

Antti Hahka

# MAAN JA ULKOAVARUUDEN ALUKSEN VÄLINEN RADIOTIETOLIIKENNE

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Helena Leppäkoski  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Antti Hahka: Maan ja ulkoavaruuden aluksen välinen radiotietoliikenne  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma, Automaatiotekniikka  
Huhtikuu 2023

---

Avaruus on vaativa ympäristö ihmisen luomalle teknologialle. Mitä kauemmas Maasta avaruusaluksat kulkevat avaruudessa, sitä vaativammaksi kaksisuuntainen yhteydenpito avaruusaluksen ja Maan välillä käy. Tässä työssä perehdytään siihen, miten ihmisen rakentaman avaruusaluksen ja Maan välillä pidetään pitkienkin matkojen välillä yhteyttä langattomasti radiotekniikan avulla sekä miten avaruusaluksen sijainti määritetään. Työssä käydään lyhyesti läpi tietoliikenne-esimerkki James Webb -avaruusteleskoopin avulla.

Työ on jaettu viiteen osaan, joissa ensiksi perehdytään avaruuteen ympäristönä ja langattomaan tietoliikenteeseen. Tästä siirrytään tutkimaan tietoliikenteen tehtäviä sekä sen mahdollistajaa ulkoavaruusverkko DSN:ää. Sen jälkeen tutustutaan ulkoavaruudesta tulevan signaalin vastaanottamiseen sekä lähettämiseen. Lopuksi käydään läpi tietoliikenne-esimerkki.

Työssä tarkastellaan ulkoavaruuden tietoliikennettä paljon Maan osalta. Tietoliikenteen osalta tutustutaan ensiksi ulkoavaruuden tietoliikenteen käyttökohteisiin, jotka ovat telemetria, ohjaus ja seuranta. Alaluvussa "Seuranta" vastataan tutkimuskysymykseen siitä, miten ulkoavaruuden alus paikannetaan avaruudessa. Tähän liittyy olennaisesti se, että aluksen paikkaa määritetään sen koko elinkaaren ajan, minkä avulla ennakkoon luotua lentoradan mallia voidaan verrata aluksen havaittuun paikkaan. Havainnointi tapahtuu ulkoavaruusverkko DSN:n avulla.

DSN on tässä työssä laajemman käsitteilyn kohteena. DSN on kolmen antenniaseman muodostama maailmanlaajuinen kokonaisuus. Nämä asemat ovat sijoitettu ympäri Maapalloa siten, että jokaiseen avaruudessa olevaan alukseen voidaan ottaa yhteyttä milloin tahansa Maapallon pyöriessä akselinsa ympäri. Asemilla on eri määrä erilaisia Cassegrain-tyyppisiä antennejä, joiden tehtävänä on vastaanottaa ja lähettää hyötyviestejä eli signaaleita. DSN:n yhteydessä tutustutaan niin sanottuun linkkibudjettiin ja sen muodostaviin parametreihin, joiden avulla kuvataan Maan ja avaruudessa olevan aluksen välisiä signaalin tehohäviöitä ja -vahvistuksia. Signaalit ovat kaukaa avaruudesta tullessaan hyvin heikkoja ja kohinaisia, mikä vaatii DSN:ltä signaalia vahvistavia laitteita. Vaikka signaalit saadaankin vahvistettua siten, että niitä voidaan tulkita ja käyttää, vaaditaan itse signaaliin liitetystä datasta varmuutta datan oikeellisuudesta. Tähän varmuuteen pystytään esimerkiksi erilaisten virheenkorjausmenetelmien avulla.

Avainsanat: avaruus, ulkoavaruus, DSN, ulkoavaruusverkko, tietoliikenne, avarusteleskooppi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

## ALKUSANAT

Erityiskiitokset ansaitsee kandidaatintyöni ohjaaja Helena Leppäkoski. Helena tarjosi minulle mielenkiintoisen aiheen minua aina kiinnostaneesta avaruudesta ja työskentely hänen kanssaan oli hyvin vuorovaikutteista ja joustavaa. Hänen palautteensa sai minut kiinnittämään huomioita kirjoittamisen pieniin, mutta tärkeisiin, yksityiskohtiin, joihin en ole aiemmin kiinnittänyt juurikaan huomiota. Kokeilin kirjoitusprosessin aikana erilaisia kirjoitustekniikoita, joihin hän antoi tukensa ja neuvonsa, mutta hän myös esitti erilaisia tekniikoita, joita pystyin kokeilemaan työn kirjoituksen aikana. Kiitän myös Suvi Pellistä, joka antoi palautetta työn kielentarkastuksessa sekä auttoi kandidaatintyöhön liittyvien Moodle-alueiden kanssa aina, kun olin jollekin alueelle unohtanut liittyä.

Näin tämän kandidaatintyön sekä opinnäytetyönä että oppimistilaisuutena, jonka aikana kehityin mielestäni paremmaksi kirjoittajaksi. Nyt voin hyvin mielin jatkaa katsomista avaruutta kohti ja todeta itselleni, että vielä on paljon ymmärrettävää ja tutkittavaa tuolla, minne silmäni eivät näe. Vaikka silmäni näkevät vain pienen osan avaruudesta, ainakin ymmärrän vähän paremmin sitä kokonaisuutta, joka mahdollistaa "parempien silmien" käytön.

Tampereella, 24. huhtikuuta 2023

Antti Hahka

## SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto . . . . .	1
2	Taustateoriaa . . . . .	3
2.1	Avaruus . . . . .	3
2.2	Langaton tietoliikenne . . . . .	5
2.3	Mikroaallot tiedonkantajana . . . . .	7
3	Tietoliikenne ulkoavaruuteen . . . . .	9
3.1	Käyttötarkoitukset . . . . .	9
3.1.1	Telemetry ja ohjaus . . . . .	9
3.1.2	Seuranta . . . . .	10
3.2	Ulkoavaruusverkko DSN . . . . .	11
3.2.1	DSN:n antennityypit . . . . .	14
3.2.2	Kehityssuunta . . . . .	14
3.3	Antennit . . . . .	15
3.3.1	Antennin luontainen vahvistus . . . . .	16
3.3.2	Tehohäviöt . . . . .	18
3.3.3	Kohina . . . . .	19
3.3.4	Signaalin vahvistaminen . . . . .	21
3.3.5	Vastaanottimet . . . . .	21
3.4	Modulaatio . . . . .	22
3.5	Virheenkorjaus . . . . .	23
4	Esimerkki - James Webb -avaruusteleskooppi . . . . .	24
4.1	Rakenne ja tutkimustehtävät . . . . .	25
4.2	Tietoliikenne . . . . .	26
5	Yhteenveto . . . . .	27
	Lähteet . . . . .	29
	Liite A DSS-14 (Mars-antenni) . . . . .	34
	Liite B JWST:n kaksi puolta . . . . .	35

