

Nýting ljósleiðara á Íslandi

Sæmundur E. Þorsteinsson^a

^aRafmagns- og Tölvuverkfræðideild, Háskóla Íslands, Dunhaga 5, 107 Reykjavík

Fyrirspurnir:

Sæmundur E. Þorsteinsson
saemi@hi.is

Greinin barst 23. febrúar 2017
Samþykkt til birtingar 28. apríl 2017

ÁGRIP

Ljósleiðaratæknin komst í almenna notkun á 9. áratug liðinnar aldar. Innleiðing hennar olli byltingu í fjarskiptum og hún er orðin undirstaða flestra fjarskiptakerfa sem í notkun eru. Ljósleiðarar tengja saman heimsálfur og lönd, eru í stofnnetum og aðgangsneta og eru notaðir til bakfæðingar í farsímakerfum. Internetið hefði aðeins orðið svipur hjá sjón án ljósleiðaratækninnar og alþjóðavæðingin hefði aldrei litið dagsins ljós. Íslendingar njóta nú ljósleiðaratengingar við umheiminn um þrjá sæstrengi, Farice og Danice sem liggja til Evrópu og Greenland Connect sem liggur vestur um haf með viðkomu í Grænlandi. Hryggjarstykkið í íslenska stofnnetinu er ljósleiðarahringurinn sem liggur um flestar byggðir landsins og ljósvæðing aðgangsnetsins er langt komin hér á landi. Ljósvæðing sveita er hafin og mun væntanlega taka fá ár að ljúka henni. Fullyrða má að Íslendingar eru í fararbroddi í nýtingu ljósleiðaratækninnar. Í þessari grein verður fjallað um nýtingu ljósleiðaratækninnar á Íslandi, í stofn- og aðgangsneta. Í aðgangsneta er hægt að haga lagningu ljósleiðara á nokkra vegu og verður þeim aðferðum lýst. Einnig verður fjallað um samkeppni á ljósleiðararneta.

Lykilorð: Ljósleiðari, FTTC, FTTH, hjávirkt ljósleiðaranet (PON), beintengdur ljósleiðari, virkt stjörnunet, innviðasamkeppni, þjónustusamkeppni.

ABSTRACT

General deployment of optical fibre technology commenced in the eighties. Its introduction revolutionised the telecommunications arena and has become the foundation of most telecommunication systems in use today. Optical fibres connect continents and countries, are used in core and access networks and for backhauling of mobile communication systems. The internet would barely exist without optical fibres and globalisation would hardly have seen the dawn of light. Three submarine optical cables connect Iceland to the outside world; Farice and Danice connect Iceland to Europe and Greenland Connect to America via Greenland. The optical ring around Iceland constitutes the Icelandic core network. The ring passes by nearly all villages and towns and fibre deployment in the access network has reached an advanced state. Fibre deployment in rural areas has already begun and will presumably be finished in a few years. Iceland plays a leading role in fibre deployment. In this paper, fibre utilisation in Iceland will be described, both in core and access networks. Three different architectures for fibre deployment in the access network will be described. Competition on fibre networks will also be discussed.

Keywords: Optical fibre, FTTC, FTTH, PON, Point-to-Point, Active Star, Infrastructure competition, service competition.

