta agertuko litzaiguke. Baina, iragazketa hori ondo mugatuta badago, irudia kodetzeko erabilitako bit kopurua asko murriztu daiteke erreproduzitutako irudiaren kalitatea kaltetu gabe. Erredundantzia espaziala kentzeari **intra-frame** trinkoketa ere esaten zaio.

Irudi estatikoak trinkotzeko JPEG estandarra (*Joint Photographic Experts Group*) definitu zuten; hasiera batean, argazkiak eta antzekoak digitalizatzeko erabiltzen zen, baina bideoa kodetzeko ere erabiltzen da. Hemen aztertuko dugu nola kodetzen dituen JPEGk 24 bpp erabiltzen dituzten RGB irudi analogikoak, bideoaren oinarria den irudi estatikoen kodeketa nola egiten den ideia orokor bat emateko asmoz.

Abiapuntua RGB informazioa kodetzen duten hiru pixel-bilduma dira, bat oinarritzko kolore bakoitzeko. Adibidez, 1280×720 bereizmenarekin lan egiten badugu, tamaina horren hiru bilduma izango ditugu: bata, irudiko pixelen osagai gorria duena; bestea, osagai berdea duena, eta, hirugarrena, osagai urdina duena. Bilduma bakoitza matrize baten moduan antolatzen da, 8 bit erabiliz

pixel bakoitzeko. Horrela, 24 bit erabiltzen dira pixel bakoitza kodetzeko; gehiegi, erredundantzia asko izaten baita. Horregatik, JPEG kodeketaren lehenengo urratsa da RGB hiru matrize horietatik Y'CbCr erredundantzia gutxiago duten beste hiru matrizeetara igarotzea. Y'CbCr sistema eragin-korragoa da RGB baino, gure ikusmen-sistemaren funtzionamendutik gertuago dagoelako, gure begiek erregistratzen dituzten bi parametroak jasota: alde batetik argiaren indarra, eta bestetik kolorea. Bi parametro horien izen teknikoak dira, hurrenez hurren, **luminantzia** eta **krominantzia** (*luma* eta *kroma* ere deituak). Krominantzia, normalean, bi balioekin adierazten da: alde batetik, urdinarekiko aldea (*Cb*, *chroma blue*), eta, bestetik, gorriarekiko aldea (*Cr*, *chroma red*). Irudiko pixelak adierazteko Y'CbCr sistema erabiliz, alde batetik, irudia kolorerik gabe kodetzen dugu (*Y'* matrizea), eta, bestetik, haren kolorea (*Cb* eta *Cr* matrizeak). Gizakiaren begia askoz sentikorragoa da zuri-beltzeko informazioarekiko kolorearekiko baino, eta, ondorioz, askoz lagin gutxiago behar dira kolorea ondo digitalizatzeko zuri-beltzeko irudiak digitalizatzeko baino. Hau da, *Cb* eta *Cr* matrizeak *Y'* matrizea baino txikiagoak izan daitezke. Horri *krominantziaren azpilaginketa* deritza (*chroma subsampling*). *Cb* eta *Cr* matrizeen tamaina *Y'* matrizearenaren erdia bada, 4:2:2 idazkeraz azaltzen da. Hori da azpilaginketarik erabiliena, baina bideo-kodeketarako beste aukera batzuk ere erabiltzen dira. Trinkotze hori galeraduna da, baina gure ikusmenak nekez nabaritutako du aldea. RGB laginen ordez luminantzia eta krominantzia kodetzeak, trinkotze-maila altuagoa lortzeaz gain, zuri-beltzeko irudiekiko bateragarritasun erraza du, lumaren matrizea (*Y'*) hartu besterik ez baita egin behar koloretan digitalizatutako irudi bat zuri-beltzean emateko.



1.16 irudia. 8x8 bloke baten berrantolaketa posible bat, zerokoen segidak maximizatzeko.

Bigarren urratsa pixel-matrizeak maiztasunen arabera errepresentaziora pasatzea da. Foto-grama baten luminantziako matrize bakoitza 16x16 pixelek osatutako blokeetan antolatzen da, eta bloke bakoitzari Fourierren analisisa aplikatzen zaio, harmonikoak lortzeko. Zehazki, DCT bihurketa egiten da, hau da, kosinuaren bihurketa diskretua. Prozesu bera egiten da krominantziako matrizeetan, baina 8 x 8 pixelek osatutako blokeetan zatituta. Hirugarren urratsa bloke bakoitzean pisu txikia duten harmonikoak ezabatzea da; hau da, maiztasun altuenak, pixelen arteko bat-bateko aldaketak azaltzen dituztenak. Urrats horren gakoa «pisu txikia» zer den definitzean datza. Erabiltzaileak erabakiko du: JPEG irudi bat sortzerakoan, azaldu behar dugu zer trinkotze-maila nahi dugun, eta, horren truke, zer kalitateko emaitza nahi dugun. Maiztasun asko ezabatzen

baditugu, koloreen arteko trantsizio guztiak leunduta agertuko dira, eta irudiaren lerro zehatzak galduko dira. Hirugarren urrats horri *irudiaren kuantizazio* deritzo, baina ez da nahastu behar soinuaren digitalizazioan ikusi dugun kuantizazioarekin; funtsean, prozesu bera da, baina era desberdinean egiten da soinuaren kuantizazioa eta irudiarena. Une horretarako, bloke bakoitzean dauden 8 biteko balioetatik asko zerokoak izango dira, edo zerotik gertukoak.

Laugarren urratsean, kodeketa diferentziala aplikatzen da fotogramaren blokeen artean, soilik bloke bakoitzeko (0,0) posizioan, hau da, goi-ezkerreko txokoan. Posizio horretan, blokeko pixel guztien batez besteko balioa kodetzen da. Berez, gehienetan, gutxi aldatzen dira bloke batetik bestera. Ondorioz, posizio horrek ere zerotik gertuko balioak gordeko ditu bloke gehienetan. Hurrengo urratsean, bosgarrenean, agerian gelditzen da zergatik bilatu dugun aurreko lau urratsetan ahalik eta posizio gehien uztea zeroan. Izan ere, bosgarren urrats horretan segiden kodeketa egingo da (*run-length encoding*); hau da, zerokoen segidak segidaren luzerarekin ordezkaturako dira. Horretarako, lehenago, bloke bakoitza berrordenatuko da, ahal den zeroko gehien ager daitezen elkarren jarraian. Berrordenatze hori zig-zag eran izaten da, 1.16 irudian agertzen den bezala, zeroko jarraitu luzeagoak sortzen dituelako. Azkenik, Huffman kodeketa erabiltzen da bloke bakoitzeko kodeak bit gutxiagorekin kodetzeko: askotan agertzen diren balioak kode txikien bidez kodetzen dira.

JPEG kodeketak lortzen duen trinkotze-maila 100:1 izatera ailega daiteke, baina kalitatearen galera nabaria izango da. 10:1 trinkoketa lortuta, ikusmenak normalean ez ditu bereiziko jatorrizko irudia eta kodetuta dagoena. JPEG simetrikoa da: denbora bera behar da kodetzeko eta deskodetzeko, gutxi gorabehera.

Mugimenduaren kodeketa

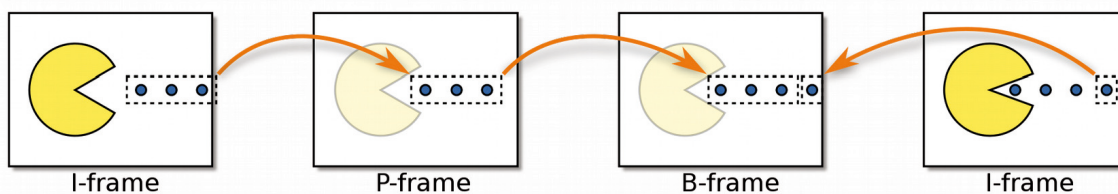
Fotogramen arteko erredundantzia kentzeari *denbora-erredundantzia kentzea*, ***inter-frame trinkoketa*** edo *mugimenduaren konpentsazioa* esaten zaio. Edozein kasutan, ideia honako hau da: pixel batean balio bera badago elkarren jarraian dauden hainbat fotogramatan, ez da behin eta berriro kodetzen pixel horren balioa. Hobe izaten da pixel horren balioa behin bakarrik kodetu, eta, gero, hainbat fotogramatan jarraian errepikatzen dela azaltzea. Harago joanda, inter-frame kodeketa era diferentzialean egiten da, hau da, ez da fotogramarik kodetzen, baizik eta fotogramen arteko aldeak. Horren erabilgarritasuna ulertzeko adibide ona da pilota-partidarena, non jokalariei eta pilotari dagokien irudiaren zatia soilik aldatzen den. Pantailaren atzean gelditzen den irudia finkoa denez, nahikoa litzateke hasieran kodetzea, eta gero jokalarien eta pilotaren mugimenduak besterik ez kodetzea. Horrela eginez gero, bideoa kodetzean erabilitako bit kopurua ikaragarri jaitziko da.

Kodetutako informazioa gutxitzearen bideoa trinkotzeko sistemek eman duten hurrengo urratsa honako hau izan da: mugimendua kodetzeko, hurrenkeran dauden fotogramen arteko aldeak kodetu ordez, zenbatetsi hurrengo fotograma, eta kodetu zenbatetsitako fotogramaren eta benetako fotogramaren arteko aldea. Kodetzaileak mugitzen ari den irudiko zatiaren mugimenduari bektorea zenbatesten du; hau da, pixel talde baten desplazamendua kalkulatu du, aurreko irudietan izandako kokapenetan oinarrituta. Bektore horrekin eta aurreko irudi batetik abiatuta, hurrengo irudietan pixel talde horren kokapena zein izango den kalkulatu du kodetzaileak. Pilota-partidaren kasuan, adibidez, pilota azaltzen duten pixelen hurrengo kokapena zein izango den zenbatesten du. Azkenean, hurrengo irudian pilota benetan non dagoen eta zenbatetsitako kokapenaren arteko aldea kalkulatu eta kodetzen da. Zenbatespena oso ona baldin bada, alde hori zero izango da. Kodetutako bideoan zeroko segida luzeak agertzea lortzen badugu, erraza izango da segida horiek ordeztzea bere luzerarekin, eta, horrela, azkenean, oso bit gutxi beharko dira bideoa kodetzeko. Zenbat eta zenbatespen hobea egin, orduan eta errealtatearekiko alde txikiagoa agertuko da, eta, ondorioz, trinkoketa handiagoa lortuko dugu. Hor dago matematikarien lehia: ea nork asmatzen duen zenbatespena egiteko funtziorik zorrotzena.

Aurreko ideietan oinarrituta, bideo-kodeketarako sistemetan, honako hiru mota hauetako fotogramak erabiltzen dira:

- I-frame izenekoak (*Intracoded frame*). Irudi estatiko trinkotuak dira. Hau da, ahal den erredundantzia espazial gehiena kentzen zaie. Halako fotogramak erreproduzitzeko ez da beste fotogramarik behar; hau da, I-frame fotograman bertan dugu fotograma hori erreproduzitzeko behar den informazio guztia. I-frameak ondoko beste era bateko fotogramak kodetzeko eta erreproduzitzeko oinarriak dira.
- P-frame izenekoak (*Predictive frame*). Irudiaren mugimendua kodetzen dute aurreko fotogrametan oinarrituta. P-frame bat kodetzeko eta gero erreproduzitu ahal izateko, aurretik I-frame bat behar da gutxienez. I-frame horretatik kodetu daitezke geroko P-frameak. Lehen deskribatu dugun bezala, P-frameetan zenbatetsitako irudiaren eta benetakoaren arteko aldea kodetzen da. *Delta fotogramak* ere esaten zaie, matematikan *delta* hitz grekoa erabiltzen baita alde txikia azaltzeko.
- **B-frame** izenekoak (*Bidirectional frame*). P-frameak bezalakoak dira, hau da, beste fotogrametatik eratorriak. Baina, B-frame fotogramen kasuan, erreferentziarako hartutako beste fotogramak aurrekoak edota gerokoak izan daitezke.

1.17 irudian, bideo baten lau fotograma ditugu. Hasierakoa eta azkena I-frameak dira; bigarrena, P-frame bat da, lehen I-frameetik eratorria; eta hirugarrena, B-frame bat, lehenengo eta azken I-frameetatik eratorria. Bigarren eta hirugarren fotogrametan, soilik pastillak kodetu dira, besterik ez baita mugitzen fotograma batetik bestera. Hirugarrenean, hasierako hiru pastillak aurreko fotogramatik eratorri dira, eta laugarren pastilla geroko fotogramatik hartuta dago, beraren posizioa birkalkulatuta.



1.17 irudia. Era desberdinetako bideo-fotogramak sekuentzian: I-frameak, P-frameak eta B-frameak.

JPEG estandarra aztertzean ikusi dugunez, irudi estatikoak kodetzeko erabilitako unitate funtzionala $N \times N$ pixeleko blokea da. JPEG estandarrean, halako blokeei *MCU bloke* (*Minimal Coding Unit block*) deritze; baina, orokorrean, bideoa kodetzeko sistemetan, *makroblokeak* esaten zaie. H.264/AVC sisteman egiten den mugimenduaren kodeketa halako makrobloketan datza, eta ez fotogrametan. Berez, kodeketa diferentziala ez da egiten fotograma osorako, baizik eta fotograma osatzen duten makroblokeen arabera. Horrela izanik, I-frameetan, I-makroblokeak egoten dira soilik; P-frameetan, I-makroblokeak eta P-makroblokeak agertzen dira, eta B-frameetan, hiru motatako makroblokeak: *Intra*, *Predicted* eta *Bidirectional* makroblokeak, alegia. HEVC/H.265 kodeketa berriagoan, CTU (*Coding Tree Unit*) izeneko unitate funtzionalak ordeztu du makroblokea.

Bideo-kodeketarako estandarrak

Bideo-kodeketarako estandarrek zehazten dituzte fotogramen formatuak eta haien unitate funtzionalen egitura, hau da, erreproduzitzailak jasoko duen bit-sekuentziaren sintaxia. Izan ere, *bideo-kodeketarako formatuak* ere baderitze. Formatu horrekin batera, erabilitako trinkotze-sistema ezartzen dute, baina ez, ordea, haren inplementazioa (hau da, kodetzailea). Inplementazioaren zehaztasun asko bideo-kodetzailea diseinatu behar duenaren eskuetan uzten dituzte,

nahita. Adibidez, kodetzaile batetik bestera aldatu egiten da mugimenduaren bektoreak nola zenbatetsi edo DCT bihurketarako parametroak nola hartu. Askatasun horrek kodetzaileen arteko lehia elikatzen du. Denek formatu estandarreko bideoak sortuko dituzte, edozein erreproduzitzailerik ulertzeko modukoak; baina gerta daiteke kodetzaile batek beste batek baino azkarago egitea lan hori, edota trinkotze-maila altuagoa lortzea digitalizatutako bideoan.

Bideo digitalizatuaren Internet bidezko banaketa hedatzearen ondorioz, bideoa kodetzeko erabilitako sistemak eta formatuak berrikusi behar izan dira. 1993. urtetik, **MPEG** estandarrak (*Motion Picture Experts Group*) izan dira nagusiak bideo-kodeketan, baina, egun, beste aukera batzuk ere indarra hartzen ari dira. AOMedia (*Alliance for Open Media*) taldeak doako bideo-kodeketarako estandarrak sortzen ditu, MPEG taldekoen alternatiba izateko asmoz. Beren lehenengo proposamena AV1 izan da (*AOMedia Video 1*). Bi taldeek argitaratutako estandarren arteko alde teknologikoa ez da handia, hemen azaldutako ideia orokor beretan oinarritzen baitira bietan, eta antzeko emaitza lortzen dute. Testu hau idaztean ikusteke dago zein bideo-kodeketa nagusituko den hurrengo urteetan, MPEG ala AOMedia taldekoa, baina, oraingoz, gehien erabiltzen dena H.264/AVC zaharra da, 2003. urtean MPEG-4 estandar sortaren barruan argitaratu zutena. Horren ondorengo H.265/HEVC da, 2013. urtean definitua; baina, teknikoki hobea izan arren, ez du lortu H.264/AVC ordezkatzeari, neurri handi batean bere lizentziarekin lotutako arazoengatik. 2020. urtean serie bereko hurrengo alea argitaratu dute, H.266/VVC izenekoa. Estandar berriek kodetze-prozesuari xehetasun txiki pila bat gehitu dizkiote emaitza hobetzeko, baina, berez, prozesu horren muina ez da aldatu. Ondoan, MPEG-4 estandar sortaren ingurukoak azalduko ditugu.

1.5 taula. MPEG bideorako estandarren alde nagusiak.

Estandar-bilduma	Zatia	Zertarako	Erabilitako izena	Alternatiba baliokideak
MPEG4	Part 2	Bideo-kodeketa	MPEG-4 part 2	
	Part 10	Bideo-kodeketa	H.264/AVC	VP8
	Part 14	Edukiontzia	.mp4	WebM .ts .flv .avi 3gp ...
MPEG-H	Part 2	Bideo-kodeketa	H.265/HEVC	VP9
MPEG-I	Part 3	Bideo-kodeketa	H.266/VVC	AV1

MPEG-4 audiorako eta bideorako estandarraz mintzatzean, lehenengo urratsak izendegia argitzea izan behar du. Estandarra hainbat zatitan dago egituratuta; egun, 30etik gora. Kodeketari dagokionez, garrantzitsuenak hauek dira: MPEG-4 part 2 (DivX, Xvid, edo QuickTime6 kode-tzaileek erabilia, besteak beste) eta MPEG-4 part 10, hamarkadetan bideoa kodetzeko gehien erabili izan den H.264/AVC kodeketa definitzen duena. Beste alde batetik, MPEG-4 part 14 zatia ere aipatu behar dugu, hor definitzen baita MP4 kontainera. Bideo-kodeketan zentratuz, MPEG-4 part 10 estandarra bi erakundek garatu zuten elkarlanean, baina ez ziren ados jarri izen bakar bat emateko estandarriari. Alde batetik, ISO/IEC erakundearen MPEG taldeak MPEG-4 Part 10 Advanced Video Coding (AVC) izena erabiltzen du, eta, bestetik, ITU-T (*International Telecommunications Union*) erakundeak H.264 izena ematen dio. Askotan, bi izenak konbinatuta erabiltzen dira: AVC/H.264, eta baita H.264/AVC ere.

H.264/AVC kodeketak aurretik zeuden MPEG-1 eta MPEG-2 hartu zituen abiapuntutzat. Haren helburua aurreko estandar horiek lortzen duten trinkoketa bikoiztea zen, kalitaterik galdu gabe eta implementazioa garestitu gabe. Lehenengo bertsioa 2003. urtean osatu zuten, eta, geroztik, etengabeko bilakaera izan du. Berez, ez da kodeketa-sistema bat, baizik eta sorta bat, kodetzeko zenbait aukera zehazten dituena. Aukera horiek profiletan (*profile*) egituratzen dira, eta profil ba-

koitzean hainbat maila (*level*) egon daitezke. Egindako inplementazioek (hau da, kodetzaileek) aukera horietako batzuk erabiltzen dituzte, helburuaren arabera. Hortaz, desberdinak izango dira bideoaren edizio profesionalerako egindako codec bat eta etxean HDTV jasotzeko egindakoa, baina biek beteko dute H.264/AVC estandarra. Ez dirudi inork estandar osoaren inplementazioa egiteko beharrik izan duenik. Lortutako konpresioa faktore askoren menpekoa da, baina erreferentzia gisa 50:1 trinkoketa aipatzen da.

Laburpena

Internet ez da sare bat, sare osatutako sarearte baizik. Hiru sare mota agertzen dira Interneti lotutako makina batetik bestera informazioak egiten duen bidean: jatorrizko eta helburuko sare lokal informatikoak, sare lokal horiek Interneterako erabiltzen dituzten sarbide-sareak (telekomunikazio-sareak) eta Internet-hornitzaileen sareak (ISPen sareak, txikizkariak zein handizkariak).

Sare horiek guztiak fisikoki lotuta egoteaz gain, beharrezkoa da arau multzo batek haien arteko komunikazioa bermatzea. Hori da, hain zuzen, TCP/IP protokolo sortaren zeregina. Protokolo horiek zera definitzen dute: zer formatu eman behar zaion informazioari Interneten zehar bidaltzeko, eta zer urrats egin behar diren informazio hori beste aldera heltzeko. Informazioa garraiatzeko oinarria IP protokoloak definitutako datagrama da, hori baita edozein sare-teknologiak onartzen duen informazio-paketea. Baina, komunikazioan agertzen diren beste arazo askori heltzeko, badaude beste protokolo batzuk. Sare bereko makinaren artean, datagramak garraiatzeko sarbide-mailako protokoloak erabiltzen dira. Protokolo horiek sare-teknologiaren arabekoak dira, ez baita gauza bera kable bidezko Ethernet sare lokal baten barruko komunikazioa eta distantzia handiko PPP linea batena. Interneten zehar datagrametan izaten diren gorabeherak kontrolatzeko, TCP protokoloa erabiltzen da, edo, arintasunak lehenetsia duenean, UDP protokoloa. Azkenik, aplikazio bakoitzak badu bere protokolo propioa, aplikazioaren beharren arabera, makina batean baino gehiagotan kokatutako sare-aplikazioaren zatiek elkarrekin hitz egiteko.

Internet bidezko transmisioak baditu mugak. Aplikazio bakoitzak behar duen abiadura asetzeari da nagusia. Gainera, sareak atzerapena eragiten du, eta, IP protokoloaren izaeragatik, eragindakoa atzerapen hori oso aldakorra izan daiteke igorritako datagrama batean edo hurrengoan. Azkenik, gerta daiteke datagramak sarean galtzea. Halako arazoak kontuan hartu behar dira Internet erabiltzen dugunean gure multimedia-komunikazioetarako.

Multimediako sare-aplikazioak soinua, bideoa eta animazioak Internet bidez garraiatzen dituzten aplikazioak dira; baina, gainera, audio- eta bideo-seinale horiek unean-unean erreproduzitzen dira. Berez, definizio horretan ez dira sartzen audio- edo bideo-deskargak; soilik seinalea jaso ahala seinale hori erreproduzitu behar dutenak hartu dira, liburu honetan, multimedia-aplikaziotzat. Alegia, audio- eta bideo-streaminga, Internet bidezko telefonia (VoIP) eta sare-jokoak.

Audioa eta bideoa Internet bidez trukatzeko, ezinbestekoa da seinale horiek era digitalean bilakatzea. Seinale analogikoak digitalizatzeko, honako hiru urrats hauek ematen dira: laginketa, kuantizazioa eta kodeketa. Lortutako bit multzoaren tamaina gutxitzea ere behar-beharrezkoa da, sareak gainezka egin ez dezan. Gutxitze hori trinkoketa da, eta kodetzaileak egiten du.

Soinua digitalizatzeko sistemak bitan bereizten ditugu. Alde batetik, gizakiak sortutako soinuak hartzen dituztenak daude, hau da, ahotsaren kodeketa. Eta, bestetik, gizakiak entzun dezakeen soinuaren digitalizazioa dugu. Horri *audioaren kodeketa* deritzaio. Bideoa digitalizatzeko, bi urrats egiten dira. Lehena, irudi estatikoak kodetzea, eta bigarrena, irudiaren mugimendua kodetzea. Bi urrats horietan lortutako trinkotze-maila altuari esker ikus ditzakegu bideoak Interneten.

1. kapituluko ariketak: audioa eta bideoa Interneten

- 1) Honako hauen artean, zeinek dute multimedia izaera?
 - Notario-eskritura bat.
 - Telefono-elkarrizketa bat.
 - Zinema mutua.
 - Bideokonferentzia bat.
 - Entziklopedia bat (liburukotea).
 - Web-orri bat.
 - Telebista-programa bat.
 - Grabatutako abesti bat.
 - Film bat.
 - Irratsaio bat.
- 2) YouTuben ikusitako bideo bat. Honako hauen artean, zein dira Interneteko multimedia-aplikazioak?
 - Notario-eskritura bat, webgune batean atzigarria.
 - Internet bidezko telefono-elkarrizketa bat.
 - P2P bidez lortutako zinema mutuko film bat.
 - Internet bidezko bideokonferentzia bat.
 - Wikipedia.
 - Internet bidezko telebista-programa bat.
 - Webgune batetik jaitsitako abesti bat.
 - Webgune batetik jaitsitako film bat.
 - Internet bidezko irratsaio bat.
 - YouTuben ikusitako bideo bat.
- 3) Demagun Internet bidez jasotzen ari garela zuzeneko ekitaldi baten transmisioa. Erreproduktzio-abiadura 1 Mb/s da. Gure sareko konexioa Gigabit Ethernet da. Igorlearena 10 Gb/s-koa da. TCP konexio bat erabiltzen da. Erantzun honako galdera hauek:
 - (a) Zein da TCP-konexio horretan neurtuko dugun abiadura maximoa?
 - (b) Demagun seinalea ez dela ondo ikusten edo entzuten. Azaldu zein izan daitekeen arazoa.
 - (c) Demagun igorritako datagrama bakoitzak 10.000 bit dituela. Zenbat denbora beharko du igorleak datagrama bat sarean jartzeko?
 - (d) Zenbat denbora beharko du hartzaileak datagrama hori saretik jasotzeko?
 - (e) Zenbat datagrama igorriko ditu igorleak segundo batean?
 - (f) Egin denbora-grafiko bat (marra horizontal bat, unitatea = 10 ms), eta hor markatu (gutxi gorabehera) igorleak fisikoki transmititzen emandako denbora. Idem hartzailearekin.
 - (g) Demagun sare-atzerapena, batez beste, 100 ms-koa dela. Zenbat datagrama daude, batez beste, sarean zeharreko bidaian?
- 4) Testuan ikusi dugunez, musika digitalizatzeko laginak 44,1 kHz-ean hartzen dira. Demagun laginak hartzen ditugula 60 kHz-ean. Gutxituko al dugu horrekin digitalizazioak eragindako errorea seinalea berreraikitzean? Hobetuko al dugu gizakiak atzemandako soinuaren kalitatea?
- 5) IP telefonian, telefono-sare klasikoetan ez bezala, soinuko laginak askotan 16 kHz-ean hartzen dira (8 kHz-ean telefono-sare klasikoetan). Jakinda gizakiaren ahotsak 4 kHz-etik gorako frekuentzia gutxi sortzen dituela, eta laginketa-teorema kontuan hartuta, nola justifika daiteke IP telefonian laginketa-abiadura bikoiztea?

- 6) Izan bedi digitalizazio-sistema bat, 3 biteko kuantizazio-uniformea erabiltzen duena. Taula honetan duzu egindako kuantizazioa.

Jatorrizko seinalearen balio-tartea (volt)	Agertzeko probabilitatea	Esleitutako kuantizazio-balioa (volt)	Kuantizazio-tartean eragindako errorea
[0 → 1)	0,125	0,5	
[1 → 2)	0,125	1,5	
[2 → 3)	0,125	2,5	
[3 → 4)	0,125	3,5	
[4 → 5)	0,125	4,5	
[5 → 6)	0,125	5,5	
[6 → 7)	0,125	6,5	
[7 → 8]	0,125	7,5	

- (a) Grafiko bat egin, taulan agertzen den jatorrizko seinalea eta kuantizatutako balioaren arteko erlazioa azaltzeko.
- (b) Taula osatu, kuantizazio-tarte bakoitzean eragindako batez besteko kuantizazio-errorea zehaztuz, eta kalkulatu zein izango den berreraikitako seinalean eragindako batez besteko kuantizazio-errorea.
- (c) Gehitu azken zutabe bat taulari, kuantizazio-balio bakoitzari esleitutako kodea jasotzeko. Demagun jatorrizko seinalearen tarteen probabilitatea ez dela bera tarte guztietan, eta honako taula honetan agertzen den beste kuantizazio bat egiten dela, kasu honetan uniformea ez dena:

Jatorrizko seinalearen balio-tartea (volt)	Agertzeko probabilitatea	Esleitutako kuantizazio-balioa (volt)	Kuantizazio-tartean eragindako errorea
0 → 2	0,025	1	
2 → 4	0,025	3	
4 → 5	0,075	4,5	
5 → 6	0,075	5,5	
6 → 6,5	0,2	6,25	
6,5 → 7	0,2	6,75	
7 → 7,5	0,2	7,25	
7,5 → 8	0,2	7,75	

- (d) Egin beste grafiko bat, taula berriaren kuantizazioa azaltzeko.
- (e) Errepikatu (b) ariketa, taula berriarekin.
- 7) Izan bedi digitalizazio-sistema bat, kuantizazio uniformea erabiltzen duena, 256 kuantizazio-balioekin (8 bit). Demagun digitalizatutako seinalearen analisiak erakusten duela seinaleak dituen balio-tarte posibleen artean erdia agertzen dela 0,95 probabilitatearekin, eta beste erdia, aldiz, soilik 0,05 probabilitatearekin. Kalkula ezazu zenbatean gutxituko litzatekeen kuantizazio-errorea, erabilitako eskalak honela banatzen baditu 256 kuantizazio-balioak:
- (a) 0,95 probabilitatea duen balio-tartea kuantizatuzko, 192 balio esleitzen ditu (balioen hiru laurden);
- (b) 0,05 probabilitatea duen balio-tartea kuantizatuzko, beste 64 balio esleitzen ditu.

- 8) Demagun seinale baten digitalizazioan 4 balio erabiltzen direla kuantizazioan. Kodeketarako Huffman kode bat erabiliko da, honako taula honetan agertzen diren kodeak erabiliz. Kalkulatu zenbatekoa izango den kodeen batez besteko luzera.

Balioa	Agertzeko probabilitatea	Kodea
A	0,55	1
B	0,30	10
C	0,10	110
D	0,05	1110

- 9) Irudi bat digitalizatu dugu 640×480 bereizmena erabiliz. Kalkulatu pixelaren tamaina (1) 8×6 cm-ko mugikor baten pantailan, (2) 6×4 m-ko zinemako pantaila batean. Ondorioak atera bereizmenari eta irudiaren tamainari dagokienez. Nola eragingo dio ikuslearen eta irudiaren arteko distantziak erabilitako bereizmenari?

- 10) Lotu akronimo bakoitza dagokion kontzeptuarekin:

— AVC	— JPEG	— WebM
— AAC	— P-frame	— MP3
— ITU	— Opus	— G.726
— Intraframe erredundantzia	— Intraframe erredundantzia	— AV1
— VP8/VP9	— ISO/IEC	— H.264
— MPEG-4	— PCM	— SILK
— bpp	— H.265	— UHD TV
— MP4	— G.729	— G.711

1. Tebista digitalerako formatu bat, HDTVren ondorengoa. 4K ere deitua.
2. Ahotsa kodetzeko estandarra, telefono-sare digital zaharrean erabilia (64 Kb/s). PCM izenarekin ere ezagutua.
3. Soinua kodetzeko estandarra, MPEG-1 estandarren 3. atala.
4. Bideoa kodetzeko estandar multzo bat, AVC izenarekin ere ezagutua.
5. Ahotsa kodetzeko estandarra, telefonia mugikorrean eta VoIP-n erabilia (abiadura tipikoa: 8 Kb/s). Vocoder teknologian oinarritua.
6. Audio eta bideo digitalerako estandar multzoa.
7. Bideoa kodetzeko estandarra, MPEG-4 taldeko 10. zatian definitua.
8. MPEG-4 estandarretan definitutako bideo-kontainer formatua.
9. Zirkuitu-kommutazioko telefono-sare digitaletan erabilitako ahots-kodeketa.
10. Soinua kodetzeko estandarra, MP3 ordezkatzeko egina.
11. Irudi estatikoak kodetzeko estandarra.
12. Bideo-kodetzailea, Google jabea duena.
13. Ahots-kodetzaile diferentziala, DECT telefonoetan erabilia (32 kb/s)
14. G.xxx erako izena duten estandarrak egiten dituen nazioarteko erakundea.
15. MPEG estandarrak egiten dituen erakunde nagusia.
16. VP8/VP9 bideorako erabilitako kontainera.
17. Bideoa kodetzeko estandarra, MPEG-H 2. zatian definitua. Bere beste izena HEVC da.
18. Audioa kodetzeko formatu irekia, galeraduna, IETFk estandarizatua, eta .ogg edukiontzia normalean erabiltzen duena. Vocoder teknologian oinarritua.
19. Skypen garatutako ahotsa eta audiorako formatua, Vocoderren teknologian oinarritua.

20. Bideo edo irudi digitalen kolorearen sakonera adierazten duen parametroa.
21. Bideo digital batek duen denborazko erredundantzia.
22. Bideo digital edo irudi batek duen erredundantzia espaziala.
23. Aurreko fotogrametatik eratorriko fotograma baten digitalizazioa.
24. Bideo digitala kodetzeko formatu irekia, AOM erakundeak estandarizatua, irekia eta VP9, AVC edo HEVC baino trinkoketa handiagoa lortzen duena.

Bideoa eta telebista Interneten

Kapitulu hau irakurri eta gero, irakurleak honako gai hauek jakingo ditu:

- Nola lortzen den Internet bidez kalitatezko bideoak eta telebista banatzea, *best effort* erako sarea izanda ere.
 - Nola funtzionatzen duen streaming-sistema batek.
 - Zer aukera dauden streaminga transmititzeko eta seinalea Interneten barreiatzeko.
 - Zer aldaketa ari den ekartzen Internet telebista-mundura.
-

XX. mende osoan eta orain dela gutxi arte nagusia izan den telebista-eredua hedatutako telebista da (*Broadcast TV*). Ikuslearen ikuspuntutik, haren ezaugarri nagusia izaera programatua da; hau da, saio bat aurretik *programatutako* egun eta ordu zehatz batean ikus daiteke soilik. Hortik sortu zen *telebistako programa* terminoa, saio bat izendatzeko erabilia. Beste ezaugarri oso garrantzitsu bat zentralizatua izatea da. Hasieran, monopolio publiko bat zen: herri bakoitzean, estatuak kudeatutako telebista-kate bakarra zegoen; gero, estatu-mailako beste telebista-kate batzuk sortu ziren, eta, geroago, kate pribatuak ere onartu ziren. Hartara, oligopolio bat sortu zen. Publizitateak ekarritako diru mordoak elikatu du telebista, baina hori ere gutxiren esku egon da beti: alde batetik, estatuaren esku, eta, beste alde batetik, lizentzia pribatuak eskuratu zituzten talde ekonomiko handien esku. Telebista hedatuak ikaragarriko eragina izan du ekonomian, kulturen eta politikan xx. mendean, oso bide eraginkorra izan baita jendearengana heltzeko. *Mass media* terminoaren esanahia bete-betean gauzatu da telebista hedatuaren garaian, prentsa idatzia eta irratia guztiz gaindituta. Banaketarako teknologiarik eta sareari dagokienez, telebista hedatuak uhinak erabili izan ditu hasieratik, lurreko antenen bidez. Uhinez gain, zenbait herritan kable ardazkide bidez garraiatu da seinalea igorletik etxeetarako bideko azken zatian. Urteetan, seinale analogikoa erabili izan da telebista hedatuan, baina, azken hamarkada hauetan, modu digitalean banatzen da. Telebista-hargailu gisa, oraindik etxe askotako egongelako erregea den aparatu hori erabili izan da. Urte horietan guztietan, bere bilakaera teknologikoa handia izan da: zuri-beltzetik kolorekora, CRT tutuetatik egungo LED teknologia lauetara.

Banaketa-sarean izandako aldaketen eraginez, telebista kontzeptua eta errealitatea aldatu egin dira. Lehen aldaketa esanguratsua satellite bidezko telebista izan zen. Horri esker, hedatutako kate kopurua eta igorle baten hedatze-esparrua ikaragarri handitu ziren, estatu-mailako monopolioen kalterako. Gainera, kable bidezko banaketa gehitu zitzaion satellite bidezko transmisioari. Horrek telebistaren bigarren aroari atea ireki zion, eta berrikuntza handi bat ekarri: bideoak eskatu ahala ikusteko ahalmena (**VoD, Video on Demand**), eta, horrekin batera, ikusitakoaren araberako ordainketa (**pay-per-view**). Hori baino lehenago, bazegoen bideoak etxean ikusteko aukera, baina fisikoki ekarri behar zen bideoa etxera, eta bideo-erreproduzigailua telebistari lotu. VoD kontzeptuari esker, saretik jasotzen dira bideo horiek. Bideo-kluben gainbehera hasi zen orduan, baina oraindik sendo zeuden, *pay-per-view* sistemen arrakasta mugatua izan baita. Nolanahi ere, ikusleak programazio hedatutik askatzen hasi ziren, bi bidetatik: alde batetik, VoD sistema erabiliz, eta, batez ere, ehunka kanal eskura edukita, batetik bestera gustuko saio baten bila jauzi eginez, edo, batez ere, gehiegizko publizitateki ihesi. VoD sistemarena baino gehiago, *zapping*aren aroa izan da telebistaren bigarren aroa.

Internetek telebistaren hirugarren arora eraman gaitu, non *telebista* hitzaren esanahia bera ere ez baitago argi. Tableta batean bezperako saio bat ikusten ari garela, telebista ikusten ari al gara? Eta, egongelako «telebista» horretan YouTubeko bideo bat ikusten dugunean, hori ere telebista ikustea al da? XXI. mendea norberaren telebistaren aroa da, norberak aukeratzen baitu zer, noiz eta nola ikusi (*everytime, everywhere, everyscreen*). Aro honetan, Internet da nagusi, haren bidez lortzen baita askatasun hori. Egongelako telebista *smart TV* izatera igaro da, Interneterako trena ez galtzeko. Beste banaketa-sareak ere (lurreko antenen sarea, sateliteak eta kableak) hor daude, baina etorkizuna Internetena da. Horretaraino heltzeko gakoak hiru izan dira. Lehena, bideoa kodetzeko teknikan izandako aurrerapena dugu; horri esker, askoz transmisio-abiadura txikiago behar da bideoak transmititzeko. Horretaz, aurreko kapituluan aritu gara. Bigarrena, sarbide-sareetan izandako hobekuntzak, kable bidezkoetan zein telefonia mugikorretarako sare zelularretan; ondorioz, askoz transmisio-abiadura handiagoa dugu eskura. Amaierako kapituluan aztertuko ditugu sarbide-sareak. Hirugarren gakoa streaming-teknologian izandako aurrerapenak dira. Horretaz arituko gara kapitulu honetan.

1. Streaming-teknikaren oinarriak

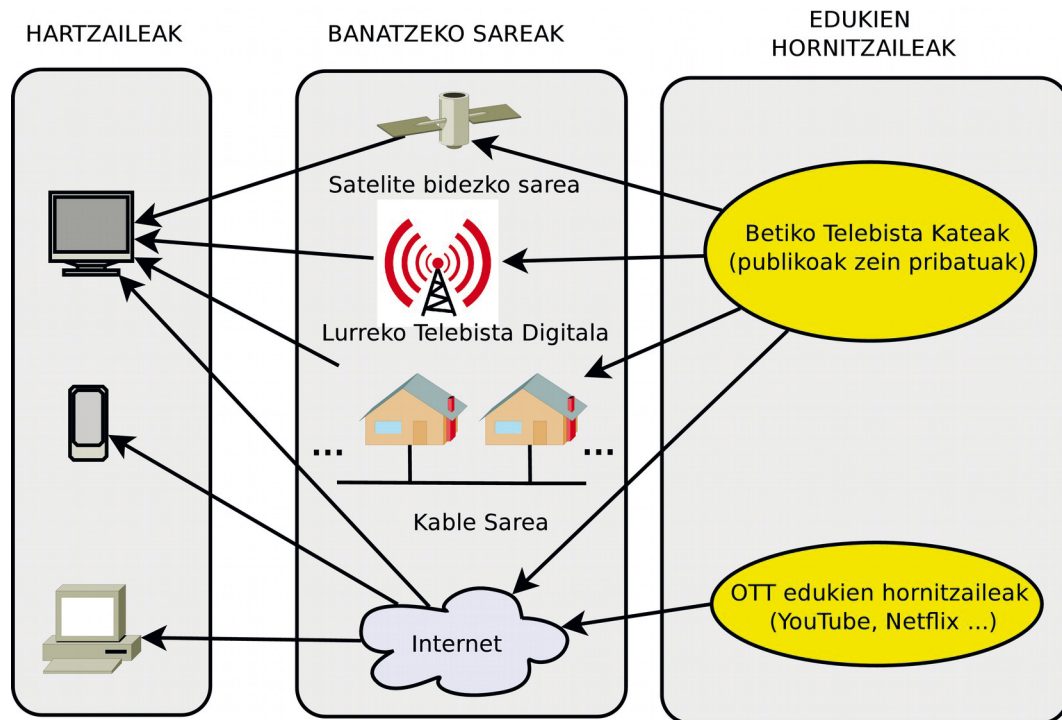
Nahiz eta streaming-teknika audioak edota bideoak banatzeko erabili, testu honetan bideoaz soilik mintzatuko gara, garbitasuna mantentzearren. Irratiari dagokionez, teknika berak erabiltzen dira, baina askoz banda-zabalera txikiagoa hartuta. Beste alde batetik, *telebista* terminoa erabiltzen dugunean, telebista-kate batek eskainitako saioak ikusteaz arituko gara, saio horiek aurretik grabatuak (filmak, dokumentalak, eztabaidak...) edo zuzenean sortu eta hedatutako saioak izanda ere (kirol-saioak, berriak...). *Bideo* hitz soila erabiltzen dugunean, pantaila batean ikusten dugun edozein ikus-entzunezkoz ari gara, betiere Internet bidez jaso bada, iturburua edozein izanda ere.

1.1. Internet bidezko bideo eta telebistarako osagaiak

Internet bidezko beste edozein zerbitzutan bezala, telebistaren eta bideoaren zerbitzuan hiru osagai agertzen dira: zerbitzua ematen duena, zerbitzua jasotzen duena eta bien arteko komunikaziorako sarea (Internet). Telebistaren eta bideoaren kasuak antz handia du web orokorraren kasuarekin; izan ere, harekin loturiko kasu partikulartzat har daiteke. Webean bezala, zerbitzua ematen duen partaideari **edukien hornitzailea** esaten zaio (*content provider*).

Hornitzaile mota asko dago:

- Edozeinek ekoiztutako bideoak banatzeko sistemak. Une honetan, haien artean erabiliena YouTube da. Halako sistemak etxean grabatutako bideo laburrak argitaratzeko garatu ziren, baina, gaur egun, edozein motatako bideo-saioak daude, baita zuzeneko saioak ere (*live streaming*).
- Betiko telebista-kateak, bai publikoak, bai pribatuak. Hasiera batean, seinalea banatzeko beste sare bat izan da Internet hornitzaile horientzat, antena, satelite edo kable bidezko banaketaren osagarria hartuta. Aldiz, egoera iraultzen ari da, eta Internet bidezko telebista aukeratzen duen erabiltzaile kopurua handitzen den heinean, beste sareak Internetaren osagarri bilakatzen ari dira.
- Interneterako soilik sortutako talde berriak. Akaso, ezagunena Netflix da. Aurrekoekiko alde bakarra da seinalea banatzeko erabiltzen duten sarea Internet besterik ez izatea.



2.1 irudia. Egungo telebista-sistemen osagaiak, tradizionalenak eta Internet bidezkoenak.

Zerbitzua jasotzen duenaren aldean, aipagarriena hargailuen aukera zabala da. Interneterako konexioa eta bideoak erreproduzitzeko ahalmena duen edozein gailu izan daiteke hargailua. Erabilienak honako hauek dira:

- Ordenagailu bat, web-arakatzailerak erabiliz bideoak ikusteko.
- Telefono edo tableta bat, bere arakatzailerak berezia erabiliz.
- Internetekin ibiltzeko prest dagoen telebista bat. Telebistak berak badu Interneterako konexio fisikoa (Ethernet txartela integratuta) eta behar den softwarea (funtsean, sistema eragilea eta web-arakatzailerak bat); *smart TV* esaten zaio. Gure telebista ez bada *smart* erakoa, era horretakoa bilakatu dezakegu *TV box* bat berari lotuta. Bestela, Internetarekin lotuta eta bideoak ikusteko ahalmena duen edozein gailutako pantaila gisa erabil dezakegu telebista: ordenagailu konbentzional bat, bideo-jokoetarako kontsolak, multimedia-erreproduzizigailuak (*home cinema* sistemak)...

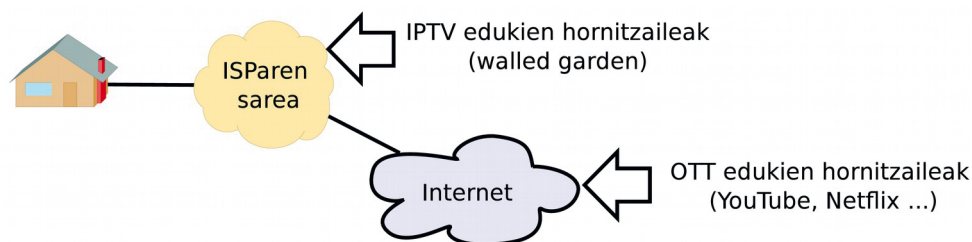
1.2. Internet bidezko bideo eta telebistarako ereduak

Bideoak edo telebista Internet bidez ikusten ditugunean, bi eratakoa izan daiteke edukien hornitzailearen, ikusleen eta ISPren arteko harremana: IPTV edo OTT erakoa.

IPTV (Internet Protocol TeleVision) terminorako definizio desberdinak agertu dira. Literalki, IP protokoloa erabiliz telebista-zerbitzua ematea esan nahi du. Definizio hori oso zabala da; izan ere, Internet bidez transmititzen den telebista oro hartzen du. Baina, gehienetan, IPTV aipatzen denean, telebista-seinalea banatzeko IP sare bat erabiltzeaz gain, esan nahi da telebista-seinaleak tratamendu berezia izango duela IP sare horretan, bere kalitatea bermatzearen. Bigarren esanahi murriztuago hori ISPek erabiltzen dute bereziki, beren zerbitzua eta Internet irekiaren bidez emandakoa bereizteko. Hemen definizio hori hartzen dugu IPTV ereduaz mintzatzen garenean.

IPTV ereduari, edukien hornitzailea eta ISP ez dira bereizten ikuslearentzat, ISPk eskaintzen baitie ikusleei telebista-zerbitzua, beste zerbitzu batzuekin batera. Internet-sarbidea, telefonia-zerbitzua eta telebista batera eskaintzen dituen pakete komertzialari *Triple Play* deritzaio. Edukien hornitzaileak edukia zuzenean sartzen ditu ISPren sarean, eta horrek ikuslearenganaino eramaten ditu, Internet irekian ibili gabe. Horrela eginda, ikusleak bere pantailan lor dezakeen kalitatea hobea izaten da, bi arrazoiengatik. Alde batetik, seinalea erabiltzaileen sarean zuzenean txertatuta, Internet irekian ager daitezkeen atzerapenak eta galerak ekiditen dira, eta, ondorioz, sareak eragindako kalitate-galera minimizatzen da. Beste alde batetik, iturri horretatik sartutako trafikoari tratamendu berezia eman diezaiolke ISPk, beste kapitulu batean aztertuko ditugun teknikak erabiliz. Abantaila horiek soilik ISPren hitzarmena duten edukiek izango dituzte, bere saretik ateratzen ez direnek, eta ez Internet bidez atzigarriak diren eduki guztiek; horregatik esaten da IPTV ereduari *walled garden* erakoa dela, hau da, eredu itxia. ISPk zerbitzua emateagatik kobratzen duen kuotaren zati bat edukia zuzenean isurtzen dituzten edukien hornitzaileei helarazten die.

IPTVren alternatiba OTT ereduari da (*Over The Top*), batzuetan *Internet TV* edo *online TV* ere bideritzaio. Gakoa konexioa ematen duen ISPren eta zerbitzua ematen duenaren arteko bereizketan dago. OTT ereduari, edukien hornitzailearen eta ISPren artean ez dago inongo harremanik, eta edukien hornitzaileek isuritako trafikoaren tratamenduari *best effort* hutsa da ISPren sarean, hau da, beste edozein datagrama jasotzen duen berbera. Ikusleak ordaindu egin behar badu ikusitako saio edo pelikula bat, zuzenean ordainduko dio edukien hornitzaileari, eta ez ISPren bidez. OTTren adibiderik ezagunena Netflix da. Askotan, OTTaren elkarlanean aritzen dira *smart TV* gailuen ekoizleekin, telebista horietan aurkituko dugun arakotzailea optimizatua izan dadin OTTren zerbitzaritik bideoak ikusteko.



2.2 irudia. Internet bidezko bideoa eta telebista: IPTV eta OTT ereduak.

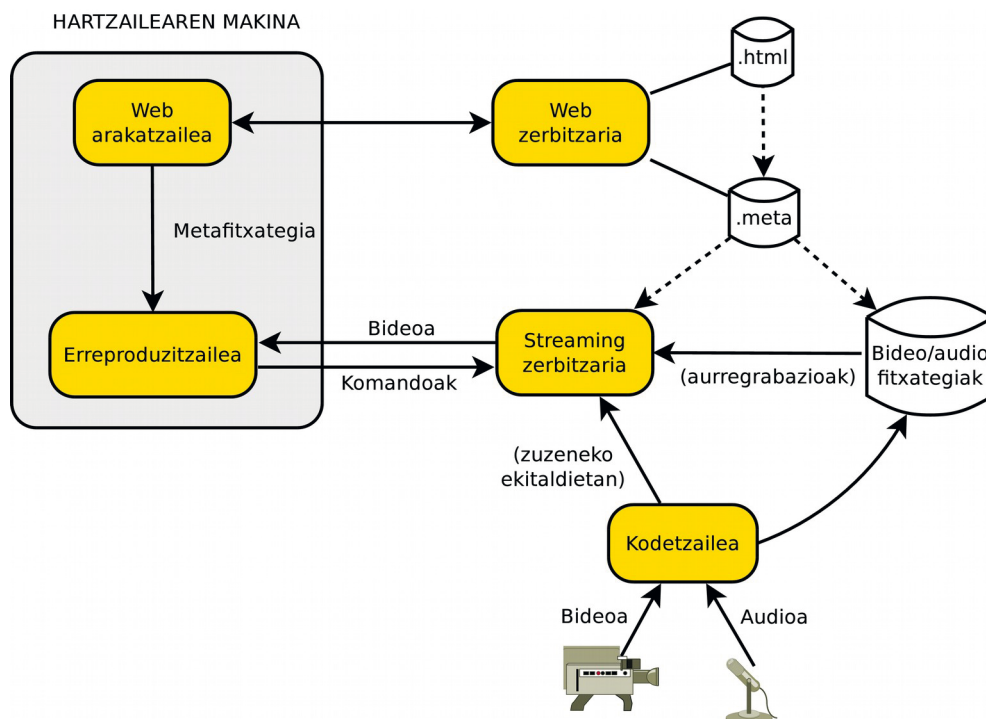
OTT kontzeptua ez da agertu Internet bidezko telebistarekin batera. Betiko telefono-konpainiek ondo ezagutzen dute lehenagotik, beren negozioaren etsai bilakatu baita. Telefoniaren arloan, adibidez, Internet bidezko telefoniak konpetentzia egiten die betiko konpainiei OTT ereduari jarraituz, erabiltzaileentzat nahikoa baita Interneterako konexioa edukitzea hortik telefono-zerbitzua jasotzeko, ISPren menpe egon gabe. Akaso, argiagoa da mezularitzaren kasua, non Whatsapp eta antzeko OTT erako aplikazioek amaiera eman baitiote telefono-konpainientzako hain errentagarria zen SMS zerbitzuari.

1.3. Streaming-sistemen osagaiak

Osagai hauek ditu oinarritzko streaming-sistema batek:

- **Streaming-zerbitzaria:** erreproduzitzailen eskaerak jaso eta streamak bidaltzen ditu. Bi iturri izan ditzake: aurretik grabatutako bideoak, edo unean kodetzaile batek sortuak (*live streaming*). Askotan, *media server* izenarekin ere aurkituko ditugu.
- **Kodetzailea:** honen lana da kamerek eta mikroek jasotako seinalea streaming eran zerbitzatzeko formatuan prestatzea. Sortutako streama gorde egin daiteke, aurretik grabatutako moduan zerbitzatzeko, edo unean bertan streaming-zerbitzariari helarazi, berak erreproduzitzaileri bidaltzeko.

- **Erreproduzitzailea:** eskaerak bidaltzen dizkie streaming-zerbitzariei, eta haien streamak jaso eta erreproduzitu behar ditu. Horretarako behar duen informazio guztia streamaren deskripzioa duen metafitxategi batean biltzen da (*manifest file* ere baderitzo). Askotan, web-arakatzailak berak egingo du erreproduzitzailearena.
- **Metafitxategia:** streama jasotzeko behar diren datuak gordetzen dituen fitxategia. Hor gordezen dira streaming-zerbitzariaren helbidea, eta bideo- eta audio-aukerak, kodeketa-sistema eta kalitate bat baino gehiago eskainiz. Normalean, ikusleak bere web-arakatzaille arrunta erabiltzen du metafitxategia eskuratzeko, HTML esteka batean txertatuta egoten baita. Izan ere, ikuslearentzat, bideo bat edozein esteka bezalakoa da: gainean klikatu, eta, handik gutxira, begien aurrean izango du bideoa.
- **Web-zerbitzaria:** Interneten dugun beste edozein edukitan bezala, web-zerbitzariak gordezen dituzte bideoak ikusteko behar diren estekak, hau da, metafitxategien URLak, web-orrien HTML formatuan txertatuta.



2.3 irudia. Oinarrizko streaming-sistema baten osagaiak.

2.3 irudiko web-zerbitzaria, streaming-zerbitzaria eta kodetzailea makina bakar batean egon daitezke, baina hori soilik sistema txikietan aurkituko dugu. Ikusle asko dituzten streaming-sistemetan, zenbait zerbitzariaren artean banatzen dira zereginak. Horrelakoetan, ohikoa da, alde batetik, web-zerbitzariak arakatzailarekin harremana izatea metafitxategiak eskaintzeko; beste alde batetik, streaming-zerbitzariak erreproduzitzaileak elikatzea, eta, beste makinetan, kodetzaileak buru-belarri aritzea streamak sortzen streaming-zerbitzariak elikatzeko.

1.4. IP zerbitzua eta bideoaren kalitatea

Aurreko kapituluan aipatu dugunez, streaming-sistemen arazo nagusietako bat da erreproduzitzean geldialdiak ekiditea. Horretarako, bideo bat erreproduzitzeko behar diren bitak eskura izan behar ditu beti erreproduzitzaileak, bideoa amaitu arte. Bideoa diskoan grabatuta badago ez dago

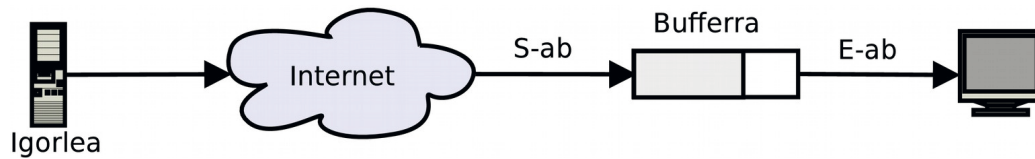
problemarik, baina gogoratu behar da streaming-sistemetan ez dela hala izaten, Internet osoa izan baitezakegu kodetutako bideoa gordetzen (aurretik grabatutako streaminga) edo sortzen (zuzenean emandako streaminga) duen igorlearen eta erreproduzizailearen artean. Igorleak kodetutako bideoa sartuko du, zatika, IP datagrametan, eta datagrama bakoitzak Interneten zeharreko txangoari ekingo dio. Normalean, datagramak erreproduzizailearen makinari helduko dira, banan-banan eta bata bestearen atzetik, atera ziren ordena berean eta beren arteko denbora-tartea berdintsua izanik. Baina gerta daiteke, eta gertatzen da, datagrama bakoitzak sare-atzerapen desberdina izatea bere bidaiari eta, ondorioz, erreproduzizailearen makinari sartzen den datagrama-korrontearen abiadura eta ordena aldakorak izatea. Horren eragina ulertzeko, ohartu zaitez erreproduzizailearen lana fabrika bateko kate batena bezalakoa dela. Datagrama batean dagoen filmaren zatia erreproduzitzen amaitu bezain pronto, hurrengo datagrama eskuratu behar du erreproduzizaileak, bere lana —hau da, pantailan ikusten ari garen bideoa— ez gelditzeko.

Datagramak helburura heltzeko erritmoaren gorabeherei **atzerapenaren aldakortasun** (*packet delay variation*, RFC 3393) edo *jitter*⁴ deritze. IP sareetan, ohikoa da aldakortasun hori, oso lotuta baitago IP protokoloaren diseinuarekin eta izaerarekin. Datagramen atzerapenaren aldakortasuna Internetek egiten duen baliabideen erabilera efizientearen ordaina da, eta lotuta dago telefono-zerbitzurako sortutako sareen zirkuitu-kommutaziotik datuetarako diseinatuta zeuden sareen pakete-kommutaziora igarotzearekin. Aldakortasun horren iturri nagusia bideratzaileen ilaretan kokatzen da. Uneoro aldakorra da bideratzaile bat zeharkatzen duen datagrama kopurua, eta, beraz, horren araberakoak izango dira bideratzaile horretan sortzen diren ilaren luzera eta bideratzaile horretan datagramak zain ematen duten denbora. Arazoa ulertzeko, demagun zuzeneko ekitaldi bat ikusten hasi garela streaming eran iluntzeko 20:50ean, eta une horretan gure ISPren beste bezeroak afaltzen ari direla oraindik. Orduan, ISPren sarean dagoen trafikoa bakarria gure filmaren datagramak izango dira. Gauzak sinplifikatzeko, demagun filmaren igorlearen eta gure ISPren arteko Interneteko bidean trafikoa egonkorra dela eta gure makinari jasotzen ditugula X datagramak segundoero filmaren zatiekin. Dena ondo doa, eta, datagramak jaso bezain pronto, erreproduzizaileak erreproduzitzen du haren edukia. Baina, bat-batean, gaueko 21:00etan, ISPren bezero pila bat afaria amaitu eta Internet erabiltzen hasten bada, gure filmaren datagramak beste datagrama asko topatuko dituzte ISPren bideratzaileetan. Okerrena gertatzen bada, ISPren bideratzailearen bat kongestionatuko da, eta gure datagramak ez dira ailegatuko erreproduzizaile-raino behar den abiadura minimoan. Une horretan, gure filma pantailan geldituko da, eta ez da berriz abiatuko buxadura konpondu arte. Agian, segundo batzuk besterik ez dira izango, baina hori nahikoa da ikuslea gogaitzeko.

1.5. Aurrekarga (*buffering*) eta hasieratzeko atzerapena

Datagramen arteko tartearen aldakortasunak streaming-sistemetan duen eragina ahal den heinean ekiditeko, erreproduzizaileak **aurrekarga** erabiltzen du (*buffering*, *prefetching*). Ideia honetan datza: erreproduzizaileak beti eduki behar du erreproduzitu behar dituen biten erreserba nahikoa, aurretik buffer batean gordeta eta erreproduzitzeko prest. Horrela, epe labur batean jasotako bit-streama mantsotzen bada, ez du eragingo erreprodukzioan, baizik eta bufferrean gordetako bit-erreserba gutxituko du. Bistakoa da irtenbide horrek baduela denbora-muga bat; hau da, mantsotze hori gehiegi luzatzen bada, azkenean, bufferra agortuta, irudia hoztu egingo da pantailan. Hori gerta ez dadin, 2.4 irudian agertzen diren parametroak hartu behar dira kontuan: bideoa erreproduzitzeko abiadura (E-ab), bideoa bufferrean sartzeko abiadura (S-ab), bufferraren tamaina eta erreproduzitzen hasteko atzerapena. Azter dezagun haien arteko erlazioa.

⁴ Berez, *jitter* terminoaren esanahia testuinguruaren araberakoa izan daiteke. Horregatik, *atzerapenaren aldakortasuna* terminoa lehenesten da.



2.4 irudia. Etenak ez gertatzeko parametroak streaming-sistema batean.

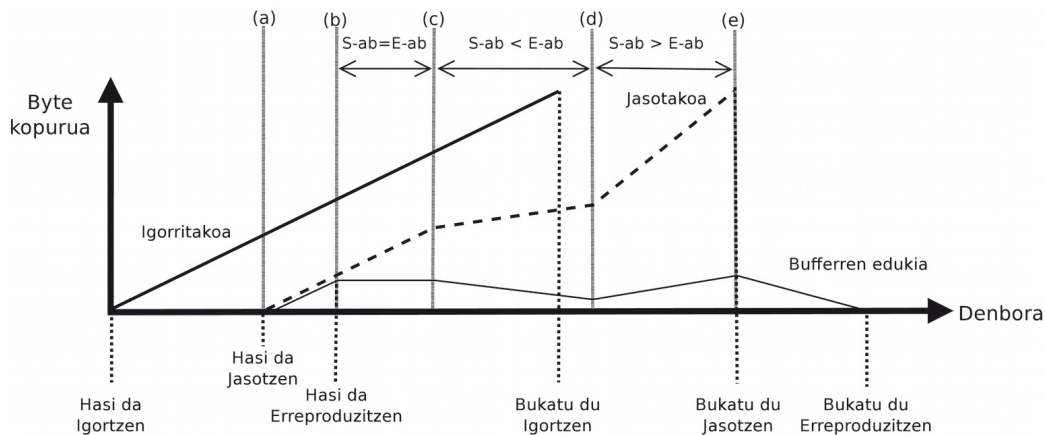
Bideoa **erreproduzitzeko abiadura** bufferretik informazioa ateratzeko abiadura bera da. Parametro nagusia da, haren arabera behar baitute beste guztiek. Bufferrean informazioa sartzeko abiadura igorlearen eta sarearen arabera da. Erreproduzitzeko abiadura baino txikiagoa bada, bufferrean gordetako murriztu egingo da, eta, nahikoa luzatzen bada bi abiaduren arteko desoreka, azkenean bufferra hustu egingo da, eta erreproduzitzaila eten. Hori eragotzi behar da.

Erreproduzitzen hasteko atzerapena informazioa jasotzen hasi eta bideoa abiatu arte utzitako epea da. Tarte horretan jasotako informazioa bufferrean metatzen da, erreproduzitzeko bit-erreserba osatu arte. Zenbat eta atzerapen handiagoa utzi, orduan eta bit-erreserba handiagoa izango dugu bufferrean, eta, ondorioz, denbora luzeagoan ere eutsi ahal izango dio bideoaren erreprodukzioari saretik jasotzeko abiadura moteltzen denean. Ikuslearen ikuspuntutik, aldiz, horberena tarte hori ahal den txikiena izatea da, *play* botoia sakatzen denetik erreprodukzioa hasi arteko epea minimoa izatea nahi baitugu. Bi parametro horien arteko oreka bilatu beharko dugu, hau da, aurrekarga maximizatu, baina eragindako atzerapenak erabiltzailearen gogobetetzea kaltetu gabe. Parametro horien guztien arteko erlazioa 2.5 irudian agertzen da. Irudiko grafikoak hiru parametroen bilakaera erregistratzen du streaming-saio batean. Lehenengo parametroa igorleak bidalitako byte kopurua da. Grafikoan, marra zuzena gorakorra denez, abiadura konstantean transmititu duela azaltzen du. (a) unean hasten den bigarren parametroa hartzaileak jasotako byte kopurua da. Igorlea transmititzen hasi zenetik (a) unera arte igarotako epea da sareak eragindako latentzia. Une horretatik eta (c) une horretara arte, hartzailea igorleak transmititutako abiadura berean ari da jasotzen datagramak, eta, helduz diren heinean, bufferrean gordetzen dira. Hori da hirugarren parametroa: bufferrean biltegitratutako byte kopurua. Datagramak jasotzen hasi eta erreproduzitzen hasi arte, erreproduzitzen hasteko atzerapena igarotzen da, eta, tarte horretan, jasotako byte kopurua eta bufferrean biltegitratutakoa kopuru bera da. Baina, erreproduzitzen hasi eta gero, bi lerro bereizten dira. Jasotako byte kopuruak goraka jarraitzen duen bitartean, bufferrean biltegitratutakoa konstantea da (c) unera arte. (b) eta (c) tartean bufferrean sartzeko abiadura eta erreproduzitzeko abiadura berdinak direnez, abiadura berean sartzen eta ateratzen dira byteak bufferretik, eta, ondorioz, bufferrean biltegitratutako byte kopurua konstantea da. (c) eta (d) unean artean, jasotako byte kopuruak goraka jarraitzen du, baina erritmo mantsoagoan. Mantsotze horrek adierazten du sarean ari dela metatzen informazioa; ziur asko, buxaduraren batean. Bitartean, erreprodukzioak abiadura konstantean jarraitzen du, eta, ondorioz, bufferretik ateratzen den byte kopurua handiagoa da sartzen dena baino, eta bufferraren edukia behera doa, (d) unera arte. Zorionez, badirudi (d) unean konpondu dela sarean zegoen arazoa; hortik aurrera, hartzaileak saretik jasotako byte kopuruak goraka egiten du, inoiz baino azkarrago. Saretik jasotzeko abiadura erreproduzitzeko abiadura baino handiagoa denez, bufferrak bere betetze-maila berreskuratzen du. (e) unean, hartzaileak bideo osoa jaso du, eta, hortik aurrera, bufferra hustu egingo da, erreprodukzioa amaitu arte.

Bufferraren tamaina definitzen dute, batez ere, erabilitako streaming-protokoloak eta bideo-saioaren izaerak, zuzenean (*live streaming*) edo eskatuta (VoD). Streaming-protokoloek datagramak bideo-segmentuetan (*chunk*) elkartzen dituzte; segmentu horren tamaina izango da bufferraren tamaina.

Zuzenean emandako streaming-saioetan ezin da aurrekarga handirik erabili, ikuslea ez dagokelako prest zuzeneko efektua galtzeko, eta, beraz, erreproduzitzen hasteko ezin da eragin atzerapen

handirik. Ondorioz, saioak zuzenean transmititzen dituzten sistemetan erabilitako bufferrak, normalean, ez du gordetzen bideoko segundo bat baino gehiago. Horrek erresistentzia txikia ematen dio erreproduzitaileari sareko gorabeheren aurrean. Hau da, buxadura batengatik jasotzen duen streamaren abiadura mantsotzen bada, arrisku handia dago erreproduzitailearen bufferra agortzeko buxadura konpondu baino lehen eta, beraz, geldialdia gertatzeko erreprodukzioan.