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	engl. Amplitude Modulation, suomeksi amplitudimodulaatio. Yksi analogisen signaalin modulaatiotavoista.
ASK	engl. Amplitude Shift Keying, suomeksi amplitudiavainnus. Yksi digitaalisen signaalin modulaatiotavoista.
au	engl. astronomical unit, suomeksi astronominen yksikkö. Maan ja Auringon välinen etäisyys, joka on noin 150 miljoonaa km.
BPSK	engl. Binary phase shift keying, suomeksi binäärinen vaiheavainnus. Yksi PSK:n toteutustavoista.
BVR	engl. Block-V Receiver. DSN:n antennin suljetun tyyppin vastaanotin.
BWG	engl. Beam Waveguide, suomeksi aaltokeilajohto. DSN:n suurissa Maa-antenneissa peilejä ja optisia linssejä hyödyntävä sähkömagneettisen aallon ohjausjärjestelmä.
CCSDS	engl. Consultative Committee for Space Data Systems. Komitea, joka kehittää standardeja avaruuden IT-järjestelmiin.
CFDP	engl. CCSDS File Delivery Protocol. Avaruuden tietoliikenteeseen tarkoitettu CCSDS:n luoma viestintäprotokolla.
CFH	engl. Cassegrain Feed-Horn. Cassegrain-tyyppinen antenni, jossa viestien lähettämiseen ja vastaanottamiseen tarvittava elektronikka sijaitsee pääheijastimella syöttötorvessa.
CSA	engl. Canadian Space Agency, Kanadan avaruusjärjestö.
DSN	engl. Deep Space Network, kansainvälinen radioantenniverkko. Tukee NASAn planeettojenvälisiä operaatioita.
DSS-xx	engl. Deep Space Station "xx". Yksilöllinen merkintä DSN:n antenneille, missä merkintä xx korvataan yksilöllisellä tunnistenumeraalilla esimerkiksi DSS-14.
EIRP	engl. Effective/Equivalent Isotropic Radiated Power, suomeksi ekvivalenttinen isotrooppinen säteilyteho. Isotrooppisen antennin parametri, jonka avulla voidaan laskea antennin absoluuttinen teho.

ESA	engl. European Space Agency, Euroopan avaruusjärjestö. Kansainvälinen avaruusjärjestö, johon kuuluu useita Euroopan maita Suomi mukaan lukien.
FAI	ransk. Fédération Aéronautique Internationale, Kansainvälinen ilmailuliitto. Hallinnoi ja edistää ilmaurheiluun liittyvää toimintaa ja kansainvälisiä ennätyksiä.
FEC	engl. Forward-Error-Correction, suomeksi toistokorjaus. Virheenkorjausmenetelmä, jossa lähetettävän hyötydatan lisäksi lähetetään datasta lisätietoa, jonka avulla mahdollisesti menetetty data saadaan palautettua.
FFT	engl. Fast-Fourier-Transform, suomeksi nopea Fourier-muunnos. Algoritmi, jolla mikä tahansa digitaalinen signaali voidaan esittää eri taajuuskomponenttien summana.
FGS/NIRISS	engl. Fine Guidance Sensor/ Near InfraRed Imager and Slitless Spectrograph. Yksi JWST:n kuvantamislaitteista.
FM	engl. Frequency Modulation, suomeksi taajuusmodulaatio. Yksi analogisen signaalin modulaatiotavoista.
FSK	engl. Frequency Shift Keying, suomeksi taajuusavainnus. Yksi digitaalisen signaalin modulaatiotavoista.
HEF	engl. High-efficiency. DSN:n eräs antennityyppi, joka sisältää syöttötorven pääheijastimella.
HEMT	engl. High-Electron Mobility Transistor, suomeksi suuren elektroniikkavuuden transistori. Yksi LNA:n tyypeistä.
HFET	engl. Heterostructure Field-Effect Transistor. Yksi LNA:n tyypeistä.
HGA	engl. High-Gain Antenna. Suurivahvistuksinen antenni.
IAU	engl. International Astronomical Union, Kansainvälinen tähtitieteellinen unioni. Astronomiaan keskittyvä kansainvälinen liitto, joka määrittelee esimerkiksi astronomian sanastoa, vakioita sekä toimii kansainvälisenä viranomaisena taivaankappaleiden nimeämisessä.
IEEE	engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, suomeksi kansainvälinen sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö. Kansainvälinen tekniikan alan järjestö, joka muun muassa määrittelee useita tekniikkaan liittyviä standardeja.

ISS	engl. International Space Station, suomeksi Kansainvälinen avaruusasema. Maasta noin 400 km:n korkeudessa toimiva kansainvälinen avaruusasema.
ITU	engl. International Telecommunication Union, Kansainvälinen televiestintäliitto. Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) alainen televiestintää hoitava järjestö.
JPL	engl. Jet Propulsion Laboratory, NASAn avaruustutkimuskeskus. Keskittyy avaruusalusten avulla suoritettaviin tutkimuksiin. Operoi myös DSN:ää.
JWST	engl. James Webb Space Telescope, suomeksi James Webb -avaruusteleskooppi. Infrapunakuvantamiseen erikoistunut avaruusteleskooppi.
LDPC	engl. Low-Density Parity-Check. Yksi virheenkorjauksen koodausmenetelmistä.
LNA	engl. Low-Noise Amplifier, pienikohinainen vahvistin. DSN:n antenneissa hyödynnettävä vahvistin, joka aiheuttaa vain pientä kohinaa vahvistettuun signaaliin.
Maser	engl. Microwave amplification by simulated emission of radiation. Yksi LNA:n tyypeistä.
MGA	engl. Medium-Gain Antenna. Keskivahvistuksinen antenni.
MIRI	engl. Mid-Infrared Instrument. Yksi JWST:n kuvantamislaitteista.
NASA	engl. National Aeronautics and Space Administration. Yhdysvaltain hallintovirasto, joka vastaa tieteestä ja teknologiasta ilmailun ja avaruuden saralla.
NIRCam	engl. Near-Infrared Camera. Yksi JWST:n kuvantamislaitteista.
NIRSpec	engl. Near-Infrared Spectrograph. Yksi JWST:n kuvantamislaitteista.
NISN	engl. NASA Integrated Services Network. NASAn käyttämä yksityinen verkko luotettavaan tiedonsiirtoon.
PLL	engl. Phase-Locked Loop, suomeksi vaihelukittu silmukka. BVR:ssä käytettävä input-signaalin seurantapiiri.
PM	engl. Phase Modulation, suomeksi vaihemodulaatio. Yksi analogisen signaalin modulaatiotavoista.
PSK	engl. Phase Shift Keying, suomeksi vaiheavainnus. Yksi digitaalisen signaalin modulaatiotavoista.