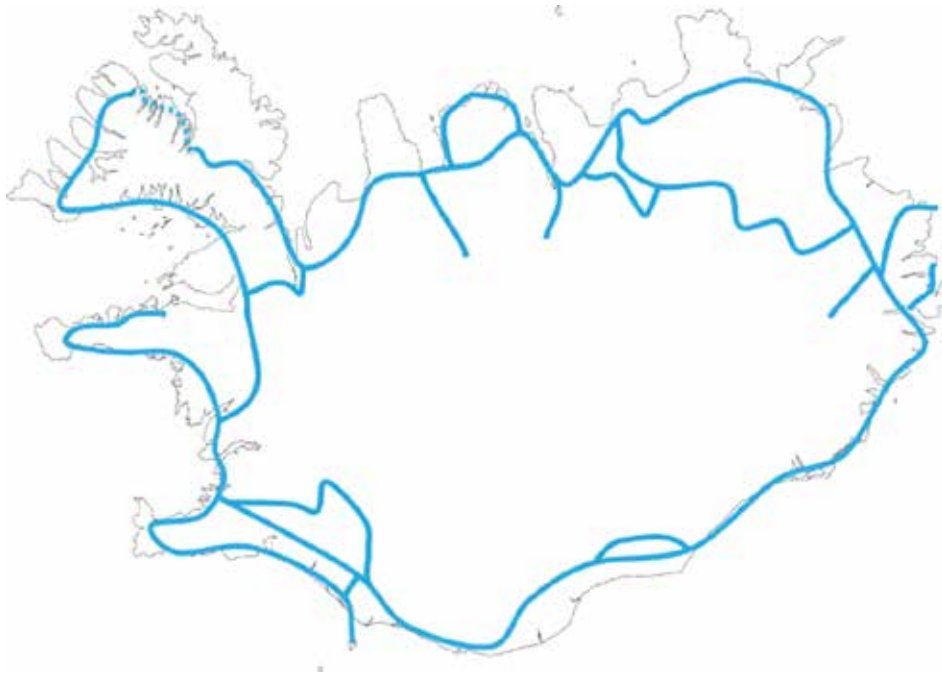
Inngangur

Póst- og símamálastofnun hóf lagningu ljósleiðara á Íslandi árið 1985 [1]. Um þessar mundir urðu stórtækar framfarir við hönnun og framleiðslu ljósleiðara. Unnt varð að framleiða svo granna glerþræði að þeir gátu borið ljós undir aðeins einum hætti sem þýddi að bitahraðinn sem hægt er að senda um einn þráð er gríðarmikill. Í rannsóknarumhverfi hefur tekist að senda um 100 Tb/s yfir 165 km leið [2]. Þetta gagnamagn jafngildir 12,5 milljónum háskerpu sjónvarpsrása og u.þ.b. 200 földu því gagnamagni sem fer um tengingar til Íslands þegar mest er. Ljósleiðarar eru jafnframt ódýrir. Bróðurpartur kostnaðar við ljósleiðarafamkvæmdir í þéttbýli er iðulega jarðframkvæmdir sem ráðast þarf í, því næst kostnaður við endabúnað og kostnaður við ljósleiðarastrengina sjálfa rekur lestina. Kostir ljósleiðara til uppbyggingar háhraða fjarskiptasambanda og -neta eru því ótvíræðir. Engin teikn eru á lofti um að önnur tækni muni leysa ljósleiðara af hólmi. Þráðlaus fjarskipti geta ekki keppt við ljósleiðara hvað varðar getu og tæplega hvað varðar kostnað þegar litið er til lengri tíma. Reyndar er það svo að þráðlaus fjarskipti byggja mjög á notkun ljósleiðara og þeim mun meira sem hraði þeirra er meiri enda er gagnafæðing til þráðlausra fjarskiptastöðva iðulega um ljósleiðara.

Fjarskiptþjónusta

Við upphaf ljósleiðaraaldar voru talfjarskipti yfirgnæfandi en fjarskipti með gögn milli tölva voru að hefja innreið sína. Ekki leið á löngu þar

til myndum og kvikmyndaefni var breytt yfir á gagnaform og þannig borið yfir stafræn fjarskiptanet. Strax var ljóst að einn góðan veðurdag yrðu gagnafjarskiptin umfangsmeiri en talfjarskiptin sem varð raunin í þróuðum löndum um aldamótin [3]. Vöxtur í umferð yfir internetið var mikill á þessum tíma og segja má að umferðin hafi tvöfaldast á eins til tveggja ára fresti eftir því hvernig mælt var. Ástæður vaxtarins voru nokkrar, sífellt fleiri tengdust netinu, tengingar voru bættar með DSL- og ljósleiðaratækni, og kvikmyndaefni var sent í síauknum mæli um netið. Framan af var algengt að fólk skiptist á kvikmyndaefni með tækni sem byggðist mest á svonefndum jafninganeta (e. Peer-to-peer networking) þar sem BitTorrent tækni er fremst í flokki. Þessi þáttur internetumferðarinnar hefur farið minnkandi á undanförunum árum enda er nú orðið mikið val um efnisveitur sem bjóða kvikmyndaefni á vægu verði með miklum gæðum. Háskerpu myndefni (HD, 2k, 1920*1080) krefst um 8 Mb/s fjarskiptahraða en efni með venjulegri skerpu (SD, 1024*576) krefst um 2 Mb/s hraða. Efni með tvöfaldri háskerpu (UHD, 4k, 3840*2160) er talið þurfa um 15 Mb/s [4]. Spurning er hvort svonefnt 8k sjónvarp nái fótfestu í framtíðinni enda þarf mjög stóra skjái til þess að sjá mun á því og 4k sjónvarpi [5]. Ólíklegt er að fólk telji fýsilegt að hafa svo stóra skjái inni á heimilum sínum. Hægt hefur á vexti internetumferðar síðan fyrir aldamót [6]. Ekkert bendir til þess að vöxturinn verði hraðari á ný og ekki er vitað hvort og hvenær hann stöðvast. Hitt virðist ljóst að þær tengingar sem flestir Íslendingar eiga nú kost á verði fullnægjandi um nokkurt árabíl. Helstu nýjungar sem taldar eru að krefjist enn meiri fjarskiptahraða eru



