

Opinnäytetyö (AMK)
Elektroniikan koulutusohjelma
Tietoliikennejärjestelmät
2017

Olli Salminen

SATELLIITTIJÄRJESTELMIEN JA SATELLIITTIANTENNITEKNOLOGIAN KEHITYS

Olli Salminen

SATELLIITTIJÄRJESTELMIEN JA SATELLIITTIANTENNITEKNOLOGIAN KEHITYS

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua satelliittiteknologian kehitykseen. Työn alkuosassa käsitellään satelliittijärjestelmiä tietoliikenne- ja paikannusjärjestelmien osalta. Tässä yhteydessä tutustutaan olemassa oleviin järjestelmiin sekä selvitetään minkälaisia satelliittijärjestelmiä on kehitteillä. Satelliittiyhteyksien ja satelliittiantennien keskeisimpiä radioteknisiä ominaisuuksia käsitellään työn keskivaiheessa. Työn lopussa käsitellään kehitteillä olevia uuden sukupolven antennitekologioita. Tässä yhteydessä näiden kehitteillä olevien antennien ominaisuuksia verrataan paraboloidiantennien ominaisuuksiin. Työn toimeksiantajana on Brighthouse Intelligence Oy.

Työn lähdemateriaalina käytetään internetissä saatavilla olevia artikkeleita, uutisia ja tieteellisiä kirjoituksia. Työn radioteknisessä osiossa lähdemateriaalina käytetään alan kirjallisuutta.

Työn lopputuloksena on saatu kirjallinen selvitys nykyisistä sekä kehitteillä olevista satelliittijärjestelmistä sekä uusista antennitekologioista. Työtä tehdessä kävi ilmi, että uusia järjestelmiä ja antenneja on tulossa markkinoille viiden vuoden sisällä. Antenniteknologioiden osalta markkinoille on tulossa eri tyyppisiä vaiheohjattuja antenneja ja satelliittijärjestelmiä kehitetään tietoliikenne- ja paikannuspalveluiden tarpeisiin. Näiden kehitteillä olevien järjestelmien ja antenniteknologioiden avulla pystytään esimerkiksi tarjoamaan nopeita tietoliikennedyhteyksiä erilaisiin mobiilisovelluksiin ja alueille, joilla muut verkkoinfrastruktuurit ovat joko kannattamattomia, tai jopa mahdottomia toteuttaa. Tulevaisuudessa autonomisesti liikkuvat ajoneuvot ja laivat voivat hyödyntää näiden järjestelmien tarjoamia mahdollisuuksia satelliittiyhteyksissä.

ASIASANAT:

satelliittiviestintä, tietoliikennetekniikka, satelliittiantennit, radioaallot

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme in Electronics | Communication Systems

may 2017 | 67 pages + appendices

Olli Salminen

DEVELOPMENT OF SATELLITE SYSTEMS AND SATELLITE ANTENNA TECHNOLOGIES

The purpose of this thesis was to become acquainted with the development of the satellite communication technology. The first part of the thesis focuses on the satellite systems for the data communications systems and positioning systems. The thesis first examines the existing systems and clarifies what kind of satellite systems are under development. Then the thesis discussed the radio technical properties of the satellite connections and of the satellite antennas and, finally, the next generation of antenna technologies under development. In this context, the properties of the antennas under development are compared with the properties of the paraboloid antennas. The client of the thesis was Brighthouse Intelligence Ltd.

Articles available in the Internet, news and scientific writings were used as a source material of the work. The literature of the field was used as the source material in the radio technical part of the work.

The end result of the thesis was a report of existing and matured satellite systems as well as new antenna technologies. The thesis shows that new systems and antennas have been launched into the market within the last five years. In the case of antenna technologies, various types of phase-controlled antennas are coming into the market and satellite systems will be developed for the needs of telecommunications and location services. With these systems and new antenna technologies being developed, for example, it is possible to provide high-speed data communications to different mobile applications and areas where other network infrastructures are either unprofitable or even impossible to implement. In the future, autonomously moving vehicles and ships can take advantage of the opportunities offered by these systems in satellite connections.

KEYWORDS:

satellite communication, satellite antennas, telecommunications, radio waves

SISÄLTÖ

SANASTO	6
1 JOHDANTO	9
2 SATELLIITTIJÄRJESTELMÄT	11
2.1 Tietoliikennesatelliittijärjestelmät	11
2.2 Satelliittipaikannusjärjestelmät	14
2.3 Uuden sukupolven satelliittijärjestelmiä	16
3 RADIOSIGNAALIN OMINAISUUKSIA SATELLIITTIJÄRJESTELMISSÄ	19
3.1 Satelliittiyhteyksissä käytetyt taajuusalueet	19
3.2 Radioaallon eteneminen	20
3.3 Ilmakehän vaikutukset	21
3.4 Signaalikohina -suhde S/N	22
3.5 Hyvyysluku G/T	25
3.6 Antennin vahvistus ja ekvivalenttinen säteilyteho	26
3.7 Polarisaatio	26
3.8 Kiertoradat	30
4 LAUTASANTENNIT	36
4.1 Polttopisteestä syötetty prime-focus-antenni ja offset-antenni	37
4.2 Gregoriaaninen ja Cassegrainin antenni	38
5 VAIHEOHJATUT ANTENNIT	39
5.1 Phasor Solutions Ltd	39
5.2 Kymeta Corporation	42
5.2.1 Metamateriaali	43
5.3 ThinKom Solutions Inc	45
5.3.1 VICTS-antenniteknologia	46
5.4 Skytech Research Ltd	48
6 ANTENNIEN VERTAILU	50
6.1 Fyysiset ominaisuudet	51

6.2 Sähköiset ominaisuudet	54
7 YHTEENVETO	59
LÄHTEET	61

LIITTEET

- Liite 1. Lautasantennien ominaisuudet
- Liite 2. Vaiheohjattujen antennien ominaisuudet

SANASTO

Airbus Defense and space	Airbus-konsernin puolustus-, ilmailu- ja avaruusalan tuotteista ja palveluista vastaava osasto
Alphasat	Inmarsatin neljännen satelliittisukupolven neljäs satelliitti
Aviator	Cobham Satcomin valmistama tuotenimi
BBflat	Skytech researchin valmistama tasoantenni
BGAN	Inmarsatin tarjoama palvelu äänen ja laajakaistaisen tietoliikenteen siirtoon
BUC	Bloc up converter, käytetään satelliittisignaalien taajuusmuuntimena ja lähettimenä
C-band	4-8 GHz:n taajuusalue
CDMA	Code division multiple access, koodijakokanavointi
Cobham Satcom	Satelliitti- ja radiotietoliikenteen tuotteiden valmistaja
DARPA	Defense advanced research projects agency, USA:n puolustusministeriön virasto, joka vastaa armeijan tuotekehityksestä
dBd	antennin vahvistus desibeleissä dipoliantenniin verrattuna
dBi	antennin vahvistus desibeleissä isotrooppiseen antenniin verrattuna
EADS Astrium	European aeronautic defence and space, kantoraketien ja satelliittien valmistaja
EIRP	Equivalent isotropically radiated power, ekvivalenttinen isotrooppinen säteilyteho
Explorer	Cobham Satcomin valmistama tuotenimi
Falcon Ka-2517	ThinKom ltd:n valmistama antenni
Falcon Ku-3030	ThinKom ltd:n valmistama antenni
FDMA	Frequency division multiple access, Taajuusjakokanavointi
Fleet Broadband	Inmarsatin tarjoama palvelu äänen ja laajakaistaisen tietoliikenteen siirtoon

G/T	Vahvistuksen ja kohinalämpötilan suhde, hyvyysluku
Galileo	Eurooppalainen satelliittipaikannusjärjestelmä
GEO	Geostationary earth orbit, geostationaarinen kiertorata
Global-Star	Satelliittipuhelin -palveluja tarjoava tietoliikenneyhtiö
Global Xpress	Inmarsatin tarjoama palvelu äänen ja laajakaistaisen tietoliikenteen siirtoon
Glonass	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema, venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä
GMDSS	Global maritime distress and safety system, maailmanlaajuinen merenkulun hätä- ja turvallisuusradiojärjestelmä
GPS	Global positioning system, Yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä
GX-palvelu	Global Xpress -palvelu
HEO	Highly elliptic orbit, hyvin elliptinen kiertorata
I-4 sarja	Inmarsatin neljäs satelliittisukupolvi
Inmarsat	Kansainvälinen satelliittitietoliikenne -palvelujen tarjoaja
Intellian technologies	satelliittijärjestelmien toimittaja
Intelsat	Kansainvälinen satelliittitietoliikenne -palvelujen tarjoaja
Iridium	Satelliittipuhelin -palveluja tarjoava tietoliikenneyhtiö
Iridium Pilot	Iridiumin tarjoama palvelu äänen ja laajakais- taisen tietoliikenteen siirtoon
k	Boltzmannin vakio
Ka 100t	ThinKom ltd:n valmistama antenni
Ka-band	26-40 GHz:n taajuusalue
Ku 100i	ThinKom ltd:n valmistama antenni
Ku-band	12-18 GHz:n taajuusalue
LEO	Low earth orbit, matala maan kiertorata

LHCP	Left handed circular polarization, vasenkätinen kiertopolarisaatio
MEO	Medium earth orbit, keskikorkea maan kierto-rata
Metamorphose	Keinotekoisten sähkömagneettisten materiaalien ja metamateriaalien virtuaali-instituutti
Orbit communication systems	satelliittijärjestelmien toimittaja
PEO	Polar earth orbit, polaarinen kiertorata
Progressive pitch™	Oneweb Ltd:n kehittämä teknologia satelliittihäiriöiden ehkäisyyn päiväntasaajan alueella
RHCP	Right handed circular polarization, oikeakätinen kiertopolarisaatio
S/N	Signal to noise ratio, signaalikohina -suhde
Sailor	Cobham Satcomin valmistama tuotenimi
SBAS	Satellite based augmentation system, satelliittipohjainen parannusjärjestelmä, parantaa GPS-järjestelmän toimintaa
Seatel	Cobham Satcomin valmistama tuotenimi
SES	Société Européenne des Satellites, Kansainvälinen satelliittitietoliikenne -palvelujen tarjoaja
Swift Broadband	Inmarsatin tarjoama IP-pohjainen pakettikytkentäinen palvelu
Teledesic	Kansainvälinen satelliittitietoliikenne -palvelujen tarjoaja
Thales Alenia Space	Ranskalais-italialainen avaruusteollisuusyhtiö
Thinair	ThinKom Ltd:n valmistama antenni
Thinline	ThinKom Ltd:n valmistama antenni
Thinpack	ThinKom Ltd:n valmistama antenni
Thinsat	ThinKom Ltd:n valmistama antenni
VanAllenin vyöhyke	Maapalloa ympäröivä säteilyvyöhyke
Vflat Ku/Ka	Skytech researchin valmistama tasoantenni
VICTS	Variable inclination continuous transverse stub, Thinkomin patentoima menetelmä suuntakeilan säätöön
λ	aallonpituus

1 JOHDANTO

Satelliittiteknologia kehittyy ja kehitteillä olevia uuden sukupolven järjestelmiä on viime aikoina julkaistu niin uusien satelliittijärjestelmien kuin antenniteknologioiden osalta. Tässä opinnäytetyössä tutustutaan olemassa oleviin järjestelmiin sekä luodaan katsaus näihin seuraavan sukupolven järjestelmiin. Työn tavoitteena on luoda selvitys satelliittijärjestelmien tulevaisuuden suunnista sekä luoda kokonaiskuva kehitteillä olevista tasoantenneista. Tämä opinnäytetyö auttaa ymmärtämään satelliittiteknologian keskeisimpiä piirteitä sekä sen kehitystä.

Työn lähdemateriaalina käytetään pääsääntöisesti antennivalmistajien ja tietoliikenneyritysten internetsivuja. Nämä sivustot tarjoavat tietoa uusista järjestelmistä ja laitteista. Alaan liittyvää uutisointia seuraamalla ja tieteellisiä artikkeleita lukiemalla on saatu tietoa kehitteillä olevista teknologioista. Satelliittiyhteyksien ominaisuuksiin on perehdytty radiotekniikan kirjallisuuden avulla. Räisäsen ja Lehdon kirjoittama Radiotekniikan perusteet [1], Ikosen kirjoittama Teräväpiirtotelevisio [2] sekä Karttusen kirjoittama Avaruuden valloitus [3] toimivat kattavana lähdemateriaalina työn radiotekniseen osuuteen. Antenneja käsittelevissä asioissa lähteenä on käytetty myös valmistajien tarjoamia datalehtiä. Tästä aiheesta kirjoitettuja suomenkielisiä opinnäytetöitä ei ollut saatavilla, mutta englanniksi samoja aiheita käsitellään Thomas Ross Hendersonin kirjoittamassa Networking over Next-Generation Satellite System [4] ja Niels Vesterdal Larsenin kirjoittamassa Electronically Steerable Antennas For Satellite Communications [5] teoksissa.

Työn alussa käsitellään yleisimpiä käytössä olevia satelliittijärjestelmiä sekä esitetään kehitteillä olevia uuden sukupolven järjestelmiä. Satelliittien kiertoradat, satelliittiyhteyksien yleisiä ominaisuuksia sekä antennien ominaisuuksia esitetään teoreettisesti luvussa 3. Luvussa 4 esitetään eri tyyppisiä satelliittiyhteyksissä käytettäviä lautasantenneja sekä pohditaan meriliikenteen toimintaympäristön asettamia vaatimuksia satelliittiyhteyksien lähetin-vastaanotin laitteistolle. Kehitteillä olevaa uuden sukupolven antenniteknologiaa käsitellään luvussa 5. Tässä yhteydessä perehdytään muutamiin keväällä 2017 markkinoilla oleviin tai sinne pyrkiviin antennivalmistajiin sekä heidän antenniteknologioihin. Luvussa 6

vertaillaan näiden antennien ominaisuuksia nykyisiin käytössä oleviin lautasantenneihin ja luvussa 7 on opinnäytetyön yhteenveto.

2 SATELLIITTIJÄRJESTELMÄT

Tämän luvun alussa käsitellään yleisimpiä käytössä olevia satelliittijärjestelmiä ja -palveluntarjoajia tietoliikenne- ja navigointijärjestelmien osalta. Luvun lopussa esitellään kehitteillä olevia uuden sukupolven satelliittijärjestelmiä.

2.1 Tietoliikennesatelliittijärjestelmät

Tietoliikennesatelliitti välittää tietoliikennettä avaruuden kautta radiolinkin välityksellä. Tietoliikennesatelliitteja käytetään esimerkiksi satelliitti-internet- ja satelliittipuhelinpalvelujen välitykseen. Näistä ensin mainittua edustaa seuraavana esitelty Inmarsat. Satelliittipuhelinpalveluja tarjoavaa Iridium järjestelmää esitellään tässä yhteydessä myös. Muita alan toimijoita ovat esimerkiksi Intelsat, SES, Teledesic ja Global-star.

Inmarsat on vuonna 1982 toimintansa aloittanut kansainvälinen organisaatio [6]. Inmarsat perustettiin parantamaan merenkulun tietoliikenneyhteyksiä, mutta nykyään se tarjoaa datapalveluja myös lento- ja maaliikenteen käyttöön [6]. Inmarsat on osa merenkulun maailmanlaajuista hätä- ja turvallisuusjärjestelmää (GMDSS, Global maritime distress and safety system) [7].

Inmarsatilla on käytössään 11 satelliittia 35 786 km:n korkeudella olevalla geostationäärisellä- eli GEO- kiertoradalla. Inmarsatin omia satelliittisarjoja on rakennettu yhteensä neljä. Viidessarja on uusin ja sitä ollaan ottamassa käyttöön vuoden 2017 aikana. [8]

Inmarsat-2 sarjan satelliitit ovat ensimmäisiä Inmarsatin omia satelliitteja, jotka on laukaistu avaruuteen vuosina 1990–1992. Tämän sarjan satelliitit ovat olleet käytössä vuoteen 2014. [8]

Inmarsat-3 satelliitit olivat ensimmäinen satelliittisarja, joka hyödynsi kohdekeilausteknologiaa. Tämän sarjan satelliitit on laukaistu vuosien 1996–1998 aikana. Näiden satelliittien yhteyteen on integroitu myös jäljempänä esiteltyjen GPS- ja Glonass-navigointijärjestelmien transpondereita eli lähetin-vastaanottimia.

Transpondereiden tarkoituksena on lisätä näiden satelliittinavigointijärjestelmien paikannustarkkuutta [9]. Tällaista järjestelmää kutsutaan SBAS- eli satellite based augmentation system järjestelmäksi [9].