QPSK	engl. Quadrature-Phase-Shift-Keying, suomeksi nelivaihesiirtovainnus. Yksi PSK-modulaatiotavoista, jossa käytetään neljää eri vaiheen arvoa esittämään eri symboleita.
SNR	engl. Signal-to-noise ratio, suomeksi signaali-kohinasuhde. Kertoo hyötysignaalin suhteen ympäristön kohinaan tietyllä taajuusalueella.
SSR	engl. Solid State Recorder. JWST:ssä toimiva tieteellisen datan tallennustila.
STScI	engl. Space Telescope Science Institute. Eri avaruusteleskooppien, kuten Hubblen ja JWST:n toiminnanohjauskeskus.
UHF	engl. Ultra-High Frequency, suomeksi ultrataajuus. IEEE:n nimeämä taajuusalue, joka kattaa taajuudet 0,3 - 1 GHz.
VLBI	engl. Very-Long-Baseline Interferometry, suomeksi pitkäkantainterferometria. Yksi menetelmä ulkoavaruudessa olevan aluksen kaltevuuskulman määrittämiseen Maahan nähden.
WLAN	engl. Wireless Local Area Network, suomeksi langaton lähiverkko.



# 1 JOHDANTO

Avaruus on kiinnostanut ihmiskuntaa pitkän ajan. Aurinkokuntamme planeetat ja yötaivaalla näkyvät tähdet ja tähtikuviot ovat olleet mielenkiinnon kohteena jo tuhansia vuosia, mistä kertoo esimerkiksi taivaankappaleiden tutkiminen jo antiikin Kreikasta lähtien. Myöhäiskeskiajalla Nikolaus Kopernikus kyseenalaisti maakeskeisen maailmankuvan sekä Galileo Galilei tutki aurinkokuntaamme kaukoputken avulla. Kylmän sodan aikana Yhdysvallat ja Neuvostoliitto aloittivat kilpailun avaruuden valloituksesta, mikä huipentui Yhdysvaltain Apollo 11 -avaruuslennon onnistuneeseen laskeutumiseen Kuun pinnalle ja siten ensimmäisiin ihmisen askeleihin Maan ulkopuolisella taivaankappaleella. Avaruuden tutkimus ei kuitenkaan pysähtynyt vain Kuun pinnalle laskeutumiseen, vaan avaruuden valloituksen jälkeen tutkijat ovat suunnanneet tutkimuksensa entistä syvemmälle aurinkokuntaamme ja sen ulkopuolelle.

Avaruuteen on lähetetty viime vuosikymmeneltä lähtien erilaisia tutkimuslaitteita. Esimerkiksi Yhdysvaltain avaruusjärjestö NASA (engl. National Aeronautics and Space Administration) lähetti Voyager 1- ja Voyager 2 -avaruusluotaimet avaruuteen vuonna 1977 ja NASA sekä Euroopan avaruusjärjestö ESA (engl. European Space Agency) lähettivät avarusteleskooppi Hubblen vuonna 1990 avaruuteen. Näistä esimerkeistä Hubble saatettiin maata kiertävälle radalle, kun taas Voyager-luotaimet lähetettiin matkaamaan pois päin Maasta kohti aurinkokuntamme uloimpia planeettoja ja tähtienvälistä avaruutta.

Avaruus ympäristönä sekä suuret etäisyydet luovat omat haasteensa sille, miten ulkoavaruuteen lähetettyihin tutkimuslaitteisiin muodostetaan kaksisuuntainen yhteys. Tämä tietoliikenneyhteys on kriittinen tutkimuslaitteen toiminnan kannalta, koska laitetta pitää pystyä komentamaan Maasta, mutta myös laitteen keräämää informaatiota pitää pystyä lähettämään Maahan asti riippumatta siitä, kuinka kaukana laite on avaruudessa.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, miten näihin kaukana oleviin ihmisen ulkoavaruuteen lähetettäisiin tutkimuslaitteisiin pidetään yhteyttä Maasta käsin. Samalla selvitetään se, miten puolestaan avaruudessa oleva tutkimuslaite lähettää dataa Maahan asti. Tärkeänä tavoitteena on myös ymmärtää, miten tutkimuslaite paikannetaan ulkoavaruudessa, jotta tietoliikennemahdollisuutta tutkimuslaitteeseen ei menetetä. Tähän yhteydenpitoon tutustutaan käytännön esimerkin kautta, mikä tässä työssä on James Webb -avaruusteleskooppi.

Työ on kirjallisuusselvitys. Lähteinä olen käyttänyt paljon NASAn virallisia verkkolähteitä, kuten teknillisiä raportteja ja artikkeleita. Työssä on hyödynnetty myös kirjoja, tieteellisiä artikkeleita sekä verkkolähteitä. Huomattavaa on, että lähteissä esimerkiksi JPL (Jet Propulsion Laboratory) on NASAn alainen tutkimuslaitos, joka hallitsee tässä työssä tarkemmin tutkittavaa ulkoavaruusverkkoa. Lähteet käsittelevät paljon ulkoavaruusverkkoasen merkittävyyden vuoksi, mutta lähteisiin on otettu lisäksi esimerkiksi langattoman tietoliikenteen perusteita, antenniteknologiaa sekä avaruudesta kertovia lähteitä.

Tämä työ on jaettu viiteen lukuun, joista tämä johdanto on ensimmäinen luku. Toinen luku kertoo avaruudesta ja langattomasta tietoliikenteestä. Kolmas luku keskittyy ulkoavaruusverkkoon, antenneihin sekä tietoliikenteen toteutukseen Maan ja ulkoavaruuden aluksen välillä. Neljännessä luvussa esitellään James Webb -avaruusteleskooppi, jonka avulla perehdytään ulkoavaruuden aluksen ja Maan väliseen tietoliikenteeseen lyhyesti. James Webb -teleskooppi lähetettiin avaruuteen joulukuussa 2021. Viimeinen luku kokoaa yhteen tämän työn tulokset.

## 2 TAUSTATEORIAA

Tässä luvussa tutustutaan Maata ympäröivään avaruuteen ja langattomaan tietoliikenteeseen. Kun avaruusalus lähetetään Maasta avaruuteen, ainoa tapa pitää yhteyttä alukseen on langattomasti. Langattomaan tietoliikenteen perusteisiin paneudutaan lyhyesti omassa alaluvussa 2.2, minkä jälkeen perehdytään tarkemmin sähkömagneettisen spektrin sisältämiin mikroaaltoihin alaluvussa 2.3. Mikroaaltoja käytetään ulkoavaruuden tietoliikenteessä hyötyviestien kantoaaltoina ja esimerkiksi avaruuden kosmista taustasäteilyä havaitaan muun muassa mikroaaltojen aallonpituuksilla [1].