2.5 irudia. Streaming-sistema baten parametroen arteko erlazioaren bilakaera, bideo-saio batean zehar.

1.6. Garraio-mailako zerbitzuak

Interneteko aplikazioek bi aukera dituzte, funtsean, sarea erabiltzerakoan: TCP zerbitzu fidagarria edo UDP zerbitzu arina. TCP egokia da igorritako datuen osotasuna ezinbesteko baldintza denean, hau da, onartezina denean igorleak bidalitako guztia hartzaileak ez jasotzea. Hala da horrenbesteko arrakasta izan duten posta elektronikoa edo webean. Berme hori emateko, TCP zerbitzuak zelatatzen du zer bidaltzen duen mutur batek eta zer jasotzen duen besteak, eta, datagramaren bat falta bada, berak birtransmititzen du. Hori da, laburrean, TCPren **galera-kontrola**. Era berean, igorleak transmititzen badu hartzaileak jasotakoa kontsumitzen duena baino azkarrago, TCPk galgatu egiten du igorlea. Horri **fluxu-kontrol** deritza. Azkenik, TCPk sarearen egoera zaintzen du, eta, gainkargatuta dagoela atzematen badu, igortzeko erritmoa jaisten du. Hori TCPren **buxadura-kontrola** da. Emaiza honako hau da: TCP erabiltzeak igorritakoa helduko dela bermatzen du, baina ez du bermatzen *noiz* helduko den; eta, are gehiago, helduko dela bermatzeak abiadura mantsotu dezake, eta horrek atzerapenaren aldakortasuna eragingo du. Zerbitzu hori egokia da datu-zerbitzuetarako, datagrama segundo batzuk geroago heltzeak ez baitio inongo kalterik egiten aplikazioak emandako zerbitzuari. Inor ez da ohartuko jasotako mezu elektronikoa 2 segundo berandu heldu dela, edo fitxategi bat deskargatzeko 4 segundo gehiago behar izan direla. Halako trafikoari, hau da, datagramen arteko tartea aldatzea onartzen duenari, **trafiko malgu** deritza.

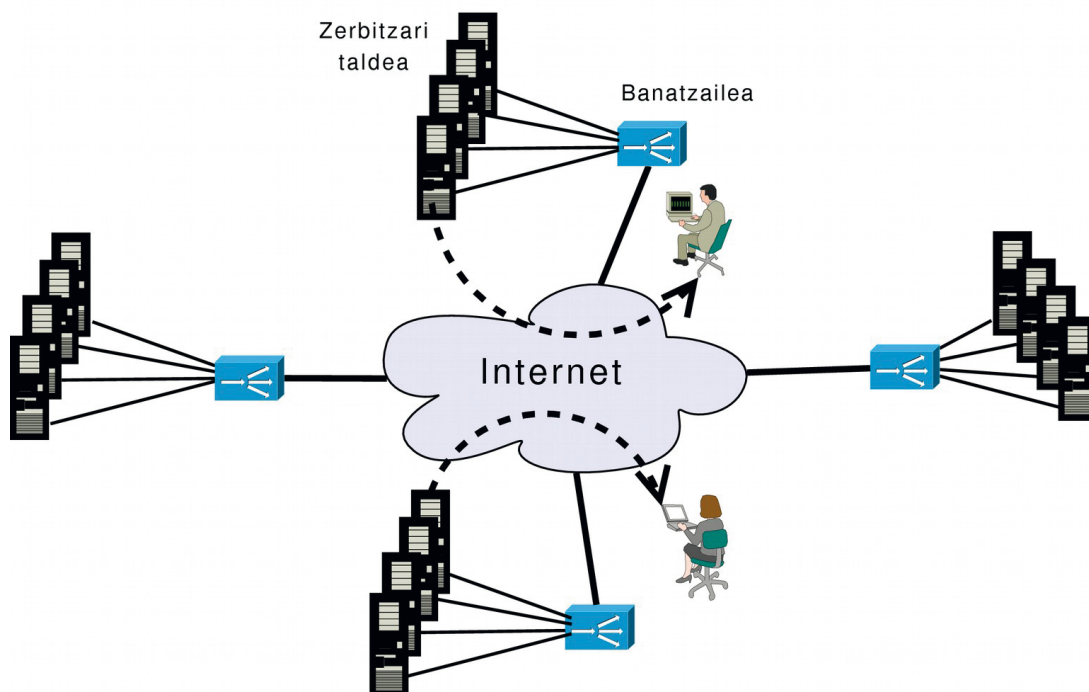
Baina, zenbait aplikaziotan, TCPren onurak ez du merezi, kostuarekin alderatuta. Hau da, aplikazio batzuen lehenetasuna ez da TCPk ematen duen fidagarritasuna; esate baterako, denbora errealeko aplikazioena. Streamingaren kasuan, adibidez, ikusi dugu lehenetasuna izango dela datagrama heltzea daramatzan laginak erreproduzitzeko unea baino lehen. Datagrama galitzen bada sareko buxadura batean, agian ez du merezi datagrama horren bigarren kopia bat bidaltzea, beranduegi helduko delako, eta, gainera, birtransmisio horrekin batera, TCPk igorlearen erritmoa mantsotuko duelako sareko buxadura arintzeko asmoz. Streaminga da **trafiko zurruna** sortzen duten aplikazioen adibide bat; hau da, haren behar nagusia datagramen arteko tarteari eustea da, eta, horrela, erreproduzitaileak saretik informazioa hartzeko abiadura konstantea izatea lortzen da.

Orokorrean, badaude garraio-zerbitzu fidagarria ez, baizik eta arina behar duten aplikazioak. Halakoetarako sortu zuten UDP zerbitzua, TCP/IP protokolo sorta diseinatu zutenean. UDPk ez du galerarik ez buxadurarik kontrolatzen, datagrama baten iturburuko eta helburuko aplikazioa zein den identifikatu besterik ez baitu egiten. Horregatik, UDP zerbitzua arina da: datagrama hartu eta bidali besterik ez du egiten, inongo kontrolik gehitu gabe, eta, ondorioz, inongo denborarik ere gehitu gabe. Hori bai, datagrama heltzen ez bada, aplikazioaren esku gelditzen da arazoa.

Puntu honetan azpimarratu behar da garraio-mailako zerbitzuak UDP edo TCP izanda, makinanako sistema eragileak aplikazioei eskainitako zerbitzuak direla. Beraz, aplikazio bat garatzen duen informatikariak erabaki behar du zein zerbitzu erabiliko duen bere aplikazioak. Emandako azalpenak ikusita, argia dirudi streaming-aplikazioek UDP zerbitzua erabili beharko dutela. Eta hala zen hasierako streaming-sistemetan; baina badira urteak TCP ere erabiltzen dela. Are gehiago, egun, streaming-sistema gehienetan TCP erabiltzen da, lehen aipatu ditugun arazoak —abiadura mantsotzea eta atzerapenaren aldakortasuna eragitea, alegia— neurri handi batean leuntzea lortu delako. Horretarako gakoak izan dira streaming-aplikazioetan eta sare-azpiegiturretan izandako hobekuntzak. Alabaina, UDPren erabilera bereziki erakargarria da oraindik ere, atzerapena minimizatu nahi denean. Eta, multicast erabili nahi bada, UDP da aukera bakarra, TCPk biren arteko konexioak besterik ezin baititu erabili.

2. CDN-sareak eta streaminga

Internet bidezko bideoen eta audioaren banaketak ikaragarriko arrakasta izan du; izan ere, azken urte hauetan sarean trafiko gehien eragiten duen aplikazioa da. Konpainia asko ari dira milioika bideo egunero milioika ikusleri banatzen Interneten. Horrek eskala-arazo bat sortzen du: nola lortu kalitatezko zerbitzu bati eustea, hainbeste ikusle ditugunean Interneteko edozein gune-tan kokatuta, eta hainbeste bideoen eskaintzari eutsi nahi zaionean?



2.6 irudia. CDN sarea. Bideoen kopiak gordetzen dituzte zerbitzari taldeek, eta horien artean egokienak zerbitzatzen dio eskatzaile bakoitzari.

Streaming-zerbitzuak eskaintzen hasten den edozein taldek eredu zentralizatu bati jarraitzen dio horretarako; hau da, streaming-gune bat osatzen du, bideoak gordetzeko edo, zuzenean emandako saioretan, seinale digitalizatua denbora errealean jasotzeko; eta gune horretan kokatutako zerbitzariak banatzen dute seinale hori Internet osoan. Zerbitzua arrakastatsua bada, konpainiak segituan handitu beharko du bere gunea, baina laster agertuko da eskema zentralizatu horren muga: eskalagarritasun eza. Eskaera handitzen den heinean nahiko zerbitzari kokatzeko toki fisikoa badugu ere, ezinezkoa izango da zerbitzari kopuru batetik aurrera zerbitzari horiek beren lana egiteko behar diren hornidurak edukitzea. Haietako bat argindarra da: nahiz eta streaming-gunea zentral elektriko baten ondoan eduki, kontsumo elektrikoaren muga bat izango dugu beti, gaindiezina. Horrekin lotuta dago hozteko sistemaren arazoa. Milaka zerbitzari abian daudela, kontsumitzen duten argindarraren zati bat bero bilakatzen dute. Bero horri kontrolpean eustea ez da lan makala. Eta, azkenik, banda-zabaleraren arazoa dago. Milioika bideo bidaltzeak b/s asko behar du une berean. Zer sare-azpiegitura eraiki beharko dira gune horren inguruan? Gainera, eredu zentralizatuaren betiko arazoa ere hor dago: izaera kaltebera. Horniduraren batek (argindarra, Internetarako konexioa...) kale egiten badu, zerbitzu osoa bertan behera gelditzen da, erabiltzaile guztien kalterako.

Eredu zentralizatuaren bigarren arazoa erabiltzaileekiko distantzia da. Ikusleak urruti kokatuta badaude sarean, gure zerbitzariak igorritako bideoek konexio, sare eta bideratzaile asko zeharkatu beharko dituzte ikusleen makinataraino heltzeko. Bide luze horretan linea edo bideratzaile ahul bat agertzen bada —hau da, gure bideoak erreproduzitzeko behar duen abiadura nahikoa emateko gai ez dena—, etenaldiak suertatuko dira erreprodukzioan, bideko puntu ahul horrek baldintzatzen baitu, azkenean, zein abiaduratan helduko diren datagramak hartzailearenganaino. Arazo hori edukitzeko probabilitatea bidean dauden linea eta bideratzaile kopuruarekin batera handitzen da.

Streaming-zerbitzuak masiboki ematen dituzten hornitzaileek hartu duten eredu zentralizatuaren alternatiba da **Edukien Banaketarako Sareak** erabiltzea (CDN, *Content Distribution Network*). Ideia honako hau da: ez eduki zure zerbitzari guztiak gune bakar batean, baizik eta munduan zehar barreiatutako hainbat gunetan; gune bakoitzean zerbitzari talde batek gordetzen ditu munduko alde horretan eskaintzen dituzun bideoen kopiak, eta erabiltzaile bakoitzaren eskaera bideratu zerbitzu onena emango dion gunera. Gune bakoitzean dagoen zerbitzari taldeari *zerbitzari-kluster* ere baderitzo (*server cluster* edo *server farm*). Ideia hori grafikoki ikusteko, ikusi 2.6 irudia.

2.1. Oinarriko funtzionamendua

CDN bidezko beste edozein zerbitzutan bezala, streaming batean ere hiru urrats egin behar dira arakatzailer bati URLa ematen diogunean: (1) eskaera horri erantzuteko zerbitzari-kluster egokiena zein den aukeratu, (2) egindako eskaera kluster horretaraino bideratu, eta (3) behin eskaera kluster hori gordetzen duen gunera iritsita, eskatutakoa klusterreko zein zerbitzarik bidaliko dion erabaki. Askotan, lehenagoko bi urratsak DNS erabiliz gauzatzen dira. Hirugarrena sare lokal batean lan egiten duen **zama-banatzaile** baten ardura da (*load balancer*).

Eskaintako bideoen kopiak CDNko zenbait gunetan gordetzen dira. Bideoaren eskari-mailaren arabera hedatuko dira bideo horren kopiak zerbitzari taldeetan. Erabiltzaile batek bideo bat eskatzen duenean, erabiltzaile horri egokitutako klusterrean bideo horren kopiarik ez badago, kluster horrek beste gune batetik ekarriko du bideoa, eta hurrengo eskaera baterako gordeko du bere kopia. Bideoak biltegitratzeko ahalmena agortzen zaionean, aspaldian eskatu ez direnak ezabatzen ditu, web cache zerbitzarietan egiten den era berean.

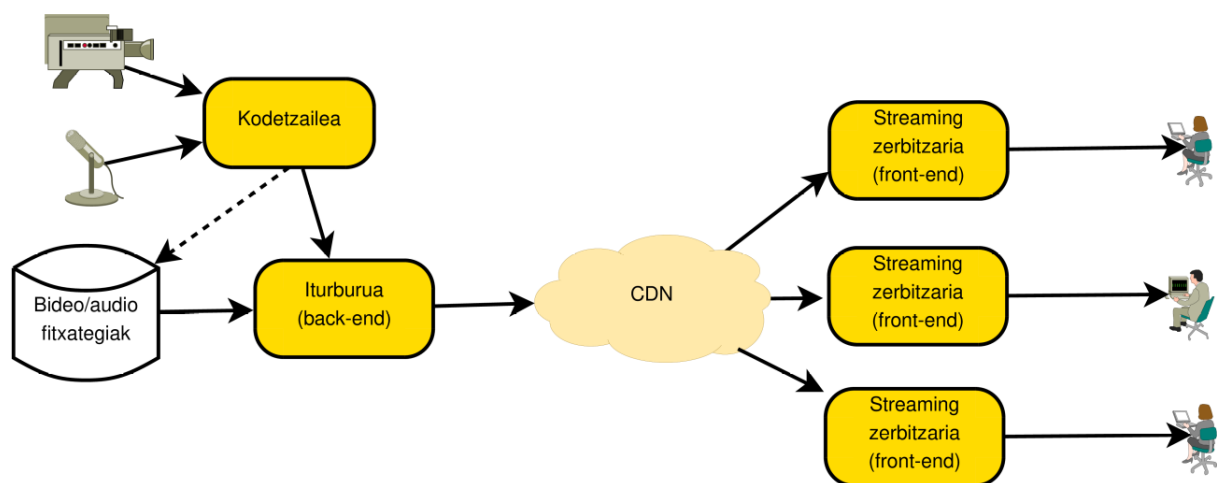
Adibide horretan, aurretik grabatutako bideoen banaketaren kasua hartu dugu (VoD zerbitzua). Zuzenean emandako transmisio batean, lehenengo urratsa izango da edukiaren jabeak sor-

tutako streama CDNko gune batera bidaltzea. Hortik, denbora errealean, erabiltzaileek atzitzen dituzten CDNko beste guneetara birbidali behar da seinalea, eta, aldi berean, gune horietatik jasoko dute bideoa ikusleek. Funtsean, aurretik grabatutako bideoekin egiten den prozedura bera da, baina zuzeneko streamingean denbora errealean transmititzen da bideoa, CDNko klusterretan kopiarik gorde gabe.

Front end eta back end zerbitzariak

Streaming bidezko bideo- eta telebista-banaketan bi motatako zerbitzariak agertzen dira: *back end* eta *front end* zerbitzariak. *Back end* zerbitzariak iturburuak dira, eta *front end* zerbitzariak erreproduzitzailerekin harreman zuzena dutenak (2.3 irudian, streaming-zerbitzariak). Nolabait, *back end* zerbitzariak *atzean* daude, dendaostean, publikoaren bistatik kanpo; *front end* zerbitzariak, aldiz, publikoak ikusten dituenak dira, haiekin bakarrik du harremana. VoD zerbitzuetan, aurretik kodetutako eta biltegitratutako bideoak igortzen dituzte iturburuek; zuzenean emandako saioetan, aldiz, denbora errealean kodetzaileek sortutakoak dira iturburuek igorritakoak. Normalean, iturburuak hornitzailearen sareetan daude, eta *front end* zerbitzariak, aldiz, CDN sareko zerbitzari-guneetan. Iturburuek bideoak igortzen dizkiete *front end* zerbitzariari, eta horiek, ikusleen erreproduzitzailerari. *Front end* zerbitzariak gehien emandako bideoen kopiak gordetzen dituzte, aldi baterako, *cache* lanak eginez. 2.7 irudian azaltzen dira harreman horiek.

CDNak erabiltzeko arrazoietakoa bat streaming-zerbitzariaren eta erabiltzailearen arteko distantzia laburtzea denez, berebiziko garrantzia du *front end* zerbitzariak ostatatzen dituzten guneen kokapenak. Eta erabiltzaileengandik gertuen dugun aukera ISPen sareak erabiltzea da. Horrek ISPen eta OTTen arteko harreman berria ekarri du; behin ISPak jabetu direnean ezin dutela bideo eta telebistaren negozioa monopolizatu eta OTTak garaitu, beren hasierako etsaiekin lankidetzan aritzea hobe dela onartu dute, eta IPTV zerbitzurako sortu zituzten zerbitzari-guneak beste edukien hornitzaileei ireki dizkiete (ordainketa baten truke, noski). Hau da, nolabait, ISPekek beren CDNak sortu dituzte beren bezeroenganako hurbiltasuna edukien hornitzaileei saltzeko asmoz: ISP baten bezeroengandik gertu egon nahi duen edukien hornitzaile batek ISP horri aloka diezaion tokia bere CDN-n. ISPekek sortutako CDNak ez dira aukera bakarra bideo- eta telebista-hornitzaileen *front end* zerbitzariak kokatzeko, baina bai ordea aukera nagusia.



2.7 irudia. Iturburuak (*back end*), CDNak eta *front end* zerbitzariak streaming-sistema batean.

CDN publikoak eta pribatuak

Badaude irizpide desberdinak CDN bidezko bideo-banaketa sistemak sailkatzeko. Lehen, zerbitzari taldeak ostatatzen dituzten guneen jabegoari dagokio. Horri dagokionez, CDN pribatu bat erabil daiteke bideoak banatzeko, edo CDN zerbitzua beste bati kontratatu. Lehenengo kasuan, gunek eta haien azpiegitura osoa bideo-streaming zerbitzua ematen duen erakundearenak berarenak dira. Hau da, edukien jabea (*content provider*) eta CDNren jabea entitate bera da. Horren adibidea da YouTube. Haren jabeak, Google konpainiak, CDN propioak erabiltzen ditu bideoak banatzeko, eta, are gehiago, sare propioa ere badu klusterren arteko trafikoa mugitzeko, Internet publikoa zeharkatu gabe. Beste aukeran, CDNren jabea eta edukien hornitzaileak ez dira berak; hau da, CDNren jabeak gune batzuk alokatzen ditu besteen edukiak hor kokatzeko. Hala da aurreko adibide asmatuan, non *Gurebideoak* izeneko entitateak *GureCDN* izeneko sareari kontratatu baitio bideoen banaketa. Horrela eginez, behar diren inbertsioak askoz txikiagoak direnez, errazagoa da zerbitzua abiatzea, eta, ondorioz, gehiagotan topatuko dugun aukera da. Internet bidezko telebista-zerbitzua (filmak eta serieak) ematen duen konpainia ezagunenak, Netflixek, horrelako eskema bati jarraitu zion hasierako urteetan. Izan ere, Netflixek hainbat CDN-sare erabili izan ditu edukiak banatzeko (Akamai, Limelight eta Level-3 CDNak erabiltzen zituen 2012an). Geroago, besteen CDNak erabiltzeaz gain, CDN-sare propioa ere garatu du.

2.2. Zerbitzari taldea aukeratzeko estrategiak

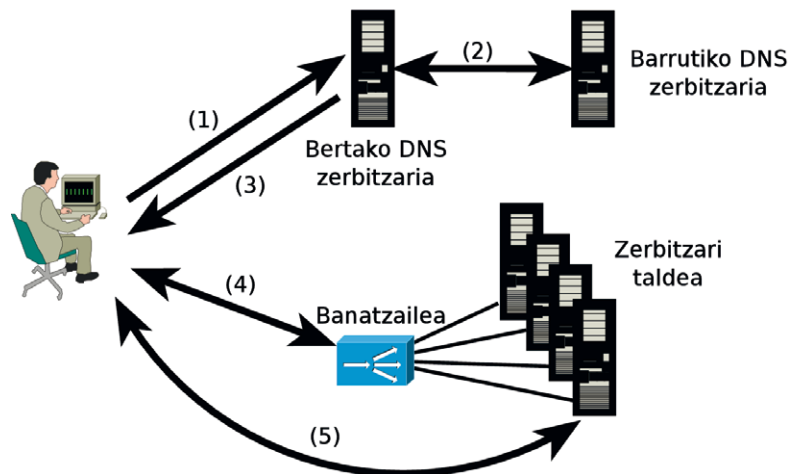
CDN baten funtzionamendu zuzenaren oinarria zerbitzari taldearen aukeraketan datza. Aukeraketa nork eta nola egiten duenaren arabera, hiru dira bide nagusiak: DNS bidezkoa, zama-banatzaile baten bidezkoa, edo anycast helbideen bidezkoa.

DNS bidezko aukeraketa

Aukeraketa DNS bidez egiten denean, bideo bera zerbitza dezaketen CDNko zerbitzari talde guztiek konpartitzen dute DNS izen bakarra, baina talde bakoitzak IP helbide desberdina du esleituta. Gakoa egongo da izen horren itzulpena egitean, horrekin batera bideoa emango duen CDNko zerbitzari taldea aukeratzeko ari baikara. Itzulpen hori CDNko DNS barrutiko zerbitzariak egin behar du. Barrutiko zerbitzariak jasotzen ditu bideoak eskatzen dituzten erabiltzaileen DNS zerbitzariak egindako DNS galderak, streaming-zerbitzari baten izenari dagokion IP helbidea zein den jakiteko. Gero, ikusleek IP helbide horri bidaliko diote beren bideoa ikusteko eskaera.

Prozesu hori dugu 2.8 irudiko adibidean. Demagun bideoak eskaintzen dituen webgune bat dugula, `w3.gureBideoak.eus` izeneko, eta demagun bideo horiek `gureCDN.eus` domeinuan lan egiten duen CDN baten bidez banatzen direla. Webguneko orri batean bideo baterako esteka bat klikatzen dugunean (adibidez, `bideoak.gureCDN.eus/20221206v` URLa duena), honako hau gertatzen da:

1. Gure makinako DNS ebazleak DNS galdera bat igorriko dio bere DNS zerbitzariari, `bideoak.gureCDN.eus` izenari dagokion IP helbidea lortzeko.
2. DNS zerbitzariak galdera helaraziko dio `gureCDN.eus` domeinua kudeatzen duen DNS barrutiko zerbitzariari (*authoritative name server*). Hark aukeratu beharko du zer klusterrek emango duen eskatutako bideoa, eta horren IP helbidea itzuliko dio DNS zerbitzariari. Aukeraketa hori egiteko, irizpide batzuk aztertuko ditugu segituan.
3. DNS zerbitzariak eskaera egin zuen makinari itzuliko dio jasotako IP helbidea.
4. Lortutako IP helbideari bidaliko dio erreproduzitaileak bideo-eskaera. Aukeratutako zerbitzari taldeko zama-banatzaileak jasoko du eskaera, eta bigarren aukeraketari ekingo dio: taldekoen artean, zerbitzaririk egokiena hartuko du. Erabaki hori hartzeko irizpidea taldeko zerbitzarien arteko zama orekatzea izaten da.
5. Azkenik, aukeratutako zerbitzariak erantzun du erreproduzitailearen eskaera.



2.8 irudia. Bideo-eskaera bati erantzuteko urratsak, CDN baten guneen artean aukeratzeko DNS erabilia.

Nola jakingo du barrutiko DNS zerbitzariak zein den eskatzailearengandik gertuen dagoen zerbitzari taldea? Denbora hori balioesteko modurik errazena distantzia geografikoa erabiltzea da. Eskatzailea non dagoen jakiteko, DNS barrutiko zerbitzariak geokopakenerako zerbitzuren bat erabiltzen du (Interneten badaude hainbat), galdera egin dion DNS zerbitzaria non dagoen jakiteko. Informazio geografiko horrekin, barrutiko zerbitzariak erabiltzailearen DNS zerbitzaritik kilometro gutxienera dagoen CDNko zerbitzari taldea aukeratu du. Horrela egindako aukeraketa egokia da kasu gehienetan, baina ez beti. Ohartu, bi makina eraikin berean egonda ere, balitekeela datagrama batek Internet osoa zeharkatu behar izatea bien arteko ibilbidean. Interneteko distantzia eta distantzia geografikoa bat ez datozenean, kale egiten du irizpide geografikoak.

Horregatik, distantzia geografikoa baino hobea da Interneteko distantzia erabiltzea. Erabiltzaile baten makinatik gertuen dagoen CDNko zerbitzari-gunea beti izango da erabiltzaile horren ISPren sarean bertan dagoen gunea, baldin badago. Jakinda zein den eskatzaile batek erabiltzen duen IP helbidea, badago jakitea zein den bere ISP (betiere, eta hori da erabiltzaile gehien kasua, IP helbidea mailegatu badio bere ISPri), ezaguna baita zein IP helbide sorta kudeatzen duen ISP bakoitzak. Horrela, irizpide geografikoa erabiltzen da soilik eskaera IP helbide ezezagun batetik eginda badago.

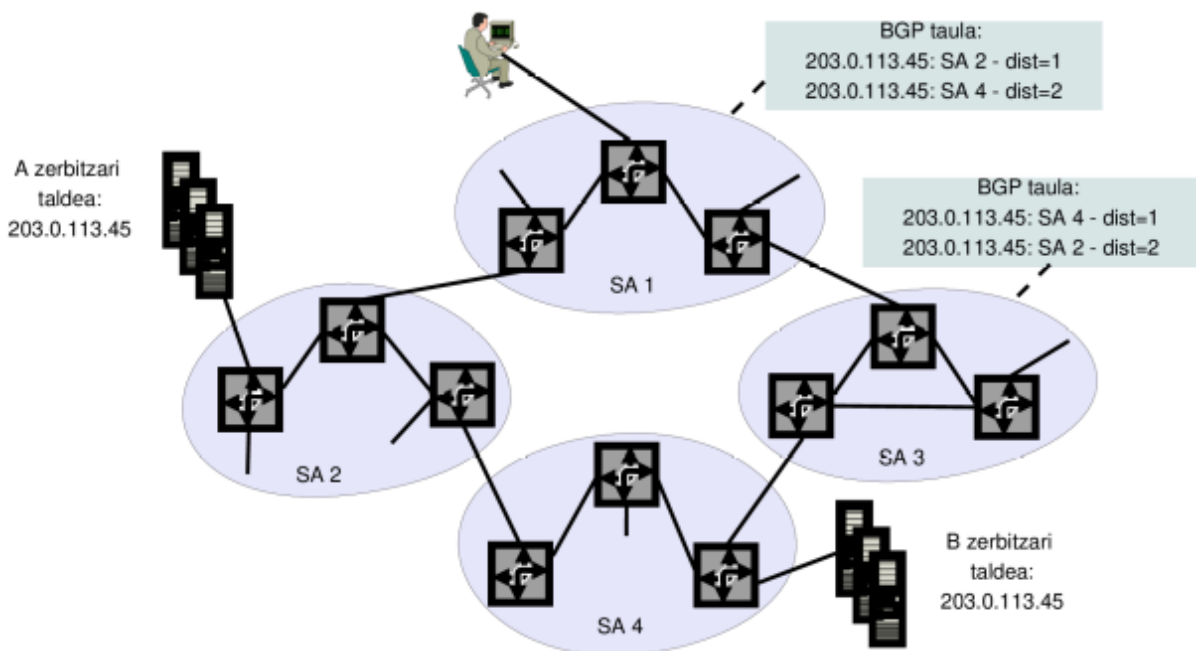
Baina beste arazo bat agertzen zaigu aukeraketa DNS barrutiko zerbitzariak egiten badu: DNS eskaera egin duena ez da bideoa jaso nahi duen makina, baizik eta makina horrek erabiltzen duen DNS zerbitzaria (ikusi 2.8 irudia). Kontuan hartuta askotan erabiltzailearen makina eta bere DNS zerbitzaria ez daudela sare berean, gerta daiteke aukeratutako CDNko zerbitzari-gunea oso gertu egotea eskatzailearen DNS zerbitzaritik, baina urruti bideoa jaso nahi duen eskatzailearen makinatik. Arazoa konpontzeko badago proposamen bat DNS protokoloari hedapen bat egiteko, DNS zerbitzariak egindako galderetan eskatzailearen IP helbidea gehitzeko (ikusi RFC 7871). Hedapen hori erabilia, barrutiko DNS zerbitzariak badu bideoa eskatzen duen makinaren IP helbidea, eta, hortik abiatuta, makina horretatik gertuen dagoen CDNko zerbitzari-gunea bila dezake.

Zama-banatzaille baten bidezko aukeraketa

Beste estrategia honetan, bideoari lotutako izenaren atzean dagoena zama-banatzaille bat izango da. Zama-banatzaille horrek egingo du zerbitzari-gunearen aukeraketa, eta bideoa ikusi nahi duen eskatzailea zerbitzari-gune horretara birbideratuko du. Birbideratze hori gauzatzeko tekniken artean ohikoena HTTP protokoloa `redirect` aukera erabiltzen duena da. Jasotako eskaera bideoa ikusi nahi duen makinak egin duenez, banatzaileak badu makina horren IP helbidea, eta, berez, aukera dezake eskatzailearengandik gertuen dagoen zerbitzari-gunea. DNS bidezkoarekin alderatuta, estrategia honek duen alde negatiboa da eragiten duen atzerapena; ikusi eskatzaileak bi HTTP eskaera egin beharko dituela, lehena zama-banatzaileri eta bigarrena aukeratutako zerbitzari taldeari.

Anycast bidezko aukeraketa

Aukeraketa egiteko beste era oso desberdin bat da *IP anycast* erabiltzea (RFC 1546). Anycast IP helbideak erabiltzeko era bat da, non hainbat makinak partekatzen baitute unicast-helbide bat, eta soilik horietako bati helaraziko dio sareak helbide horretara bidalitako datagrama bat (*one-to-one-of-many*). Ideia bikaina da CDN batean erabiltzeko: esle diezaiekegu helbide bera bideoa zerbitzatzen duten zerbitzari talde guztiei, eta sareko bideratzaileek aukeratuko dute zein talderi bideratu eskaera daraman datagrama bakoitza. Bideratzaile bakoitzak gertuen duen CDNko zerbitzari talderantz bideratzen ditu datagramak, bide laburrenak hartzea baita, azkenean, Interneten erabiltzen diren bideratze-protokoloen helburua. Halako protokoloak erabiliz, bideratzaileek beren birbidaltze-taulak betetzen dituzte, IP helbide bakoitzeraino heltzeko biderik onena aukeratuz. CDNko zerbitzari talde bakoitzak bere buruaren berri ematen dio Internet osoari, BGP protokoloa erabiliz, eta, ondorioz, inguruko zein urrutiko sareetako bideratzaileek zerbitzari talde horretara doan bidea erregistratuko dute. Bideratzaileek beste zerbitzari taldeen berri ere jasoko dute BGParen bidez. Jasotako bide guztien artean laburrena kargatuko dute bideratzaileek beren birbidaltze-tauletan, eta besteak alternatiba gisa erreserbatuko dituzte beren BGP tauletan. Adibidez, CDN baten zerbitzu bat ostatatzen badu bere 10 klusterretan, zerbitzua ematen duten 10 zerbitzari taldeek beren IP helbide bakarrerako 10 bide zabalduko dituzte Interneten zehar. Interneteko bideratzaile bakoitzak 10 bide horien artean laburrena aukeratuko du bere birbidaltze-taulan sartzeko.



2.9 irudia. Anycast helbideen erabilera, eskaerak gertuen dagoen CDN bateko zerbitzari taldearengana eramateko. SA = Sistema Autonomoa.

2.9 irudian dugu horren adibidea. Irudian, A eta B zerbitzari taldeak ditugu, bakoitza sistema autonomo batean kokatuta (bi ISP izan daitezke), baina biek 203.0.113.45 IP helbidea erabilia. Zerbitzari taldeak ostatatzen dituzten SA2 eta SA4 sistema autonomoek zabalduko dute Interneten, BGP erabiliz, 203.0.113.45 IP helbidea bertan dutela. Demagun une batean SA1-ean dagoen erabiltzaileak bi zerbitzari talde horietan dagoen bideo bat ikusi nahi duela. Eskaera egingo duen erabiltzailea ostatatzen duen SA1 sistema autonomoko bideratzaileek 203.0.113.45 helbidera heltzeko bi bideen berri jasoko zuten, baina beren birbidaltze-tauletan laburrena sartu dute; SA2 sistema autonomotik dabilena, alegia. Hortaz, A zerbitzari taldeak jasoko du egindako eskaera. SA3-ko bideratzaileek, aldiz, SA4 sistema autonomoan dagoen B zerbitzari taldera joateko bidea

kargatuko zuten beren tauletan, beste sistema autonomo hori gertuago baitute SA2 baino. Eskaera SA3 sisteman kokatutako erabiltzaile batek egingo balu, B zerbitzari taldeak jasoko luke.

Anycast aukera oso erakargarria da bere sinpletasunagatik; CDNk ez du ezer egin behar eskaerak gertuen dagoen taldearengana heltzeko. Gainera, DDoS erasoen kontrako borrokan lagundu dezake anycast erabiltzeak. DDoS eraso batean, iturri desberdinetatik bonbardatzen da zerbitzari bat. Baina zerbitzari horrek anycast helbide bat badu esleituta, bonbardaketa banatu egiten da helbidea partekatzen duten zerbitzari guztien artean.

Beste alde batetik, anycast aukerak baditu bere alde ilunak. Bata, CDNk ez du inongo kontrolik izango aukeraketan. Hemen distantzia bakarrik hartu dugu irizpide gisa taldea aukeratzean, baina, batzuetan, ez da erabiltzen den irizpide bakarra. Adibidez, CDN batek zerbitzarien zama ere kontuan hartu nahi badu, ezingo du anycast erabiltzen badu. Anycast erabiltzeak duen beste zailtasun bat da bideen ezegonkortasuna Interneten (*route flapping*); hau da, ez dago bermatuta makina berak jasoko dituen anycast helbide berera eta jarraian igorritako bi datagrama. Hori arazo bat da TCP konexioak erabiltzen dituzten protokoloetan (laster ikusiko ditugun streaming-protokolo askotan, adibidez), TCP konexio baten bi muturrek berdinak izan behar dutelako konexioak irauten duen bitartean. Horregatik, anycast erabiltzen denean CDN batean, neurri bereziak hartu behar dira bideen egonkortasuna sendotzeko.

3. Streaming-protokoloak

Streaming-zerbitzua asmatu baino lehen, Internet erabiliz bideo bat ikusteko aukera bakarra zen lehenago bideo hori deskargatzea sare-aplikazio batekin (web, FTP, P2P sare bat...), eta, gero, bideoa erreproduzitzea aplikazio lokal batekin (erreproduzitzailer bat). Horrek suposatzen zuen bideoa ikusi ahal izateko deskarga osatu arte itxaron behar izatea, askotan denbora luze bat, garaiko konexioen banda-zabalera eskasak eraginda. Testuinguru horretan, xx. mendearen amaieran, agertu zen *deskarga progresiboa* izeneko teknika (*progressive downloading*), streaming-zerbitzuaren aitzindaria.

Progressive downloading

Deskarga progresiboa egiten denean, erreproduzitzailer bideoa erreproduzitzen hasten da deskarga amaitu baino lehen. Ikaragarriko berrikuntza ekarri zuen, zerbitzu berri bat, Interneten biltegitratutako bideoak unean bertan ikusi ahal izateko, eta ez ordu batzuk geroago (edo hurrengo egunean...). Dena dela, sistemak arazo batzuk zituen:

- Ez zegoen erreprodukzioan jauziak aurrerantz egiteko aukerarik. Bideoko geroko une batera joan ahal izateko, deskarga une horretaraino heldu arte itxaron behar zen.
- Zerbitzariaren transmisio-ahalmenaren kudeaketa oso txarra zen. Deskargak beti egiten dira TCP erabiliz, eta TCP saiatzen da ahal den azkarren transmititzen. Horrek bi ondorio dakartzatza. Batetik, ikusleak bideo osoa ikusten ez bazuen, ikusi gabeko baina bidalitako guztia lan alperre zen, agian beste ikusle batek behar zuen transmisio-ahalmena xahututa. Bestetik, eta aurrekoarekin lotuta, bideo bat deskargatzen aurrena hasten zenak zerbitzariaren banda-zabalera gehiena bereganatzen zuen, geroko eskatzaileen kalterako.
- Soilik aurretik grabatutako bideoetarako erabil zitekeen, azken finean, fitxategi bat deskargatzea baita kontua. Zuzeneko ekitalditarako ez zuen balio.
- Edukien hornitzaileek mesfidantzaz hartzen zuten erabiltzaileak bideoaren kopia osoa egitea beraren diskoan.

Arazo horiek konpontzeko agertu ziren streaming-zerbitzurako espresuki sortutako lehenengo protokoloak.

3.1. Hasierako streaming-protokoloak

Bideoak unean bertan ikustea eta bideoak deskargatzea zerbitzu desberdinak zirela onartuta, logikoa zen aplikazio desberdinak erabiltzea baterako eta besterako. Laster agertu ziren hainbat aplikazio zerbitzu berrirako, bakoitzak bere protokoloarekin. Baina denek zituzten antzeko ezau-garriak:

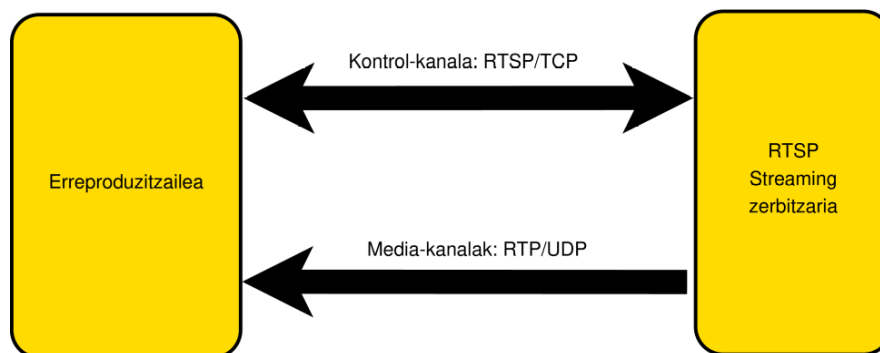
- Bereizi egin ziren web-zerbitzaria, bideoaren esteka lortzeko, eta streaming-zerbitzaria, bideoa bera ikusteko (ikusi 2.3 irudia). Deskarga progresiboan zerbitzari bakarra zegoen, bideoa biltegitratzen eta eskaintzen zuena.
- Erreproduzitaileak saio bat ezartzen du streaming-zerbitzariarekin. Saio horren kontrolerako agertzen dira streaming-protokolo berriak: RTSP, MMS, RTMP.
- Aurrekarga erabiltzen dute, eta erreproduzitaileak ez du gordetzen jasotako bideoaren kopiarik. Bere memorian, bufferrean duen bideoaren zatia besterik ez du, eta, behin erreproduzituta, bideo zati hori hurrengo bideo zatiak zapalduko du. Bufferrean, gehienez, bideoko segundo batzuk besterik ez daude. Edukien hornitzaile komertzial askorentzat abantaila handia da hori, ez baitiete erabiltzaileei aukerarik eman nahi edukiaren kopiarik izateko.
- Zerbitzariak ikusle bakoitzari bideoa bidaltzen dio erreproduzitzeko abiaduran, eta ez azkarrago. Hau da, ikusle bakoitzari behar duen banda-zabalera esleitzen zaio, ez gehiago.
- Streaming-protokoloek komandoak definituko dituzte bideoaren erreprodukzioa kontrolatzeko: play, pause, stop, aurrera, atzera. Horrela, ikusleak bideoaren une konkretu batera jauzi egin nahi badu, bufferra berriz bete arte besterik ez du itxaron behar.
- Ikuslearen erreproduzizigailuaren pantailako tamainaren arabera edota bere konexioaren abiaduraren arabera bideoaren bertsioa hartzea automatikoki egin daiteke, erreproduzitailearen eta streaming-zerbitzariaren artean hitz eginda, streaming-protokoloa erabiliz. Deskarga progresiboan ikusleak berak aukeratu behar zuen zein fitxategi deskargatu, askotan bertsio bat edo bestea aukeratzearen ondorioak ezagutu gabe.

Hasierako protokolo hauen artean arrakasta handiena izan duena RTMP da. Microsoft-ek segituan baztertu zuen bere MMS protokoloa (*Microsoft Media Server*), estandarra den RTSP lehenesteko (*Real Time Streaming Protocol*, RFC 7826).

RTSP

RTSP erabiltzen duten streaming-sistemetan guztiz bereizita daude kontrol-kanala eta media-kanalak⁵. Batean, bideoaren emanaldia kontrolatzeko aginduak eta haren erantzunak ibiltzen dira, eta, bestean, bideo-laginak kodetuta (hau da, bideo-emanaldi bera, beti zerbitzaritik erreproduzitailearentz). RTSP protokoloak definitzen du zein izango diren komando eta erantzun horiek. Azken finean, RTSPk bideo-erreproduzizigailu batean aurkituko ditugun botoien lana egiten du (*play, pause, stop...*). Bi kanalak, media, kontrola eta bakoitzean erabilitako protokoloak agertzen dira 2.10 irudian.

⁵ Berez, protokoloak aurreikusten du kanal bakar batetik ere komandoak eta media transmititzea, baina ez da normalean erabiltzen den aukera. Ohikoa da bi kanalak bereiztea.



2.10 irudia. Kontrol-kanala eta media-kanalak RTSP streaming-sistema batean.

RTSPk badu HTTP protokoloaren antza, batez ere sintaxian. Biek ere TCP konexio bat erabiltzen dute aginduak bidaltzeko. Baina, HTTP ez bezala, RTSP saio bidezkoa da; hau da, zerbitzariaren eta erreproduzitzailearen arteko komunikazioaren egoera gordetzen du (*stateful protocol*), eta bidalitako agindu bakoitza lotuta dago identifikatuta dagoen saio batekin. Adibidez, ikusi RTSP agindu hau, erreproduzitzaile batek zerbitzari bati bidalitako PLAY komando bat:

```
PLAY rtsp://audio.example.com/audio RTSP/2.0
CSeq: 835
Session: ULExwZCXh2pd0xuFgkgZJW
Range: npt=10-25
User-Agent: PhonyClient/1.2
```

HTTP komandoak bezala, lerroka dago egituratuta RTSP komando hau, eta lerro bakoitzean bere lerro-izena eta balioa aurkituko ditugu, bi puntuz bereizita. Horietako lerro batek (*session ize-nekoak*) konexioa identifikatzen du.

Media-kanalei dagokienez, teorian RTSPk ez du behartzen zein protokolo erabili, baina, praktikan, RTP erabiltzen da (*Real time Transport Protocol*, RFC 3550), eta, horren azpian, garraio-mailan, UDP. RTP protokoloa gero aztertuko dugu, telefoniari buruzko kapituluan.

RTSP/RTP streaming-sistemak asko erabili ziren Internet bidezko bideo-banaketaren hasieran, oraindik xx. mendean. Baina NAT eta su-hesien erabileraren hedapenak haren kontra jo zuen segituan. Funtsean, arazoa da RTSP protokoloan, bezeroak streaming-zerbitzariarekin kontrol-saioa ezarri eta gero, media-kanalak streaming-zerbitzariak abiatu behar dituela bezeroari audioa eta bideoa bidalita; baina ikusleen bezeroak, gehien-gehienetan, NAT baten atzean daude, eta, ondorioz, iritsezinak dira kanpotik. NATekin eta su-hesiekin horrenbesteko arazoak ez zituen RTMP protokoloa agertu zen orduan, 2002. urtean, eta segituan nagusitu zen streaming-munduan. Egun, 2016. urtetik indarrean dugun RTSP protokoloaren bigarren bertsioa (bateraezina 1998ko 1.0 bertsioarekin) prest dago NAT eta antzekoak zeharkatzeko (ikus RFC 7825), baina dagoeneko galdu du streaming-protokoloen arteko lehia, eta bere erabilera nahiko baxua da.

Hala ere, RTSP/RTP bidezko streaming-sistemek badituzte bi ezaugarri oso positibo, kontuan hartzekoak. Biak daude lotuta UDP protokoloaren erabilerarekin media-kanaletan. Bata da multicast-helbideak erabiltzeko ahalmena, TCP gaineko transmisioa erabiltzen duten sistemek ez dutena. Multicast erabiltzearen abantailak gero aztertuko ditugu. Bigarren abantaila da bere latentzia baxua, TCPren kontrolek eragiten dituzten gorabeherak ez baitira agertzen UDP erabiltzen denean, eta, ondorioz, aurrekarga txikiagoa erabil daiteke.

RTMP

Internet bidezko streaming-sistemarako *de facto* estandarra izan da urteetan RTMP protokoloa (*Real Time Messaging Protocol*). RTSP sistemetan ez bezala, RTMP bidezko streaming-sistemetan ez

daude bereizita kontrol-kanala eta media-kanalak, protokoloaren komandoak eta bideoa bera erreproduzitzailearen eta streaming-zerbitzariaren arteko TCP konexio bakar baten bidez transmititzen baitira. Protokoloa *Flash Player* erreproduzitzailearen jabea zen enpresak definitu zuen, bere erreproduzitzailearen eta streaming-zerbitzari baten arteko komunikazioetarako. Hau da, ez zen edozeinek inplementa zezakeen estandar bat. Baina ordurako *Flash Player* bazegoen nabigatzaile guztietan plugin moduan; horrek, eta NAT gainditzeko RTMP sistemen erraztasunak, nagusitu zuten RTMP-ren erabilera, nahiz eta estandar ez izan. Gero, 2012. urtean, bere gainbehera hasita zegoela, protokoloaren jabeak argitaratu egin zuen protokoloaren espezifikazioa, eta baimendu bere erabilera.

Egoera irauli egin zen HTML5 estandarraren hedapenarekin, eta, geroztik, ikusleen nabigatzaileek ez dute onartzen bideorako pluginik, ezta, ondorioz, RTMP protokoloaren bidezko streamingik ere. Hala eta guztiz ere, horrek ez zuen eragin RTMP streaming-sistemak desagertzea. Aldiz, 2022. urtean, oraindik ere oso erabilia da RTMP, baina ez erabiltzaileei zuzenean bideoak helarazteko, baizik eta streaming-sistemen lehenengo urratsean, iturrien eta CDNtan kokatuta dauden streaming-zerbitzarien artean (2.8 irudian, *back end* zerbitzarien eta *front end* zerbitzarien arteko komunikazioetan). Biziraute horren atzean dagoen arrazoi nagusia da RTMPk eragiten duen atzerapen txikia (5 segundo izaten da). Beste arrazoi bat inertzia da: urteetan erabilitako protokolo nagusia izan da, ingeniariak ezagutzen dute, ondo funtzionatzen du, eta, aldatzeko beharrik ez dagoen bitartean, eutsi egiten dute lehenengo urrats horretan, bereziki atzerapenekiko sentikortasun handia duten *live streaming* saioetarako. Gero, *transcoding* egin behar da, *front end* zerbitzariak bideoak ikusleei helarazteko beste protokoloak erabiliz.

3.2. HTTP bidezko streaming-protokoloak

Streaming-protokoloen bigarren belaunaldia lotuta dago HTTP protokoloarekin, streaming dinamikoarekin, eta HTML5 estandarrarekin. Hainbat arrazoi zeuden XXI. mendearen hasieran RTMPren garaia amaitzeko. Hasteko, nabigatzaileen ekoizleek hautsi egin nahi zuten Flash Player-ekiko menpekotasuna, eta, are gehiago, ez zuten nahi inongo pluginekin lan egin behar izatea. Horretarako bultzatu zuten HTML5 estandar berrian bideoak txertatzeko ahalmena, eta, batez ere, bideo horiek erreproduzitzeko ahalmen zuzena nabigatzailearen inplementazioan bertan edukitzea, inongo pluginik kargatu behar izan gabe. Beste alde batetik, RTMP protokoloarekin lan egiteak behartzen du streaming-zerbitzari espezifikoko ezartzea. Askoz erakargarriagoa zen dagoeneko CDN guztietan zeuden HTTP zerbitzariak erabiltzea bideoak zerbitzatzeko, *front end* gisa. Baina, horretarako, erreproduzitzaileek HTTP komandoak igorri behar zituzten, ez RTMP, RTSP edo beste edozein streaming-protokolok definitutako komandoak. Eta posible al da bideo baten erreprodukzioa kontrolatzea web-orriak deskargatzeko diseinatu zen HTTP protokoloa erabiliz?

Bideoaren kontrola HTTPen bidez

Bideo baten erreprodukzioa abiatu daiteke HTTP GET komando bat igorrita; nahikoa izango da streaming-zerbitzariarena egiten duen HTTP zerbitzaria bideoaren laginak bidaltzen hasteko. Erreproduzitzaile horrek bere bufferrean jasoko ditu laginak, eta, segundo batzuk geroago, bufferra beteta dagoela, hasiko da bideoa erreproduzitzen. Ikusleak beste ezer egiten ez duen bitartean, zerbitzariak mutur batetik elikatzen du bufferra, eta erreproduzitzaileak beste muturretik ateratzen ditu bideo-laginak, bideoa amaitu arte.

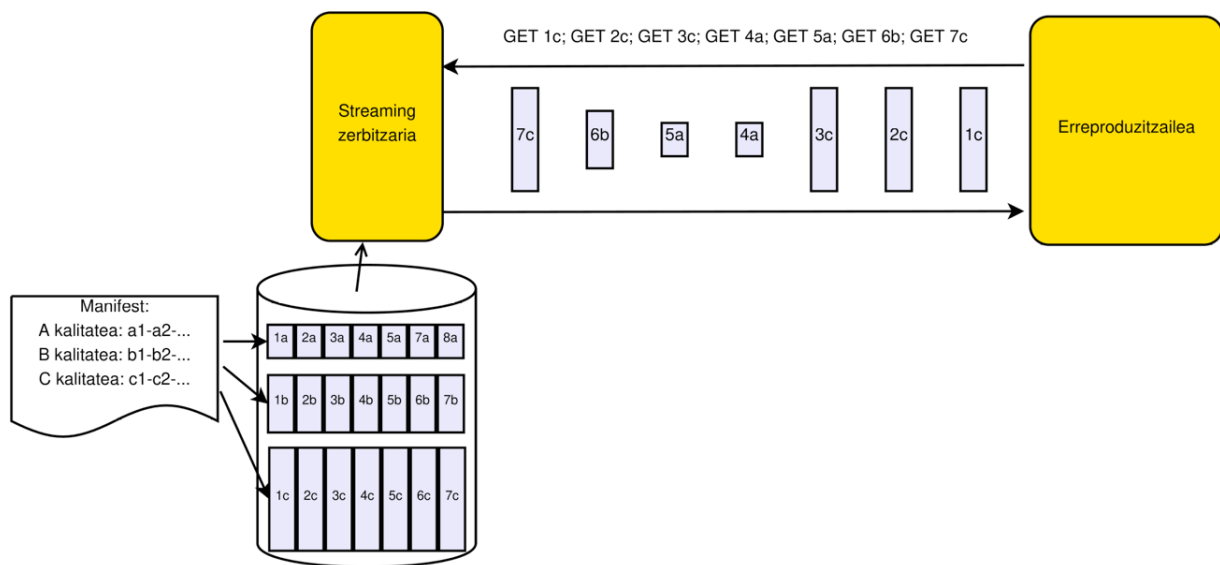
Ikusleak saioa gelditu nahi duenean (*pause*) edo berriz abiatu nahi duenean (*play*), erreproduzitzaileak ez luke inongo komandorik igorri behar; nahikoa litzateke bufferretik informazioa ateratzeari uztea edo berriz ekitea, hurrenez hurren. Gero, TCPren fluxu-kontrolak geldiaraziko du zerbitzaria, bufferra betetzen denean, eta berriz aktibatuko du, ikusleak berriz *play* sakatu eta gero, erreproduzitzaileak berriz ekiten dionean bufferra hustutzeari.

Ikusleak bideoaren puntu zehatz batera joan nahi duenean, HTTP GET komandoaren `byte-range` goiburukoa erabil daiteke. Goiburu horrek eskatutako bideoaren zatia zein den azaltzen du. Erabiltzaileak jauzi bat eskatzen duenean, nabigatzaileak HTTP GET berri bat bidaltzen dio zerbitzariari, eta zer bytetik jaso nahi duen azaltzen du goiburu horren bidez. Eskaera jasota, zerbitzariak birkokatu egiten du bidalketa.

HTTP zerbitzarien bidezko streaming era berri horri *pseudo streaming* deitu izan diote askotan, RTMP edo RTSP streaming-zerbitzarien bidezko «benetako» streaming-sistemetatik bereizteko.

- Streaming dinamikoa

Deskribatutako erreproduzioaren kontrolak, HTTP GET komandoen bidezkoak, atea zabaldu zion streaming dinamikoari. *Progressive downloading* sisteman ez bezala, HTTP streaming-sistemetan hainbat GET bidal daitezke bideo bat jasotzeko, bat ikusleak emandako jauzi bakoitzeko. Mekanismo hori muturreraino eraman daiteke, eta bideoaren zati bakoitzeko GET bat bidali, nahiz eta jauzirik egon ez. Hori da streaming dinamikoaren funtsa: bideoa zatika eskatu behar da, aldiro GET bat igorrita. Horrelako zatiei *chunk* edo *bideo-segmentu* izena eman zaie. Bideoa hainbat segmentutan dago zatituta, eta segmentu bakoitza hainbat datagramak osatuko dute. Bideoari dagozkion segmentuak fitxategiak izango dira, eta bideoaren *manifest* metafitxategian agertu behar da zein diren fitxategi horiek, beren ezaugarriekin batera (kodeketa, funtsean). Adibidez, 2.11 irudian, zazpi segmentutan dago zatituta bideoa. Segmentuaren tamaina lotuta dago erabiltako bufferraren tamainarekin, eta, ondorioz, erreproduzioan izango dugun atzerapenarekin. Streaming dinamikoa erabiltzen duen protokolo bakoitzak definitzen du zein izango den segmentuaren tamaina hori, tipikoki 2 eta 10 segundo artekoa.



2.11 irudia. Streaming dinamikoa.

Zatika eskatzeak malgutasun handia ematen die erreproduzitzaileei, unean aukeratzeko zein kalitateko bideo jaso nahi duen, eta, horrela, bufferra husteko abiadura uneko sarearen egoerari egokitzeko. Erreproduzitzaileak zelatatuko du bufferraren betetze-maila, eta, jaisten ari dela atzematen badu (hau da, bideoajastoen duena baino azkarrago ari dela kontsumitzen, eskatuko du hurrengo segmentuak kalitate baxuagoan bidaltzeko. Gero atzematen badu konexioaren aurreko abiadura berreskuratu duela, berriz kalitate handiagoko segmentuak eska ditzake. 2.11 irudiko adibidean bideoaren hiru kopia ditu zerbitzariak, bakoitza kalitate desberdinekoa. Irudiko a, b, eta c kalitateak izan daitezke kalitate es-

tandarreko bideoa, HDTV eta 4K kalitatea, hurrenez hurren. Hasierako 3 segmentuak c kalitatean eskatu ditu erreproduziztaileak. Gero, bufferra husten ari dela ikusita, a kalitatean eskatu ditu hurrengo bi segmentuak, laugarrena eta bosgarrena. Egoera hobetu dela atzemandu, seigarren segmentua eskatu du b kalitatean, eta, azkenean, berriz c kalitatean eskatu du zazpigarren segmentua.

Aurregrabatutako bideoen kasuan, hasierako *manifest* metafitxategian ager daitezke bideoaren segmentu guztiak; *live streaming* batean, aldiz, zerbitzariak aldiro bidaltzen du *manifest* metafitxategiaren kopia berria, azken laginei buruzko informazioa zabaltzeko.

Bideoa zatika eskatzeko era honi *Adaptive Bit Rate* (ABR) deitu zitzaion, streaming dinamikoa, edo streaming adaptatiboa. Bereziki erakargarria da telefono mugikorren bidez bideoak ikustean, telefonoen konexioak oso ezegonkorak direlako, eta une bakoitzean dugun bideoak jaisteko abiadura oso aldakorra izan daiteke. Egoera horretan, askoz hobea da ikusten ari garen bideoaren hurrengo segundoa kalitatea baxuagoan jasotzea, kalitate handiagoko bideoa gure pantailan izoztea baino. Streaming dinamikoa erabiltzen da ikusleen nabigatzaileen eta *front end* zerbitzarien artean; ez da normala streamingaren lehenengo urratsean erabiltzea, iturrien eta *front end* zerbitzarien artean, alegia.

HTTP streaming dinamikorako onartu den estandar bakarra **MPEG-DASH** da (*Dynamic Adaptive Streaming over HTTP*), baina oso erabiliak eta antzekoak diren beste aukera pribatu batzuk ere badaude. Izan ere, testu hau idaztean gehien erabiltzen dena ez da aipatutako estandarra, Apple-ren *HTTP Live Streaming* (HLS) protokoloa baizik. Protokolo horiek guztiek ezaugarri berdinak partekatzen dituzte (HTTPn oinarrituta, eta bideoa segmentutan zatituta egotea), baina bakoitzak bere xehetasunak ditu, eta horrek beren arteko bateraezintasuna sortzen du. Definitzen duten segmentuaren tamaina desberdinaz gain, erabiltzen dituzten bideo-kontainerrak ere ez dira berdinak; MPEG-DASH protokoloa mp4 kontainerrarekin lotuta definitu zuten, eta HLS, aldiz, MPEG Transport Stream kontainerrarekin. Hala izanik, bideo bat gehien erabiltzen diren bi protokoloen erabiltzaileei eskaini nahi zitzaizkion, bideo horren bi kopia sortu eta biltegitatu behar ziren, bat protokolo eta kontainer bakoitzeko. Kostu bikoitz horrekin amaitzeko asmoz adostu zuten CMAF bideo-formatu berria 2018. urtean, streaming zerbitzuentzako diseinatua (*Common Media Application Format*). Geroztik, HLS zein DASH zerbitzariak eta erreproduziztaileak onartzen dute formatu amankomun hori, eta berarekin lotutako fMP4 kontainerra (*fragmented MP4*).

- HTML5

Ikuslearen web-arakatzailaren eta erreproduziztailearen arteko harremana aldatu egin da urteek aurrera egin ahala. Hasieran, bideo bat ikusi ahal izateko arakatzaila erabiliz, erreproduzitzeko ahalmena plugin moduan gehitu behar zitzaion nabigatzaileari. Horixe egin da QuickTime-ren, RealPlayer-en eta, batez ere, Adobe Flash pluginaren garaietan. Baina 2007. urtetik aurreratu zen web-orrietan bideoak txertatu ahal izatea, baita arakatzaila bideoak zuzenean erreproduzitzeko ahalmena ematea ere, inongo pluginik erantsi beharrik gabe. Eskaera hori asetzeko, HTML5 estandar berrian bideoarako `<video>` elementua gehitu zuten, eta erreproduziztaile arakatzaila berak egikaritutako duen Java Script aplikazio bilakatu zuten. Flash-en aroaren amaiera 2011. urtean hasi zen, Adobe konpainiak iragarri zuenean ez zuela gehiago eguneratuko bere plugin mugikorretarako; eta prozesu hori azkartu egin zen 2015. urteko urtarrilean, YouTube-k iragarri zuenean Flash-en ordeztu HTML5 lehenetsiko zuela bideoak erreproduzitzeko. Hala eta guztiz ere, HTML5 estandarren hasierako arrakasta oztopatu zuena arakatzaila onartu beharreko bideo-kodeketarako adostasun eza izan zen.

HTML5ek erraztasun handia ekarri dio bideoak argitaratu nahi dituenari. Nahikoa da HTML-lerro batzuk txertatzea web-orri batean, eta zure bideoa eskura dago arakatzaila moderno guztientzat. Bere modurik sinpleenean, honelako lerro bat besterik ez da:

```
<video controls> <source src="Mendiak.mp4" type="video/mp4"> </video>
```

Bideoaren iturria `<src>` atributuaren balioa da, eta hor azaldu behar da, beste edozein agiri motarekin bezala, bideoa gordetzen duen fitxategirako ibilbidea zerbitzariaren diskoan. `<type>`

atributuak zer kodeketa mota erabili den azaltzen du, MIME identifikadoreak erabiliz, eta `<controls>` atributuak, berriz, arakatzailari agintzen dio bideoaren kontrolerako ohiko botoiak txertatzeko leihoan (*play, pause, stop...*). Beste adibide honetan bideo bera eskaintzen zaio arakatzailari, baina hiru kodeketa desberdin ditu aukeran:

```
<H2> HTML5 bideoa, formato desberdinetan eskainita </H2>
<p>
<video width="600" height="400" controls>
  <source src="media/Mendiak.ogv" type="video/ogg">
  <source src="media/Mendiak.webm" type="video/webm">
  <source src="media/Mendiak.mp4" type="video/mp4">
  Zure arakatzailak ezin du HTML5 bideoa erreproduzitu!!
</video>
</p>
```

Arakatzailak emandako aukerak agertzen diren hurrenkeran aztertzen ditu, eta, onartzen duen formatu bat topatzen duenean, hori hartu eta bilaketa eteten du. Adibidearen bukaeran agertzen den oharra nabigatzaileak eskaintako inongo formaturik onartzen ez badu pantailaratuko du soilik.

HTML5 `<video>` elementuarekin lan egiteko JavaScript API batzuk ere definitu dituzte. Garrantzitsuenak MSE (*Media Source Extensions*) eta EME (*Encrypted Media Extensions*) dira. Horiei esker, asko erraztu da arakatzailak egikaritzeko dituzten JavaScript erreproduzitzailak sortzea.

3.3. Atzerapen baxuko streaming-protokoloak

Streaming-protokoloen bilakaera etengabea da. HTTP streaming dinamikoa nagusitu ondoren, hurrengo erronka atzerapena minimizatzea izan da. HLS edota DASH sistemen bidezko atzerapena 15 segundotik gorakoa izaten da, nahikoa aurregrabatutako bideoak zerbitzatzeko, baina gehiegi zuzeneko komunikazioetarako. Une honetan, bi bide jorratzen ari dira atzerapen hori gutxitzeko. Bata segmentuen tamainan eta aurrekargan datza; bestea, bideoak transmititzeko garraio-mailan UDP protokoloa erabiltzean.

Atzerapen baxuko HTTP streaminga

Atzerapenaren osagai nagusia aurrekarga da. Hasierako HTTP streaming-sistema dinamikoen lehentasuna zen etenaldiak ekiditea, eta ez atzerapena minimizatzea. Ondorioz, definitutako segmentazioak eta eratorritako bufferren tamaina handia zen. Arreta atzerapenean jarri denean, jorratutako lehenengo aukera segmentazioaren eta bufferren birdefinizioa izan da, txikiago bilakatzeko. Hori da, funtsean, HLS eta DASH protokoloen atzerapen txikirako aldaerek egiten dutena (*Low Latency HLS* eta *Low Latency DASH*). Aldaera horiek bateragarriak dira protokolo bereko aurreko bertsioekin; erreproduzitzailak ez badu onartzen atzerapen txikiko bertsioa, zerbitzariak automatikoki erabiliko du protokoloaren bertsio arrunta.

Bide beretik doa dagoeneko aipatu dugun CMAF formatu berria erabiltzeko aukera. CMAF proposamenaren helburu nagusia formatu bakarra erabiltzea izanda ere, aukera aprobeztatu zuten, eta definitutako segmentazioan erabilitako *chunken* tamaina ere gutxitu egin zuten, atzerapena laburtzeko asmoz.

UDP bidezko streaminga

Atzerapena jaisteko hartutako beste bidea TCP eta bere kongestio-kontrolak baztertzea izan da, eta, horren ordez, UDP erabiltzea bideoa garraiatzeko. Neurri batean, RTSP bezalako hasierako streaming-sistemetarako itzultzea da. Bide hori hartu duten proposamenak dira SRT protokoloa eta WebRTC bidezko streaminga.

SRT protokoloak (*Secure Reliable Transport*) izen nahasgarria du, aplikazio-mailako protokolo bat baita. Bideoa eta aginduak UDP datagrametan bidaltzen ditu, arintasunaren bila. Hala ere, UDP erabiltzeak ez du esan nahi TCPk ematen duen fidagarritasunari uko egitea; SRT protokoloak berak inplementatzen ditu, aplikazio-mailan, galerak berreskuratzeko behar diren mekanismoak. Horrela, nolabait, UDPren eta TCPren onurak konbinatzen ditu; alde batetik, arintasuna, eta, bestetik, fidagarritasuna. Arintasun horri esker, SRT erabiltzen duten streaming-sistemetan atzerapena 3 segundopean jar daiteke.

Egun erabiltzen diren HTTP gaineko streaming-protokoloekin alderatuta, SRT protokoloak duen handicap handia da, berriz, bere inplementazioaren hedapen eza arakatzailleetan. TCP baztertzek HTTP ere baztertzea dakar, eta, ondorioz, ez dago mahai gainean SRT erabiltzea streaming-zerbitzarien eta ikusleen artean. Aldiz, SRT proposatu da streaming-sistemen lehenengo urratsean erabiltzeko, hau da, iturrien eta *front end* streaming-zerbitzarien artean, RTMPren ordeztu.