I-4 -sarjan satelliitit välittävät L-bandilla eli taajuusalueella 1–2 GHz olevia palveluja, joita ovat BGAN, FleetBroadband ja SwiftBroadband. Sarjan satelliittien on odotettu toimivan 2020-luvun alkuun asti ilman huoltoa. I-4 -sarjaan kuuluu neljä satelliittia, joista kolme ensimmäistä on otettu käyttöön vuosien 2005–2008 aikana. Nämä kolme satelliittia on rakentanut eurooppalaisen EADS Astrium johdolla joukko erimaalaisia avaruusteknikoita. Sarjan viimeisin satelliitti otettiin käyttöön vuonna 2013. Tätä satelliittia kutsutaan nimellä Alphasat ja se on kaikkien aikojen suurin Euroopassa rakennettu tietoliikennesatelliitti. Alphasat satelliitin on rakentanut EADS Astrium ja Thales Alenia Space. [8]

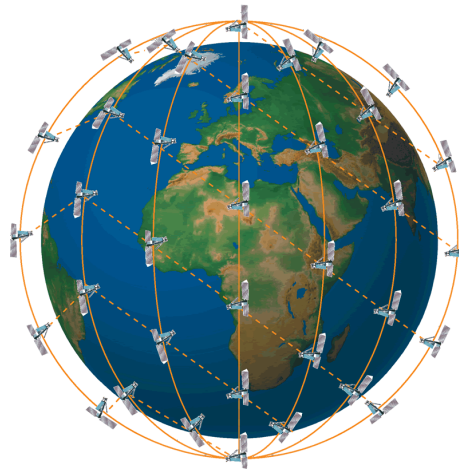
Inmarsatin viimeisin satelliittisarja on maailman ensimmäinen Ka-bandin eli taajuusalueen 26–40 GHz:n koko maailman kattava mobiilisatelliittijärjestelmä. Inmarsat-5 Global Xpress -nimityksellä olevaan sarjaan kuuluu yhteensä neljä satelliittia, joista ensimmäinen satelliitti on laukaistu 6.12.2013. Ensimmäinen satelliitti kattaa koko EMEA-alueen ja Aasian. Toinen satelliitti on laukaistu 1.2.2015 välittämään GX -palveluja Amerikan ja Atlantin valtameren alueelle. Tyynen valtameren kattava satelliitti laukaistiin 28.8.2015. Neljäs satelliitti oli syksyllä 2016 viimeistely- ja testaus vaiheessa Boeingilla Kaliforniassa. [8] Sen suunniteltu laukaisuaika on vuoden 2017 toukokuussa [10].

Vuoden 2015 joulukuussa Inmarsat ilmoitti sopimuksesta kahden tietoliikennesatelliitin rakentamisesta Airbusin Defence and Space -osaston kanssa. Satelliitit olisivat osa edistyksellistä uuden sukupolven Inmarsat-6-sarjaa. Ensimmäisten satelliittien toimitus on suunniteltu olevan vuonna 2020. Tämän sarjan satelliitit tulevat välittämään L- ja Ka-bandin palveluja. Näiden satelliittien avulla Inmarsat pystyy kasvattamaan kattavuutta ja kapasiteettia merkittävästi. [11]

Yhdysvaltalainen Iridium on alun perin perustettu tarjoamaan kannettavien päätelaitteiden kautta käytettävää maailmanlaajuista satelliittipuhelinpalvelua [12]. Nykyisin Iridiumin palveluihin sisältyy myös muita data-palveluja. Esimerkiksi Iridium pilot tarjoaa kaksisuuntaista 134 kbps nopeudella toimivaa yhteyttä yhdessä

OpenPort palvelun kanssa [13]. Tällä palvelulla käyttäjä saa kolme erillistä puhe- lin yhteyttä sekä mahdollisuuden sähköposti- ja internet-palveluiden käyttöön [13]. Iridium -järjestelmän ensimmäiset satelliitit laukaistiin avaruuteen 5.5.1997 [14] ja ensimmäinen satelliittipuhelu suoritettiin vuonna 1998 [15].

Päätelaitteen ja satelliitin välillä liikennöinti tapahtuu L-bandilla. Puheluiden releointi viereisten satelliittien kautta ja yhteydet maa-asemiin suoritetaan Ka-bandilla [12]. Järjestelmä koostuu 66:sta satelliitista, jotka kiertävät maapalloa kuudella eri kiertoradalla. Kiertoradat sijaitsevat 780 km:n korkeudella LEO- eli matalalla maan kiertoradalla. Kullakin kiertoradalla on 11 käytössä olevaa satelliittia [16]. Näiden satelliittien lisäksi jokaisella radalla kiertää kuusi varasatelliittia [16]. Kuvassa 1 on havainnollistettu Iridium satelliittien kiertoradat. Satelliittikonstellaatio on toteutettu siten, että joka puolella maapalloa on useampia satelliitteja näkyvillä. Tämä mahdollistaa järjestelmän käytön ympäri maapalloa. Iridium on liittymässä osaksi GMDSS -järjestelmää vuosien 2018–2019 aikana [17].



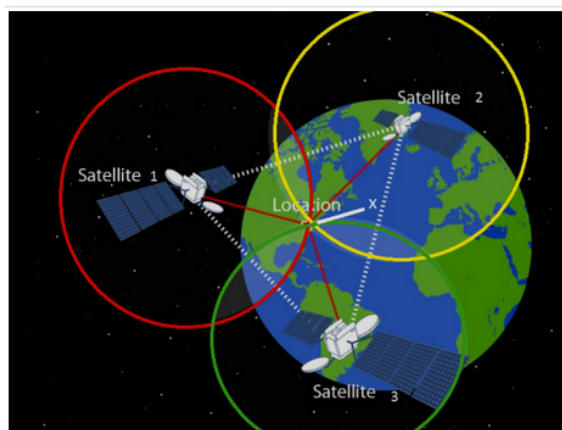
Kuva 1. Iridium satelliittien kiertoradat [18]

Uuden sukupolven Iridium Next- konstellaatio tulee korvaamaan käytössä olevat satelliitit. Satelliittien päivitys parantaa puheluiden äänenlaatua ja nostaa yhteysnopeutta esimerkiksi OpenPort luokan terminaaleihin 1,5 Mbps:iin [19]. Ensimmäiset 10 satelliittia laukaistiin avaruuteen 14.1.2017 ja järjestelmän ennustettu käyttöönotto on vuoden 2018 aikana [20].

2.2 Satelliittipaikannusjärjestelmät

Satelliittipaikannusjärjestelmissä vastaanottimen sijainti määritetään satelliittien lähettämien radiosignaalien perusteella [21]. Seuraavana esitellyt GPS- eli Global Positioning System- ja Glonass- eli Globalnaja Navigatsionnaja Sputnikovaja Sistema -järjestelmät ovat käytetyimpiä satelliittipaikannusjärjestelmiä [21]. Luvun lopussa esitellään myös 15.12.2016 käyttöön otettua Galileo -järjestelmää [22]. GPS, Glonass ja Galileo -paikannusjärjestelmät ovat koko maapallon kattavia paikannusjärjestelmiä. Järjestelmissä käytetyt radiotaajuudet sijaitsevat L-bandilla [23].

USA:n puolustusministeriön kehittämä GPS-järjestelmä on ollut vuodesta 1995 alkaen täydessä toiminnassa. Järjestelmään kuuluu 24 satelliittia, joista kolme toimii varasatelliitteina. Satelliitit sijaitsevat kuudella eri kiertoradalla 20 000 km:n korkeudessa. Satelliittien paikat on valittu siten, että vähintään viisi satelliittia on näkyvillä joka puolella maapalloa. Järjestelmän toiminta perustuu satelliitin ja vastaanottimen välisen etäisyyden mittaamiseen signaalin kulkuajan perusteella. Kolmen satelliitin avulla pystytään määrittelemään vastaanottimen koordinaatit kuvan 2 mukaisesti. Vastaanottimen kellon epätarkkuus aiheuttaa kuitenkin virheitä mitattuihin etäisyyksiin. Tämä virhe eliminoidaan vastaanottamalla neljännen satelliitin tiedot. Mikäli satelliitteja on näkyvissä useampia, paikannus tarkkuus on parempi. [1]



Kuva 2. Paikan määrittäminen kolmen satelliitin avulla [24]

Glonass on venäläinen vuonna 1995 käyttöön otettu vastine GPS -järjestelmälle [1]. Glonass -järjestelmässä vastaanottimen paikan määrittäminen perustuu samaan neljän satelliitin etäisyyden mittaamiseen, joka GPS -järjestelmän osalta esitettiin [25]. Glonass- ja GPS -järjestelmien tekninen eroavaisuus liittyy erilaisiin radiotien kanavanvaraustekniikoihin. GPS -järjestelmässä käytetyssä CDMA eli koodijakokanavointitekniikassa jokaisella satelliitilla on oma näennäissatunnainen koodi jonka avulla hyötysignaali levitetään koko järjestelmän taajuusalueelle. Vastaanotin tunnistaa satelliitin tämän koodin avulla ja tunnistamisen jälkeen vastaanottaa hyötysignaalin. CDMA tekniikkaa käyttämällä yksittäinen käyttäjä pystyy hyödyntämään koko saatavilla olevan taajuuskaistan hyväkseen, koska samalla taajuusalueella voi toimia samanaikaisesti useita käyttäjiä. Glonass -järjestelmässä käytössä olevassa FDMA- eli taajuusjakokanavoinnissa käytettävä taajuusalue jaetaan käyttäjien kesken osiin. Tämän kanavanjakotekniikan haittana on rajallinen taajuuskaista, joka rajoittaa käyttäjien määrää. [1] [26]

Keväällä 2017 järjestelmässä oli 24 toiminnassa olevaa satelliittia. Nämä satelliitit ovat sijoittuneena kolmelle eri kiertoradalle 19 100 km:n korkeuteen. Keväällä 2017 Glonass -satelliittien toinen sukupolvi on tulossa elinikänsä päähän. Kehitteillä olevia uuden sukupolven satelliitteja ollaan ottamassa käyttöön vuosien 2018–2020 aikana. Näissä sukupolvissa kanavanjakotekniikaksi otetaan käyttöön FDMA:n lisäksi myös CDMA. [27]

Galileo on Euroopan unionin ja Euroopan avaruusjärjestön yhteisen hankkeen tulos. Galileo-järjestelmän ensimmäisenvaiheen palvelut otettiin käyttöön 15.12.2016. Näitä palveluja ovat hätälähettimien paikantamiseen tarkoitettu etsintä- ja pelastuspalvelu, suojattu ja vikasietoinen valtiolliseen käyttöön tarkoitettu palvelu sekä kuluttajamarkkinoilla oleviin laitteisiin tarkoitettu avoin ja maksuton palvelu. Kaikki laitteet jotka ovat yhteensopivia Galileo-järjestelmän kanssa ovat palveluiden käyttöönoton jälkeen voineet hyödyntää Galileo-satelliitteja sijainnin ja ajan määrittämiseen sekä navigointiin. [28]

Galileo-järjestelmässä käytetään CDMA -kanavanvaraustekniikkaa. Ensimmäisessä vaiheessa Galileo-järjestelmä koostuu 18:sta satelliitista [28]. Lopullisessa järjestelmässä satelliitteja on yhteensä 30 kpl joista 24 kpl ovat toiminnassa ole-

via satelliitteja ja 6 kpl varasatelliitteja [28]. Satelliitit sijaitsevat kolmella kiertoradalla 23 222 km:n korkeudessa [29] ja järjestelmän odotetaan olevan valmis vuonna 2020 [28].

2.3 Uuden sukupolven satelliittijärjestelmiä

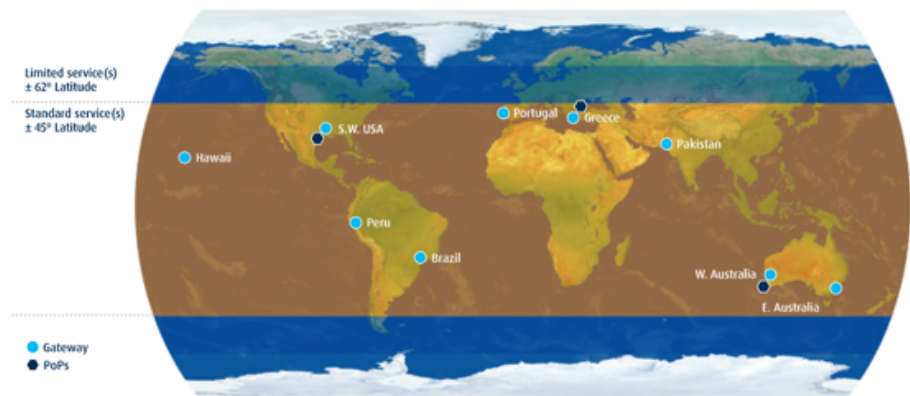
O3b Networks Ltd on vuonna 2007 perustettu tarjoamaan satelliittitietoliikenneyhteyksiä sellaisille alueille, joilla muita verkkoinfrastruktuureita ei ole tai yhteydet ovat kapasiteetiltaan riittämättömiä. O3b networksin asiakkaina ovat eri yritykset ja yhteiskunnalliset toimijat 180:stä maasta aasian, tyynenemerren, afrikan, lähi-idän ja latinalaisen amerikan alueilta. Risteilyvarustamo Royal Caribbean Cruises on yksi O3b networksin asiakkaista. Varustamon laivoissa laajakaistaiset internet yhteydet on toteutettu O3b networksin satelliittijärjestelmän avulla Karibian alueella. Esimerkiksi Quantum of the Seas alukselle O3b networks tarjoaa 600 Mbps nopeuksista internetyhteyttä. Satelliittien suuntakeilat pystytään suuntaamaan laivojen reittien mukaisesti. Tämän sekä kaksoisseuranta antennien ja kahdennettujen yhdyskäytävien avulla taataan yhteyksien kapasiteetti kuhunkin alukseen. Varustamo pystyy hallitsemaan aluksien yhteyksiä alhaisen kulkuaikeviiveen eli latenssin ja kapasiteetti tarpeen sekä laivaston laajuuden ja liikennöinti-alueen mukaan. [30] Eurooppalainen satelliittipalvelujen tarjoaja SES on 29.4.2016 noussut O3b Networksin suurimmaksi osakkaaksi [31]. SES on myös ilmoittanut halukkuutensa koko O3b Networksin ostopista. Kaupan on suunniteltu tapahtuvan vuoden 2017 lopulla [31].

O3b Networksin ensimmäiset 12 satelliittia ovat laukaistu avaruuteen vuosien 2013–2015 aikana. Vuoteen 2021 mennessä satelliittikonstellaatioon tulee kuumalumaan 20 satelliittia. Satelliitit kiertävät maapalloa 8 062 km:n korkeudella päiväntasaajan tasossa olevalla radalla. Kuvasta 3 nähdään havainnekuva satelliittien kiertoradasta. Satelliittien yhteydet muodostetaan Ka-bandilla ja yhteyksien maksiminopeudeksi on luvattu 1 Gbps yhteysviiveen ollessa 150 ms. [30]



Kuva 3. O3b Networksin satelliittien kiertorata [30]

Kuvasta 4 nähdään satelliittien maanpäällinen peittoalue. Kuvan perusteella optimaalisin peittoalue kattaa 45 leveysasteiden välisen alueen. Joitain rajoitettuja sovelluksia tarjotaan myös 62 leveysasteille saakka. Tällaisten sovellusten käyttö esimerkiksi Itämeren eteläosissa olisi mahdollista, mutta pohjoisemmalla Itämerellä vastaanotto ei onnistuisi nykyisellä satelliittikonstellaatiolla. Uusien rakenteilla olevien satelliittien odotetaan kasvattavan napa-alueiden kattavuutta. [30]



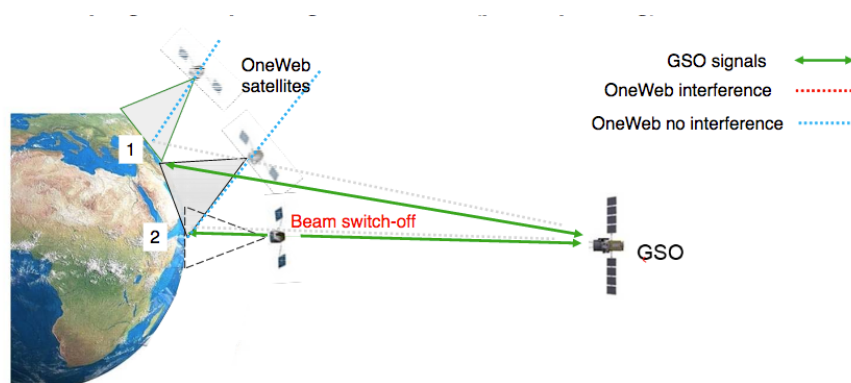
Kuva 4. O3b Networks satelliittien peittoalue [30]

Edellä esitetyn O3b networksin perustaja amerikkalainen liikemies ja insinööri Greg Wyler on perustanut myös Oneweb Ltd:n vuonna 2012. Oneweb on perus-

tettu samaa missiota varten, kuin O3b network; tarjota laajakaistainen internetyhteys kaikkialle maailmaan missä sitä ei vielä ole. Onewebin tavoitteena on esimerkiksi mahdollistaa jokaiselle koululle internetyhteys vuoteen 2022 mennessä. Oneweb tulee tarjoamaan yhteyksiään myös lento- meri- ja maaliikenteen tarpeisiin. [32]