Mynd 1. Íslenski ljósleiðarahringurinn

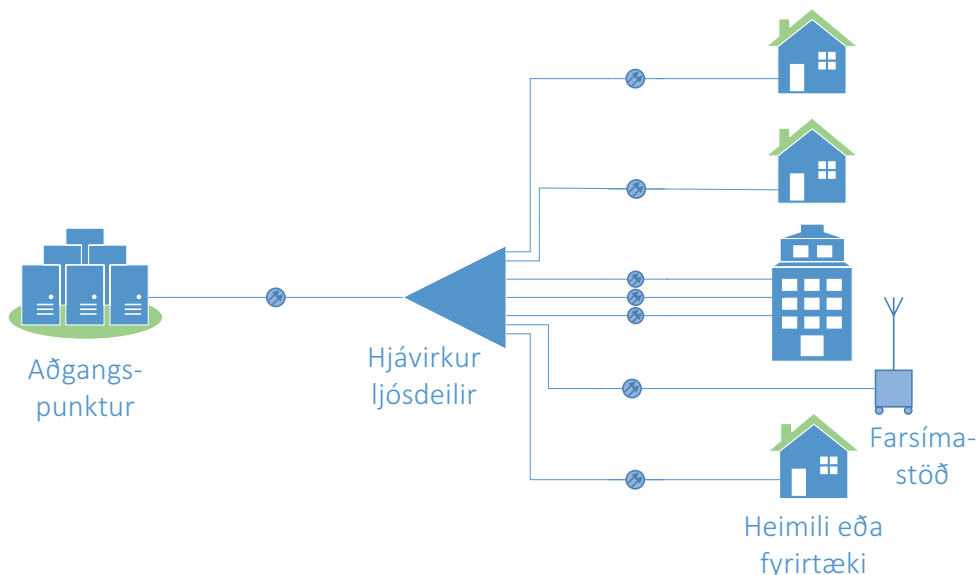
fjarskipti með þrívíddarkvikmyndir, svonefndar heilmýndir (e. hologram). Nú er unnið ótullega að því að þróa kóðunartækni fyrir slíkar myndir og svo virðist að mönnum takist að þjappa þeim verulega mikið saman þannig að óvíst er hvort það valdi jafn miklum vexti fjarskiptaumferðar og margir hafa talið [7]. Í [8] er fjallað um sendingar slíkra mynda með þræðlausum hætti.

Ljósleiðaralagnir

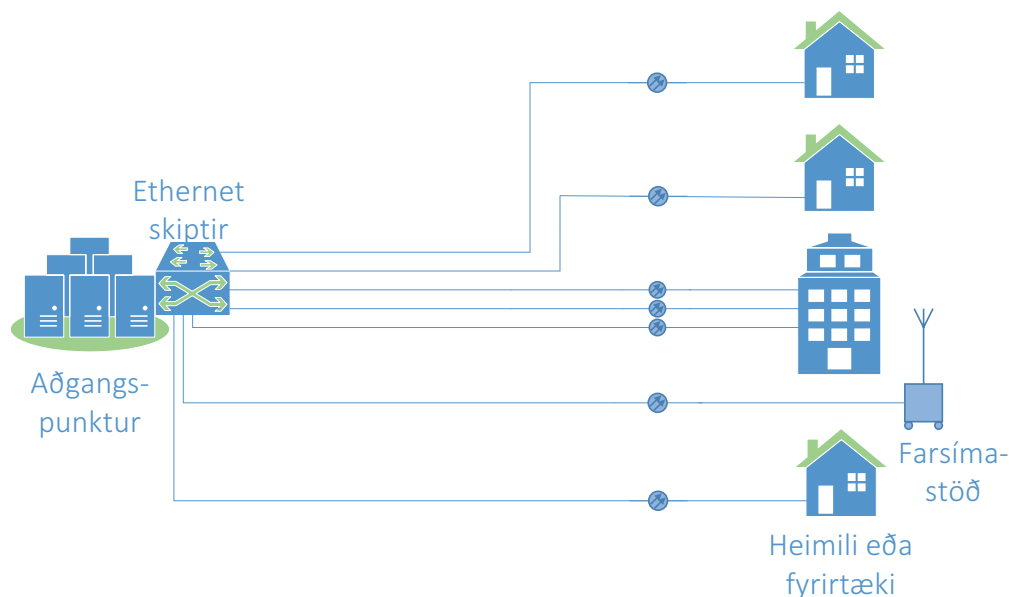
Ljósleiðarahringurinn var að mestu lagður á árunum 1986 til 1993 og þjónar landsmönnum enn. Hann er í eigu Mílu ehf. og íslenska ríkisins. Ríkið leigir sína þræði til Fjarskipta hf. (Vodafone). Í ljósleiðarahringnum eru þrjú ljósleiðarapör á sumum svæðum en fjögur á öðrum. Hringurinn í núverandi formi hefur næga burðargetu um langa framtíð og óvíst er hvenær þarf að endurnýja hann, t.d. vegna öldrunar efnis. Enn hefur ekkert komið fram sem bendir til öldrunar í þeim strengjum og glerþráðum sem legið hafa í jörðinni í hartnær 30 ár enda vandað til verka við lagningu þeirra. Ljósleiðarahringurinn er sýndur á mynd 1. Nú hafa verið lagðir um 5 þúsund km af ljósleiðara í stofnnetinu