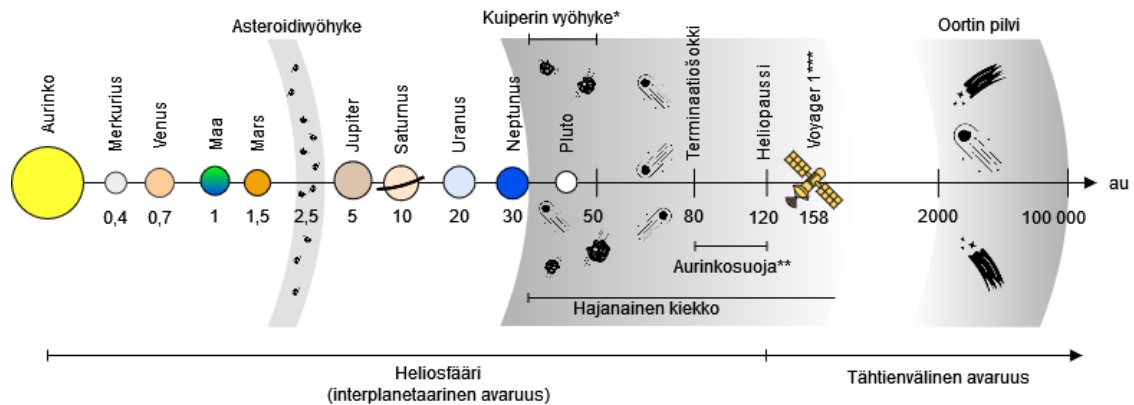
### 2.1 Avaruus

Maapalloa ympäröi elämälle tärkeä ilmakehä. Ilmakehä sisältää esimerkiksi typpeä, happea ja hiilidioksidia, joilla kaikilla on tärkeä rooli elämän mahdollistamiseksi. Ilmakehä voidaan jakaa useaan eri kerrokseen eli sfääreihin, jotka sijaitsevat eri korkeuksilla. Mitä kauemmas Maapallosta pois päin mennään, sitä ohuemmaksi ilmakehä muuttuu ja sitä lähemmäs päästään niin kutsuttua *avaruutta*.

Avaruuden alkamisetiäisyydelle ei ole yksikäsitteistä määritelmää. Eri määritelmät avaruuden alkamisrajalle ovat esittäneet esimerkiksi NASA, joka on määritellyt avaruuden alkan van 50 mailin korkeudessa (80 km) [2] ja Kansainvälinen ilmailuliitto FAI (ransk. Fédération Aéronautique Internationale), joka on määritellyt 100 km:n korkeudessa olevan Kármánin rajan olevan avaruuden raja. FAI:n määritelmä saattaa lähitulevaisuudessa muuttua samaksi kuin NASAn 80 km raja. [3] *Ulkoavaruus* on määritetty tässä työssä avaruuden alueeksi, joka alkaa 2 000 000 km päästä Maapallosta. Tämä määritelmä on johdonmukainen Kansainvälisen televiestintäliiton ITU:n määritelmän kanssa [4].

Kuva 2.1 esittää aurinkokunnan rakennetta. Kuva on rakennettu yhdistäen tietoa Doody Daven kirjasta *Deep Space Craft* [5, liite C] ja NASAn uudemmissa aurinkokuntaan liittyvistä internetlähteistä [6][7][8]. Kuvaan on merkitty myös arvioidut etäisyydet Auringosta astronomisina yksiköinä. Kansainvälinen tähtitieteellinen unioni IAU (engl. International Astronomical Union) on määrittänyt yhden astronomisen yksikön vastaavan keskimääräistä etäisyyttä Maan ja Auringon välillä, mikä on noin 150 miljoonaa km (tarkalleen 149 597 870 700 metriä) [9]. Astronomisen yksikön yksikkömerkintä on pienellä kirjoitettu "au". Aurinkokunnan ja astronomisen yksikön skaalojen hahmottamiseksi esitettäköön,

että yksi valovuosi vastaa noin 63 241 astronomista yksikköä ja etäisyys Linnunradan keskipisteeseen Maasta on noin 27 000 valovuotta.



**Kuva 2.1.** Aurinkokunta

\*Kuiperin vyöhyke tunnetaan myös nimellä Neptunuksen takainen alue (engl. *Trans-Neptunian region*).

\*\*Käännös englanninkielisestä sanasta "heliosheath".

\*\*\*Voyager 1 -luotain on kuvan tekohetkellä noin 158,2 au:n päässä Auringosta ja saavuttaa Oortin pilven 300 vuoden päästä [10].

Heliosfääriksi kutsutaan sitä aluetta avaruudessa, johon Auringon magneettikenttä vaikuttaa merkittävästi. Interplanetaarinen avaruus (planeettainvälinen avaruus) kuuluu heliosfääriin ja sisältää kaikki aurinkokuntamme planeetat. [5, s. 332] Heliosfääri ei kuitenkaan pääty planeettoihimme, vaan se ulottuu paljon kauemmas avaruuteen [6].

Aurinkokuntamme viimeisen planeetan Neptunuksen kiertoradan takana alkaa Kuiperin vyöhyke. Kuiperin vyöhyke koostuu komeetan kaltaisista objekteista ja sen pääalue päättyy noin 50 au:n etäisyyteen Maasta. Nykytiedon mukaan Neptunuksen takana alkaa myös toinen alue, jota kutsutaan *hajanaisiksi kiekoksi*. Hajanainen kiekko voi yltää yli tuhannen au:n päähän. [7] Joidenkin astronomien [7] mukaan nämä alueet ovat erillisiä alueita, kun taas esimerkiksi Doody Daven kirjassa vuodelta 2009 [5] hajanaisesta kiekosta ei ole mainintaa.

Lähestyttäessä heliosfäärin ulkoreunaa aurinkotuulen nopeus laskee alle äänennopeuden. Tätä rintamaa kutsutaan terminaatiošokiksi. Terminaatiošokin jälkeen alkaa niin sanottu aurinkosuojan alue (engl. heliosheath). Tällä alueella aurinkotuuli ja tähtienvälinen aine ja säteily kohtaavat ja niiden välinen paine-ero tasoittuu. Aurinkosuojaa päättyy heliopaussiin, joka merkitsee heliosfäärin loppumisen. Auringon vaikutus heikkenee merkittävästi, ja tähtienvälinen avaruus alkaa. [5, s. 332] Aurinkokunta ei kuitenkaan pääty tähtienväliseen avaruuteen, vaan Aurinkokunnan uloin alue on Oortin pilvi tähtienvälisessä avaruudessa. Oortin pilvi on muodoltaan pallomainen kuori, joka sisältää koko aurinkokuntamme. Oortin pilvi muodostuu jäisistä komeetan kaltaisista kappaleista. [8]

Interplanetaarisen avaruuden materiaali on pääosin Auringosta peräisin, mutta myös planeetoista päätyy materiaalia avaruuteen. Aurinko lähettää materiaalia aurinkotuulen ja satunnaisten koronan massapurkausten myötä. [5, s. 332] Aurinkotuuli koostuu plasmas- ta eli ioneiden ja elektronien muodostamasta massasta. Koronan massapurkaus on sa- tunnainen räjähdys ioneita [5, s. 332], jotka ovat positiivisesti tai negatiivisesti varautuneita atomeja tai molekyyliä. Maalla, Jupiterilla ja Saturnuksella on magneettikenttä, joka kääntää aurinkotuulen ja massapurkausten lähettämät partikkelit näiden planeettojen ohi [5, s. 332].