Onewebin satelliitit tulevat sijaitsemaan 18:lla kiertoradalla 1200 km:n korkeudella ja satelliittien määrän on kaavailtu olevan 648 kpl. Tällä satelliittikonstellatiolla järjestelmän peittoalue ulottuu 50 leveysasteille saakka. Ensimmäiset 10 koesatelliittia on tarkoitus laukaista avaruuteen vuoden 2018 aikana ja ensimmäiset palvelut otetaan käyttöön vuoden 2019 loppuun mennessä. Satelliittien on tarkoitus olla pieniä matalan hintaluokan satelliitteja, joita on nopea valmistaa. Järjestelmän yhteydet toteutetaan 12–18 GHz:n taajuusalueella olevalla Ku- ja 18–26 GHz:n taajuusalueella olevalla Ka-bandeilla. Oneweb kertoo yhteysnopeuksien olevan esimerkiksi 50 Mbps (download) ja 25 Mbps (upload) ja latenssin 50 ms. [33] Onewebilla on suunnitteilla myös satelliittikonstellatio, joka koostuisi yhteensä noin 2 000:sta satelliitista. Näistä 720 sijaitsisi 1 200 km:n korkeudella ja loput 1 280 km:n korkeudella. Satelliittien yhteydet ovat suunniteltu toteutettavan 37–50 GHz:n taajuusalueella eli V-bandilla. [34]

Kuvassa 5 esitetään tilanne, jossa Onewebin satelliitti saattaisi aiheuttaa häiriötä tai häiriintyä geostationäärisellä tai geosynkroonisella radalla olevan satelliittin takia. Oneweb on häiriöiden minimoimiseksi kehittänyt progressive pitch™ -menetelmän, jossa Oneweb -satelliitin lähetys katkaistaan ja satelliitteja kallistetaan loivasti sen ylittäessä päiväntasaajan aluetta. [32]



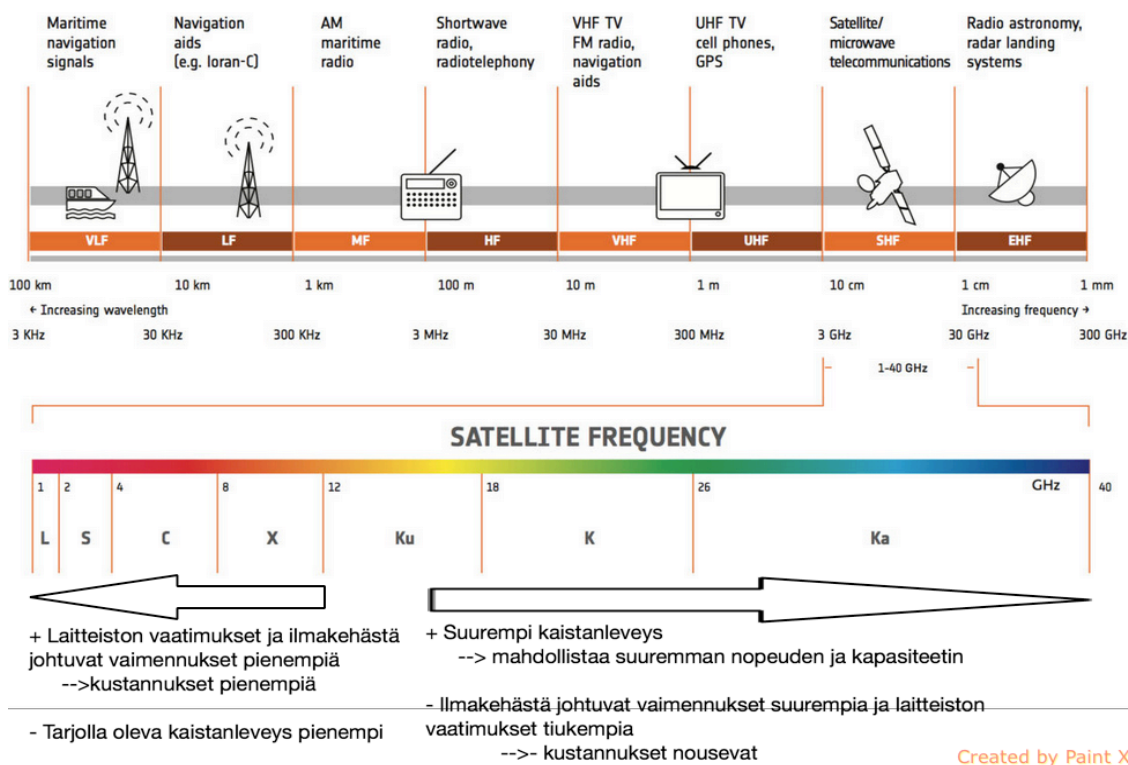
Kuva 5. Oneweb progressive pitch™ [32]

3 RADIOSIGNAALIN OMINAISUUKSIA SATELLIITTIJÄRJESTELMISSÄ

Tässä luvussa käsitellään satelliittijärjestelmien yleisimpiä ominaisuuksia. Luvun alussa esitetään satelliittiyhteyksissä käytetyt taajuusalueet sekä käsitellään radiosignaalin etenemiseen ja vaimenemiseen liittyviä asioita. Luvussa esitetään signaalikohina -suhteen ja hyvyysluvun määrittäminen. Tässä yhteydessä käsitellään myös antennin vahvistukseen sekä ekvivalenttiseen säteilytehoon liittyviä asioita. Radioyhteyksien polarisaatiot sekä satelliittien kiertoradat ovat esitetty luvun lopussa.

3.1 Satelliittiyhteyksissä käytetyt taajuusalueet

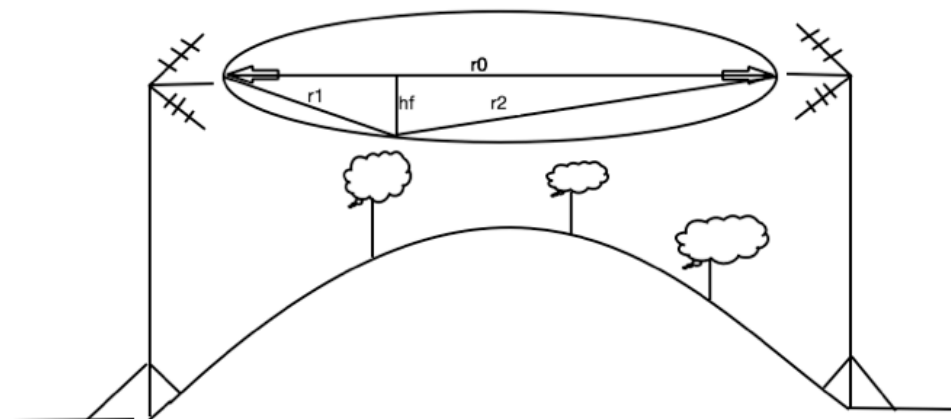
Kuvassa 6 on esitetty satelliittitaajuusalueiden sijoitus radiospektrissä. Kuvaan on havainnollistettu myös taajuusalueiden etuja ja heikkouksia. Korkeampien Ku- ja Ka- taajuusalueiden käyttö mahdollistaa suuremman kaistanleveyden kuin matalammat L- (1–2 GHz) ja C- (4–8 GHz) bandit. Kaistanleveyden tarve määräytyy yhteyden käyttökohteen mukaan. Nopeat ja suuren kapasiteetin sovellukset vaativat suurempaa kaistanleveyttä. Tämän vuoksi uusia järjestelmiä kehitetään korkeammille taajuuksille. Korkeammat taajuudet asettavat kuitenkin vastaanotto-laitteistolle tiukempia vaatimuksia ja näillä taajuusalueilla ilmakehästä johtuva signaalin vaimennus kasvaa. [35]



Kuva 6. Satelliittiyhteisissä käytetyt taajuudet radiospektrillä [35]

3.2 Radioaallon eteneminen

Satelliittiyhteisissä radioaalto etenee näköyhteysreitillä pitkin. Näköyhteysreitillä edetäkseen radioaalto vaatii ympärilleen tilan, joka on vapaa esteistä. Aallon vaatimaa vapaata tilaa voidaan tarkastella Kuvassa 7 esitetyn fresnelin ensimmäisen ellipsoidin avulla. [1]



Kuva 7 . Fresnelin ensimmäinen ellipsoidi

Ellipsoidin säde on laskettavissa seuraavalla kaavalla 1.

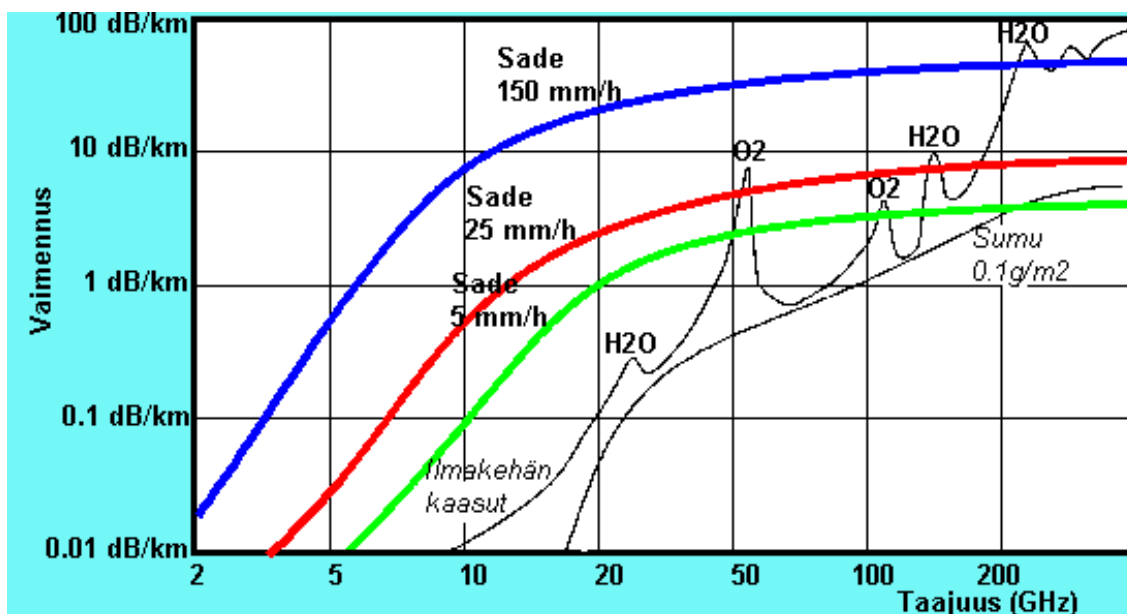
$$h_F = \sqrt{\frac{\lambda r_1 r_2}{r_1 + r_2}} \quad (1)$$

Missä r_1 ja r_2 ovat ellipsoidilla olevan pisteen etäisyydet lähetys- ja vastaanotto-pisteistä ja λ on radiosignaalin aallonpituus. Kaavasta huomataan, että radioaal-lon vaatima vapaa tila on riippuvainen käytetystä taajuudesta. Signaalin vaimen-nus voidaan laskea vapaan tilan vaimennuksen kaavalla, mikäli fresnelin ellip-soidi on vapaa esteistä. Vapaan tilan vaimennuksen kaava 5 on esitetty luvussa 3.4. [1]

3.3 Ilmakehän vaikutukset

Satelliittiyhteyksissä käytettyjen korkeiden taajuuksien vuoksi on otettava huomi-oon ilmakehästä johtuvat vaimennukset. Näitä vaimennuksia aiheuttavat ilmake-hän kaasuista johtuvat signaalin absorptio ja sironna. [1]

Sääolosuhteet vaikuttavat ilmakehän vaimennukseen. Kirkkaalla ilmalla vaimen-nus johtuu pääasiassa hapen ja vesihöyryn molekyylien resonansseista. Ilmake-hässä olevan vesihöyryn määrä vaihtelee, ja sen aiheuttama vaimennus on suo-raan verrannollinen vesihöyryn määrään. Sadepisarat ja lumi aiheuttavat myös vaimennusta. Vaimennuksen lisäksi sadepisara voi muuttaa radioaallon polari-saatiota. Eniten vaimennusta aiheuttavat märkä lumi ja kaatosade. Pilvet ja sumu vaikuttavat myös radioaallon vaimenemiseen. Kuvasta 8 nähdään kuinka signaali vaimenee ilmakehän kaasujen ja eri sääolosuhteiden vaikutuksesta taajuuden funktiona. Kuvasta voidaan todeta, että sateen vaikutuksesta signaali vaimenee enemmän taajuuden kasvaessa. Myös sademäärän kasvaessa ja sumun tihen-tyessä signaali vaimenee enemmän. Kuvasta nähdään myös ilmakehän kaa-suista johtuvat vaimennuspiikit tietyillä taajuuksilla. Näillä taajuuksilla pitkän mat-kan yhteyksiä ei voida suuren vaimennuksen takia toteuttaa, mutta lyhyillä yh-teysväleillä näitäkin taajuuksia pystytään hyödyntämään.[1]



Kuva 8 . Ilmakehän kaasujen ja sääolosuhteiden aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona [36].

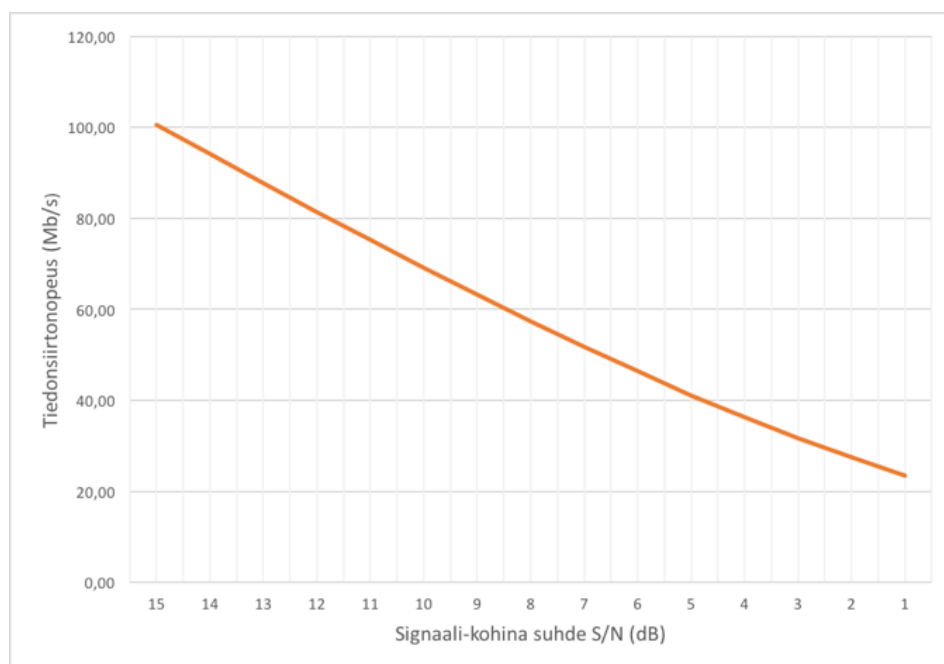
3.4 Signaalikohina -suhde S/N

Kaikissa siirtokanavissa esiintyy taustakohinaa, joka rajoittaa radioyhteyksien laatua. Hyötysignaalin on oltava tietyllä tasolla verrattuna kohinan tasoon, jotta se pystytään erottamaan kohinan joukosta. Signaalin ilmaisuun vaadittu signaalikohina -suhde määräytyy käytetyn modulaation mukaan. Signaalitason ja kohinatason välistä suhdetta kuvataan signaali-kohina- eli S/N-suhteena. S/N-suhde ilmaistaan yleensä desibeliarvona. [1]

Tietyn kaistanleveyden omaavan siirtokanavan suurinta saavutettavissa olevaa siirtokapasiteettia voidaan arvioida seuraavana esitetyn kaavan 2 shannonin teoreeman mukaan. [2]

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

Missä C on suurin saavutettavissa oleva bittimäärä sekunnissa (b/s), W on siirtokanavan kaistanleveys (Hz) ja S/N on signaalikohina -suhde suhdelukuna. Shannonin teoreeman mukaan S/N -suhdetta voidaan pitää tiedonsiirtoa rajoittavana tekijänä. Tämä havaitaan kuvasta 9 jossa on esitetty tiedonsiirtonopeus S/N -suhteen funktiona siirtokanavassa, jonka kaistanleveys on 20 MHz.



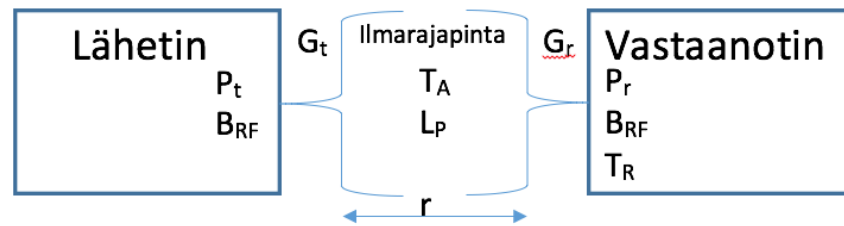
Kuva 9. Teoreettinen tiedonsiirtonopeus signaali-kohinasuhteen funktiona

S/N -suhteen pienentyessä, myös suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus pienenee.

Kuvassa 10 näkyvälle radioyhteydelle määritetään signaalikohina -suhde vastaanotetun signaalitehon ja vastaanottimeen kumuloituneen kohinatehon avulla seuraavasti (kaava 3).

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{P_n} \quad (3)$$

Missä P_r on vastaanotettu teho ja P_n on vastaanottimen sisäänmenon kohinateho.