íslenska. Til viðbótar hafa Orkufjarskipti lagt ljósleiðara yfir hálandi landsins. Hann liggur milli virkjanasvæðisins á miðhálandinu og Eyjafjarðar. Jafnframt búa Orkufjarskipti yfir ljósleiðurum sem liggja í háspennulínunum. Orkufjarskipti sinna þó eingöngu fjarskiptaþörfum orkufyrirtækja [9]. Landið er tengt umheiminum um þrjá sæstrengi sem allir eru nýlegir ljósleiðarastrengir, þ.e. Farice, Danice [10] og Greenland Connect [11]. Flutningsgeta þeirra er mjög vannýtt og bjóða þeir landsmönnum mikil sóknarfæri, t.d. við uppbyggingu gagnavera [12].

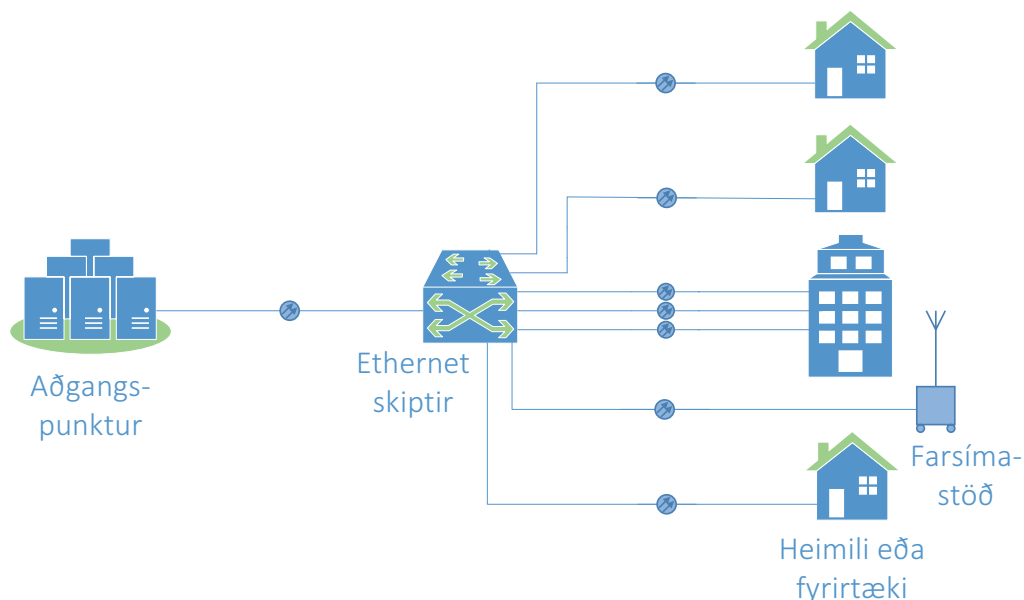
Ljósleiðarar hafa verið nýttir í aðgangsnæmum hér á landi síðan 1994 þegar lagning breiðbands Pósts og Síma hófst. Í breiðbandinu voru ljósleiðarar lagðir til götuskápa sem eru í mest 200 m línufjarlægð frá heimilum. Frá götuskápunum til heimilanna voru lagðar símalínur, kóaxstrengir og síðar einnig blástursrör fyrir ljósleiðara. Þessi högun er nefnd „ljósleiðari í götuskáp“ og „Fibre to the Curb“ (FTTC) á ensku. Um og eftir aldamótin fóru menn að leggja ljósleiðara alla leið heim til viðskiptavina og er sú högun nefnd „ljósleiðari heim“ eða „Fibre to the Home“ (FTTH). Helstu aðilar hér á landi sem leggja ljósleiðara



Mynd 2. Hjávírt ljósleiðaranet (PON)



Mynd 3. Beintengdur ljósleiðari (PTP)



Mynd 4. Virkt stjörnunet (AS)

heim eru Gagnaveita Reykjavíkur (GR), Míla og Tengir.