Avaruus on haastava ympäristö kehitetylle teknologialle seuraavista syistä [11, luku 11]:

- äärimmäiset lämpötilat
- voimakas säteily
- tyhjiön olosuhteet
- erittäin nopeasti kulkevat partikkelit ja irtoainekset
- haastavat tai jopa mahdottomat laitteiden huoltotoimenpiteet.

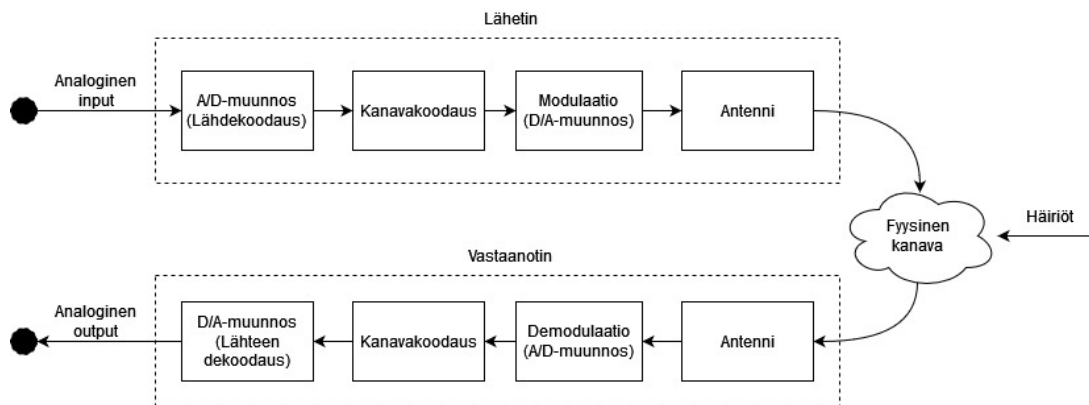
Esimerkki äärimmäisistä lämpötiloista esitetään luvussa 4: James Webb -avaruusteles- kooppi voi kokea sekä noin  $-240^{\circ}\text{C}$  lämpötilan että  $110^{\circ}\text{C}$  lämpötilan saman avaruusaluks- sen eri puolilla. Tyhjiö voi aiheuttaa kaasujen vapautumista materiaaleista, minkä vuoksi materiaaleista vapautunut kaasu voi kondensoitua aluksen muille pinnoille ja aiheuttaa näiden pintojen ominaisuuksien muutoksia [12, alaluku 1.1.3.1]. Edellä mainitun aurinko- tuulen partikkelien lähetys aiheuttaa huomattavaa painetta avaruusalukseseen [12, alaluku 1.1.3.3]. Aluksen ympärillä ei ole samanlaista avaruuden irtoainekselta suojaavaa ilma- kehää, mitä Maassa on, jolloin pienikin irtoainekset aiheuttaa aluksen kulumista. [12, alaluku 1.1.3.6] Voimakkaan säteilyn aiheuttaa Aurinko, joka säteilee ympärilleen esimerkiksi UV- ja röntgensäteilyä. Esimerkiksi UV-säteily täytyy huomioida aluksen aurinkopaneeleissa. [12, alaluku 1.1.3.2] Huoltotoimenpiteitä voidaan suorittaa avaruudessa hyvin lähellä ole- viin rakennelmiin kuten Kansainväliseen avaruusalukseseen (engl. International Space Sta- tion, ISS), mutta ulkoavaruuteen lähetettyjen alusten osalta huoltotoimenpiteitä ei tehdä.

## 2.2 Langaton tietoliikenne

Langaton tietoliikenne on ainoa keino lähettää ja vastaanottaa viestejä avaruudesta. Täs- sä alaluvussa perehdytään yleisellä tasolla langattomaan tietoliikenteeseen ja digitaali- seen signaalinkäsittelyyn. Tyypillinen langattoman tietoliikenteen kulku on esitetty kuvas- sa 2.2. Langatonta tietoliikennettä voidaan kuvata kolmen eri osan avulla: lähetin, fyysi- nen kanava ja vastaanotin.

Hyvänä esimerkkinä langattomasta tietoliikenteestä, jossa analoginen osa on mukana, on puhelimeen puhuminen. Ensiksi lähetin (puhelin) vastaanottaa analogisen viestin, jo-

ka tässä esimerkissä on puhe. Tässä tapahtuu puheen havaitseminen puhelimen mikrofonissa. Lähettimessä puhe muutetaan digitaaliseksi A/D-muunnoksen avulla, missä havaittu analoginen signaali näytteistetään ja kvantisoidaan [13, alaluku 1.1]. Tämän jälkeen digitaaliselle datalle sovelletaan sopivaa virheenkorjausmenetelmää, jotta viestin lähetyksen aikana tapahtuvan kohinan, häiriöiden ja häipymisen vaikutusta voidaan vähentää [14, alaluku 1.1]. Ennen viestin siirtämistä lähettävälle antennille tehdään itse signaali, joka sisältää lähetettävän viestin. Tämä signaali saadaan aikaan modulaation avulla, jossa matalataajuksinen hyötyinformaatio (tässä esimerkissä puhe) yhdistetään korkeataajuksiseen kanta-aaltoon. Modulaatiosta kerrotaan lisää alaluvussa 3.4.



**Kuva 2.2.** Langattomaa tietoliikennettä hyödyntävä systeemi.

Antenni säteilee moduloidun signaalin ympäristöönsä väliaineen kautta, mitä kuvataan kuvassa 2.2 fyysisenä kanavana. Maassa sähkömagneettinen aalto kulkee ilmassa ja avaruudessa puolestaan tyhjiössä. Tämän aallon kulkiessa väliaineessa signaaliin syntyy kohinaa, häiriöitä ja muita haittoja esimerkiksi lähetettävien tai vastaanottavien laitteiden liikkeistä ja ympäristön muutoksista aiheutuen. Signaalin tehoon vaikuttaa etenemisvaimennus (engl. path loss) ja häipyminen (engl. shadowing). Etenemisvaimennus aiheutuu sekä lähettimen tehohäviöistä että etenemiskanavan ominaisuuksista. Häipyminen puolestaan aiheutuu siitä, että lähettimen ja vastaanottimen välillä on esteitä, jotka vaimentavat signaalin tehoa absorptioon, heijastumiseen, sironnan ja diffraktion vuoksi. [15, s. 27]

Viesti kulkee fyysisen kanavan kautta vastaanottimen antenniin (toiseen puhelimeen), minkä jälkeen alkaa päinvastainen tapahtumaketju kuin lähettimessä. Tämän ketjun lopputuloksena saadaan hyötysignaali eli puhe käyttöön vastaanottavassa laitteessa langattoman tietoliikenteen avulla.