UDP gainean dabilen beste aukera bat WebRTC da (*Web Real-Time Communication*, RFC 8825). Berez, WebRTC ez da protokolo bat, denbora errealeko komunikazioetarako behar direnak biltzen dituen lanerako testuinguru bat baizik, non protokoloak, estandarrak eta, batez ere, API batzuen definizioa baitaude. Ez zen definitu bideo-streaming sistemetarako, arakatzaillearen arteko komunikazio zuzenetarako baizik. Ikusi dugun HTML5 estandarraren bide beretik doa, hau da, APIak definitzen ditu, arakatzailleak denbora errealeko komunikazioetarako bezero bilakatzeko. API horiek edukitzeak aplikazioen sortzaileak askatzen ditu komunikazioen inguruko arazoetatik, hala nola, kodetzaillearen erabilerari edo bideoaren transmisioari buruzkoetatik. Hasiera batean, sare sozialetako lagunen arteko bideokonferentzietan erabiltzen zen nagusiki, baina segituan zabaldu da bere erabilerara taldeko streaminga egiteko, eta *de facto* estandar bat bilakatzen ari da taldean *live streaming* egitean. Ohartu bideokonferentzia baten eta zuzeneko streaming baten arteko aldea oso txikia dela; bietan igorleak unean bertan ari dira transmititzen hainbat hartzailearentzat. Bere hurrengo erronka da WebRTC erabiltzea bideo-banaketa masiborako sistemetan ere.

Bideoa eta audioa transmititzeko RTPren bertsio segurua erabiltzen dute WebRTC aplikazioek, eta, horren azpian, UDP. Galerak berreskuratzeko, hurrengo kapituluan aztertuko ditugun FEC teknikak erabiltzen dira (ikus RFC 8854). Horrek guztiak ahalbidetzen du oso atzerapen txikia lortzea, segundo erdi baten azpitik (*Ultra Low Latency*).

Neurri handi batean, WebRTC sistemek streaming-aroaren hasierara itzularazi gaituzte, RTP/UDP bikotea erabiltzen zuten RTSP streaming-sistemen garaira, alegia. Garai horretan RTSPk izan zituen arazoak hor ditugu oraindik, baina orain baditugu orduan ez zeuden irtenbideak. NAT eta antzeko gailuak gainditzeko, WebRTC sistemek ICE protokoloak erabiltzen dituzte (IP telefonia aztertzean ikusiko dugu ICE estandarra). Beste alde batetik, HTTP zerbitzariekin lan egitea ez da behar bat edo abantaila bat WebRTC komunikazioetan, bi arakatzaillearen arteko komunikazio zuzenetarako baitago definituta WebRTC. Hau da, ez dugu behar inongo protokolorik bideoa eskaintzen digun zerbitzari batekin komunikatzeko, horren zerbitzaririk ez dagoelako. Bideoa arakatzaille batek eskaintzen die beste arakatzaillei, komunikazioari P2P kutsua emanez eta WebRTC-k definitzen duen arakatzaillearen arteko protokoloa erabiliz. Bideo-banaketa masiborako sistemetan WebRTC erabili izan da hasieran iturrien eta streaming-zerbitzarien arteko komunikazioan, RTMPren ordeztu, eta SRTrekin lehian. Baina WebRTC jauzia ematen ari da streaming-sistemen bigarren zatira ere, *front end* zerbitzarien eta ikusleen arakatzaillearen arteko komunikazioetara, arakatzaille horiek dagoeneko prest daudelako WebRTC komunikazioetarako; eta gogoan izan WebRTC-ren bidez agertzen diren atzerapenak HTTP/TCP bidezko streaming-sistemetan lortzen direnak baino askoz baxuagoak direla.

4. P2P streaminga

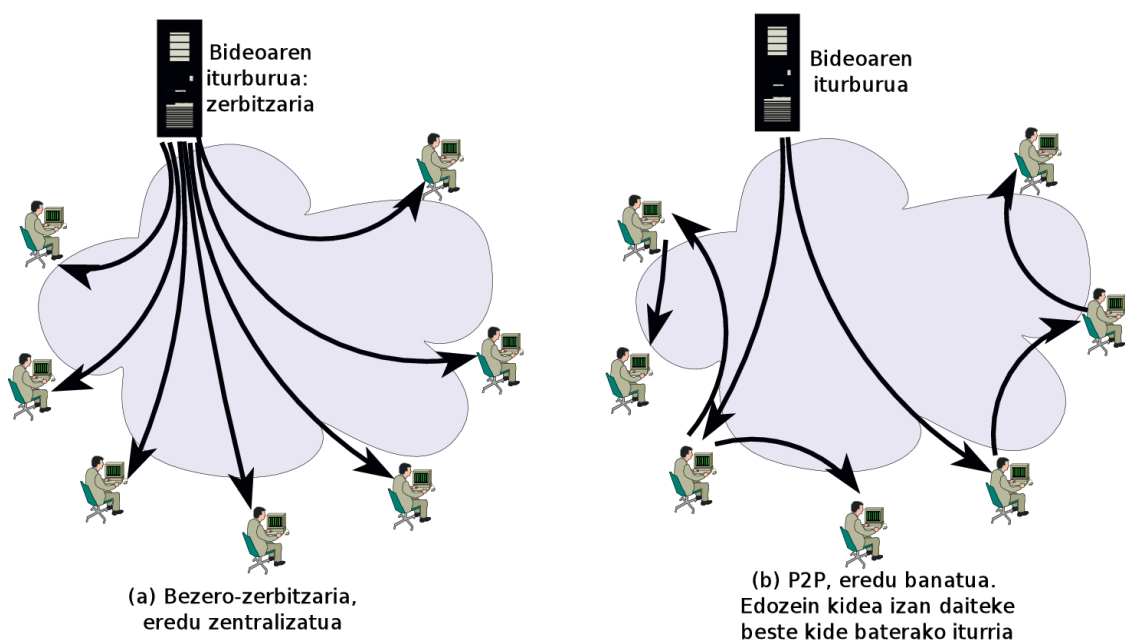
Bideo-sortzaile partikularrek beren bideo laburrak lagunen eskura jarri nahi dituztenean, nahikoa izan ohi dute sarean dauden doako zerbitzuak erabiltzea, CDN bidezko streaminga era-

biltzen dutenak. Baina zerbitzu horiek egokiak ez direnean, gauzak konplikatu egiten dira. CDN sareek eskema zentralizatuaren eskalagarritasunaren arazoa gainditzen dute, baina garestiak dira. Soilik konpainia handi batzuek sortu eta kudea dezakete CDN bat osatzen duen zerbitzari-gune sorta. Gure bideoak banatzeko CDN baten zerbitzuak erabiltzerik ez badago, edo inola ere ez badugu erabili nahi, aukera bat izan daiteke P2P streaminga.

P2P streaminga egiteko aukera XXI. mendearen hasieran sortu zen. Denboraren poderioz, CDN aukera nagusitu da, eta, abiatu ziren P2P streaming-egitasmo asko desagertu badira ere edo CDN izaera hartu badute ere, badago teknologia hori erabiltzen duen komunitate handi bat Interneten. Horrez gain, ez da baztertu behar etorkizunean gainditzea egun P2P streaming-sistemek dituzten arazoak.

4.1. P2P streamingaren erakargarritasuna

P2P akronimo anglosaxoia hitz-joko batetik eratorritakoa da. Berez, *peer-to-peer* du esanahia, hau da, berdinen artekoa. Ohiko bezero-zerbitzari ereduaren alternatiba gisa sortu zen, Interneten zerbitzu bat jaso ahal izateko inongo zerbitzariaren menpe izan gabe, eta, berez, zerbitzari hori kudeatzen duen inoren menpe izan gabe. Sare-aplikazioen eredu berri hori fitxategiak partekatzeko asmatu zuten, baina, gero, beste aplikazio asko aurkitu zaizkio; tartean, P2P streaminga. Sistemaren ideia honako hau da: zerbitzua jaso nahi duten erabiltzaileek, eta ez zerbitzariak, zerbitzua emango diote elkarri, 2.12 irudian agertzen den moduan. Eredua, teoriarik behintzat, guztiz horizontala da: partaide guztiek zeregin bera dute, eta, zerbitzariak sortzen duten menpekotasunaren aurrean, partaideen arteko elkarlana dago. Hori horrela izanik, zenbat eta erabiltzaile gehiago izan, orduan eta zerbitzu hobea lortzen da, P2P sarean parte hartzen duten erabiltzaile horiek beste erabiltzaileei zerbitzua eman diezaieketelako. Hau da, P2P sistemak guztiz eskalagarriak dira, edo, beste era batean esanda, erabiltzaile kopurua handitzen den heinean, sistemak erantzun egokia ematen du kalitaterik galdu gabe eta sistemaren kostuak handitzeko beharrik gabe. CDNetan erabiltzen den bezero-zerbitzarien sistemen dinamika guztiz kontrakoa da: erabiltzaile kopurua handitzen den heinean, emandako zerbitzua narriatu egiten da, zerbitzariak edo beste azpiegiturak (sare-ahalmena zerbitzariaren konexioan, argindarra...) ito arte, zerbitzari kopurua eta behar diren beste azpiegitura guztiak handitu ez badira.



2.12 irudia. Bezero-zerbitzaria eta P2P ereduak.

P2P streamingeko sare baten kasuan, partaide bakoitzak bideoaren zatiak jasotzen ditu beste partaideengandik, eta, aldi berean, jasotakoak beste partaideei birbidaltzen dizkie. Sarean partaide gehiago egonez gero, iturri gehiago izango ditu aukeran partaide bakoitzak bideoa jasotzeko, eta, ondorioz, kalitate hobea lortzeko probabilitatea handitu egiten da. Adibidez, partaide batek emandako seinalea oso ona ez bada, sarean urruti dagoelako, gertuago dagoen beste partaide bat topatzea erraza izango da partaide asko baldin badaude sarean. Edo gure iturri batek P2P sarea uzten badu, hobe da beste partaide asko aukeran izatea, bera ordezkatzeko. Eskalagarritasun horretan datza P2P sistemen erakargarritasuna.

4.2. P2P streamingerako aukerak

Bi dira P2P sareak egituratzeko erak: zuhaitz moduko P2P sareak eta P2P lainoak (*swarming* P2P). P2P zuhaitzek *multicast* kontzeptua gauzatzen dute aplikazio-mailan, multicast-metasare bat eraikiz Interneten. *Multicast* kontzeptua geroago aztertuko dugu. P2P lainoetan, partaideak talde-tan antolatzen dira (talde bakoitza *swarm* bat da, hau da, erlekume bat), eta partaide bakoitzak taldeko beste partaide batzuekin trukutzen du informazioa, batzuei igorri eta besteengandik jasoz. Bi kasuetan, zuhaitzean eta lainoan, hainbat aldiz kodetzen da bideoa, MDC teknika erabiliz.

Multiple Description Coding (MDC)

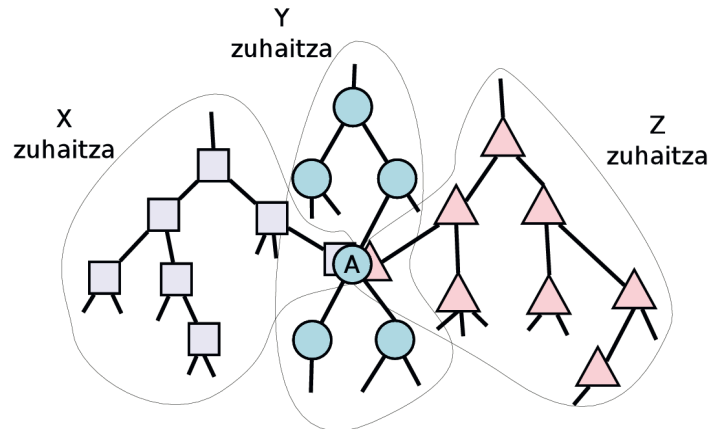
MDC kodetze-sistema erabiltzen da bideo bakarra hainbat **azpistreametan** kodetzeko eta transmititzeko. Azpistream bakoitzari *deskribapen (description)* deritzo teknika horretan. Bideoa erreproduzitzeko, nahikoa da deskribapen bakar bat jasotzea, baina hainbat deskribapen ere har daitezke paraleloan, eta, guztiak erabilia, bideoa erreproduzitu. Erreproduzioan lortutako kalitatea erabilitako deskribapen kopuruaren arabera da: maximoa izango da deskribapen guztiak erabiltzen direnean. Hori horrela izanik, partaide batek ahalik eta deskribapen gehien lortu behar du beste partaideengandik, eta, aldi berean, igortzeko ahalmenaren arabera, beste partaideei ahalik eta deskribapen gehien birbidaltzen saiatu behar du. Kodetze-sistema horri esker, gainera, streaming dinamikoa egin daiteke P2P sareetan, era naturalean, partaide bakoitzak bilatuko baitu jaso dezakeen deskribapen kopuru handiena une bakoitzean.

P2P zuhaitzak

Aukera horretan, partaideak zuhaitzetan antolatzen dira; hau da, partaide batek jasotzen duen informazioa beste hainbat partaideri birbidaltzen die. Salbuespena zuhaitzaren hostoak dira, jasotakoa ez baitiote birbidaltzen beste inori. Eskema horrek talka egiten du erabiltzaileen Internet-konexioen ahalmenaren asimetriarekin. Hau da, nodo batek jasotze-ahalmen gehiena erabiltzen badu stream bat ahalik eta kalitaterik hoberenean jasotzeko, ezingo du igorri abiadura berean, are gutxiago kopia bat baino gehiago, etxeetako Internet-konexioek askoz ahalmen handiagoa baitute behearanzko noranzkoan (*downstream*), goranzkoan baino (*upstream*). Horregatik erabiltzen da MDC kodeketa P2P streamingean. Beraz, bideo bat ikusteko, ez da sortzen zuhaitz bat partaideen artean, baizik eta hainbat zuhaitz; eta zuhaitz bakoitzean MDC kodeketaren bidez sorturiko deskribapen bat banatzen da partaideen artean. Erabiltzaile batek hainbat zuhaitzetan hartuko du parte, transmisio-ahalmenaren arabera. Normalean, partaide bat zuhaitz bakar batean izango da barruko nodoa, eta, beste guztietan, hostoarena egingo du. 2.13 irudian, adibidez, A partaidea hostoa da bi zuhaitzetan, eta barruko nodoa beste batean. Zuhaitzak sortzeko eta eguneratuta eusteko, algoritmoak gako nagusia dira P2P zuhaitzen bidezko banaketan. Erabilitako algoritmoak saiitzen dira zuhaitzak ahalik eta egonkorrenak eta laburren izan daitezen. Arazo handiena partaideek alde egiteari aurre egitea da.

Nahiz eta P2P izaera aldarrikatu, ohartu sistema horretan partaide guztiak ez direla berdinak. Bideoaren iturburua den nodoak beti eduki behar du igortzeko ahalmen nahikoa MDC deskribapen guztiak aldi berean transmititzeko. Are gehiago, saiatu behar da MDC deskribapen bakoitzeko

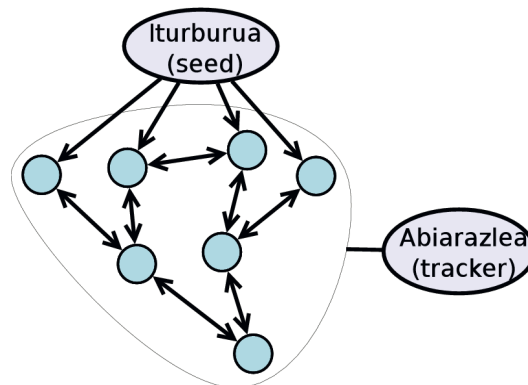
ahalik eta kopia gehien isurtzen sarean. Haietako kopia bakoitza zuhaitz baten iturburua izango da, eta, beraz, bideoaren iturria den nodoa zuhaitz guztien iturburua da. Tartean agertzen bada jasotako deskribapen guztiak birbidaltzeko ahalmena duen partaideren bat, ederto. Horri **supernodo** deritzo. Supernodoak ager daitezke hainbat zuhaitzetan barruko nodo gisa, eta inon ez hostoarena egiten. Zerbitzua iturburuaren eta supernodoen menpe dagoenez, zilegi da kolokan jartzea eskema honen P2P izaera, bere filosofian behintzat.



2.13 irudia. Bideo baten banaketa P2P hainbat zuhaitzetan. Irudian hiru MDC azpistream banatzen ari dira, bakoitza bere zuhaitzean. A nodoa hostoa da X eta Z azpistreamerako zuhaitzetan, eta barruko nodoa Y zuhaitzean.

P2P lainoak

P2P streamingeko lainoek (**swarming**) fitxategiak trukatzeko BitTorrent sistemaren ideia bera hartzen dute. Laino batean, partaideen arteko loturak ez daude hierarkikoki antolatuta, zuhaitzetan bezala, baizik eta zorizko moduan, sareta baten antza hartuta. Partaide batek iturri bat baino gehiago izango ditu, deskargatzeko ahalmenaren arabera ahalik eta MDC deskribapen gehien jasotzeko. Gainera, igortzeko ahalmenaren arabera, deskribapen horiek guztiak beste partaideei birbidaliko dizkie. Bideo bat ikusteko, partaideak laino batean sartu behar du. Horretarako, laino horren nodo-abiarazle bat behar du (**bootstrapping node**), balizko iturrien zerrenda lortzeko. Abiarazleak lainoko partaide bakoitzaren lan-zama erregistratzen du une bakoitzean, eta informazio horrekin prestatzen du partaide berri bakoitzarentzako zerrenda. BitTorrent hizkeran, **abiarazlea trackera** da, eta bideoaren iturburua den makina, berriz, **seeda**. Partaideen arteko informazio-trukea bi noranzkoetan egin daiteke, edo bakar batean. 2.14 irudian duzu laino baten adibidea.



2.14 irudia. P2P laino bat (swarming).

P2P lainoak eta zuhaitzak hasieran ematen duena baino antz handiagoa dute. Partaide baten zuhaitz guztiak aldi berean kontuan hartuta, lainoa bezalako egitura bat sortzen da, baina loturak beti noranzko bakarrekoak izanik. Bi kasuetan, partaide bakoitzak deskribapen batzuk jasotzen ditu beste partaide batzuegandik, eta beste partaide batzuei helarazten dizkie haietako deskribapen batzuk. Bi kasuetan behar da abiarazlearena egiten duen nodoren bat, askotan bideoaren iturburuak berak egiten duena. Eta, erreproduzitzen hasi baino lehen, bieran gehitu behar zaio aurrekarga-denborari P2P sarean sartzeko behar den tarte (*join time*). Sistemen eta P2P partaide kopuruaren arabera, denbora horiek aldakorak dira. Ideia bat egiteko, 4 eta 15 segundo arteko sartzeko-denborak neurtu dira. Kontuan izan denbora hori behar dela ikusten ari garen bideoa aldatzen dugun bakoitzean, horrelako aldaketa batek P2P sareaz aldatzea baitakar. Orokorrean, emaitza hobek ematen dituzte P2P lainoek zuhaitzek baino.

4.3. P2P streamingaren mugak

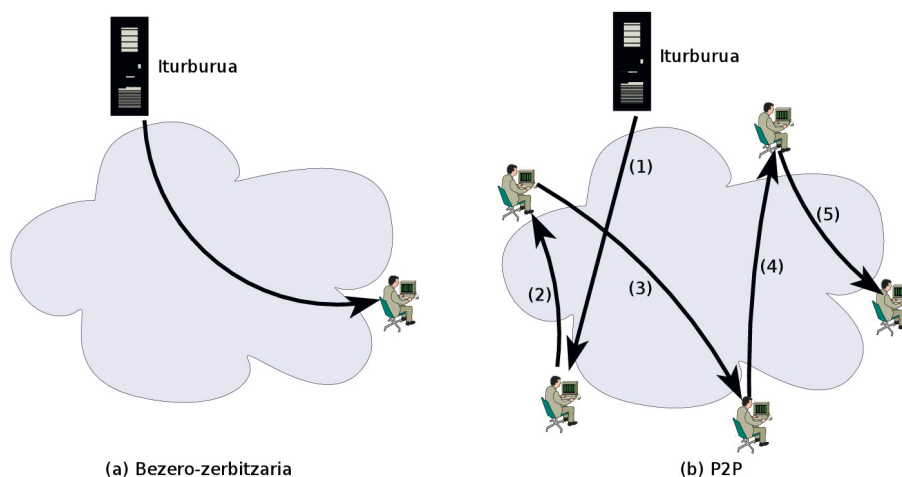
Inbertsio-behar baxuagatik eta eskalagarritasunagatik oso erakargarria izanda ere, P2P streaminga ez dago oso hedatuta, CDN streamingarekin alderatzen badugu behintzat. Errealitate horren arrazoi nagusiak bi dira: erabiltzaileen sinkronizazioaren beharra eta lortutako kalitate eskasa.

Sinkronizazioaren beharra

Sinkronismoari dagokionez, ohartu P2P sistema baten partaide guztiak aldi berean jaso behar dutela zerbitzua; streamingaren kasuan, horrek uneko streaming-aplikazioetara (*live streaming*) mugatzen du erabilgarritasuna, aurretik grabaturiko bideoen eskari-zerbitzuan (VoD) oso baxua baita erabiltzaileen arteko sinkronizazioa. Hau da, eskaria ikaragarria duten bideoen kasuan izan ezik, oso zaila da hainbat partaidek une bertsuan eskatzea bideo bera ikusteko. Uneko streamingak, aldiz, berezkoa du sinkronizazio hori, beti aldi berean ari baitira ikusle guztiak ikusten zuzenean igorritako bideoa. Baina, P2P streamingaren sustatzaileen zoritxarrerako, aurretik grabatutako bideoen zerbitzua da nagusia. Izan ere, telebistaren kontzeptua aldarazten ari dira ikusleak, garai bateko hedapeneredua baztertuz eta eskatu ahalako eredu berria hartuz. Egungo telebista-ikusleak, batez ere gazteak, ez dira eroso sentitzen ordutegi eta telebista-programazio bati lotuta; haiek aukeratzen dute zer, noiz eta nola (telefonoan, egongelako telebistan, logelako ordenagailuan...) ikusi nahi duten bideo bat (*programa* hitza gero eta gutxiago erabiltzen dugu pantaila batean ikusten duguna izendatzeko), eta ez daude prest publiziterako etenik pairatzeko film baten erdian daudela.

P2P streaminga aurretik grabatutako bideoen banaketarako egokia ez bada ere, hor daude zuzeneko ekitaldiak. Baina, eremu horretan ere, CDN streaminga eta, batez ere, betiko telebista-sareak dira nagusi, eta ez hain merkea eta eskalagarria den P2P streaming-teknologia. Arazoa lortutako kalitatean datza. Alde batetik, P2P streaming-sistemek oso atzerapen nabaria sortzen dute ekitaldiaren beraren eta haren erreproduzioaren artean. Atzerapen horretan, P2P sarean sartzeko denborak (*join time*) eragiten du, baita aurrekargak ere, zeina P2P sistemetan CDNetan baino handiagoa baita, P2P sareak CDNak baino ezegonkorragoak baitira eta informazioak ibilbide luzeagoak egin behar baititu nodoen artean. Egonkortasunari dagokionez, edozein unetan gerta daiteke partaide baten iturriren batek P2P saretik alde egitea. Hori gertatzen denean, partaideak denboratarte bat behar du beste iturri bat lortu arte. Etengabeko iturri-aldaketa horri aurre egiteko (*churn* esaten diote ingelesez, *change-and-turn* hitzetatik eratorrita), aurrekarga-maila handitu behar da, eta horrek erreproduzitzeko atzerapena handitzea dakar. Beste alde batetik, gogoratu iturburuaren eta erreproduzitzailaren arteko distantziak ere handitzen duela etenak izateko arriskua. P2P sareetan, distantzia hori, segundotan neurtuta, askoz handiagoa eta ezegonkorra da, tartean hainbat P2P partaide eta bideratzaile baitaude, eta ez soilik hainbat bideratzaile (bideratzaileak, gainera, askoz eraginkorragoak dira datagramak birbidaltzeko P2P sareko partaideak baino). Ikusi, adibidez, 2.15 irudiko (b) aukera, non azken partaideraino heldu arte, iturriak igorritako datagramak beste

lau partaide bisitatu behar baitituzte, eta alderatu (a) aukerarekin, non datagramak zuzenean hel-tzen baitira iturritik. Horrela, ekitaldi beraren ekintzak betiko hedapen-sare bidezko saioan minu-turen bat lehenago gertatzen dira P2P saio batean baino. Nimiñokeria dirudien horrek egundoko garrantzia du joko olinpikoen 100 metroko lasterketako finala ikusten ari garenean, kasurako.



2.15 irudia. Iturburuaren eta erreproduzitzaileraren arteko distantzia. Irudiko P2P aukeran, bost partaide zeharkatu behar du streamak erreproduzitzaileraino heldu arte.

Bideoaren kalitatea eta banda-zabalera

Beste alde batetik, banda-zabaleraren arazoa dago P2P streaming-sareetan. Hori ulertzeko, demagun bideo bat 4K kalitatean ikusteko 5 Mb/s-ko abiadura behar dela (abiadura hori aldatu egi-ten da kodeketa-sistemak hobetzen diren heinean). Hasiera batean, gure sare-konexioak 5 Mb/s-ko deskarga-abiadura ematen badigu, kalitaterik hoberenean ikusi behar genuke bideoa. CDN baten zerbitzari batek, horretarako dimentsionatuta badago, 5 Mb/s-ko abiaduran bidaliko digu streama, eta, sarean aparteko arazorik ez badago, 4K-ko bereizmenarekin ikusiko dugu bideoa. Demagun P2P alternatibari 5 Mb/s horiek 1 Mb/s-ko abiadurako 5 MDC deskribapenetan daudela banatuta jatorrizko saioan. P2P sare horretan, goranzko konexioan 1 Mb/s libre duten bost partaide aurkitu beharko ditugu bideoa 4 K kalitatean ikusteko. Atalase baxuagoa edukitzearen, 500 kb/s-ko deskribapenak egin daitezke, baina, kasu horretan, bost partaideren ordez, 10 partaide topatu beharko ditugu 4 K kalitatea lortzeko behar diren 10 deskribapenak guri hornitzeko. Alde batetik errazten duguna beste batetik zailtzen dugu, alegia. Praktikan, zaila da hainbeste partaiderekin elkarlanean aritzea, eta, ondorioz, zaila da kalitate handiko bideoak lortzea P2P streaming-teknologian. Erabil-tzaileen sare-konexioak asimetrikoak diren bitartean, behintzat, zenbakiak ez dira ondo ateratzen: kide berri batek hornitzen duenak ez du estaltzen sortzen duen behar berria. P2P teknologia erabil-tzen zuten Zattoo sisteman egindako neurrien arabera, sareko partaideen % 50ak ezin zuten bideo ba-ten erdia ere birbidali, eta partaideen % 82ak ezin zuten birbidali bideo oso bat.

Goranzko banda-zabaleraren mugarik ez dago P2P lainoak erabiltzen dituen fitxategi-trukee-tan (adibidez, BitTorrent sistemetan), aplikazio horretan ez baitago streaming-aplikazioan dugun denbora errealik. Fitxategi bat trukatzeko duen laino batean, elkarlanean aritu daitezke ia fitxategi osoa duten partaideak zein lainoan sartu berriak. Bideo bat ikusterakoan, aldiz, filmaren hasieran dagoen partaideak ez du ezer trukatzeko film bera minutu batzuk lehenago ikusten hasi den beste partaide batekin. Gainera, BitTorrent sistemetan erabiltzen den *tit-for-tat* estrategiak ez du balio streaming-aplikazioetan, sinkronizazioaren behararengatik. Estrategia horretan, A partaide batek

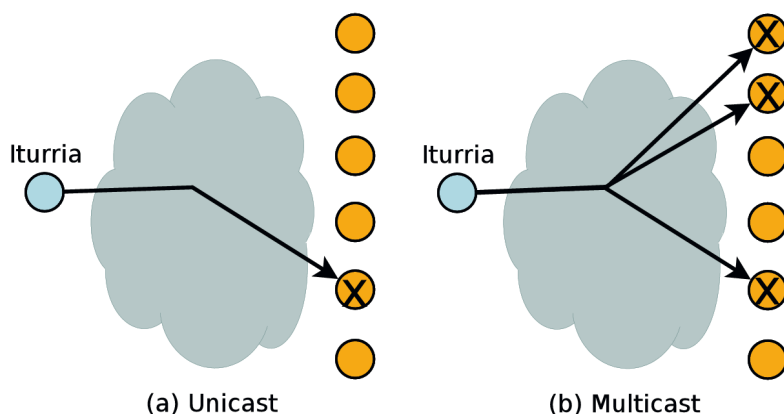
B partaideari igorriko dio informazio kantitatea, B-k A-ri bidaltzen dion informazio kantitatearen arabera. *Tit-for-tat* helburua bizkarroiak (*leechers*) baztertzea da; hau da, besteengandik informazio bila etorri baina besteei informazioa birbidaltzeko prest ez daudenak sistematik ateratzen ditu *tit-for-tat* jarduerak. Streaming batean, partaide baten iturria diren beste partaideek onartu behar dute elikatutako partaide horrek ezin diela ezer eskaini, berak izango dituen bideo zatiak iturriek dagoeneko erreproduzituak izango baitituzte.

Partaideen goranzko ahalmenaren defizitari aurre egiteko, P2P streaminga erabiltzen duten sare batzuek CDN-izaera ere hartu dute. Lehen aipatu dugun Zattoo sarea da horren adibidea. Erabiltzaileei kalitate minimo bat eskaintzeko, nodo errepikatzaileak gehitu dituzte sarean. Errepikatzaileak iturburuaren kopiak dira, eta haien funtzioa partaide berriak elikatzea da, partaide zaharrek horretarako goranzko ahalmen nahikorik ez dutenean. Azkenean, errepikatzaileek CDN-sare bat osatzen dute.

Arazo horiek direla eta, P2P streaming-teknikaren arrakasta mugatuta dago. P2P streaming-egitasmo askok porrot egin dute, batez ere XXI. mendearen hasieran. Hala eta guztiz ere, P2P streaminga bizirik dago, eta, etxeetako konexioen goranzko ahalmenak gora egiten duen heinean, oztopo teknologikoak leundu egingo zaizkio. Ikusteke dago zenbateko eragina izango duen etxeetako zuntz optikoko sareen hedapenak P2P streamingean.

5. Multicast-streaminga

CDN sareez eta P2P teknologiaz gain, badago hirugarren bide bat eskalagarritasunaren arazari aurre egiteko: helburu anitzeko IP helbideak (*multicast*) erabiltzea. Aukera hori CDN edo P2P streaming-sareen osagarri gisa erabiltzen da maiz, uneko streaming-zerbitzuak hobetzeko. Geroko kapitulu batean aztertuko dugu sakonago multicast-teknologia; oraingo honetan, streaming-sistemetan IP multicast-helbideen erabilera ikusiko dugu. Multicast bidezko streaming-sistema baten osagaiak streaming-sistema arrunten osagai berak dira, baina, unicast-helbideen ordez multicast-helbideak erabiltzen dituzte.



2.16 irudia. Unicast eta multicast.

Multicast-helbideak

Normalean erabiltzen ditugun IP helbideak *unicast* erakoak dira, hau da, helburu bakarrekoak. Haietako helbide bakoitzak IP sarean lotutako makina bat identifikatzen du; hau da, sare-txartel bakoitzak bere IP unicast-helbidea du (berez, helbideak sare-txartel bat identifikatzen du, ez makina).

Multicast-helbide batek, aldiz, makina talde bat identifikatzen du, edo, zorrotzago hitz eginda, IP sarean lotutako sare-interfazeen sorta bat identifikatzen du. 2.16 irudian, adibidez, hiru sare-interfaze identifikatzen ditu. Adi: sare-txartel batek beti izan behar du bere IP unicast-helbidea, eta, horretaz gain, sare-txartel hori multicast-talde baten kidea izan daiteke. Hau da, ez dugu aukeratu behar unicast- edo multicast-helbide bat makina baterako, biak aldi berean erabiltzen baitira. Datagrama baten helburuko helbidea multicast erakoa denean, datagrama horren kopia bana helarazi behar dio sareak multicast horren taldekide bakoitzari. *Sarea* esaten dugunean, sareko bideratzaileez ari gara. Ohartu multicast-helbideak soilik helburu bat adierazteko erabil daitezkeela, ez baitu zentzurik multicast-ahelbide bat agertzeak datagrama baten jatorrizko helbide gisa.

IP multicasten onurak

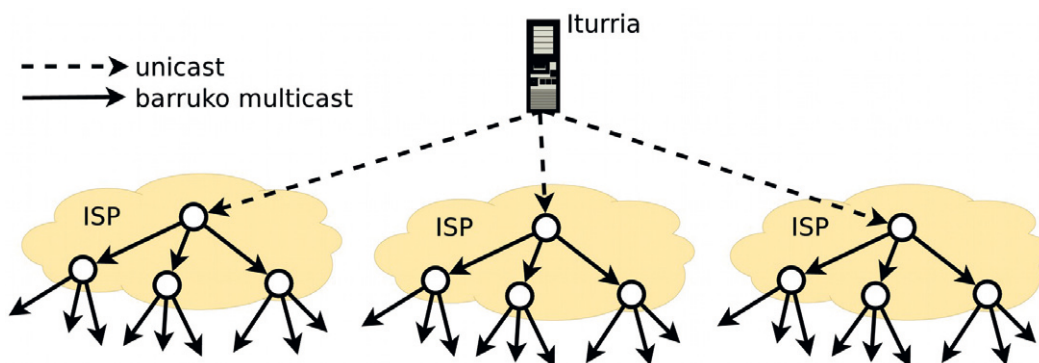
Multicast-streaminga erabiltzearen abantaila eskala-ekonomia da: ikusle kopurua edozein izanda ere, sistemaren kostua bera da. Hartzaile kopurua nahi dugun adina handitzen bada ere, hornitzaileak ez du zerbitzari berririk gehitu behar, ezta banda-zabalera gehiago kontratatu behar ere. Hartzaile kopurua edozein izanda ere, igorleak datagrama bakoitzaren kopia bakarra sortu eta bidali behar du. Bideratzaileen lana izango da datagrama hori ugaltzea eta kopiak birbidaltzea behar diren lineetan, hartzaile bakoitzak berea jaso dezan. Multicast erabiltzeak, igorleari dakarkion abantailaz gain, sareari ere mesede egiten dio, ibiltzen den trafikoa txikiagoa izango baita.

Ikuslearen ikuspuntutik, multicast-helbideak erabiltzea P2P sareak erabiltzea baino aukera hobea da uneko telebista jasotzeko, bi arrazoirengatik. Lehen, jatorrizko seinalearen atzerapena da. Lehen aipatu dugunez, P2P sare batean, minutu batzuetakoa izan daiteke atzerapena, aurrekarga-denbora bereziki luzea baita P2P sarearen ezegonkortasunari aurre egiteko. Multicast-sistemetan, aldiz, atzerapena bereziki baxua da, UDP bidezkoa delako transmisioa, eta iturriaren eta hartzailearen artean sareko bideratzaileak besterik ez daudelako, P2P sareko beste ikusleen menpe egon gabe. Bigarren abantaila seinalearen kalitatea bera da. Multicast-sistema batean, hartzaile bakoitzaren sare-konexioak mugatzen du jaso dezakeen seinalearen kalitatea. P2P sistema batean, berriz, partaide batek jasotzen duen kalitatea beraren iturburu diren beste partaideen banda-zabaleraren araberakoa ere izango da, eta, askotan, banda-zabalera horiek jatorrizko iturburuarenak baino eskasagoak dira.

Multicast bidezko streamingaren mugak

Hori bai, P2P streaming-sistemak bezala, multicast-streaminga erabiltzea zuzeneko streaming-gegarako soilik da bideragarria, aldi berean jaso behar dutelako emanaldia ikusle guztiek. Hori muga handia da, multicast bidez bideraezina den VoD zerbitzua nagusi baita Interneten.

Horrez gain, multicast-helbideak soilik UDPrekin batera erabil daitezke, TCP protokoloarekin ezin baita sortu multicast-trafikorik. Ondorioz, multicast-trafikoa erabili nahi bada, ez dago HTTP bidezko streaming-aukerarik.



2.17 irudia. IPTV streaming-sistema misto bat, unicast eta multicast erabiliz.

Multicast-banaketa CDN bidezko streamingarekin alderatuta, atzerapenari eta haren ondorioei dagokienez hobe da CDN-sarea, hartzaile bakoitzak gertuen duen iturritik jasoko baitu bere streama. Multicast-helbideak erabilia, aldiz, iturri bakarra izaten denez, hartzaile bakoitzarekiko distantziaren arabera izango da atzerapen hori.

Baina IP multicast erabiltzeko oztoporik handiena bere **dena-edo-ezer-ez** izaera da (*all-or-nothing*). Multicastak funtzionatzeko, igorlearen eta hartzaile guztien artean dauden sare guztiek onartu eta bideratu behar dituzte multicast-helburua daramaten datagramak. Eta, egun, hori ez dago bermatuta, bideratzaileek multicast-trafikoa onartzea ez delako derrigorrezkoa, aukera bat baizik. Multicast oso teknologia zaharra bada ere, sistema autonomoen arteko komunikazioetan zailtasun handiak izan ditu hasiera-hasieratik. Egun, zailtasun horiek teknikoki gaindituta badaude ere, teknikoak ez diren beste arrazoi batzuek oztopatzen dute bere hedapena Internet osatzen duten sare guztietan. Horren ondorioz, multicast oso erabilia da sistema autonomoen barruko komunikazioetan, baina ezin da erabili Internet irekian. Streaming-sistemei dagokienez, oso erabilia da IPTV erudian, CDN bidezko banaketarekin batera. Sistema misto horiek deskribatzen dira 2.17 irudian, non iturburuan eta *front end* zerbitzarien artean unicast erabiltzen baita, eta, gero, ISP berean dauden *front end* zerbitzarien eta ikusleen artean multicast erabiltzen baita. Baina ezin da erabili OTT erudian, ez dagoelako bermatuta igorleak isuritako datagramak hartzaile guztiengana helduko direla.

Internet osoan multicast-trafikoa onartuz gero, edonork konekta lezake bere webcam-sarean, eta BBCK duen hedapen bera lortu bere saiorako, banatzeko sarean euro bat bera ere inbertitu gabe. Hori ez dute oso gustuko ez ISPeK, ez edukien hornitzaile handiek, ezta CDN operadoreek ere. ISPeK beren sareak erabiltzen dituzten negozioen etekinen zati bat nahi dute, IPTV erudian egiten duten moduan. Internet multicast batean, aukera hori desagertu egiten da, edonork eraman baitezake bere seinalea Interneteko edozein txokotara kalitate onarekin. Hau da, edozein izan daiteke zuzeneko OTT operadore bat, kamara, ordenagailu eta Interneterako konexio arruntak edukita. Eta, Internet multcastik balego, CDN operadoreek zuzeneko telebistaren banaketarako negozioaren zati bat galdu lezakete. Aldaketarako gakoa ISPeK dute, dagoeneko Tier mailako Internet-operadore gehienek —agian denek, dagoeneko— onartzen baitute multicast-trafikoa beren sareetan. Hau da, Internet-handizkariak bideratzen dute multicasta, baina ez txikizkariak.

Laburpena

Bideo- eta telebista-saioak banatzeko sareen artean, Internet nagusitzen ari da, antena, satellite edo kable bidezko sareen kalterako. Horretarako, hainbat erronka teknologiko gainditu behar izan dituzte ingeniari informatikoek, Internet ez baitzen diseinatu telebistak eta bideoak sortzen duten trafiko motarako. Kapitulu honetan, hori nola lortu duten aztertu dugu.

Internet erabiltzeko bideoak eta telebista banatzeko, honako hiru arazo hauek egon dira nagusiki: lehena, pantailan dugun irudiak behar den kalitatea izatea; bigarrena, etenik ez izatea; eta hirugarrena, luze itxaron behar ez izatea bideo edo saio bat aukeratzen dugunetik gure pantailan ikusten hasi arte. Kalitatearen afera banda-zabalera handituz eta kodeketa-teknikak hobetuz konpondu da. Atzerapenarena streaming-sistemak erabiliz gainditu dugu, eta, etenik ez sortzeko, aurrekarga edo *buffering*a erabiltzen da.

Streaming-sistemak urteetan zehar aldatu dira. Hasierakoak soilik UDP protokoloaren gainean egiten zuten lan, protokolo horren ezaugarriak hobeak baitira denbora errealeko trafikorako TCPrenak baino. Baina web-zerbitzariak erabiltzea tentazio handia zen streamingarako, asko erraztu baitzitezkeen streaming-zerbitzu bat abiatzea, horretarako espresuki beste streaming-zerbitzari bat abiatu eta kudeatu beharrik izan gabe. Segituan hasi ziren erabiltzen HTTP gaineko streaming-sistemak, eta laster nagusitu ziren. Gaur, VoD banaketa HTTP gainean egiten da, eta zuzeneko telebistarako biak erabiltzen dira, UDP gainekoa eta HTTP bidezko streaminga.

Bezero-zerbitzari erduan oinarritutako Internet bidezko beste zerbitzu arrakastatsuen kasuan bezala, bideo- eta telebista-banaketak eskalagarritasunaren arazoari egin behar izan dio aurre. Eta, beste zerbitzu horien kasuan bezala, eredurik arrakastatsuen CDN-sareena da egun. Hala ere, ez da bakarra. P2P sareak eta multicast-transmisioa dira haren alternatibak. Biak dira, eskala-ekonomiaren ikuspuntutik, CDN erdua baino askoz hobeak. Baina biek dituzte muga zorrotzak, eta horrek asko murriztu du haien arrakasta. Ez P2Pk ezta multicastek ere ez dute balio VoD zerbitzurako —eskaerarik handiena bereganatzen duen zerbitzurako, alegia—, biek behar baitute ikusleen sinkronizazioa. P2Pren kasuan, gainera, kalitate-arazoak ere badaude, sistemaren izaerari berari oso lotuak. Multicastaren kasuan ez dago oztopo teknikorik zuzeneko transmisioetan teknologia nagusia izateko, abantaila argiak baititu CDNrekin alderatuta; baina merkatuaren interesek blokeatu dute hura ezartzea eta erabiltzea, oraingoz behintzat.

2. kapituluko ariketak: streaminga

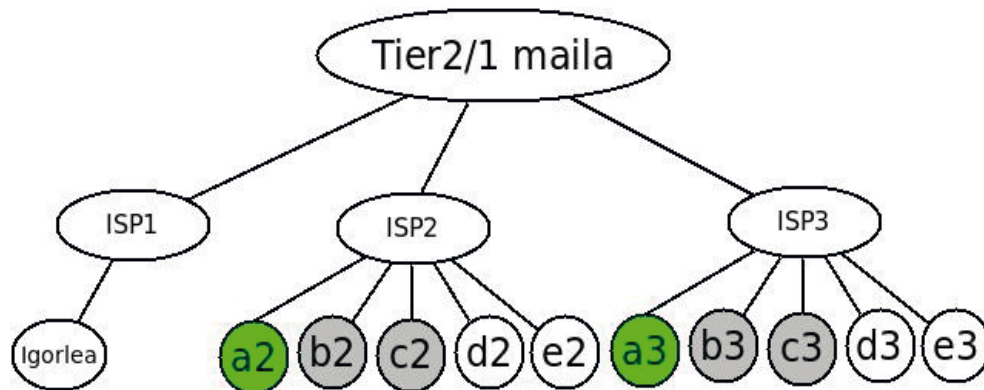
- 1) Demagun TCP erabiltzen duen streaming-saio bat. Azaldu ezazu nola eragiten duen erreproduzitailearen bufferra betetzeak TCP-konexio horretan.
- 2) Demagun HTTP erabiltzen duen streaming-zerbitzari bat, eskatutako aurregrabatutako edukiak banatzeko erabilia (VoD). Zerbitzariak ahal duen azkarren transmititzen ditu datagramak. Suposa dezagun erreproduzitaileak E b/s abiadura ateratzen dituela laginak bere bufferretik, eta suposa dezagun E TCPk konexio horretan lor dezakeen abiadura baino askoz mantsoagoa dela. Demagun erreprodukzioa ez dela hasiko bufferra beteta egon arte (*pre-fetching* edo aurrekarga). Deskriba ezazu TCP konexioaren abiaduraren eta erreproduzitailearen bufferraren betetze-mailaren bilakaera, denboraren arabera. Suposa ezazu ez dagoela kongestio-arazorik sarean. Zer eragin izango du bufferra bete baino lehen erreprodukzioa hasteak?
- 3) Demagun aurreko ariketan, behin bufferra beteta eta erreprodukzioa hasita, TCPk lortzen duen abiadura erreprodukzio-abiadura baino mantsoagoa dela. Zeren arabera izango ditugu etenak erreprodukzioan?
- 4) Demagun aurreko ariketan TCP abiadura eskasaren arrazoia dela sarea kongestionatuta dagoela. Aztertu RTP/UDP erabiltzeko alternatiba, arazoa konpontzeko.
- 5) Demagun 1,5 Mb/s-ko filma eskaintzen dela HTTP streaming bidez. Demagun bi erabiltzailek eskatzen diotela zerbitzari berari film hori, eta honako baldintza hauetan ematen dela zerbitzua:
 - Zerbitzariaren eta bi erreproduzitaileen artean ez dago kongestio-arazorik sarean.
 - Zerbitzariaren eta bi erreproduzitaileen arteko sare-lotura guztietan badago 1,5 Mb/s abiadura bermatuta.
 - Bezeroen TCP entitateek 16 KiB-eko hartzeko bufferra erabiltzen dute.
 - Kasu batean RTT 50 ms-koa da, eta bestean 100 ms-koa.
 Ondo ikusiko al da bideoa bi kasuetan? Ondorioak atera: nola eragin dezake distantziak streaming-zerbitzuan?
- 6) Demagun CDN sistema misto bat, bi mailatan antolatuta: megadata centerrak (*back end*), eta ISPtan kokatutako *front end* moduko klusterrak; eta demagun honako hauek ere baditugula:
 - *Front end* zerbitzariak ez badu erabiltzaile batek eskatutako agiria, bere *back end* zerbitzariari eskatuko dio, eta jasotakoa birbidaliko dio erabiltzaileari.
 - *Back end* zerbitzaritik *front end* zerbitzariak jasotako informazio-datagramak segituan birbidaltzen dizkio erabiltzaileari, agiri osoa deskargatu arte itxaron gabe.
 - Egindako eskaerek hiru datu-bidalketa suposatzen dituzte, batez beste, *slow start* eraginagatik.
 - Bi mailetak klusterrak lotuta daude sare pribatu baten bidez, eta batez besteko RTT 10 ms da bi mailen arteko klusterren artean.
 - Erabiltzaileen eta *front end* klusterren arteko batez besteko RTT 20 ms da, Interneten bidez.
 - (a) Kalkulatu zenbat denbora behar den orri bat deskargatzeko, *front end* zerbitzarian ez badago eskatutakoa.
 - (b) Kalkulu bera egin TCP *splitting* erabiltzen bada.
- 7) Telebista Internet bidez banatzeko sistema bat (Live TV) diseinatzen ari da, eta honako bi aukera hauek aztertzen ari dira:
 - (a) Edukiak banatzeko sare bat (CDN – Content Distribution Network) osatu. Igorle nagusi bakarra izango dugu, streaming-zerbitzariak diren hainbat igorle laguntzaileri jatorrizko

seinalea bidaltzen diena. Erabiltzaileak igorle laguntzaileekin konektatzen dira, seinalea streaming eran jasotzeko.

- (b) P2P moduko banaketa-sarea antolatu, seinalea jaso nahi duten bezeroek osatuta. Berririo, jatorrizko igorle bakarra dugu. Honek seinaleko streama igorriko die hainbat bezerori. Hauetako bezeroek, aldi berean, P2P sareko partaide diren beste hainbat bezerori birbidaliko die jasotako streama. Gauza bera egingo du seinalea jasotzen duen bezero bakoitzak: berarekin lotuta egon daitezkeen P2P sareko beste bezero bati birbidali seinalea. Horrela, sareko bezero guztiengana helduko da seinalea.

Alderatu bi diseinu, honako parametro hauek kontuan hartuz:

- (a) Sistema abiatzeko behar den hasierako inbertsioa, eta sistema mantentzeko kostuak.
- (b) Sistemaren eskalabilidadea: zein egokitzen da hobeto erabiltzaileen kopurua aldatzen denean? (hartzaile gehiago edo gutxiago).
- (c) Erabiltzaileak jasotako seinalearen kalitatea.
- 8) Demagun transmisio helburuanitz bat, non igorlea bakarra baita eta 16 hartzaile baitaude, den-denak igorletik 4 jauziko distantzian kokatuta (hau da, 3 bideratzaile daude igorlearen eta hartzaile bakoitzaren arteko bidean). Igorlea eta hartzaileak konektatuta daude bideratzaileek osatutako zuhaitz bitar baten bidez, eta igorlea erroan dago. Hau da, igorleak eta bideetako bideratzaile bakoitzak bi datagrama igortzen dituzte.
- (a) Neurtu datagrama baten transmisioaren kostua, unicast moduko transmisio helburuanitza eta benetako transmisio helburuanitza erabiliz. Har ezazu datagrama bat edo haren kopia linea batean transmititzea kostuaren unitatea dela.
- (b) Zein litzateke kasurik onena multicast-transmisiorako, betiere 3 bideratzaile egonda igorlearen eta hartzaile bakoitzaren artean? Zein litzateke datagrama baten transmisioaren kostua kasu horretan?
- (c) Kasurik txarrenean, multicast-transmisioaren kostua eta unicast-transmisioarena berdinak dira. Zein da kasu txarren hori, igorlearen eta 16 hartzaileen artean beti hiru bideratzaile egonda?
- 9) Transmisio helburubakarrarekin (unicast) alderatuz, transmisio helburuanitzak (multicast) duen abantailarik handiena da sarean sortzen den trafiko kopuru txikiagoa. Azter ezazu nolako eragin ekonomikoa duen abantaila horrek Internet bidezko telebista-zabalkunderako sistema baten honako partaide hauengan:
- Telebista-igorlea.
 - Telebista-igorlearen Internet hornitzailea (ISP).
 - Ikusleen ISPak.
 - Telebista-saioak jasotzen dituzten etxeko erabiltzaileak.
- Egin ezazu azterketa hori honako bi kasu hauetan:
- (a) Telebista-igorleak eta jasotzaile guzti-guztiak auzo berean daude kokatuta, eta ISP bera dute. ISP horrek sartzeko nodo bakarra du, eta horri daude konektatuta ISPren bezero guztiak. Nodo bakar horretan konmutatzen dira ISPren bezeroen arteko datagramak, beste inongo saretatik igaro gabe.
- (b) Telebista-saioak jasotzen dituzten erabiltzaileek ISP desberdinekin dute beren Internet konexioa, eta ISP horietako bat ere ez da telebista-igorleak duena.
- 10) Demagun honako sare-eskema hau, non *igorlea* telebista-igortzaile bat baita, eta beste nodo guztiak horren hartzaileak baitira.



Bete ezazu honako taula hau; bertan, bideo-streama osatzen duen datagrama bakoitzeko:

- *ISP1, Tier, ISP2, ISP3* zutabeetan, horietako sare bakoitzetik ateratzen den datagrama kopurua jaso behar da.
- *Unicast* lerroa unicast eran transmititzen den egoerari dagokio.
- *IP multicast* lerroa multicast eran transmititzen den egoerari dagokio, sare guztietako bideratzaileak m-bideratzaileak direla hartuta.
- *P2P multicast* lerroa P2P eran transmititzen den egoerari dagokio, MDC erabili gabe. Suposatu honako P2P harreman hauek osatzen dutela P2P sarea (igorlea, hartzaileak): (igorlea, a2-a3), (a2, b2-c2), (a3, b3-c3), (c2, d2-e2), (c3, d3-e3).
- *Multicast-tunelak* lerroa saioa mcast-tunelak erabiltzen duen egoerari dagokio. Suposa ezazu (1) igorleak multicast eran transmititzen duela, (2) ISPak ez direla multicast-sareak, (3) baina Tier1/2 maila eta erabiltzaileen artean (igorlea eta hartzaileak dira erabiltzaileak) multicast-tunelak ezarri direla.
- *Batura* zutabeak lerro bakoitzaren batura biltzen du.

Egoera	ISP1	Tier	ISP2	ISP3	Batura
unicast					
IP multicast					
P2P multicast					
Multicast-tunelak					

- 11) Demagun live streaming transmisiorako P2P diseinu bat, bitTorrent-en oinarrituta. Aztertu *Tit-for-tat* algoritmoaren eraginkortasuna horrelako aplikazio batean.
- 12) Lotu honako akronimo eta termino hauek dagokien kontzeptuarekin. Kontuan izan termino batzuk sinonimoak direla, eta, beraz, kontzeptu bera lotu behar zaiela:

- | | | |
|---------------------|------------------------|---------------------------|
| — IPTV | — RTMP | — progressive downloading |
| — TCP splitting | — OTT (Over-The-Top) | — prefetching |
| — Metafitxategia | — RTP | — RTSP |
| — MDC | — HTML5 | — HLS |
| — Aurrekarga | — MPEG-DASH | — Manifest fitxategia |
| — SRT | — CDN | — Tit-for-tat |
| — Pseudo streaminga | — Abiatzeko atzerapena | — MSS |
| — Netflix | — triple play | — Content provider |
| — walled garden | — Akamai | — ABR |
| — Aurrekarga | — WebRTC | |

1. Erreproduzioa hasi baino lehen, bildu memorian erreproduzitu behar denaren zati bat.
2. Streaming-sistema batean, erreproduzioa hasi baino lehen emandako denbora, bufferra kargatu arte.
3. Streaming-sistema batean, sarean edukiak sartzen dituen.
4. Telebista Internet bidez banatzeko estandar multzoa, ETSIk eginda. Walled-garden erako banaketa sistemekin lotzen da.
5. Internet bidez zerbitzuak jasotzeko era, ISPren kontrolik gabe.
6. Internet bidezko telebista zerbitzua jasotzeko eredia, non ISPk berak hornitzen eta kudeatzen baitu zerbitzua.
7. Internet, telefonia, eta telebista-zerbitzuak kontratu bakar batean eskaintzeko ISPe erabiltzen duten izena, *walled garden* eredia gauzatuz.
8. Stream bat jaso eta erreproduzitu ahal izateko behar den informazioa biltzen duen fitxategia.
9. Audio eta bideo interaktiboa erabiltzen dituzten denbora errealerako aplikazioetarako definitutako protokoloa, streaming-sistemetan UDPekin batera normalean erabiltzen dena.
10. Multimedia-aplikazioen kontrol-kanalerako definitutako protokoloa, normalean RTP/UDP streaming-sistemetan erabilia.
11. Igorritako stream baten kalitatea sarearen egoerari eta ezaugarriei egokitzen dioten teknikak.
12. Edukiak biltzen eta zerbitzitzen dituzten zerbitzariak osatutako sareak. Besteak beste, Internet bidezko bideo- eta telebista-banaketarako erabilia.
13. OTT telebistarako edukien hornitzaile baten adibidea, egungoen artean handienetakoa.
14. CDN adibide bat.
15. Urruti dauden zerbitzarietatik informazioa jaisteko denbora gutxitzeko teknika, CDNtan erabilia.
16. BitTorrent sareetan erabiltako algoritmoa, bizkarroikeriak zigortzeko erabilia.
17. Stream bat hainbat azpistearekin banatzeko teknika, P2P stream-sistemetan erabilia.
18. Web-orrietarako estandar berria, orrietan bideoa txertatzea asko errazten duena.
19. HTTP streaming jatorrizko era.
20. Flash streaming teknologian erabilitako protokoloa.
21. ABR teknologia HTTP gainera erabiltzen duen nazioarteko estandarra.
22. Apple konpainiaren streaming-protokoloa, ABR gauzatzen duena.
23. Microsoft konpainiaren streaming-protokoloa, ABR gauzatzen duena.
24. Bidekonferentziarako sortutako teknologia, egun oso erabilia live streaming-erako.
25. UDP gaineko streaming egiteko protokolo berria, RTP/RTSPren ordezkua, oso atzerapen txikia eragiten duena.

IP telefonia

Kapitulu hau irakurri eta gero, irakurleak honako gai hauek ikasiko ditu:

- Nola lortzen den IP sareetan telefonia-zerbitzua ematea, kontuan izanda telefoniarren denbora errealeko izaera zorrotza eta IP sareen zerbitzua *best effort* erakoa dela.
 - Zein diren IP telefonian erabiltzen diren protokolo nagusiak.
 - Nolakoa den SIP telefoniarren funtzionamendua.
 - Nolakoa den Internet bidezko telefonia eta betiko telefono-sareen arteko komunikazioa.
 - Nola erabiltzen duten IP telefonia-enpresek.
-

Asko aldatu da telefonia azken hamarkadetan. Betiko telefono-sarea analogikoa eta zirkuitu-kommutazio bidezkoa zen; gaur egun, telefono-komunikazioak digitalak izaten dira, eta, gero eta gehiagotan, pakete-kommutazio bidezkoak. Lehenengo aldaketa mundu analogikotik digitalera igarotzea izan zen. Digitalizazio hori lehenengo kapituluan aztertu dugu, ikuspuntu teknikotik. Azpiegituren aldetik, telefonia operadoreen sareetan digitalizatu da lehenik, eta, askoz mantsoago eta geroago, sarbide-sareetan. Izan ere, oraindik, etxeko telefonoaren eta auzoko telefonogunearen arteko bidea era analogikoan egiten da askotan, eta soilik telefonogunean digitalizatzen da seinalea operadorearen sarean sartu baino lehen. Bigarren aldaketa handia, zirkuitu-kommutaziotik pakete-kommutaziora igarotzea, IP teknologiarekin eta Internetekin lotuta dago, eta digitalizazioak baino iraultza handiagoa ekarri du telefonia-mundura. Alde batetik, pakete-kommutazioa zirkuitu-kommutazioa baino askoz efizienteagoa denez azpiegiturak erabiltzean, zerbitzua emateko kostuak jaitsi egin dira. Beste alde batetik, ahotsa garraiatzeko Internet erabili ahal izateak telefonia-merkatua hankaz gora jartzea ekarri du, OTT operadoreak telefonian ere agertu baitira. Has-tapenetan, Internet telefono-sarearen apendiz gisa ikusten zen: bi konputagailu elkarrekin komunikatzeko, telefono-sareari lotutako modemak erabiltzen genituen. Egun, egoera irauli egin da, eta Internet fagozitatzen ari da telefono-sarea, telefono-zerbitzua Internet bidezko beste zerbitzu bat bilakatzeraino. Bide horretan, betiko telefonia-operadoreak ere IP sareekin ordezkutzen ari dira beren zirkuitu-kommutazioko TDM sare zaharrak (*Time Division Multiplexing*). *All IP* garaia da.

Jauzi hori ez da erraza izan, IP eta Internet ez baitziren diseinatu denbora errealeko aplikazioetarako (telefoniarako, adibidez). Baina ingeniariak asmatu dute nola egin. Hori aztertuko dugu kapitulu honetan.

1. Sarrera

IP telefonia, izenak nahiko argi azaltzen duenez, solaskideen arteko telefonia-trafikoa IP protokoloa erabiliz garraiatzea da. Internet erabiltzen bada bidaia horretan, *Internet-telefonia* terminoa ere erabiltzen da. Azkenik, VoIP izena ere oso erabilia da (*Voice over IP*), baina nahasgarria suerta daiteke, betiko ahots-komunikazioaz gain bideokonferentzia ere sartzen baita *telefonia* kontzeptuan. Testu honetan, **IP telefonia** terminoa lehenetsi dugu, anbiguotasunik gabe biltzen ditue-

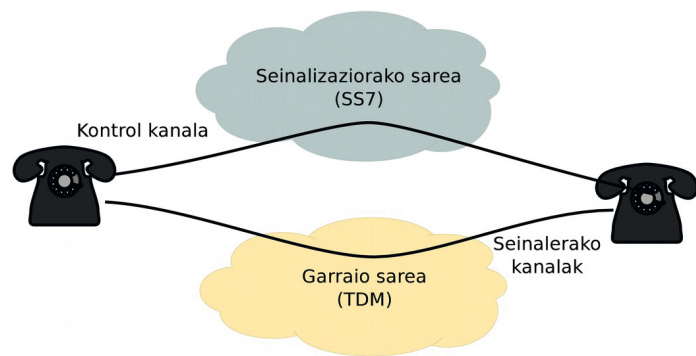
lako ahots bidezko komunikazio tradizionala zein bideokonferentzia, baita Internet bidezko telefonia zein enpresen barruko telefonia pribatua ere.

1.1. Media- eta kontrol-kanalak

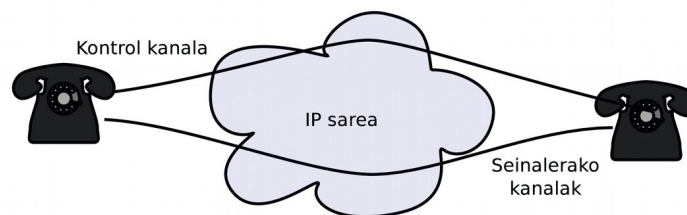
Telefono bidezko elkarrizketa bat gauzatzeko, bi urrats hauek egiten dira, edozein teknologia erabilia ere:

1. Solaskideen arteko deia ezarri.
2. Solaskideen artean ahots- edo bideo-seinaleak trukatu, denbora errealean.

Deia ezartzea, funtsean, deitzailearen eta deitutakoaren arteko kontrolerako komunikazio-kanal bat ezartzea da (*signaling channel*). Horretarako arazorik handiena deitutakoa non dagoen aurkitzea da. Gero, behin deitutakoa deia onartuta, solasaldia amaitu arte mantentzen da ezarrita kanal hori. Bitartean, beharrezkoa baldin bada, muturrek kontrol-mezuak truka ditzakete. Zirkuitu-kommutazio bidezko TDM telefono-sare historikoetan, **SS7** protokolo estandarra erabiltzen da kontrol-komunikazio horietarako. IP sareetan, aldiz, aukera asko garatu dira. Protokolo irekien artean garrantzitsuenak SIP protokoloa da, baina alternatiba asko daude. Konpainia pribatuek beren protokoloak garatu dituzte; adibidez, Skype edo Skinny.



(a) Telefonia klasikoa



(b) IP Telefonia

3.1 irudia. Kontrol-kanala eta seinalerako kanalak telefonia klasikoan eta IP telefonian.

Ahots- edo bideo-seinaleek beren bidea egiten dute solaskideen artean, kontrol-kanalaz aparte. Hau da, telefono-dei batean, IP sareen kasuan, portu bat eta protokolo bat erabiltzen dituzte solaskideek kontrol-kanaleko mezuak elkarri bidaltzeko, eta beste portu eta protokolo bikotea seinalea bidaltzeko. Are gehiago, seinale bat baino gehiago badago, hainbat kanal ezarri beharko dira. Kanal horiek seinaletarako kanalak edo media-kanalak deituko ditugu (*media channels*). Hori da bideokonferentziaren kasua, non, kontrol-kanalaz gain, kanal berezituak egoten diren soinurako eta bideo-rako. Zirkuitu-kommutazioko telefono-sareetan, kontrol- eta media-kanalak maiztasun desberdinak

erabiliz gauzatu daitezke transmisioaren zati analogikoa dagoenean (etxearen eta telefonogunearen artekoa), edo TDM slot desberdinak erabiliz transmisio digitalean. Telefono-sare klasikoetan, harago ere joaten dira, eta sare fisiko desberdinak erabiltzen dituzte operadoreen sareetan kontrolaren eta seinalearen trafikoak mugitzeko. Kontrol-trafikoaren sareari *seinalizazio-sare* esaten diote, eta seinalerako sareari, berriz, *garraio-sare* (ikusi 3.1 irudia). IP bidezko sareetan, sare bakarra erabiltzen da bi trafikoetarako.

Elkarrizketak sortutako denbora errealeko ahotsaren eta irudien trafikoa IP sareetan mugitzeko ditugun arazoak, funtsean, aurreko kapituluan bideorako aurkitu ditugun arazo berberak dira: atzerapena, atzerapenaren aldakortasuna eta galerak. Baina telefonia bideoa baino zorrotzagoa da, beharren mailan, parametro horiei dagokienez. Beste alde batetik, lehenengo kapituluan ikusi dugunez, telefoniak askoz gutxiago eskatzen dio sareari banda-zabaleraren kontsumoari dagokionez. Seinalearen kanaletarako ere, kontrol-kanalean bezala, protokolo bat baino gehiago erabil daiteke IP sareetan; haietako batzuk irekiak dira, eta beste batzuk (Skype, kasurako), pribatuak. Estandar irekien artean, dagoeneko streamingaren kasuan aipatu dugun **RTP** protokoloa da nagusi telefoniako seinaleak mugitzeko.

1.2. IP telefoniaren erabilerak

IP telefonia zenbait testuingurutan aurki dezakegu. XXI. mendearen hasieran IP telefoniak bultzada handia jaso zuen OTT operadoreek emanda (ezinbestekoa da Skype aipatzea), betiko telefonia-operadoreen tarifak baino askoz merkeago ematen zutelako zerbitzua. Garai horretan IP telefoniarako bezero bat instalatu behar zen konputagailu batean (*softphone* ere deitua), eta, Internet konexioa edukita, nahikoa zen. Betiko telekomunikazio-operadoreak egoera berrira egokitu behar ziren, eta, etsaiari aurre egin ezinean⁶, bat egin dute IP telefoniarekin. Hasieran, etxean eta ISPren sarearen arteko bidean telefonia konbentzionalari eutsita, eta soilik beren ardatz-sareetan IP erabiliz. Gero, zuntz optikoak ADSL ordezkatu duen heinean, etxean bertan dugu IP telefonia. Horretarako, ez ditugu gure betiko telefonoak IP telefonoekin ordezkatu behar, telefonia eta Internet operadoreak utzitako modem-routerrak egingo baitu behar den lana telefono konbentzionalak IP sarea lotzeko. Alde batetik, telefonoak igorritako ahotsa digitalizatu, eta jaso behar duena era analogikoan emango dio routerrak. Beste alde batetik, routerrak kontrol-kanaleko seinaleak bihurtuko ditu telefono klasikoekin eta IP telefoniako protokoloen artean.

Lantokietan topatuko ditugu IP telefonoak, hau da, zuzenean IP trafikoa sortu eta jasotzen dutenak, hor erabilgarriagoak suertatzen baitira beren ahalmenak. Hala ere, agian erabiltzailea ez da jabetuko bere telefonoa IP erakoa denik, mahai gainean duena betiko telefono itxurakoa izango baita. Baina, pixka bat begiluzea bada, atzemango du bere telefonoa ez dagoela paretari lotuta betiko RJ-11 konektore baten bidez, baizik eta konputagailuak sare lokalera konektatzeko erabiltzen diren RJ-45 horietako batekin.