Við ljósleiðaralagnir heim er þrenns konar högun beitt, hjávirkt ljósleiðaranet (e. Passive Optical Network, PON) mynd 2, beintengisamband (e. Point to Point, PTP) mynd 3 og virkt stjörnunet (e. Active star, AS) mynd 4.

Hvaða högun hentar best?

Allar þær haganir ljósleiðaraneta sem hér hefur verið getið anna gríðarmiklu gagnamagni og verða aldrei takmarkandi þáttur hvað varðar þann gagnhraða sem um netin fer. Þetta er augljóst hvað varðar beintengdan ljósleiðara, þar er óskipt ljósleið alla leið frá símstöð og heim til notanda. Netskiptirinn (eða skiptarnir) í virku stjörnuneti ráða hraðanum á slíku neti. Nú þegar eru netskiptar fáanlegir sem ráða við margfaldan þann hraða sem heimili þurfa og munu þurfa um langa framtíð. Þróun netskipta er ekki hætt og því má fullyrða að stjörnuhögunin sé framtíðarhæð. Sama gildir um PON högunina. PON byggir á því að senda sama gagnastrauminn til allra notanda, straumurinn er dulkóðaður og endabúnaður (ONT, Optical Network Termination) hjá hverjum notanda sér um að hleypa gögnum þess notanda í gegn. Hjávirkur (e. passive) deilir sér um að deila

ljósorkunni til þeirra notenda sem tengjast hverju sinni. Sú útfærsla sem nú er mest notuð er nefnd GPON (Gigabit Passive Optical Network). Í GPON er 2,5 Gb/s hraði sem skiptist milli notenda sem tengjast deilinum. Algengt er að hafa fjölda þeirra á bilinu 32 til 128. Ef gert er ráð fyrir að 64 notendur tengist deilinum eru því 39 Mb/s að meðaltali til reiðu fyrir hvern notanda.

Öll fjarskiptakerfi eru hönnuð með tilliti til þess að afar litlar líkur eru á því að allir notendur nýti getu kerfisins til fulls á sama tíma, þetta er nefnt „tölfræðileg fléttun“ (e. statistical multiplexing). Þetta gildir einnig um ljósleiðaranet, óháð högun þeirra. Gagnaumferð kemur í gusum (e. burst) og því þurfa netin að vera hæf að veita mikinn hraða í skamma stund þó að meðalhraðinn yfir tíma geti verið afar lágur. Um þessar mundir er meðalhraði á ljósleiðaratengingu á háannatíma aðeins um 1,5 Mb/s. Því eru allar líkur á því að notandi GPON njóti gusuhraða sem er mörg hundruð Mb/s þegar hann þarf á því að halda. Dæmi eru um fjarskiptafélög sem bjóða allt að 1 Gb/s hraðar tengingar yfir GPON net.

Þeir sem hallast að beintengdum ljósleiðaranetum benda á að slíkt net séu öruggari til framtíðar af því að gagnaflutningsgeta þeirra er ekki takmörkuð. Í raun má fullyrða það sama um PON og AS.

Gagnaflutningsgeta ljósleiðara er svo mikil að einu gildir hvort hún skiptist milli 100 notenda eða að einn notandi njóti hennar allrar. Hugmyndin um beintengd ljósleiðaranet er í raun afsprengi högunar koparneta [13]. Koparnet eru beintengd, hver notandi hefur sína koparlínu alla leið til símsstöðvar. Í ljósleiðaraneti er ekki þörf fyrir þetta og mun hagkvæmari uppbyggingarkostir eru fyrir hendi. Auðvelt er að leggja ljósleiðaranet þar sem hver leggur er 20 km langur og því er mjög hagkvæmt að hafa deilipunkta nálægt notendum og fækka þar með símsstöðvum og ljósþráðum sem til þarf. Að auki er högunin mun sveigjanlegri þar sem auðveldara og ódýrara er að bæta við notendum sem síðar koma til sögunnar.

Uppbygging PON neta er hagkvæmari en beintengdra neta sem nemur u.þ.b. 10% til 30% eftir því umhverfi sem netin eru lögð í. Skv. [14] má vænta þess að fjárfesting (CAPEX) við PON lausnir í þéttbýli sé um 10% lægri en við beintengdan ljósleiðara og skv. [15] má búast við 10% - 30% minni fjárfestingu í dreifbýli. PON er sú högun sem flest fjarskiptafélög um heiminn hafa valið [16], um 75% tenginga í Evrópu eru byggðar á PON [17]. Nýlegt dæmi um PON net er ljósleiðaranet Google í Bandaríkjunum, sem nefnt er Google fiber [18, 19].