Edellisessä esimerkissä puhelimet toimivat sekä lähettiminä että vastaanottiminä eli "lähetin-vastaanottiminä" (engl. transceiver). Lähetin-vastaanottimia voidaan rakentaa toimimaan digitaalisesti tai analogisesti. Nykyisin käytetään käytännössä vain digitaalisia lähetin-vastaanottimia, koska ne ovat halvempia, nopeampia ja energiatehokkaampia kuin analogiset lähetin-vastaanottimet. Digitaalisen signaalinkäsittelyn kehittymisen vuoksi di-

gitaalinen signaalin modulointi on saanut myös muita etuja analogiseen verrattuna. Korkeampi spektrinen tehokkuus (kuinka paljon informaatiota voidaan välittää tietyllä kaistanleveydellä), tehokkaat virheenkorjausalgoritmit, vastustuskyky radiokanavan häiriöille sekä parempi tietoturva esimerkiksi salausten vuoksi ovat kaikki esimerkkejä digitaalisten järjestelmien vahvuksista analogiseen verrattuna. Näiden esimerkkisyiden takia nykyään suunnitellut tai rakennetut järjestelmät ovat kaikki digitaalisia. [15, s. 126]

Langatonta tietoliikennettä toteutetaan monella eri alalla ja eri käyttötarkoituksiin, mikä asettaa langattomalle tietoliikenteelle erilaisia vaatimuksia datamäärien, virheiden, latenssien ja etäisyyksien suhteen. Myös käytetyt taajuuskaistat ovat erilaisia eri sovelluksille. [15, s. 5-7] Langaton tietoliikenne on kuitenkin toimintaperiaatteiltaan samanlainen sekä avaruudessa että Maassa: hyötyviesti etenee fyysisessä kanavassa sähkömagneettisena aaltona vastaanottimeen ilman lähettimen ja vastaanottimen yhdistävää kaapelia tai muuta johdinta. Ulkoavaruuden tietoliikenteen tapauksessa tämä sähkömagneettinen aalto on mikroaallo, josta kerrotaan tarkemmin seuraavassa alaluvussa 2.3.

### 2.3 Mikroaallot tiedonkantajana

Sähkömagneettinen spektri kuvaa sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituuksia. Sähkömagneettinen spektri sisältää esimerkiksi näkyvän valon, jonka aallonpituus vaihtelee noin 400–700 nm:n välillä violetista punaiseen. Yksi spektrin nimetyistä alueista on erityisen tärkeä ulkoavaruuden tietoliikenteelle: mikroaallot. Mikroaallot ovat valikoituneet kantoaalloiksi sen takia, että mikroaaltojen aallonpituuksilla kantoaallot kulkevat suhteellisen vaimentumattomasti Maan ilmakehän läpi avaruuteen. Mikroaalloilla saavutetaan myös sopivat kaistanleveydet datamäärävaatimusten vuoksi. [11, alaluku 11]

Sähkömagneettinen säteily kulkee avaruuden tyhjiössä valonnopeudella 299 792 458 m/s. Sähkömagneettisen säteilyn informaation kantokyky perustuu siihen, että sähkömagneettinen aalto värähtelee tietyllä taajuudella kulkiessaan väliaineessa kuten avaruuden tyhjiössä. Kun tämä oskilloiva säteily kohtaa sähköjohtimen, johtimeen syntyy muuttuva sähkövirta, joka voidaan huomata ja tarpeen vaatiessa sähköisesti vahvistaa. Informaatiota voidaan sisällyttää tähän säteilyyn siten, että näiden sähkömagneettisten aaltojen aalto-ominaisuuksia muokataan halutulla tavalla modulaation avulla. Modulaatioon perehdytään alaluvussa 3.4. [5]

Mikroaallot ovat sähkömagneettisen spektrin aallonpituusalue, joka sijoittuu noin metrin ja millimetrin väliin. Taulukossa 2.1 on esitetty osa IEEE:n standardin mukaisista nimetyistä taajuusalueista, joita käytetään silloin, kun puhutaan tutkataajuuksista [16]. Koska sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja taajuus ovat kääntäen verrannollisia, vastaa taulukossa 2.1 esitetty koko aallonpituusalue taajuusmuodossa 1 GHz – 300 GHz taajuuksia. Taulukkoon on lisätty pyöristetyt aallonpituudet havainnollistamaan taajuuskaistojen

välisiä eroja. Tässä työssä luvussa 3 tutkittavan ulkoavaruusverkko DSN:n yhteydessä käytetään taulukon 2.2 nimettyjä taajuusalueita [17, alaluku 2.3], jotka lähes noudattavat IEEE:n standardia (vrt. X-kaista taulukoissa 2.1 ja 2.2).

**Taulukko 2.1.** Osa IEEE:n nimetyistä taajuusalueista mikroaalloille välillä 1 - 300 GHz

Nimi	Taajuusalue (GHz)	Aallonpituus
L	1 - 2	30 - 15 cm
S	2 - 4	15 - 7,5 cm
C	4 - 8	7,5 - 3,8 cm
X	8 - 12	3,8 - 2,5 cm
K <sub>u</sub>	12 - 18	2,5 - 1,7 cm
K	18 - 27	1,7 - 1,1 cm
K <sub>a</sub>	27 - 40	11 - 7,5 mm
V	40 - 75	7,5 - 4 mm
W	75 - 110	4 - 2,7 mm
mm	110 - 300	2,7 - 1 mm

Avaruuteen kohdistuvalle tietoliikenteelle mikroaallojen neljä kaista-alueita ovat erityisen tärkeitä: S, X, K<sub>u</sub> ja K<sub>a</sub>. S- ja X-kaistoja käytetään molempia avaruusaluksen käskytykseen ja telemetriaan sekä yleisesti radiotieteessä. K<sub>u</sub>-kaistaa voidaan hyödyntää avaruusaluksen tutkimuslaitteissa. K<sub>a</sub>-aluetta käytetään niin radiotieteessä kuin uudempien avaruusoperaatioiden telemetriassa kuten James Webb -avaruusteleskoopin yhteydessä. [5, alaluku 1.2.2] ITU on asettanut tietyt alueet taajuuskaistojen sisällä käytettäväksi avaruuden tutkimukseen, mistä löytyy esimerkkejä suosituksessa ITU-R SA.364.