Kuva 10. Radioyhteys

Vastaanotettuun signaalitehoon vaikuttavat lähetysteho, lähetys- ja vastaanotin antennien vahvistukset, vapaantilan vaimennus sekä ilmakehän vaikutuksesta syntyvä vaimennus. Vastaanotettu signaaliteho lasketaan seuraavan kaavan 4 mukaisesti. [1]

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \frac{1}{L_p} P_t \quad (4)$$

Missä G_t on lähetysantennin vahvistus, G_r on vastaanottoantennin vahvistus, L_p on ilmakehän sironta- ja absorptiovaimennuksen sekä diffraktion ja monitie-etemisestä johtuva vaimennus ja P_t on lähetysteho.

Vapaan tilan vaimennuksen osuus vastaanotetun signaalitehon kaavasta 4 on esitetty seuraavassa kaavassa 5. Vapaan tilan vaimennukseen vaikuttavat radio-signaalin taajuus ja yhteysvälin pituus. [1]

$$A = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (5)$$

Missä λ on radiosignaalin aallonpituus ja r on yhteysvälin pituus.

Vastaanottimen sisäänmenon kohinatehoon vaikuttavat vastaanottimen kohinakaistanleveys sekä antennin- ja vastaanottimen kohinalämpötilat. Antennin kohinalämpötila muodostuu ympäristöstä tulevasta kohinatehosta jonka antenni vastaanottaa. Vastaanottimessa syntyvää kohinaa voidaan kontrolloida valitsemalla vähäkohinaisia komponentteja. Vastaanottimeen tuleva kohinateho saadaan laskettua seuraavasti (kaava 6). [1]

$$P_n = kT_s B_{RF}, \quad (6)$$

Missä k on boltzmannin vakio, B_{RF} on kohinakaistanleveys ja T_s on vastaanottojärjestelmän kohinalämpötila joka koostuu antennin kohinalämpötilasta T_A ja vastaanottimen kohinalämpötilasta T_R .

Vastaanotetun signaalitehon kaavan 4 ja vastaanottimen sisäänmenon kohinatehon kaavan 6 avulla saadaan muodostettua signaali-kohinasuhteen kaava 3 seuraavanlaiseksi (kaava 7). [1]

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{P_n} = \frac{G_t P_t \lambda^2}{(4\pi r)^2 k B_{RF} L_p T_s} G_r \quad (7)$$

3.5 Hyvyysluku G/T

Kaavan 7 lopussa olevan antennin vahvistuksen ja kohinalämpötilan suhdetta kuvaavan G_r/T_s -suhteen avulla voidaan arvioida vastaanottolaitteiston laatua. Mitä suurempi G_r/T_s suhde on, sitä heikompia signaaleja voidaan vastaanottaa. Tällöin myös yhteyden S/N kasvaa. G_r/T_s suhde voidaan laskea antennin vahvistuksen ja vastaanottojärjestelmän kohinalämpötilan avulla. Vastaanottojärjestelmän kohinalämpötilaan sisältyvät antennista ja vastaanottimen elektronikasta syntyvät kohinalämpötilat. Signaali-kohinasuhteen parantamiseksi voidaan valita vastaanotinjärjestelmä jonka G/T-arvo on korkeampi. Vastaanotinjärjestelmän G/T voidaan laskea seuraavan kaavan 8 mukaisesti. [1]

$$\frac{G}{T} = G(dB) - 10 \log(T_A + T_R) \quad (8)$$

Missä G on vastaanottoantennin vahvistus, T_A on antennin kohinalämpötila ja T_R vastaanottimen elektronikasta johtuva kohinalämpötila.

3.6 Antennin vahvistus ja ekvivalenttinen säteilyteho

Antennin vahvistuksella tarkoitetaan antennin pääkeilan suuntaan säteilemän tehotehden suhdetta siihen tehotehdyteen, jonka häviötön isotrooppinen antenni säteilisi saman tehon kytkeytyessä siihen. Häviötön isotrooppinen antenni on teoreettinen pistemäinen säteilijä, joka säteilee tasaisesti kaikkiin suuntiin. Antennin vahvistusta isotrooppiseen antenniin verratessa käytetään yksikköä dBi. Vertailuantennina voidaan käyttää myös dipolia. Tällöin yksikkö on dBd. dBi:n ja dBd:n välillä voidaan esittää seuraava yhtäläisyys (kaava 9). [2]

$$dBd = dBi + 2,15 dB \quad (9)$$

Mitä suurempi vahvistus antennilla on, sitä kapeammalla sektorilla antenni vastaanottaa ja lähettää signaalia. Vaadittava antennin vahvistus on riippuvainen yhteysvälin pituudesta, lähetystehosta ja vastaanottimen herkkyydestä. Mitä pidempi yhteysväli on, sitä suurempi vahvistuksen tulee olla. Antennin vahvistus on myös riippuvainen antennin koosta. [2]

Ekvivalenttinen säteilyteho eli EIRP muodostuu lähettimen tehon ja antennin vahvistuksen vaikutuksesta seuraavasti: [2]

$$EIRP (dBW) = P_{Tx}(dBW) - L(dB) + G(dB) \quad (10)$$

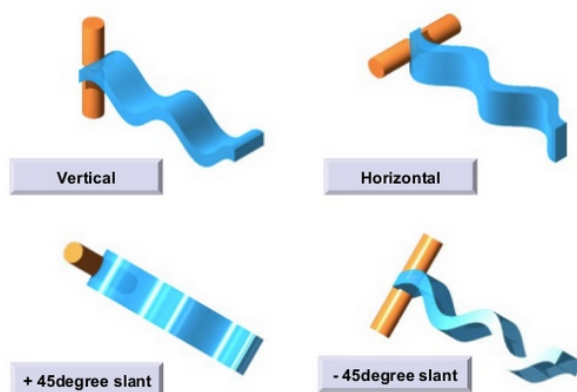
Missä P_{Tx} on lähettimen teho, L on kaapeleiden vaimennukset ja antennin epäsovituksista johtuvat häviöt ja G on antennin vahvistus.

EIRP on teho, joka muodostuu antennin vahvistuksen ja lähetystehon yhteisvaikutuksesta. Mitä suurempi EIRP on, sitä voimakkaampi signaalin voimakkuus on tietyllä etäisyydellä antennista. [2]

3.7 Polarisaatio

Polarisaatio tarkoittaa antennin säteilemän sähkökentän vektorin suuntaa. Antennit suunnitellaan toimimaan jollain tietyllä polarisaatiolla. Tätä polarisaatiota

kutsutaan pääpolarisaatioksi. Vastaanotettavan radioaallon polarisaatio on ol-
tava sama kuin vastaanottoantennin, jotta aalto sovituisi antenniin. Pääpolari-
saation vastakkaista polarisaatiota kutsutaan ristipolarisaatioksi. Antennin ristipo-
larisaatiovaimennus kertoo vastakkaisella polarisaatiolla olevan radioaallon kyt-
keytymisestä antenniin. Ristipolarisaatiovaimennuksen tulee olla riittävän suuri,
jotta vastakkainen polarisaatio ei häiritse pääpolarisaatiolla olevaa yhteyttä. An-
tennin polarisaatio on tunnistettavissa esimerkiksi antennin elementtien asennon
avulla. Seuraavana on esitetty lineaariset polarisaatiot ja kiertopolarisaatiot. [1]
Lineaarinen polarisaatio voi olla joko horisontaalista tai vertikaalista [1]. Näiden
lisäksi polarisaatio voi olla kallistettu esimerkiksi 45° kulmaan [37]. Kuvassa 11
on esitetty dipoliantenni horisontaalisessa, vertikaalisessa ja kallistetussa polari-
saatioissa.



Kuva 11. Eri polarisaatioita [38]

Televisiotoiminnan maanpäällisessä antennijakelussa käytetään horisontaalista polarisaatiota. Horisontaalista polarisaatiota käytettäessä puiden vaimennus on pienempi kuin vertikaalista polarisaatiota käytettäessä. Kuvissa 12–14 esitetään eri lineaarisellapolarisaatiolla olevia antenneja. [2]



Kuva 12. Vertikaali polarisoitu vhf-antenni [39]



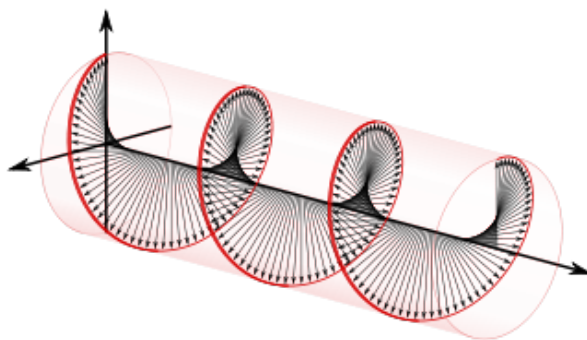
Kuva 13. Horisontaalisesti polarisoitu TV-antenni [40]



Kuva 14. 45°:seen asennettu antenni [37]

Lineaarinen polarisaatio voi kiertyä läpäistäessään ionosfääriin. Tämä kiertyminen voi johtua esimerkiksi maapallon magneettikentän ja ionosfäärissä olevien ionien vaikutuksesta. Tätä ilmiötä kutsutaan faradayn kiertymiseksi. Kuvassa 15

esitettyä kiertopolarisaatiota suositaan satelliittiyhteyksissä, koska tällä polarisaatiolla tällaista kiertymistä ei tapahdu. Myös satelliitissa olevan antennin asento-
virheistä johtuvat vaimennukset ovat kiertopolarisaatiota käytettäessä pienem-
mät kuin lineaarisella polarisaatiolla. [41]



Kuva 15. Kiertopolarisaatio [42]

Kiertopolarisaatio voidaan toteuttaa joko vasen- (LHCP, left handed circular polarization) tai oikeakätisenä (RHCP, right handed circular polarization) polarisaationa. Kiertosuunta aallon etenemissuuntaan katsottuna määrittää kumpi polarisaatio on kyseessä. Oikeakätinen polarisaatio kiertyy myötäpäivään ja vasenkätinen vastapäivään. Kuvassa 16 esitetyn risti-yagi antennin elementtien signaalien syöttöjä sopivasti vaiheistamalla saadaan muodostettua kiertopolarisaatiota. Tyypillisin kiertopolarisaatiossa käytetty helix-antenni on esitetty kuvassa 17. Kuvassa näkyvän antennin polarisaatio on oikeakätinen. [1]



Kuva 16. Risti-yagi antenni [43]

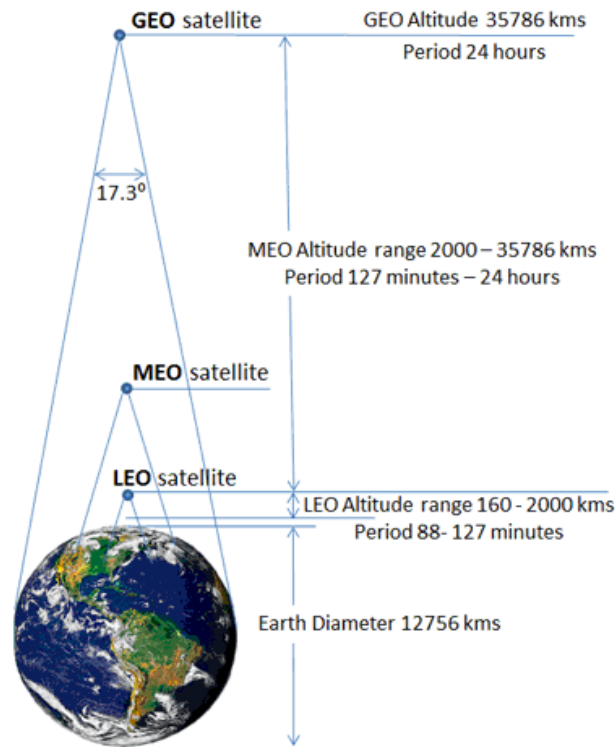


Kuva 17. Helix-antenni [44]

3.8 Kiertoradat

Seuraavana on esitetty kiertoratojen keskeisimpiä piirteitä ja luvun lopussa on tarkasteltu eri kiertoratojen ominaisuuksia. Satelliitin käyttötarkoituksesta riippuen se asetetaan tietylle kiertoradalle kantoraketin avulla. Satelliitti kiertää maapalloa ympyrän- tai ellipsin muotoisella radalla maapallon painovoimapisteen ympäri. Maata kiertävä satelliitti on vapaassa putoamisliikkeessä, ja putoaa kohti maapalloa. Satelliitilla on kuitenkin kiertoradan suuntaista nopeutta, jonka ansiosta se ei putoa Maan ilmakehään. Tarvittava ratanopeus on riippuvainen satelliitin korkeudesta. Kantoraketti nostaa satelliitin oikealle korkeudelle ja antaa sille korkeudesta riippuvan ratanopeuden. Mitä matalammalla satelliitti on, sitä enemmän Maan painovoima vetää satelliittia puoleensa ja ratanopeuden on oltava suurempi. Ratanopeus pienenee ja kiertoaika tulee pidemmäksi, kun kiertoradan kokoa suurennetaan. Satelliitin on oltava vähintään 160 km:n korkeudella, jotta ilmakehästä johtuva kitka ei pudottaisi satelliittia. Ilmakehästä haihtuvat atomit ja molekyylit sekä aurinkotuulen hiukkaset törmäilevät korkeallakin olevaan satelliittiin. Tämä jarruttaa satelliittia ja vaikuttaa satelliitin kiertorataan. Kuvassa 18 on esitetty yleisimpien käytössä olevien GEO-, MEO-, ja LEO-kiertoratojen sijainnit maapalloon nähden sekä satelliittien kiertoajat. [3]

Satellite Orbits, Periods and Footprints



Kuva 18 . GEO-,MEO- ja LEO-kiertoratojen sijainnit [45]

Kiertoradan kokoa suurennettaessa, saavutetaan 35 786 km:n korkeudella tilanne, jossa satelliitin kiertoaika on sama kuin Maan pyörähdysaika. Maan pyörähdysajalla tarkoitetaan pyörähdysaikaa tähtien suhteen eli sideeristä vuorokautta. Sideerinen vuorokausi on 23h 56min 4s. 35 786 km:n etäisyydellä päiväntasaajan kohdalla olevaa kiertorataa kutsutaan geostationaariseksi maan kiertoradaksi eli GEO -kiertoradaksi. [3] Samasta kiertoaikasta johtuen GEO -radalla oleva satelliitti pysyy maa-asemiin nähden paikoillaan. Satelliitin paikka voidaan olettaa yhdeksi pisteeksi taivaalla, johon antenni voidaan kiinteästi suunnata. Tämä yksinkertaistaa maa-asemien laitteistoja, koska antennin suuntakeilan ohjausta ei tarvita. Maa-aseman antenni voi olla myös hyvin kapeakeilainen, jolloin antennin vahvistus saadaan suureksi. [46] GEO-satelliittien etäisyys mahdollistaa laajan maanpäällisen peittoalueen. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi TV-jakelussa sekä muissa tietoliikennejärjestelmissä, joissa halutaan jatkuva yhteys laajalle alueelle. [45] GEO-radalla olevien satelliittien peittoalue ulottuu noin

75°:een leveyspiireille. Tätä korkeammilla leveyspiireillä signaalin vastaanotto on haasteellista, koska antenni joudutaan suuntaamaan lähes suoraan horisonttiin. Tällöin antennin sieppaama lämpökohina kasvaa maan lämpösäteilyn vuoksi. [47]

Geosynkroonisella kiertoradalla satelliitin kierrosaika on myös 23 h 56 min ja 4 s, mutta kiertorata on kallistettu päiväntasaajan suhteen tai kiertorata on elliptinen. Inklinaatio kertoo kiertoradan kaltevuuden asteina päiväntasaajan tasosta. 0° inklinaatio merkitsee päiväntasaajan tasossa kulkevaa rataa ja 90° inklinaatio merkitsee molempien napojen ylitse kulkevaa rataa. Maasta katsottuna kallistetulla radalla oleva satelliitti liikkuu pitkin kahdeksikon muotoista rataa ja ympyräradasta poikkeavalla radalla oleva satelliitti näyttää maasta katsottuna liikkuvan keskimääräisen paikkansa molemmin puolin itä-länsi -suunnassa. Myös geostationaarisella kiertoradalla olevien satelliittien inklinaatio kasvaa luonnollisesti ja kiertorata muuttu muiden taivaankappaleiden painovoimasta johtuen. Tätä pyritään korjaamaan satelliitin propulsiolaitteistolla. Propulsiolaitteiston käyttämää polttoainetta on oltava koko satelliitin eliniän ajaksi. Synkroonisella radalla oleviin satelliitteihin tarvitaan vähemmän polttoainetta, mutta maa-aseman antennilta vaaditaan satelliitin seurantalaitteistoa mikäli kiertoradan inklinaatio ylittää 0,1°. [3]

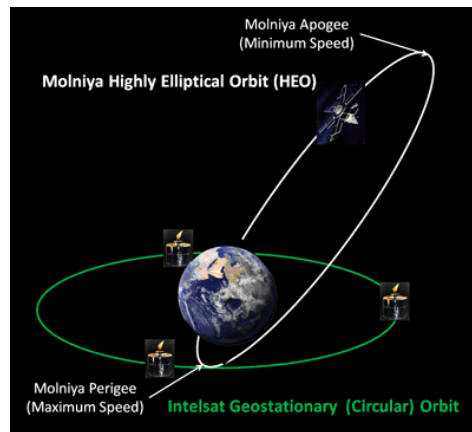
Maan matalaksi kiertoradaksi eli MEO-radaksi kutsutaan 2 000–35 786 km:n korkeudella olevaa aluetta [45]. MEO-radalla satelliittien kiertoaika vaihtelee kahdesta tunnista 24:ään tuntiin ja yleisimpiä MEO-radalla kiertäviä satelliitteja ovat napa-alueiden tietoliikennesatelliitit, sekä GPS-, Glonass- ja Galileo- paikannusjärjestelmien satelliitit [48]. Korkeuksilla 1 000–6 000 km ja 10 000–65 000 km sijaitsevat VanAllenin vyöhykkeet. Nämä maan ympärillä olevat vyöhykkeet koostuvat suurenergisistä hiukkasista, jotka ovat jääneet maan magneettikentän vangitsemiksi. [49] Satelliittien kannalta nämä vyöhykkeet ovat haitallisia, koska ne aiheuttavat kohinaa ja häiriöitä satelliittien elektroniikkalaitteisiin [6].