Rekstur PON neta er talinn hagkvæmari en rekstur beintengdra og AS neta. Í PON er enginn virkur búnaður milli símsstöðvar og heimilis, aðeins ljósleiðarar og hjávirkur ljósdeilir. Sama er að segja um beintengd net en þau þurfa að hafa einn ljóssendi fyrir hvern viðskiptavin meðan PON net þurfa einn fyrir hverja 32 – 128 viðskiptavini. Í AS þarf netskipti sem hefur a.m.k. jafnmörg ljóstengi og viðskiptavinir eru margir. Við þetta bætist að viðgerð á ljóstrengjum í PON netum getur tekið mun skemmri tíma en í beintengdum netum. Samsetning ljósleiðara sem hefur verið slitinn (t.d. af gröfu) er tímafrekt verk. Því er betra að nota strengi með tiltölulega fáum ljósleiðurum og stytta þar með viðgerðartíma umtalsvert. Skv. [20] er árlegur rekstrarkostnaður beintengdra ljósleiðaraneta um 35 € hærri en GPON neta fyrir hvern tengdan viðskiptavin. Þetta stafar m.a. af því að beintengd net þurfa meiri orku og meira rými í símsstöð.

Ljósleiðaralagnir í sveitum Íslands

Nokkur íslensk sveitarfélög hafa staðið fyrir ljósleiðaravæðingu á sínum svæðum. Víða í dreifbýli á Íslandi ríkir markaðsbrestur sem þýðir að enginn markaðsaðili telur sér í hag að fjármagna ljósleiðaralagnir á markaðslegum forsendum. Þess vegna hefur Fjarskiptasjóður fjármagnað hluta framkvæmdanna í nokkrum tilvikum og hefur þá stefnu að halda áfram slíkri fjármögnun. Áætlað er að úthluta 500 milljónum króna árlega á árunum 2016-2019 [21].

Í sveitum eru oft svo fáir viðskiptavinir fjarskiptafélaga að tekjurnar sem þeir skapa hrökkva ekki fyrir kostnaði. Til þess að veita þjónustu yfir ljósleiðaranet þarf þjónustuveitandi að bakfæða (e. backaul) netið með internettingu, sjónvarpstengingu og símatengingu. Kostnaður við bakfæðinguna getur orðið verulegur hluti af tekjum fjarskiptafyrirtækja af netinu sem undirstrikar þörfina á því að halda öllum öðrum kostnaði við lágmark. Ljósleiðaranet í sveit veitir enga þjónustu, það verður að tengjast inn á þjónustuhnútpunkta sem margir eru í Reykjavík. Þar sem strjálbýlið er mest er hugsanlegt að stjórnvöld þurfi hreinlega að styrkja rekstur ljósleiðarakerfa. Á móti mætti spara t.d. þráðlausar útsendingar útvarps og sjónvarps.

Ljósleiðaralagnir í sveitum munu leysa úr fjarskiptapörfum sveitafólks til frambúðar. Fólk mun eiga kost á gagnvirkum sjónvarpi, háhraða internettingu og góðu talsambandi. Við bætist að ódýrara verður að setja upp farsímanet þar sem unnt verður að nýta ljósleiðaranetið til gagnafæðingar farsímastöðva en gagnafæðingin er verulegur kostnaðarliður við uppsetningu farsímastöðva. Þetta styður enn frekar PON uppbyggingu því auðveldara og ódýrara er að bæta við nýjum notendum á PON net en á beintengd net. Ástæðan er sú að á endanum klárast ljósþráðir í beintengdum netum nema þau séu verulega

yfirhönnuð frá upphafi. Í sveitum geta risið sumarbústaðahverfi sem þurfa ljósleiðaratengingar og ný farsímanet (t.d. 5G) þurfa þéttirðin sendanet sem best er að bakfæða með ljósleiðurum.

Samkeppni á ljósleiðaranetum

Nauðsynlegt er að tryggja samkeppni í fjarskiptum. Tvær meginaðferðir eru notaðar og nefnast þær innviðasamkeppni og þjónustusamkeppni. Innviðasamkeppni byggist á því að hver aðili á markaði byggir upp sína eigin innviði og býður þjónustu sína yfir þá. Dæmi um þetta eru farsímakerfin þar sem hver aðili hefur byggt upp eigin farsímanet og forskot á markaði hefur m.a. falist í því að hafa sem mesta útbreiðslu. Annað dæmi er samkeppni GR og Mílu þar sem verið er að leggja tvö samhliða ljósleiðaranet. Í þessu eru línur þó ekki skýrar og þjónustusamkeppni ryður sér til rúms. Vodafone og Nova hafa sameinað rekstur á sínum farsímainnviðum og nýta sömu innviðina til að keppa hvort við annað og aðra á markaðnum. Sýndarfarsímafélög (MobileVirtual Network Operator, MVNO) eru einnig á farsíma markaði. Slík félög semja við félag sem á innviði og bjóða farsímaþjónustu yfir þá innviði. Dæmi um þetta er 365 sem býður farsímaþjónustu yfir farsímainnviði Símans.