**Taulukko 2.2.** DSN:n käyttämät taajuusalueet avaruuden tutkimukseen.

Kaista	Taajuusalueet (MHz) — Lähiavaruus (< 2 000 000 km Maasta)		Taajuusalueet (MHz) — Ulkoavaruus (> 2 000 000 km Maasta)	
	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink
	S	2025 – 2110*	2200 – 2290	2110 – 2120
X	7190 – 7235	8450 – 8500	7145 – 7190	8400 – 8450
K	22550 – 23150	25500 – 27000	-	-
K <sub>a</sub>	-	-	34200 – 34700	31800 – 32300

Taulukossa uplink tarkoittaa Maasta avaruuteen -yhteyttä ja downlink puolestaan avaruudesta Maahan -yhteyttä.

\* S-kaistaa ei käytetä Madridin asemalla IMT-2000 käyttäjien vuoksi (3G-yhteydet).



## 3 TIETOLIIKENNE ULKOAVARUUTEEN

Tässä luvussa perehdytään kaksisuuntaiseen radioliikenteeseen ulkoavaruudessa sijaitsevan avaruusaluksen ja Maan välillä. Avaruusalus (engl. spacecraft) määritellään tässä työssä tarkoittavan ulkoavaruudessa toimivaa ihmisen rakentamaa miehittämätöntä tutkimusalusta, -laitetta tai -järjestelmää. Jäljempänä tässä työssä avaruusalukseseen viitataan myös vain nimellä alus tekstin luettavuuden parantamiseksi.

### 3.1 Käyttötarkoitukset

Tavanomaisesti ulkoavaruuden tietoliikennettä voidaan kuvata kolmen eri käyttötarkoituksen muodostamana kokonaisuutena: avaruusaluksen telemetria (engl. telemetry), ohjaus (engl. command) ja seuranta (engl. tracking) [5]. Telemetriaan ja ohjaukseen tutustutaan alaluvussa 3.1.1 ja seurantaan alaluvussa 3.1.2. Yksi tämän työn tutkimuskysymyksistä on selvittää, miten ulkoavaruudessa oleva alus paikannetaan tietoliikenteen mahdollistamiseksi, mihin seurantaan perehtyminen vastaa.

#### 3.1.1 Telemetria ja ohjaus

Ensimmäinen avaruusaluksen perustoiminnallisuuksista on telemetria. Telemetrialla tarkoitetaan sitä aluksen toimintakokonaisuutta, jonka avulla Maahan lähetetään aluksen keräämää tieteellistä dataa sekä tarkkaillaan aluksen kuntoa ja tilaa. [5, alaluku 1.2] Yksi tämän työn tutkimuskysymyksistä on vastata siihen, miten kaksisuuntainen tietoliikenne tapahtuu ulkoavaruuden aluksen ja Maan välillä. Telemetriassa isossa osassa on Maan vastaanottava pää eli DSN. Informaatiota kuljettavasta signaalista ja sen lähettämisestä ja vastaanottamisesta kerrotaan tulevissa kappaleissa. Tähän tutkimuskysymykseen perehdytään vielä käytännön esimerkin avulla luvussa 4.

Ohjaus on toinen avaruusaluksen perustoiminnoista. Ohjaus kuvaa avaruusaluksen toiminnan käskytystä sekä ohjelmistopäivitysten asennusta. [5, alaluku 1.2] Aluksissa voi olla useita tietokoneita, jotka toteuttavat Maasta tulevia käskyjä, kun käskyt saapuvat aluksen antenneihin. Näitä käskyjä voi olla ohjelmituna ennakkoon useita tuhansia, ja ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään: "suorita toiminto heti sen saatuaasi", "suorita toiminto ajanjakson X aikana" ja "tee ohjelmistopäivitys". [5, alaluku 1.2.24]

Ajastetuissa toiminnoissa alukselle lähetetään aikakoodattuja käskyjä, jotka alus tallentaa tietokoneen muistiin ja suorittaa ne aluksen sisäisen kellon avulla oikea-aikaisesti. Ohjelmistopäivitysten osalta alukselle lähetetään suuri määrä suoritettavaa koodia, joka tallennetaan niin ikään aluksen tietokoneen muistiin ja suoritetaan haluttuun aikaan. Joissain ulkoavaruusoperaatioissa alukset ovat olleet käytännössä uusia, kun ne ovat saapuneet avaruudessa aluksen suunnitellulle toiminta-alueelle kuten Voyager 2 Neptunuksen kohdalla. Päinvastaisena esimerkkinä Cassini-luotaimen tarvitsemaa toimintalogiikkaa ei oltu edes kirjoitettu silloin, kun alus lähetettiin monivuotiselle matkalleen kohti Saturnusta. Tarvittava toimintalogiikka lähetettiin Maasta luotaimelle sen matkan aikana, minkä vuoksi ohjelmistopäivitykset pystyttiin suorittamaan ennen luotaimen saapumista Saturnuksen kiertoradalle. [5, alaluku 1.2.24]

### 3.1.2 Seuranta

Viimeinen avaruusaluksen perustoiminnoista on seuranta. Seurannaksi kutsutaan aluksen liikeradan mittaamista. [5, alaluku 1.2] Avaruudessa aluksen navigointiin liittyy kaksi tärkeää tekijää: radanmääritys (engl. orbit determination) ja ohjaus (engl. guidance). Aluksen ohjausta toteutetaan radanmäärityksestä saatujen tulosten perusteella. [5, alaluku 2.3] Seuraavaksi perehdytään vain radanmääritykseen.

Alukselle laaditaan aina ennakkoon lentorata, jota pitkin aluksen tulisi kulkea määränpäähänsä. Lentoradassa huomioidaan se, että alus on aina jollain kiertoradalla (engl. orbit) tai kiertoradan osalla (engl. trajectory) jonkin objektin kuten Auringon suhteen. Esimerkiksi matkalla Marsiin alus on ennen lähtöään Maan pinnalla kiertoradalla Auringon suhteen. Lähdön jälkeen alus on ensiksi Maan, sen jälkeen Auringon ja päämäärässä Marsin gravitaation vaikutuksen alaisena, mitkä kaikki vaikuttavat aluksen rataliikkeisiin. [5, alaluku 2.3] Kaksiulotteisessa maailmassa lentoradan laatimisessa hyödynnetään Newtonin gravitaatio- ja Keplerin planeettalakeja, joiden avulla voidaan arvioida aluksen lentorataa [5, alaluku 2.3.1].