LEO-rata sijaitsee lähimpänä maapalloa. LEO-radalla ratakorkeus on 160–2 000 km maanpinnan yläpuolella ja satelliittien kiertoaika on noin 90–130 min. [45] Yksittäinen LEO-radalla oleva satelliitti on käytettävissä pienellä, noin 1 000 km:ä säteeltään olevalla maanpäällisellä alueella [48]. Satelliitti on näkyvä noin 15

min kerrallaan. LEO-radalla sijaitsevat tyypillisesti sää- ja satelliittipuhelinjärjestelmien satelliitteja [46].

Napa-alueiden kautta kulkevat PEO eli polaarisen kiertoradan satelliitit kuuluvat myös LEO-kiertoradan ryhmään. Näiden PEO-radalla olevien satelliittien avulla on kuvattu esimerkiksi Google Earth –palvelussa näkyvät satelliittikuvat. [45]

Hyvin elliptistä eli HEO-kiertorataa hyödynnetään korkeilla leveysasteilla sijaitsevilla alueilla. Näillä alueilla GEO-radatan satelliittien vastaanotto on haasteellista tai jopa mahdotonta. Esimerkiksi venäläisten puhelin- ja TV-palveluja välittävien Molnya-satelliittien kiertoratana käytetään HEO-rataa. Kuvissa 19 ja 20 on havainnollistettu Molnya-satelliitin kiertorata ja reitti. [45]



Kuva 19 . Molnya-satelliitin kiertorata [45]



Kuva 20 . Molnya-satelliitin reitti [45]

Satelliittien kiertoratoja vertailtaessa on otettava huomioon eri järjestelmien vaatimukset. Taulukosta 1 nähdään eri kiertoradoilla olevien satelliittien signaalien teoreettiset etenemisviiveet ja vapaantilan vaimennukset. Etenemisviivettä kutstutaan myös latenssiksi ja se merkitsee aikaa, mikä datapaketilta kuluu matkaan lähettäjältä vastaanottajalle ja takaisin. Latenssiin ei sisälly paketin prosessointiin kuluvaa aikaa [50].

Taulukko 1. Kiertoratojen ominaisuuksia

	LEO	MEO	GEO
kiertoradan korkeus / km	2000	20 000	35 786
vapaan tilan vaimennus / dB $20 \log_{10} \left(\frac{4 \times \pi \times d \times f}{c} \right)$	187	207	212
etenemisviive / ms $\frac{d}{c}$	13	133	239
koko Maan kattavuuteen tarvittava määrä satelliitteja	100–700	20–30	3

Taulukossa 1 olevissa kaavoissa c on valonnopeus, d on kiertoradan korkeus ja f on käytetty taajuus. Vapaantilan vaimennuksen laskennassa käytettiin 26 GHz taajuutta. Taulukosta havaitaan, kuinka signaalin vaimennus ja viive kasvavat etäisyyden kasvaessa. Toisaalta mitä kauempana satelliitti sijaitsee sitä suuremmalla maanpäällisellä alueella sitä pystytään vastaanottamaan. Vastaanottolaitteistojen vaatimukset ovat myös avainasemassa suunniteltaessa satelliittijärjestelmiä.

Esimerkiksi Tv-jakeluun tarkoitetut satelliitit ovat GEO-radalla olevia kiinteitä satelliitteja joihin asiakkaat pystyvät suuntaamaan antenninsa. Tv-jakeluun ja muuhun vastaavaan yleisjakeluun tarkoitetut yhteydet, jotka eivät ole kriittisiä viiveestä on kannattavampaa luoda GEO-radalla olevien satelliittien avulla, kuin LEO- tai MEO-radoilla olevien satelliittien avulla. GEO-radalla 120°:n välein sijoi-

tettujen kolmen satelliitin avulla pystytään teoriassa kattamaan lähes koko maapallo. MEO-radalle tarvitaan noin 20–30 satelliittia ja LEO-radalle 100–700 satelliittia. [46]

Viive aiheuttaa ongelmia puhelinyhteyksiin ja sovelluksiin joissa vaaditaan lähes reaaliaikaista yhteyttä kuten autonomiset kulkuneuvot ja nettipelit. LEO- ja MEO-radoilla olevien satelliittien yhteyksien viiveet ja vaimennukset ovat pienemmät kuin GEO-radalla olevien satelliittien [30]. Pienemmän vaimennuksen ansiosta näillä radoilla oleviin satelliitteihin voidaan luoda yhteys myös pienen vahvistuksen omaavan maa-asema-antennin avulla. Maa-asema-antennin pieni vahvistus mahdollistaa laajan suuntakeilan toteutuksen. Laajan suuntakeilan ansiosta ja satelliittijärjestelmän laajan peittoalueen ansiosta yksittäisen satelliitin seuranta ei tarvita. Tällaista antennia käytetään esimerkiksi Iridium-järjestelmän päätelaitteissa. Joissain järjestelmissä yhteys muodostetaan hetkellisesti näkyvillä olevien yksittäisten satelliittien avulla. Tällaisessa järjestelmässä vaaditaan satelliittien seurantalaitteistoa. Edellä esiteltyjen yritysten suunnittelemat seuraavan sukupolven satelliittijärjestelmät ovat suunniteltu toimimaan LEO- ja MEO-radoilla. Näiden järjestelmien useat liikkuvat seuranta vaativat satelliitit ja tarvittavat signaalin voimakkuudet asettavat vaatimuksia myös antennien suorituskykyyn. Jäljempänä esiteltyjen uusien antenniteknologioiden avulla satelliittijärjestelmien kehittäjät pystyvät vastaamaan myös näihin suorituskykyvaatimuksiin.

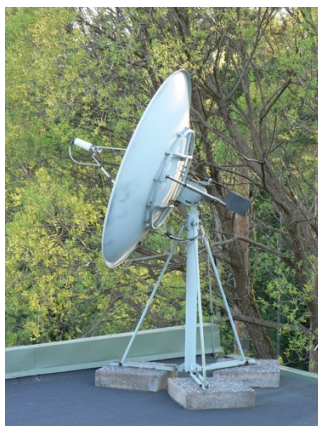
4 LAUTASANTENNI

Satelliittitietoliikennelaitteistoja valmistava Cobham satcom on osa Iso-Britannialaista Cobham plc:tä. Cobham satcom on perustettu vuonna 1972 ja se myy maailmanlaajuisesti tuotenimillä Aviator, Explorer, Sailor ja SeaTel olevia satelliittiantenneja sekä muita radioyhteyksiin liittyviä tuotteita. Vuonna 2017 Cobham tukee kuudennen kerran peräkkäin Volvo Ocean Race -purjehduskilpailua sponsoroimalla kilpaveneisiin satelliitti- ja radiotietoliikennevälineitä. Muita suuria satelliittiantennijärjestelmien valmistajia ovat Intellian Technologies [51] ja Orbit Communication Systems [52]. [53]

Satelliittiyhteyksien pitkät välimatkat ja yhteyksissä käytetyt suuret taajuudet asettavat vaatimuksia satelliittitietoliikenteen maa-asema-antenneille. Maa-asema-antennien vahvistuksen tulee olla riittävän suuri, jotta suuren etäisyyden päässä olevien satelliittien radiosignaalia voidaan vastaanottaa. Vaatimuksista johtuen satelliittitietoliikenteessä maa-asema-antennina käytetään yleisesti paraboloidin muotoista heijastinantennia, koska tällä antennityypillä saadaan muodostettua riittävän suuri vahvistus satelliitin suuntaan [1]. Antennin vahvistus ja suuntaavuus ovat riippuvaisia keskenään. Tietty minimi suuntaavuus merkitsee tiettyä vahvistusta. Antennin vahvistus on puolestaan riippuvainen paraboloidin halkaisijasta. Symmetrisen rakenteensa ansiosta tällä antennityypillä on myös hyvät polarisaatio-ominaisuudet [2].

Paraboloidin muotoisella heijastimella on olemassa tarkka polttopiste johon signaalin säteet fokusoituvat saman vaiheisena vahvistaen toisiaan [46]. Polttopisteessä sijaitsee signaalin lähetin-vastaanottimena toimiva syöttöelementti [1]. Seuraavana on esitetty erilaisia paraboloidiantennien tyyppejä.

4.1 Polttopisteestä syötetty prime-focus-antenni ja offset-antenni



Kuva 21. Polttopisteestä syötetty antenni [54]



Kuva 22. Offset-antenni [55]

Kuvassa 21 nähdään polttopisteestä syötetty eli prime-focus tyyppinen paraboliantenni. Tämän antennityypin syöttöelementtinä voi olla esimerkiksi torvi- tai dipoli antenni. [1]

Kuvan 22 mukaista offset-antennia käytetään yleisesti satelliitti-tv:n vastaanotossa. Offset-antennien syöttöelementti ei varjosta antennia, joten erityisesti pienen kokoisten lautasantennien osalta tällä saavutetaan parempi hyötysuhde kuin polttopisteestä syötetyillä prime-focus-antenneilla. Paraboliantennin heijastimeen kerääntyvä lumi vaimentaa heijastuvaa signaalia. Offset-antennilla tällaista ongelmaa ei ole, koska alareunaan ei pääse kerääntymään lunta. [2]

4.2 Gregoriaaninen ja Cassegrainin antenni



Kuva 23. Cassegrainin antenni [56] Kuva 24. Gregoriaaninen antenni [57]

Cassegrainin ja Gregoriaanisessa antennissa polttopiste saadaan siirrettyä pääheijastimen taakse erillisten apuheijastimien avulla. Kuvassa 23 näkyvä Cassegrainin antenni käyttää hyperboloidin muotoista ja kuvassa 24 näkyvä Gregoriaaninen antenni koveraa apuheijastinta. Apuheijastimien avulla saadaan kasvatettua antennin hyötysuhdetta ja syöttöelementin sijoittaminen on käytännöllisempää. Näiden antennityyppien haittoja ovat monimutkainen rakenne ja rakenteesta johtuva varjostus. [1]

Meriliikenteen toimintaympäristö asettaa vaatimuksia maa-asema-antenneille. Kovassa merenkäynnissä laivan keinuminen ja jyskintä voi olla hyvinkin voimakasta. Erillisen stabilointilaitteiston avulla satelliittiantenni pysyy suunnattuna satelliittiin laivan liikkeistä huolimatta. Stabilointilaitteisto lisää kuitenkin antenniyksikön painoa ja monimutkaistaa laitteistoa. Stabilointilaitteistossa on myös monia vaurioherkkiä komponentteja. Esimerkiksi laitteiston hihnat ja laakerit tarvitsevat säännöllistä huoltoa. Antennin suojakuvun eli radomin on kestävä roiskeveden lisäksi myös talvimerenkulun jäätäviä olosuhteita. [58] [59]

5 VAIHEOHJATUT ANTENNIT

Kahdesta tai useammasta erillisestä antennielementistä koostuvan ryhmäantennin avulla voidaan saavuttaa parempi vahvistus, kapeampi suuntakeila tai parempi suuntakuviot yksittäiseen antennielementtiin verrattuna. Antenniryhmän yksittäisten elementtien signaalin syöttöä vaiheistetaan eri menetelmillä. Vaiheensiirron avulla voidaan antennin suuntakeilaa kääntää tai antennin suuntakuviota muokata nopeammin kuin antenna mekaanisesti liikuttamalla. Digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla voidaan toteuttaa adaptiivisia eli olosuhteisiin mukautuvia antennia. Tällöin antennien suuntakuviota pystytään muokkaamaan esimerkiksi siten, että antenni ei vastaanota tietystä suunnasta tulevaa häiriösignaalia. [1]

Tässä luvussa käsitellään eri menetelmillä toteutettujen vaiheohjattujen antennien valmistajia sekä heidän antenniaan. Luvun 5.1 alussa esitettyjen Phasor Solutionsin ja Kymeta corporationin kehittämät antennit ovat tasomallisia vaiheohjattuja antennia joiden suuntakeilan muokkaus tapahtuu täysin sähköisesti. Mekaanisen suuntakeilan säädön omaavat Thinkom solutionsin ja Skytech Researchin kehittämät antennit esitellään luvun lopussa.

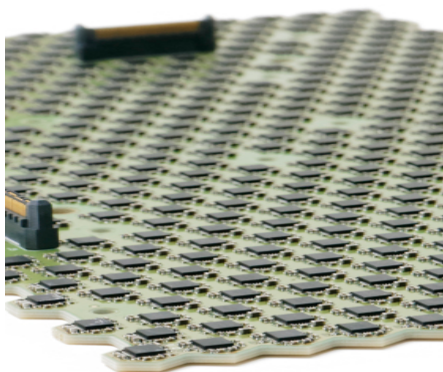
5.1 Phasor Solutions Ltd

Phasor Solutions Ltd on modulaarisien digitaalisesti vaiheohjattujen tasoantennien valmistaja. Phasor kehittää antenniteknologiaansa eri sovelluksiin lento-, meri- ja maaliikenteen ympäristöihin. Phasor demonstroi antenninsa toimintaa 7.9.2016. Tässä demonstraatioissa antennilla välitettiin HD-tasoista live-videota Intelsatin 903 satelliitin kautta. Phasorin pääkonttori sijaitsee Washington DC:ssä (Phasor inc.) ja teknologiakeskus Lontoossa (Phasor Solutions Ltd.). [60]



Kuva 25. Phasor Solutionsin kehittämä antenni

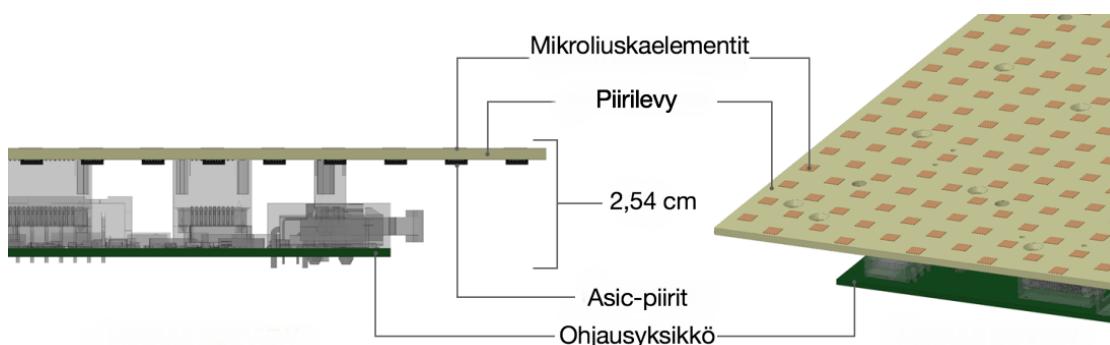
Kuvassa 25 esitetty Phasorin antenni koostuu useista kuvassa 27 näkyvistä piirilevyille painetuista mikroliuskaelementeistä. Antennin suuntakeilan ohjaus on toteutettu sulautettujen mikroprosessorien avulla. Mikroprosessorit säätävät dynaamisesti yksittäisten mikroliuskaelementtien signaalien vaihetta. Keilan suuntaus tapahtuu täysin sähköisesti, joten antennin mekaanista siirtoa ei tarvita. Digitaalinen signaalin muokkaus suoritetaan kuvassa 26 näkyvien yksittäisten mikroliuskaelementtien vastakkaisella puolella olevien ASIC-piirien avulla. ASIC-piirit ovat Phasorin kehittämiä ja patentoituja innovaatioita.