Þjónustusamkeppni byggir á því að tveir eða fleiri aðilar nýta tiltekna innviði til að veita þjónustu sína. Þjónustuaðilar leigja þá aðgang að innviðunum sem geta verið í eigu eins þeirra eða í eigu aðila sem ekki býður þjónustu á markaði. Góð dæmi um þetta eru ljósleiðaranet GR, koparnet og ljósveita Mílu. Hvorugt félag býður fjarskiptaþjónustu í smásölu en önnur fjarskiptafélög leigja aðgengi að innviðunum og keppa um hylli neytenda með mismunandi þjónustu og verði. GR og Míla hafa þó innviðasamkeppni sín á milli eins og fyrr segir.

Samkeppni á beintengdum ljósleiðaranetum og virkum stjórnutengdum netum getur farið þannig fram að aðilar leigja sameiginlega hýsingu fyrir búnað (símsstöð) og hver setur upp sinn netskipti. Ljósleiðaratengigrind er sett upp og hægt er að tengja viðskiptavini hvers fjarskiptafélags inn á netskipta þess. Þetta kemst nærri því að vera innviðasamkeppni þó að innviðirnir séu í raun þeir sömu milli aðseturs viðskiptavinar og símsstöðvar. Hægt er að reka PON net á beintengdu ljósleiðaraneti en þá næst ekki kostnaðarhagkvæmnin sem fæst við það að miða innviðina við PON.

Ef ljósleiðaranet er lagt með PON högun er hægt að mynda þjónustusamkeppni. Einnig fylgir því óverulegur kostnaður að leggja strengi með nægilega mörgum ljósþráðum þannig að samkeppnisáðilar geti hver rekið eigið PON net. Þetta leiðir þó til mun verri nýtingar á símsstöðvarbúnaði. Þjónustusamkeppni sem unnt er að viðhafa á PON neti er vel þekkt á markaðnum og er mikið beitt. Dæmi um þetta er sýndaradgangur á VDSL netum sem nefndur er VULA (Virtual Unbundled Local Access) og viðskiptalíkan GR sem nefnt er „opið net“ [22] og felst í því að margir markaðsaðilar nýta innviði GR til að bjóða þjónustu sína.

Lokaorð

Stjórnvöld hafa markað þá stefnu að leggja ljósleiðara sem víðast um sveitir landsins [21]. Sú aðgerð horfir mjög til frambara fyrir landsmenn og mun styðja verulega við atvinnulíf og nýsköpun í sveitum. Mjög þarf að vanda til verka við lagningu ljósleiðaranna til þess að rekstur netanna verði eins hnökralaus og kostur er. Viðgerðir í sveitum eru kostnaðarsamar og taka oft mun lengri tíma en tilsvareandi viðgerðir í þéttbýli. FTTH net eiga að duga um margra áratuga skeið og ekki ætti að vera þörf fyrir mikla endurnýjun strengja eins og reynslan af ljósleiðarahringnum sýnir. Endabúnaður ljósleiðara mun halda áfram að þróast og víst er að ávallt verður hægt að bjóða viðskiptavinum tengdum ljósleiðaraneti þann fjarskiptahraða sem þeir óska. Þetta er óháð þeirri högun sem beitt er og gildir um PON, beintengd og AS net. Ýmiss konar þróun á sér stað í tækni yfir PON net og er lesendum t.d.

bent á [23] um frekari fróðleik. Eitt af því sem athygli vekur er samþætting PON og fimmtu kynslóðar farsímaneta. Búist er við því að flestar aðgerðir sem nú fara fram í farsímastöðvum verði færðar í tölvuský í framtíðinni og eftir stíji lítið annað en sendir, viðtæki og loftnet í farsímastöðvum. Tengingin milli tölvuskýs og slíkra farsímastöðva er nefnd „framfæðing“ (e. fronthaul) og þarf að eiga sér stað með miklum bitahraða. Nú er unnið að stöðlum sem gera slíka framfæðingu yfir PON mögulega til þess að halda kostnaði við hana í lágmarki.