Horrez gain, eta bereziki WebRTC programazio-interfazea zabaldu denetik, IP telefonia oso erabilia da sare sozialen bidezko komunikazioetarako, bideokonferentziak egiteko taldekideen artean. Kasu horretan, ez dugu garai bateko *softphone* instalatu behar, arakatzailak berak egingo baitigu lan hori: gure gailuko mikroa, kamara eta bozgorailuak kontrolatuko ditu ahotsa eta irudiak jaso eta igortzeko, eta berak ere erabiliko ditu behar diren protokoloak IP bidezko komunikazioa gauzatzeko.

⁶ Segituan atzeman zuten betiko konpainia telefonikoek zer ekarriko zuten beren negozioarako IP telefoniak eta Internetek: AEBko kongresuan, 1996. urtean, hango telekomunikazio-konpainiek eskatu zuten IP telefonia debekatzea (RFC 2235 agirian aipatua).

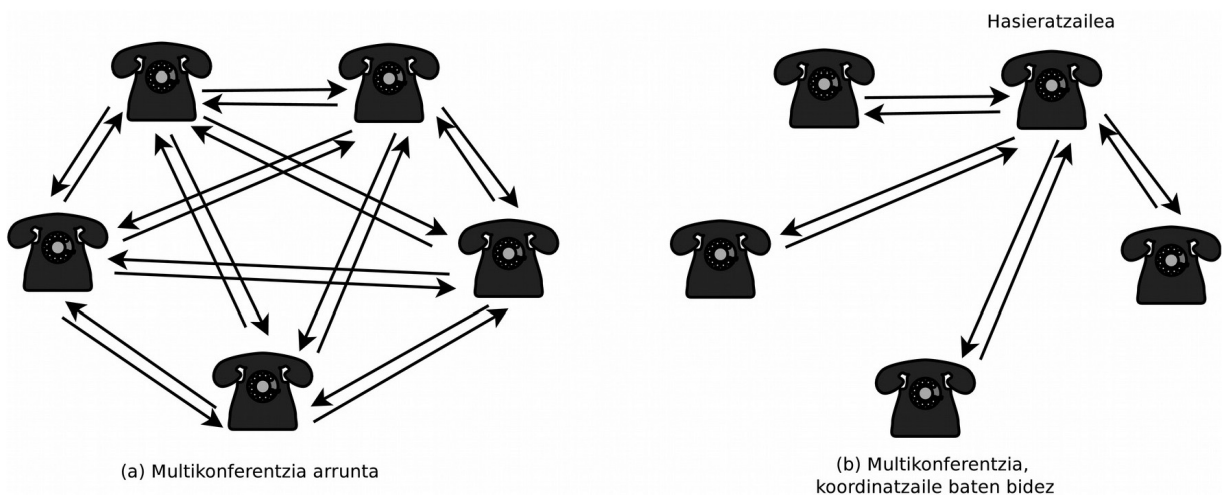
2. Media-kanalak

Bideo-elkarrizketa batean ahots- eta bideo-seinaleak trukutzen dira. Honako azpiatal hauetan aztertuko ditugu beren beharrak eta arazoak.

2.1. Banda-zabalera

Telefonian kontsumitzen den banda-zabalera erabiltzen den kodetzailearen eta lortu nahi den kalitatearen araberakoa da. Zirkuitu-kommutazioko sare digitaletan erabilitako G.711 kodeketak (PCM) 64 kb/s behar du noranzko bakoitzean, baina, IP bidezko telefonian, beste kodetzaile eraginkorrago batzuk dira ohikoak. Oso erabilia da, adibidez, G.729 kodeketa, ahots-kanal bakoitzeko 8 kb/s besterik behar ez duena. Teknika berberean (LPCn) oinarritutako SILK kodetzaileak (Skypek garatua) 6 eta 40 kb/s artean behar ditu, eta SILKetik eratorria den **Opus** kodetzaileak (egungo estandar irekia Interneten, RFC 6716), 6 eta 510 kb/s artean erabiltzen ditu, nahi den kalitatearen arabera.

Bi parametro horien araberakoa da nagusiki, hau da, erabiltzen den kodetzailearen eta behar den kalitatearen araberakoa. Bideoak ahotsak baino askoz abiadura handiagoa behar duenez, kanal bakoitzeko behar dena 128 kb/s eta 1,5 Mb/s artekoa da, gutxi gorabehera.



3.2 irudia. Audio-multikonferentzia gauzatzeko aukerak, unicast eran.

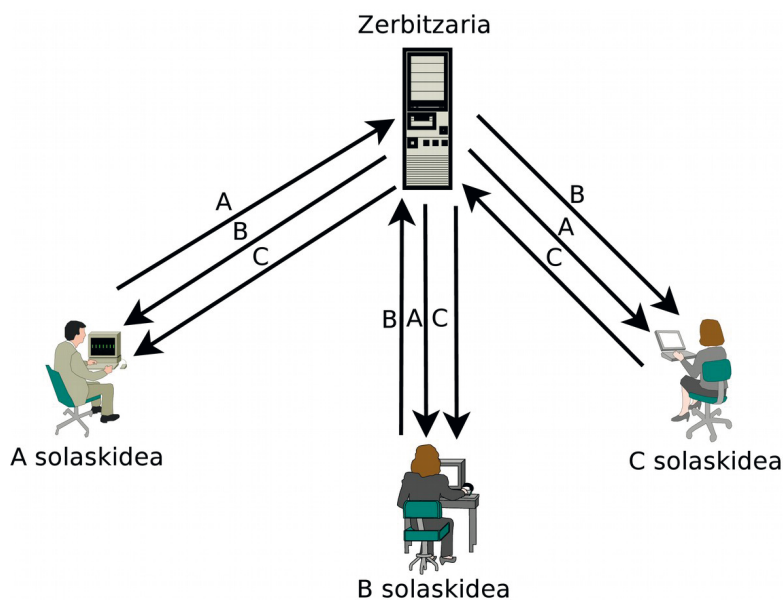
Multikonferentzia

Multikonferentziak tratamendu desberdina du ahots-telefonian eta bideokonferentzian, partaide guztien ahots-kanalak elkartu daitezkeelako kanal bakarrean, baina hori ezin da egin bideo-kanalekin. Gainera, multikonferentzia oso aplikazio egokia da multicast erabiltzeko, eta, horrela, beste partaide bakoitzari stream bat bidali ordez, partaide bakoitzak stream bakarra bidal diezaioke taldeari. Hala ere, egun, multicast-teknologia ez dago oraindik erabilgarri sare guztietan. Hori dela eta, hurrengo paragrafoetan, multicast-aukera alde batera utzita, soilik unicast-trafiko hartuko dugu kontuan.

Elkarrizketa batean partaide kopurua N baldin bada eta, beraz, solaskide bakoitzak beste solaskide bakoitzari bidali behar badio bere seinalearen kopia bat, $(N-1)$ media stream igorri beharko lituzke sarean. Guztira, N kide baten elkarrizketan, $N(N-1)$ stream txertatuko dira sarean, 3.2 irudiko (a) aukeran gertatzen den bezala. Aldi berean, solaskide bakoitzak $(N-1)$ stream jasoko ditu, bat solaskide bakoitzeko. Internet bidezko telefonian, banda-zabaleraren kontsumoa esanguratsua izan daiteke, bereziki erabiltzaile askoren goranzko trafikoari dagokionez, Interneterako ko-

nexioak asimetrikoak izaten baitira. Arazoa arintzeko bide bat da koordinatzailearena egiten duen agente bat txertatzea elkarriketa horretan. Koordinatzailearena zerbitzari batek egin dezake, edo, bestela, elkarriketako partaideren batek, betiere horretarako behar diren baliabideak (banda-zabaleraren bereziki) baldin baditu. Edozein izanda ere, koordinatzaileari bidaliko dizkiote partaide guztiek beren audio-streamak; hark nahastuko ditu, audio-stream bakarra sortuz, eta audio hori birbidaliko die beste partaide guztiei. Aukera hori da 3.2 irudiko (b) aukerak azaltzen duena. Ohartu bakoitzak X b/s kontsumitzen duen N audio-stream nahasten baditugu, sortutako audio-streamak ere X b/s besterik ez duela behar, soinuak nahas baitaitezke beste soinu bat sortzeko. Koordinatzailearen banda-zabaleraren kontsumoa 3.2 irudiko (a) kasuan bezainbestekoa da, oraindik ere $N(N-1)$ stream jaso eta igorri behar dituelako. Baina beste partaide guztiek nabarmen murrizten dute beren kontsumoa eta lan-zama, audio-stream bakarra igorri eta jasoko baitute, eta ez baitute nahasketa-lanik egin behar (ohartu koordinatzailearik gabeko eskeman partaide guztiek egin behar dutela audioa nahasteko lana).

Bideo-kanalen kasuan, zailagoa da partaide batek koordinatzailearena egitea; alde batetik, bideoak banda-zabaleraren gehiago kontsumitzen duelako, eta, bestetik, hainbat bideo-seinale ezin direlako nahastu seinale bakarra sortzeko. Horrela izanik, koordinatzailearena egiten duenak birbidali egin behar dio partaide bakoitzari beste partaide guztien bideo-seinalearen kopia, hau da, $N(N-1)$ bideo-stream goranzko bidean. Stream bakoitza minimoa izanda ere (hau da, 128 kb/s-koa), nahikoa izan daiteke lagun gutxiren arteko bideokonferentzia Interneteko goranzko konexio bat agortzeko. Horregatik, multibideokonferentzietan, ohikoa da zerbitzari bat erabiltzea koordinatzailearen lana betetzeko. Partaideek stream-bideo bakar batek kontsumitzen duen banda-zabaleraren besterik ez dute beharko goranzkoan, soilik koordinatzaileari bidali behar baitiote beren bideoa. Beheranzkoan, aldiz, $N(N-1)$ bideo-seinale jaso beharko dituzte koordinatzaileak igorrita. Hori da 3.3 irudian dugun kasua.



3.3 irudia. Lagun anitzen arteko bideokonferentzia, zerbitzari baten bidez.

2.2. Atzerapena

IP sareetan atzerapena aztertzean, bi fenomeno hartzen dira kontuan: alde batetik, datagramak igorletik hartzailearaino joateko hartutako denbora, eta, beste alde batetik, atzerapenaren aldakortasuna. Lehenengoari *latentzia* deritza, eta bigarrenari, askotan, *jitterra*. Biek eragin eta tratamendu

desberdina dute. Ahotsaren azterketan zentratuko gara, atzerapenarekiko askoz sentikorra goa delako hori bideoa baino. Fenomeno hori nolabait azaltzeko, alderatu zer erreakzio dugun hitzaldi bat ikusten ari garenean, hizlariaren irudiak une batean garbitasun pixka bat galtzen duenean, eta hizlariaren ahotsa pixka bat distortsionatzen denean. Irudiaren garbitasun-galerak ez du asko kalitetuko guk atzemandako irudiaren kalitatea; izan ere, agian, esfortzu berezi bat egin beharko dugu galera hori atzemateko. Soinuan, aldiz, distortsio txiki hori segituan atzemango dugu.

Latentzia

Sare-latentziak bi osagai ditu: lineetan (kableetan edo uhinetan) seinalea fisikoki garraiatzeko denbora, eta lineak lotzen dituen guneetako gailuetan emandako denbora. Zirkuitu-kommutazioko telefono-sare klasikoetan, lehena da esanguratsua. Seinalea elektrikoa zein optikoa izanda ere, hedatzeko abiadura fisikoa ikaragarria duenez, soilik satellite bidezko konexioak agertzen direnean suertatzen da atzerapena problematikoa (270 ms behar du satellite geoestazionario baterako joan-etorriak). Hori da arrazoi nagusietako bat satellite bidezko komunikazioak itsas azpiko zuntz optikoko kableekin ordezkatzeko. IP sareetan, aldiz, lineen artean ditugun bideratzaileek sortzen dute atzerapen handiena.

Latentziak ez du zuzenean eragiten soinuaren kalitatean, baina bai elkarrizketa baten ulergarritasunean. Hau da, soinua bikaina izan daiteke, baina, espero baino beranduago heltzen bada beste aldera, elkarrizketa pairaezina bilakatzen da: hitz egin eta gero espero den erantzuna jasotzen ez bada, komunikazioa eten dela edo beste aldeak ez duela ulertu ondorioztatzen dugu, eta esandakoa errepikatzen dugu; errepikapen hori bidean gurutzatzen da hasierako erantzunarekin, eta, hortik aurrera, bi aldeek esandakoak eta errepikatutakoak katramilatu egiten dira elkarrizketan.

ITUk neurtua du zenbatekoa izan daitekeen ahots-seinale baten latentzia, eta gomendio gisa argitaratu du **G.114** agirian. Gomendio hori erreferentzia da telefonia-sistema publikoetarako; izan ere, telefonia-sistema pribatuetan normalean ezartzen diren mugak baino zorrotzagoa da. Laburtuz, honako hau dio: 150 ms baino txikiagoa den atzerapena ez dugu normalean atzemango; 400 ms-tik gora, elkarrizketaren kalitatea onartezina da, eta, bitarteko atzerapenetan, solaskideek nabaritutako dute kalitatearen degradazioa, baina onargarrizat joko dute.



3.4 irudia. Sare-latentziaren eragina soinuaren kalitatean, G.114 gomendioaren arabera.

Zenbatekoa da IP sareetan eragindako latentzia? Sare lokal batean, G.114 agirian azaldutako balioak baino askoz beherago dago, baina, Internet zeharkatu behar bada, baliteke 150 ms-ko muga gainditzea. Balioa oso aldakorra da, hainbat faktoreren menpe baitago. Garrantzitsuenak bi solaskideen arteko distantzia eta ibilbidean dauden sareen trafiko-egoera dira. Distantzia ez dugu kilometrotan neurtu behar, denboran baizik. Egun, oso ohikoa da 100 ms baino gutxiago behar izatea Interneti lotutako bi makinaren arteko bidaia egiteko. Internet-hornitzaile handiek, Tier 1 edo 2 mailakoek, beren sarea zeharkatzeko denbora maximo bat bermatzen dute egindako kontratazioetan, 100 ms-tik nahiko beheragokoa normalean. Horri ISPen eta erabiltzaileen sare pribatuetan egin beharreko ibilbideak gehitu behar zaizkio. Sare-latentziaz gain, ahotsa digitalizatzeko eta berriz era analogikoa itzultzeko denbora ere gehitu behar da, atzerapen osoa kontuan hartzeko. Horretan eragina dute erabiltzen den kodetzaileak eta erabiltzaileen makinek soinua prozesatzeko duten ahalmenak. Horretarako denbora sare-latentzia baino askoz txikiagoa izaten da.

Atzerapenaren aldakortasuna

Atzerapenaren aldakortasuna pakete-kommutazioko sareei dagokie, eta, bereziki, IP sareen moduko datagrama-sareei. Sare horien *best effort* zerbitzuaren eraginez, oso zaila da elkarrizketa

baten trafikoari bermatzea bideratzaileen ilaretan emango duen denbora maximoa. Horrek, denbora errealeko trafikoari dagokionez, galerak eta atzemandako kalitatea okertzea dakar. Latentzia bezala, atzerapena ere oso aldakorra da, distantziaren eta sareko egoeraren arabera. Horren garrantziaz jabetuta, sare-operadoreek latentziaz gain atzerapenaren aldakortasunaren balio maximoa ere bermatzen dute. Handizkariak 0,5 eta 10 ms artekoa eskaintzen dute beren kontratazioetan; nahikoa atzerapen da aldakortasunak eragin ditzakeen kalteak ekiditeko.

Hala ere, IP sare baten operadoreak bermea emateak ez du esan nahi ibilbide osoan eta une orotan kalitatea bermatuta dagoenik, Interneten zeharreko bidaietan sare asko zeharkatu beharko direlako, eta ez soilik operadore horrena. Horregatik, beharrezkoa da IP telefoniako aplikazioek neurriak hartzea erabiltzailearen makinetan atzerapenaren aldakortasunari aurre egiteko. Irtenbidea aurreko kapituluan bideorako ikusi dugun bera da: aurrekarga (*buffering*). Izan ere, telefoniaren testuinguruan, erabilitako bufferrari jitter buffer edo **dejitterazio-buffer** deritza (*de-jitter buffer*, ikusi G.114 gomendia). Mekanismo horren eraginkortasuna lotuta dago bufferrean gordetako lagin kopuruarekin; zenbat eta lagin gehiago eduki bufferrean, orduan eta aldakortasun handiagoari aurre egiteko ahalmena izango dugu. Baina bufferrean gorde dezakegun lagin kopuruak, gogora dezagun, erreprodukzioaren hasieran txertatu beharko dugun atzerapena luzatzen du. Atzerapen hori segundo batzuetakoa ere izan daiteke aurregrabatutako bideo bat ikusterakoan; horrek erresistentzia handia ematen die streaming-sistemei. Baina, telefono bidezko elkarrizketa batean, onartezina litzateke hainbesteko atzerapena txertatzea esaldien hasieran. Ondorioz, telefono-zerbitzuetan aurrekarga erabiltzen bada ere, haren eraginkortasuna atzerapenaren aldakortasuna ezabatzeko streaming-sistemetan lor daitekeena baino nabarmen txikiagoa da.

Aurrekargaren eragina zertxobait hobetzeko asmoz, aurrekarga aldakorra erabiltzen da telefonian. Ideia diskurtsoan agertzen diren isiluneak luzatzean edota laburtzean datza, bufferraren bilakaeraren arabera. Sarean atzerapenaren aldakortasun txikia sortzen ari bada, bufferraren egoera ez da ia aldaketu, erritmo bertsuan sartu eta ateratzen baita informazioa bufferretik. Horrela bada, ez dugu buffer handia behar izango, eta, ondorioz, ez da atzerapen handirik sortuko. Aldiz, sarean gorabeherak gertatzen ari badira, bufferraren egoera aldatu egingo da, eta husteko arriskua sor daiteke. Horrelakoetan, atzerapena handitu beharko da bufferrean dugun lagin-erreserba handitzeko, jasotako kalitatearen kalterako. Egoera hobetu dela atzemanaz gero, sistemak hurrengo isilunea laburtuko du kalitatea berreskuratzeko. Orokorrean, aurrekarga aldakorra erabiltzen duten telefonia-sistemetan, isilune bakoitzaren hasieran aurrekargaren luzera birkalkulatzen da, eta, horrekin, erreprodukzioan eragindako atzerapena.

2.3. Galerak

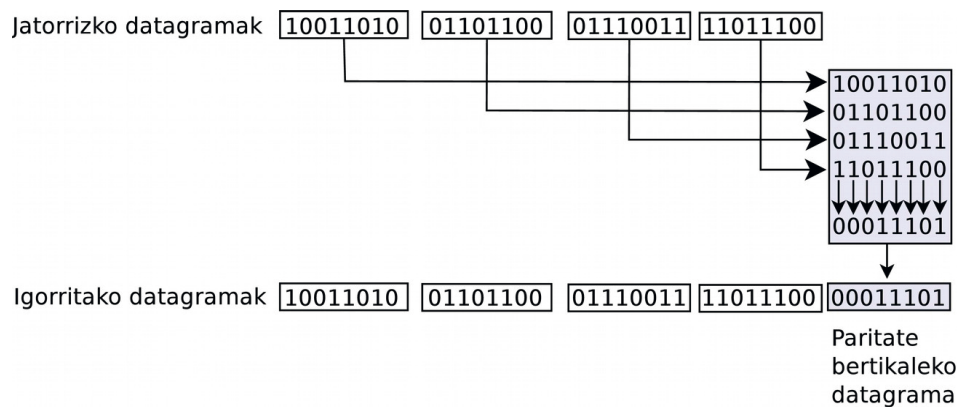
Atzerapenak bezala, galerek askoz eragin handiagoa dute ahotsaren kalitatean bideoan baino. Horregatik, atal honetan ere ahotsaren kasuan zentratuko gara.

Aurrekarga erabilia ere informazio-galerak gertatzen dira, datagrama batzuk erreproduzitzeko unea baino geroago heltzen direlako, edo inoiz heltzen ez direlako, agian sare-kongestio batean galduta. Galera horiei aurre egiteko, ez du zentzurik galdutako laginak birtransmititzeak, birtransmisio horiek ere, ezinbestean, berandu helduko direlako. Zenbateko galera izan dezake telefono bidezko elkarrizketa batek? Berriz, zifra aldakorra da, lortu nahi dugun kalitatearen eta erabilitako trinkotze-mailaren arabera. Igorritako seinalea oso trinkotua badago, galera bakoitzak kalte handiagoa egiten du. Errore-tasa onargarri unibertsal bat ezartzea ezinezkoa bada ere, nahiko onartuta dago tasa hori ezin dela izan % 1 baino handiagoa. Zenbait operadorek beren sareetan galdutako datagramen tasa bermatzen dute. Telefonia-zerbitzurako emandako balioak % 0,5en azpitik egoten dira normalean, baina kontuan hartu behar da zifra hori operadore horren sareko bideratzaileetan edo lineetan galdutako datagramen dagokiela soilik; benetan izango dugun galera-tasa lortzeko, beste sareetan izandako galerak eta atzerapenaren aldakortasunak eragindakoak gehitu beharko genituzke.

Telefonian eta denbora errealeko beste aplikazioetan, honako bi estrategia hauek dira nagusiak galerak kudeatzeko: galdutako laginak berreskuratzea, edo galera horiek eragindako kaltea nolabait leuntzea edo ezkutatzea (*error concealment*). Lehenengo estrategian erabilitako teknikak FEC izenez dira ezagunak (*Forward Error Correction*). Bigarrenean, nahasketa (*interleaving*) eta berreraiketa teknikak kokatzen dira.

FEC teknikak

FEC tekniken ideia da datagrama batean igorritako lagin sortari galerak kontrolatzeko kode bat gehitzea. Galera bat atzematen denean, kode hori erabiltzen da galdutako lagin sorta berreskuratzeke. Bi FEC mekanismo aurkeztuko ditugu: paritate bertikala eta bigarren kanala.

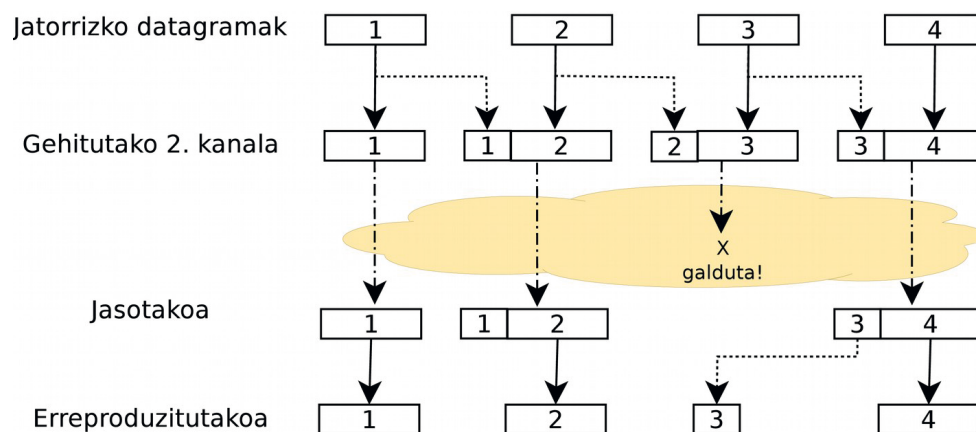


3.5 irudia. Paritate bertikala.

Paritate bertikala erabiltzen denean, n datagramako paritate-datagrama estra bat bidaltzen da, galerak atzemateko eta berreskuratzeke kode batekin. Kodea igorleak kalkulatu du, aurretik igorritako n datagramen paritatea bezala, bitez bit. Hau da, kodeko lehenengo bita izango da aurreko n datagramen lehenengo bit guztien paritatea, edo, era teknikoagoan azalduz, aurreko n datagramen lehenengo bit guztien XOR funtzioa. Geroko bit guztiakin, kalkulu bera egiten da. 3.5 irudian duzu paritateko datagrama kalkulatzeko adibide bat, non $n = 4$ den. Aurretik bidalitako n datagrametako bat galtzen bada bidean, galdutako laginak berreskura ditzake hartzaileak, paritate-datagrama erabiliz. Teknikaren muga bistan dago: datagrama bat baino gehiago galtzen badira, ez dugu zer eginik. N datagramako talde batean galera bat baino gehiago izateko probabilitatea jaisteko modua n txikia izatea da; horrela, ordea, txertatutako erredundantzia handitu egiten da. Edo, beste era batean esanda, banda-zabaleraren kontsumoa handitu egiten da, igorritako paritate-datagrama kopurua handitzen baita. Banda-zabaleraren kontsumoa $1/n$ proportzioan handitzen da; hau da, $n = 4$ hartzen badugu, banda-zabaleraren kontsumoa % 25 handituko da. Pentsa daiteke eskema horrek erreproduzitzeko atzerapena behartzen duela, ezin baititugu datagramak garraiatzen dituzten laginak erreproduzitu taldeko n datagramak jaso eta galerarik ez dagoela egiaztatu arte. Hala ere, praktikan, paritate-datagrama igortzeak ez du handitu behar erreproduzitzeko atzerapena, aurrekargak eragindako atzerapena kontuan hartzen badugu. Hau da, erreproduzizioa hasi baino lehen bufferrean n datagrama baino gehiago biltegitatu arte itxaron behar badugu, n datagrama horiei dagokien paritate-datagrama gehitzeak ez du erreproduzizioa gehiago atzeratzen. Horrez gain, ohartu gaitezke paritate-datagrama bidaltzeak ez duela atzeratzen ahots-lagin berriak daramatzen $n+1$ hurrengo datagrama bidaltzea, lagin horiek digitalizatzen ari diren bitartean igortzen baita aurreko n datagramen paritate-datagrama.

Bigarren kanalaren teknika lagin sorta bakoitzaren bi kopia bidaltzean datza, bata dagokion unean, eta bigarrena hurrengo lagin sortarekin batera. Lehena galtzen bada, bigarrena erabiliko da soinua erreproduzitzeko. Bigarren kopia erresoluzio gutxiagokoa izaten

da. Adibidez, 64 kb/s-ko G.711 kodeketa erabiltzen denean, 20 ms-tan bildutako 160 laginak bildu, eta datagrama batean bidaltzen dira. Bigarren kanal bat gehituz gero, lagin horien (erresoluzio txikiagoko kodetzaile batekin digitalizatuak) beste kopia bat bidaliko da 20 ms geroago, lehenengo kanaleko bigarren lagin taldearekin bateratuta, datagrama bakar batean. Bigarren kanala kodetu daiteke, adibidez, GSM telefoniarako erabiltzen den 13 kb/s-ko kodetzailearekin. Ikusi 3.6 irudian nola igorritako n -garren datagramak bi lagin sorta daramatzen kodetuta: kanal nagusiko n -garren lagin sortari dagokiona, gehi $(n-1)$ garren lagin sortako bigarren kanaleko kodifikazioa. Horrela, datagrama bat galtzen bada —irudiko 3. datagrama, adibidez—, hartzaileak hurrengo datagraman jaso ditzake datagrama horretan zetozen laginak, nahiz eta kalitate baxuago batean. Entzulea ez da ohartuko kalitate-galera minimo horretaz 20 ms-ko tarte txikian. Bigarren kanalak erreproduzitzeko atzerapena eragiten du, baita banda-zabaleraren kontsumoa handitzen ere. Atzerapenari dagokionez, hurrengo datagrama jaso arte besterik ez da itxaron behar datagrama batean datozen laginak erreproduzitzeko. Banda-zabaleraren kontsumoa bigarren kanalerako erabilitako kodetzailearen araberakoa izango da. Opus kodetzaileak (RFC 6716), adibidez, aukerazko bigarren kanal bat erabiltzen du FEC teknika moduan. Erabiltzea edo ez erabiltzea kodetzaileak berak erabakitzen du, atzemandako errore-tasaren eta beste zenbait parametroren arabera.



3.6 irudia. FEC bigarren kanal baten bidez.

Dena den, bigarren kanal batek datagrama-galera bakarra berreskura dezake, baina ez bi datagrama edo gehiago galtzen badira elkarren jarraian. Hori hobetzeko bidea kanal erredundante gehiago erabiltzea da. Horretarako, n -garren datagramako laginen bigarren kopia bidaltzen da $(n+1)$ garren datagraman, baita hirugarren kopia bat ere $(n+2)$ datagraman. Nahi adina kanal gehitu daitezke, datagrama-galera segida luzeagoan konpondu ahal izateko; baina kontuan hartu behar da gehitutako kanal bakoitzak banda-zabalera kontsumitzen duela eta erreproduzitzeko atzerapena handitzen duela.

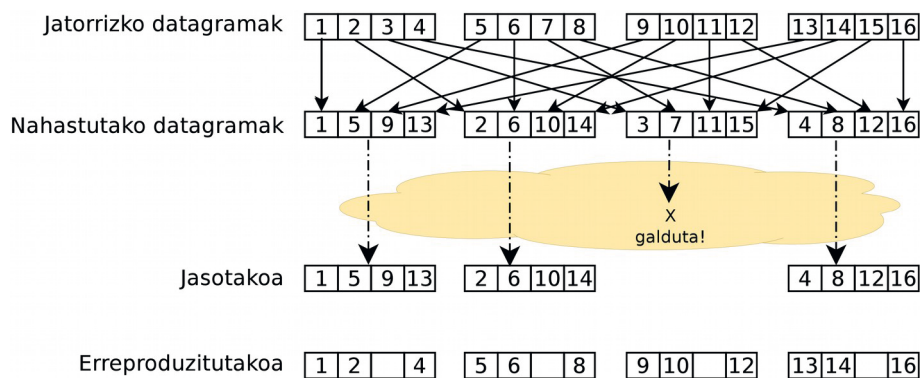
Nahasketa

Nahasketaren ideia galdutako laginen eragina denboran lausotzea da. Horretarako, igorleak laginak berrantolatzen ditu igorri baino lehen, jatorrizko soinuan elkarren jarraian dauden laginak zenbait datagramatan bidaltzeko, 3.7 irudian azaltzen den moduan. Horrela eginez, bidean datagrama bat galtzen bada, galdutako soinu-tartea banatzen da erreprodukzioan zehar. Adibidez, berriz hartzen badugu G.711 kodeketa, eta datagrama batean doazen 20 ms-ko 160 soinu-laginak 5 ms-ko lau tartetan zatitzen baditugu, lortutako tartea hurrengo 4 datagrametan bidal daitezke. Irudian azaltzen den moduan, datagrama horietako baten bat galtzen bada, erreproduzitzean, 5 ms-ko 4 isilune agertuko dira hurrengo 80 ms-tan, eta ez 20 ms-ko isilune bat.

Nahasketak nabarmen hobetu dezake entzuleak atzemandako audio-stream baten kalitatea, eta ez du banda-zabalerarik kontsumitzen. Gainera, erreproduzitzeko atzerapena handia izan daiteke (gure adibidean, 80 ms).

Berreraiketa

Berreraiketa galdutako soinuaren antzeko kopia bat sortzean datza. Hori posible da soinua, eta batez ere gizakiaren diskurtsoa, oso aurreikusgarria delako tarte txikietan. Modurik sinpleenean, galdutako datagraman zetorren soinua erreproduzitzeko azken soinuarekin ordezkatzeko da. Hau da, isilunea utzi ordez, aurreko soinua errepikatzen da. Ikaragarri sinplea da sistema hori, eta emaitza ez da batere txarra. Aldaera konplexuago bat interpolazioa da, hau da, galdutakoa berreraikitzea aurretik eta gero jasotako soinuetatik abiatuta. Errepikatzeak baino emaitza hobea du interpolazioak. Adibide gisa, Opus kodetzaileak berreraiketa erabiltzen du; RFC 6716 agirian, PLC deritza (*Packet Loss Concealment*).



3.7 irudia. Laginen nahasketa, galeren eragina leuntzeko.

Berreraiketa-teknikek soilik isilune txikietarako funtzionatzen dute ondo. Beren muga fonema baten luzeran dago. Fonema bakar bat oso ondo berreraiki daiteke alboko soinuetatik abiatuta. Baina, fonema bat baino gehiago galtzen bada, berreraikitako soinuaren distortsioak agertzen dira maiz. Nahasketarekin konbinatuta, eraginkortasuna handitu daiteke, baina sistemaren konplexutasuna ere bai. Eta ez dugu ahaztu behar halako sistemek denbora errealean egin behar dutela kodetzeko eta erreproduzitzeko lana.

2.4. Media-kanaletarako protokoloak

Behin seinalea kodetuta, solaskideek seinale hori elkarri bidali behar diote IP sarean zehar. Hau da, solaskide baten IP telefoniako bezeroak hartu behar ditu laginak, behar den goiburukoa gehitu, eta makinako sistema eragileari eman, hark sarean zehar beste solaskide bati bidal diezaion. «Behar den goiburukoa» esatean, aplikazio-mailako protokolo bat behar dugula esaten ari gara; goiburuko hori nolakoa izango den definitzen duen protokoloa, alegia. Beste edozein sare-aplikaziotarako bezala, IP telefoniarako ere zenbait protokolo definitu dira. Horien artean, dagoeneko ezagutu dugun RTP estandarra erabiltzen da gehien VoIP media-kanaletarako.

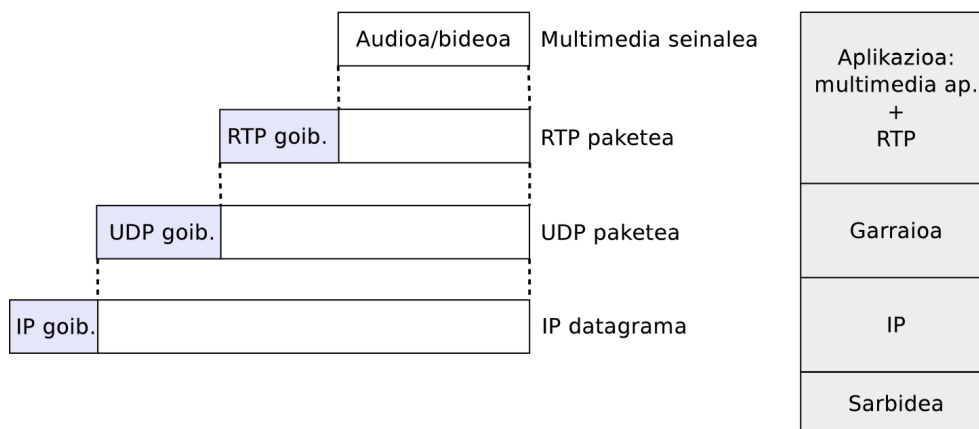
RTP (*Real-time Transport Protocol*)

Soinu- eta bideo-seinaleak denbora errealean bidaltzeko diseinatutako protokoloa da RTP. Izena nahiko nahasgarria du, ez baita garraio-mailako protokolo bat, aplikazio-mailakoa baizik. Haren zeregina da laginekin batera bidali behar den kontrol-informazioa definitzea. Zein da informazio hori? Funtsean, laginaren kokapena diskurtsoan. Horretarako, honako bi datu hauek bidali behar ditu igorleak laginekin batera:

- Sekuentzia-zenbakia, laginen arteko ordenari eusteko.
- Denbora-marka, lagina noiz sortu den jakiteko.

Hasiera batean, badirudi bi datu horiek erredundanteak direla, eta nahikoa litzateke haietako bakar batekin laginak sekuentzian jartzea ondo erreproduzitu ahal izateko. Kodetutako seinalean isiluneak kentzen badira, aldiz, behar-beharrezkoak dira bi datuak, isilunearen eta datagrama baten galeren artean zer gertatu den bereizteko. Denbora-markak besterik ez bagenu, eta elkarren jarraian jasotako bi paketeen denbora-marken artean hutsune bat balego, zer interpretatu behar luke erreproduzitzailerak: isilune bat egon dela ala datagrama bat galdu dela bidean? Era berean, sekuentzia-zenbakiak besterik ez badugu, nola azalduko dio igorleak erreproduzitzailari non dagoen isilune bat eta zein den haren iraupena? Ezinbestekoa da bi eremu horiek gehitzea bidalitako lagin sortei. Egokiena pakete-formatu estandar bat definitzea da, audio-/bideo-laginak gehi denbora-markak, sekuentzia-zenbakiak, eta erabilgarria suerta daitekeen beste kontrol-informazioa biltzen dituen. RTP da estandar hori (RFC 3550).

RTPren definizioak behartzen ez badu ere, UDP erabiltzen da normalean RTP paketeak bidaltzeko. Hau da, igorlearen aplikazioak, denbora errealean kodetutako laginak elkartu, RTP goiburukoa gehitu, eta sistema eragileari helarazten dio horrela sortutako paketea, UDP/IP datagrama batean kapsulatu eta sarean sar dezan (3.8 irudian ikus daiteke kapsulatze hori). Hartzailearen sistema eragileak erauziko du RTP paketea bere UDP/IP trajetik, eta aplikazioari emango dio. Aplikazioak, RTP goiburukoak aztertu, kendu, laginak deskodetu, eta erreproduzitzaileraren bufferrean sartuko ditu, hark dagokion unean erreproduzi ditzan. RTP goiburukoak 12 byte hartzen ditu normalean. Azpimarratzekoa da RTPk ez duela definitzen nola kodetu eta deskodetu behar den seinalea, ezta zer egin behar den ere galerei eta atzerapenari aurre egiteko. Hala ere, RTPk aukera ematen du paritate bertikala erabiltzeko galerak berreskuratzeko (ikusi RFC 5109).



3.8 irudia. RTP protokoloaren kokapena TCP/IP metan.

RTPn, iturri bakoitzak azpikanal batzuk erabil ditzake. Adibidez, bi solaskideren arteko bideokonferentzia batean, lau RTP korrante ezar daitezke: audioa noranzko bakoitzean transmititzeko stream bana, eta beste hainbeste bideoa transmititzeko. Hala ere, normalean, kodetzaileek kanal bakar batean elkartzen dituzte audio- eta bideo-seinaleak, noranzko bakoitzean RTP stream bana besterik erabili gabe. UDP erabiltzen duenez, multicast-komunikazioetarako ere erabil daitezke RTP. Bere goiburukoan dauden eremu esanguratsuenak hauek dira:

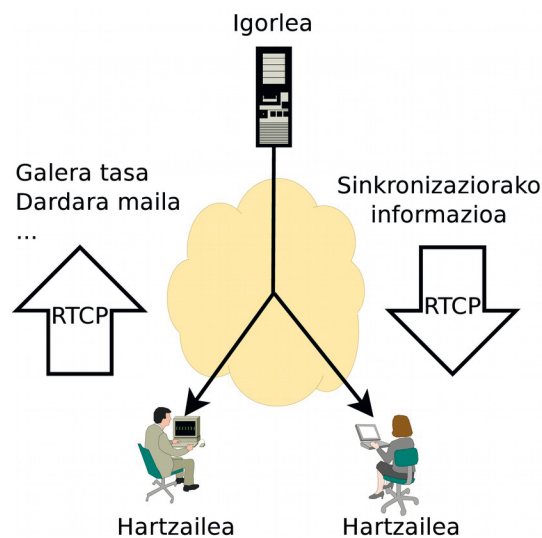
- Seinale mota (*payload type*). Zazpi biteko kode bat da, seinalea kodetzeko sistema identifikatzen duena. Adibidez, 3 kodeak GSM eran kodetutako audio-seinalea identifikatzen du, eta 31 kodeak H.261 bideoa.

- Sekuentzia-zenbakia. 16 bit dituen zenbaki hori RTP paketeak ordenatzeko eta galerak atzemateko erabiltzen da. Adibidez, 50. eta 52. paketeak jasota 51. paketea erreproduzitzeko garaia helutzen bada, galdutzat jo beharko du hartzaileak 51. datagrama hori, eta galerak berreskuratzeko mekanismoak erabiliko ditu pakete horrek zeramatzan laginak erreproduzitu ahal izateko.
- Denbora-marka (*timestamp*). 32 bit erabiltzen dira horretarako. Paketeak daraman lehenengo lagina noiz jaso den erregistratzen du. Denbora-marka unitate batean handitzen da lagin bat hartzeko denbora-tarte bakoitzeko. Adibidez, 8 kHz-etan hartzen baditugu laginak, tarte bakoitzeko 125 μ s handitzen da unitate batean denbora-marka. Hori horrela izanik, aplikazioak 20 ms-tan zehar hartutako laginak elkartzen baditu RTP pakete batean, elkarren jarraian igorritako bi paketeen denbora-marken arteko aldea 160 izango da. Kontuan hartu denbora-markaren balioa handitu egiten dela seinalea bidaltzen ez bada ere, isilunean gertatzen den moduan.

Internet bidezko komunikazioetan segurtasunak hartu duen garrantziak bultzatuta, RTPren bertsio segurua den SRTP (*Secure RTP*, RFC 3711) gero eta gehiagotan erabiltzen da RTPren ordez. Adibidez, IP telefoniarri beste bultzada handi bat eman dion WebRTC proiektuak erabiltzen du SRTP bere media-kanaletan, ahotsa eta bideoa trukatzeko nabigatzaileen artean.

RTCP (RTP Control Protocol)

RTP protokoloaren laguntzailea da RTCP (RFC 3550). RTP bidezko multimedia-saio baten datu estatistikoak eta kontrolerako informazioa igorleei helaraztea da haren lan nagusia. Hala ere, ez dugu hartzen hurrengo atalean aztertuko dugun kontrol-kanalerako protokolotzat, ez baitu telefono-deia edo bideo-saioa kontrolatzen, SIP edo RTSP protokoloekin hurrenez hurren egiten den moduan. Horiek ez bezala, RTCP media-kanalak monitorizatzeko tresna bat besterik ez da. Funtsean, seinalea jasotzen dutenek txostenak bidaltzen dizkiote igorleari, RTCP paketeak erabiliz (ikusi 3.9 irudia). Txosten horietan, jasotako informazio kopurua, galera-tasa, atzerapenaren aldakortasuna eta atzerapen osoa aurkituko ditu igorleak. Informazio hori seinalearen kalitatea bermatzeko edo hobetzeko erabil dezake aplikazioak. Adibidez, igorleak erabaki dezake ahotsaren edo bideoaren kodeketa aldatzea. RTCP multicast-saiotarako dago bereziki egokituta, baina unicast-saiotan ere erabil daiteke.



3.9 irudia. RTCP mezuen erabilera.

Normalean, saio baten hartzaile guztiek RTCP txostenak bidali beharko lizkiekete igorleei. Horrek eragindako trafikoa gehiegizkoa izan daiteke hartzaile asko dituzten saioetan (adibidez,

multicast-stream batean), eta, horregatik, bidalitako txostenen aldirokotasuna dinamikoki doitu egiten zaio une bakoitzean dagoen hartzaileen kopuruari. Hau da, hartzaile gehiago badaude, txostenen arteko tartea ere handitu egiten da.

3. Kontrol-kanalerako protokoloak

IP telefoniako kontrol-kanalerako hamaika protokolo definitu dira, batzuk estandarrak eta beste batzuk pribatuak. Gehien erabiltzen dena SIP da (*Session Initiation Protocol*, RFC 3261). Horretan zentratuko gara orain.

3.1. SIP

Honako bi hauek ahalbidetzen ditu SIP protokoloak:

- Solaskideen arteko deiak ezartzea IP sare baten bidez. Horretarako, deitzaileak deitutakoa zer IP helbidetan dagoen aurkitzeko mekanismoa definitzen du protokoloak. Behin aurkituta, deitzaileak hitz egiteko gonbidapena igortzen dio deitutakoari, eta bien arteko kontrol-kanala ezartzen da. SIP mezuak erabiliz, solaskideek elkarrizketarako baldintzak adostu ditzakete; tartean, zer kodeketa erabiliko den. Elkarrizketa amaitzeko ere, SIP mezuak erabiltzen dituzte.
- Deia kudeatzeko hainbat tresna ematen dizkie IP telefoniarako aplikazioei. Adibidez, seinale-kanal gehiago gehitzea dinamikoki (bidea gehitzeko ahotsari, adibidez), erabilitako kodeketa aldatzea (sarearen egoerara egokitzeko, adibidez), solaskideak dinamikoki gehitzeko edo deia beste erabiltzaile bati transferitzeko.

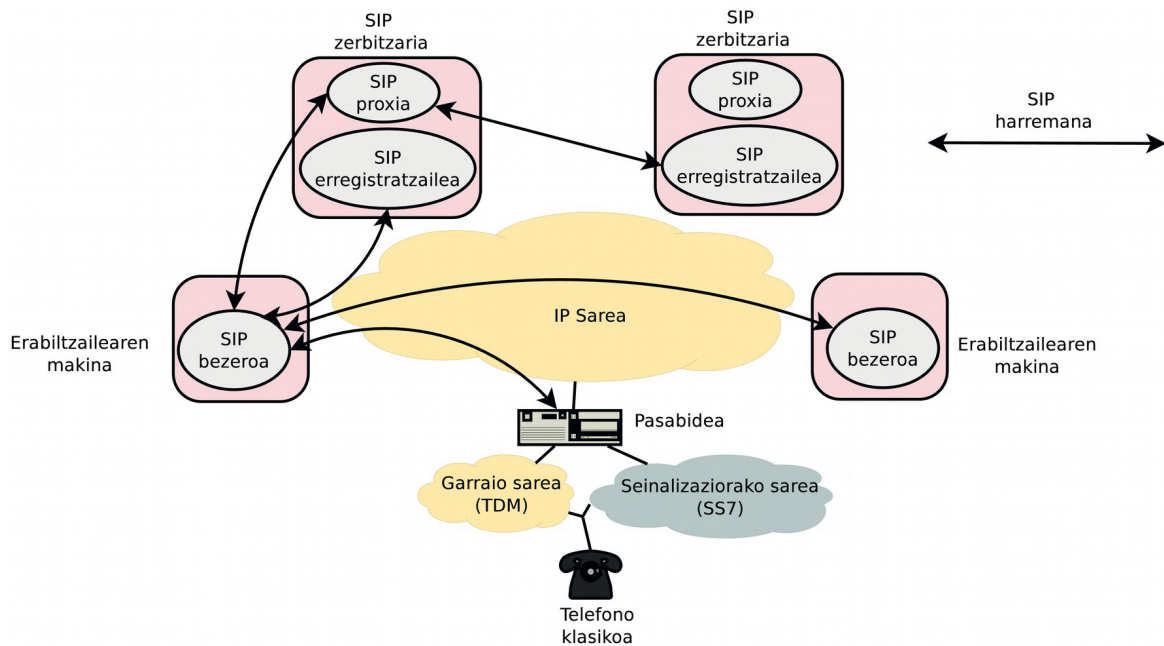
Deiak ezartzeko mekanismoa argia bada ere, SIP elkarrizketak korapilatsu samarrak suertatzen dira. SIP estandarra definitzen duen RFC 3261 agiriaz gain, badaude beste 30 RFC baino gehiago definizio hori zabaltzen dutenak. Ondorioz, SIP produktuek inplementazio partzialak erabiltzen dituzte, eta baliteke bi inplementazio ez izatea bateragarriak deia ezartzeko mekanismoaz harago. Konplexutasun horren arrazoietakoa bat, baina ez bakarria, betiko telefono-sareekiko bateragarritasunari eutsi nahi izatea da. Oraindik ezinbestekoa denez betiko telefono-sareekiko komunikazioari eustea, IP sare huts batean behar ez genituzkeen SIP komando pilo bat agertzen dira SIP protokoloan. Testu honetan, SIP erabiliz deiak nola ezartzen diren ikasteen zentratuko gara.

Ezaugarri nagusiak

Bi solaskidek zuzenean hitz egiten dutenez, P2P aplikazioen antza hartzen du SIPEk. Baina, berez, bezeroa/zerbitzaria ereduari jarraitzen dion aplikazio-mailako protokolo bat da. Hau da, helburua lortzeko, funtsezkoak dira zerbitzari-lanak egiten dituzten zenbait programa, zenbait makinatan kokatuta. Kontrol-kanala ezarri ahal izateko, zerbitzari horiekin lan egin behar dute erabiltzaileen makinetan egikaritzen diren SIP bezeroek. Behin deia ezarrita, aldiz, komunikazioa zuzenean bi bezeroen artean gauzatzen da; bi solaskideen makinetan egikaritzen diren SIP bezeroen artean, alegia. Komunikazio horiek guztiak, zerbitzarien eta bezeroen artekoak zein bezeroen artekoak, SIP protokoloa erabiliz gauzatzen dira. Honako hauek dira SIP aplikazio batean agertzen diren eragileak (3.9 irudian agertzen dira):

- **SIP bezeroak** (*user agent*). Deitzailearen eta deitutakoaren makinetan daude. Erabiltzaileekiko interfazearena egiteaz gain, beren lana SIP bidez deiak kontrolatzea da, baita seinaleak igortzea eta jasotzea ere, askotan RTP erabiliz. Bi bezeroen arteko kontrol- eta media-kanalak ezartzeko, zerbitzarien laguntza beharko dute bezeroek.

- **SIP erregistratzailea** (*SIP registrar*). Erregistratzaileak deitutako bezeroa aurkitzeko behar den informazioa gordeko du. Beraz, dei bat ezartzeko ohiko bide bat da bezeroak aurkitzea zein den deitutakoaren fitxa gordetzen duen erregistratzailea, eta berari eskatzea fitxa hori. IP telefonia-zerbitzua ematen digun entitateak kudeatuko du SIP erregistratzailea. Internet bidezko telefonia bada, gure ISP izan daiteke entitate hori, edo, OTT zerbitzu bat bada, beste edozein konpainia. Barruko telefonia bada, gure sareko zerbitzari batean egongo da dagokigun SIP erregistratzailea.
- **SIP proxia**. Deitutakoen fitxak bilatzeko erabiltzen den zerbitzari bat da. Erregistratzaileaz gain, SIP bezeroek SIP proxy bat eduki beharko dute esleituta, beren eskaerak bidaltzeko. Hau da, SIP bezeroek ez dute zuzenean bilatzen non dagoen deitutakoari dagokion erregistratzailea, eta ez dute erregistratzaile horrekin zuzenean hitz egingo; lan hori SIP proxy baten esku utziko dute (ingelesezko *proxy* hitzak «delegatua» edo «utzia» esan nahi du, hain zuzen ere). Normalean, sare baten erabiltzaileentzako proxiaren eta erregistratzailearen lana programak berak egiten du, zerbitzari batean: SIP zerbitzarian. Zerbitzari horrek telefonogunearen lana egiten duenez, ez da harrizkoa *IP telefonogune* terminoa erabiltzea hura izendatzeko.
- **Pasabideak**. IP sarearen eta telefono-sare zaharren arteko zubiarena egiten duten zerbitzariak dira. Beren lanak bi dira: SIPen eta telefono-sareen kontrol-protokoloen arteko itzulpena, eta bi sareetan erabilitako ahots- eta bideo-kodeketen arteko bihurteta.



3.10 irudia. SIP eragileak eta beren arteko harremanak.

Deia ezartzeko egin beharrekoak antz handia du DNS izen baten ebazpenarekin. Azken finean, bi kasuetan, fitxa baten bila ibiltzea da. DNSren kasuan, izena eta IP helbidea lotzen dituen A motako DNS erregistro baten bila gabiltza («fitxa» adierazteko informatikariok erabiltzen dugun terminoa da «erregistroa»). SIP telefoniaren kasuan, SIP erabiltzailea eta uneko IP helbidea lotzen dituen beste erregistro baten bila gabiltza. Horregatik, bi aplikazioetan agertzen diren eragileak eta egin behar diren urratsak antzekoak dira. Laster ikusiko dugunez, SIP proxiak egiten duen lana eta sare baten DNS cache-zerbitzariak egiten duena antzekoak dira. Eta SIP erregistratzaileak egiten duena eta DNS barrutiko zerbitzariak (*DNS zone server*) egiten duena ere gauza bera da funtsean.

SIP bezeroek UDP zein TCP erabiltzen dute normalean (beste aukera batzuk ere badaude). 5060 edo 5061 portuak erabiltzen dira; lehena, mezuak zifratu gabe bidaltzen direnean, eta bigarrena, zifratzen direnean. SIP mezuen sintaxiak antz handia du HTTP protokoloa mezuenarekin. SIP protokoloan ere bi motatako mezuak daude: eskaerak eta erantzunak. Aldi berean, hainbat eskaera mota daude. Garrantzitsuenak honako hiru hauek dira:

- REGISTER: bezeroek bidaltzen dizkiete erregistratzaileei, beren buruaren berri emateko; hau da, nolabait, telefonia-sisteman alta ematea.
- INVITE: bezeroek bidaltzen diote beren proxiari, edo, zuzenean, beste bezero bati.
- BYE: bezero batek besteari bidaltzen dio, ezarria duten deia bertan behera utziko duela jakinarazteko.

SIP helbideak

SIP deiak egiteko eta jasotzeko, SIP helbide bat behar dute bezeroek. SIP telefonia hornitzaile batekin erregistratzen garenean emango digute gure SIP helbidea, beste SIP erabiltzaileen aurrean identifikatzeko. SIP helbideek antz handia dute posta elektronikoko helbideekin. Honako hau da beren sintaxi sinplifikatua, normalean erabiltzen dena (sintaxi osoa ezagutu nahi izanez gero, begiratu RFC 3261 agiria):

```
sip:erabiltzailearen_izena@identifikadorea:portua
```

Hasierako «sip» hitzak zer protokolo erabili den azaltzen du. Batzuetan, hitz hori kendu egiten da gizakien artean helbideak trukatzeko, jakintzat hartzen baita protokolo hori SIP dela. Zifraketa erabili nahi badugu, «sip» hitzaren ordez «sips» erabili behar dugu helbidean protokoloa adierazteko. Amaierako portu-zenbakia ez da askotan jartzen; kasu horretan, 5060 hartuko da, protokoloa «sip» izanez gero, eta 5061, berriz, «sips» erabiliz gero. Erabiltzailearen izena karakterekin edota zenbakiekin osa daiteke. A bilduaren atzetik, makina edo domeinu baten identifikadoreak agertu behar du. Makina bat denean, IP helbide bat edo izen bat izan daiteke identifikadore hori, baina bigarrena izatea gomendatzen da. Makina zehatz bat identifikatzea baino malguagoa da makina horri SIP zerbitzua ematen dion hornitzailearen DNS domeinua identifikatzea. Gero ikusiko dugunez, hortik abiatuta lor daitezke domeinu horretarako SIP erregistratzailearena egiten duen makinaren izena eta IP helbidea. Hona hemen SIP helbideen adibide batzuk:

```
sip:patxi@euskosip.eus
sips:txomin.etxea@telesip.eus,
sip:943311723@mysip.net
sip:joe2@203.0.113.4:5090.
```

Hizkera teknikoan, SIP erabiltzaileen identifikadoreak ez dira helbideak, URIak baizik (*Uniform Resource Identifier*). Hala ere, inork gutxik ematen dio lagun bati bere «SIP URIa». Gizakiok nahiago dugu helbideez mintzatu.

Deia ezartzea

Deitutakoaren SIP helbideko «identifikadorea» eremuan IP helbide bat dagoenean, erraza da deia ezartzea, IP helbide hori izango baita deitutakoaren bezeroarena. Nahikoa da deitzaileak helbide horretara bidaltzea INVITE komandoa, SIP helbidean bertan azaldutako portura. Komandoarekin batera, saioa ezartzeko behar diren zenbait datu bidaltzen dira. Adibidez, ikusi balizko INVITE komando baten edukia:

```

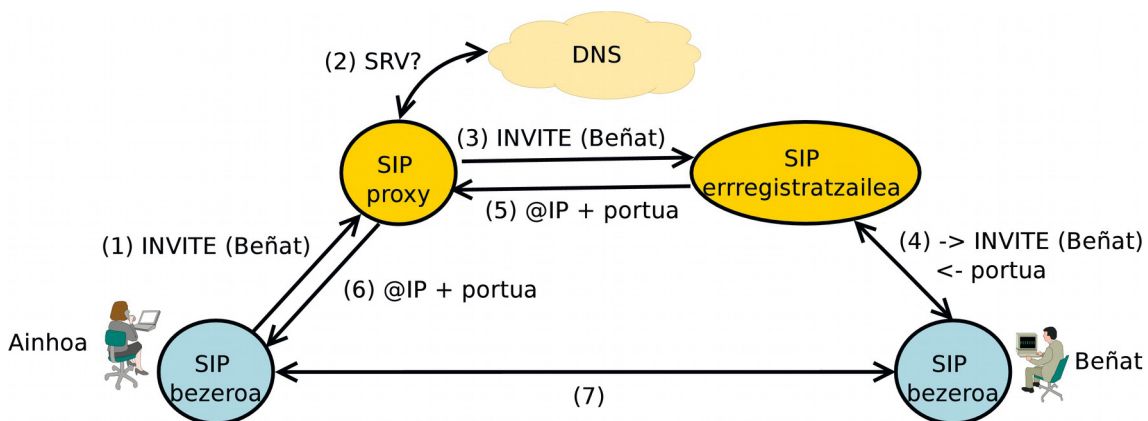
INVITE sip:beñat@203.0.113.196 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.0.2.34
From: sip:ainhoa@euskophone.eus
To: sip:beñat@203.0.113.196
Call-ID: a2b4e@belea.euskophone.eus
Content-type: application/sdp
Content-Length: 987

c=IN IP4 192.0.2.34
m=audio 38060 RTP/AVP 0

```

Bistakoa da SIP sintaxiak antza duela HTTPrekin, eta, kasu honetan, antz handia dagoela HTTP GET eta SIP INVITE mezuen artean. Mezuak lerroka daude antolatuta, eta, lerro bakoitzean, lerroaren izena, bi puntuko karakterea eta lerroaren eremuak ditugu. INVITE mezuak zeharkatutako makina bakoitzak, jatorrizkoak barne, *Via* izeneko lerro bat gehituko dio mezuari, bere IP helbidea grabatzeko. Eskaerari egindako erantzunak *Via* lerro horiek erabiliko ditu gero itzulerako bidean. Hurrengo lerroak posta elektronikoko mezuetan agertzen diren batzuk dira: *From* eta *To* izenekoek deiaren jatorria eta helburua identifikatzen dituzte; *Call-ID* izenekoak deiaren identifikadore bat da, eta *Content-Type* eta *Content-Length* lerroek SIP mezuan dagoen edukiaren formatua eta luzera adierazten dituzte. Hutsik dagoen lerroaren ondotik, mezuaren edukia dator. Adibidean, edukiak deitzailearen IP helbidearen eta audioa jasotzeko nahiago duen formatuaren berri ematen du.

Hala ere, gutxitan aurkituko dugu deitutakoaren SIP helbidean haren IP helbidea, goiko adibidean agertzen den bezala. Alde batetik, ohikoa delako DHCP zerbitzu dinamikoak erabiltzea, eta, ondorioz, erabiltzaile baten makinak erabilitako IP helbidea alda daitekeelako makina pizten duen bakoitzean. Eta, beste alde batetik, erabiltzaile batek hainbat gailu desberdin erabiltzen dituelako SIP telefono gisa (etxeko konputagailua, telefono mugikorra, tableta bat...), horietako gailu bakoitzak IP helbide desberdina izango duena. Erabiltzailearen SIP helbide bakarrak balio behar dio bere burua identifikatzeko, edozein izanda dei bakoitzean erabiltzen duen gailua. Horregatik guztiagatik, ohikoagoa da SIP helbidearen eskuineko aldean domeinu baten izena aurkitzea, hau da, helbidearen jabeari telefonia-zerbitzua ematen dion erakundearen domeinua. Hori da lehenagoko adibide batean emandako `sip:patxi@euskosip.eus` eta `sips:txomin.etxea@telesip.eus` helbideen kasua («euskosip» eta «telesip» domeinuen izenak asmatuak dira). Kasu horretan, deitutakoaren uneko makinaren IP helbidea lortzeko, ezinbestekoa da haren fitxa gordetzen duen erregistratzaileari galdetzea. Erregistratzaile hori topatu ahal izateko, erabiltzailearen hornitzailearen domeinua jartzen da SIP helbideetan. Adibide batean ikusteko, har dezagun 3.11 irudia, deitzailea Ainhoa eta deitutakoa Beñat (`sip:beñat@euskosip.eus`) direla.



3.11 irudia. SIP deia ezartzeko urratsak.

Urratsez urrats, honako prozedura honi jarraitu behar zaio deia ezartzeko:

- (1) Ainhoaren bezeroak bere proxiari igortzen dio INVITE mezua, Beñaten SIP helbidea azalduz (gogoratu, 'To' lerroan).
- (2) Proxiak DNS galdera bat egingo dio bere DNS zerbitzariari, `euskosip.eus` domeinuari dagokion SRV erregistroa eskatuz. Erregistro horretan aurkituko du `euskosip.eus` domeinuan SIP zerbitzua ematen duen makinaren izena, hau da, `euskosip.eus` domeinuko erabiltzaileen erregistratzailearena egiten duen makinaren izena.
- (3) Proxiak erregistratzaileari birbidaliko dio (1) urratsean jasotako INVITE mezua.
- (4) Erregistratzaileak beñat erabiltzailearen fitxan kontsultatuko du zein IP helbide dagokion, eta hara birbidaliko dio INVITE mezua. Beñaten SIP bezeroak kasu egin behar lioke mezu horri, eta Beñati jakinarazi dei bat duela, txirrina joz, adibidez. Beñatek deia onartzen badu, haren bezeroak portu bat irekiko du dei horretarako, horren berri emango dio bere erregistratzaileari, eta seinalearen zain geldituko da portu horretan.
- (5) Beñaten erregistratzaileak jasotako erantzuna birbidaliko dio Ainhoaren proxiari.
- (6) Proxiak erantzuna birbidaliko dio Ainhoaren bezeroari.
- (7) Ainhoaren bezeroak jasotako erantzunean aurkituko duen (IP helbidea, portua) bikoteari bidaliko dio seinalea. Hori beteta, deia ezarrita dago. Handik aurrera, bi SIP bezeroek zuzenean trukatu dituzte beren seinaleak eta komandoak.

Deskribatutakoa oinarrizko funtzionamendua da, baina aldaerak egon daitezke proxiaren eta erregistratzailearen portaeran. Adibidez, baliteke Beñaten zerbitzariak aukera ematea beren erabiltzaileei kontaktatzeko helbide bat baino gehiago erregistratzeko. Hori aprobetxatuz, Beñaten fitxan ager daitezke, adibidez, haren mahaigaineko konputagailuaren IP helbidea, laneko konputagailuarena eta, baita ere, telefono mugikorraren zenbakia. Aurreko (4) urratsean, erregistratzaileak erantzunik jasotzen ez badu etxeko konputagailuari INVITE mezua birbidali eta gero, amore eman baino lehen, bigarren saio bat egin dezake laneko konputagailuarekin. Horretan ere kalte egin badu, telefono mugikorraren zenbakiarekin saia daiteke. Gerorako utziko dugu azaltzea zer egin behar den IP telefono batek telefono konbentzional batekin komunikatzeko (Internet bidezko telefonia aztertzen dugunerako).

3.2. Beste protokolo batzuk

SIP ez da, ordea, erabiltzen den protokolo bakarra VoIP telefonian. Hona hemen aipatzekoak diren beste aukera batzuk.

H.323

ITU-T (ITUren telekomunikazio-arlorako atala) erakundeak egindako estandarra da. Esan daiteke betiko telefonia-konpainien estandarra izan dela IP telefoniarako. Lehenengo bertsioa argitaratu zenetik, 1996. urtean, lehia bizian ibili da SIP protokoloarekin, baina, egun, SIP gailendu da estandarren arteko borroka horretan. Oraindik ere erabiltzen da zenbait VoIP aplikaziotan, baina Internet komunitateak, beste behin⁷, bizkarra eman die telefono-konpainiek bultzatutako estandarrei, eta bere barnean sortutako estandar irekia hartu du; SIP, alegia.

Berez, protokolo bat baino gehiago, protokolo sorta bat da H.323. SIP baino zabalagoa da; kontrol-kanalerako protokoloaz gain, VoIP aplikazioek behar dituzten beste protokolo eta estandarrek ere ezartzen ditu: seinalerako kanalean erabiltzeko protokoloa —RTP, hain zuzen ere

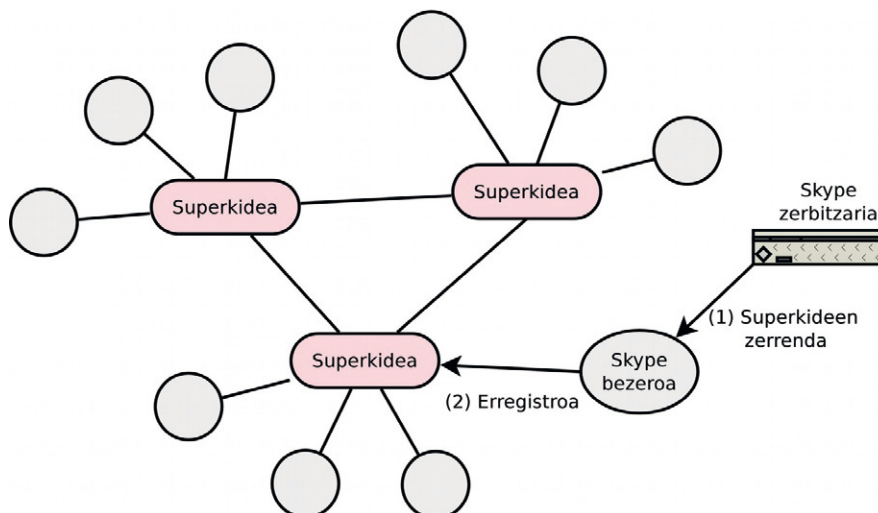
⁷ Gogoratu, adibidez, X.25/X.75-en eta IPren arteko lehia, edo X.400 eta SMTP posta elektronikorako estandarren artekoa.

(VoIPrako RTP erabili zuen lehenengo estandarra izan zen H.323)—, segurtasunerako ezaugarriak (H.235) eta beste hainbat osagarri eta hedapen (H.450, H.239, H.460).