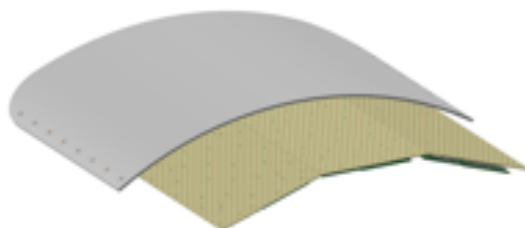
Kuva 26. ASIC-piirit mikroliuskaelementtien taustalla

Vuoden 2017 keväällä Phasorin antenni on suunniteltu Ku-Bandille, mutta tulevaisuudessa antennit tulevat toimimaan myös Ka- ja X- Bandeilla. [60]

Kuvasta 27 nähdään yhden antennimoduulin rakenne. Päälimmäisen piirilevyn päälle on painettu mikroliuskaelementit. Näiden elementtien vastakkaisella puolella ovat ASIC-piirit. Antenninohjausyksikkö sekä sen sähkön syöttö ja tietoliikenneosa ovat sijoitettu alemmalle piirilevylle. Phasorin kahdesta piirilevystä koostuva antennimoduuli on ainoastaan 2,54 cm korkea ja sen paino on 2 kg. Järjestelmän vaatimuksista riippuen voidaan antennin ominaisuuksia säätää moduuleita yhdistämällä. Useammasta antennimoduulista koostuvaa antenna voidaan tarvittaessa taivuttaa kuvan 28 mukaisesti. Tämä mahdollistaa antennin asentamisen erilaisille valmiille pinnoille ilman erillisten antennitelineiden tai jalojen rakentamista. Phasor solutions tekee yhteistyötä tietoliikennesatelliittiyhtiö Intelsatin kanssa. [60]



Kuva 27. Antennimoduulin rakenne [60]



Kuva 28. Useammasta antennimoduulista koostuva taivutettu antenni [60]

5.2 Kymeta Corporation

Kymeta Corporation kehittää metamateriaaliin perustuvaa antennia. Kymetan pääkonttori sijaitsee Redmondissa Washingtonissa. Kymetan kehittämä kuvassa 29 näkyvä mTenna^{u7} -antenni on soveltuva käytettäväksi niin merellä, ilmassa kuin maallakin. Kymeta demonstroi 10.12.2013 ensimmäisen kaksisuuntaisen internetyhteyden, joka oli muodostettu metamateriaalista valmistetun antennin kanssa. Yhteys muodostettiin Telesatin maa-asemalta Vancouverista Ka-bandilla Telesatin Anik F2 -satelliittia käyttäen. [61]



Kuva 29. mTenna^{u7} antenni [61]

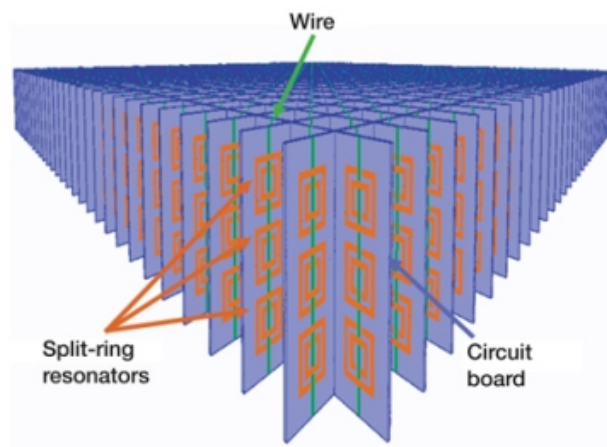
Kymetan antennit perustuvat metamateriaaliin, joka koostuu tuhansista erikseen säädettävistä rakenteellisista elementeistä. Näiden yksittäisten elementtien sähköisiin ominaisuuksiin vaikuttamalla saadaan antennin suuntakeilaa muokattua. Kymeta kehittää laitetta, jolla voidaan yhdistää antennipaneeleja. Antennipaneeleja yhdistämällä voidaan parantaa antennijärjestelmän ominaisuuksia, koska antennin sieppauspinta-ala kasvaa. Yhdistäminen mahdollistaa myös paneelien asennukset eri elevaatio- ja atsimuuttikulmilla. Tämä parantaa antennijärjestelmän vastaanottokykyä erityisesti korkeilla leveysasteilla. Kymetan ensimmäiset mTenna^{u7} -tuotteet ovat tulossa markkinoille vuoden 2017 aikana. Intelsat kuuluu myös Kymetan yhteistyökumppaneihin [61]

5.2.1 Metamateriaali

Elektromagneettisille metamateriaaleille on ollut olemassa erilaisia määritelmiä, missä sana ”meta” on käytetty englanninkielessä etuliitteenä merkitsemässä kuvailuja kuten rajattomampi ja kattavampi. Vuonna 2001 metamateriaali -termi määritettiin Texasin yliopistossa viittaamaan keinotekoisiiin yhdistelmiin, joiden materiaaliominaisuudet ylittävät tavallisten komposiittimateriaalien rajat.

Yhdysvaltojen armeijan tuotekehitysyksikkö DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) laajensi tätä käsitettä vuonna 2001 alkaneessa Metamateriaalit ohjelmassaan. Tässä määritelmässä metamateriaalit ovat järjestäytyneiden yhdistelmien uusi luokka, jotka esittävät sellaisia poikkeuksellisia ominaisuuksia joita ei havaita olemassa olevissa materiaaleissa. [62]

Keinotekoisten sähkömagneettisten materiaalien ja metamateriaalien virtuaalinen instituutti Metamorphose kuvailee metamateriaalin olevan keinotekoisten rakenteellisten aineksien asetelma, joka on suunniteltu saavuttamaan hyödylliset ja epätavalliset sähkömagneettiset ominaisuudet. Metamorphosen mukaan metamateriaali koostuu sen omista elementeistä samassa mielessä, kuin tavallinen aine koostuu atomeista. Nämä rakenteelliset ainekset itse on tehty tavanomaisista materiaaleista eli loppujen lopuksi normaaleista atomeista. Sen vuoksi metamateriaali edustaa aineksen seuraavan tason rakennetta. Kuvassa 30 nähdään erään metamateriaalin rakennetta. [63]



Kuva 30. Erään metamateriaalin rakenne. [64]

Metamateriaaleilla on sovelluksia radiotekniikan, mekaniikan, termodynamiikan ja akustiikan aloilta. Luonnossa esiintyvien materiaalien parametrit ovat luonnon mukaisesti kiinteitä, toisin kuin metamateriaalien parametrit, joita pystytään säätämään vaikuttamalla materiaalin rakenteeseen. [65]

Metamateriaalien tärkeimpinä alaluokkina voidaan pitää siirtojohtometamateriaaleja ja bianisotrooppisia väliaineita. Metamateriaaleilla on useita erityisominaisuuksia kuten negatiivinen permeabiliteetti ja permittiivisyys. Nämä ominaisuudet muodostuvat materiaalin hienorakenteesta sekä epähomogeenisuuksista. Negatiivisen permeabiliteetin ja permittiivisyyden vuoksi myös materiaalin taitekerroin on negatiivinen. Tällaista materiaalia kutsutaan myös vasenkätiseksi metamateriaaliksi. [65]

Kuvassa 31 on esitetty esimerkki negatiivisesta metamateriaalista. Se koostuu jaksolliseksi hilarakenteeksi muodostuneista ohuista johtimista ja ohuista, katkaistuista metallirenkaista. Metallirenkaat ovat katkaistuja johderenkaita, jotka toimivat resonaattoreina. Tässä rakenteessa ohuet johtimet muodostavat negatiivisen permittiivisyyden ja johderenkaat negatiivisen permeabiliteetin. [65]

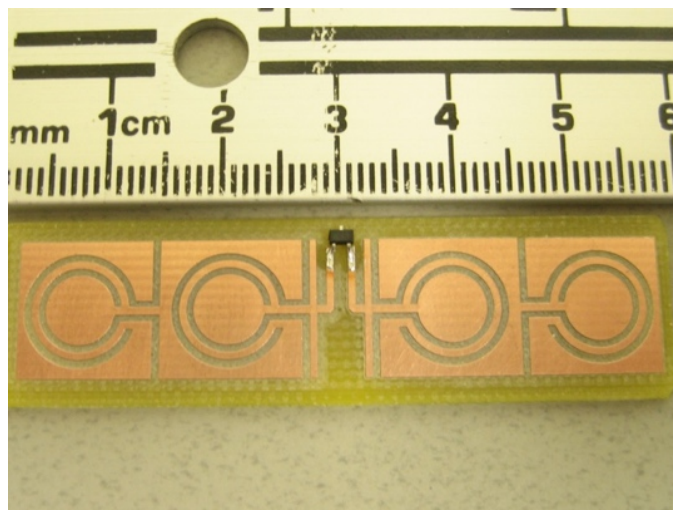


Kuva 31. Johderengas resonaattori ja ohuet johtimet. [65]

Kuvassa 32 nähdään siirtojohtometamateriaaliin perustuva verhoamislaitte. Tämän materiaaliin perustuvaa laitetta on tutkittu Aalto yliopistossa. Tällaista verhoamislaitetta voidaan käyttää esimerkiksi antennien lähellä olevien metallirakenteiden verhoamiseen antennin säteilykuvion vääristymien ehkäisemiseksi. Johderengasresonaattori -rakenteeseen perustuva mikroliuska-antenni on esitetty kuvassa 33. [66]



Kuva 32. Verhoamislaite[66]



Kuva 33. Johderengasresonaattori antenni. [66]

5.3 ThinkKom Solutions Inc

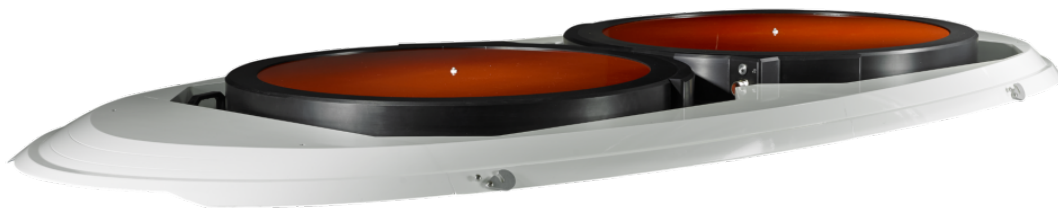
Thinkom Solutions on vuonna 2000 perustettu yritys, joka kehittää ja valmistaa antennijärjestelmiä lentokoneisiin, autoihin ja kannettaviin laitteisiin. Thinkom pyrkii tuomaan tuotteitaan myös meriliikenteen sovelluksiin [67] ja se tekee yhteistyötä Inmarsatin kanssa [68]. Thinkomin pääkonttori sijaitsee Hawthornessa Kaliforniassa [67].

Yrityksen valmistamat antennit ovat jaettu neljään eri ryhmään Thinsat, Thinair, Thinpack ja Thinline. Thinsat-antenneja on kolme erilaista mallia ja ne ovat takoitettu pääosin autoihin asennettavaksi. Lentokoneisiin suunnitellut tuotteet kuuluvat Thinair ryhmään ja niitä on neljä antennimallia. Näistä antenneista Falcon-Ka2517 (kuva 34) ja Falcon-Ku3030 (kuva 35) soveltuvat Thinkomin mukaan myös laivojen satelliittiantenneiksi. Thinpack antennit ovat suunniteltu mukana kannettaviksi. Tähän antenniryhmään kuuluvat Ka100T ja Ku100(i) antennit.

Thinkomin mukaan näillä antenneilla on vastaavat ominaisuudet, kuin 60 cm halkaisijaltaan olevalla lautasantennilla. Thinline-antenni on suunniteltu maanpäällisiin point-to-point yhteyksiin taajuuksilla 71–86GHz. [67]



Kuva 34. Falcon-Ka2517 [67]



Kuva 35. Falcon-Ku3030 [67]

Thinkomin antenneja on keväällä 2017 X-, Ku-, K-, Ka- ja Q- bandeilla toimivia. Antennien toiminta perustuu Thinkomin patentoimaan VICTS-teknologiaan [67]. VICTS-teknologiaan perustuvan antennin keilansuuntaus tapahtuu mekaanisesti [69].

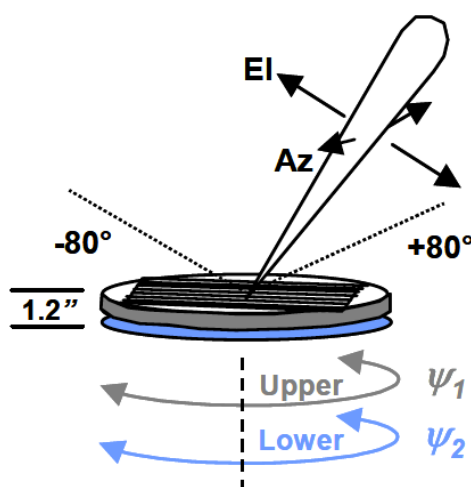
5.3.1 VICTS-antenniteknologia

VICTS-antennin toiminta perustuu kahteen päällekkäiseen metallipinnoitettuun ympyrän muotoiseen muovilevyyn [70]. Ylempään levyyn on toteutettu yksisuuntainen säleikkö säteileviä mikroliuskoja kuvan 36 mukaisesti. Alempaan levyyn

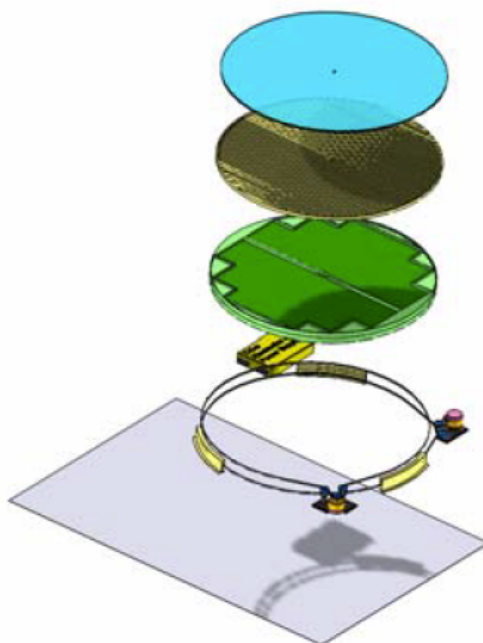
on sijoitettu antennisignaalin syöttölinjat. Kuvassa 37 on havainnollistettu suuntakeilan säätöä. Suuntakeilan nousukulmaa säädetään ylempää levyä kiertämällä, ja levyjen kierto samassa suhteessa muuttaa suuntakeilan suuntakulmaa. Polarisaatio säädetään erillisellä kiinteällä tai kierrettävällä polarisaattorilevyllä. Kuva 38 havainnollistaa antennin rakennetta. Ylin levy on edellä mainittu polarisaattorilevy ja keskimmäinen levy on kuvan 36 mukainen stubi -levy. Alimmassa levyssä on antennin syöttöelementit. Levyistä koostuva kokonaisuus on pakattu kuvassa näkyvään kehykseen. Tällainen kokonaisuus toimii joko vastaanotto- tai lähetinantennina. [71]



Kuva 36. VICTS -antennin ylempi levy [71]



Kuva 37. VICTS -antennin suuntakeilan säätö [71]



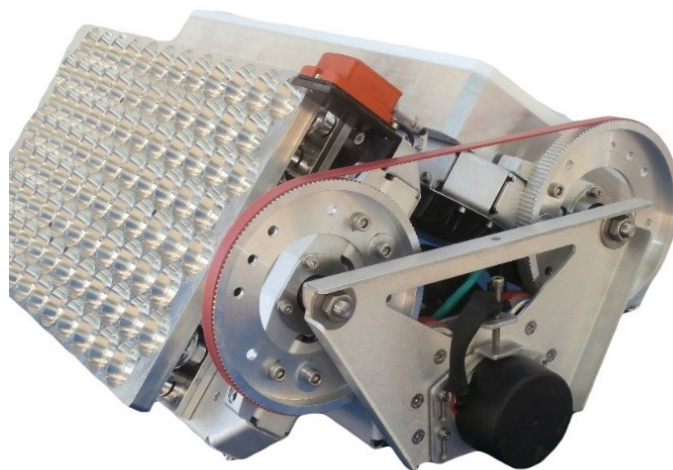
Kuva 38. VICTS -antennin kokoonpano [67]

5.4 Skytech Research Ltd

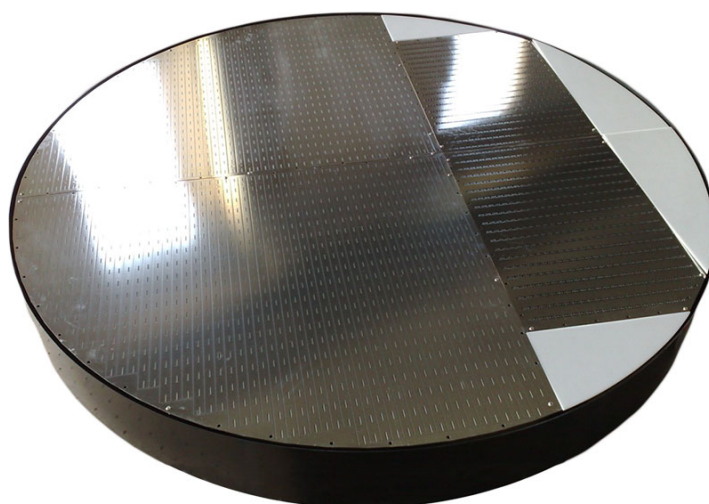
Skytech Research on tietoliikennealan yritys, joka on erikoistunut liikkuvan kaluston satelliittijärjestelmiin. Skytech valmistaa ja kehittää sekä lautasantenneja, että vaiheohjattuja tasoantenneja. Skytechin antenneja on käytössä muun muassa öljynporauslautoilla ja jäänmurtajilla. Skytechin antennit ovat suunniteltu rajuihin sääolosuhteisiin. Skytech Research Ltd:n pääkonttori sijaitsee Isossa-Britanniassa. [72]

Skytech on kehittänyt hiilikuidusta ja erikoisseostetusta alumiinista valmistettuja lautasantenneja. Näillä materiaalivalinnoilla on antennien painoa saatu pienemmäksi. Skytechin lautasantennien koot ovat 30 cm–150 cm ja vaiheohjattuja antenneja on kaksi eri mallia. Kuvassa 39 esitetty Vflat Ku/Ka -antenni toimii Ku- ja Ka bandeilla. Toiminta perustuu kahteen eri bandeille optimoituihin tasoantenneihin. Antennin suuntaus tapahtuu tasoantennien elevaatio- ja atsimuuttikulmaa mekaanisesti kääntämällä. Kuvassa 40 esitetty BBFlat antenni on suunniteltu Ku-

bandille. Skytech pyrkii kehittämään antenniaan uusille bandeille sekä operoimaan MEO- ja LEO-radalla olevien satelliittien kanssa. [73]



Kuva 39. VFlat Ku/Ka Dual-Band Phased Array [72]



Kuva 40. BBFlat Ku-Band [72]

6 ANTENNIEN VERTAILU

Tässä luvussa vertaillaan lautasantennien ja vaiheohjattujen antennien ominaisuuksia. Vertailun kohteena olevat antennit ovat lueteltuna taulukossa 2. Vertailulla selvitetään antennien ominaisuuksien eroavaisuuksia. Vertailun avulla pystytään tutkimaan voidaanko joissain järjestelmissä käytössä oleva lautasantenni korvata vaiheohjatulla antennilla. Antennien ominaisuudet ovat kerätty valmistajien datalehdistä. Vertailussa tutkitaan antennien fyysisiä ja sähköisiä ominaisuuksia. Antennien ominaisuuksista kootut yhteenvedot löytyvät liitteistä 1-2.