Heimildir

- [1] H. Þorleifsson, Söguþræðir Símans - Þróunarsaga íslenskra símamála, Reykjavík: Póst- og símamálastofnun, 1986.
- [2] J. Hecht, „Ultrafast fibre optics set new speed record,“ *New Scientist*, 9 April 2011. [Á neti]. Available: <https://www.newscientist.com/article/mg21028095.500-ultrafast-fibre-optics-set-new-speed-record>. [Skoðað 4. desember 2016].
- [3] D. M. Flournoy, *The Broadband Millenium: Communication Technologies and Markets*, Chicago: International Engineering Consortium, 2004.
- [4] T. Morrod, „Netflix goes Ultra High Definition,“ *IHS Inc.*, 09 April 2014. [Á neti]. Available: <https://technology.ihs.com/496648/netflix-goes-ultra-high-definition>. [Skoðað 6. febrúar 2017].
- [5] E. Harstead og R. Sharpe, „Future Fiber-To-The-Home bandwidth demands favor Time Division Multiplexing Passive Optical Networks,“ *IEEE Communications Magazine*, pp. 218-223, November 2012.
- [6] A. Odlyzko, „The growth rate and nature of Internet traffic,“ *Transactions on Internet Research*, special issue on “New developments on the Web,“ pp. 39-42, January 2016.
- [7] T. Senoh, I. Yasuyuki, S. Hisayuki og Y. Kenji, „Multi-View Image and Depth Map Coding for Holographic Reconstruction for Future Idealistic 3DTV System,“ 2013.
- [8] Y. Huo, P. T. Kovács, T. J. Naughton og L. Hanzo, „Wireless Holographic Image Communications Relying on Unequal Error Protected Bitplanes,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, nr. DOI 10.1109/TVT.2017.2656798, 2017.
- [9] „Um Orkufjarskipti,“ *Orkufjarskipti*, [Á neti]. Available: <https://orkufjarskipti.is/?pageid=3>. [Skoðað 14 febrúar 2017].
- [10] „Farice,“ *Farice ehf.*, [Á neti]. Available: <http://www.farice.is>. [Skoðað 31. janúar 2017].
- [11] „Submarine Cable Map,“ *TeleGeography*, 8. febrúar 2017. [Á neti]. Available: <http://www.submarinecablemap.com>. [Skoðað 10. febrúar 2017].
- [12] Ó. Benediktsson, „Um Farice og gagnaver,“ *Morgunblaðið*, p. 24, 9. september 2016.
- [13] D. Payne og R. Davey, „A new architecture for optical networks,“ *Telekommunikation, special issue on optical communications*, pp. 34-48, Vol. 2 2005.
- [14] E. Zouganelli og et.al., „Fibre in Access Network Greenfield Scenarios, Deliverable 1,“ *Eurescom GmbH, Heidelberg*, 2006.
- [15] K. I. Ásgeirsson, „Ljósleiðaravæðing Mílu - Nútið og framtíð,“ í *Hádegisfundur Ský, “Ljóstengt Ísland - Fyrirmynd annarra þjóða”, Reykjavík*, 2016.
- [16] F. news, „Industry’s first XGS-PON Plugfest extends PON interoperability,“ *FSAN, Full service Access Network*, 15 Desember 2016. [Á neti]. Available: <http://www.fsan.org/industry-first-xgs-pon-plugfest-extends-pon-interoperability/>. [Skoðað 13. febrúar 2017].
- [17] E. Frestaets, „Speed & Convergence define the Access Network of the Future,“ í *Haustfundur Mílu, Reykjavík*, 2016.
- [18] E. Keith, „Google Fiber’s Brewing Little Secret Exposed: It’s GPON!,“ *Current Analysis*, 27 Febrúar 2014. [Á neti]. Available: <https://networkmatter.com/2014/02/27/google-fibers-brewing-little-secret-exposed-its-gpon/>. [Skoðað 20. desember 2016].
- [19] Google, „Google fiber,“ *Google*, 2016. [Á neti]. Available: <https://fiber.google.com/about/>. [Skoðað 1 Febrúar 2017].
- [20] S. Ricciardi, G. Sanots-Boada, D. Cariglio og J. Domingo-Pascual, „GPON and EP2P: A Techno-Economic Study,“ í *17th European Conference on Networks and Optical Communications, Vilanova i la Geltrú, Catalonia Spain*, 2012.
- [21] H. Benediktsson, „Snjalla Ísland fyrirmynd annarra þjóða,“ í *Hádegisfundur Ský, “Ljóstengt Ísland - Fyrirmynd annarra þjóða, Reykjavík*, 2016.
- [22] Gagnaveita_Reykjavíkur, „Stefna,“ *Gagnaveita Reykjavíkur*, 2016. [Á neti]. Available: <https://www.ljosleidarinn.is/stefna>. [Skoðað 15. desember 2016].
- [23] J. Salgado, R. Zhao og N. Monteiro, „New FTTH-based technologies and applications,“ *FTTH Council Europe, Deployment & Operations Committee*, http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/DandO_White_Paper_2014.pdf, 2014.