Hasiera batean ematen duena baino antz handiagoa dute H.323 eta SIP ereduak. Hiztegi zeharo ezberdina erabiltzen badute ere, kontzeptualki era berean antolatzen dute komunikazioa, biek bezeroa/zerbitzaria ereduari jarraitzen baitiote. SIP munduan proxia/erregistratzailea eta pasabidea esaten diegune *Gatekeeper* eta *Gateway* esaten diete H.323 unibertsoan, hurrenez hurren; baina haien funtzionalitatea oso antzekoa da, nahiz eta definitutako zereginak betetzeko protokolo desberdinak erabili.

Skype

Skypek ikaragarritzko bultzada eman zion Internet bidezko telefoniari XXI. mendearen hasieran. Skyperen arrakastak oinarri teknologiko eta komertzialak zituen. Alde teknologikoari begiratuta, Skypek bere lehiakide guztiak gailendu zituen hainbat aldetatik: banda-zabaleraren kontsumoaren eta kalitatearen arteko erlazio bikaina lortu zuen, horretarako hainbat kodeketa berri sortuz (SVOPC, SILK, Opus) eta erabilitako kodeketa eta FEC funtzioak dinamikoki egokituz sarearen egoerari; NAT eta su-hesiak zeharkatzeko sistemak sistematikoki erabiltzen hasi zen; eta, gainera, komunikazioaren konfidentzialtasuna bermatu zuen, bidalitako guztia zifratuta.



3.12 irudia. Skype P2P sare-egitura eta bezero baten abiatzea.

Skype sortu zutenek fitxategiak partekatzeko Kazaa P2P sarea sortu zuten lehenago, eta orduan ikasitakoa IP telefonian aplikatu zuten: P2P sare batean oinarritzen zen jatorrizko Skype deitzaileak deitutakoa non dagoen aurkitzeko. Beren egitasmoa aurrera ateratzeko kostua ikaragarri merkatu zien bere sortzaileei P2P eredu erabiltzeak. P2P teknologiaren erabilera egun Skypen baztertuta badago ere, bere funtzionamendua ezagutzea interesgarria da, kontuan hartzekoa izan daitekeelako beste aplikazioak diseinatzean.

Bi motatako parte-hartzaileak zeuden P2P Skype sarean: kide arruntak eta superkideak. Superkideek bilaketa-sare bat (*overlay network*) osatzen zuten, eta kide arruntek sare hori erabiltzen zuten deitutako kidea kontaktatzeko behar den (IP, portua) bikotea aurkitzeko. Superkideen artean taula bat banatzen zuten, non erabiltzaileen izenak eta (IP, portua) bikoteak lotzen baitziren. Ainhoa eta Beñat Skype erabiltzaileak baziren, beren bezeroak abiatzen zituztenean, aurretik konfiguraturutako Skype zerbitzari batekin jartzen ziren harremanetan, inguruan zeuden superkideen zerrenda jasotzeko. Ainhoaren eta Beñaten bezeroek superkideren bat aukeratzen zuten; berarekin harremanetan jarri, eta beren buruaren berri ematen zioten, hau da, beren (IP, portua) bikotea ematen zioten. Superkideek erregistratzailearen lana egiten zuten, baita proxiarena ere: Ainhoak Beñat deitu nahi zuenean, bere superkideari eskatzen zion Beñati zegokion (IP, portua) bikotea.

Eskatutakoa aurkitzeko, Ainhoaren superkideak beste superkideen artean hedatzen zuen eskaera, Skype protokoloa erabiliz, Beñaten (IP, portua) bikotea topatu arte.

Jatorrizko Skype sarean, superkideak erabiltzaile batzuen makinak ziren. Edonor ezin zen superkide bilakatu, zenbait baldintza bete behar baitziren horretarako: IP helbide publikoa erabiltzea —NAT zerbitzari baten atzean egon gabe, alegia—, nahiko banda-zabalera edukitzea erabiltzeko prest, eta nahiko CPU ahalmen libre edukitzea ere bai, kide arruntei zerbitzua eman ahal izateko. Auzolan moduko funtzionamendu horri 2012. urtera arte eutsi zioten. 2011. urtean Microsoft konpainiak erosi zuen Skype, eta, urtebete beranduago, auzolanean zeuden 48.000 erabiltzaile ingururen superkideak ordezkatu zituen konpainiaren 10.000 zerbitzariekin⁸. Ordezkapen horrek ez zuen suposatzen inongo aldaketa teknologikorik, Skypek definitutako kontrol-kanalerako protokolo propioa erabiltzen jarraitu baitzuten; baina, nonbait, «superkidea» izendapena «zerbitzaria»-rekin ordezkatzeko P2P izaera galtzea ekarri du. Agian onartu beharko genuke hasiera-hasieratik Skype ez zela P2P sare bat, superkideek egiten zuten lana SIP zerbitzari batenaren baliokidea baitzen. Egokia litzateke esatea Skype auzolanean emandako zerbitzua zela, bezero-zerbitzaria jarraituz, non zerbitzarien lana milaka boluntarioek betetzen baitzuten.

Inter Asterisk Exchange 2. bertsioa (IAX2)

Asterisk VoIP zerbitzari bat da. Hainbat VoIP protokolo erabil ditzake (SIP, H.323...), baina haren sortzaileek protokolo propioa ere sortu zuten, IAX protokoloa, Asterisk zerbitzarien arteko komunikazioetarako. Egun, IAX ordeztuta dago bere bigarren bertsioarekin, IAX2 izenekoarekin (RFC 5456). Haren erabilera zabaldu dute VoIP aplikazioen osagai guztien arteko harremanetarako. Are gehiago, IP telefoniaz gain, multimediatik edozein komunikazio-kontrolerarako erabil daiteke, bideo-streaming aplikazioetarako barne.

«Dena batera» motako protokolo bat da (*All-in-one*), kontrolerako trafikoa eta seinalea kanal beretik bidaltzen baititu UDP erabiliz. Horrek asko laguntzen du NAT eta su-hesiak zeharkatzeko arazoa gainditzen (laster aztertuko ditugu). IAX2ren beste abantaila bat ahots-laginei gehitutako goiburukoaren tamaina da, RTPk gehitutakoa baino nabarmen txikiagoa baita. Adibidez, ahotsa transmititzeko 8 kb/s abiaduran eta 20 ms-ro datagramak sortzen dituen sistema batean, datagrama bakoitzak 20 byte ahots garraiatzen ditu. IAX2 protokoloak 4 byteko goiburuko gehitzen du, hau da, % 20ko zama, eta RTPk, aldiz, 12 byte, hau da, % 60 ko gainkarga.

Skinny Client Control Protocol (SCCP)

Cisco-k garatutako protokolo propioa da SCCP. Beren VoIP produktuen arteko komunikazioetarako erabiltzen da, zerbitzarien eta IP telefonoen artekoetarako batez ere (Ciscoren izen-degi aldakorrean, VoIP zerbitzariak oraingoz *Cisco Unified Communications Manager* dira; lehen, *CallManager* besterik ez). TCP gainean erabiltzen da SCCP, eta, seinalerako, Ciscoren IP telefonia-sistemek RTP/UDP erabiltzen dute. SCCPrekin diseinua Ciscoren ekipoekin integratuta dago, haiekin lan egiteko pentsatuta baitago. Hala eta guztiz ere, beste konpainia batzuek alderantzizko ingeniariak erabiliz inplementatu dute SCCP protokoloa beren produktuetan. Adibidez, Asterisk telefonoguneek SCCPrekin lan egin dezakete, konpainiak sortutako software libreko inplementazio bat erabiliz.

XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol)

Bere jatorrizko izena Jabber zenez, oraindik XMPP/Jabber izendatuta aurkituko dugu. XML formatuan (*eXtensible Markup Language*) oinarritzen den protokolo bat da. Hasiere batean, uneko mezularitzarako alternatiba irekia izateko garatu zuten, baina bere ezaugarrietako bat da beste

⁸ Mugimendu horiek mesfidantza-zirrikituak ireki zituzten Skype zerbitzuarengan, jakin zenean 2011. urtetik Skype sarea AEBko PRISM espioitza masiborako sistemari sartuta zegoela.

komunikazio-aplikazioetarako luzapenak gehitzeko ahalmena (horregatik dago *extensible* hitza XMPP akronimoan). Eta segituan definitu zuten haren VoIP aplikazioetarako hedapena, Jingle protokoloa dena. Hala ere, azpimarratu behar da Jingle ez zutela diseinatu telefonia-aplikazioek ematen dituzten zerbitzu guztiak gauzatzeko, baizik eta lagunen arteko komunikazio sinpleetarako, ahots-mezularitzarako, alegia. Hortaz, ez da SIP bezalako protokoloetarako alternatiba bat.

IETFk onartutako estandarra da XMPP protokolo orokorra 2011. urtetik (*proposed standard*, RFC 6120); Jingle protokoloa, aldiz, XMPP Standards Foundation erakundearen estandar egonkortua da (XEP-0166). SIP eta H.323 protokoloekin bezala, RTP erabiltzen da XMPP/Jingle protokoloarekin batera media-kanaletan.

XMPP erabilera XXI. mendearen hasieran zabaldu zen, baina mendearen bigarren hamarkadan XMPP protokoloa bultzatu zuten konpainia handiek ordezkatu zuten beren protokoloekin. Egun, software irekian oinarritutako zerbitzuek erabiltzen dute gehien.

WebRTC eta kontrolerako kanala

WebRTC ezagutu dugu dagoeneko, streaming-sistemetan erabiltzen ari diren protokoloekin batera. Bere izenak dioenez, web-arakatzailen arteko denbora errealeko komunikazioetarako definitu zen, beste aplikazio bat edo pluginak erabili beharrik gabe. Hau da, WebRTC-k telefonia-zerbitzua web-aplikazioetan barneratzea dakar. RFC 7478 agirian haren erabilerarako zenbait aukera deskribatzen dira. Bere hasierako erabilera nagusia arakatzailen arteko bideokonferentziak gauzatea izan da, sare sozialen zerbitzu estra bezala. Egun, arakatzaille gehienak prest daude WebRTC-rekin lan egiteko.

Dagoeneko aipatu dugunez, WebRTC-k SRTP/UDP erabiltzen du media-kanaletan. Eta kontrol-kanalerako, zein da WebRTC-k definitzen duen protokoloa? Erantzunak bitxia dirudi: batere ez. WebRTC-n ez dago definituta nola egingo duten solaskideek elkarren berri izateko, edo deiak ezartzeko. Hori ulertzeko gogoratu behar da kontrol-kanalerako protokoloen lan nagusia dela deitutakoa sarean zehar aurkitzea, dei bat egiten zaionean. Baina WebRTC diseinatu zutenek buruan zuten testuingurua ez zen telefonia-zerbitzu unibertsal batena, lagunen arteko komunikazioena baizik, sare sozialetan egiten den moduan. Hau da, aurreikusten zuten solaskideek jadanik izango zutela harreman bat, eta, ondorioz, bide eta protokolo bat ere bai, elkarren berri emateko dei bat egin nahi dutenean. Lagun batek bere taldeko beste lagun bat deitu nahi duenean, partekatzen duten aplikazio-zerbitzariari eskatuko dio horren berri emateko beste lagun horri; zerbitzariak harremanetan jarriko ditu bi arakatzailleak, eta gero ez du ezertan parte hartuko elkarrizketa horretan. Zerbitzari horiek, gehienetan, protokolo propioak erabiltzen dituzte deiak ezartzeko bi arakatzailen artean; baina estandar eta irekiak diren batzuk ere erabiltzen dira, besteak beste, SIP, XMPP, eta MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*, gauzen Internetarako erabilia).

Kontrolerako protokoloa definitu ez zuten arren, aipatu behar da WebRTC-ri buruzko agirietan seinalizazio-protokolo bat agertzen dela (*signaling protocol*), baina ez dela hemen kontrol-kanalerako protokoloa deitu duguna. NAT zeharkatzeko erabilitako protokoloa da, laster aztertuko dugun ICE protokolo sorta, hain zuzen ere. Nomenklatura hori nahasgarria suerta daiteke, TDM telefonia tradizionalen, seinalizazio-protokoloa gure kontrol-protokoloa delako.

WebRTC arakatzailen arteko komunikazio zuzena bideratzen duenez, P2P erako komunikazioa dela aipatzen da askotan. Hala ere, zerbitzarien beharra ez da desagertzen, IP telefonian, orokorrean, gertatzen den bezala: IP telefoniarako terminalen arteko komunikazio zuzena izateak ez du esan nahi P2P aplikazioa denik, edo, behintzat, zerbitzaririk ez denik behar. WebRTC komunikazioetan hainbat zerbitzari topatuko ditugu:

- Bi arakatzailen berri duen zerbitzari batek egin beharko du konexioa. Nolabaiteko IP telefoniarako zerbitzari-lana egin beharko du, alegia.
- Geroago aztertuko ditugun TURN eta STUN zerbitzariak ere beharko dira, NAT eta antzeko sistemak zeharkatu ahal izateko.

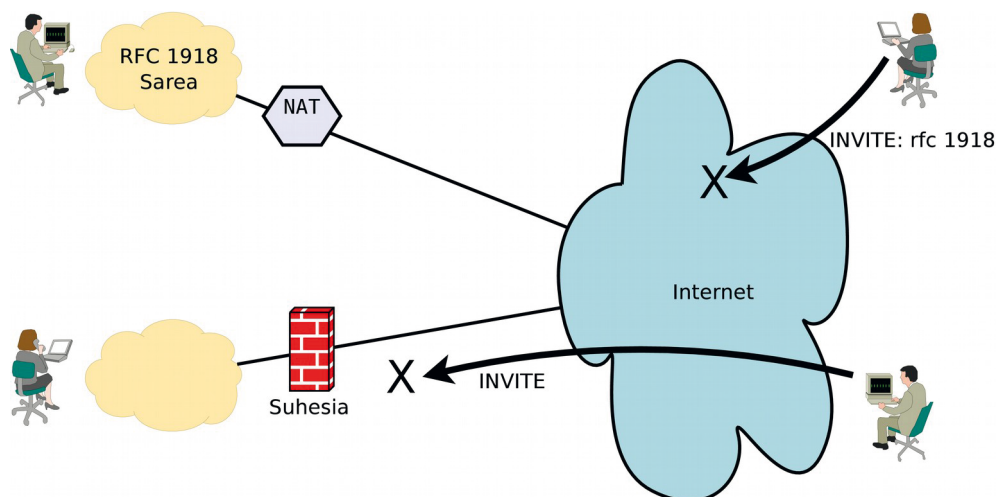
— Media-zerbitzariak beharko dira bi arakatzailak nahikoa ez direnean zenbait zerbitzu gauzatzeko; besteak beste taldeko komunikazioak (multibideokonferentzia), beste sareetako erabiltzaileekin komunikatzea (pasabidearenak egiteko), edo zuzeneko streaminga (*front end* zerbitzariarena egiteko).

4. Internet bidezko telefonia

Internet erabiltzen badugu telefoniarako, seinaleak denbora errealean transmititzeaz eta deiak ezartzeaz gain, beste bi arazo hauek agertzen dira: su-hesiak eta NAT hesiak zeharkatzea, eta TDM telefono-sareetako komunikazioa. Azken horrekin lotuta dago gure betiko telefono-zenbakien erabilera IP telefonia-sistemetan.

4.1. NAT eta su-hesiak

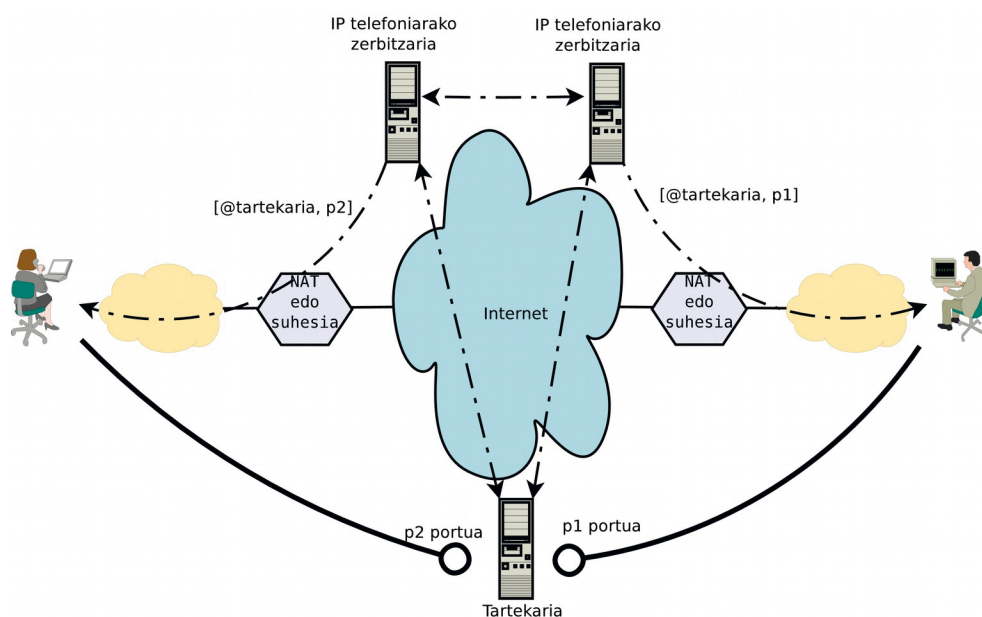
Egungo Internet-erabiltzaile gehienak NAT edota su-hesi baten atzean daude kokatuta. Bai NAT zerbitzariak baita su-hesiek ere pantailarena egiten dute beren sare lokalean, erabiltzaileak bere makina konektatua duen sarean, alegia. Kasu horretan, soilik IP helbide publiko bat edota su-hesian espresuki baimendutako sareko zerbitzariak daude ikusgarri kanpoan —Interneten— kokatuta dauden beste makinentzat. Baimenduta dauden makina horien artean ez da egoten erabiltzailearena, eta, ondorioz, ez da posible kanpoko makina batek konexio bat ezartzea erabiltzailearen makinekin. Beraz, lehenago ikusitako telefono-deia ezartzeko mekanismoek ez dute zereginik kasu horietan; izan ere, IP telefoniarako bezero batek, behin deitutakoaren (IP, portua) bikotea aurkituta, ezingo du komunikaziorik ezarri, IP hori ez baita atzigarria izango NAT edo su-hesi baten atzean badago (ikusi 3.13 irudia).



3.13 irudia. NAT eta su-hesien atzeko ikusezintasuna.

Hesi horiek gainditzeko era bat bitartekariak erabiltzea da (*relay*, ingelesez), 3.14 irudian azaltzen den moduan. Bitartekariak edozein erabiltzailerentzat ikusgarri egon behar duten zerbitzariak dira; hau da, aukera egon behar du haiekin Interneteko edozein gunetatik konexio bat abiatzeko, inongo su-hesi edo NAT oztoporik gabe. Ainhoak Beñat deitu nahi duenean, bere IP telefoniako zerbitzariarekiko komunikazioa abiatu behar du lehenik (SIPen kasuan, proxiarekin). Era berean,

Beñatek bere bezeroa abiatzen duenean, erregistratzailearena egiten duen bere IP telefoniako zerbitzariarekin ezarri behar du kanal bat. Ainhoak Beñati deitzea eskatzen dionean bere zerbitzariari, hark, erabilitako protokoloak agindutakoa betez, Beñati dagokion zerbitzaria aurkituko du, eta hari helaraziko dio Ainhoaren eskaera. Ohartu kanpoko komunikazioak bideratzeko erregistratzailearena egiten duen IP telefoniako zerbitzariak ikusgarri egon behar dutela kanpotik, bestela Ainhoaren zerbitzariak ezingo bailuke komunikaziorik abiatu Beñaten zerbitzariarekin (edo alderantziz). Irudian, bi zerbitzariak babestutako sareetatik at daude, baina beste aukera bat litzateke bi zerbitzari horiek NAT/su-hesien atzetik egotea, baina IP helbide publikoak erabiltzea eta su-hesian ikusgarri izateko konfiguratuta egotea. Beñaten zerbitzariak, Beñaten bezeroarekin aurretik ezarrita duen kanalaren bidez, Beñati birbidaliko dio jasotako eskaera. Beñatek deia onartzen badu, bitartekari bat adostu behar dute, eta hari eskatu portuak irekitzeko Ainhoarentzat eta Beñatentzat. Bitartekariak portu horiek prest dituenean, zerbitzariak bitartekariaren IP helbidea eta portua helaraziko dizkiete Ainhoaren eta Beñaten bezeroei, eta haiek konexioak ezarriko dituzte bitartekariarekin, 3.14 irudian agertzen den bezala. Hortik aurrera, bitartekariak portu batekin jasotakoa bestetik birtransmitituko du, eta, horrela, Ainhoaren eta Beñaten arteko elkarrizketa gauzatuko da, nahiz eta Ainhoa zein Beñat NAT edo su-hesi baten atzean egon. Gakoa da deitutakoaren bezeroak ez duela inongo konexiorik hartu behar zuzenean bere makinako portu batean, konexio guztiak bezero batengandik bistan dagoen zerbitzariaren baten kontra abiatzen direlako.

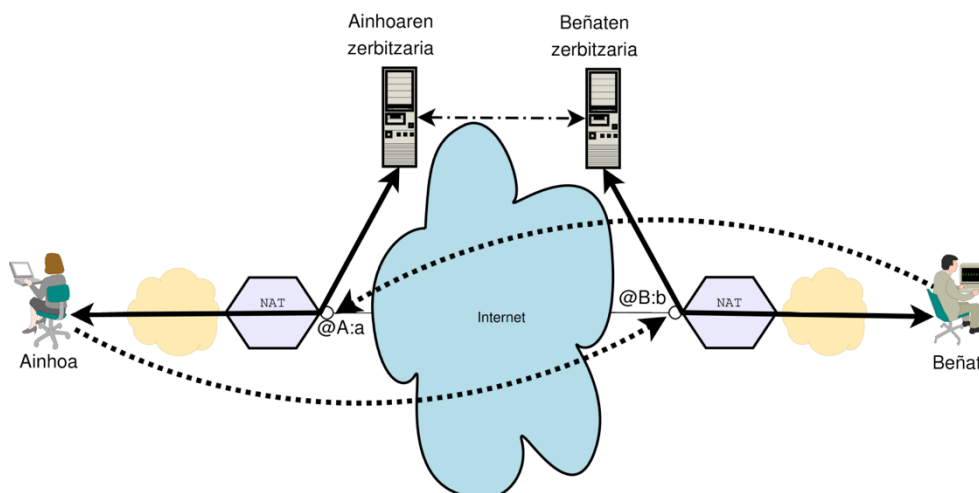


3.14 irudia. TURN erabilera su-hesiak eta NAT zerbitzariak gainditzeko.

Deskribatutako mekanismoa, funtsean, **TURN** deritzon teknika da (*Traversal Using Relays around NAT*, RFC 5766). Ez da NAT eta su-hesiak zeharkatzeko aukera bakarra, ezta, batzuetan, onena ere. Ahal denean, hobe da, bitartekariaren ordez, zuzenean NAT gailuak bere atzean dagoen bezero batentzako erabilitako portuan zuzenean jasotzea bezero horrentzako VoIP trafikoa, 3.15 irudian agertzen den bezala. Irudian, Ainhoak bere IP telefoniako zerbitzariari saioa abiatzeko eskaera bidali dionean, bere NAT gailuak IP helbide publiko bat eta portu bat (@A:a bikotea irudian) esleitu ditu Ainhoaren eta bere IP telefoniako zerbitzariaren arteko komunikazioak gauzatzeko. Era berean, Beñaten NAT gailuak @B:b bikotea esleitu dio Beñaten eta bere IP telefoniako zerbitzariaren arteko komunikaziorari. Ondorioz, Internetetik Ainhoaren NAT gailuak @A:a bikotera igorritako datagramak jasotzen dituenean, datagrama horien helburuko helbidea eta portua ordezkatzeko ditu, Ainhoaren IP barruko helbidea eta portua ipiniz, eta barruko sarean birbida-

liko ditu datagrama horiek, Ainhoarengana. Beñaten NAT gailuak lan bera egingo du jasotzen dituen eta $@B:b$ helburua duten datagramekin, Beñati helarazteko. Horrela izanik, Beñatek INVITE bati emandako erantzunean $@B:b$ bikotea eman dezake, deitzaileak hara bere ahots-seinalea bidaltzeko. Era berean, Ainhoak Beñati, INVITE eskaeran, $@A:a$ bikotea emango dio, Beñatek bere ahotsa Ainhoari helaraz diezaion. Hortik aurrera, bi solaskideek badute ahotsa elkarri bidaltzea, bitartekari baten beharrik gabe.

Hala ere, NAT gailuak bitartekari gisa erabili ahal izateko, Ainhoak eta Beñatek jakin behar dute NAT baten atzean daudela, eta, gainera, saio bakoitzeko zein den NAT horrek beraiei esleitutako *IP helbidea:portua* bikotea. Baina NAT mekanismoaren ezaugarri positiboetako bat da, hain zuzen ere, beraren gardentasuna; hau da, NAT baten atzean dauden gailuek ez dute ezer berezirik egin behar NAT zerbitzua erabiltzeko, ez dira jabetuko NAT baten atzean daudenez, eta ez dute ikusiko zein diren saio bakoitzean berari esleitutako IP helbide publikoa eta portua. Oztupo hori gainditzeko definitu ziren STUN teknika eta protokoloa (*Session Traversal Utilities for NAT*, RFC 8489). Protokolo horren bidez, NAT baten atzean daudenek hitz egin dezakete Internetetik ikusgarri dagoen STUN zerbitzari batekin, jakin ahal izateko zein den NATek beraiei esleitutako *IP:portua* bikotea. STUN zerbitzariak informazio hori lortzen du berari igorritako mezuak dakarren jatorrizko IP helbidea eta portua begiratuta, besterik ez.



3.15 irudia. NAT gailuen erabilera bitartekari gisa, bezeroen arteko saio batean.

Alabaina, NAT gailuak bitartekari gisa erabili ahal izateko, beste arazo hau agertzen da maiz: segurtasun-arrazoia direla medio, NAT gailu askok ez dute onartuko VoIP bezero baten eta bere VoIP zerbitzariaren arteko saiorako erabilutako *IP:portua* bikote bera erabiltzea beste edozein komunikaziotarako. Horregatik, hain zuzen ere, asmatu zen TURN, bitartekari bat erabiltzeko. Izan ere, STUN teknikaren hedapena da TURN. STUN teknikaren beste hedapen bat, NAT zeharkatzeko era guztiak bere barnean biltzen dituen, ICE protokoloa da (*Interactive Connectivity Establishment*, RFC8445). Funtsean, honako hau da ICE erabilera Ainhoaren eta Beñaten arteko saio bat ezartzean:

- (1) Ainhoak, ICE protokoloa erabiliz, bere ICE/STUN zerbitzariari eskatzen dio bere helbideen bilduma. Bilduma horretan agertuko dira Ainhoari datagramak bidaltzeko erabil daitezkeen $@IP:portua$ bikote guztiak. Bikote horiek hiru eratakoak izan daitezke ICE definizioetan:
 - Bikote zuzenak (*host candidate*): hauek dira bezeroaren benetako IP helbideak dituzten bikoteak. Kasu gehienetan helbide pribatuak izango dira, eta, ondorioz, sare pribatu berean dauden bezeroen arteko komunikazioetan besterik ezingo dira erabili.

- NAT bikoteak (*reflexive candidate*): hauek dira bere atzean dagoen bezeroari NAT gailuak esleitutako bikoteak. Hauen artean bi azpimota daude: bezeroari esleitu zaizkionak kanpoko zerbitzari batekin komunikatzeko (adibidez, bere IP telefoniarako zerbitzariarekin), eta beste bezeroarekin komunikatzeko esleitu zaizkionak.
 - Bitartekari bidezkoak (*relayed candidate*): bitartekari batek esleitutakoak; adibidez, TURN zerbitzari batek.
- (2) Ainhoak Beñati igorritako saioa hasieratzeko eskaeran (adibidez, SIP INVITE batean), aurreko urratsean lortutako bikote-bilduma bidaliko du. Gogoratu eskaera hori hainbat zerbitzari erabiliz helaraziko zaiola Beñati, Ainhoaren eta Beñaten arteko komunikazio zuzenik ez dagoelako.
 - (3) Eskaera jasota, Beñatek ere bere bikote-bilduma prestatuko du. Bera ere NAT baten atzean badago, ICE/STUN zerbitzari baten laguntza beharko du horretarako.
 - (4) Beñatek bere erantzuna helaraziko dio Ainhoari, bere bikote-bilduma barne.
 - (5) Ainhoak eta Beñatek beren bildumetan dauden bikoteen konbinazioak probatuko dituzte, biren arteko komunikazioa ahalbidetzen duen bat topatu arte. Bilaketa hori ordena bat jarraituz egiten dute, komunikazio hori zuzenagoa eta azkarragoa egiten duten konbinazioei lehentasuna emanez. Hau da, helbide zuzenak probatzen hasiko dira, eta, ezin badute komunikatu hauekin, NAT bidezkoak erabiltzen saiatuko dira; hauekin ere jai badute, bitartekari bidezkoak probatuko dituzte.
 - (6) Badabilen konbinazio bat aurkituta, beren arteko telefonia saioa abiatuko dute.

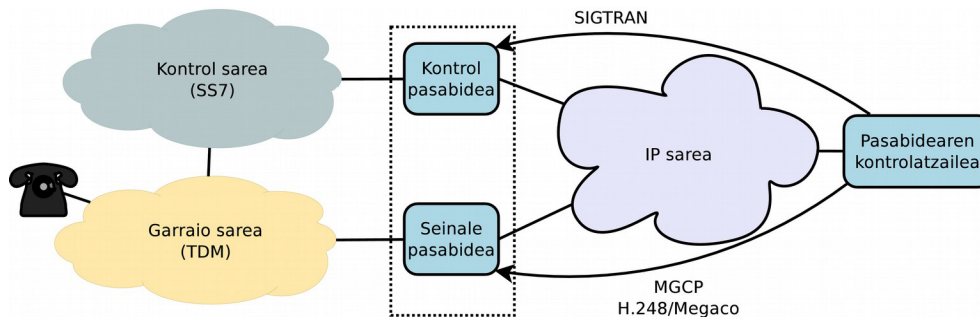
4.2. IP telefoniaren eta TDM telefono-sareen arteko komunikazioa

Internet bidezko telefoniak eta, orokorrean, IP telefoniarako sistemek, benetako arrakasta izatearren, ezinbestekoa dute telefono-sare klasikoekin lan egitea. Hau da, IP telefono batek ahala izan behar du beste edozein telefonotatik deiak jasotzeko edo telefono horretara deiak egiteko, edozein saretan kokatuta badago ere beste telefono hori. Horretarako, bi dira baldintzak. Bata, IP telefoniako zerbitzua ematen duten sareak, tartean Internet, fisikoki konektatuta egotea TDM telefono-sareekin, eta biren arteko seinalearen kodeketa-bihurketa egitea (*transcoding*). Bestea, IP sareetan erabiltzen diren erabiltzaileen identifikadoreak eta betiko telefono-sarean erabilitako zenbakien arteko lotura izatea. Lehenengo arazoari helduko diogu orain.

IP telefoniaren eta TDM telefono-sareen arteko komunikazioa pasabideek gauzatzen dute (ingelesez, *gateway*). Pasabideek telefono bidezko komunikazioaren bi alde zaindu behar dituzte: alde batetik, ahotsa zein bideoa bihurtzeko lana, eta, bestetik, kontrol-kanaleko komandoak itzultzeko lana. Bi lan horiek gailu fisiko bakar batean elkartu daitezke; baina, askotan, bi bihurketa horiek gailu desberdinek egiten dituzte: alde batetik media-pasabideak (*media gateway*), eta, bestetik, kontrol-pasabideak (*signaling gateway*). Bi pasabide horiek fisikoki banatzen dira TDM telefono-sareetan, fisikoki desberdinak direlako ahotsa garraiatzeko sarea eta kontrolerako sarea. Gainera, pasabideko bi alde horiek kontrolatzeko pasabidearen kontrolatzailea dago (*gateway controller*). Hiru osagai funtzional horien definizioa jasota dago zenbait RFCtan (RFC 2719, RFC 2805). 3.16 irudian dituzu haien arteko erlazioa eta haien arteko komunikazioetan erabilitako protokolo nagusiak.

Media-pasabideak soinua edota bideoa garraiatzen duten datagramen eta zirkuitu bidezko sareetan ibiltzen diren TDM tramen arteko bihurketa egiten du, baita barruan daramatzaten laginen kodeketen arteko bihurketa ere, beharrezkoa denean. ITSP (*Internet Telephony Service Provider*) baten sarea eta TDM telefono-sare baten arteko lotura egiten duen gailu bat izan daiteke (*trunking gateway*), baina ez da aukera bakarra. Enpresa baten IP telefonogunea ere izan daiteke (*business gateway*); alde batetik, RJ-11 konexioak jasotzen ditu, eta, beste alde batetik, IP sarearekin lotuta

dago, deiak hortik bideratzeko. Etxeetan telefono-zerbitzua IP bidez jasotzen badugu, etxeko modem-routerrak IP telefoniarako pasabide-lana ere hartzen du; alde batetik, RJ-11 konektorea eskainiz, IP ez diren telefonoak lotzeko, eta, bestetik, Internet eta telefonia zerbitzuak ematen dizkigun ISPren sarearekin lotuta.



3.16 irudia. Kontrol-pasabidea, media-pasabidea eta pasabidearen kontrolatzailearen arteko erlazioa eta protokoloak.

IP sareetan eta TDM telefono-sareetan erabilitako kontrol-protokoloen arteko bihurketak bi alde ditu. Alde batetik, IP telefoniako zerbitzuetan erabilitako kontrol-protokoloen (SIP, H.323...) eta telefono-sare zaharretan erabiltzen den SS7 kontrol-protokoloaren arteko bihurketa egin behar da, bi noranzkoetan. Hori da pasabidearen kontrolatzailearen lana. Beste aldetik, kontrol-pasabideak helarazi behar dizkio pasabidearen kontrolatzaileari jasotako SS7 aginduak, eta, kontrako noranzkoan, pasabidearen kontrolatzaileak igorri behar dizkio SS7 aginduak kontrol-pasabideari, hori guztia IP sarean zehar. Komunikazio horretarako definitu ziren **SIGTRAN** protokoloak (RFC 2719). SS7 mezuak IP datagrametan nola sartu eta bidali ezartzen du SIGTRAN estandarrak; horretarako, protokolo-familia oso bat definitzen du, tartean garraio-mailako protokolo berri bat (SCCP, *Stream Control Transmission Protocol*), kontrol-datagramak bere helburura heltzen direla bermatzeko, baina TCP erabiltzeak dakarren zamarik gabe. Izena protokolo sorta landu zuen IETFren lantaldeko izenetik eratorria da (*SIG*naling *TRAN*sport).

Pasabidearen kontrolatzailearen (*Gateway Controller*, edo, agiri askotan, **Call Agent**) eta media-pasabidearen arteko komunikazioa gauzatzeko, honako bi hauek dira protokolo nagusiak: **MGCP** (*Media Gateway Control Protocol*, RFC 3435), eta haren ordezkoa izateko definitu zuten **H.248/Megaco** protokoloa. Lehena ez da estandar bat izatera heldu, baina erabiltzen da oraindik, ekoizleek definitutako zenbait aldaeratan. Bigarrena, IETFren eta ITUren arteko lankidetzaren emaitza izan zen. Horregatik du izen bikoitza, bata IETFk erabilia (Megaco) eta bestea ITUk emana (H.248). IETFk estandarra eguneratzeari utzi zion (azken definizioa, RFC 3525 agirikoa, historiko gisa birsailkatu zuten RFC 5125 agirian), eta, egun, ITUk argitaratutako 3. bertsioa da estandar ofiziala. Harrigarria bada ere, H.248.1 izena eman dio ITUk 3. bertsio horri.

4.3. Identifikadoreen arteko lotura

TDM telefonia klasikoan, erabiltzaileak identifikatzeko zenbaki bat erabiltzen dugu; adibidez, 34 843 377 292 telefono-zenbakia. Zenbaki horien egitura **E.164** estandarrak ezartzen du. IP telefonian, aldiz, kontrolerako erabilitako protokoloak definitzen du nolakoak izango diren erabiltzaileen identifikadoreak. Horren adibidea dira SIP protokoloak definitzen dituen identifikadoreak. TDM telefono-sarean dagoen telefono klasiko batetik IP telefono batera deitu ahal izateko, IP telefono horrek, bere IP telefoniarako identifikadoreaz gain, E.164 zenbaki bat ere beharko du. TDM saretik IP sarera igarotzeko pasabide batek IP sarean dagoen telefono baterako SS7 deia jasotzen

duenean, deitutako E.164 zenbakitik abiatuta lortu beharko du deitutako horren IP telefoniarako identifikadorea. Horretarako, honako bi urrats hauek egingo ditu:

- (1) E.164 zenbakiari lotutako DNS izen bat lortu. Horretarako, ENUM estandarra erabiliko du.
- (2) DNS izen horri dagokion NAPTR erregistroa lortu. Erregistro horretan izango du erabiltzailearen IP telefoniarako identifikadorea.

ENUM

ENUM (*E.164 Number to URI Mapping*, RFC 6116) E.164 zenbaki bakoitza DNS izen batekin lotzeko sistema bat da. Bi identifikazio-sistemak, DNS eta E.164, era hierarkikoan daude antolatuta, baina bakoitza bere eran. DNSren hierarkian, domeinutan daude antolatuta identifikadoreak. Identifikadore bat (DNS izen bat), azpidomeinu-segida bezala idazten dugu, hierarkiako maila gorenean dagoen domeinua eskuinean idatzita, eta, hortik ezkerrera, azpidomeinuen segida identifikadorea osatu arte. Adibidez, `mmi.ehu.eus` izenean, `.eus` da domeinu gorena; horren azpian dugu `.ehu` domeinua, eta domeinu horretan dago `mmi` izena. E.164 zenbakietan, ordea, alderantziz idazten da hierarkia, ezkerretik eskuinera, alegia. Adibidez, 34 843 377 292 telefono-zenbakian, 34 da nazioarteko identifikadorea, kasu honetan Espainiako estatuak gobernatutako lurraldeak identifikatzen dituena. Gero, 843 aurrezenbakiak telefono hori Gipuzkoan kokatuta dagoela adierazten du. Eskuinean dauden hurrengo bi digituk, 37 zenbakiak, zehazten du Gipuzkoako zein telefonogunetan dagoen lotuta (kasu honetan, Lasarteakoan). Azken digituek erabiltzailearen linea identifikatzen dute telefonogune horretan.

ENUM sistemak bi hierarkien arteko bihurketa egiten du, E.164 zenbaki batetik DNS izen bat eratortzeko. Horretarako, ENUMek bi osagai ditu. Alde batetik, `.e164.arpa` domeinua definitu dute. Domeinu horren DNS zerbitzariari bidali behar zaizkie NAPTR erregistroa lortzeko eskaerak; baina eskaera horiek DNS izen bati buruzkoak izan behar dute, eta ez E.164 zenbaki bati buruzkoak. Horretarako, beste alde batetik, ENUMek definitzen du nola bilakatu E.164 zenbaki bat DNS izen: zenbaki bera alderantziz idatzi (hau da, eskuinetik ezkerrera), digituak puntuen bidez bereizi, eta, eskuinean, `.e164.arpa` domeinua gehitu. Adibidez, 34 843 377 292 zenbakia `2.9.2.7.7.3.3.4.8.4.3.e164.arpa` izen bilakatzen da. Hortik tiraka, `.e164.arpa` domeinuko zerbitzariak aurkituko dute zein E.164 maila goreneko zerbitzariri birbidali behar dioten jasotako NAPTR galdera. Hortik aurrera, galdera hori, beste edozein DNS galdera bezala, DNS zerbitzariz zerbitzari ibiliko da, bere erantzuna topatu arte. Hau da, telefono-zenbaki horri dagokion IP telefonia-identifikadorea duen NAPTR erregistroa topatu arte.

NAPTR erregistroak

NAPTR (*Naming Authority PoiNTeR*, RFC 3403) erregistro batean aurkituko dugu telefono-zenbakiari dagokion IP telefoniarako identifikadorea, adibidez, SIP identifikadorea. Hala ere, NAPTR erregistroek telefono-zenbakiak eta SIP helbideak lotzeko baino gehiagorako balio dute: telefono-zenbaki bati edozein motatako identifikadorea lotzeko ere balio dute, edo, hizkera teknikoagoa erabiliz, edozein URI E.164 zenbaki batekin lotzeko balio du NAPTR erregistroak (gogoratu SIP helbidea URI mota bat dela). Berez, zenbaki bati ez dagokio NAPTR erregistro bakar bat, NAPTR erregistro sorta bat baizik; zenbakiari lotu nahi diogun zerbitzu bakoitzeko erregistro bat, hain zuzen ere. NAPTR erregistroen malgutasun horrek egundoko ahalmena ematen dio ENUM sistemari, E.164 zenbaki batekin edozein zerbitzu lot baitezakegu. Hau da, gure telefono-zenbakia emanda, nahikoa izan daiteke guri telefono-dei bat egiteko Internetetik zein telefono-sare konbentzionaletik, guri mezu elektronikoa bat bidaltzeko, gure web-orri pertsonalaren URLa lortzeko, edo uneko mezu bat guri bidaltzeko. Zerbitzua bilduma horri IP bidezko oraingo edo etorkizuneko beste edozein zerbitzu gehitu diezaiokezu.

Malgutasunari eusteko, NAPTR erregistroek zenbait eremu behar dituzte. Honako hauek definitu dira:

- Izen bati dagokion NAPTR erregistroak sailkatzeko zenbakia. Lehenago, zenbaki txikiena duten NAPTR erregistroak hartu behar dira kontuan. Zenbaki hori erabiltzen da izenari lotutako

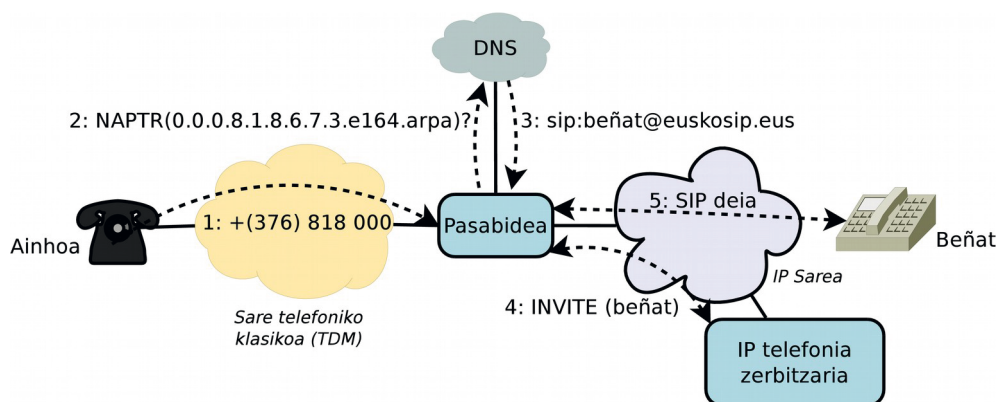
zerbitzuen artean lehentasunak ezartzeko. Adibidez, erabiltzaile batek nahiago badu IP telefonoiako zerbitzua erabiltzea berarekin komunikatzeko, IP telefoniarako identifikadorea ematen duen NAPTR erregistroari emango dio zenbaki txikiena.

- Berdinen arteko lehentasuna azaltzeko zenbakia. Bigarren zenbaki honek sailkapen bereko erregistroen arteko lehentasuna ezartzeko balio du; honetan ere, berriz, zenbakirik txikienak du lehentasuna.
- Flag bat erregistroaren eremuak interpretatzeko.
- Zerbitzua deskribatzeko eremua, azaltzeko nolako URIa gordetzen duen erregistroak eta zer protokolo erabili behar den zerbitzu hori eskuratzeko.
- Gordetako URIa azaltzen duen espresio erregular bat. Espresio erregularra hutsa denean, haren ondotik agertuko den DNS izena erabili behar da.

Beñatek bere telefono-zenbakiari bere SIP helbidea besterik lotu nahi ez badio, telefono-zerbitzua ematen dion konpainiak horrelako NAPTR erregistro bat txertatu beharko du zenbaki horri dagokion barrutiko DNS zerbitzarian:

```
IN NAPTR 100 10 "U" "sip+E2U" "!^.*$!sip:beñat@euskosip.eus!"
```

Sailkatzeko zenbakia 100 da, eta lehentasuna, berriz, 10. "U" flagak azaltzen du erregistroak URI bat emango duela, erregistroaren amaieran aurkituko dugun espresio erregularra ebatzita. Zerbitzua deskribatzeko eremuak ("sip+E2U") SIP protokoloa erabiliko dela zehazten du, E.164 zenbakitik eratorritako URIa erabiliz (E2U kodeak *E.164 to URI* bihurketa esan nahi du). Amaieran dagoen espresioaren emaitza sip:beñat@euskosip.eus SIP helbidea da. Ikusi 3.17 irudian nolakoa litzatekeen Ainhoa Beñati egindako deia, ENUM sistema eta NAPTR erregistroa erabiliz.



3.17 irudia. Dei baten urratsak, ENUM sistema eta NAPTR erregistroak erabiliz.

Bestelako zerbitzuak NAPTR erregistroen bidez

Demagun Beñatek hainbat zerbitzu lotu nahi dizkiola bere telefono-zenbaki finkoari, IP telefoniaz gain. Adibidez, demagun ahalbidetu nahi duela edozeinek berari posta elektronikoko bat bidaltzea, bere web-orria bisitatzea, edo bere mugikorrera deitzea bere telefono-zenbakitik abiatuta. Kasu horretan, honelako lau NAPTR erregistro sartu beharko ditu DNS zerbitzarietan:

```
IN NAPTR 100 10 "U" "sip+E2U" "!^.*$!sip:beñat@euskosip.eus!"
IN NAPTR 110 10 "U" "tel+E2U" "!^.*$!tel:+376-3-12345!"
IN NAPTR 120 10 "U" "smtp+E2U" "!^.*$!mailto:beñat.k@posta.eus!"
IN NAPTR 130 10 "U" "http+E2U" "!^.*$!http://beñat.eus!"
```

Aurreneko erregistroa VoIP zerbitzuari dagokio; bigarrena, telefonia mugikorrari; hirugarrena, posta elektronikoa, eta azkena, web-orriari. Pasabideak Beñaten telefono-zenbakiari da-

gozkion NAPTR erregistroak eskatzen dizkionean DNSri, sorta hori jasoko du erantzun gisa. Pasabideak aukeratu behar du zein den egokiena eskatu dioten lana egiteko. Berez, NAPTR erregistroak ez dituzte soilik erabiltzen telefono-sare konbentzionalak eta Internet lotzen dituzten pasabideek; komunikazio pertsonaleko edozein aplikaziok erabil ditzake, eta unean uneko zerbitzua aukeratu norbaitekin komunikatzeko.

Hau da, NAPTR erregistroen erabilera ez dago mugatuta E.164 zenbakiei IP zerbitzuak lotzean. Izan ere, beste identifikadoreak ere har ditzake erabiltzaile batek identifikadore unibertsal gisa, eta, gero, NAPTR erregistroen bidez zerbitzuak lotu identifikadore unibertsal horrekin. Adibidez, Beñatek posible zuen bere posta elektronikorako helbidea aukeratzea bere identifikadore gisa eta, NAPTR erregistroen bidez, helbide horri hainbat IP zerbitzu lotu. SIP telefonian ere oso erabiliak dira NAPTR erregistroak, RFC 3263 agirian deskribatzen den moduan. Kontuan hartu SIP erabil daitekeela UDP, TCP, SCTP edo TLS/TCP gainean, baina SRV erregistro batek emandako zerbitzariaren izenak ez digu azaltzen zein protokolo erabili behar den zerbitzari horrekin hitz egiteko. NAPTR eta SRV erregistroak konbinatuz, aldiz, protokolo-aukera horiek bereiz daitezke. Adibidez, demagun Beñaten VoIP hornitzaileak honako hiru NAPTR erregistro hauek lotzen dizkiola bere `euskosip.eus` domeinuari:

```
IN NAPTR 100 20 "S" "sips+D2T" "" _sips._tcp.euskosip.eus
IN NAPTR 120 20 "S" "sip+D2T" "" _sip._tcp.euskosip.eus
IN NAPTR 140 20 "S" "sip+D2U" "" _sip._udp.euskosip.eus
```

`beñat@euskosip.eus` helbidera dei bat egiteko INVITE agindua jasotzen duen SIP zerbitzariak TCP eta UDP protokoloei eusten badie, NAPTR informazioa eskatuko du `euskosip.eus` domeinuari dagokion SRV erregistroa eskatu baino lehen. Aurreko erregistroak jasota, ikusiko du hiru aukera daudela Beñaten SIP zerbitzariarekin harremanetan jartzeko, hurrenkera honetan: `sips+D2T`, `sip+D2T` edo `sip+D2U`. Lehen TLS/TCP erabiltzea da, bigarrena TCP erabiltzea, eta azkena UDP erabiltzea. Orain arte emandako NAPTR erregistroen adibideetan ez bezala, oraingoan "S" aurkituko dugu flag eremuan. Flag-ek esan nahi du azken eremuan dugun izenari dagokion SRV erregistroa eskatu behar dela. Ohartu "S" flag duten erregistroetan espresio erregularra hutsik dagoela. Gure adibideko zerbitzariak SRV eskaera egingo du `_sip._tcp.euskosip.eus` izenerako. Demagun honako bi SRV erregistro hauek jaso dituela erantzun gisa:

```
IN SRV 0 1 5060 tcp1.euskosip.eus
IN SRV 0 2 5060 tcp2.euskosip.eus
```

Erregistroetan ditugun bi DNS izenek iradokitzen dutenez, bi TCP-zerbitzari daude SIP proxiarena egiteko `euskosip.eus` domeinuan. Batek erantzuten ez badu (1 lehentasuna duen `tcp1.euskosip.eus` zerbitzaria), bigarrenarekin saia gaitzke (2 lehentasuna duen bestea).

ENUM inguruko tirabirak eta kezkak

ENUM erabilerak iraultza ekarri zuen telefoniaren mundu zaharrera, non zerbitzuak eskaintzea, kudeatzea eta, batez ere, kobratzea sarearen jabeari baitzegokion, hau da, telefono-konpainiari. Baina ENUM sistemak betiko telefono-zenbakiak ekarri ditu IP zerbitzuen mundura, non zerbitzuak sareari lotutako gailuen kontua baitira, eta ez sarearena. Hau da, erantzungailu-zerbitzua, deia birbidaltzea edo deiak erregistratzea erabiltzailearen gailuan dugun telefonia-aplikazioak egikaritutako scriptak izan daitezke, eta ez sareak eman eta kobratutako balio erantsiko zerbitzuak. Muturreraino eramanda, telefonia-zerbitzua bera saretik ateratzen da, OTT operadoreen eskuetara joateko. Guztiz bereizita gelditzen dira alde batetik sare-konexiorako zerbitzua, betiko telekomunikazioko operadoreen eskutan gelditzen den zerbitzu bakarra, eta, bestetik, konexio hori erabiliz lor ditzakegun bestelako zerbitzuak, haietako batzuk edozein konpainiari kontratatuta eta beste batzuk guk geuk gure aplikazioetan inplementatuta.

ENUM sisteman erabili behar den TLDk ere eztabaida piztu du. Askok ez dute gustuko `.e164.arpa` domeinua, `.arpa` TLD lotuta dagoelako Amerikako Estatu Batuekin, eta egokiago jotzen dute `.e164.int` erabiltzea. Edozein izanda ere, TLDren kudeaketaren inguruan ere badaude desadostasunak. Aukera bat betiko telefono-operadoreen eskuetan uztea da, azken finean operadore horiek kudeatzen baitituzte E.164 zenbakiak estatu bakoitzean. Baina Internet-hornitzaileen lantzat (ISPen lana, alegia) ere har daiteke, NAPTR erregistroetan deskribatutako zerbitzuak Internet bidez jasotako zerbitzuak baitira, azken finean. Izan ere, soilik telefono-operadoreek balute domeinu horien kontrola, zer egin behar luke ISP batek, baldin eta telefono-zerbitzurik ez baina horri lotutako beste hainbat ENUM zerbitzu eskaini nahi balitu? Bere zerbitzuak eskaini nahi dituen estatu bakoitzeko telefono-operadoreekin (agian bere lehiakide komertzialak direnak) negoziatu beharko al du dagokion `.e164.arpa` azpidomeinuan berarekin lotura egiten duten NAPTR erregistroak txertatzea?

E.164 zenbakiei dagokienez, ENUMetik eratorritako zenbakien egitura bera ere kolokan jarri dute batzuek. Andorrako edozein telefonorekin kontaktatzeko +376 nazioarteko aurrezenbakia erabiltzen denez, `.6.7.3.e164.arpa` domeinu bakarra egongo dela ondorioztatuko dugu. Baina domeinu bakar bat egoteak domeinu horretarako kudeatzaile bakarra dakar, eta kudeatzaile bakarra izateak monopolio-jardura dakar. Horregatik aldarrikatzen da DNS domeinu bat baino gehiago erabiltzea egungo E.164 estatu-kode bakoitzeko. Horren kontrakoek argumentatzen dute hainbat ENUM izenen hierarkia paraleloak egoteak deskoordinazioa eta kaosa besterik ez lukeela ekarriko, ENUM bidezko zerbitzuen garapenaren kalterako.

Anabasa horretan, hainbat ENUM aldaera agertu dira; adibidez `.e164.arpa` domeinua-ren alternatiba den `.e164.org` ENUM zerbitzua. DNS pribatuak erabiltzen diren era berean, ENUM zerbitzu pribatuak ere abiatu dituzte zenbait ISPk, IP telefoniarako hornitzaileek edota sare-operadoreek, beren bezeroen informazioa eta zerbitzuak kudeatzeko asmoz. Haietako batzuk elkartu egiten dira beren bezeroei buruzko informazioa partekatzeko eta, horrela, ITSPen arteko deiak era eraginkorragoan egiteko (**VoIP peering**).

Teknologia guztiek bezala, ENUMek ere badu zaindu beharreko alde ilun bat. Ikusi dugunez, egun hain erabiliak diren telefono-zenbakietatik abiatuta eta ENUM erabiliz, edonorekin komunikatzeko bide guztiak identifika daitezke: nola hitz egin pertsona batekin IP telefonia-zerbitzua erabiliz, zein diren pertsona horren beste telefono-zenbaki alternatiboak, nola bidali uneko mezu labur bat edo posta elektronikoko mezu bat, eta baita zein den ere haren web-orri pertsonala edo harekin lotutako beste edozein zerbitzu. Oso egoera eroso agertzen zaigu begien aurrean: akabo txartel pertsonalak betetzea telefono finko eta mugikorrekin, gehi posta elektronikoko helbidea, web-orri pertsonalaren helbidea eta beste edozein helbide eta identifikadore. Nahikoa da horietako bakarra hartzea gure lokalizadore unibertsala izateko, eta, hortik abiatuta, interesatuak aukeratu dezala bidea gureganaino heltzeko. Zenbaki arabiarrek munduko edozein hizkuntzatan erabiltzen direnez, karaktere berezirik gabe herri bakoitzean, hautagai bikaina da E.164 numerazioa identifikadore unibertsal hori izateko. Baina erraztasun hori erabilera txarrerako ere bada. ENUM norberaren pribatutasunarekiko mehatxutzat har daiteke, beste urrats bat gizabanakoaren arrastoari segitzeko Interneten, nortasun digitalaren alde guztiak zenbaki bakar batekin uztartuta. Edo, hain urruti joan gabe, gu itotzeko bidea errazten die spam-eragileei.

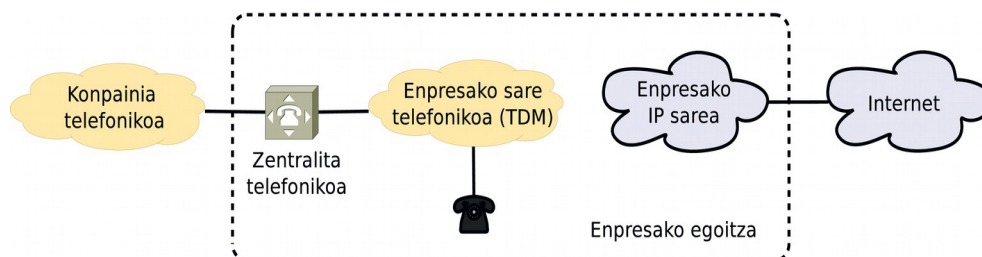
5. IP telefonia enpresetan

TDM telefonia klasikoan, linea bat ezartzen da enpresako telefonogunea eta telefono-konpainia-ren telefonogunerik gertuena lotuz. Linea horri **trunk** izena ematen zaio, enpresako telefono-linea sorta biltzen delako TDM teknologiaren bat erabiliz, tipikoki ISDN edo E1/T1⁹ (garai bateko tele-

⁹ T1 aukera AEBn erabiltzen da; Europan, E1.

fono-sare analogikoetan, *trunk* izena eman zieten bakarkako hainbat linea fisikok elkartzen zituzten kableei). Enpresako telefonogune horren zeregina eta izaera aldatu egin da urteetan, eta, egun, IP telefonogune bilakatzen ari da. Hasierako enpresako telefonoguneen zeregin nagusia zen telefono-linea batzuk zenbait terminalen artean (telefonoak, fax-makinak, txartel bidezko salmentarako gailuak) partekatu ahal izatea. Hau da, haren lana zen baliabide eskas eta garesti bat —telefono-linea— partekatu ahal izatea. Enpresako telefono bakoitzeko linea bat kontratatu ordez, estatistikoki nahikoa zen linea kopuru txiki bat kontratatzen zen, eta askoz handiagoa zen terminal kopuru batek erabiltzen zituen linea horiek telefonogunearen bidez. Halako TDM telefonoguneak izendatzeko, PBX terminoa erabiltzen da ingelesez (*Private Branch eXchange*). Kanpoko lineak partekatzeaz gain, enpresa barruko komunikazioa bideratzen dute (oraindik badaude eta), hau da, barruko telefonoen arteko komunikazio zuzena, telefono-konpainien saretik igaro gabe, eta ordaindu gabe.

Hasiera batean (eta, oraindik, enpresa batzuetan), *telefonista* esaten genion langile batek jasotzen zituen kanpotik heltzen ziren deiak, eta behar zen telefonoarekin (luzapenarekin) konektatzen zituen. Egun, gehienetan, lan hori automatizatu egin da telefonoguneen bidez. Gainera, telefoniaren digitalizazioarekin batera, telefonoguneak zeregin gehiago bereganatu ditu. Baina, IP telefonia agertu bitartean, horretarako erabilitako azpiegitura mantendu egin da, hau da, telefonogune klasiko hori gehi berarekin enpresako telefonoak fisikoki lotzeko behar den kable-sarea. Berez, IP telefoniarako migrazioa egin ez denean, bi kableatu-sistema zabaldu eta mantendu behar dira enpresa batean: sare informatikoarena, alde batetik, eta TDM telefoniarako beharrezkoa dena, bestetik (ikus 3.18 irudia). Kable desberdinak izanda ere, normalean azpiegitura fisiko gehienak, kanalizazioak eta armairuak, partekatzen dituzte. Orain, komunikazioen arloan enpresek duten erronka IP telefoniara igarotzea da. TDM telefonoguneen garaia telefonia bidezko komunikazioen garaia zen, baina, egun, enpresako komunikazioak betiko telefonia baino askoz gehiago dira: posta elektronikoa, uneko mezularitza, bideokonferentzia, mahaigainekoa partekatzea, SMSak eta telefonia mugikorraren beste aplikazioak... **Komunikazio bateratuak** (*Unified Communications*) da zerbitzu horiek guztiak bildu nahi dituen terminoa, betiko telefonia ordezkatuz.



3.18 irudia. Bi sareak enpresetan: telefoniarako sare eta IP sare.

Enpresaren IP telefoniarako aldaketa egiteko arrazoiak honako hauek izaten dira:

- Kostua. Enpresa barruko komunikazioetan telefonia konbentzionalari eustek bi sare sortu eta mantendu behar izatea dakar, bata telefoniarako eta bestea informatikarako. IP telefonia erabilita, telefono bidezko komunikazio-zerbitzua sare informatikoaren bidez gertatzen da, eta TDM telefono-sarearen beharra eta kostua desagertu egiten dira. Telefonia konbentzionalerako behar den inbertsioak eginda badaude ere (hau da, enpresak dagoeneko bere TDM telefono-sarea baldin badu ere), askotan, merezi du sare hori ordezkatzea IP teknologiarekin, merkeagoa baita ustiatzeko eta, ondorioz, epe labur batean amortiza baitaiteke IP telefonia ezartzeko egindako inbertsio berria.
- Barruko komunikazioen kudeaketa errazagoa da IP teknologia erabiliz, telefonia konbentzionalerako telefonogune baten bidez baino. IP erabiliz, telefonia datu-sareko beste zerbitzu bat izatera igarotzen da, eta informatikari batek kudea dezake.

— Gainera, IP telefoniak beste zerbitzu berri batzuk ere eman ditzake betiko telefoniarekin eman daitezkeen zerbitzuez gain (erantzungailua, deiak birbidaltzea, eta abar).

IP telefonoak datu-sarean

IP telefonoak datu-sarean konektatzeak zenbait aldaketa dakartza. Alde fisikoari dagokionez, telefono bakoitzaren ondoan argindarrerako entxufe bat eta datu-sarerako hartune bat beharko dira. Argindarrerako beste entxufe baten beharra ekiditeko, PoE (*Power over Ethernet*) ahalmena duten konmutagailuak erabiltzen dira IP telefonoak sarean konektatzeko, datuez gain argindarra ere Ethernet konexiotik helarazteko telefonoari. Datu-sarerako beste hartune baten beharra ere ezabatu daiteke erabilitako IP telefonoak aukera ematen badu hartune bat partekatzeko eta, ohi den bezala, telefonoaren ondoan sareari lotuta dagoen konputagailu bat badugu. Kasu horretan, konputagailua lotuko dugu telefonoarekin, eta telefona lotuko dugu sarerako hartune bakarrarekin, konputagailuak libratu duenarekin, alegia.

Beste alde batetik, IP telefonoak VLAN batean elkartzen dira, VoIP trafikoa bereizteko. Horrela eginda, kudeaketa errazten da, eta tratamendu berezia eman dakioke telefonoen arteko trafikoiari, denbora errealeko trafikoa baita. Adibidez, lehentasuna eman dakioke trafiko horri bideratzaileen ilaretan, ahotsaren kalitaterako hain kaltegarria den atzerapen-aldakortasuna minimizatzearen.

5.1. Migrazioako aukerak

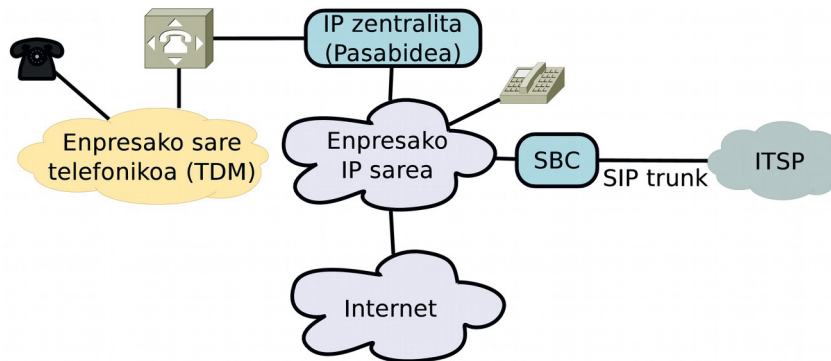
IP telefoniarako jauzia egiteko, badago era bat baino gehiago. Enpresa bakoitzak erabaki beharko du nola egin behar duen ibilbide hori, bere beharren eta baldintzen arabera. Ondoren azaltzen dira IP telefonian murgiltzeko enpresek dituzten aukerak.

Barruan TDM eta IP, kanpoan IP

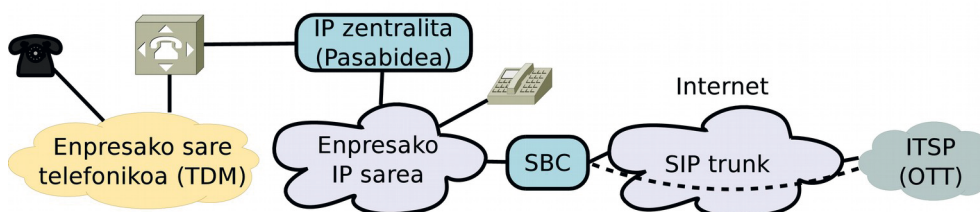
Barruko komunikazioetarako dagoeneko TDM telefonia sare klasiko bat duten enpresei, askotan, kostatu egiten zaie sare hori baztertzea eta IP komunikazioetan % 100 murgiltzea, TDM sare telefonikoan egindako inbertsioa amortizatutzat eman arte behintzat. Horrelako kasuetan, ohikoa da IP telefoniarako migrazioa epeka egitea; orduan, lehenengo urratsa izan daiteke barruko komunikazioetarako telefonia klasikoari eustea, baina kanpoko komunikazioetan IPra igarotzea. Kasu horretan, kanpoko komunikazioak merkatzea lehenesten da, bai eta IP testuingurura pasatzeak eskatzen dituen inbertsio gehienak atzeratzea ere; zehazki, enpresako telefono-terminal guztiak aldatu behar izatea (edo egokigailuak erosi behar izatea), sare lokala birkonfiguratzea telefonia-trafikoa kontuan hartuta (VLAN berriak, PoE konmutagailuak...), eta langileak egoera berrirako prestatzea. Nolanahi ere, enpresako TDM telefonia-sareari eutsi behar zaio sare informatikoaren ondoan, eta, azken horretan, IP telefonogune bat ezarri behar da. Telefonogune horren lana izango da pasabidearena egitea TDM eta IP munduen artean. Behin IP telefonogunea edukita enpresako sarean, erraza da IP telefonoak eta zerbitzuak ezartzen hastea. Horregatik, enpresa handietan behintzat, aukera dago egoera misto batean ibiltzeko aldi baterako, sail batzuetan TDM telefoniari eutsita eta beste batzuetan, aldiz, IP telefoniari eutsita. Egoera hori agertzen da 3.19 irudian.