Taulukko 2. Vertailun kohteena olevat antennit

vaiheohjatut antennit		lautasantennit	
valmistaja	malli	valmistaja	malli
Phasor solutions ltd	-	Cobham	SeaTel5012
Skytech Research ltd	BBFlat-Phased Array	Cobham	SeaTel 4006RZA
Skytech Research ltd	Vflat Ka	Cobham	Sailor 800 VSAT
Skytech Research ltd	Vflat Ku	Cobham	Sailor 900 VSAT
ThinKom Solutions, inc	Falcon-Ku3030	Cobham	Sailor 600 VSAT
ThinKom Solutions, inc	Ka2517	Orbit	OceanTRx-4-500 Ka
Kymeta corporation	mTenna	Orbit	OceanTRx-7-500 Ka

6.1 Fyysiset ominaisuudet

Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty antennien ulkomitat ja painot. Ulkomitat ovat ilmoitettu antennin suojakuvun eli radomin mittojen mukaisesti. Antennien painoihin sisältyvät antennin ohjausyksikön, radomin sekä antenni-elementtien painot. Vertailun kohteena olevat vaiheohjatut antennit ovat kaikki maksimissaan noin 10 cm korkeita. Taulukossa 3 olevien mittojen perusteella voidaan todeta, että eniten pinta-alaa vievä vaiheohjattu antenni on Phasorin 27:n moduulin antenni. Tämä Phasorin antenni vie vastaavasti noin kolminkertaisesti vähemmän pinta-alaa kuin suurin vertailussa oleva Orbitin 2,2 m:n lautasantenni. Vähiten pinta-alaa vievä vertailussa oleva lautasantenni on Cobhamin valmistama 65 cm halkaisijaltaan oleva Sailor 600 VSAT -antenni. Vastaavasti Phasorin kuuden moduulin antenni on tätäkin pienempi pinta-alaltaan.

Lautasantenneissa olevat stabilointilaitteistot lisäävät antenniyksikön painoa huomattavasti. Vaiheohjatuissa antenneissa tällaisia stabilointilaitteistoja ei tarvita, joten painokin on pienempi. ThinKomin ja Kymetan antenneista ei ollut painoa saatavilla. Näidenkin antennien paino voidaan antennien rakenteen ja valmistajien internet-sivuilta löytyvien videoiden perusteella olettaa olevan huomattavasti kevyempiä kuin vastaavat lautasantennit. Esimerkiksi ThinKomin Ka2517 -antennin asennuksessa kaksi asentajaa pystyivät nostamaan antenniyksikön ja radomin asennuspaikalle vaivattomasti.

Taulukko 3. Antennien ulkomitat

	valmistaja	malli	ulkomitat / [cm]
Lautasantennit	Orbit	OceanTRx-7- Ka	halkaisija: 270 korkeus: 169
	Cobham	Sailor 900 VSAT	halkaisija: 130 korkeus: 150
	Orbit	OceanTRx-4-500 Ka	halkaisija: 155 korkeus: 169
	Cobham	SeaTel 5012	tietoja ei saatavilla
	Cobham	Sailor 800 VSAT	tietoja ei saatavilla
	Cobham	SeaTel 4006RZA	halkaisija: 127 korkeus: 148
	Cobham	Sailor 600 VSAT	halkaisija: 82 korkeus: 91
vaiheohjatut antennit	Phasor Solutions, ltd		54 x 72 (6 moduulia) 72 x 108 (12 moduulia) 126 x 144 (27 moduulia)
	Skytech Research, ltd	BBFlat-Phased Ar-ray	tietoja ei saatavilla
	Skytech Research, ltd	Vflat Ka	halkaisija: 70 korkeus: 30
	ThinKom Solutions, inc	Ka2517	127 x 74 x 8
	ThinKom Solutions, inc	Falcon-Ku3030	188 x 89 x 10
	Skytech Research, ltd	Vflat Ku	halkaisija: 70 korkeus: 30
	Kymeta corporation		tietoja ei saatavilla

Taulukko 4. Antennien painot

	valmistaja	malli	paino / [kg]
Lautasantennit	Orbit	OceanTRx-7- Ka	590
	Cobham	Sailor 900 VSAT	126
	Orbit	OceanTRx-4-500 Ka	200
	Cobham	SeaTel 5012	182
	Cobham	Sailor 800 VSAT	tietoja ei saatavilla
	Cobham	SeaTel 4006RZA	136
	Cobham	Sailor 600 VSAT	37
vaiheohjatut antennit	Phasor Solutions, ltd		12 (6 moduulia)
	Skytech Research, ltd	BBFlat-Phased Array	15
	Skytech Research, ltd	Vflat Ka	27
	ThinKom Solutions, inc	Ka2517	tietoja ei saatavilla
	ThinKom Solutions, inc	Falcon-Ku3030	tietoja ei saatavilla
	Skytech Research, ltd	Vflat Ku	27
	Kymeta corporation		tietoja ei saatavilla

Vertailun kohteena olevien vaiheohjattujen antennien voidaan todeta olevan kokonsa ja painonsa puolesta huomattavasti pienempiä kuin vastaavat lautasantennit. Nämä ominaisuudet korostuvat erityisesti asennusvaiheessa ja tilankäytön osalta. Vaiheohjattuja antennia voidaan asentaa ilman järeitä nostureita ja ne vievät vähemmän tilaa kuin lautasantennit.

6.2 Sähköiset ominaisuudet

Taulukkoon 5 on koottu antennien G/T- eli hyvyysluvut. Hyvyyslukuun vaikuttaa antennin nousu- eli elevaatiokulma. Mitä pienempi elevaatiokulma on, sitä enemmän maasta heijastuva lämpökohina vaikuttaa antennin lämpökohinaan ja G/T - luku heikkenee. Esimerkiksi Turussa geostationaarista satelliittia vastaanottaessa antennin elevaatiokulma on noin 20° [46]. Kaikissa taulukon 5 hyvyysluvuissa ei ole ilmoitettu elevaatiokulmaa jolla hyvyysluku on määritetty. Eri elevaatiokulmilla olevia hyvyyslukuja ei voida verrata suoraan keskenään. Taulukon perusteella voidaan arvioida, että Phasorin 27:stä moduulista koostuvan antennin hyvyysluku on lähellä Cobhamin ja Orbitin 1 m:n halkaisijoiltaan olevia antenneja, mutta heikompi kuin Orbitin 2,2 m halkaisijaltaan olevan antennin. Phasorin 12:sta moduulista koostuvan antennin hyvyysluku on Cobhamin 83 cm:ä halkaisijaltaan olevan Sailor 800 VSAT -lautasantennin veroinen. Muiden vaiheohjattujen antennien hyvyysluku on heikompi kuin Sailor 600 VSAT 65 cm:ä halkaisijaltaan olevan antennin. Kymetan kehittämän antennin tietoja ei ollut saatavilla.

Taulukko 5. Antennien hyvyysluku G/T

	valmistaja	malli	hyvyysluku G/T / [dB/K]
Lautasantennit	Orbit	OceanTRx-7-Ka	24,5
	Cobham	Sailor 900 VSAT	20,1 @ 19,7 GHz, 10° elevaatio
	Orbit	OceanTRx-4-500 Ka	20,0 @ 12,5 GHz, 30° elevaatio
	Cobham	SeaTel 5012	20,0 @ 30° elevaatio
	Cobham	Sailor 800 VSAT	18,2 @ 12,75 GHz, 30° elevaatio
	Cobham	SeaTel 4006RZA	17,9
	Cobham	Sailor 600 VSAT	17,2 @ 19,7 GHz, 10° elevaatio
vaiheohjatut antennit	Phasor Solutions, ltd		14,3 (6 moduulia) 17,4 (12 moduulia) 21,0 (27 moduulia)
	Skytech Research, ltd	BBFlat-Phased Array	13,5 @ 12,0 GHz, 30° elevaatio
	Skytech Research, ltd	Vflat Ka	12,5 @ 20,0 GHz, 20° elevaatio
	ThinKom Solutions, inc	Ka2517	12,5 @ 20° elevaatio
	ThinKom Solutions, inc	Falcon-Ku3030	12,0 @ 20° elevaatio
	Skytech Research, ltd	Vflat Ku	11,5 @ 12,0 GHz, 20° elevaatio
	Kymeta corporation		tietoja ei saatavilla

Taulukoihin 6 ja 7 on koottu antennien ekvivalenttiset säteilytehot (EIRP), vahvistukset sekä block upconverterin lähetystehot (BUC). Block upconverter muuntaa radiosignaalin lähetystaajuudelle ja lähettää radioaallon tietyllä teholla [74]. Joilain antennilla on useampia vaihtoehtoja block upconverterin lähetysteholle.

Taulukko 6. lautasantennien EIRP, BUC ja vahvistus

lautasantennit				
valmistaja	malli	EIRP / dBW	BUC / dBW	vahvistus / dBi
Orbit	OceanTRx-7-Ka	64,3	14	50,3
Cobham	Sailor900 VSAT	53,5	7	47,5
Orbit	OceanTRx-4-500 Ka	57	10	47
Cobham	SeaTel 5012	55	12	43
Cobham	Sailor 800 VSAT	48,1	7,8	40,6
Cobham	SeaTel 4006RZA	52	12	40
Cobham	Sailor 600 VSAT	50,4	7	43,4

Taulukko 7. vaiheohjattujen antennien EIRP, BUC ja vahvistus

vaiheohjatut antennit				
valmistaja	malli	EIRP / [dBW]	BUC / [dBW]	vahvistus / [dBi]
Phasor Solutions, ltd		53,6 (6 moduulia) 59,6 (12 moduulia) 66,6 (27 moduulia)	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
Skytech Research, ltd	BBFlat-Phased Array	39,51	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
Skytech Research, ltd	Vflat Ka	42	6	36
ThinKom Solutions, inc	Ka2517	46,5	17	29,5
ThinKom Solutions, inc	Falcon-Ku3030	49	16	33
Skytech Research, ltd	Vflat Ku	44	12	32
Kymeta corporation	mTenna	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla

Taulukoista havaitaan, että Phasorin 27:stä moduulista koostuvan antennin EIRP on noin 2 dB korkeampi kuin Orbitin 2,2 m halkaisijaltaan olevan antennin. Phasorin 12:n ja 6:n moduulin antennit ovat EIRP:n osalta parempia tai lähes yhteneväisiä 1 m:n halkaisijoiltaan olevien lautasantennien kanssa. Phasorin antennien hyvyysluvut on kuitenkin noin 3–6 dB heikompia. Esimerkiksi Phasorin kuuden moduulin antennin ja Cobhamin Sailor 900 VSAT -antennin EIRP arvot ovat lähes samoja, mutta Phasorin hyvyysluku on noin 6 dB heikompi. Muiden vaiheohjattujen antennien EIRP:t ovat noin 1–10 dB ja vahvistukset noin 7-13 dB heikompia kuin Cobhamin 65 cm halkaisijaltaan olevan Sailor 600 VSAT -lautasantennin. Näiden vaiheohjattujen antennien hyvyysluvut ovat noin 5–9 dB heikompia. Esimerkiksi Cobhamin Sailor 800 VSAT -antennin EIRP on noin 1 dB heikompi mutta vastaavasti hyvyysluku on noin 6 dB parempi kuin Thinkomin Falcon-Ku3030 -antennin. Phasorin ja Skytechin BBFlat-Phaser Array -antennin

block upconverterin lähetystehoja ja antennien vahvistuksia ei ollut saatavilla. Tällöin ei tiedetä, mikä osuus EIRP:sta on lähettimen ja mikä antennin vahvistuksen aikaansaamaa. Kymetan kehittämän antennin tietoja ei ollut saatavilla.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä tehtiin kirjallinen selvitys satelliittijärjestelmien ja satelliittiantenniteknologian kehityksestä. Työssä tutustuttiin olemassa oleviin satelliittijärjestelmiin ja luotiin katsaus kehitteillä oleviin seuraavan sukupolven järjestelmiin. Työssä selvitettiin minkälaisia satelliittiantenneja on kehitteillä. Tässä yhteydessä vertailtiin näiden kehitteillä olevien antennien ominaisuuksia nykyisiin käytössä oleviin lautasantenneihin.

Uusien satelliittijärjestelmien ja antenniteknologioiden tuntemus auttaa suunnittelemaan uusia tehokkaampia satelliittiyhteyksiin perustuvia tietoliikennesovelluksia erilaisten toimijoiden käyttöön.

Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla olemassa oleviin satelliittijärjestelmiin ja antenneihin. Tämän osion lähdemateriaalina käytettiin yritysten internetsivuja sekä aihetta käsitteleviä artikkeleita. Aiheen laajuuden vuoksi työhön pyrittiin poimaan keskeisimpiä alan toimijoita. Satelliittiyhteyksien ominaisuuksiin ja radioteknisiin asioihin perehdyttiin alan kirjallisuuden ja artikkeleiden avulla. Kehitteillä oleviin järjestelmiin ja antenneihin perehdyttiin valmistajien internetsivujen ja esitteiden avulla. Laitteistojen tarkempia tietoja pyrittiin saamaan suoraan valmistajilta, mutta näiden tietojen saaminen olisi vaatinut syvällisemmän kumppanuuden luomisen kuhunkin yritykseen.

Tämä työ osoitti, että olemassa olevia järjestelmiä kehitetään ja uusia, korkean suorituskyvyn satelliittijärjestelmiä on tulossa saataville 2020-luvun alussa. Tässä työssä käsitellyt uuden sukupolven järjestelmät ja laitteet tulevat tarjoamaan mahdollisuuksia uusille tulevaisuuden sovelluksille. Nopeat ja maailmanlaajuiset satelliittiyhteydet mahdollistavat uusien innovaatioiden syntymisen ja sovellusten kehityksen. Uuden teknologian antenniratkaisut tulevat mullistamaan koko satelliittitietoliikenteen kaikilla satelliittitoimialoilla. Nämä antenniratkaisut tarjoavat uudenlaisia keinoja toteuttaa satelliittitietoliikennesovelluksia auto-, laiva- ja lentokoneteollisuudessa.

Tulevaisuudessa voisi toteuttaa kattavamman selvityksen jokaisesta antennityypistä sekä suorittaa antennien ominaisuuksien mittauksia oikeissa ympäristöissä. Meriliikenteen satelliittiyhteyksiä ajatellen antennille voisi suorittaa vertailevia testejä. Testausten avulla voisi tutkia, miten eri antennit käyttäytyvät, miten niiden ominaisuudet muuttuvat esimerkiksi kovassa merenkäynnissä tai miten ne kestävät talvimerenkulun jäätäviä olosuhteita. Lisäksi voitaisiin suorittaa pidemmän aikavälin toiminnallisia testejä uusien satelliittijärjestelmien osalta. Näillä testeillä voisi kartoittaa järjestelmien todellista suorituskykyä, sekä mahdollisia katvealueita.

Tässä opinnäytetyössä esitetyistä järjestelmistä ja antennista voisi toteuttaa uuden selvityksen 5-10 vuoden kuluttua. Tässä selvityksessä voisi tutkia, mitkä näistä järjestelmistä ja antennista ovat käytössä yleisemmin ja mitä uutta alalla on tapahtunut. Tällainen selvitys yhdessä tämän opinnäytetyön kanssa auttaisi ymmärtämään satelliittiteknologian kehitystä pitkällä aikavälillä. Kehityshistorian ja olemassa olevien järjestelmien tuntemus on avainasemassa uusien innovaatioiden syntyemisessä.

LÄHTEET

- [1] Räisänen A, Lehto A. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press; 2011.
- [2] Ikonen A. Teräväpiirtotelevisio. 1st ed.: TeleStory Oy; 2009.
- [3] Karttunen H. Avaruuden valloitus. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry; 2014.
- [4] Thomas Henderson. Networking over Next-generation Satellite Systems University of California at Berkeley; 1999. Saatavilla: <https://pdfs.semanticscholar.org/b52c/1312abe5a9a8996df7751a80891e72c2e43a.pdf>
- [5] Niels Larsen. Electronically steerable antennas for satellite communications Technical University of Denmark; 2007. Saatavilla: <http://orbit.dtu.dk/files/4702357/PHDdissertationNiels%20Vesterdal%20Larsen.pdf>
- [6] Granlund K. Langaton tiedonsiirto. Jyväskylä: Docendo Finland Oy; 2001.
- [7] IMSO International mobile satellite organization. The global maritime distress and safety system. Saatavilla: <http://www.imo.org/public/GMDSS> (luettu: 4.4.2017)
- [8] Inmarsat plc. Our satellites.
Saatavilla: <http://www.inmarsat.com/about-us/our-satellites/>.
(luettu: 13.10.2016)
- [9] Wikipedia-projektin osanottajat. SBAS. 2015; Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/SBAS>. (luettu: 26.4.2017)
- [10] Cooper B. Rocket Launch Viewing Guide for Cape Canaveral. 2017; Saatavilla: http://www.launchphotography.com/Delta_4_Atlas_5_Falcon_9_Launch_Viewing.html. (luettu: 26.4.2017)
- [11] Get Connected. Inmarsat to launch fourth I-5 Ka-band GX satellite this year. 2017; Saatavilla: <http://www.getconnected.aero/2016/03/inmarsat-fourth-i-5-ka-band-gx-satellite/>. (luettu: 30.9.2016)

- [12] Wade M. Encyclopedia Astronautica Iridium. 2016; Saatavilla: <http://www.astronautix.com/i/iridium.html>. (luettu: 26.4.2016)
- [13] Iridium Communications Inc. Iridium Pilot. 2017; Saatavilla: <https://www.iridium.com/Products/Details/Iridium-Pilot-1?section=tech>. (luettu: 27.4.2017)
- [14] Itprostar. Iridium satellites. 2017; Saatavilla: <http://www.n2yo.com/satellites/?c=15>. (luettu: 26.4.2017)
- [15] New Scientist. Iridium: story of a communications solutions no one listened to. Saatavilla: <https://www.newscientist.com/article/mg23130850-700-iridium-story-of-a-communications-solution-no-one-listened-to/>. (luettu: 27.4.2017)
- [16] Iridium Communications Inc. The Global Network: Satellite Constellation. 2012. Saatavilla: <https://www.iridium.com/Download?resourceID=dfe9546a-0fe8-494f-873e-df78d15858b5>
- [17] Marine electronics & communications. Iridium expect to launch GMDSS service in 2018. Saatavilla: http://www.marinemec.com/news/view,iridium-expects-to-launch-gmdss-service-in-2018_42699.htm. (luettu: 27.4.2017)
- [18] Iridium Communications Inc. Iridium Broadband. Saatavilla: <https://www.iridium.com/services/broadband>. (luettu: 27.4.2017)
- [19] Iridium Communications Inc. What is Iridium NEXT. Saatavilla: http://www.argo.ucsd.edu/sat_comm_AST13.pdf (luettu: 27.4.2017)
- [20] Iridium Communications Inc. First Iridium NEXT Satellites Declared Ready for Shipment and Launch Date Announced. 2016; Saatavilla: <http://investor.iridium.com/releasedetail.cfm?releaseid=975723>. (luettu: 27.4.2017)
- [21] MML paikkatietokeskus. Paikannussatelliittijärjestelmät. Saatavilla: <http://www.fgi.fi/fgi.fi/teemat/paikannussatelliittij%C3%A4rjestelm%C3%A4t>. (luettu: 27.4.2017)

- [22] Liikenne- ja viestintäministeriö. Galileo satelliittinavigointijärjestelmä käyttöön. Saatavilla: <https://www.lvm.fi/-/galileo-satelliittinavigointijarjestelma-kayttoon-914283>. (luettu: 26.4.2017)
- [23] ESA navipedia. GNSS signal. 2014; Saatavilla: http://www.navipedia.net/index.php/GNSS_signal. (luettu: 27.4.2017)
- [24] The Science Geek. GPS. Saatavilla: <https://thes-sciencegeek.org/2017/01/29/gps/>. (luettu: 27.4.2017)
- [25] Information and Analysis Center. Glonass. Saatavilla: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/navfaq.php>. (luettu: 27.4.2017)
- [26] ESA navipedia. FDMA vs. CDMA. 2014; Saatavilla: http://www.navipedia.net/index.php/FDMA_vs._CDMA. (luettu: 27.4.2017)
- [27] Information and Analysis Center. Glonass history. Saatavilla: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>. (luettu: 27.4.2017)
- [28] Euroopan komissio - Lehdistötiedote. Galileo on täällä! Saatavilla: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-4366_fi.htm. (luettu: 27.4.2017)
- [29] ESA. Fact sheet Galileo Status. Saatavilla: http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo/Galileo_factsheet_2016.pdf. (luettu: 27.4.2017)
- [30] O3b Networks Ltd. Saatavilla: <https://www.o3bnetworks.com/>. (luettu: 25.1.2017)
- [31] Space news. SES takes control of O3b, citing synergies between GEO,MEO constellations. Saatavilla: <http://spacenews.com/ses-takes-control-of-o3b-citing-multiple-synergies-between-geo-meo-constellations/>. (luettu: 2.5.2017)
- [32] Oneweb llc. Saatavilla: <http://oneweb.world/>. (luettu: 25.1.2017)
- [33] Oneweb llc. OneWeb. Saatavilla: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/SISS-2016/Documents/OneWeb%20.pdf>. (luettu: 2.5.2017)
- [34] Space news. FCC gets five new applications for non-geostationary satellite constellations. Saatavilla: <http://spacenews.com/fcc-gets-five-new-applications-for-non-geostationary-satellite-constellations/>. (luettu: 2.5.2017)

- [35] ESA. Satellite frequency bands. 2013; Saatavilla: http://m.esa.int/spaceimages/Images/2013/11/Satellite_frequency_bands. (luettu: 15.3.2017)
- [36] Tähtitieteellinen yhdistys URSA. Radioastronomian historia. Saatavilla: <https://www.ursa.fi/wiki/Radioastronomia/Historia>. (luettu: 5.1.2017)
- [37] Peplink. Stuck obtaining IP address on T-Mobile. Saatavilla: <https://forum.peplink.com/t/stuck-obtaining-ip-address-on-t-mobile/8925/10>. (luettu: 5.5.2017)
- [38] Kusuma W. Antenna And Equipment Related. 2013; Saatavilla: https://www.slideshare.net/Wijaya_Kusuma/modul-6-antenna-related-equipments. (luettu: 5.5.2017)
- [39] John Nurminen Marine. Scout KM-10 VHF-antenni 18cm täysi paketti. Saatavilla: <https://www.merikartat.fi/scout-km-10-vhf-ais-kumiantenni-18cm.html>. (luettu: 5.5.2017)
- [40] Anvia TV Oy. LTE700-Ready UHF-antenni. Saatavilla: <http://www.anviatv.fi/category/47/antennit>. (luettu: 5.5.2017)
- [41] Air-Stream. Antenna Polarisation. 2014; Saatavilla: <http://www.air-stream.org.au/technical-references/antenna-polarisation>. (luettu: 8.5.2017)
- [42] Wikipedia-projektin osanottajat. Circular polarization. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarization. (luettu: 8.5.2017)
- [43] Clingerman D. The Olde Antenna Lab. Saatavilla: <http://www.hamtv.com/oal.html>. (luettu: 8.5.2017)
- [44] Kärkkäinen. Helix 5.8GHz 11dB RHCP antenni. Saatavilla: <https://www.karkkainen.com/verkkokauppa/helix-5-8ghz-11db-rhcp-antenni>. (luettu: 8.5.2017)
- [45] Lawson B. Electropaedia satellite technologies. 2015; Saatavilla: <http://www.mpoweruk.com/satellites.htm>. (luettu: 24.11.2016)
- [46] Gylen H. Tietoliikennesatelliittijärjestelmät kurssimoniste. ; 2012.

- [47] Wikipedia-projektin osanottajat. kiertorata. Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kiertorata#MEO-rata>. (luettu: 28.2.2017)
- [48] EMEA satellite operators association. Satellite orbits. Ei tiedossa; Saatavilla: <https://www.esoa.net/technology/satellite-orbits.asp> (luettu: 3.1.2017)
- [49] Ilmatieteenlaitos. Maan magneettikehä. Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/magneettikeha>. (luettu: 24.11.2016)
- [50] Wikipedia-projektin osanottajat. Latenssi. Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Latenssi>. (luettu: 5.3.2017)
- [51] Intellian Technologies Inc. About Intellian. Saatavilla: <http://www.intelliantech.com/?lang=en>. (luettu: 10.5.2017)
- [52] Orbit Communications Company. About - Our Story. Saatavilla: <http://orbit-cs.com/>. (luettu: 10.5.2017)
- [53] Cobham satcom. Cobham satcom. Saatavilla: <https://www.linkedin.com/company/cobham-satcom>. (luettu: 10.5.2017)
- [54] Wikipedia-projektin osanottajat. Satelliittitelevisio. 2015; Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Satelliittitelevisio>. (luettu: 10.5.2017)
- [55] Anvia TV Oy. Offset satelliittiantenni 100cm televes. Saatavilla: <http://www.anviatv.fi/product/337/offset-satelliittiantenni-100cm-televes-ei-sis-lnbta>. (luettu: 10.5.2017)
- [56] Wikipedia-projektin osanottajat. Cassegrain antenna. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Cassegrain_antenna. (luettu: 10.5.2017)
- [57] Orbit Communications Company. OceanTRx4 Maritime Stabilized VSAT System. Saatavilla: <http://orbit-cs.com/?product=oceantrxtm-4>. (luettu: 10.5.2017)
- [58] SeaSponsor.com. Marine Electronics Maintenance Information. 2010; Saatavilla: <http://www.seasponsor.com/antennas.html>. (luettu: 10.5.2017)

- [59] Watson gyro. Marine communications satellite tracking antenna stabilization. Saatavilla: <http://watson-gyro.com/project/marine-communications-satellite-tracking-antenna-stabilization/>. (luettu: 10.5.2017)
- [60] Phasor Solutions Ltd. Phasor's Technology. Saatavilla: <http://www.phasorsolutions.com/phasors-technology>. (luettu: 5.10.2016)
- [61] Kymeta Corporation. Saatavilla: <https://www.kymetacorp.com/>. (luettu: 6.10.2016)
- [62] Hao Y, Mittra R. FDTD Modeling of Metamaterials. : Artech house, Inc; 2008.
- [63] Metamorphose. Metamaterials Definition. 2017; Saatavilla: <http://www.metamorphose-vi.org/index.php/metamaterials>. (luettu: 4.5.2017)
- [64] Institute of physics. Metamaterials. Saatavilla: <http://www.iop.org/resources/topic/archive/metamaterials/>. (luettu: 4.5.2017)
- [65] Joni Vehmas. Transmission-Line Metamaterials, Bianisotropy, and Transmission-Line Bianisotropy Aalto University; 2015. Saatavilla: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/18994>
- [66] Aalto yliopisto. Theoretical and Applied Electromagnetics of Complex Media. Saatavilla: <http://meta.aalto.fi/research.html>. (luettu: 4.5.2017)
- [67] Thinkom Solutions Inc. Saatavilla: <http://www.thinkom.com/>. (luettu: 19.10.2016)
- [68] Inmarsat plc. Inmarsat and Thinkom Solutions agree on development plan for Global Xpress® Terminals. 2014; Saatavilla: <http://www.inmarsat.com/press-release/inmarsat-thinkom-solutions-agree-development-plan-global-xpress-terminals>. (luettu: 19.10.2016)
- [69] Lemme P. Vics (2Ku) is Mechanically Steered&Other Antenna Characteristics. 2015; Saatavilla: <http://www.satcom.guru/2015/12/vics-2ku-is-mechanically-steered-other.html>. (luettu: 30.9.2016)
- [70] Elbert BR. Gogo 2Ku Whitepaper. Saatavilla: http://www.thinkom.com/wp-content/uploads/2013/08/Gogo_2Ku_Whitepaper_Rev2.pdf. (luettu: 22.2.2017)

- [71] Thinkom Solutions Inc. The Variable Inclination Continuous Trasnverse Stub (VICTS) Array. Saatavilla: <https://www.yumpu.com/en/document/view/5627013/victs-thinkom>. (luettu: 22.2.2017)
- [72] Skytech Ltd. About Skytech. Saatavilla: <http://www.skytech-research.com/about.php>. (luettu: 13.10.2016)
- [73] Skytech Ltd. Skytech presentation. 2015; Saatavilla: <https://company.metstrade.com/?a=FEY9pLHXWfV1XHUY5r0nDkENVx7AKfUXIvKRtropaEQ%3D>. (luettu: 12.10.2016)
- [74] Wikipedia-projektin osanottajat. Block upconverter. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Block_upconverter. (luettu: 8.5.2017)

Lautasantennien ominaisuudet

Valmistaja	Cobham	Cobham	Cobham	Cobham
Malli	Sea Tel 5012	Sea Tel 4006RZA	Sailor 800 VSAT	Sailor 900 VSAT
Antennin halkaisija / cm	124	100	83	103
Taajuusalue	Ku	Ku	Ku	Ka
Polarisaatio	H / V	H / V	H / V	RHCP/LHCP
EIRP / dBW	55	52	48,1	53,5
BUC / dBW	12	12	7,8	7
Antennin vahvistus / dBi (TX)	43	40	40,6	47,5
Antennin vahvistus / dBi (RX)	41,6	39	38,8	43,7
G/T / dB/K	20,0 @ 30° elevaatio	17,9	18,2 @ 12,75GHz,	20,1 @ 19,7 GHz,
Ulkomitat / cm	tietoja ei saatavilla	Radomi: -halkaisija 127	tietoja ei saatavilla	Radomi: -halkaisija 130
Paino / kg	182	136	tietoja ei saatavilla	126
Lämpötila-alue / °C	tietoja ei saatavilla	-20 – 55	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla

Valmistaja	Cobham	Orbit	Orbit
Malli	Sailor 600 VSAT	OceanTRx-4-500 Ka	OceanTRx-7- Ka
Antennin halkaisija / cm	65	115	220
Taajuusalue	Ka	Ka	Ka
Polarisaatio	RHCP/LHCP	RHCP/LHCP	RHCP/LHCP
EIRP / dBW	50,4	57	64,3
BUC / dBW	7	10	14
Antennin vahvistus / dBi (TX)	43,4	47	50,3
Antennin vahvistus / dBi (RX)	40,4	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
G/T / dB/K	17,2 @ 19,7 GHz, 10° elevaatio	20,0 @ 12,5 GHz, 30° elevaatio	24,5
Ulkomitat / cm	Radomi: -halkaisija 82	Radomi: -halkaisija 155	Radomi: -halkaisija 270
Paino / kg	37	200	590
Lämpötila-alue / °C	-20 - 55	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla

vaiheohjattujen antennien ominaisuudet

Valmistaja	Phasor solutions ltd	Skytech research ltd	ThinKom Solutions, inc	ThinKom Solutions, inc
Malli		Vflat Ku	Falcon-Ku3030	Ka2517
Taajuusalue	Ku	Ku	Ku	Ka
Polarisaatio	H/V	H/V	H/V	RHCP/LHCP
EIRP / dBW	6 moduulia: 53,6 12 moduulia: 59,6	44	49 @ 20° elevaatio	46,5 @ 20° elevaatio
BUC / dBW	tietoja ei saatavilla	12	16	17
Antennin vahvistus / dBi (TX)	tietoja ei saatavilla	32	33	29,5
Antennin vahvistus / dBi (RX)	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
G/T / dB/K	6 moduulia: 14,3 12 moduulia: 17,4	11,5 @ 12 GHz, 20° ele-	12 @ 20° elevaatio	12,5 @ 20° elevaatio
Ulkomitat / cm	6 moduulia: 54 x 72 12 moduulia: 72 x 108 27 moduulia 126 x 144	Radomi: -halkaisija 70 -korkeus: 30	188 x 89 x 10	127 x 74 x 8
Paino / kg	6 moduulia: 12	27	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
Lämpötila-alue / °C	-55 - 85	tietoja ei saatavilla	-55 - 74	-55 - 74

Valmistaja	Skytech re- search ltd	Skytech research ltd	Kymeta corpora- tion
Malli	Vflat Ka	BBFlat-Phased Ar- ray	mTENNA _{U7}
Taajuusalue	Ka	tietoja ei saatavilla	Ka / Ku
Polarisaatio	RHCP/LHCP	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
EIRP / dBW	42	39,51	tietoja ei saatavilla
BUC / dBW	6	ei tiedossa	tietoja ei saatavilla
Antennin vahvis- tus / dBi (TX)	36	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
Antennin vahvis- tus / dBi (RX)	tietoja ei saata- villa	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
G/T / dB/K	12,5 @ 20 GHz, 20° elevaatio	13,5 @ 12GHz, 30° elevaatio	tietoja ei saatavilla
Ulkomitat / cm	Radomi: -halkaisija 70	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla
Paino / kg	27	15	tietoja ei saatavilla
Lämpötila-alue / °C	tietoja ei saata- villa	tietoja ei saatavilla	tietoja ei saatavilla