Kanpoko komunikazioak IP eran egiteko, bi aukera dituzte enpresek: edo betiko telefono-lineak ordezkatu **SIP trunk** batekin, edo Internet konexioa erabili OTT erako hornitzaile batekin lotzeko. Lehenengo kasuan, Interneterako konexioaz gain, telefoniarako beste konexio bat ere behar da. Zerbitzu guztiak Interneterako konexioaren bidez gauzatzea baino garestiagoa da; baina bermatuak ditugu, ordea, kontratatutako banda-zabalera eta, batez ere, atzerapenaren aldakortasunik eza. Bi aukerak agertzen dira 3.19 irudian. SIP trunk bat linea birtual bat da, betiko TDM linea multzo baten

baliokidea IP munduan, hau da, gure konexioa telefono-konpainiarekin. Komunikazio guztiak Internet bidez egiten direnean, SIP trunk hori gure sarearen eta ITSPren arteko VPN batek gauzatzen du (*Virtual Private Network*), komunikazioen konfidentzialtasuna bermatzearen. Enpresa ertain eta txikietan, zein etxeetan, nahikoa izaten da Internet konexioa erabiltzea IP telefoniarako, beste ezer kontratatu gabe. Joera hori zabaltzen ari da hain txikiak ez diren enpresetan, Internet konexioen kalitateak gora eta prezioek behera egiten duten heinean.



(a) Telefoniarako konexio berezita kontratatuta



(b) Kanpoko telefonia OTT bidez

3.19 irudia. Barrurako, TDM eta IP telefonia; kanporako, IP telefonia.

Pasabide-lanez gain, SBC lana ere egin dezake IP telefonoguneak (*Session Border Controller*), nahiz eta irudian bi zereginak berezita agertu. SBC izenekoa enpresako IP sarearen eta ITSPren arteko muga kokatzen den bitartekaria da, bideratzaile berezi baten eran. SBC terminoaren esanahia ez dago garbi definituta, ez baitago estandarizatuta zein den bere zeregina. RFC 5853 agirian deskribatzen da zein diren SBC baten lanak bi SIP eremuen arteko lotura egiten denean, baina terminoaren erabilera ez da horretara mugatzen. Gehienetan, SBC batek honako lan hauek egiten ditu:

- Segurtasuna: sarbidearen kontrola, VPN muturra komunikazioak zifratzeko, DoS erasoen kontrako babesa, eta abar.
- Sareen arteko pasabidearena, protokoloen arteko bihurketa eginez.
- Trafikoaren monitorizazioa eta lehenetsunak ezartzea (QoS).

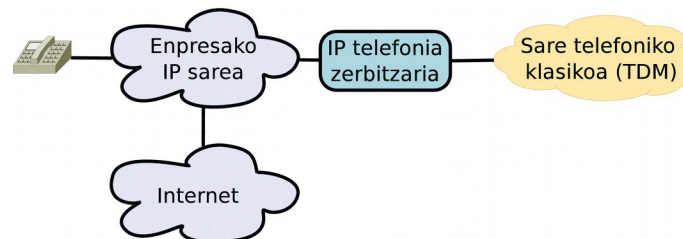
Kokapenari dagokionez, askotan, SBCak bi sareetan instalatu behar dira, enpresaren sarean eta ITSPren sarean. Enpresaren aldean dagoenari E-SBC izena ematen zaio (*Enterprise SBC*). Enpresa txikietan eta etxeetan SBC bakarra egoten da, ITSPren aldean.

Barruan IP, kanpoan TDM

Aurreko aukeraren kontrakoa da. Normalean, enpresak kanpoko komunikazioak IP bidez egiteko aukerarik ez duenean agertzen da, operadoreek ez baitute egiten SIP trunk bat kontratatzeko

eskaintzarik enpresa kokatuta dagoen tokian, eta Interneterako loturak ez baitu ematen behar den kalitate minimoa zerbitzua OTT bidez kontratatu ahal izateko.

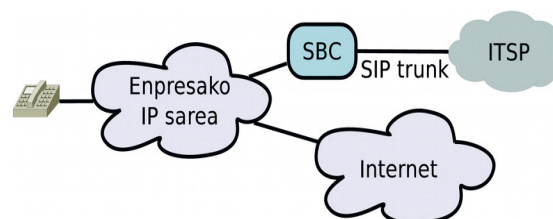
Kasu horretan, enpresako egoitzetan ez dago telefoniarako sarerik: zerbitzu hori sare informatikoak berak ematen du. Hala ere, pasabide bat beharko da telefono-sare klasikoarekin komunikatu ahal izateko. Hori izango da, beraz, IP telefonogunearen lan nagusietako bat. Telefonoguneak bi konexio izango ditu: alde batetik, enpresako IP sarearekin, eta, beste alde batetik, TDM telefonia-operadorearekin. Enpresako telefono guztiak IP erakoak izan behar dute. 3.20 irudian agertzen zaizkigu osagarri horiek guztiak.



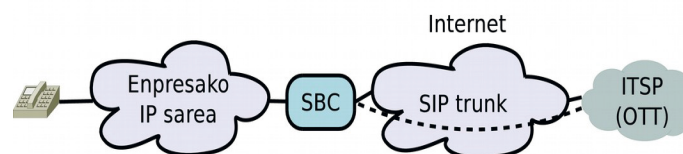
3.20 irudia. Barrurako IP telefonia; kanporako TDM telefonia.

Telefonia guztia kanporatuta

Zerbitzua kanporatzea, boladan dagoen terminologia erabilia, zera da: IP telefonia-zerbitzua lainoan kontratatzea. Horretarako, antzeko hainbat termino erabiltzen dira ingelesez. Agian ezagunenak *Cloud Telephony* edo *Hosted Telephony* dira. Zabalagoa da *UCaaS* terminoa (*Unified Communications as a Service*), telefoniaz gain beste komunikazio-zerbitzu batzuk ere barneratzen baititu. Urrats hori egiten bada, gure sareko IP telefonogunerik ere ez dugu beharko, gure ITSPk hartuko baitu telefonogunearen lana. Izan ere, 3.21 irudia 3.19 irudi bera da, baina barruko TDM sarea eta IP telefonogunea kenduta. ITSP gure ISP bera izan daiteke, soilik telefonia-zerbitzua ematen digun beste hornitzaile bat, edo OTT bat, hau da, bere zerbitzuak Internet irekian eskaintzen dituena.



(a) Telefoniarako konexio berezitatea kontratatuta



(b) Kanpoko telefonia OTT bidez

3.21 irudia. IP telefonia kanporatuta.

Aukera hori bereziki erakargarria da enpresa txikientzat, ez baita inongo inbertsiorik egin behar, IP telefonoak ezartzea izan ezik (eta hori ere ez da guztiz beharrezkoa, software bidezko telefonoak erabiltzen badira). Enpresa handietan, lehenengo aukeraren bilakaera naturala izan dai-

teke: hasi barruko bi sistemekin (TDM eta IP telefonia), pixkanaka TDM sarea eta telefonoak guttiz baztertu arte, eta, azkenean, IP telefonogunea ere kendu. Hala ere, enpresa handietan, joera handia dago oraindik zerbitzuak zuzenean kudeatzeko.

Laburpena

IP telefoniak iraultza ekarri du telekomunikazio-mundu zaharrera. Telefonoaz hitz egitea konpainia batekin lotutako zerbitzu bat izatetik beste Internet-aplikazio bat izatera igaro da. Urteetan hain errentagarria izan den zerbitzuak eskuetatik ez alde egiteko, betiko telefono-konpainiek ere IPra jo dute, OTT ereduari aurre egiteko azken saioan. Hala ere, Internet hornitzea eta konexio horretatik zerbitzuak jasotzea gero eta banatuago dauden kontuak dira.

Egoera honetara heltzeko, IPren *best effort* izaerak denbora errealeko komunikazioetarako dakartzan oztopoak gainditu behar izan dira. Arazorik handiena atzerapenaren aldakortasuna da, telefonian oso aurrekarga (*buffering*) gutxi egin baitaiteke aldakortasun hori ezabatzeko. Horrek ahotsa garraiatzeko RTP/UDP erabiltzera behartzen du kasu gehienetan, eta ez TCP gaineko aukerak. Hala eta guztiz ere, Interneteko azpiegituretan egindako hobekuntzak nabarmen gutxitu dute kongestioen mamua, eta, horrekin batera, erreproduzio-unea baino beranduago heltzen diren datagramen kopurua. Horrez gain, uhinen bidezko komunikazioak transmisioetan eragindako galerak handitu dituzte. Baina galerak berreskuratzeko teknikak erabiliz, lortzen ari dira galera-tasa horri onargarria den atalase baten azpitik eustea.

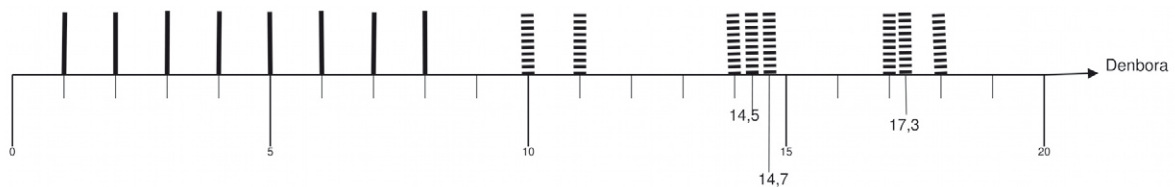
Komunikazioaren kontrolean, SIP protokoloa nagusitu da lehiakideen artean. SIP zerbitzarien lan nagusia deitutakoa aurkitzea da. Horretarako, posta elektronikoaren antzeko funtzionamendua du: deitutakoaren identifikadoretik haren SIP zerbitzariaren berri jaso, eta, hortik tiraka, deitutakoarekin harremanetan jarri.

Internet bidezko telefoniak bi arazo izan ditu nagusiki: NATen eta su-hesien oztopoa, eta betiko telefono-sarearekiko komunikazioa. NATen eta su-hesien atzean dauden erabiltzaileak ikusezin bilakatzen dira Interneten, eta, ondorioz, ezin da haiekin telefono-saio bat hasi kanpotik abiatuta, SIPEk eta beste protokoloek egiten duten moduan. Txarrantxa horiek gainditzeko, ICE zerbitzariak behar dira. Internet bidezko telefonoaren bigarren arazoari dagokionez, kontuan hartu behar da betiko TDM telefono-sarea garrantzia galtzen ari bada ere, erabiltzaile asko berari lotuta daudela oraindik, eta, ondorioz, ezinbestekoa da IP telefoniako erabiltzaileek beste erabiltzaile klasiko horiekin nolabait komunikatu ahal izatea. Horretarako, pasabideak behar dira Interneten eta betiko telefono-konpainien artean. Baina ez pasabide horiek bakarrik: IP telefoniarako erabiltzaileen identifikadoreen —URIak— eta telefono-sistema zaharraren E.164 zenbakien arteko igarobidea ere behar da. Zubi-lan hori egiteko aukerarik erabilienak ENUM itzulpena eta NAPTR erregistroak dira. ENUMek DNS mundura ekartzen ditu E.164 zenbakiak, eta NAPTR erregistroek zerbitzuak lotzen dizkiote ENUMetik eratorritako izenari. Horrek zabaltzen dituen aukera guztiak ikusteke ditugu oraindik.

IP telefoniaren bidea abiatuta dago enpresa askotan. Zertarako eutsi bi sare paralelori enpresen egoitzetan —bata TDM telefoniarako bakarrik, teknologia, ekipo eta kable propioarekin, eta bestea IP zerbitzuetarako—, posible baldin bada telefonia ere beste IP zerbitzuekin batera integratzea enpresako sare informatikoan? Horrek IP telefoniarako zerbitzariak (edo IP telefonoguneak) enpresako IP sareetan ezartzea ekarri du. Enpresako kanpoko komunikazioak ere IP telefoniaren bidez egiten dira gero eta gehiago. Horretarako, lehenengo aukera izan da betiko konpainiekin *SIP trunk* erako loturak ezartzea, lehen ISDN lineak edo *trunk* bat zeuden lekuan. Baina OTT aukerak zabaltzen ari diren heinean, betiko konpainien atzarretatik alde egiteko tentazioak ere gero eta handiagoak dira enpresentzat. Eta, lainoaren indarrak eraginda, kontua ez da bakarrik kanpoko komunikazioak Interneteko edozein konpainiarekin kontratatzea: barruko komunikazioen kudeaketa ere kanporatu dezakete.

3. kapituluko ariketak: IP telefonia

- 1) Demagun IP ahots-telefoniako multikonferentzia bat, unicast moduan eginda, non deia abiatu duen erabiltzaileak zentralizatzen duen komunikazioa. N partaide badago, non $N > 2$, eta erabilitako kodeketak r b/s kontsumitzen badu, erantzun honako hauek:
 - (a) Zenbat b/s igortzen ditu deia abiatu duenak?
 - (b) Zenbat b/s igortzen ditu bestelako partaide bakoitzak?
 - (c) Zenbat b/s sartzen dituzte denen artean sarean?
- 2) Demagun multibideokonferentzia bat, unicast moduan, N partaide dituen, non $N > 2$. Erabilitako kodeketak r b/s kontsumitzen badu, eta zerbitzaririk ez badago (hau da, partaide bakoitzak bere seinalearen kopia igorri behar die beste partaide guztiei), erantzun honako hauek:
 - (a) Zenbat b/s igortzen ditu partaide bakoitzak? Demagun $N = 5$ eta $r = 300$ kb/s.
 - (b) Zenbat b/s sartzen dituzte denen artean sarean?
- 3) Demagun zerbitzari baten bidezko bideokonferentzia bat, unicast moduan, N partaide dituen, non $N > 2$. Erabilitako kodeketak r b/s kontsumitzen badu, eta zerbitzari baten bidez egiten bada, erantzun honako hauek:
 - (a) Zenbat b/s igortzen ditu partaide bakoitzak?
 - (b) Zenbat b/s igortzen ditu zerbitzariak?
 - (c) Zenbat b/s sartzen dituzte denen artean sarean?
- 4) Ikusi honako denbora-grafiko hau. Hasierako 8 marra (jarraituak) telefonia G.711/PCM sistema batean bidalitako 8 UDP datagramak dira, eta beste 8ek (marra etenak eta lodiagoak) datagrama horiek noiz jaso diren azaltzen dute.



Demagun atera ziren ordena berean heldu direla datagramak.

- (a) Jakinda marren lodierak datagrama bidaltzeko edo hartzeko denbora adierazten duela, nork du sare-konexio azkarragoa, igorleak ala hartzaileak?
 - (b) Igorritako datagrama bakoitzean soinua daramaten 1.280 bit daudela jakinda, zenbatekoa da, segundotan, grafikoko bi uneren arteko iraupena? Zenbat segundoko soinua bidaltzen ari da datagrama guztiak hartuta?
 - (c) Zein da igorritako datagrama bakoitzak izandako sare-atzerapena? Zenbatekoa izan da batez besteko atzerapenaren aldakortasuna?
 - (d) Demagun hartzailea lehenengo datagrama jaso bezain pronto hasiko dela ahotsa erreproduzitzen, inongo atzerapenik ezarri gabe. Zenbat soinu erreproduzitu du?
 - (e) Demagun hartzailea lehenengo datagrama jaso eta 20 ms geroago hasiko dela ahotsa erreproduzitzen. Zenbat soinu erreproduzitu du?
 - (f) Zein da hartzaileak aplikatu behar duen atzerapen minimoa inongo galerarik ez izateko?
- 5) TDM telefono-sare klasikoan aspaldi erabiltzen da digitalizazioa. Baina sare horretan ez da erabiltzen dejitterizazio-bufferra. Zergatik?

6) Demagun VoIP elkarrizketa bat, PC baten eta telefono baten artekoa, biak sare lokal batera lotuta. PCa Ethernet bidez dago lotuta, eta telefonoa wifi bidez. Demagun wifian dugun bit-errore tasa 10^{-5} dela, eta, aldiz, kablean, 10^{-9} . Erabilitako kodeketa G.711/PCM da.

(a) Kalkulatu, batez beste, segundotan zenbat soinu galduko den transmisio-erroreengatik PCak erabiltzen duen kablean, 5 minutuko elkarrizketa batean.

(b) Egin kalkulu bera wifi-loturarako.

Kontuan hartu:

- Laginak 20 ms-tik behin bidaltzen dira UDP datagrama batean, RTP erabiliz.
- Ethernet goiburukoak 18 byte ditu, eta erabilitako wifia renak (802.11 trama) 34 byte.
- RTP goiburukoa 12 bytekoa da; IPrena, 20 bytekoa, eta UDPrena, 8 bytekoa.

7) Errepikatu aurreko ariketa, baina orain G.729 kodeketa erabiliz, datagramak 10 ms-tik behin bidaliz, eta bakoitzak 10 byte ahots edaramatzala kodetuta. Eraitza ikusita, trinkoketak dakarren banda-zabalera aurrezteaz gain, zer beste onura dakar?

8) Demagun IP telefonia-sistema bat dugula, RTP erabiltzen duena. Digitalizazioa G.711/PCM erabiliz egiten da (8 kHz-eko laginketa, 8 bit lagineko), eta laginak datagrama batean elkartzen eta bidaltzen dira 20 ms-tik behin, UDP segmentu batean. Erroreak zuzentzeko, bigarren kanal bat erabiltzen da. Erroretarako kanal horretan, 3 bit erabiltzen dira laginak kodetzeko. Erantzun honako bi galdera hauek:

(a) Zer tamainakoa izango da bidalitako datagramen datu-eremua? Kontuan hartu aplikazio-eta garraio-protokoloen goiburukoak (RTP = 12 byte, UDP = 8 byte).

(b) Zein izango da hartzaileak utzi behar duen erreproduzitze-atzerapen minimoa, milisegundotan?

(c) Demagun aplikazioak, berez, 80 ms-ko atzerapena ezartzen duela ahotsa erreproduzitzean, atzerapenaren aldakortasuna zuzentzeko bufferra erabiliz. Zenbat kanal erabil daitezke erroreak zuzentzeko, erreproduzitzeko atzerapena handitu gabe?

9) IP telefonian, galerak berreskuratzeko bi FEC teknika ikasi ditugu: paritate-datagrama erabiltzen duena eta kanal estrak gehitzea. Demagun bi teknika horien erabilpena ebaluatu nahi dugula, eta:

— Digitalizazioa G.711/PCM jarraituz egiten dela (8 Khz-eko laginketa, 8 bit lagineko), eta laginak datagrama batean elkartzen eta bidaltzen direla 20 ms-ro.

— Lehenengo teknikan (paritate-datagramarena) jatorrizko 4 datagramako paritate-datagrama bat sortu eta bidaltzen dela.

— Kanal estrako teknikan kanal bakarra gehituko dela.

Orduan:

(a) Zenbateko erreproduzitze-atzerapena sortuko du teknika bakoitzak?

(b) Nolako portaera izango dute 5 datagramako talde bakoitzean, lehena galtzen bada?

(c) Eta bi datagrametako lehenengoa galtzen bada?

10) Demagun IP bidezko telefono-dei bat, NATen atzean dauden bi erabiltzaileen artean. NAT gaintzeko *relay* bat erabiltzen da. Idatz ezazu zein diren bidea egingo duten honako datagrama hauen jatorrizko eta helburuko IP helbideak eta portuak:

— Igorlearen eta haren NAT zerbitzariaren artean dabilen datagrama.

— Igorlearen NAT zerbitzariaren eta *relay*ren artean dabilen datagrama.

— *Relay*ren eta hartzailearen NAT zerbitzariaren artean dabilen datagrama.

— Hartzailearen eta haren NAT zerbitzariaren artean dabilen datagrama.

Helbideak eta portuak azaltzeko, erabili notazio hau:

- @I = igorlearen IP helbidea.
- @H = hartzailearen IP helbidea.
- @NAT-I = igorlearen NAT zerbitzariaren IP helbidea.
- @NAT-H = hartzailearen NAT zerbitzariaren IP helbidea.
- @R = *Relay*ren helbidea
- pI: igorleak erabilitako portua.
- pH: hartzaileak erabilitako portua.
- pNAT-I: igorlearen NAT zerbitzariak igorleari esleitutako portua.
- pNAT-H: hartzailearen NAT zerbitzariak hartzaileari esleitutako portua.
- pRI: *Relay*k igorleari irekitako portua.
- pRH: *Relay*k hartzaileari irekitako portua.

11) Demagun *relay* bidezko telefonia-sistema bat dugula, TURN erako protokoloa erabiltzen duena NAT zerbitzariak eta su-hesiak gainditzeko. Baina demagun komunikazioko bi aldean proxiak (edo superkideak) beste aldeari bidaltzen diotela beren NAT zerbitzariak esleitutako portua. Hau da, igorlearen proxiak igorlearen NAT zerbitzariaren IP helbidea eta igorleari esleitutako portua bidaltzen dizkio hartzaileari, eta hartzailearen proxi/registerrak (edo superkideak), hartzailearen NAT zerbitzariaren helbidearekin batera, zerbitzari horrek hartzaileari esleitutako portua helarazten dio igorleari.

(a) Deskribatu bi aldean arteko datagrama baten ibilbidea.

(b) Idatzi ibilbide horretan erabilitako jatorrizko eta helburuko (IP helbidea: portua) bikoteak.

12) Egin ezazu eskema bat SIP deia ezartzeko urratsak adieraziz, baina deitzailea eta deitutakoa NAT zerbitzari baten atzean kokatuta daudela, eta ICE/TURN zerbitzari bat erabiltzen dutela telefono-saioak ezarri ahal izateko. Zertan aldatzen da eskema NAT zerbitzari baten atzean egon ordez su-hesi baten atzean badaude, eta biek erabiltzen dituzten su-hesiek iragazten badi-tuzte zerbitzarietara ez doazen saio-eskaerak?

13) Lotu akronimo eta termino hauek dagokien kontzeptuarekin:

- | | | |
|----------------------------|---------------------|-------------------|
| — <i>Signaling gateway</i> | — Error concealment | — Overlay network |
| — SIP | — Media gateway | — Megaco |
| — ICE | — RTP | — RTCP |
| — Opus | — IAX2 | — VoIP Relay |
| — SIP erregistratzailea | — ITSP | — Interleaving |
| — H.323 | — E.164 | — WebRTC |
| — NAPTR | — SIGTRAN | — ENUM |
| — FEC | — TURN | — SBC |
| — SIP proxia | — #SS7 | — Pasabidea |
| — H.248 | — SILK | |

1. NAT edo su-hesi baten atzean dagoen makina batean konexioak hartzea relay bidez ahalbidetzeko teknika.
2. Telefonian, deia kontrolatzeko erabiltzen den protokoloetako bat, Interneten testuinguruan sortua (IETFk estandarizatua, RFC bidez).
3. Sarean jazotako galerak berreskuratzeko teknika sorta.
4. RTPrekin batera erabilitako kontrol-protokoloa.
5. Pakete-kommutazioko sareetan telefonia-zerbitzuak eskaintzeko protokolo multzoa, ITUk estandarizatua.

6. TCP/IP sareetan soinua eta bideoa denbora errealean bidaltzeko formatu estandarra.
7. Betiko telefono-zenbakiak eta Internet-identifikadoreak lotzeko sistema.
8. Skypen erabilitako ahotserako kodetzailea.
9. Soinu-kodetzailea, partzialki SILKen oinarritua, libreza eta egokia IP telefoniarako.
10. Transmisio-erroreak eragindako kaltea leuntzeko teknika, non galeraren eragina denboran zehar banatzen baita.
11. Transmisio-erroreak eragindako kaltea leuntzeko teknika sorta.
12. Deitzaileak egindako eskaerak jaso eta bideratzen dituen, SIP telefonia sistema batean.
13. IP telefonia-sistema batean, Internet eta betiko sare telefonikoen arteko zubiarena egiten duen ekipoa.
14. SIP telefonia sistema batean, bere sareko erabiltzaileekin kontaktatzeko informazioa gordetzen duena.
15. Betiko telefono-sarean erabilitako seinalizazio-protokoloa.
16. ITUk egindako gomendioa, non betiko telefono-zenbakien antolaketa arautzen den.
17. Izen bati zerbitzu desberdinak lotzeko DNS erregistro mota.
18. P2P sare batean partaideen bilaketa egiteko sarea. Euskaraz, bilaketarako sarea.
19. NAT eta su-hesiak zeharkatzeko erabilitako zerbitzaria.
20. Asterisk zerbitzarietan erabilitako IP telefoniarako protokoloa.
21. Pasabide batean, kontrol-protokoloaren bihurketa egiten duen zati funtzionala. Euskaraz, kontrol-pasabidea.
22. Pasabide batean, seinalearen bihurketa (ahotsa, bideoa) egiten duen zati funtzionala. Euskaraz, seinale-pasabidea.
23. SS7 protokoloen egokitzapena, IP sareetan erabilgarria.
24. Pasabidearen kontroladorearen eta seinale-pasabidearen arteko komunikazioetarako protokoloa.
25. IP telefonia ematen duen hornitzailea izendatzeko akronimoa.
26. Gehienetan, SIP trunk baten kontrola betetzen duen bideratzailea.
27. RTC aplikazioak garatzeko javascript API bat, nabigatzaileetan inplementatuta dagoena.
28. Komunikazioak NAT zerbitzariak zeharkatzeko protokoloa, TURN eta STUN teknikak erabiltzen dituenak.

Multimediarako sare-teknologiak

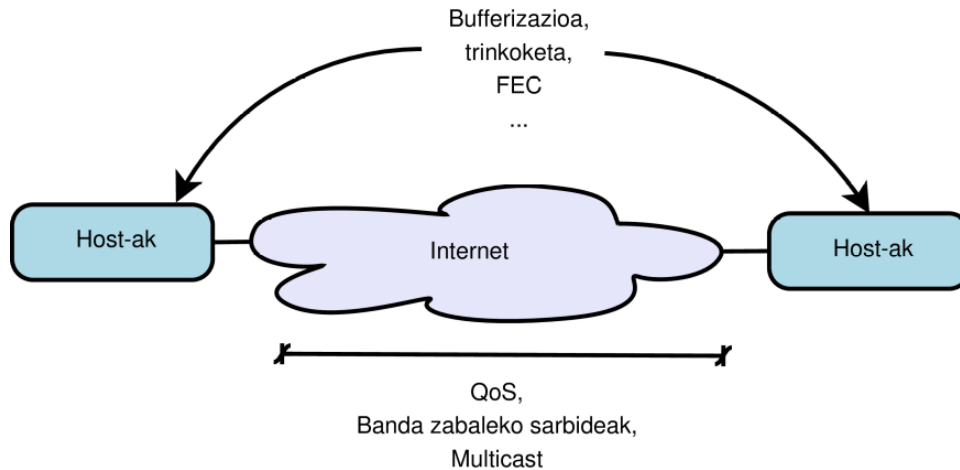
Kapitulu hau ikasi eta gero, irakurleak ondo ezagutuko ditu gai hauek:

- Multicast-teknologiaren oinarriak: helbideak eta protokoloak.
 - Zerbitzuaren kalitatea (QoS).
 - *Traffic Management* eta haren teknika nagusiak.
 - Trafiko-ingeniaritza eta MPLS/RSPVTE bikotea.
 - Banda zabaleko aukerak Interneterako sarbidean.
-

Aurreko kapituluetan ikasi dugu zer egiten duten multimedia-aplikazioek IP sareetan topatzen dituzten oztopoak gainditzeko: nola trinkotzen dituzten kodetutako ahotsa eta irudiak banda-zabalera gutxiago kontsumitzeko, nola erabiltzen duten aurrerakarga (*buffering*) atzerapenaren aldakortasuna ezabatzeko, nola egokitzen dioten erreproduzitzeko abiadura sarearen egoerari, nola tratatzen dituzten sarean izandako galerak, nola antolatzen dituzten zerbitzariak CDNtan... Teknika horiek guztiak Internetek eta IP sareek ematen duten *best effort* moduko zerbitzuaren mugak gainditzeko saiatzen dira, baina sareko muinean ezer ukitu gabe. Aplikazioen antolaketan edota beren kode-lerroetan gauzatzen diren teknikak dira, komunikazioaren muturretan, saretik at (ikus 4.1 irudia). Multimedia-aplikazioek IP sareetan dituzten arazoak konpontzeko bide alternatiboa sarean bertan ekiditea da. Hori aztertuko dugu kapitulu honetan: zer egin dezaketen sare-ingeniariek multimedia-trafikoa arazorik gabe garraiatzeko IP sareetan. Funtsean, IP sareetan suertatzen den datagramen arteko atzerapenaren aldakortasuna eta datagrama-galerak minimoetan uztea da helburua. Eta, kontuan hartuta atzerapenaren aldakortasuna eta galeren iturri nagusia bideratzaileetan sortutako datagrama-ilarak direla, helburu hori buxadurak ekiditea bilakatzen da.

Bideratzaileetan sortzen diren ilarak desagerrarazteko modurik zuzenena lineen transmisio-abiadura eta bideratzaileen ahalmena handitzea da. Beste era batean esanda, banda-zabalera handitzea. Bada, banda-zabaleraren handitze horri ekin diote sare-operadoreek; eta, gogoratu, hori izan da multimediararen hedapenaren eragile nagusietako bat Interneten eta IP sareetan. Interneteko banda-zabalerari dagokionez, gabezia handienak sarbide-sareetan daude. Horregatik aztertuko dugu kapitulu honetan nolakoak diren multimedia-trafikoa xurgatzeko kapaz diren sarbide-sareak.

Hala eta guztiz ere, beste edozein baliabide bezala, hobe da banda-zabalera ondo erabiltzea, sobera hornitzea baino. Hori da bigarren estrategia sareak berak *best effort* baino harago doan zerbitzua emateko: IP trafikoa ondo kudeatzea sarearen muina diren bideratzaileetan. Horretan datza QoS akronimoarekin ezagutzen den teknika sorta (*Quality of Service*). Dagoeneko ezagutzen dugun multicast-teknologian ere sakonduko dugu kapitulu honetan, masiboki erabiliz gero sarean dabilen trafikoa murrizten baitu, eta, ondorioz, dugun banda-zabaleraren erabilera optimizatzen.



4.1 irudia. Multimedia gauzatzeko estrategiak: sarean edo sareari lotutako ekipotan ekitea.

1. Multicast-teknologia

Aurreko kapituluetan multicasten erabilera ezagutu dugu streaming eta IP telefonia sistemetan. Orain, sare batek multicast-trafikoa bideratu ahal izateko behar direnak aztertuko ditugu; baina, lehenago, multicasten inguruko oinarriko kontzeptuak eta multicast-helbideak ezagutu beharko ditugu.

1.1. Multicast-kontzeptuak

ASM eta SSM multicast

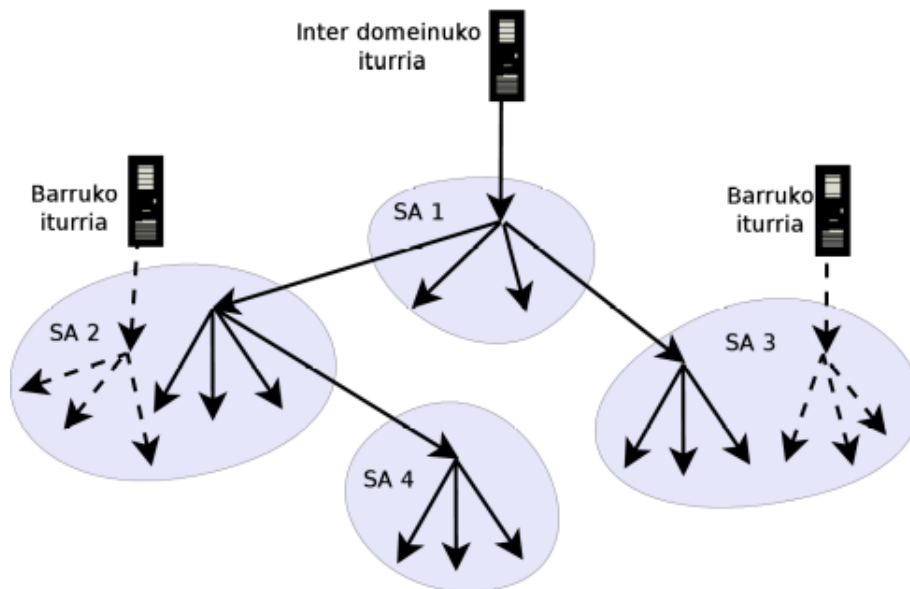
Taldeko komunikazioa bi eratakola izan daiteke: igorle bakarrekola (*one-to-many*) edo igorle askokola (*many-to-many*). Lehenengo kategorian, uneko streaminga kokatzen dugu, non igorle bat eta, aldi berean, hartzaile asko egoten baitira. Bigarrenean, multikonferentzia eta sareko joko interaktiboak ditugu. Hasieran definitu zen IP multicast eredu (RFC 1112 agirian, 1989. urtean) ez du axola nork igortzen duen multicast-helbide batera, edonork bidal baitezake edozein multicast-helbide batera. Egun, multicast-eredu horri *ASM multicast* deritzo (*Any Source Multicast*). Eredu horrek edozein multicast-komunikaziotarako balio du, igorle bakarrekotarako zein askokotarako. Baina, igorlea edonor izatean, arazo tekniko ugari sortzen dira, batez ere datagramak bideratzeari eta segurtasunari dagokienez. Horregatik, 2006. urteko RFC 4607 agirian, beste multicast-eredu bat definitu zen, multicast-helbide bati nork igortzen dion zehaztuz. Bigarren multicast-eredu hori SSM da (*Source Specific Multicast*). SSM erabiltzen denean, hartzaile bakoitzak zehaztu behar du zer igorlerengandik jaso nahi duen helbide bati dagokion trafikoa. Hasiera batean, SSMk igorle bakarrekotarako soilik balio duela badirudi ere, igorle askoko aplikazioetan ere erabil daiteke. Horretarako, nahikoa da hartzaile bakoitzak bere intereseko igorleen helbideak jakitea. Multikonferentzia batean, adibidez, kide bakoitzak SSM eskaera bat bidali behar du elkarrizketako kide bakoitzeko. SSM gauzatzea ASM baino askoz errazagoa denez, eta sareko multimedia-aplikazioetarako SSM nahikoa denez, egun, SSMren erabilera lehenesten da. IPv4 232/8 helbide sorta dago erreserbatuta SSM erabiltzen duten aplikazioentzat, IPv6 FF3x::/32 sortarekin batera.

Multicast intra eta inter

Multicast komunikazio baten igorleak eta hartzaileak sistema autonomo berean badaude, **barruko multicast** bat dela esango dugu (*intradomain multicast*). Ostera, multicast-trafikoa zenbait sis-

tema autonomotan zehar barreiatzen bada, **domeinuen arteko multicasta** izango dugu (*interdomain multicast*). 4.2 irudian azaltzen dira bi multicast era hauek; irudiko 2 eta 3 sistema autonomoetan barruko multicast-saioak daude abiatuta, eta beste saio bat irudiko domeinu guztien artekoa da, igorlea 1 sistema autonomoan kokatuta duena, eta hartzaileak irudiko lau sistema autonomoetan dituena.

Interes handiena domeinuen arteko multicast erak pizten du, aukera ematen baitu Interneteko edozein txokotatik beste puntan sortua den streaming bat jasotzeko, edota edozein saretan kokatutako beste erabiltzaileekin multikonferentzia bat egiteko edo sare-jokoetan ibiltzeko. Baina, domeinuen arteko multicast-komunikazioa gauzatzeko, igorleen eta hartzaileen artean dauden sistema autonomo guztiek bideratu behar dute multicast-trafikoak, eta hori, gaur egun, zaila da, ISP askok ez baitute onartzen beste sistema autonomo batetik heltzen zaien multicast-trafikoak. Horregatik, egun ibiltzen den multicast-trafiko gehiena barrukoa da. Domeinuen arteko ASM multicasta bereziki zaila da, Interneten dauden sistema autonomo guztien arteko koordinazioa behar baita talde baten igorle guztien berri izateko. SSM multicast-trafikoak sistema autonomoen artean mugitzeko, aldiz, ez dago arazo teknikorik. Egun, barruko SSM multicasta oso erabilia da Internet bidezko telebista banatzeko eredu itxian (IPTV). ASM multicastaren domeinuen arteko erabilera, aldiz, zaharkitu gisa sailkatu zuten 2020. urtean (*deprecated*, RFC 8815).



4.2 irudia. Barruko eta domeinuen arteko multicasta. Barrukoak ez ditu sistema autonomoen arteko mugak zeharkatzen.

Multicast aplikazio-mailan

Interneteko ikuspuntu global batetik hain onuragarria izanda ere, sare askotako bideratzaileek ez dute multicast-trafikoak onartzen. Horren ondorioz, taldeko komunikazioa behar duten hainbat aplikaziok multicast-izaera emulatu behar dute IP unicast-helbideak erabiliz. Aplikazioko programaren lana izango da, eta ez sareko bideratzaileena, igorleak bidalitakoaren kopia bakarra ugaltzea eta behar diren kopiak birbidaltzea. Hori da, hain zuzen ere, P2P streaming-sareetan egiten dena: sareko kide bakoitzak erregistratuta dauka beste zer kideri birbidali behar dizkien jasotzen dituen datagramen kopiak. Kide bakoitzak birbidaltzeko zerrenda hori nola eraiki eta mantentzen duen, berriz, aplikazioa diseinatzen duten informatikarien lana da. Sareak (hau da, bideratzaileek) beste aplikazioen datagramak bezala tratatuko dituzte horrelako P2P streaming baten datagramak: linea batetik jaso, eta beste linea batetik, bakar batetik, birbidali. Unicast bidezko multicasta lortzeko beste era bat dira CDN-sareak ere: igorle nagusiak datagrama bakoitzaren kopia bana igortzen dio

kluster bakoitzari, eta, gero, kluster bakoitzetik kopiak ateratzen dira hartzaileengana. Orokorrean, IP unicast-sare baten gainean multicast-portaera eragiteari **overlay network** bat egitea esaten zaio. Horrelako sasi-multicastak benetakoak baino maizago erabiltzen direnez, askotan, IP multicast-helbideetan oinarritutako trafikoari **native multicast** deritzo, hau da, nolabait, benetako multicasta. Hori da atal honetan kontuan hartzen dugun multicast era bakarra.

1.2. Multicast-helbideak

Multicast-helbide batek makina talde bat identifikatzen du, baina soilik hartzaile gisa. Hau da, helburuko helbidea multicast izan daiteke, baina ez jatorrizko helbidea. Multicast-helbideak Ethernet trametan edo IP datagrametan ager daitezke, IPv4 zein IPv6 aukeretan.

IPv4 multicast-helbideak

IPv4 multicast eta unicast helbideak bereizteko, helbidearen hasierako 4 bit erabiltzen dira, eta, multicast-helbideen kasuan, 1110 balioa ematen zaie bit horiei. IP protokoloaren jatorrizko definizioan, helbide guztiak A, B, C, eta D klaseetan sailkatzen ziren, eta multicast-helbide taldea D klasea zen. Gero, IP helbideak kudeatzeko **CIDR** sistema etorri zen (*Classless Inter-Domain Routing*), eta klaseetan oinarritutako bereizketa baztertu zen, baina D taldeko helbide sorta mantendu zen multicast-erabilerarako. CIDR eran, 224.0.0.0/4 adierazten da lehen D taldeak barneratzen zuen helbide sorta, 224.0.0.0 eta 239.255.255.255 helbideen artekoa. Sorta horren barnean bereizten diren azpisortak RFC 5771 (BCP 51) agirian zehazten dira. Azpisorta horien artean, batzuk **IANA**k kudeatzen ditu zuzenean (*Internet Assigned Numbers Authority*), eta, besteetarako, esleipenatarako jarraibideak ematen ditu RFC 5771 agiriak. IPv4 multicast azpisorta nagusien ezaugarriak 4.1 taulan biltzen dira. Hona hemen sorta horiei buruzko azalpen gehiago:

- **Sare lokaleko kontrolerako helbideak** sare lokal baten barruko kontrolerako protokoloetan erabilitako helbideak dira. Helbideok helburu gisa daramatzaten datagramak ezingo dute sare lokaleko muga gainditu. Adibidez, 224.0.0.1 helbideak sare lokaleko makina guztiak identifikatzen ditu, eta 224.0.0.2 helbideak sare lokalean bertan dauden multicast-bideratzaile guztiak identifikatzen ditu.
- **Kontrolerako helbide globalak** aurrekoak bezalakoak dira, baina, kasu honetan, helburuak daramatzaten datagramak beren sare lokaletik atera daitezke. Adibidez, NTP (*Network Time Protocol*) multicast-bezeroek 224.0.1.1 helbidean jasotzen dituzte mezua.
- **SSM** (*Source-Specific Multicast*) sortako helbideak edonork erabil ditzake, inongo esleipenik jaso gabe. Hartzaileak igorlea aukeratzen duenez, ez dago erabiltzaileen artean talka egiteko arriskurik.
- **Multicast-helbide pribatuak** unicast RFC 1918 helbideen parekoak dira: norberak bere sarean erabiltzekoak dira, Internetera atera gabe.

4.1 taula. IPv4 multicast-helbide sorta nagusiak.

Izena	Sorta	Nork kudeatu	Esparrua
Sare lokaleko kontrolerako helbideak (<i>Local Network Control Block</i>)	224.0.0/24	IANAk	Sare lokala
Kontrolerako helbide globalak (<i>Internet Control Block</i>)	224.0.1/24	IANAk	Internet
SSM sorta	232.0.0.0/8	Librea	Internet
Helbide pribatuak (<i>Administratively Scoped IP Multicast</i>)	239.0.0.0/8	Librea	Sare pribatua

Ez dira nahastu behar broadcast- eta multicast-helbideak. Broadcast-helbidea sareko makina guztiak identifikatzen dituen multicast-helbide berezia da. Bistan denez, ez da bideragarria broadcast-helbide bat izatea Internet osorako, baina broadcast kontzeptua oso erabilgarria izaten da sare lokaletan. RFC 919 agirian definitzen dira IPv4 broadcast-helbideak. Gehien erabiltzen dena 255.255.255.255 helbidea da, sare fisiko bereko txartel guztiak identifikatzen dituena. IP azpisare baten broadcast-helbidea sortzeko, azpisarea identifikatzen duten helbideko bitak izan ezik, beste guztiak bateko bilakatu behar ditugu. Adibidez, 203.0.113.0/24 azpisareko broadcast-helbidea 203.0.113.255 da.

IPv6 multicast-helbideak

RFC 4291 agiriak definitzen du IPv6 helbideen antolaketa orokorra, eta, horren barnean, multicast-helbideena, $\text{ff00}::/8$ aurrezenbakia dutenak. Helbidearen 32 bitak 4 zatitan daude egituratuta (ikusi 4.3 irudia):

- Hasierako 8 bitak multicast-aurrezenbakia dira.
- Hurrengo 4 bitak *flagak* dira.
- Hurrengo 4 bitek helbidearen esparrua adierazten dute. Definitutakoen artean, interesgarrienak 0010 (sare lokaletik ateratzen ez direnak), 0100 (erakunde baten bertako sarea), eta 1110 (globalak) dira.
- Azkeneko 112 bitak multicast-taldearen identifikazioa dira. Batzuk aurredefinituta daude. Adibidez, 101 zenbakia (hamartarra) NTP zerbitzuari dagokio. Esparrua kontuan hartuta, $\text{ff02}::101$ helbideak sare lokaleko NTP zerbitzariak identifikatzen ditu, eta $\text{ff08}::101$ helbideak, aldiz, erakunde baten sare osoan dauden NTP zerbitzariak.

IANAk zenbait IPv6 multicast-helbideren erabilera aurredefinitu du. Erreserbatutako helbide horiek eta beren erabilerak zein diren jakiteko, kontsultatu ezazu IANAn web-orria.



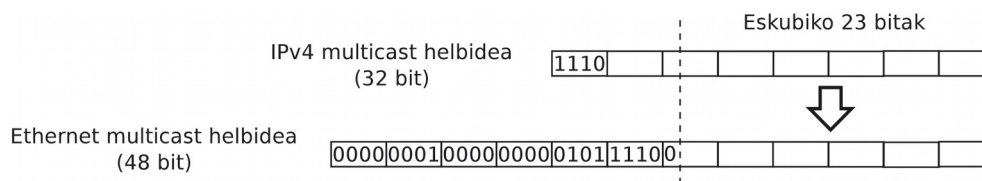
4.3 irudia. IPv6 multicast-helbideen egitura.

Ethernet multicast-helbideak

Multicast-komunikazioa IP mailan definitu da, hau da, datagrama-mailan. Baina sare-txartelak jasotzen dutena ez dira datagramak, tramak baizik. Horregatik, datagrama bat bidali ahal izateko, lehenengo itzulpen bat egin behar da, datagramaren bidean hurrengo makina denaren IP helbidetik bidaliko den tramako helburuko MAC helbidea lortzeko (normalean, ARP bihurketa da itzulpen hori). Horren guztiaren ondorioa honako hau da: multicast IP helbideak badaude, multicast MAC helbideak beharko ditugu, baita biren arteko bihurketa egiteko mekanismoa ere. Sare-teknologia bakoitzak bere trama-formatu propioa definitzen duenez, horietako bakoitzeko multicast helbideratze-eskema eta IP multicast helbideetatik eratortzeko mekanismoak definitu beharko lirakeke. Egun, sare-txartel gehienek Ethernet teknologiako aldaeraren bat erabiltzen dutenez, trama multicast-helbideratzea Ethernet teknologietarako dago soilik garatuta.

48 biteko Ethernet helbideetan, 01-00-5E-00-00-00 eta 01-00-5E-7F-FF-FF arteko sorta gordeta dago IPv4 multicasterako. 4.4 irudian ikusten denez, Ethernet multicast-helbideko ezkerreko 25 bitak finkatuta daude, eta eskuineko 23ak aldakorrak dira. IPv4 multicast-helbide batetik dagoen Ethernet multicast-helbidea eratortzeko, IPv4 helbideko eskuineko 23 bitak Ethernet helbideko eskuineko 23 bitetan txertatzen dira. Kontu bitxia da zergatik hartzen diren 23 bit bakarrik, eta ez IPv4 multicast-helbide baten 28 bit aldakorrak, eta ondorioa bistakoa da: IPv4 eta Ethernet

helbideen arteko bihurketa ez da batetik batera erakoa, baizik eta zortitik baterakoa; hau da, badaude 8 IPv4 multicast-helbide Ethernet multicast-helbide bakoitzeko. Beraz, gerta daiteke saretxartel batek jasotzea ez dagozkion multicast-tramak. Arazoa IP mailan konpondu beharko da; jasotako tramak daraman datagrama erauzi eta helburuko IP helbidea arakatzean, akatsa agerian gelditzen da, eta datagrama hori baztertu egingo da. Mekanismo bera erabili da IPv6 multicast-helbideak Ethernet helbide bihurtzeko (ikus RFC 2464), baina Ethernet multicast-helbide bakoitzeko dugun IPv6 multicast-helbide kopurua hainbat aldiz handituta: IPv6 helbidea osatzen duten 128 bitetik, soilik eskuineko 32 bitak hartzen dira, eta, berez, 296 IPv6 multicast-helbide desberdinetatik Ethernet multicast-helbide bera eratortzen da. Ethernet multicast-helbideko aurreneko 16 bitak finkatuta daude 33-33 balioan (formatu hamaseitarrean).



4.4 irudia. IPv4 multicast-helbidetik Ethernet helbiderako bihurketa.

IPv4 eta IPv6 multicast-helbideen bihurketarako gordetako bi Ethernet helbide sorta horiez gain, orokorrean, Ethernet helbideko zortzigarren bita batekoa denean, helbide hori multicast dela dago definituta (zortzigarren bit hori da transmititzen den lehena).

Hala ere, IP eta Ethernet multicast-helbideen arteko bihurketa definituta izan arren, praktikan ez da erabiltzen. Horren orde, IP multicast-helbide baten Ethernet baliokidea behar denean, Ethernet broadcast-helbidea erabiltzen da, hau da, dena batekoz osatuta dagoen Ethernet helbidea. Beraz, fisikoki, Ethernet segmentu berean dauden makina guztiak jasoko dute multicast-datagrama hori. IP mailak ebatzi beharko du ea benetan jaso ala baztertu behar duen datagrama.

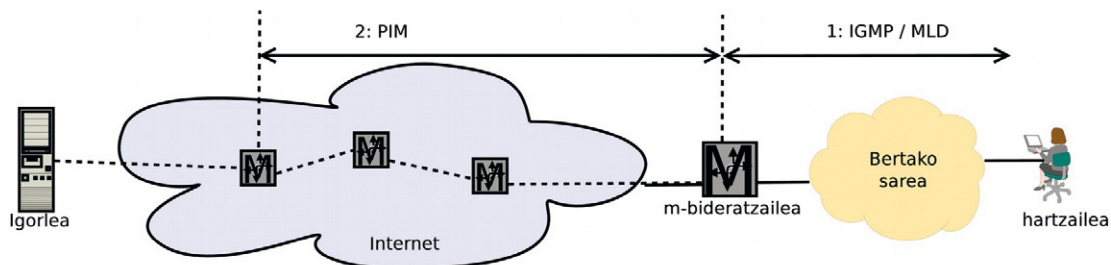
1.3. Multicast-trafikoa birbidaltzea

Multicast-helbide baten igorleen eta haren hartzaile guztien arteko bidean dauden bideratzaileek **multicast-zuhaitza** osatzen dute. Bideratzaile horiei jakinarazi behar zaie zuhaitz horretan daudela, multicast-helbide hori daramaten datagramak birbidal ditzaten zuhaizpean dituzten hurrengo bideratzaileetara. Arazoa ez da makala, kontuan izanda igorleak ez dakiela zein diren hartzaileak eta, gainera, hartzaile talde hori oso aldakorra izan daitekeela unez unez. Ondorioz, multicast-zuhaitz batean engaiatutako bideratzaile taldea ere aldakorra izango da. Mekanismo dinamiko bat beharko dugu bideratzaile horiek zein diren hartzaile taldearen bilakaerarekin batera eguneratzeko. Argi dago mekanismo hori hartzaileengandik abiatu behar dela, hartzaileak soilik kontrolatzen baitu taldean noiz sartzen den edo taldetik noiz ateratzen den. 4.5 irudian azaltzen den bezala, multicast-zuhaitz bat bi urratsetan eguneratzen da hartzaile bat taldean sartu edo taldetik ateratzen denean: lehenik, hartzaileak bere mugimenduaren berri eman behar dio bere sarean bertan izan behar duen multicast-bideratzaile bati, eta, gero, bideratzaile horrek multicast-zuhaitzean gorrak dauden beste bideratzaileei helarazi behar die berritasuna. Hartzailearen sarean bertan dagoen multicast-bideratzaile hori gakoa da bi prozesuetan, eta, gainera, bi prozesuak lotu behar ditu. Bideratzaile horrek izen desberdinak jasotzen ditu agiri desberdinetan, une bakoitzean betetzen duen funtzioaren arabera. Agiri honetan, orokorrean, **bertako multicast-bideratzailea** edo MLR (*Multicast Local Router*) deituko dugu, eta beste izenak erabiltzen diren testuinguruan aipatuko ditugu.

Hartzaileen altak eta bajak: IGMP eta MLD

Hartzailearen eta bertako multicast-bideratzailearen arteko komunikazioa IGMP protokoloak arautzen du (*Internet Group Management Protocol*, RFC 3376) IPv4 trafikoa denean, eta MLD protokoloak IPv6 trafikoa denean (*Multicast Listener Discovery*, RFC 3810). IGMP-eko hiru bertsiotzat definitu dira. MLDri dagokionez, esan behar da haren eta IGMPren arteko alde bakarra mezuaren formatua dela. Indarrean dagoen bertsiotzat bigarrena da, MLDv2 izenekoa. Aipatu behar da, berez, MLD protokoloa **ICMPv6** protokoloaren zati bat dela, nahiz eta era guztiz berezitan aipatu agiri gehienetan. Ondoren, IGMPren azken bertsiotzat (IGMPv3) aztertuko dugu. Haren ekarpen nagusia, aurreko bertsiotekin alderatuta, SSM multicast erari emandako arreta da.

IGMP mezuak IPv4 datagrametan kapsulatzen dira zuzenean, hau da, TCP edo UDP erabili gabe. Bideratzaileak eta hartzaileak sare berean egon behar dutenez, IGMP mezuak garraiatzen dituzten datagramak bateko bat daramate TTL eremuan, eta, ondorioz, IGMP mezuak ezin dute bideratzaileerik zeharkatu. Bi motatako mezuak besterik ez ditu definitzen protokoloak bere azken bertsiotzat: `membership_query` eta `membership_report` mezuak. Lehena bertako multicast-bideratzaileak bidaltzen du aldiro, zundarena eginez, sare lokal berean multicast-hartzaileak hautemateko. Bigarrena hartzaileen makinek bidaltzen diete multicast-bideratzaileei, talde batean sartu nahi dutenean, edo bideratzaile batek egindako itaunketari erantzuteko. Zundaketarako mezuak hiru eratakoak izan daitezke: orokorrak (*general query*), taldekoak (*group-specific query*) edo SSM galderak (*group-and-source-specific query*). Galdera orokorrak 224.0.0.1 helbidera igortzen ditu bideratzaileak, sare fisikoko beste makina guztiek jaso ditzaten. Haien artean, multicast-hartzaileak dituztenek `membership_report` mezu batekin erantzun behar dute, azalduz ea jarraitu nahi duten multicast-trafikoa jasotzen. Beste bi motetako galderak dagokion multicast-helbidera bidali behar ditu bideratzaileak, soilik dagokien makinek erantzun dezaten. Bideratzaileen galderari erantzuteko ez ezik, `membership_report` mezuak alta emateko ere bidaltzen dituzte hartzaileek, zundaren zain egon gabe. Mezuok 224.0.0.22 helbidera bidaltzen dituzte; sare lokal bereko multicast-bideratzaile guztiak identifikatzen dituen helbidera, alegia.



4.5 irudia. Multicast-zuhaitzaren eguneraketarako protokoloak.

IGMP protokoloak ez du definitu `membership_query` galdera bati ezezkoa emateko mezurik. Horren ordez, taldeko parte-hartzaileek taldea utzi nahi dutenean, nahikoa dute `membership_query` galderari ez erantzutea. Taldeko inongo hartzailek ez badu galdera erantzuten, bideratzaileak bere multicast birbidaltze-taulatik kenduko du talde hori (gero aztertuko dugu taula hori), eta talde horren trafikoa jasotzeari eta birbidaltzeari utziko dio. Horrelako protokoloak, non egoera-aldaketak eragin baitaitezke ezer egin gabe, **protokolo bigunak** terminoarekin dira ezagunak (*soft state protocol*). Haien kontrakoak **protokolo gogorrak** dira (*hard state protocol*), zeinetan egoera ez baita aldatzen esplizituki eskatzen ez bada.

IGMP snooping

Ethernet konmutagailu batek multicast-helburua duen trama bat jasotzen duenean, soilik multicast-helbide horrekin lotutako makinei birbidali behar lieke trama hori. Haatik, Ethernet kommu-

tagailu arruntek ez dute halako multicast-ahalmenik, eta multicast-helbideak broadcast balira bezala tratatzen dituzte; hau da, sareko linea guztietatik birtransmititzen dituzte. Jokabide horrek banda-zabalera kontsumitzen du, alferrik, eta, gainera, **DoS** erasoak ekar ditzake (*Denial of Service*). Horregatik, zenbait ekoizlek multicast-trafikoa soilik trafiko horri dagozkion lineetatik birbidaltzen duten Ethernet kommutagailuak merkaturatu dituzte. Haien lana IGMP mezuen edukia miatzean datza, multicast-bideratzaileak IP mailan egiten duen taldeen jarraipen-lanaren parekoa egiteko Ethernet mailan. Hau da, Ethernet kommutagailuak ARP taularen antzeko beste taula bat eraikiko du, aho bakoitzari dagozkion multicast-helbideak aho horrekin lotzeko. Bideratzaileen eta hartzaileen arteko IGMP trafiko-zelatatze horri *IGMP snooping* deritzo. Bereziki onuragarria da multicast bidezko IP telebistan eta halako aplikazioetan, sare lokalean eragindako trafikoa era nabarian murriztu baitezake.

IGMP *snooping* teknikan, bi kontu nahasten dira: Ethernet mailako kommutagailuen funtzionamendua eta IP mailako multicast-trafikoa bideratzea. Horrek estandarizaziorako arazo bat dakar, erakunde desberdinei baitagokie kommutagailuen funtzionamendua arautzea (IEEEk egiten du) eta IP multicast bideratzea arautzea (IETFren lana da). Beren artean ados jarri ez, eta, ondorioz, ez dugu IGMP *snooping* arautzen duen estandarrik. Teknika deskribatzen duen RFC 4541 agiriak dibulgaziorako estatusa du (*Informational status*).

Multicast-datagramak bideratzea: PIM

Hainbat agirik (RFC 5110, RFC 5132, RFC 7761) deskribatzen dute nola bideratzen den multicast-trafikoa Interneten. Hemen, SSM trafikoan ardaztuko gara, 2020. urtetik ASM multicast baztertzen hasia baitago (ikus RFC 8815).

Multicast-trafikoa bideratu ahal izateko, bideratzaileek multicasterako birbidaltze-aula bat osatu eta eguneratu behar dute. Taula horri izen bat baino gehiago ematen zaizkio agiri teknikoetan. Adibidez, RFC 7761 agirian, **MFIB** terminoa erabiltzen da (*Multicast Forwarding Information Base*); RFC 5132 agirian, aldiz, *Multicast Routing Next Hop Table* terminoa erabiltzen du. Guk **multicast birbidaltze-aula** erabiliko dugu. Taulako sarrera bakoitza SSM kanal bati dagokio, hau da, [iturria, helburua] bikote bati, non helburua multicast helbide bat baita. Beraz, bideratzaile batek sarrera bat izango du bere multicast-aulan, parte hartzen duen SSM multicast-zuhaitz bakoitzeko. Zehazki, taularen antolaketa eta edukia inplementazioaren arabera da, baina, orokorrean, honen antzekoa izango da:

4.2 taula. IP multicast birbidaltze-aula posible bat.

SSM kanala [Iturria, helburua]	Hurrengo bideratzaileak (Next hop)	Interfazea
[198.51.100.9, 233.252.0.1]	192.0.2.34	eth0
	198.51.100.56	ppp1
[198.51.100.48, 233.252.0.1]	192.0.2.212	eth0
	—	eth1
[192.0.2.213, 233.252.0.55]	198.51.100.197	ppp1

Unicast-komunikazioetan ez bezala, multicast-sare batean baliteke datagrama bat linea bate-tik baino gehiagotatik birbidali behar izatea, eta hori islatu behar da birbidaltze-tauletan. Bideratzaile batek datagrama bat ugaldtu behar badu, hurrengo bideratzaile bat baino gehiago lotu behar zaizkio datagrama horri dagokion kanalarari. Horrela egiten da 4.2 taularen hasierako bi kanaletan, non datagramak bi lineetatik birbidali behar baitira. Taulako hirugarren kanalaren kasuan, ordea,

datagramak linea bakar batetik birbidaltzen zaizkio hurrengo bideratzaile bati, eta, beraz, ez dira ugaltzen. Taulako SSM kanal bati dagokion linea bakoitzari **adarra** izena emango diogu; adar bakoitzean, hurrengo bideratzaile bat eta igortzeko sare-interfaze bat azaltzen dira. Adibidez, 4.2 taulako hasierako bi kanalek bi adar dituzte bakoitzeko, baina azken kanalak adar bakarra du. Aipatzekoa da bigarren kanalean ere bi adar agertu arren, bata `eth0` interfazetik eta bestea `eth1` interfazetik, bigarren adar hori berezia dela, ez baitu hurrengo bideratzailearik. Horrek esan nahi du adar horren datagramak beren helburuko sarera heldu direla eta ez zaiela beste bideratzaile bati birbidali behar, hartzaileak bertan dituelako. Lerro hori, adarra baino gehiago, *hosto* izendatu beharko genuke.

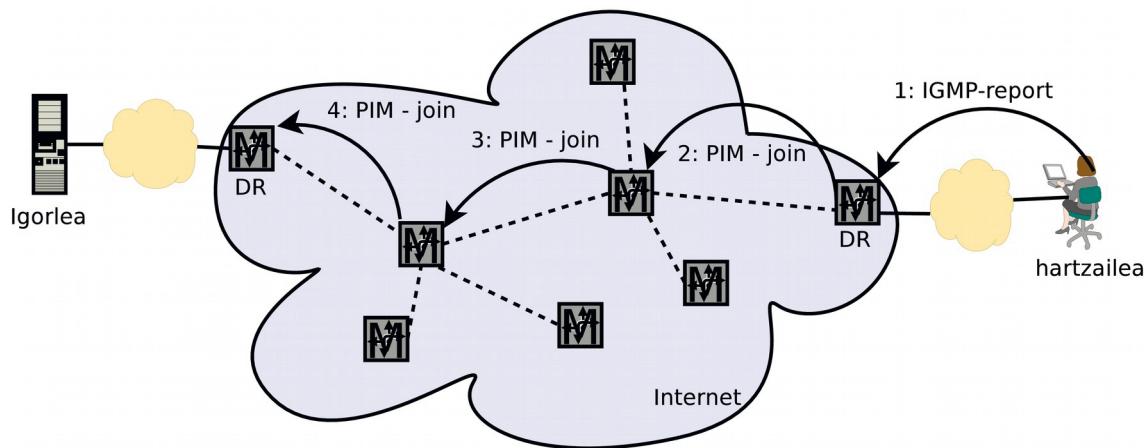
Bideratzaileen multicast birbidaltze-taulak eraikitzeke, bi arazo hauek konpondu behar dira:

- (1) Hartzaile berri batek kanal hori eskatzen duenean, zuhaitzeko bideratzaile guztiei jakinarazi behar die beren tauletan sarrera bat gehitu behar dutela. Horri *multicast-zuhaitza eraikitzea* esaten diogu. Arazo handiena zuhaitz horretan zer bideratzailek egon behar duten asmatzea da.
- (2) Zuhaitzeko bideratzaile bakoitzean, taulako sarrera bati dagokion hurrengo bideratzailea zein den zehaztu behar da.

Bi arazo horiek PIM protokoloa erabiliz (*Protocol Independent Multicast*) konpontzen dira. Haren azken espezifikazioa RFC 7761 agirian dago, PIM-SM izenpean (*Sparse Mode*). Berez, edozein multicast-trafikatorako balio du PIM protokoloak; baina, gogoratu, guk SSM trafikoan jarriko dugu arreta. SSM trafikorako PIM protokoloaren zatia, batzuetan PIM-SSM izenarekin agertzen dena, PIM protokolo orokorraren sinplifikazio bat da. Hemen haren funtzionamenduaren mamia erakutsiko dugu.

Iturriaren eta hartzaileen arteko multicast-zuhaitza kudeatzea da PIM protokoloaren lana. Horretarako, bi zeregin betetzen ditu: bata, hartzaile batek kanal batean sartzeko eskatzen duenean, adarrak gehitzea zuhaitz horretan, eta, bestea, adar bateko azken hartzaileak kanala uzten duenean, adarra moztea. Lehenengo lanerako, `join` izeneko mezuak erabiltzen ditu, eta, bigarrenerako, `prune` izenekoak. Hartzaile baten bertako multicast-bideratzaileak kanal berri baterako IGMP `membership_report` mezua jasotzen duenean, bere multicast birbidaltze-taulan kanal hori sartu eta, segidan, kanal berri horren zuhaitzean adarra gehitzeko prozedura abiatzen du. Era berean, multicast-bideratzaile batek igorritako zundari inongo hartzailek erantzuten ez dionean, bideratzaileak bere multicast birbidaltze-taulatik kenduko du kanal hori, eta kanalarik dagokion adarra kentzeko prozedura abiatuko du. Ikusten denez, hartzaileen sareetako multicast-bideratzaileek zubiarena egiten dute hartzailearen eta kanpoko multicast-bideratzaileen artean, batekin komunikatzeko IGMP erabiliz, eta besteekin PIM. Hartzailearen sarean multicast-bideratzaile bat baino gehiago balego, horietako bakar batek egin behar luke zubi-lana. Bideratzaile horri **DR** izena (*Designated Router*) ematen dio PIM protokoloak, eta mekanismo bat deskribatzen du sare lokal batean dauden multicast-bideratzaileen artean DR bideratzailea aukeratzeko. Beraz, PIM protokoloaren testuinguruan, bertako multicast-bideratzaileari DR deitzen zaio. Izendapen horri eutsiko diogu, protokoloak dioena jarraitzeagatik, baina buruan izan DR, MLR edo bertako multicast-routerra makina bera direla.

SSM kanal baten multicast-zuhaitzean adar bat gehitzeko prozedura 4.6 irudian deskribatzen da. DR bideratzaileak emango dio hasiera, bere multicast birbidaltze-taulan SSM kanal berri bat sartzeko duenean. Hartzailearekin lotura zuzena duenez, ez du hurrengo bideratzailearik esleituko taulako lerro berrian. Gero, `join` mezu bat bidali behar dio kanal horren iturrirako bidean duen hurrengo multicast-bideratzaileari. `join` mezu hori kanal horren trafikorako eskaera bat da. `join` mezua jasotzen duen bideratzaileak lerro bat gehitu behar du bere multicast birbidaltze-taulan kanal horretarako, eta `join` mezua igorri dion bideratzailearen helbidea jarri behar du hurrengo bideratzailearen zutabean. Gero, prozedura errepikatuz, `join` mezua birbidaliko dio iturrirako bidean duen hurrengo multicast-bideratzaileari. Horrela, jauzika, `join` mezua kanal horren iturria den sareko DR bideratzailearaino helduko da, bideko bideratzaileetako multicast birbidaltze-tauletan aztarna utzita, hau da, multicast-zuhaitza osatuta.



4.6 irudia. Multicast zuhaitzaren eguneraketarako urratsak eta protokoloak.

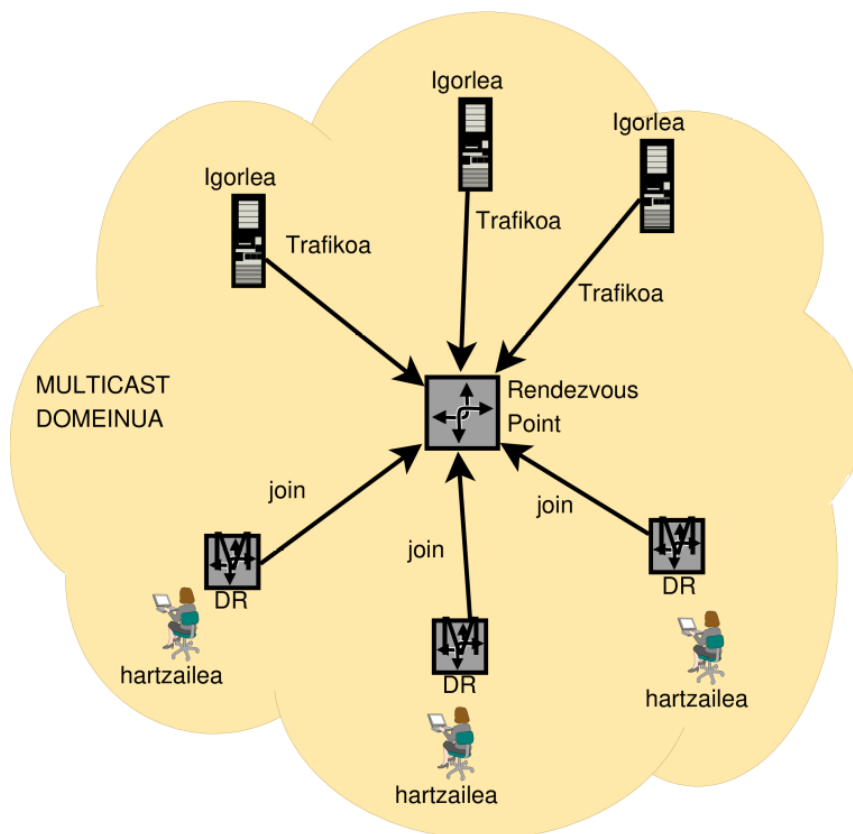
Deskribatutakoa PIM protokoloaren oinarriko mekanismoa da, baina bi aipamen egin behar dira horretaz. Batetik, taula batean adar berri bat sartzen denean, tenporizadore bat abiatzen da adar horri lotuta; eta tenporizadore hori agortu baino lehen jasotzen ez bada adarra berretsi eta tenporizadorea berrabiatuko duen `join` mezu bat, adarra taulatik ezabatuko da. Beraz, adar horri eutsi ahal izateko, hartailearen DR bideratzaileak `join` mezuak igorri behar ditu periodikoki. Ikusten denez, PIM protokoloa, IGMP bezala, biguna da. Bestetik, iturrirako bidean hurrengo multicast-bideratzailea zein den asmatu behar da. Besterik ezean, unicast birbidaltze-taulan kontsultatzen da zein den hurrengo bideratzaile hori. Normalean, taula hori erabiltzen da datagramak bere helbururantz eramateko, baina, orain, datagramen iturrirantz joateko bidean hurrengo bideratzailea zein den jakiteko izango da erabilia. Horregatik, teknika honi **RPF** deritzo (*Reverse Path Forwarding*), nonbait *kontrako bidean* begiratzea baita. Kasu honetan, multicast-trafikoa bideratzeko unicast-taula erabiltzen denean, esaten da unicast- eta multicast-topologiak **kongruenteak** direla. Hala ere, posible da bide desberdinak planifikatzea multicast- eta unicast-trafikoetarako, hau da, sare topologia desberdinak erabiltzea unicast- eta multicast-datagramak birbidaltzeko. Aukera hori gauzatzeko, multicast-topologiari buruzko informazioa gordetzen duen beste taula bat beharko dute multicast-bideratzaileek, **MRIB** izenekoa (*Multicast Routing Information Base*); taula horretan, helburu posible bakoitzeko multicast-bide posibleak zein diren gordetzen da. Bideratzaile batean MRIB baldin badago, taula horretan begiratu behar du zein den `join` mezua birbidaltzeko hurrengo bideratzailea.

Ez dira nahastu behar multicast bideratzeko taula (MRIB) eta multicast birbidaltzeko taula (MFIB): bata `join` mezuak goranzko bidean birbidaltzeko erabiltzen da, RPF eran iturrirantz, eta bestea, multicast-aplikazioetako datagramak beheranzko bidean birbidaltzeko, hartaileetarantz. MRIB taula betetzeko (taula hori dagoenean), multicast-bideratzaileek bideratze-informazioa trukatu behar dute beren artean, eta, horretarako, protokoloak behar dituzte. Multicast-domeinuen arteko bideratze-informazioa trukatzeko, BGP protokoloaren hedapen bat erabiltzen da, **MBGP** izenekoa (*Multiprotocol Border Gateway Protocol*, RFC 4760). Multicast-domeinu berean, arrotza da unicast- eta multicast-topologiak desberdinak izatea, baina, hala ere, zenbait barne-bideratzerako protokoloetarako ere definitu dira multicasterako hedapenak; adibidez, M-ISIS eta MT-OSPF (*Multi-Topology OSPF*, RFC 4915). Baina gogoratu: unicast- eta multicast-topologiak kongruenteak direnean, gehienetan gertatzen dena, protokolo hauek ez dira behar.

Beren multicast birbidaltze-taulan kanal batean erregistratutako hartaile guztiek baja hartzen dutenean, DR bideratzaileak utzi egingo dio periodikoki `join` mezuak bidaltzeari kanal horretarako. Adarra mozteko hori nahikoa balitz ere, PIM protokoloak badu mekanismo proaktibo

bat adarra ezabatzeko bideko bideratzaileen taulatik, `prune` mezua erabiliz. Adarra gehitzearen antzeko prozedura da, baina `join` mezuen ordez `prune` mezuak bidaltzen dira zuhaitzean gora, hartzailearen DR bideratzaileak hasita. Goranzko hurrengo bideratzaileak `prune` mezua jasotzen duenean, bere multicast birbidaltze-taulatik kenduko du `prune` mezua igorri dion bideratzaileara zihoan adarra, eta, kanal horretan adar gehiago gelditzen ez bada, kanala ere ezabatuko du bere taulatik. Aldiz, kanal horretan oraindik beste adarren bat badago, `prune` mezua ez du gorantz birbidaliko, kanal horretarako trafikoa beste adarretara bideratzen jarraitu behar baitu.

2020. urtean baztertu zen ASM multicast erabiltzea domeinuen arteko trafikoan, eta, geroztik, domeinuen barneko trafikoan ere SSM multicast besterik ez erabiltzea gomendatzen da. Hala ere, oraindik, ohikoa da ASM trafikorako definitu ziren elementuak agertzea multicasti buruzko testuetan eta bere inplementazioetan. Horregatik emango diogu begirada labur bat ASM trafikoreen bideraketari, betiere multicast-domeinu barnean mugatuta. Horrelako trafikorako birbidaltze-taulak osatzean agertzen den arazo nagusia da asmatzea nora bidali behar dituzten bideratzaileek beren `join` mezuak, iturria ez baitago identifikatuta, eta, gainera, iturri asko egon daitezke aldi berean (adibidez, multikonferentzia baten kasuan). Arazo hori konpontzeko agertzen da *Rendezvous Point* izenekoa (RP). Bere lana izango da ASM multicast taldeen igorleen trafikoa biltzea, eta igorle horiek guztiak ordezkatzeko, 4.7 irudian agertzen den bezala. ASM multicast talde baten igorleek eta hartzaileek konfiguratuta egon behar dute RP batekin lan egiteko. Igorle bakoitzak, PIM erabiliz, jakinaraziko dio bere RPri trafikoa isuri nahi duela talde horretan; jakinarazpen hori jasota, RPk `join` mezu bat bidaliko du igorlerantz, eta horrela eraikiko du multicast-zuhaitza igorle bakoitzaren eta RPren artean. Hartzaileen DRk, iturriak zein diren jakiterik ez dutenez, RPrantz bidaliko dituzte beren `join` mezuak, eta, horrela, RPren eta beren arteko zuhaitzaren zatia eraikiko dute. Gero, hartzaileek RPren bidez igorleak zein diren jakinda, igorle guztientzako zuhaitz amankomuna baztertu eta igorle bakoitzarentzako zuhaitz optimoa eraiki dezakete.

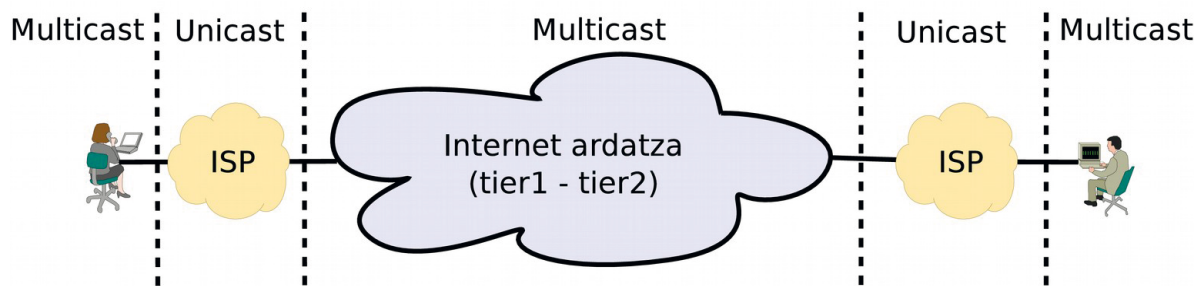


4.7 irudia. ASM trafikoa bideratzea multicast-domeinu baten barnean.

1.4. Multicast-domeinuen arteko hutsunea eta AMT tunelak

Multicast-teknologia 1985. urtean definitu zen IP saretarako. Hasierako definizio hori ASM ereduakoa zen. Eredu horrek arazo asko ekarri zizkion multicast-hedapenari, bai segurtasunaren aldean, baita multicast-bideraketaren aldean ere, bereziki domeinuen arteko bideraketari dagokionez. Horren ondorioz, urte luzez multicast-teknologia ez da zabaldu Internet irekian, sistema autonomoen arteko trafikoa. Baina multicast erabiltzearen onurak jasoko lituzketen aplikazioentzat —Internet bidezko telebista- eta bideomultikonferentzia-aplikazioentzat, alegia—, nahikoa da SSM ereduak; ez dute ASM behar. Horretan erreparatuz, 2006. urtean SSM multicast definitu zen, askoz seguruagoa eta bideratzen errazagoa.

Dena dela, oraindik ere, multicast-teknologiak testuinguru itxietan izan du soilik arrakasta, hau da, sare korporatiboen barruko aplikazioetan edo ISPen saretik atera gabe. Internet irekian, oraindik, ikusteke dugu SSM multicast-trafikoa. Domeinuen arteko multicast-trafikoaren hedapenaren arazoa IPv6 bertsioaren arazo bera da: biak dira «dena edo ezer ez» erako teknologiak (*all-or-nothing*); hau da, ibili ahal izateko, iturriaren eta hartzailearen arteko bidean dauden bideratzaile guzti-guztiek onartu behar dute erabilitako teknologia; bestela, ez dago zer eginik, multicast-ahalmenik ez duen bideratzaile bat agertzen bada multicast-datagrama baten bidean, bideratzaile horrek datagramarekin zer egin jakin ez, eta baztertu egingo du. Multicasten kasuan, ez du ezertarako balio iturri baten ISPk multicast eskaintzeak bere zerbitzuen artean, ezin baitu bermatu bere saretik kanpo dauden bideratzaileek multicast-trafikoa onartuko duten. Gainera, ISPe ez dute garbi ikusten zer onura ekar liezaiekeen kanpoko iturri batetik etorritako multicast-trafikoa onartzeak, baina bai, ordea, zer kalte: beren kompetentzia diren OTT operadorei erraztasun teknologikoak eta ekonomikoak emango lizkiekete. Hartzaileen ikuspuntutik, multicast erabiltzeak ez dakar bistako onurarik, bere Internet konexioaren banda-zabaleraren kontsumoa bera baita, unicast zein multicast erabili.



4.8 irudia. Multicast-domeinuen arteko hutsunea.

Berez, egun, multicast-teknologia guztiz hedatuta dago Interneteko handizkarien sareetan, Tier1 eta Tier2 erakoetan; baina sareko bazterrak osatzen dituzten ISPen sare gutxitan topatuko dugu multicast-ahalmena bideratzaileetan. Masiboki publikoarenganaino heltzeko bideko azken kilometroan dago tapoia, ISPen sareetan. Erabiltzaileen eta multicast Interneten arteko hutsune hori da 4.8 irudiak azaltzen duena. Multicast hutsune hori gainditzeko, proposamen bat egin du IETFk, AMT izenekoa (*Automatic Multicast Tunneling*, RFC 7450). Izenak dioenez, ideia tunelak erabiltzean datza: multicast-trafikoa unicast-datagrametan kapsulatzen da multicast-sareko muga dauden bideratzailetatik, hartzaileara arteko multicast-hutsunea zeharkatzeko. AMT guztiz multicast den Internet izan arteko trantsiziozko teknologia da. Nahiz eta 2015. urtera arte ez argitaratu Internet estandarra izateko moduan, gutxienez 2011. urtetik egon da implementatuta merkatuan dauden zenbait bideratzaileetan. Hala eta guztiz ere, oraingoz, AMTk ere ez dio eman multicast-teknologiari behar duen bultzadarik.

2. QoS mekanismoak

QoS akronimoa (*Quality of Service*), orokorrean, sareko erabiltzaileek jasotako zerbitzuaren pertzepzioari dagokio, zerbitzu horren kalitatea zenbait parametroren bidez neurtuta: atzerapena, atzerapenaren aldakortasuna, galera-tasa, emandako banda-zabalera, eta erabilgarritasuna, batez ere. IP sareetan, haatik, termino hori lotuta dago parametro horiek hobetzeko erabiltzen diren teknikekin, eta, berez, egokiagoa da QoS teknikei edo mekanismoei buruz hitz egitea. Jarraian, QoS teknika nagusiak aurkeztuko ditugu.

2.1. Traffic Management

Besterik ezean, bideratzaile batek irteerako ilara bakarra esleitzen dio bere linea bakoitzari; datagramak ilara horretatik atera, eta ilaran sartu diren ordena berean birbidaltzen ditu. Hau da, **FIFO** eran kudeatzen da ilara hori (*First Input First Out*). Horietako ilara batean datagramak atera baino azkarrago sartzen badira, buxadura sortzen da. Epe batean, ilaran toki libreka gelditzen den bitartean, bideratzaileak datagramarik galdu gabe eutsiko dio; baina, ilara bete baino lehen buxadura arintzen ez bada, azkenean, bideratzaileak datagramak baztertzen hasi beharko du. AQM (*Active Queue Management*) teknika erabiltzen ez duen bideratzaile batean zein datagrama baztertu aukeratzeko, **Tail Drop** irizpidea erabiltzen da; hau da, ilara beteta aurkitu duen datagrama heldu berri hori baztertu egingo da. Portaera horrek sarearen neutraltasuna definitzen du: trafiko guztiak jasotzen du tratamendu bera. Hala ere, ikusi dugunez, horrelako portaerak ez die kalte bera egiten aplikazio guztiei. Datu-aplikazioek galdutako datagrama berreskura dezakete birtransmisioen bidez, emandako zerbitzuaren kalitatean eraginik izan gabe, edo eragin txikiarekin. Gure multimedia-aplikazioetan, aldiz, denbora errealekoak direnez, galdutako datagramak ezin dira birtransmititu, eta galdutako informazioak eragin zuzena izango du jasotako zerbitzuaren kalitatean. Are okerrago, kalte handiena ez dute galerek eragiten denbora errealeko aplikazioetan, ilaratan emandako itxaronaldi ezegonkorrek suertatzen duten atzerapen-aldakortasunak baizik. Horregatik, zilegi da datagrama guztiei tratu bera ez ematea ilaratan, baizik eta garraiatzen duten trafikoaren arabera (beste kontu bat da tratu berezi hori beste parametroen arabera balitz). Hori da, funtsean, **Traffic Management** izenarekin ezagunak diren teknikek egiten dutena: datagrama batzuei lehentasuna eman bideratzaile edota kommutagailuen ilaratan. Edozein datagrama izan daiteke lehentasunezkoa, baina teknika horiek IP telefoniaren eta bideo-transmisioen kalitatea bermatzeko erabiltzen dira nagusiki.

Kontuan hartu behar dugu *Traffic Management* terminoaren esanahia testuinguruaren arabera izaten dela. IP sareez ari garenean, terminoak buxadurak kudeatzeko eta datagramen sailkapenetan oinarritutako teknikak biltzen ditu (ikusi RFC 7640). Horregatik, IP sareen zerbitzuaren kalitatea bermatzeko *Traffic Management* erabiltzen denean, QoS helburua **CoS** bilakatzen dela esaten da (*Classes of Service*). Orokorrean, *Traffic Management* ahalmena duen gailu batek honako lan hauek bete ditzake:

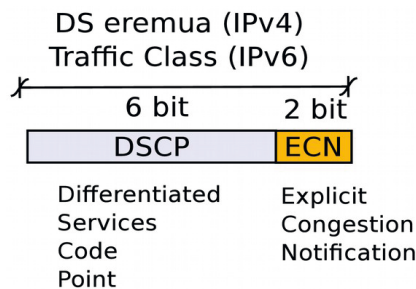
- Trafikoa sailkatzea, hau da, datagramak markatzea beren edukiaren arabera.
- Trafikoa mugatzea, hau da, sarean sartzen den trafiko kantitatea kontrolatzea, sailkapenaren edota banda-zabaleraren arabera.
- Ilarak kudeatzea, hau da, bere sailkapenaren arabera datagramak ilaratan banatzea, transmititzeko ilaretatik ateratzea, ilararen egoera zelatatzea eta, beharrezkoa denean, zein baztertu erabakitzea.

Sailkapena

Datagramen arteko lehentasunak bereizteko Interneteko proposamena DiffServ da (RFC 2475). DiffServ hizkeran, datagramak PHB (*Per-Hop Behavior*) izeneko kategorietan eta azpikategorietan bereizten dira, jaso behar duten zerbitzuaren arabera. DiffServ proposamenak zehazten ditu kategoriak, baina ez ditu zehazten kategoria bakoitzeko zerbitzuaren parametroen

balioak (galera-tasa, atzerapena...), ezta inongo mekanismorik ere zerbitzu hori lortzeko. Praktikan, horrek zera dakar: sare bakoitzeko kudeatzaileak definituko duela zer egin kategoria bakoitzeko datagramekin. Hortik sortzen da **DiffServ domeinua** kontzeptua (*DS Domain*); hau da, sare multzo bat non DiffServ kategorien tratamendua homogeneoa den. DS domeinua izendatzeko ingeleseko beste era *QoS domain* edo *QoS trust boundary* da; **QoS domeinua** edo QoS konfiantzaz-muga, alegia. Datagramen sailkapena QoS domeinuan sartzeko bideratzaileak egiten du, eta ez da aldatzen QoS domeinu osoan zehar. QoS domeinu batetik bestera igarotzean, aldiz, gerta daiteke sailkapena aldatzea, edo datagramako kategoriak jasoko duen tratamendua desberdina izatea QoS domeinu berrian, edo baita inongo kasurik ez egitea ere datagramen sailkapenari.

IPv4 eta IPv6 datagramek 6 biteko eremu bat dute beren goiburukoan sailkapena egiteko, DSCP izenekoa (*Differentiated Services Code Point*). IPv4ren kasuan, DS eremuko (*DS field*) hasierako 6 bit dira DSCPkoak, eta, IPv6 goiburukoan, *Traffic Class* izeneko eremuko aurreko 6 bitak, 4.9 irudian agertzen den moduan. Teorian, sailkapen hori datagrama sortu duen makinak berak egin dezake, baina, praktikan, normalean, *Traffic Management* egiten duen sarerako sarbidearena egiten duen bideratzaileak emango dio balioa DSCP eremuari. Hau da, DS domeinu baten sarbideko bideratzaileak sailkatzen ditu DS domeinu horretan sartzen diren datagramak.



4.9 irudia. DS eremuaren egitura, datagramen goiburukoan.

Datagramako goiburuko DSCP eremuari balioa emateko irizpidea DS domeinuko kudeatzaileak erabaki behar du, eta, horretarako, sailkapena egingo duen bideratzailea konfiguratu behar du. Horretarako, bide hauek hartzen dira gehienetan:

- IP eta garraio-mailako goiburukoetan agertzen den informazioa erabiltzea aplikazioa identifikatzeko, eta, horren arabera, datagrama sailkatzea. Erabiltzen diren goiburuko eremuak IP helbideak (helburukoa zein jatorrizkoa), portuak, edota protokoloa (TCP edo UDP) dira. Adibidez, sare korporatiboetan ohikoa da VLAN bat definitzea IP telefonoentzat; horrela, IP telefonia daramaten datagramak identifikatzen dira beren jatorrizko eta helburuko helbideen bidez (eta, normalean, UDP protokoloa garraiatzeagatik).
- Datagramak daraman aplikazio-mailako informazioari ere begiratu dakioke, hau da, DPI egin (*Deep Packet Inspection*). DPI oso teknika polemikoa da, sareko neutraltasunari, konpetentziari edota pribatutasunari egin diezaiokeen kalteagatik.

Baina ilarak eta buxadurak ez dira IP bideratzaileetan bakarrik gertatzen; Ethernet switchetan, 802.11 (wifi) sarbideetan, ATM kommutagailu zaharretan edota MPLS gailuetan ere ilarak agertzen dira. Teknologia horietan guztietan ere trafiko-lehentasunak kudeatzeko ahalmena dugu.

QoS ahalmena duten Ethernet kommutagailuek berezitu ditzakete tramak, eta horren arabera birbidali. Horretarako, Ethernet saretarako VLAN arauan (IEEE 802.1Q) definitzen da 3 biteko eremu bat sailkapena egiteko. Eremu hori Ethernet goiburukoan txertatutako VLAN etiketan dago, PCP izenarekin jasota estandarrean (*Priority Code Point*). DS domeinu baten barruan sare batetik bestera igarotzeko, Ethernet goiburuko PCP eremua mapatu egiten da datagrametako

DSCP eremuan. Mapatze hori errazteko, IEEE 802.1Q estandarrak definitzen dituen zortzi kategoria edo zerbitzu-klaseetatik (*Classes of Service, CoS*), hasierako seiak eta DiffServ estandarrak definitzen dituen sei trafiko-kategoria berdinak dira.

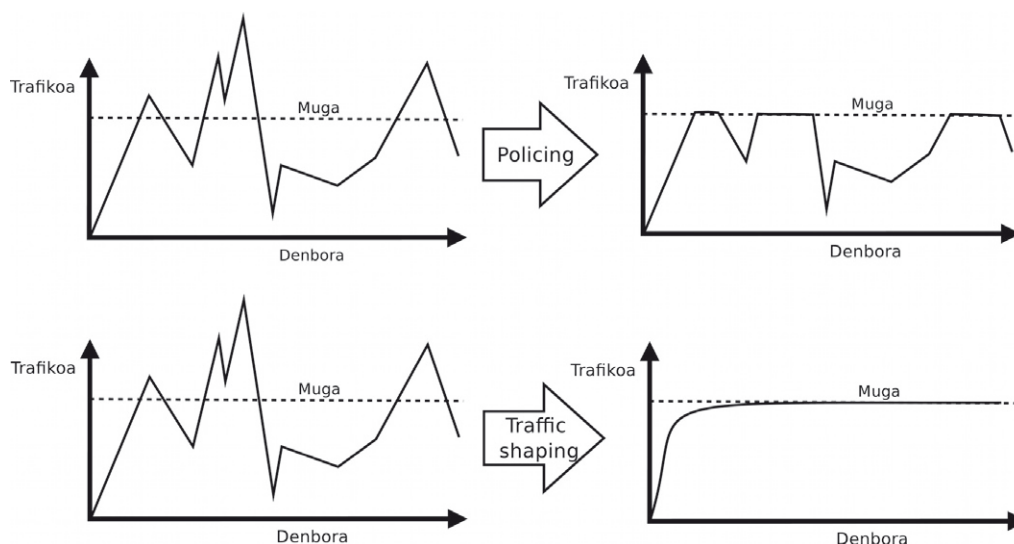
Haririk gabeko sare lokaletan (802.11 edo wifi-sareak) tramen arteko lehenetasunak bereizteko ahalmena 802.11e estandarrak gehitu zuen. Bere erabilera ohikoa da 802.11n estandarretik aurrera, eta nabaria da bere onura streaming eta VoIP aplikazioen funtzionamenduan. Lehenetasun horiek MAC protokoloan erabilitako parametro batzuk eraldatzen dituzte, partekatutako kanala nodo batek errazago bereganatzeko. 802.11 sareetan AC izena (*Access Categories*) jasotzen dute lehenetasunek, eta horietako lau lehenetasun maila ditugu definituta estandarrean.

ATM eta MPLS distantzia handiko sareetarako definitutako teknologiak dira (WAN sareak). ATM zaharkitutako teknologia da jadanik, baina MPLS oso erabilia da operadoreen sareetan. MPLS sareetan etiketa bat txertatzen da IP datagramen goiburukoan, trafikoa elkartzeko eta beraren etiketaren arabera kommutatzeko. MPLS etiketan ere, lehenetasunerako 3 bit daude definituta; kasu horretan, *Traffic Class* izenekoak. Etherneten kasuan bezala, DiffServ eta MPLS kategorien artean badago mapatze-sistema bat definituta (RFC 3270).

Trafikoa mugatzea: policing eta traffic shaping

Trafikoa mugatzeko teknikak (*traffic metering* edo *rate limiting* ere deituak) epe batean interfaze batetik zenbat byte ari diren jasotzen edo igortzen zelatatzen dute, aurretik konfiguratutako muga bat ez dela gainditzen bermatzeko. Horrela, QoS domeinu batean sartzen den trafikoa kontrolpean edukita, domeinu horren barneko kongestioak ekiditen ditugu, eta, horrekin batera, beren QoS-rako ondorio txarrak, hau da, datagramen galerak eta atzerapenaren aldakortasuna. Bi eratako kontrola egin daiteke:

- *Policing*: ezarritako muga gainditzen duen trafikoa baztertzen da, edo birsailkatzen, haren lehenetasuna jaisteko.
- *Traffic shaping* edo trafikoa moldatzea: muga gainditzen duen trafikoa ez da baztertzen, baizik eta buffer batean gordetzen da, geroxeago birtransmititzeko. Bere helburua da trafikoa konfiguratutako abiadurara egokitzea, segida bateko datagramak bakanduz azkarregi heltzen ari badira.



4.10 irudia. *Policing* eta *Traffic shaping* kontrolen arteko aldea.

Bi teknikak oso antzekoak dira, eta, askotan, nahastu egiten dira. Bien arteko aldea 4.10 irudian azaltzen da. Biak erabiltzen dira QoS domeinuan sartzeko bideratzaileetan, QoS domeinu horretan trafikoa txertatzen duten erabiltzaileekin hitzartutako fluxuak kontrolatzeko.

Policing inplementatzeko, *token-pertza* izeneko algoritmoa erabiltzen da (*token bucket*), eta, *Traffic shaping* egiteko, oso antzekoa den zulatutako pertzarena (*leaky bucket*). Token-pertzaren algoritmoa kontagailu baten bidez inplementatzen da. Hona hemen haren bertsioetako bat:

```
E hasieratu;
while (beti)
  Itxaron: (Datagrama berri bat heldu arte
  kontagailua := kontagailua + X;
  if (kontagailua > MUGA),
    then datagrama bota (edo birsailkatu eta birbidali);
  else birbidali datagrama;
    if (E denbora igaro da)
      then kontagailua := kontagailua - E*R;
      E hasieratu;
end while;
```

X heltzen den datagramaren tamaina da. R parametroa interfaze horri dagokion batez besteko abiadura da. E trafikoa kontrolatzeko epea da. MUGA parametroa segidan bidal daitezkeen bit kopurua da, hau da, gehienez zenbat bit bidal daitezkeen E denbora-epe batean. Kontagailua ezin da balio negatiboa izan. Adibidez, demagun kontrolatu behar dugula erabiltzaile batek sarean sartzen duen trafikoa (goranzko trafikoa) ez izatea 50 Mb/s baino handiagoa, nahiz eta haren sare-txartela 100 Mb/s abiadurakoa izan. Aldi berean, 100 ms-ko epe batean onartuko diogu segida bat abiadura fisikoan transmititzea. Erabiltzaile horren sarrera den interfazean, honelako konfigurazioa egin behar genuke:

$$R = 50 \text{ Mb/s} \qquad E = 0,1 \text{ s} \qquad MUGA = 10 \text{ Mb}$$

Trafikorik gabeko epe baten ondoren, kontagailuaren balioa zero izango da. Orduan segida bat hasten bada, bideratzaileak 10 Mb-era arte onartuko du hasierako epean, nahiz eta 50 Mb/s-ko abiaduran 5 Mb besterik ezin duen bidali 100 ms irauten duen epean. Hurrengo epeetan, aldiz, soilik 5 Mb onartuko ditu bideratzaileak, epearen hasieran kontagailua 5 Mb balioan egongo delako. Horrela, azkenean, batez besteko abiadura izango da, gehienez, hitzartutako 50 Mb/s hori. E segundoko epe batean baino luzeagoan erabiltzaileak igortzen baditu 50 Mb/s baino gehiago, azkenean, interfaze horren sarrerako bufferrak gainezka egingo du, eta datagramak baztertzen hasiko da. Hori ekiditeko, erabiltzaileak sareko administratzailearekin hitzartutako gehienezko abiadura handitu behar luke, edo sortzen duen trafiko kantitatea jaitsi. Sistema horretan, jasotzen den datagramaren tamaina maximoko buffer bat behar da lineako sarreran, gehiago ez. Zulatutako pertza izeneko algoritmoa buffer baten kudeaketan datza. Hona hemen haren funtzionamendua:

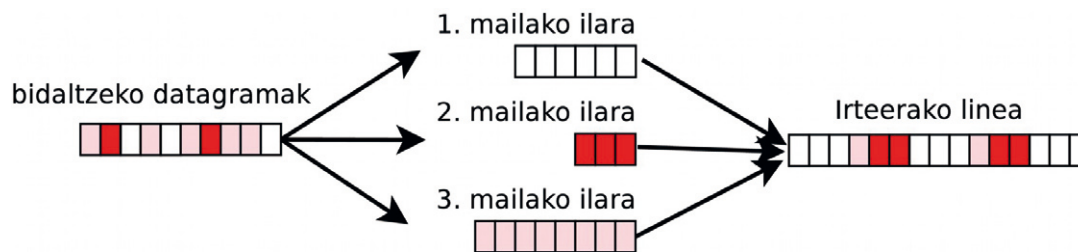
```
E hasieratu;
while (beti)
  Itxaron: (Datagrama berri bat heldu arte
  edo
  (E agortu arte);
  if (datagrama berri bat heldu da)
    if (bufferrean tokia dago)
      then onartu;
    else baztertu;
  if (E denbora igaro da)
    then atera bufferretik datagrama bat eta bidali;
    E hasieratu;
end while;
```


Kasu horretan, bufferraren tamaina eta E parametroa konfiguratu behar dira. Orain, bufferraren tamainak mugatzen du zenbatekoa izango den gehienez onartuko den segidaren tamaina. Adibidez, demagun erabiltzaile batek kontratatu duela saretik 50 Mb/s jasotzea (beheranzko trafikoa), baina haren sareko konexioaren abiadura fisikoa 100 Mb/s dela. Erabiltzaile horrekiko konexioa egiten duen bideratzailearen konfigurazioan trafikoa mugatzeko epea 0,1 segundo bada, erabiltzaile horri dagokion lineako irteerako bufferraren tamainak ez luke 5 Mb baino handiagoa izan behar. Hala ere, 10 Mb tamainako bufferra konfiguratu dezakegu, eta, horrela, 100 Mb/s-ko abiaduran 0,1 segundoko segidak onartuko ditu bideratzaileak, saretik erabiltzaileari birbidali baino lehen. Denbora luzeagoan saretik datagramak sartzen badira bideratzailean 100 Mb/s-ko abiaduran, bufferrak gainezka egingo du. Informazioa saretik bideratzailean sartzen den abiadura edozein izanda ere, bideratzailetik beti ateratzen da, batez beste, kontratatutako abiaduran. Algoritmoak, berriz, jasotako fluxua kontratatutako abiadurara moldatzen du. Hau da, *Traffic shaping* egiten du. Ohartu token-pertza algoritmoak ez duela abiadura moldatzen; muga ez gainditzea (*Policing*) kontrolatzen du soilik, baina jasotako abiadura berberean birbidaltzen du onartzen duen trafikoa.

AQM teknikak: scheduling eta ilaren kudeaketa (*queue management*)

Atal honen hasieran aipatu dugunez, Internet irekian dauden bideratzaile gehienak neutralak dira, hau da, datagrama guztiek jasotzen dute *best effort* tratua bera, FIFO eta *Tail Drop* estrategiak jarraituz. Ilarak kudeatzeko horren alternatiba AQM teknikak dira. Ilaretatik atera eta datagrama bidaltzeko, *scheduling* edo *dispatching* izenekin biltzen diren estrategiak dira FIFOren AQM alternatiba. Ilaren betetze-maila kudeatzeko, *Tail Drop* egitearen ordez, **ilaren kudeaketa** (*queue management*) egitea proposatzen du AQMk.

Dagoen banda-zabalera trafiko mota desberdinen artean banatzeko erabiltzen dira *dispatching* algoritmoak. Beren oinarria da bidaliko den hurrengo datagrama aukeratzea kontuan hartuta datagramen sailkapena. Kategoria bakoitzeko trafikoa ilara berezitu batean sartzen da, eta, gero, bideratzailearen artean txandaka ibiltzen da datagramak ateratzen. Txandak uniformeki banatuta badaude ilara guztien artean, **Fair Queuing** izena hartzen du *dispatching* era horrek. Bere erabilerak ekiditen du trafiko mota batek banda-zabalera gehiena bereganatzea, beste trafiko moten kalterako. Edo beste era batean ikusita, trafiko mota guztiei bermatzen die banda-zabaleraren gutxieneko bat. Adibidez, kopuru absolutuan gutxi izan daitekeen VoIP trafikoari berma diezaiokegu behar duen banda-zabalera, beste kategorien gehiegizko datu-trafikoak kongestio bat eragiten duen uneetan. Kasu horretan, datu-trafikoak bakarrik pairatu beharko luke berak eragindako buxaduraren eragina.



4.11 irudia. *Weighted Fair Queuing*. Patroia 111-22-3 da.

Txandak ez badira uniformeki banatzen ilaren artean, WFQ (*Weighted Fair Queuing*) izeneko *dispatching* estrategia erabiltzen dela diogu. *Fair Queuing* eta WFQ arteko aldea ikusteko, demagun hiru trafiko mota ditugula; hiruren artean *Fair Queuing* eran banatzen bada linea, 1-2-3 patroia erabiltzen da; hau da, lehenengo kategoriako datagrama bat hartzen da, gero bigarren kategoriako beste bat, gero hirugarren kategoriako beste bat, eta, gero, berriz hasten da zikloa. Beste

era batean esanda, *Round Robin* moduan bidaltzen dira hiru ilaretako datagramak. Baina, WFQ kudeaketa egin nahi badugu, lehenengo kategoriarako banda-zabalera osoaren erdia gordetzeko, herena bigarrenarentzat, eta gelditzen den banda-zabaleraren 1/6 zatia azken kategoriarentzat, orduan, patroia izango da 111-22-3 (ikusi 4.11 irudia). Multimedia-aplikazioen trafikoa lehenetsi nahi badugu, bide bat WFQ erabiltzea da, eta banda-zabalera handiagoa gordetzen da multimedia kategorian sailkatuta dauden datagramentzat.

Tail Drop estrategiaren alternatiba diren **ilaren kudeaketa** (*queue management*) tekniken helburua da ilaren luzera kontrolpean edukitzea, eta, buxadurak suertatzean, eragindako kaltea fluxu desberdinen artean banatzea. Erabilitako teknikak **RED** (*Random Early Detection* edo *Random Early Drop*) izeneko algoritmoaren aldaerak dira gehien, ECN biten erabilerarekin osatuta.

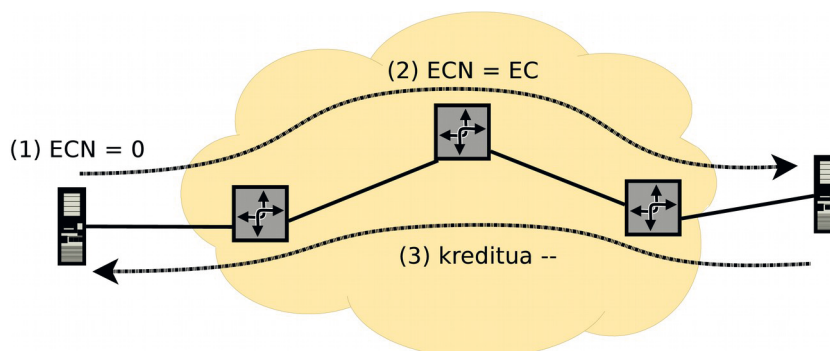
RED erabiliz, datagrama bat baztertua izateko probabilitatea ilararen betetze-mailaren arabera da. Ilara hutsik badago, etorriko den lehenengo datagrama baztertua izateko probabilitatea zero izango da. Ilara betetzen den heinean, probabilitate hori handitu egingo da, eta, beraz, baliteke ilara beteta egon gabe datagrama bat baztertua izatea. Orokorrean, sare-ingeniariei zaila egiten zaie datagrama bat sakrifikatzea ilaran tokia egonda, bermatu gabe datagrama hori orduan botatzeak gero datagrama gehiago bota behar ez izatea ekarriko duela. Horregatik, kritika eta zalantza ugari argitaratu dira RED inguruan. Egungo RFC 7567 agiriak —AQM kontzeptua eta RED algoritmoa definitu zuen RFC 2309 ordezkatu duenak— gomendatzen du AQM erabiltzea, haren erabileraren onura onartuta baitago Interneten, baina ez du babesten inongo AQM algoritmo konkreturik. REDen ondotik, algoritmo asko agertu dira, haietako asko RED beraren aldaerak: REM, RRED, RED-PD, SFB, PI kontrola...

Nolanahi ere, AQM teknika hauek guztiek egiten duten buxaduraren tratamendua erreaktiboa da; hau da, neurriak hartzen dira soilik arazoa agertu eta gero, buxadurak eragindako kalteak nolabait minimizatzeko, eta kalte hori eginez errekuperatzeko aukera duten aplikazioetan soilik. Buxadurak kudeatzeko beste estrategia bat prebentzioa da, hau da, buxadura gertatu baino lehen ekitea, buxadurarik sor ez dadin. Estrategia prebentiboek bideratzaileen eta sareari lotutako makinaren arteko komunikazioa behar dute, sareak (bideratzaileek, alegia) bere erabiltzaileak (zerbitzariak eta erabiltzaileen makinak, *hostak* alegia) buxaduraren arriskuaz ohartarazteko beren ilarek gainezka egin baino lehen. Komunikazio hori gauzatzeko, ECN bitak gehitu dira IP datagramen goiburukoan (*Explicit Congestion Notification*, RFC 3168). Bit horiek berak agertu zitzaizkigun DiffServ sailkapena azaldu genuenean, DS eremuaren azken bi bitak baitira (ikusi 4.9 irudia). Honako lau kode hauek gorde daitezke bit horietan:

- 00 – *Non ECN-Capable Transport*, Non-ECT.
- 10 – *ECN Capable Transport*, ECT(0).
- 01 – *ECN Capable Transport*, ECT(1)
- 11 – *Congestion Encountered*, CE.

Komunikazioaren bi muturretako makinek, gai badira ECN bitak erabiltzeko, ECT(0) edo ECT(1) kodea erabili behar dute isurtzen duten datagrametan. Horrela egiten du 4.12 irudiko 1. urratsean ezkerreko makinak. Bi kodeak baliokideak dira, eta, beraz, edozein erabil dezakete. Kode bakarra behar bada (normalena), RFC 3168 agirian gomendatzen da ECT(0) erabiltzea. Horrelako kodea daraman datagrama bat ECN gai den bideratzaile batetik igarotzen denean, bideratzaile horretan buxadura-arriskua badago, bideratzaileak CE bilakatuko du ECN kodea, 4.12 irudiko 2. urratsean egiten den moduan. Hartzaileak, horrelako kodea atzematean, neurriak har ditzake buxadura suertatu baino lehen. Neurri horiek, benetan, neurri bakarra dira: beste aldeari egoera jakinarazten zaio, transmititzeko erritmoa apaldu dezan. Teorian, lan hori garraio- edo aplikazio-mailako protokoloek egin dezakete, baina, praktikan, soilik garraio-mailan egin daiteke, sistema eragileek ez dietelako biderik ematen aplikazioei ECN bitekin lan egiteko. Garraio-mailako protokoloen artean ere, soilik fluxu-kontrolerako mekanismoak dauzkatenek badute aukera ECN bitekin lan egiteko, soilik protokolo horietan baitu modua har-

tzaileak igorleari jakinarazteko bere erritmoa mantsotu behar duela. Hori da TCPren kasua, kredituen bidez, eta ez, aldiz, UDPrena. Irudiko bi makinaren arteko komunikazioa TCP bidez egiten denez, eskuinteko makinak, EC kodea daraman datagrama jaso duenean, beste aldeko makinari TCP kreditua jaitسي dio irudiko 3. urratsean. ECN erabiltzen duen beste garraio-protokolo bat DCCP da (*Datagram Congestion Control Protocol*, RFC 4340). Protokolo hori multimedia-aplikazioentzat diseinatu zen bereziki, UDPren eta TCPren arteko alternatiba gisa. Baina, aurreko kapituluetan ikusi dugunez, aplikazio horiek nahiko ondo moldatu dira betiko TCP edo UDP erabilia, eta DCCP protokoloak, aldiz, arrakasta eskasa izan du.

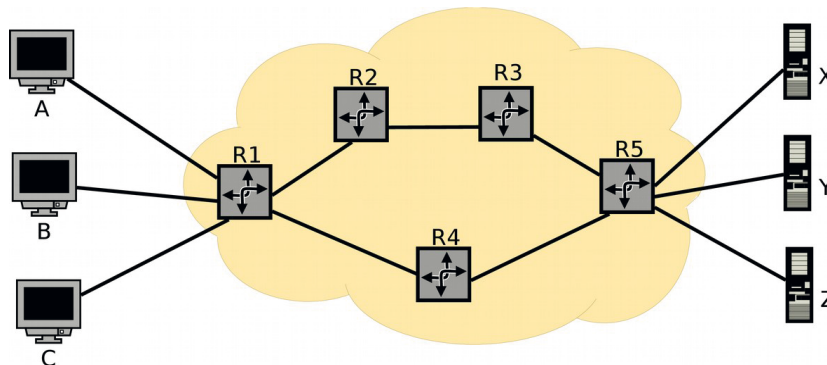


4.12 irudia. ECN biten erabilera TCP konexio batean. Gorriz dagoen bideratzailea kongestionatuta dago.

2.2. Trafiko-ingeniaritza (*Traffic Engineering*)

Trafiko-ingeniaritzak ECN biten estrategia bera bilatzen du: buxadurak guztiz ekiditea, neurriak hartuz buxadura suertatu baino lehen. Horretarako, datagramak elkartzen ditu fluxuetan, trafikoaren bilakaera sarean planifikatu eta kontrolatu ahal izateko.

Trafiko-ingeniaritzak konpondu nahi duen arazoa ulertzeko, ikus dezagun 4.13 irudiko sarea. Demagun une batean $A \rightarrow Z$, $B \rightarrow X$ eta $C \rightarrow Y$ trafikoak dabiltzala sarean. Barruko bideratze guztia ohikoa den SPF moduan (*Short Path First*) egiten bada (OSPF edo antzekoa den beste edozein protokolo erabiliz), eta distantziak neurtzeko bideko bideratzaile kopurua erabiltzen bada, hiru trafiko horiek igaroko dira R1-R4-R5 ibilbidean. Trafiko bakoitza 1 Mb/s-ko mugitzen bada, eta bideratzaileen arteko linea guztiak 3 Mb/s-koak badira, R1-R4 eta R4-R5 lineak dagoeneko kolapsatuta egongo dira, eta, beste edozein trafiko hortik bideratzen bada, buxadura sortu eta datagramak galtzen hasiko dira. Bien bitartean, R1-R2-R3-R5 bidea hutsik egongo da, alferrik. Hobe genuke trafikoren bat bideratzea beste bide horretatik. Hori da trafiko-ingeniaritzako teknikak egiten dutena.



4.13 irudia. Sare-topologia SPF protokoloen arazoak azaltzeko.

Merezi du aipatzea Interneten erabiltzen diren bideratze-protokoloek ez dutela balio trafikoa-ren banaketa optimoa egiteko, lehen aipatutako beren SPF izaera horrengatik. OSPF, RIP, IS-IS eta antzekoak diren protokolo horiek guztiek biderik laburrena aukeratzen dute beti puntu batetik bestera joateko, eta ez dituzte beste bide alternatibo guztiak kontuan hartzen datagramak birbidaltzerakoan. Protokolo horiek aukera ematen dute aukera egiterakoan baloratzen diren parametroen balioa egokitzeko; baina horrek ez du arazoa konpontzen, tokiz aldatzen baizik. Adibidez, aurreko kasu berean, arazoa konpontzeko lineen pisua aldatuko bagenu, R1-R2-R3-R5 bidea lehenesteko trafiko guztia bidez aldatuko genuke, eta, R1-R4-R5 bidea kolapsatuta egon ordez, R1-R2-R3-R5 izango genuke gainezka. Gakoa dago bideratzaileetan datagrama egiten zaien banakako tratamenduan. Irudiko bi bide posibleen arteko trafikoa banatzeko, hobe dugu helburu bera duten datagramak nolabait bitan banatzea, gero datagramak bere taldearen arabera bide batetik edo bestetik bideratzeko, eta ez datagrama bakoitza bere helburuko IP helbidearen arabera. Datagramen elkartze horretarako erabiltzen dira fluxuak.

Fluxuak bideratzen

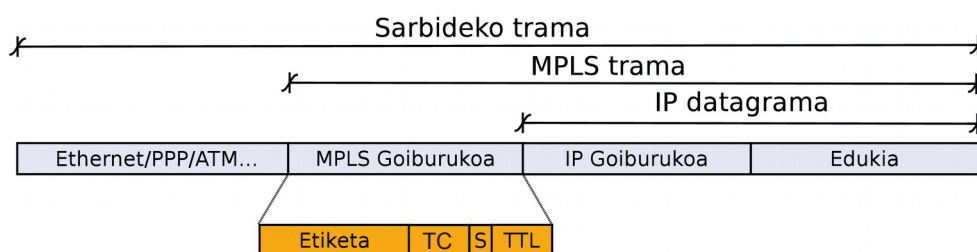
Datagrama-fluxu bat, trafiko-fluxu bat edo sareko fluxu bat datagrama talde bat da; datagrama horiek guztiek zenbait ezaugarri amankomun dituzte; gutxienez, iturriko eta helburuko helbideak. Horietaz gain, gainera, normalean iturriko eta helburuko garraioa portua eta IP datagramako `protocol` eremuko balioa hartzen dira fluxuak identifikatzeko, 5-tupla bat osatuz. Adibidez, bi makinaren arteko IP telefono-saio bati dagozkion datagramak fluxu batean elkartu daitezke, eta makina beren arteko web-deskarga bati dagozkionak beste fluxu batean. Ikusten denez, *fluxu* kontzeptua oso gertu dago *konexio*, *saio* edo *zirkuitu* kontzeptuetatik. Baina fluxua zabalagoa eta malguagoa da: fluxu batean hainbat saio, konexio edo zirkuitu elkartu daitezke.

Fluxu bereko datagrama guztiek QoS bera jaso behar dute saretik. Denbora errealeko aplikazioei dagokienez, fluxu bereko datagrama guztiek ibilbide bera egin behar dute sarean, beren iturritik helmugaraino heltzeko. Bestela, ibilbide desberdinak edukita, datagrama bakoitzak sare-latentzia desberdina izango luke, atzerapenaren aldakortasuna nekez izango litzateke egonkorra, eta, ondorioz, sareak emandako QoS eskasa litzateke. Beraz, trafiko-ingeniaritza gauzatu ahal izateko, datagramak fluxuetan elkartzeko eta kudeatzeko moduren bat behar dugu. Gero, bideratzaileetan fluxuak birbidaltzeko taulak osatzeko, eta, batez ere, dinamikoki eguneratzeko, beste mekanismoren bat ere beharko dugu. Bi lan horietarako, hainbat proposamen agertu dira, baina MPLS eta RSVP-TE bikoteak izan du arrakasta xx. mendearen amaieratik. Aipatzekoa da fluxuekin eta, orokorrean, trafiko-ingeniaritzarako lan egiteko ahalmen handia erakusten duen beste teknologia bat SDN dela (*Software Defined Networking*). Hala ere, testu hau idaztean, SDNk ez du oraindik lortu MPLSk duen arrakasta gutxitzea.

MPLS eta RSVP-TE

MPLS (*MultiProtocol Label Switching*, RFC 3031, RFC 3032) xx. mendearen azken hamarkadan aurkeztutako teknologia da. Garai horretan, bideratzaileen ahalmena arazo bat zen, ez baitziren kapaz Interneten sortzen zen trafiko guztia behar den abiaduran birbidaltzeko. Denbora gehiegi ematen zuten datagrama bakoitzeko, batez ere birbidaltze-taulak atzitzen, helburuko IP helbideari zegokion irteeraren bila. Arazoa CIDR helbideratze-sistema zabaldu zenean lehertu zen, helbideen aurrezenbakia edozein luzeratakoa izan zitekeelako; birbidaltze-taulen tamaina ikaragarri handia bilakatu, eta, azkenean, taula horietan datagrama bakoitzeko egin behar zen bilaketa asko luzatu zen. Horrek zirkuitu birtualen bidezko teknologietara eraman zuen berriz arreta: paketeak birbidaltzeko, ez da bilaketa bat egin behar taula batean, baizik eta indexatu egiten da taula horretan. Ohartu askoz azkarragoa dela taula batean indexatzea bilatzea baino, bideratzaileak ez duelako alderatu behar paketeko helburuko helbidea birbidaltzeko taulako sarrera bakoitzarekin, banan-banan, baizik eta paketeak grabatuta dakarren zirkuituko identifikadoreak azaltzen duen birbidaltze-taulako sarrera hartu behar du.

MPLSk komunikazio-arkitekturan duen kokapena 4.14 irudian ikus daiteke, MPLS goiburukoaren kokapena eta egitura agertzen baitira. Ikusten denez, MPLS goiburukoak IP datagrama kapsulatzen du. Gero, MPLS paketea transmisio-teknologiaren bateko trama batean kapsulatu behar da, linea batetik bidali ahal izateko. Ohartu MPLS gailu bat paketeak konmutatzeaz arduratzen dela soilik, eta ez paketeak sare batetik fisikoki transmititzeaz. Horregatik du horren goiburuko sinplea: ez dago erroreak atzemateko koderik, sinkronizaziorako mekanismorik, ezta linea-kontrolak behar dituen beste inongo eremurik ere. Irudiko sarbideko goiburuko Ethernet trama batena izan daiteke, sare lokal baten bidez bi MPLS gailu konektatzen ari bagara; PPP trama batena, linea baten bidez bi MPLS gailu horiek lotzen baditugu; ATM gelaxka, ATM sare bat erabiltzen badugu lotura horretarako, edo beste edozein sare-teknologiaren goiburukoa. Erabiltzen den kasu bakoitzeko argitaratu da nola txertatu MPLS goiburukoa IP goiburukoaren eta sare-teknologiakoaren artean. Askotan, MPLS goiburukoa erabilitako sare-teknologiaren tramaren goiburukoaren hedapentzat hartzen da. Horregatik argitaratzen da RFC agiri bat, MPLSrekin batera erabili nahi dugun sare-teknologia bakoitzeko.



4.14 irudia. MPLS goiburukoa, IP eta sarbide-geruzen artean kokatuta.

MPLS goiburukoan dugun eremurik garrantzitsuena etiketa-zenbakia da (*label*), horrek identifikatzen baitu datagrama multzoa. Beste hiru eremuak hauek dira: S izeneko (datagrama multzoak aldi berean elkartzeko, supermultzo erako taldeetan), TTL (IP datagramen antzeko *Time To Live* iraungitze-eremua) eta trafikoa sailkatzeko TC (*Traffic Class*) izeneko hiru bitak (2009 arte, eta agiri askotan oraindik, EXP bitak deituak; ikusi RFC 5462). MPLS gailuek etiketa-zenbakia erabiltzen dute fluxuak identifikatzeko, eta, beraz, horren arabera birbidaliko dituzte datagramak linea batetik edo bestetik. Datagrama MPLS sare batean sartzean, sarrerako MPLS gailu horrek MPLS goiburukoa gehituko dio datagramari, etiketa bat esleituz. Esleipen horrekin, datagramaren ibilbide osoa MPLS sarean zehar definituta geldituko da. Hau da, bideratzeko erabakia, datagramaren helburuko IP helbidean oinarrituta, behin bakarrik hartuko da MPLS sarean, atarian, eta berdina izango da fluxu bereko datagrama guztientzat. Datagramak gero zeharkatuko dituen beste MPLS gailu guztiek etiketa kontsultatuko dute MPLS paketea birbidaltzeko, eta ez helburuko IP helbidea. MPLS sareko azken gailuan, MPLS goiburukoa kendu egingo dute, eta jatorrizko IP datagrama birbidaliko dute MPLS saretik kanpora.

Sareko MPLS gailuek behar dituzten etiketekin osatutako birbidaltze-etaulak betetzeko, sareko informazio topologikoa behar da. Informazio hori lortzeko, MPLS gailuek dagoeneko definituta dauden IP barne-bideratzeko protokolo berberak erabiltzen dituzte (adibidez, OSPF). Informazio horrekin aurkitu daiteke zein den ibilbide laburrena fluxu bakoitzeko MPLS sarean zehar. Behin ibilbidea finkatuta, MPLSrekin batera definitutako LDP protokoloa (*Label Distribution Protocol*) ezarri zen ibilbideko bideratzaileen birbidaltze-etaulak eguneratzeko. Trafiko-ingeniaritza gauzatzeko, ordea, informazio topologikoa gain, QoS bermatzeko beste informazioa ere behar da ibilbideak ezartzean (batez ere, lineen okupazioa), eta informazio hori eguneratuta izan behar dute bideratzaileek. Jatorrizko barne bideratzeko protokoloak eta LDP horretarako prestatuta ez zeudenez, alternatibak bilatu behar ziren. Barne-bideratzeko protokoloak dagokienez, beren hedapenak definitu dira trafiko-ingeniaritzarako; adibidez, OSPF-TE (*OSPF-Traffic Engineering*). LDPren

kasuan, ordea, definitu zen hedapena ez da nagusitu, eta bere ordeztu RSVP-TE (*ReSerVation Protocol-Traffic Engineering*, RFC 3209, RFC 5151) protokoloa erabiltzen da. Fluxu bati dagokion ibilbidea ezartzean protokolo horiek erabilita, trafiko bat sarean onartu baino lehen bermatzen da sareak izango duela trafiko horrek beharko dituen baliabideak; funtsean banda-zabalera. Adibidez, 4.13 irudia berriz erabilita, dagoeneko A→Z eta B→X fluxuak ari badira bideratzen R1-R4-R5 ibilbidetik, eta C→Y beste fluxu bat ezarri behar badugu sarean, fluxu horri esleituko zaion bidea R1-R2-R3-R5 izango da. Ondorioz, sareak duen ahalmen guztia ondo erabiliz, buxadurak ekidin dira; bilatzen genuen helburua, hain zuzen.

Hala ere, MPLSren erakargarritasuna ez datza soilik bere trafikoa planifikatzeko ahalmenean. Oso baloratua den bere beste ezaugarri bat da haren malgutasuna eta arintasuna sareko birkonfigurazioei aurre egiteko; hau da, linea batek kale egiten duenean, segituan bide alternatiboetatik trafikoa bideratzeko bere ahalmena. MPLSren ahalmen horri *Fast Reroute* izena eman zaio (RFC 3469). IP sare arrunt batean, linea batek kale egiten duenean, orduan abiatzen da bide alternatiboak definitzeko prozedura. Prozedura horrek segundo batzuk har ditzake. Sareko bideratze-sistemako trantsizio-denbora kritiko horri **konbergentzia-denbora** deritzo. MPLS sareetan, konbergentzia-denbora askoz txikiagoa da, milisegundo batzuk besterik ez, bide alternatibo horiek aurretik kalkulatu eta ibilbideko makinaren tauletan kargatuta daudelako, lineako akatsik itxaron gabe. Arazo bat dagoenean, arazoa duen bideratzaileak unean bertan aktibatzen du kale egin duen linea saihesteko ibilbidea, beste bideratzaileekin ezer komunikatu behar izan gabe. Denbora errealeko aplikazioentzat, beste behin, oso egokia da arintasun hori.

MPLS agertu eta gutxira, ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) teknologien erabilierak nabarmen azkartu zuen bideratze-lana, eta, egun, IP mailan birbidaltzea MPLS mailan egitea bezain azkarra da. Horregatik, MPLS birbidaltze-prozesua azkartzeko asmoz garatu bazen ere, gero arrakasta ez zaio ustezko azkartze horri zor, bere trafiko-ingeniaritzarako ahalmenari baizik, eta, orokorrean, bere QoS-rako ahalmenari. Egun, oso erabilia da maila guztietako Internet hornitzaileen sareetan, beren azpiegituren era optimoan ustiatzeko ematen duen aukerengatik, eta, ondorioz, beren bezeroei eskaini diezaikekeen QoS-rengatik. Interneterako sarbidea emateko ez ezik, sare korporatiboen distantzia handiko lineak (WAN, edo *Wide Area Network* lineak) VPN bidez ezartzeko ere oso estimatua da MPLS. VPNak (*Virtual Private Network*) alokatutako lineen ordeztukoak dira. Haiei esker, askoz merkeagoa da enpresen eta erakundeen WAN sare pribatuak eraikitzea eta kudeatzea.

QoS eta gaindimensionamendua

Sareak ez duenean ahalmen nahikoa txertatzen zaion trafiko guztia mugitzeko, QoS teknikak ezer gutxi lor dezakete buxadurak, galerak eta atzerapenak ekiditeko. Kasu horretan, bide bakarra sarea handitzea da, linea gehiago edota banda-zabalera handiagokoak ezarriz, eta bideratzaile ahaltsuagoak erabiliz. Bide hori harago eramanda, badago planteatzea sarea gaindimensionatzea (*overprovisioning*) buxadurak inolaz ere ez agertzeko, ezta ezohiko trafiko-boladak agertzen direnean ere. Kontuan hartuta azken urteetako banda-zabaleraren merkatzea, zilegi da aukeratzea azpiegiturretan inbertitzea QoS teknologia konplexuetan inbertitzea baino. Ikuspuntu hori bereziki erakargarria da *Traffic Management* teknikekin alderatuta, teknika horiek *a posteriori* baitira, eta, berez, ez dituzte buxadurak ekiditen, beren kaltea arintzen baizik. Dena dela, *Traffic Management*, trafiko-ingeniaritza, eta gaindimensionamendua ez dira hartu behar elkar bazterten duten teknologia bezala, baizik eta elkarren osagarri bezala. Hortaz, ohikoa izango da sarea gaindimensionatuta izatea, baina aldi berean trafiko-ingeniaritza erabiltzea azpiegitura horiek ahal den hoberen erabiltzeko, eta, gainera, trafikoa sailkatuta tratatzea bideratzaileetan, hala eta guztiz ere ezohiko trafiko-punta batek eragiten badu buxadura, horren kalteak minimizatzen.

3. Banda zabaleko sarbide-sareak

Historian zehar, zerbitzu telematiko berri bat agertu den bakoitzean, telekomunikazio-sare propioa eraiki izan da zerbitzu horretarako. Horrela, telegrafoarako, telefoniarako, irratirako, telebistarako, eta datuetarako sare-azpiegiturak ugaritu egin dira gure lurralde eta hirietan, zerbitzu horiek hedatu diren heinean. Egun, telegrafo-sarea da desmuntatu den bakarra, beste zerbitzuek telegrafoa zaharkitua utzi dutenean. Beste telekomunikazio-sare guztiak hor daude, ordea. Hala ere, xx. mendean bertan hasi ziren zenbait zerbitzu sare berean integratzeko ahaleginak, azpiegiturak sinplifikatzeko, zerbitzuak hobetzeko, eta kostuak jaisteko asmoz. Horrela, herri batzuetan, kable ardazkideko sareen bidez batu zituzten telebista- eta telefonia-zerbitzuak etxeetan, eta, horrez gain, ISDN estandarrek (*Integrated Services Digital Network*) telefonia eta datuen zerbitzuak batera eskaini zizkien enpresei. Baina, bi kasuetan, integrazioa mugatua zen, zerbitzu guztiak ez baitziren integratzen, eta soilik sarbide-sareari ekin baitzion integrazio partzial horrek. Hau da, telebistak, telefonoak eta datuek, bakoitzak bazuen bere ardatz-sarea, eta soilik azken zatian erabiltzen ziren sare integratuak zerbitzuak erabiltzailearenganaino heltzeko.

Internet egoera hori iraultzen ari da, telekomunikazio-zerbitzuak fagozitatzen dituen heinean. Internet datu-zerbitzuetarako diseinatu zen, baina beste sareek ematen dituzten zerbitzuak ere banan-banan bereganatu ditu. Egun, gure Interneterako konexioa erabiltzen dugu telefonoz hitz egiteko, telebista ikusteko, irratia entzuteko edo, noski, gure datu-aplikazioetarako. Sare bakarra da, edozein zerbitzuetarako balio duena. Beste telekomunikazio-sare zaharrek iraun egiten dute, baina argia dirudi trantsizio-epe batean murgilduta gaudela, eta beste sareen etorkizun bakarra desagertzea edo Internet multimediararen zati bilakatzea dela. Aldaketa nabaria izaten ari da etxeetan eta enpresetan: etxeetan, amaitzen ari da alde batetik telebistarako antena eta beste batetik telefonorako konexioa ezartzea; enpresetan, berriz, jada ez du zentzurik alde batetik telefono-zerbitzurako linea kontratatzeak eta, bestetik, datuetarako konexioa kontratatzeak. Sare eta zerbitzuen integrazioko testuinguru horretarako sortu dituzte banda zabaleko azpiegiturak, erabiltzen ditugun telekomunikazio-zerbitzu guztiak garraiatzeko kapazak diren sareak. Zerbitzu horiek guztiak IP protokoloaren bidez ematen direnez, multimedia-Interneterako sare-azpiegiturak dira. Atal honetan, beraren sarbiderako zatian zentratuko gara.

Sarbide-sareak sortzea operadoreen ardatz-sareak eraikitzea baino garestiagoa da, beren kapitalitate handiarengatik. Eskala kontua da: Internetera lotu nahi ditugun etxe eta eraikin guztiataraino heldu behar dute sarbide-sareek. Linea xumeek osatzen dute, baina, milioika izanik, edozein aldaketa egiteak oso kostu handia du. Telekomunikazio-hizkeran, sare horiek dira «**azken zatia**» (*last mile*). Izena ondo jarrita dago bigarren zentzu batean ere, sare hori baita azkena hobekuntza teknologikoak jasotzen. Adibidez, zuntzaren kasuan, gure etxe eta enpresen atariraino iritsi zenerako, aspalditik zegoen operadoreen barruko sareetan eta beren arteko loturretan. Internet bidezko telebista eta streaming-teknologiak aztertu genituenean, aipatu genuen nolako garrantzia izan duen sarbide-sareen banda-zabaleraren handitzeak teknologia horien hedapenerako, hor egon baita, urteetan, hainbat multimedia-aplikazioren botila-lepoa. Azter dezagun orain nolakoak diren banda zabaleko sarbide-sare horiek. Kable bidezkoak dira batzuk, eta kablerik gabekoak besteak.

3.1. Zuntz optiko bidezko sareak

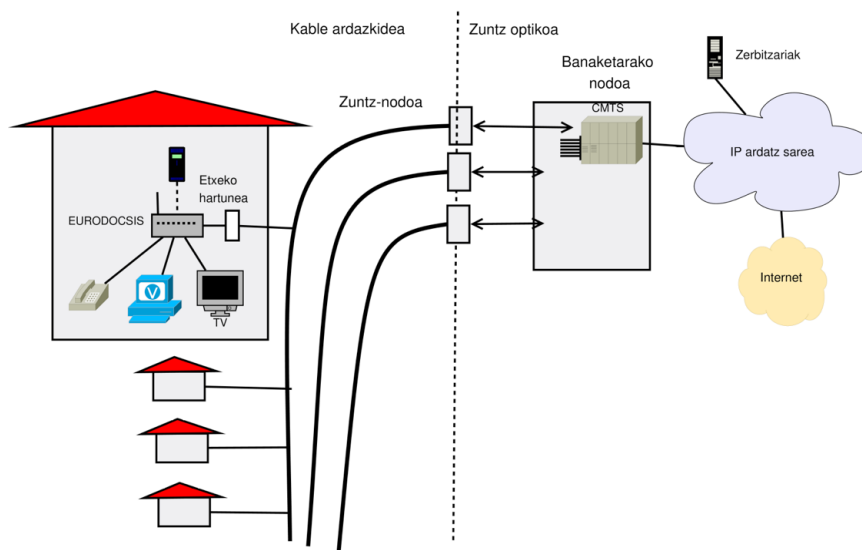
Banda zabaleko izendapena jaso zuen kable bidezko lehenengo teknologia ADSL izan zen. Bere garrantzia ikaragarria izan da multimedia-Internetaren hedapenerako xx. mendearen amaieran eta XXI.aren hasieran. Baina, egun, ADSL linea gehienak ordezkaturik daude askoz abiadura handiagoa ematen duten zuntz optikoko lineekin, eta espero da teknologia hori desagertuta egotea Euskal Herrian 2025. urtearen aldera. Hortaz, zuntz optikoa erabiltzen duten banda zabaleko beste kable bidezko teknologietan zentratuko gara.

HFC sareak

Hego Euskal Herriko herri askotan, kable bidezko telebista-sareak (CATV, *Community Antenna TV*) hedapen nabaria lortu zuen xx. mendearen amaieran. Munduko beste herrialde batzuetan bezala, sarbide-sare hori zerbitzu telefonikorako eta Interneterako bide gisa ere erabili izan da, bere HFC bilakaeran (*Hybrid Fiber Coaxial*). ADSLk bezala indarra galdu badu ere zuntz optiko hutsaren bidezko sareen hedapenaren aurrean, haren presentzia nabaria da oraindik gure auzoetan.

Hasierako CATV sareak nahiko sinpleak ziren. Alde batetik, iturburua zegoen, hau da, sateliterako antena bat, eta, bestetik, antena hori partekatu nahi zuten bizilagunak. Bien artean, kable ardazkide bat, adar batekin bizilagun bakoitzeko. Seinalea iturburutik etxeetara zihoan, noranzko bakarrean. Egungo kable bidezko sareak konplexuagoak dira, helburuak aldatu direlako eta horrek aldaketa teknologikoak eragin dituelako sare horietan. Helburua, orain, ez da satelite bidezko antena bat partekatzea, baizik eta era guztietako zerbitzuak atzitzea, tartean telebista-zerbitzua, baina telefonia eta Interneterako sarbidea ere bai.

Egungo HFC sareak 4.15 irudian agertzen diren bi zatitan banatzen dira: alde batetik, etxeen eta konpainiaren **zuntz-nodoen** (*fiber node*) arteko zatia dago, eta, bestetik, zuntz-nodoen eta operadorearen banaketarako guneen artekoa. Banaketarako gunen horiek TDM sareko telefonoguneeen baliokideak dira (zentralitak, Hegoaldean). Lehenengo zatian kable ardazkidea erabiltzen da, eta, bigarrenean, zuntz optikoa. Zuntz-nodotik kable ardazkide bakarra ateratzen da etxeen aldera, eta etxe bakoitzerako adar bat ateratzen da kable horretatik. Zuntz-nodo bakoitzak 125-500 etxeri ematen die zerbitzua.



4.15 irudia. HFC sarbide baten ohiko egitura.

Etxeetan kable ardazkiderako modem berezi bat instalatu beharko da. Halako modemek DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) estandarra bete behar dute, edo, European, EuroDOCSIS. Gailu horiek, DOCSIS modemarena eta IP bideratzailearena egiteaz gain, telebistarako kodetzaile-deskodetzailearena (*set-top-box*) eta IP telefoniarako egokigailuarena ere egiten dute. Banaketarako nodoetan, goranzko IP trafikoa jasotzeko, CMTS izeneko gailua erabiltzen da (*Cable Modem Termination System*). Gainera, operadorearen IP saretik jasotzen dituzte erabiltzaile guztientzako diren telebista-seinaleak eta erabiltzaile bakoitzaren beste IP trafikoa, tartean IP telefoniarena edota bideoarenak. Operadoreak telefonia-zerbitzua TDM eran mantendu nahi badu, TDM telefonia-sareko konexioa ere izan beharko dute banaketarako nodoek (4.15 irudian ez da agertzen aukera hori).

Jatorrizko CATV sareetan, trafikoa beheranzkoa zen bakarrik, eta fluxu bakarra zegoen erabiltzaile guztientzat, une bakoitzean jasotzaile kopurua edozein izanda ere (*broadcast* trafikoa). Kablea Interneten ibiltzeko ere erabiltzen denetik, aldiz, trafikoa oso mugimendua oso bestelakoa da, erabiltzaile bako-

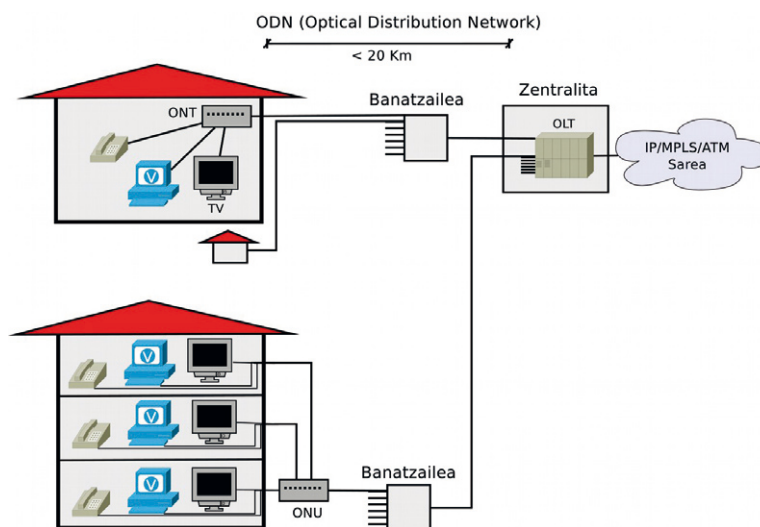
tzak bere beheranzko eta goranzko kanalak behar baititu, besteen trafikoetatik bereiz. Egoera horretan, kable berean dagoen erabiltzaile kopuruak garrantzi handia du, bakoitzak banda-zabaleraren zati bat kontsumitzen duelako. Ondorioz, mugatuta dago kable berean konekta daitekeen etxe kopurua. Kableak garraia ditzakeen seinaleen espektroa kanaletan banatzen da FDM erabiliz (*Frequency Division Multiplexing*). Kanal batzuk goranzko trafikorako gordeko dira, datuak eta telefonia igotzeko, eta beste guztiak beheranzko trafikorako, hau da, erabiltzaileen datuez eta ahotsaz gain, telebista- edota irrati-banaketarako. Kanalak erabiltzaileen artean partekatzeko, TDM eta CDMA (*Code-Division Multiple Access*) tekniken konbinazioak erabiltzen dira. Transmisio-bidea partekatua denez, erabiltzaile bakoitzak lor dezakeen abiadura kable berean lotuta dagoen erabiltzaileen kopuruaren arabera da, baita une bakoitzeko erabiltzaile horien jarduera-mailaren arabera ere.

Kable ardazkidearen eta zuntzaren arteko muga den zuntz-nodoaren kokapenaren arabera badago HFC sareak izendatzeko beste sistema bat, segituan aztertuko ditugun zuntz optiko bidezko sareen nomenklatura bera erabiltzen duena. Ingeleseko terminoak erabiliz, eta zuntza noraino heltzen denaren arabera, HFC sareak izan daitezke, besteak beste, FTTP, FTTB, FTTC edo FTTN: etxeko lursaileraino (*Fiber To The Premises*), atariraino (*Building*), baliokidea den fatxadaraino (*Curb*) edo, era orokor batean eta kokapena zehaztu gabe, zuntz-nodoraino (*Node*). Sigla horien esanahia eta erabilera ez dago estandarizatuta; ondorioz, aukera bat baino gehiago agertu dira, hemen aipatu ditugunez gain, eta nahaspila sortu da. Horregatik, testu honetan, guztiak izendatzeko HFC terminoa erabiltzea aukeratu dugu.

Zuntz optiko bidezko sarbidea

FTTH (*Fiber To The Home*) sareetan, etxeen eta telefonoguneen arteko kobrezko kable zaharra zuntz optikoarekin ordezkatzen da, askoz abiadura altuagoak lortzeko asmoz. Telefonogunearen eta etxeen artean ezarritako sare-azpiegiturari *banaketarako sare optikoa* edo ODN deritzo (*Optical Distribution Network*). Sare horren izaeraren arabera, FTTH sareak pasiboak (**PON**, *Passive Optical Network*) edo aktiboak (**AON**, *Active Optical Network*) izan daitezke; baina soilik sare pasiboak erabiltzen dira, beren ahalmena nahikoa delako ditugun beharrak asetzeko, eta sare aktiboak baina dezente merkeagoak direlako eraikitzeko eta mantentzeko.

Sare pasiboetan, telefonogunetik ateratzen den zuntz bakoitza zenbait etxeren artean partekatzen dute, **banatzaileak** (*splitter*) erabiliz. Izenak dioen bezala, banatzaileak zenbait zuntzetan ugaltzen du zuntz bakar batean datorren argia, beheranzko bidean, eta kontrakoan egiten du goranzkoan: zuntz desberdinetan zenbait etxetatik datozen seinale optikoak elkartzen ditu telefonogunerantz doan zuntz optiko bakar batean. Horretarako ez du elektronikarik behar, ezta, berez, argindarrik ere; hortik datorkio *pasibo* hitza PON sareen izendapenari. 4.16 irudian duzu horrelako sare baten egitura.



4.16 irudia. PON sare baten egitura.

Telefonogunearen eta etxeen artean, puntu bakarretik puntu anitzetara doan linea bat (*point-to-multipoint link*) osatzen da banatzaileak erabiliz. Irudian, banatzaile bakarra agertzen da telefonogunearen eta etxeen artean, baina gehiago izaten dira. PON sareetako telefonogunean zuntzak jasotzen dituen gailuak **OLT** izena du (*Optical Line Termination*). Haren lana da ISPren sarearen eta haren bezeroentzako sarbide-sarearen arteko zubiarena egitea. Banaketarako sare pasiboaren beste muturrean, etxeetan, seinale optikoaren eta etxeko sareko seinale elektrikoaren arteko bihurtzea egiten duen gailua dugu. Gailu horretarako bi izen erabiltzen dira: **ONU** (*Optical Network Unit*) edo **ONT** (*Optical Network Terminal*). ITUk egindako G.987 agirian gomendatzen da ONT terminoa erabiltzea erabiltzaile bakarreko gailua izendatzeko. Hori da ohiko kasua, 4.16 irudiko goiko etxean agertzen dena. Beste kasu bat, ezohikoa Euskal Herrian, hainbat etxeren artean zuntzaren muturrean dagoen gailua partekatzea da (4.16 irudiko beheko etxean agertzen dena); kasu horretan, gailuari ONU izena ematea da gomendia. ONU/ONT ekipo aktiboa da, hau da, argindarra behar du bere lana betetzeko. ONT etxeko routerrarekin lotuta egongo da Ethernet kable baten bidez, edo, gero eta gehiagotan, routerrarekin batera agertzen da, gailu bakar batean integratuta (4.16 irudiko goiko etxeko kasua).

PON teknologien estandarizazioari dagokionez, bi dira egile nagusiak. Alde batetik, badago betiko telekomunikazio-konpainien inguruan ITUk egindako estandar sorta, **GPON** akronimoan bildua (*Gigabit PON*). Beste alde batetik, Ethernet sareen estandarizazioaz arduratzen den IEEE institutuak ateratako estandarrak daude, **EPON** izenez ezagunak (*Ethernet PON*). Mundu mailan, eta Euskal Herrian ere bai, GPON sortako estandarrak dira nagusi. GPON agirietan definitzen dira nolakoak izango diren transmititutako tramak eta nola txertatuko diren beren barnean Ethernet tramak, nola banatuko den zuntzaren erabilera erabiltzaileen artean, nola zifratuko den transmititutako informazioa, eta nola kontrolatuko dituen OLT batek berari lotutako ONT/ONU gailuak.

Edozein PON estandar erabilita ere, **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*) banaketa erabiltzen da beheranzko eta goranzko norabideetako seinaleak zuntz bakar batean bereizteko. Hasierako GPON estandarrean (G.984), 2,4 Gb/s-ko kanala da beheranzkoa, eta 1,2 Gb/s-koa goranzkoa; estandarreko geroko berrikuspenetan abiadura horiek igo dira. Beheranzko kanalean, igorle bakarra telefonogunea da (OLTa, alegia), baina seinalea zuntz horretan konektatuta dauden etxe guztietara hedatzen da, eta, berez, mekanismoren bat behar da norberak soilik dagozkion datagramak jasotzeko, eta ez bizilagunarenak. Hori bermatzeko, igorritako tramaren helburua zein den identifikatzen da, eta edukia zifratzen da, soilik hartzaileak dezifratu ahal izateko bere seinalea.

Goranzkoan, konplikatua da kanal bakarra partekatzea, igorle asko baitaude. Beren artean talka ez egiteko **TDMA** erabiltzen da (*Time Division Multiple Access*); hau da, goranzko kanala txandaka erabiltzen dute etxeek. Txanden esleipena OLTk kontrolatzen du. Etxeetako batek igorri ahal izateko, txanda eskatu behar dio telefonogunean dagoen OLTri, hark esleia diezaion. Bigarren aukera da goranzko kanalaren erabilera antolatzeke WDM erabiltzea, etxeen artean kanala azpibanatzeko.

Sare optiko pasiboek abiadura handia eman diezaioke etxe bakoitzari, telefonogunetik 20 km-ko distantziara arte. Konpainiek 100 Mb/s-tik gora eskaintzen dute bi noranzkoetan, gero eta gehiagotan era simetrikoan. Baina, OLT-tik ateratzen den zuntz bakoitza hainbat erabiltzaileen artean partekatua denez, lortuko den benetako abiadura, HFC sareetan bezala, zuntz bakoitzeko dagoen erabiltzaile kopuruaren arabera izango da, baita erabiltzaile horiek une bakoitzean sortzen ari diren trafikoko kopuruaren arabera ere. Horregatik, operadoreek eskaintzen dutena gehienezko abiadura bat da; benetan lortzen dena askoz baxuagoa da sarritan, baina, hala eta guztiz ere, nahikoa eta soberan etxeetako erabiltzaile gehienentzat. Sare pasiboen zuntz partekatua nahikoa ez denean, bermatutako FTTH konfiguratu daiteke OLT eta ONT baten artean, behar diren TDMA txandak gordetzeko ONT horretarako. Bermatutako FTTH zerbitzua enpresei bakarrik eskaintzen zaie, beren beharrek soilik justifikatu baitezakete bere kostua.

Sare pasiboen balizko alternatiba sare optiko aktiboak dira. Aktibotasun hori, berriz, banaketarako sare optikoan datza. PON sareen kasuan banatzaile pasiboak ditugun tokian, Ethernet kommutagailu bat topatuko dugu sare aktiboetan. Beraz, banaketarako sarea ez da izango linea

bide teknologikoa halako sareen bilakaeran atzematen da. Bilakaera hori belaunalditan antolatzen da, 1Gtik hasita (*1. Generation*) egun dugun 5G belaunaldira arte. Belaunaldien artean 10 urte igarozten dira, gutxi gorabehera.

Sare zelularren 1G belaunaldiaren ezaugarri nagusiak honako hauek dira: soilik telefono-zerbitzua emateko diseinatu zen, transmisio analogikoa erabiltzen zen, zirkuitu-kommutazioa zen oinarria, eta, tokian-tokian, estandar ugari eta bateraezinak zeuden. 2G izeneko bigarren belaunaldiaren ezaugarri nagusia digitalizazioa izan zen. Baina hori ez zen berrikuntza bakarra: lehen aldiz, datu-zerbitzuak kontuan hartu ziren diseinuan, nahiz eta, oraindik, bigarren mailakoak izan telefoniaren ondoan. Baina datuetarako eskaintzen zuen abiadura urriak (9,6 kb/s) baliogabetu zuen arrakastarako edozein aukera datu-zerbitzuetan, kanal horren bidez behintzat. Hala ere, kontrolerako sarearen bidez emandako SMS zerbitzuaren arrakastak (*Short Message Service*) erakutsi zien telekomunikazio-operadoreei datu-zerbitzuek zuten ikaragarritzko eskaria, eta, berez, negozio-aukera. Estandarizazioa izan zen 2G belaunaldiak ekarri zuen beste aurrerapauso garrantzitsu bat. Ez zen estandar bakarra lortu, baina bai sorta txiki bat; horietatik batek, Europako **GSMk**, nagusitasuna lortu zuen mundu mailan.

2G belaunaldiaren datu-zerbitzuetarako gabeziak agerian gelditu ziren segituan, eta, berez, eskaria asetzeko tarteko 2,5G bat sortu behar izan zuten, 3Gren zain egon gabe. 2,5Gren ikurra **GPRS** estandarra izan zen, GSMren osagarria. GPRSn pakete-kommutazioa agertzen da lehenengo aldiz sare zelularretan, datuetarako kanaletan, zirkuitu-kommutazioa ahots-kanaletarako gordetzen den bitartean. Orduan hasi ziren telefono mugikorrek, bai eta beste gailu mugikor batzuk ere, Interneten ibiltzeko erabiltzen. Baina, abiadurari dagokionez, nahiz eta GSMk ematen zuena baino hamar aldiz handiagoa izan GPRSk emandakoa, ez zen nahikoa. Gainera, Interneten ibiltzeko terminal mugikorrak ere bistan zeuden: pantaila eskasak, teklatu deserosoak eta bateria ahulak. Argi zegoen hitz egiteko diseinatutako terminalek ez zutela balio beste gauzetarako; baina, aldi berean, agerian geratu zen Interneten eskaintako zerbitzuak ez zeudela prestatuta betiko konputagailuak ez ziren terminalen bidez jasotzeko. Komunikazioen aro berri bat sortzen ari zen, eta paradigmak aldatu beharra zegoen. Sarearen aldetik, 3G belaunaldiak datuen aldeko jauzia egin zuen; hala, sare zelularretik Interneten ibiltzeko benetako aukera gauzatu zen. **UMTS** da 3G estandar nagusia, GSMtik eratorria. Oso abiadura aldakorra lortzen da, sarearen egoeraren eta erabilitako teknologiaren arabera. Hasierako UMTS estandarrak 384 kb/s-ko abiadura lortzen du beheranzko trafikoan, baina, errealitatean, gutxiago izaten da. 2G belaunaldian gertatu zen bezala, tarteko teknologiak aurreratu ziren, 3,5G eta 3,75G izenpean, transmisio-abiadurak Mb/s eskalara ekarri arte.

Baina, 3. belaunaldia, oraindik, motz gelditu zen zenbait aplikazioentzat, zehazki banda-zabalera handia eta atzerapen urria exijitzen duten multimedia-aplikazioentzat. Beste alde batetik, 3G sarean zirkuitu- eta pakete-kommutazioa erabiltzen dira aldi berean, datuetarako eta ahotserako hurrenez hurren, sarearen ustiaketa zailduz eta garestituz. Dikotomia hori irrati bidezko sarbidean dago (zeluletako antenetan, alegia), baina baita kontrol-sarean ere: alde batetik, SS7 seinalizaziorako sare bati eutsi behar zaio zerbitzu telefonikoetarako, eta IP sarea beste guztietarako. 4G belaunaldian, telefono-zerbitzuak beste zerbitzu guztiekin integratu dira IP sarean, eta zirkuitu-kommutazioa irrati bidezko sarbidean ere desagertu da. Laugarren belaunaldia multimedien belaunaldia da, lortzen diren abiadurei esker, orain bai, edozein aplikazio erabil baitaiteke sare zelularren bidez Internetera konektatuz gero. 4G izena erabili ahal izateko baldintzak IMT-Advanced estandarrak definitzen ditu. Hor ezartzen dira abiadura minimoak: 100 Mb/s azkar mugitzen direnentzat, eta 1 Gb/s erabiltzaile estatiko edo ia estatikoentzat. Baldintza horiek bi teknologiak betetzen dituzte: **LTE Advanced** eta **WirelessMAN-Advanced** (IEEE 802.16m estandarra, WiMax2 izenez ere ezaguna). Azken hori segituan aztertuko dugu, WLL sareei buruzko atalean.

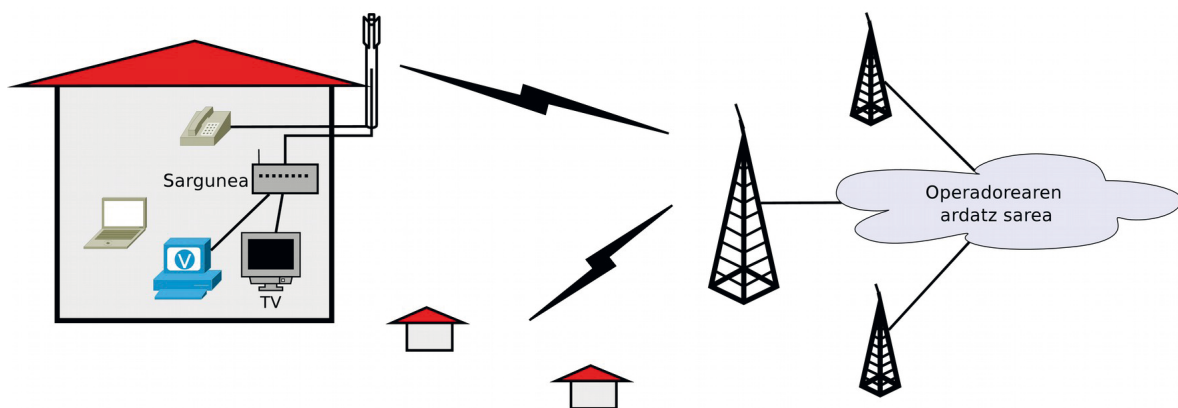
Hau idazten ari garela, 5G sarea hedatzen ari da. Zerbitzuei dagokienez, belaunaldi berriaren helburua ez da, aurreko belaunaldietan bezala, zerbitzu berriak eskaintzea erabiltzaileei, dagoneko ematen direnak hobetzea baizik. Zehazki, sare zelularrak eragindako atzerapena minimizatzea, eta askoz gailu gehiagori zerbitzua ematea, bai *Internet of Things* (IoT) deritzotena ahalbi-

detzeko, baita jendetza elkartzen denean (ekitaldi masiboak, merkataritza-guneak, geltokiak, eta abar) zerbitzua mantentzeko ere, erabiltzaile guztien konexioari eutsita eta, gainera, bakoitzak lortzen duen abiadura jaitsi gabe. Helburu horiek lortzeko gako teknologikoak bi dira, bata bestearekin oso lotuta. Alde batetik, espektoaren banda altuak erabil daitezke, eta, bestetik, oso tamaina txikiko zelulak agertzen dira, *pikozelula* deituak. Aurreko belaunaldiek baino banda altuagoak erabilia, banda-zabalera handiagoa dago erabiltzaileen artean banatzeko, nahikoa zelula batean gailu asko badago ere. Banda altuak erabiltzeak, ordea, pikozelulen beharra dakar, banda horietan transmititutako uhinak oso distantzia motzetara besterik ez baitira heltzen. Hala eta guztiz ere, luzatzen ari den trantsizio-epe batean, operadore gehien-gehienak ezartzen ari diren 5G sareek ez dute oraindik lan egiten banda altu horietan, milaka pikozelula ezartzeak duen kostuengatik. Kasu batzuetan, telebista digitalak erabiltzen zituen beheko bandak bereganatu dituzte, Hegoaldean 2. *di-bidendu digitala* izendutako prozesuan. Besteetan, 4G sarea bera egokitu dute antena eta banda horien bidez 5G zerbitzua ere emateko DSS teknologia erabiliz (*Dynamic Spectrum Sharing*).

Kablerik gabeko sarbidea (WLL - Wireless Local Loop)

Europar eta mundu osoko herri askotan, telekomunikazioen liberalizazioak kompetentzia ekarri nahi zuen telefono-sareen bidez ematen diren zerbitzuen merkatuetara, non, telefoniaz gain, Internetarako sarbide-zerbitzua ere bai baitago. Merkatu batean sartu nahi zuten konpainiek bazuten arazo bat: betiko sarbide-sare publikoa, kobrezko kableekin egina, pribatizatutako konpainia baten eskuetan gelditu zen herri askotan, tartean Euskal Herrian. Gauzak horrela, merkatuan sartu nahi izanez gero, sarbide berri bat eraiki behar al du konpainia batek, telefonogune eta milioika etxeetarako kanalizazio eta guzti? Hori ekonomikoki bideraezina eta baliabideen erabilerari dagokionez absurdoa denez, telekomunikazioen liberalizazioaren kompetentziarako helburu hori teoria hutsa da, baldin eta beste aukerarik zabaltzen ez bada konpainia berriak bezeroen etxeetaraino heltzeko. Horregatik, liberalizazioak berak konpainia nagusiak (*incumbent*) derrigortu zituen ondare publikotik jaso zituzten sarbideak kompetentziako beste konpainiei erabiltzen uztera, araututako alokairuen bidez. Konpainia baten sarbidea kompetentziako beste konpainia batek erabiltzeari **linearen bereizketa** deritza (*local-loop unbundling*).

Hala ere, sarbidearen liberalizazioaren zain egon gabe, beste bide bat agertu zen merkatuan sartzeko: kablerik gabeko sarbide-sarea eraikitzea. Herri baten kanpoaldeko mendixka batean antena bat jartzea askoz merkeagoa da etxe guztietara kableak eramatea baino. XX. mendearen amaieran hasi ziren horrelako kablerik gabeko teknologiak garatzen, LMDS izenarekin (*Local Multipoint Distribution Service*), hasiera batean kable bidezko telebistaren alternatiba gisa. Gero, IEEE institutuak horren estandarizazioa hartu, edozein zerbitzutarako, eta 802.16 seriea argitaratu zuen kablerik gabeko abiadura handiko sarbideetan erabiltzeko (*wireless broadband*). Haren izen komertziala **WiMAX** da.



4.18 irudia. WLL sareen egitura.

WLL sareen egitura 4.18 irudian dugu. Betiko sare kableatuarekin alderatuta, telefonogunearen ordez antena bat dugu, eta telefonogunearen eta etxeen arteko kablearen edo zuntzaren ordez, uhinak. Sare zelularrekin erkatuz, sare-egitura oso antzekoa dute WLL sareek: antena bakoitzaren hedatze-esparruan dauden erabiltzaileak mikrouhinen bidez konektatzen dira antena horrekin, eta antenak telekomunikazio-operadorearen ardatz-sarearekin daude lotuta, normalean kable bidez.

Badaude bi motatako WiMAXak: estatikoa, etxe baten barruan eta motel mugitzen diren eki-poenzat, eta mugikorra, kanpoaldean eta azkar mugitzen direnentzat. Estatikoan, 3,5 GHz-eko eta 5,8 GHz-eko bandak erabiltzen dira, 70 Mb/s arteko abiadura emateko, zenbait baldintza teknikoren arabera. Hala ere, Euskal Herrian, 512 kb/s eta 4 Mb/s arteko abiadura eman ohi dute zerbitzu hori eskaintzen duten operadoreek. Antenek badute 50 km-ra arte hedatzea. WiMAX estatikoa sare kableatua heltzen ez den tokietan erabiltzen da, telefono-zerbitzua eta Interneterako sarbidea emateko. Aipatu behar da zenbat eta mikrouhinen banda altuagoa erabili, orduan eta errazago xurgatzen duela atmosferako urak uhin horren energia. Horren ondorioz, euria denean, gerta daiteke WiMAX zerbitzua nahiko gaizki ibiltzea. Hori handicap bat da WiMAX aukerentzat beraren konpetentzia diren sare zelularrekin alderatuta, azken horiek, Europan, 2,1 GHz-eko eta 2,6 GHz-eko bandak erabiltzen baitituzte 3G eta 4G zerbitzuentzat, hurrenez hurren; hau da, WiMAX erabiltzen dutenak baino baxuagoak, eta, ondorioz, gertaera atmosferikoekin horrenbeste arazorik ez dutenak.

WiMAX mugikorra estatikoaren bilakaera da, eta 4G zerbitzuak emateko erabiltzen da. Europan WiMAXentzat baimendutako bandak 2,3 GHz-ekoa (Hego Euskal Herrian ezin da erabili), 2,5 GHz-ekoa (LTE bidezko beste 4G aukerentzat erabiltzen ari da gehienetan, eta ez WiMAXentzat) eta 3,5 GHz-ekoa dira. Orokorrean, WiMAX mugikorrak estatikoak baino hedadura eta abiadura txikiagoak lortzen ditu. Hala ere, WiMAX2 bertsioan, teoriaran, 300 Mb/s-ko abiadura lor daiteke. Zerbitzu hori ez dute eskaini, oraingoz behintzat, Euskal Herrian lan egiten duten konpainiek. Testu hau idaztean, WiMAX mugikorraren etorkizuna nahiko iluna da; LTE teknologiak partida irabazi dio 4G teknologien lehian. WiMAX mugikorra erabiltzen zuten konpainia gehienek LTErekin ordezkatu zuten teknologia hori 2015. eta 2016. urteetan.

WiMAX teknologiaren beste erabilera atzealdeko sarea osatzekoa da (*backhaul*). Erabilera hori, berriz, landa-esparruetan agertzen da, hau da, telefonoguneak ardatz-saretik urruti dauden tokietan, eta, ondorioz, oso garestia da kablea haraino eramatea.

Wifi bidezko sarbidea

Wifi teknologia kablerik gabeko sare lokalak eratzeko sortu zen, hau da, gehienez ehunka metrora dauden ekipoak Ethernet sare bati konektatzeko. Haren estandarizazioa IEEE institutuak egiten du, **802.11** izeneko agirietan. Haren erabilera nagusia etxe edo enpresen barrualdeko edozein tokitan Interneterako konexioa atzigarri egitea da, hormetako sare-hargune baten menpe egon gabe. Sare lokalez harago joanda, wifi teknologia erabiliz, sarbide-sareak ere sortu dira. Kable bidezko konexio bat bizilagunen artean partekatzeko hasi zen erabiltzen wifia. Gero, wifi-sarguneen arteko konexio zuzenak erabili izan dira operadoreen kable bidezko sarbideak saihesteko, 4.19 irudian ikus daitekeen moduan.

Wifi sarbide-sare batean, bi motatako antenak erabiltzen dira. Alde batetik, erabiltzaileak konektatzeko erabiltzen direnak sarguneak dira. Bere seinalea inguruan barreiatzen dute, erabiltzaileen ekipoen bila. Berez, sare zelularren antenak bezalakoak dira, baina txikiagoak dira, eta sare zelularretan erabiltzen diren teknologien ordez 802.11 estandarrak jarraitzen dituzte transmisiorako. Beste alde batetik, sarguneak eta ardatz-sarea lotzeko erabiltzen diren antenak daude. Antena horien arteko konexioak zuzenak dira, binakakoak. Seinalea elkarri zuzentzen diote gertu dauden antena bikoteek, inguruan barreiatu gabe, eta, horrela, jauzika, distantzia handiko lineak osatzen dira.

edozein tokitatik atzitu ahal izatean datza. Horregatik, GEO sateliteak badira alternatiba bat beste inongo sarbiderik ez dagoen tokietan. Horretarako, VSAT teknologia erabiltzen da (*Very Small Aperture Terminal*), hau da, antena txikiak¹⁰ (metro baten diametroa baino txikiagoa dutenak) erabiltzen dituenak. GEO sateliteen bidezko Interneterako sarbidean lortzen diren abiadurak ez dira ikaragarriak, baina askotan nahikoak etxe edo enpresa txiki baterako. Gutxi gorabehera, eta faktore askoren arabera, beheranzkoan 30 Mb/s izan daiteke abiadura hori, eta 5 Mb/s goranzkoan. Teknologia berrienak erabiliz, 100 Mb/s arte eman daitezke beheranzkoan.

GEO sateliteen bidezko komunikazioak duen arazorik handiena da eragindako latentzia. Nahiz eta mikrouhinak argiaren abiaduratik gertu hedatu, ia 300.000 km/s-ko abiaduran, seinaleak igaro behar duen distantzia hain handia denez, txangoak hartzen duen denbora esanguratsua da, bereziki multimedia-aplikazioentzat. Horrelako VSAT linea batean, atzerapena 250 ms-koa izaten da gutxienez; IP telefonia-aplikazio batentzat, onartezina. Erabiltzaileen egoitzan VSAT sistemek behar duten instalazioa merkea da, baina, horren truke, atzerapen handi horri eutsi behar diote. Pentsatu, egun, arraroa dela 100 ms baino gehiago behar izatea Internet osoa zeharkatzeko lurreko lineak erabiliz.

MEO eta LEO orbitetan kokatutako sateliteak askoz gertuago daude lurrazaletik, eta, ondorioz, beren latentzia eta behar duten igortze-potentzia ere askoz baxuagoak dira. Adibidez, MEO orbitan dagoen O3B satelite sarea 8.000 km-ko altueran dago, eta haren RTT 125 ms-koa da. LEO orbitan dauden Iridium eta Globalstar sateliteak 670 eta 1.420 km-an daude, hurrenez hurren, eta beren atzerapena 40 ms ingurukoa da. Horrek erakargarri egiten ditu Internet sarbiderako; baina orbita baxuagoetan dauden sateliteek ere badute, ordea, beren handicap: lurrazaletik ikusita, mugitzen ari dira, eta tarte batean soilik daude ikusgarri. Horrek asko zailtzen du haiekiko komunikazioa; satelite bakoitza zeruan aldiro agertu eta desagertu egiten da, eta, hortaz, ezin diogu komunikazioari eutsi. Horregatik, LEO eta MEO orbitetan, satelite-sareak behar dira, bermatu ahal izateko gure antenaren bistatik satelite bat desagertu baino lehen beste bat agertuko dela. Komunikazioa eten baino lehen, sare bereko bi sateliteren arteko trantsizioa (*roaming*) egin beharko da. Horrek guztiak sistema zaildu eta garestitu egiten du. Ondorioz, LEO sistemak telefoniarako erabili izan dira gehien, eta ez Internet-sarbiderako. Zerbitzu hori emateko hainbat egitasmok porrot egiten badute ere, hau idaztean badaude LEO sateliteen bidezko Internet-zerbitzua ematen duten operadore pare bat. MEO sateliteen erabilera nagusia geokopakapen-zerbitzuak dira (Galileo eta GPS), baina O3B sarea telefonia- eta datu-zerbitzuak eskaintzen hasi zen 2014. urtean. Haren merkatua, hala ere, ez da zuzenean erabiltzailea, baizik eta ISPak eta telefonia mugikorrerako operadoreak. Haren loturak erabiltzen dira, adibidez, atzealdeko sarea osatzeko beste sareak heltzen ez diren tokietan (adibidez, itsasontzietan). Gb/s mailako abiadura emateraino hel daiteke.

Laburpena

Aurreko kapituluetan ikasi dugu nola egokitzen diren multimedia-aplikazioak Internetek ematen duen IP zerbitzuan; *best effort* zerbitzuan, alegia. Multimedia-aplikazioek IP sareetan dituzten arazoak konpontzeko bide alternatiboa sarean bertan ekiditea da, hau da, sare-azpiegiturak hobetzea eta bideratzaileetan teknika berriak erabiltzea, multimedia-trafikoa arazorik gabe garraiatzeko IP sareetan. Funtsean, IP sareetan suertatzen den datagramen arteko atzerapenaren aldakortasuna eta datagrama-galerak minimoetan uztea da helburua. Horretarako, badaude zenbait estrategia.

¹⁰ Txikitasun hori erlatiboa da. VSAT teknologia garatu arte satelite bidezko komunikazioetarako erabiltzen ziren antenekin alderatuta, oso txikiak dira VSAT antenak. Etxeko wifi-sareko antenarekin alderatuta, erraldoiak dira.

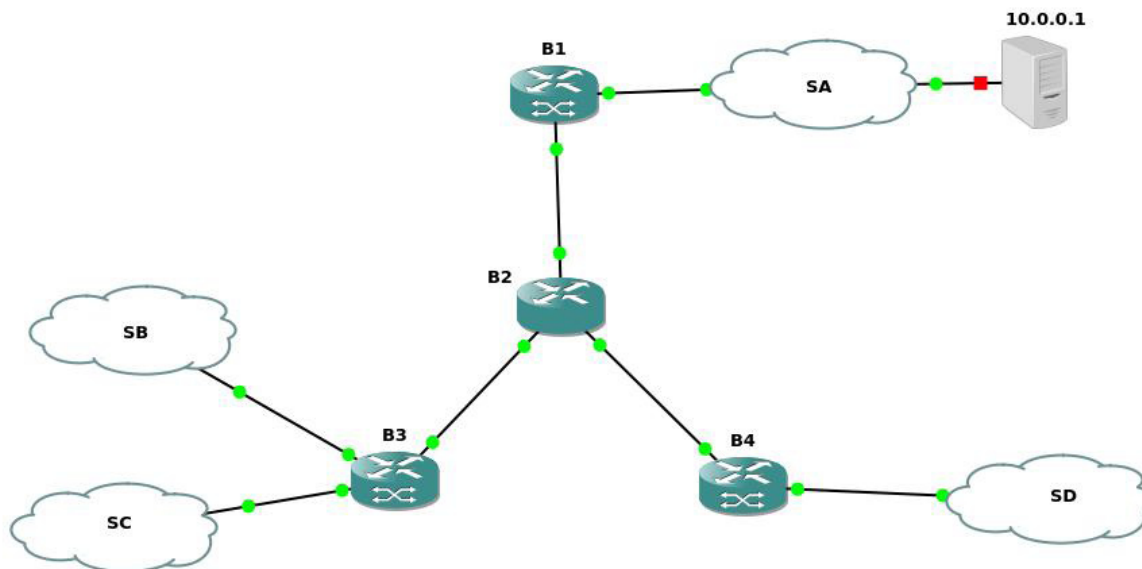
Lehenengo estrategia sarean sartzen dugun trafiko kantitatea murriztea da, banda-zabaleraren beharrak eta bideratzaileetan sortzen diren ilarak gutxitzeko, eta, horrekin batera, buxaduraren arriskua eta haren ondorio negatibo guztiak ere murrizteko. Hori bilatzen du aztertu dugun lehenengo teknikak: multicast-teknologia. Multicasten erabilera masiboak asko jaitsiko luke Interneten *broadcast* moduan bidalitako trafikoa. Teknologia heldua da aspalditik; multicast-helbideak araututa daude, eta erabili egiten dira. Multicast erabiltzeko protokoloak ere, IGMP eta MLD, inplementatuta daude erabiltzaileen egungo sistema eragileetan. Eta bideratzaileetan prest dugun multicast bideratze-protokoloa, PIM, nahikoa da erabiltzen diren multicast-aplikazio nagusiek sortzen duten trafikorako (SSM motako trafikoa). Baina teknologikoak ez diren arazoez geldiarazi dute multicast ISP sareetan hedatzea. Horri *multicast-hutsune* deritza (*multicast gap*). Ikusteke dugu zer gertatuko den etorkizunean, baina, oraindik, multicast-teknologiak dakarren onura ez dugu ikusi Internet irekian; soilik multicast-domeinu baten mugak gainditu gabe da ohikoa haren erabilera.

Bigarren estrategia buxaduren kudeaketan datza, buxada bera eragozteko edo, hala eta guztiz ere buxada suertatzen bada, eragindako kalteak (hau da, datagrama-galerak) multimedia ez diren aplikazioei egozteko. Estrategia hori bilatzen duten teknikak QoS epigrafean bildu ditugu. Hor daude *Traffic Management* eta trafiko-ingeniaritza. *Traffic Management* funtsean CoS egitea da, hau da, datagramak tratatzea beren sailkapenaren arabera. Horrela, galerak daudenean, hobe da kaltea konpon dezaketan aplikazioei egozteko galera horiek; denbora errealekoak ez direnei, alegia. *Traffic Management* barruan, sarerako sarreran trafikoa mugatzeko eta ilarak kudeatzeko teknikak ere aztertu ditugu. Trafiko-ingeniaritzan, sareko baliabideak —hau da, lineak— ahal den modurik onenean erabiltzea bilatzen da. Trafikoa bide alternatiboetan banatzea da ideia, bide laburrenean datagramak metatzea saihestuz. Horretarako, datagramak fluxuetan elkartu behar dira, eta, gero, fluxuen arabera mugitu trafikoa sarean, eta ez datagramak banan-banan. Trafiko-ingeniaritzarako oso egokiak suertatu dira MPLS eta RSVP-TE protokoloak, biak beste helburu batzuekin sortu baziren ere.

Hirugarren estrategia gaindimentsionamendua da: bideratzaileetan sortzen diren ilarak desagerrarazteko, lineen transmisio-abiadura eta bideratzaileen ahalmena handitzea hasierako beharrek eskatzen dutena baino gehiago. Bide horretik, Interneterako sarbide-sareetako banda-zabalera handitzea izan da multimediararen hedapenaren gakoa Interneten. Izan ere, *banda zabaleko sareak* izena erabiltzen da edozein aplikaziok sortutako trafikoa xurgatzeko ahalmena duten sarbideak izendatzeko. Sare horiek kable bidezkoak edo kablerik gabekoak izan daitezke; bigarren horiek ezinbestekoak dira gero eta garrantzitsuagoak diren gailu eramangarriei sarbidea emateko. Kable bidezko sarbideetan, kable ardazkideko eta zuntz optikoko sareak ditugu, ADSL sareak desagertzeaz daukela. Kablerik gabeko sarbideetan, multimediarako bereziki diseinatutako 4G eta 5G sare zelularrak, WLL sarbideak eta wifi bidezko sarbideak ditugu. Sateliteak ere hor daude, beste inongo sarerik heltzen ez denerako.

4. kapituluko ariketak: multimediarako sare-teknologiak

- 1) Bedi honako eskema honetan dagoen sarea. Agertzen diren bideratzaileak multicast-bideratzaileak dira. Gainera, B1, B3, eta B4 MLR bideratzaileak dira (*Multicast Local Router*), SA, SB, SC eta SD saretarako.



Demagun honako hauek gertatzen direla:

- (1) SA sarean dagoen zerbitzaria hasi da *live streaming* saio bat transmititzen 238.1.1.3 helbidera.
- (2) SB sarean dagoen nodo bat saio hori ikusten hasi da.
- (3) SD sarean dagoen nodo bat saio hori ikusten hasi da.
- (4) SC sarean dagoen nodo bat saio hori ikusten hasi da.
- (5) SB sarean dagoen bigarren nodo bat ere hasi da saioa ikusten.
- (6) SD sarean saioa ikusten ari zen nodoak utzi du saioa.

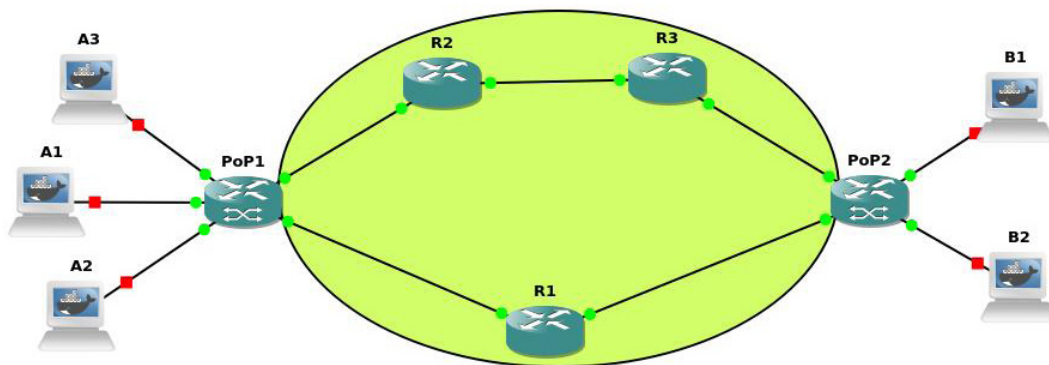
Idatzi horrelako gertaera bakoitzak izango duen eragina sareko bideratzaileen multicast birbidaltze-tauletan. Erabili horretarako behean duzun taula; bertan:

- *Kanala* zutabea: zein kanali dagokion lerroan dagoen informazioa.
- *Hart* zutabea: kanal horretan erregistratu den hartzaile kopurua.
- *N-H*: zutabeko bideratzailean, lerroko kanalarari dagokion `Next-hop` helbidea. Bideratzaileen helbideak azaltzeko, erabili `@bideratzailea/bestaldea` erako notazioa (adibidez, B1 bideratzailea SA sarearekin lotzen duen helbidea `@B1/SA` izango da).
- *INT*: bideratzaile horretan, lerroko kanalarari dagokion interfazea. Interfazeak izendatzeko notazio hau erabili: `bideratzailea/bestaldea`. Adibidez, B1en bi interfazeak izango dira `B/SA` eta `B/B2`.
- *Prot*: bideratzaile horretan, multicast-taulako lerro hori zein protokoloren bidez bete den.

3) Lotu akronimo eta termino hauek dagokien kontzeptuarekin:

- | | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| — DR | — SSM | — IGMP |
| — MLD | — Multicast-domeinua | — Interdomain multicast |
| — Reverse-Path-Forwarding | — Broadcast-helbidea | — MLR |
| — Rendez-vous Point | — Intradomain multicast | — ASM |
| | — PIM-SSM | |

1. Talde batean sartzeko edo ateratzeko hartzaileek erabilitako protokoloa.
 2. Sareko makina guztiak identifikatzen dituen helbidea.
 3. Sare baten taldeen kudeaketa egiten duen bideratzailea, normalean atebidearena egiten duena.
 4. Iturri bakarreko multicasta.
 5. IGMP funtzionalitate bera duen protokoloa, baina IPv6-n erabiltzekoa dena.
 6. Iturri anitzeko multicasta.
 7. SSM Multicast birbidaltzeko taulak eguneratzeko erabiltzen den protokoloa.
 8. Multicast-domeinutik ateratzen ez den multicast-trafikoa.
 9. Multicast-domeinu desberdinen artean igaro daitekeen multicast-trafikoa.
 10. Multicast-bideratzaileen birbidaltzeko taulak mantentzeko erabiltzen den algoritmoa.
 11. Multicasta bideratzen duen sare multzo bat, kudeatzaile bakar baten menpe dagoena. Normalean, AS bat da.
 12. ASM trafikoa bideratzeko domeinu bakoitzean egon behar duen banatzaile zentrala.
- 4) Bedi honako sare hau. Demagun barruko bideratze guztia SPF moduan (*Short Path First*) egiten dela, OSPF erabiliz, eta distantziak neurtzeko hop kopurua erabiltzen dela. Demagun une batean honako trafiko-fluxuak daudela sarean: A3-B1, A2-B2, eta A1-B1. Fluxu guztiak 1 Mb/s mugitzen badute, eta sareko lotura guztiak 3 Mb/s badira, kongestio-arriskurik ikusten al duzu? Zer gertatuko da OSPF bidez lehenesten baduzu R2 eta R3 bidez doan ibilbidea? Nola antolatuko zenituzke trafiko horiek, trafiko-ingeniaritza erabiliz?



- 5) ISP batek, bere erabiltzaileek igorritako trafikoa mugatzeko (*policing*), token-pertzaren teknika erabiltzen du (*token bucket*). Horrela, erabiltzaile batek ISPri igortzen dizkion datagrama guztiak token-pertza batek kontrolatutako ilara batean sartuko dira, konmutazio gunean sartu baino lehen. Demagun honako bezero honen kasua:

- 1 Mb/s-ko batez besteko igortzeko abiadura kontratatu du.
- Ilara kontrolatzeko kontagailuak byteak neurtzen ditu.
- Segundoero kenketa egiten zaio kontagailuari.

Zehaztu zenbateko kenketa egin behar zaion kontagailuari.

- 6) Demagun token-pertza erabiltzen duen ISP bat dugula. ISPren sarrerako bideratzaileko linea batean, segundo erdiro, 0,75 Mb kentzen dio kontagailuari, eta muga 1 Mb da. Zenbateko batez besteko abiadura kontratatu du linea horretan konektatua dagoen erabiltzaileak? Zenbatean gaindi daiteke abiadura hori bultzada (burst) batean?
- 7) Lotu akronimo eta termino hauek dagozkien kontzeptuekin:

— scheduling	— CoS	— MPLS
— DSCP	— tail drop	— <i>traffic shaping</i>
— policing	— traffic engineering	— RED/WRED
— WFQ	— leaky bucket	— DiffServ
— traffic management	— best effort	— RSVP-TE
	— ECN	

1. Buxadurak kudeatzeko teknikak, datagramen sailkapeneta oinarrituak.
 2. Datagramaren sailkapena grabatzeko erabiltzen den IP goiburukoaren eremua.
 3. Buxaduraz ohartarazteko IP goiburukoetan dagoen eremua.
 4. Trafiko-doitzea izendatzeko ingelesez erabiltzen den terminoetako bat.
 5. *Classes of Service*, askotan *Traffic Management* bidez lortutako QoS era izendatzeko erabiltzen den akronimoa.
 6. Datagramen sailkapenerako definitutako estandarra.
 7. Sare baten sargunean trafikoa doitzeko erabiltzen den teknika.
 8. Bideratzaileetan ilarak kudeatzeko erabiltzen diren teknikak.
 9. IP mailak ematen duen zerbitzu era (ez dago kalitatearen bermerik).
 10. Ilaran sartzeko estrategia, heldu den azken datagrama baztertzen duena ilaran tokirik ez badago.
 11. Ilaran sartzeko estrategiak, datagramak baztertzeko probabilitatea ilara betetzeko mailaren arabera erabiltzen dutenak.
 12. Dispatching-estrategia, interfaze batetik igortzeko hurrengo datagramak aukeratzean ilaren lehentasunaren arabera erabakitzen duena.
 13. Sarean dagoen trafikoak dinamikoki birbideratzeko teknikak, sarearen erabilera optimizatzeko eta buxadurak ekiditeko.
 14. IP datagramak fluxuetan elkartzeko protokoloa, trafiko-ingeniaritzarako oso erabilia.
 15. Trafiko-fluxuak era dinamikoan definitzeko eta eraldatzeko protokoloa, MPLSrekin batera erabilia.
- 8) Lotu akronimo eta termino hauek dagozkien kontzeptuekin:

— NGAN	— Backhaul	— CDMA
— GSM	— TDMA	— Incumbent
— xDSL	— UMTS	— WiMAX
— LTE	— FTTx	— FDM

1. Sarbide-sare baten telefonoguneen sarea.
2. Zuntz optikoa erabiltzen duen sarbide-sarea izendatzeko akronimoa.
3. Oso banda zabaleko sarbide-sareak izendatzeko erabiltzen den akronimoa.
4. Merkatu batean nagusia den telekomunikazio-operadorea.
5. Telefono-zerbitzu zaharrerako ezarritako kobrezko kablea erabiltzen duen banda zabaleko sarbide-sarea.
6. Espektroa txanden bidez banatzen duten teknikak.

7. Espektra kodeen bidez banatzen duten teknikak.
8. Espektra maiztasunen bidez banatzen duten teknikak.
9. 2G belaunaldiko teknologia nagusia.
10. 3G belaunaldiko teknologia nagusia.
11. 4G belaunaldiko estandarra.
12. WMAN sareetarako erabiltzen den izen komertziala.

Bibliografia

Liburu honetan ez dago multimedia-Interneti buruzko guztia. Interesa duen irakurleak liburu hauetan aurkitu dezake informazio gehiago, sakonagoa eta zehatzagoa.

Liburu orokorrak

- Multimedia Networks: Protocols, Design and Applications. Hans W. Barz, Gregory A. Bassett. John Wiley & Sons, 2016.
TCP/IP sareetan multimedia-aplikazioak erabili ahal izateko behar direnak aztertzen dira liburu horretan: soinuaren eta bideoaren kodeketa, VoIP eta streamingerako protokoloak, eta abar.
- Computer Networking, 7th edition. J. F. Kurose, K.W. Ross. Pearson, 2017.
Sare informatikoak eta Internet orokorrean azaltzen duen liburu honetan kapitulu oso bat dago multimedia-sarean aztertzeko.
- Computer Networks, 5th edition. A. S. Tanenbaum, D. J. Wetherall. Pearson, 2011.
Nahiko liburu entziklopedikoa da. Multimedia-sareari dagokionez, bideoaren eta audioaren kodeketa lantzen du, baita sarbide-sareetarako teknologiak ere.
- TCP/IP Protocol Suite 4th edition. B. A. Forouzan. McGraw-Hill Education, 2009.
Sare informatikoei buruzko beste liburu orokorretan bezala, sarbideetarako teknologiak azaltzen dira. Horretaz gain, badakar multicast-teknologia aztertzeko kapitulu berezi bat, baita multimedia-sarean orokorrean lantzeko beste bat ere.

Lehenengo kapitulan landutakoa zabaltzen duten liburuak

- Fundamentals of Multimedia (3rd ed) – Ze-Nian Li, Mark S. Drew, Jiangchuan Liu. Springer, 2021
- Video Over IP, Second Edition. Wes Simpson. Focal Press, 2008.
- Video Processing and Communications. Y. Wang, J. Ostermann, and Y.-Q. Zhang, Prentice Hall, 2001.
- The Zettabyte Era—Trends and Analysis. Cisco White Paper, 2017.

Bigarren kapitulan landutakoa zabaltzen duten liburuak

- Next-generation video coding and streaming - Benny Bing. Wiley & sons. 2015.
- The Technology of Video and Audio Streaming, Second Edition. David Austerberry. Focal Press, 2004.

- Mastering Internet Video: A Guide to Streaming and On-Demand Video. Damien Stolarz. Addison-Wesley, 2004.
- A Practical Guide to Content Delivery Networks, Second Edition. Gilbert Held. CRC Press, 2010.
- IP Multicast with Applications to IPTV and Mobile DVB-H. D. Minoli. John Wiley & Sons, 2008.

Hirugarren kapituluaren landutakoa zabaltzen duten liburuak

- Understanding Voice Over IP Technology. Nicholas Wittenberg. Delmar Cengage Learning, 2009.
- VoIP and Unified Communications: Internet Telephony and the Future Voice Network. W. A. Flanagan. Wiley, 2012.
- Real-Time Communication with WebRTC. Salvatore Loreto and Simon Pietro Romano. O'Reilly 2014.

Laugarren kapituluaren landutakoa zabaltzen duten liburuak

- Technical, Commercial and Regulatory Challenges of QoS. X. Xiao. Morgan Kaufmann, 2008.
- Tecnologías de Banda Ancha y Convergencia de redes. M. Álvarez-Campana, J. Berrocal, F. González, R. Pérez, I. Román, E. Vázquez. Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2009.
- Broadband Last Mile: Access Technologies for Multimedia Communications. N. Jayant. CRC Press, 2005.
- Implementation and Applications of DSL Technology. P. Golden, H. Dedieu, K. S. Jacobsen. CRC Press, 2007.

RFCak

Askotan agertzen dira RFCetarako erreferentziak liburuan zehar, agiri horiek baitira, askotan, informazio-iturririk onena TCP/IPri eta Interneti dagokienez. Hainbat tokitan daude eskura RFCak sarean. Hoberena zuzenean Internet Society-ko RFC Editor entitateak kudeatutako gunea erabiltzea da (www.rfc-editor.org). Webgune horretan badago aukera RFCak bilatzeko izenaren, zenbakiaren edo egilearen arabera, eta RFC bakoitzaren egoera (uneko estandarra, proposatutakoa, historikoa, eta abar) azaltzen du, baita zer beste RFCk eguneratu edo ordeztu duten bilatutakoa ere.

Hitz-zerrenda

1

1G 148

2

2,5G 148

2G 148

3

3G 9, 148

4

4G 9, 148

5

5G 149

8

802.11 150

A

A-legea 24

AAC - *Advanced Audio Coding* 35

abiarazlea 72

ABR - *Adaptive Bit Rate* 67

Active Optical Network - AON 145

adarra 129

ADPCM 33

all-or-nothing 77

AMT - *Automatic Multicast Tunneling* 132

anycast 61

AOMedia 42

aplikazio banatua 10

AQM 137

ASIC - *Application-Specific Integrated Circuit* 142

ASM - *Any Source Multicast* 122

ATM 134

atzealdeko sarea 147

atzerapena 14

atzerapenaren aldakortasuna 16

Audio 28

aurrekarga 53

AVC/H.264 42

azken zatia 48

azpistream 71

B

B-frame 41

backhaul 147

banatzailea 145

banda estuko ahotsa 32

banda zabalera 14

barruko multicast 122

Bereizmena 37

Bermatutako FTTH 146

Berreraiketa 90

bertako multicast-bideratzailea 126

best effort 14

bezeroa 12

bideratzailea 9

bigarren kanala 90

bilaketa sarea 115

bit-sakonera 23

BitTorrent 72

bizkarroia (*leecher*) 75

bootstrapping node 72

bpp - *bits per pixel* 38

buffering 18

business gateway 106

buxadura 11

C

Cable Modem Termination System 144

Call Agent 107

CATV 144

Cb, *Chroma blue* 39

CDMA 145

CELP - *Code-Excited Linear Prediction* 33

chunk 54

CIDR - *Classless Inter-Domain Routing* 124

Cloud Telephony 115

CMAF - *Common Media Application Format* 67

codec 27

container 27

content provider 49

CoS - *Classes of Service* 133

Cr, *Chroma red* 39

D

DASH - *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* 67

datagrama 10

DCCP - *Datagram Congestion Control Protocol* 139

DCT bihurketa - *Discrete Cosine Transform* 38

dejitterazio-bufferra 89

Delta fotograma 41

dena-edo-ezer-ez 77

Denbora marka 93

DiffServ 133

DiffServ domeinua 134

digitalizazioa 20

diskretizazioa 22

dispatching 137

DOCSIS 144

domeinuen arteko multicast 123

DoS - *Denial of Service* 128

DPI - *Deep Packet Inspection* 134

DR - *Designated Router* 129

DS Domain 134

DS field 134

DSCP 134

Dynamic Spectrum Sharing - DSS 149

E

E.164 107

E1 111

ECN 138

edukien hornitzailea 49

EME - *Encrypted Media Extensions* 68

ENUM 108

Erreproduzitzaila 52

erreproduzitzeko abiadura 53

Erreproduzitzen hasteko atzerapena 54

error concealment 90

Ethernet multicast helbideak 125

Ethernet PON - EPON 146

EuroDOCSIS 144

F

Fair Queuing 137

Fast Reroute 142

FDM 145

FEC - *Forward Error Correction* 90

fenakistiskopio 36

fiber node 144

FIFO 133

FIFO - *First Input First Out* 133

flickering 36

fluxu kontrola 65
 fotograma 36
 Fourier 29
 FPS - *Frames Per Second* 36
frame 36
 FTTB 145
 FTTC 145
 FTTH 145
 FTTN 145
 FTTP 145

G

G.114 88
 G.711 31, 86
 G.721 33
 G.722 33
 G.723 33
 G.729 33, 86
 gainlaginketa 35
 galera kontrola 55
 Gatekeeper 100
 Gateway 106
 gateway controller 107
 GEO - *Geostationary Earth Orbit* 151
 Globalstar 152
 GPON-Gigabit PON 146
 GPRS 148
 GSM 148

H

H.235 100
 H.239 100
 H.248/Megaco 107
 H.264/AVC 41
 H.323 107
 H.450 100
 H.460 100
hard state protocol 127
 HEVC/H.265 41
Hosted Telephony 115
 HTTP 10
 HTTP *Live Streaming* 67

I

I-frame 41
 IANA - *Internet Assigned Numbers Authority* 124
 IAX2 101
 ICE - *Interactive Connectivity Establishment* 105
 ICMPv6 127
 IEEE 802.16m 148
 IEEE 802.1Q 134
 IGMP - *Internet Group Management Protocol* 127
 IGMP snooping 127

igortzeko abiadura 13
 Ilaren kudeaketa 137
 IMT-*Advanced* 148
 incumbent 149
 inguratzaila 33
 inter-frame trinkoketa 40
interdomain multicast 123
 Internet kommutagailu 9
 Internet hornitzaile 9
Internet of Things - IoT 148
 Internet TV 51
 intra-frame trinkoketa 38
 intradomain multicast 122
 IP telefonia 83
 IPTV 50
 Iridium 152
 ISDN 111
 ISM bandak 151
 ISOBMFF 27
 ISP 9
 ITSP 106
 Iturriko kodetzaileak 32

J

jitter 53
jitter buffer 89
jitterra 87
join time 73
 JPEG - *Joint Photographic Experts Group* 38

K

Kazaa 100
 keinada 36
 kodetzaile 40
 kodetzeko formatua 25
 kolorearen sakonera 38
 Komunikazio bateratuak 112
 konbergentzia denbora 142
 kongestio kontrola 68
 kongestioa 11
 kongruentea 130
 Kontainer 27
 Kontrolerako helbide globalak 124
 kroma 39
 Krominantzia 39
 krominantziaren azpilaginketa 39
 kuantizazio ez uniforme 24
 kuantizazio uniforme 24
 kuantizazio-distortsioa 23
 kuantizazio-errorea 23
 Kuantizazioa 22

L

Laginketa 22
 laginketa-abiadura 22
 laginketa-teorema 22

last mile 143
 Latentzia 87
leaky bucket 136
 LEO - *Low-Earth Orbit* 151
 Linea kodeak 25
 linearen bereizketa 149
load balancer 57
Local Multipoint Distribution Service - LMDS 149
 LPC (*Linear Predictive Coding*) 31
 LTE *Advanced* 148
 Luma 39
 Luminantzia 39

M

M-ISIS 130
 MAC protokoloak 15
 Maiztasunen kodeketa 28
 makroblokea 41
manifest file 52
 MBGP - *Multiprotocol Border Gateway Protocol* 130
 MCU blokeak (*Minimal Coding Unit block*) 41
 MDCT - *Modified Discrete Cosine Transform* 30
media gateway 106
media server 51
 Megaco 107
 MEO - *Medium-Earth Orbit* 151
 metafitxategia 52
 MFIB - *Multicast Forwarding Information Base* 128
 MGCP - *Media Gateway Control Protocol* 107
 MLD - *Multicast Listener Discovery* 127
 MLR 126
 MP3 - *MPEG Audio Layer 3* 35
 MPEG - *Motion Picture Experts Group* 42
 MPEG-4 42
 MPLS 121
 MPLS - *MultiProtocol Label Switching* 140
 MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport* 102
 MRIB - *Multicast Routing Information Base* 130
 MSE - *Media Source Extensions* 68
 MT-OSPF 130
 mugimenduaren konpentsazioa 38
 Multicast bidezko streaming 75
 multicast birbidaltze-taula 128
 Multicast helbide pribatuak 124
 Multicast helbidea 124
Multicast Routing Next Hop Table 128

multicast zuhaitza 126
Multicast-streaming 75
 Multikonferentzia 86
Multiple Description Coding
 (MDC) 71

N

Nahasketa 91
 NAPTR 108
 NAT 103
native multicast 124
 Nyquist maiztasuna 22
 Nyquist muga 22

O

O3B 152
online TV 51
Optical Distribution Network 145
Optical Line Termination -
 OLT 146
Optical Network Terminal -
 ONT 146
Optical Network Unit - ONU 146
 Opus 26
 OTT - *Over The Top* 51
overlay network 100
overprovisioning 142

P

P-frame 41
 P2P 70
 P2P lainoak 71
 P2P *streaming* 69
 P2P zuhaitzak 71
packet delay variation 53
 paritate bertikala 90
 Pasabidea 96
Passive Optical Network - PON 145
pay-per-view 48
 PBX 112
 PCM 32
 PCP - *Priority Code Point* 134
peer-to-peer 70
 PHB 133
 PI kontrola 138
 pikozelela 149
 PIM - *Protocol Independent Multi-*
cast 129
 pixel 37
 Plateau 36
 PoE - *Power over Ethernet* 113
Policing 135
prefetching 18
 PRISM 101
 protokolo biguna 127
 protokolo gogorra 127
pseudo streaming 66
 Psikoakustika 30

Q

QoS - *Quality of Service* 133
 QoS domain 134
 QoS domeinua 134
queue management 137

R

Random Early Drop 138
RED - Random Early Detection 138
 RED-PD 138
 REM 138
 RGB - *Red Green Blue* 38
 RJ-11 85
 Roget 36
Round Robin 138
 router 9
 RPF - *Reverse Path Forwarding* 130
 RRED 138
 RSVP-TE - *RSVP-Traffic Engi-*
neering 140
 RTCP - *RTP Control Protocol* 94
 RTMP - *Real Time Messaging*
Protocol 64
 RTP 64
run-length encoding 40

S

sarbide-sarea 9
 Sare lokaleko kontrolerako hel-
 bideak 124
 sare-abiadura 14
 sare-aplikazioa 10
 sare-atzerapena 15
 Sare-jokoa 19
 SBC - *Session Border Controller* 114
 SBC, *Sub-Band Coding* 31
 SCCP - *Stream Control Trans-*
mission Protocol 107
 SCCP (*Skinny Client Control*
Protocol) 101
scheduling 137
seed 72
 segiden kodeketa 40
 seinale analogiko 20
 Sekuentzia zenbakia 94
set-top-box 144
 SFB 138
Short Message Service - SMS 148
signaling gateway 106
 SIGTRAN 107
 SILK 26
 SIP - *Session Initiation Protocol* 95
 SIP bezeroa 95
 SIP erregistratzailea 96
 SIP helbidea 97
 SIP proxia 96
 SIP trunk 113
 Skype 100

smart TV 50
soft state protocol 127
 soinu inguratzailea 34
 soinu kuadrafonikoa 34
 soinu monoaurala 34
source coders 32
spectral envelope 33
 SPF - *Short Path First* 139
splitter 145
 SRT - *Secure Reliable Transport* 69
 SS7 84
 SSM 122
 SSM - *Source Specific Multicast* 122
 SSM helbideak 122
stateful 64
streaming 17
Streaming dinamikoa 65
Streaming zerbitzaria 51
 STUN 105
 superkidea 100
 supernodo 72
swarming 72
switch 9

T

T1 111
Tail Drop 133
 TCP/IP protokoloak 10
 TDM 83
Time Division Multiple Access -
 TDMA 146
tit-for-tat 74
token bucket 136
token pertza 136
tracker 72
Traffic Class 141
Traffic Management 142
Traffic shaping 135
 trafikoen ingeniariaritza 139
 trafikoen malgura 19
 trafikoen zurruna 55
 trama 11
transcoding 106
 Trinkoketa 25
Triple Play 51
trunk 111
trunking gateway 106
 TURN 104

U

UCaaS - *Unified Communications*
as a Service 115
 Uhin kodetzaileak 32
 UMTS 148
 unicast 75
Unified Communications 112
 URI - *Uniform Resource Identi-*
fier 97

V

Very Small Aperture Terminal - VSAT 152
Vocoder 33
VoD, Video on Demand 48
VoIP 83
VoIP peering 111
VPN - *Virtual Private Network* 114

W

walled garden 51

waveform coders 32
Wavelength Division Multiplexing - WDM 146
webcasting 18
WebRTC - *Web Real-Time Communication* 69
WFQ - *Weighted Fair Queuing* 137
WiMAX 149
WiMax2 148
wireless broadband 149
Wireless Local Loop - WLL 149
WirelessMAN-Advanced 148
wrapper format 27

Z

zama-banatzaillea 59
Zattoo 74
zerbitzari-kluster 57
zerbitzaria 10
Zulatutako pertza 136
zuntz-nodoa 145

μ

μ-legea 24

Unibertsitateko eskuliburuak
Manual universitarios

UPV/EHUko Argitalpen Zerbitzua
argitaletxea@ehu.eus

Servicio Editorial de la UPV/EHU
editorial@ehu.eus

Tel.: 94 601 2227
www.ehu.eus/argitalpenak



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

ISBN: 978-84-1319-583-4