Navigointi avaruudessa on iteratiivinen prosessi. Aluksen lentorata alkaa noudattamalla suunnitellun lentoradan mallia, jota täydennetään ja korjataan jatkuvasti matkan varrella mitattaviin sijaintiin liittyvien "havaintoparametrien" avulla. Mikäli mallin ja havaintoparametrien välillä on eroja, voivat ne olla seurausta aluksen virheellisestä lentoradasta, havaintoparametrien poikkeamisista todelliseen aluksen sijaintiin nähden tai mallin virheellisyydestä. Virheitä seuraamalla voidaan tehdä ohjauspäätös aluksen liiketilan muutokselle. [5, alaluku 2.3.2]

DSN kykenee mittaamaan aluksen suoran etäisyyden Maahan mittaamalla viestinvälitykseen käytettyä aikaa Maasta alukseen tai toisinpäin. Aluksen säteisnopeus (engl. radial velocity) Maan suhteen voidaan mitata vastaanotetuista signaaleista Doppler-ilmiön avul-

la tai hyödyntämällä edellä mainittua havaintoparametrien muuttumista ajan suhteen. [5, alaluku 2.3.2]

Kolmiulotteisessa maailmassa tarvitaan kuitenkin tieto myös aluksen "korkeudesta" eli kaltevuuskulmasta Maan suhteen. DSN voi rajatulla tarkkuudella mitata aluksen kaltevuuskulman DSN:n asemien korkeustietojen avulla. Korkeusero Australian Canberran aseman (eteläisellä pallonpuoliskolla) ja Espanjan Madridin aseman (pohjoisella pallonpuoliskolla) välillä on yli 8300 km. Tällöin voidaan hyödyntää kolmiomittausta tai Dopplerialmiötä kaltevuuskulman määrittämiseen, mutta tarkempiakin keinoja kaltevuuden määrittämiseen on olemassa. Näitä keinoja ovat muun muassa optinen navigointi ja pitkäkantainterferometria (engl. very-long-baseline interferometry, VLBI). [5, alaluku 2.3.2]

Mikäli avaruusalukseseen on sijoitettu kamera, niin tätä kameraa voidaan hyödyntää taivaankappaleiden läheisyydessä optiseen navigointiin. Aluksen kamera komennetaan ottamaan kuva jostain taivaankappaleesta siten, että taustalla näkyy tähtiä. Näiden tähtien oletetaan olevan niin kaukana, että ne ovat "kiinteitä pisteitä", jolloin aluksen sijainti voidaan määrittää tarkemmin, kuin vain edellä esitetyn DSN:n kolmiomittauksen avulla. [5, alaluku 2.3.3] Optista navigointia hyödynnetään myös autonomisessa navigoinnissa [5, alaluku 2.3.4].

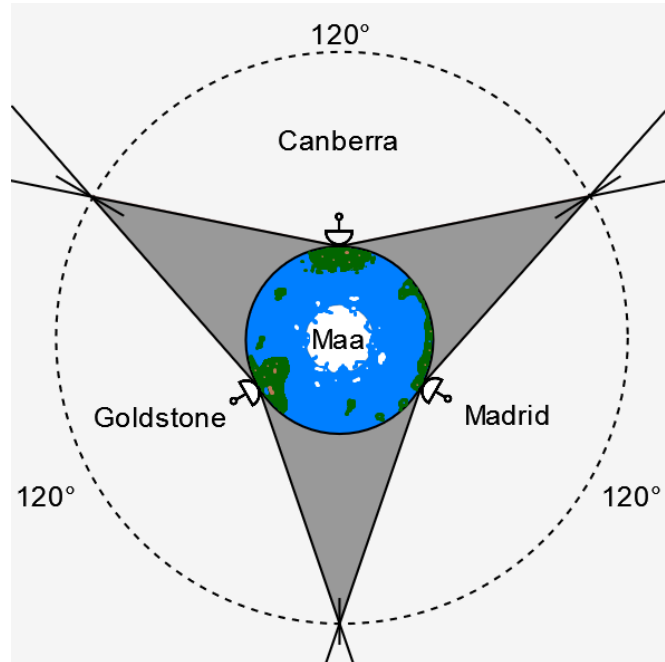
VLBI:ssä kaksi eri DSN:n asemaa vastaanottavat samasta aluksesta dataa yhtäaikaisesti ja niiden signaalien vaiheet yhdistetään oikeaoppisesti, jolloin signaalit vahvistavat toisiaan. VLBI:ssä DSN:n eri mantereilla olevat antennit siis esitetään yhtenä suurena vastaanottavana antennina kahden pienemmän sijasta. Huomioitavaa on se, että vastaanotettu teho ei kasva tällä tekniikalla, vaan ainoastaan signaalia vastaanottava pinta-ala. [5, alaluku 2.4.5]

VLBI:n käyttö vaatii molempien DSN:n asemien antennien suuntaamisen yhteen referenssipisteeseen, yleensä johonkin kvasaariin, jonka sijainti on tunnettu. Antennit vastaanottavat ja tallentavat tietyn ajanjakson kvasaarin kohinaa. Tämän jälkeen antennit suunnataan avaruusalukselta kohti, jolloin vastaanotetaan aluksen heikkoa signaalia, joka tallennetaan myös. Tämän jälkeen antennit suunnataan uudestaan kvasaria kohti ja taas kohinan tiedot tallennetaan. Tämän prosessin jälkeen alkaa datankäsittelyvaihe, jossa aluksen sijaintitieto saadaan selville. VLBI:llä päästään noin 5 nano-radiaanin tarkkuuteen kaltevuuskulmassa Maahan nähden, mutta tämän tarkkuuden hintana on resurssit, aika ja vaiva [5, alaluku 2.4.5]. VLBI:tä käytettiin luomaan ensimmäinen kuva mustasta aukosta vuonna 2019 [18].

## 3.2 Ulkoavaruusverkko DSN

Ulkoavaruusverkko (engl. Deep Space Network, DSN) on NASA:n kansainvälinen radioantenniverkko, joka tukee planeettojenvälisiä avaruusalusoperaatioita. Tämä verkko

koostuu kolmesta radioasemasta ympäri Maapallon: Goldstonen asema Yhdysvaltain Kaliforniassa, Espanjan asema Madridissa sekä Australian asema Canberrassa. Jokainen asema on suunnilleen 120 asteen kulmassa toisiinsa nähden, mikä mahdollistaa jatkuvan kommunikoinnin avaruudessa sijaitsevien avaruusalusten kanssa Maapallon pyöriessä. Tätä radioasemien asetelmaa on kuvattu kuvassa 3.1.



**Kuva 3.1.** DSN:n kolme asemaa sijaitsevat noin 120° kulmassa toisiinsa nähden. Tummanharmaa alue esittää katvealuetta, jonne antennit eivät pysty lähettämään signaaleja. Tietyn matkan jälkeen kaikkialle avaruuteen voidaan lähettää signaaleja.

Ulkoavaruusverkkoa hallinnoi Yhdysvaltain Kaliforniassa NASAn Jet Propulsion Laboratory (JPL), joka hallitsee useita NASAn planeettainvälisiä operaatioita [19]. Jokaisella radioasemalla on oma signaalinkäsittelykeskuksensa, jossa antennit ohjataan etänä, niiden vastaanottamaa dataa prosessoidaan sekä lähetetään komentoja avaruusaluksille [20]. Nämä ulkoavaruusverkon kolme radioasemaa ovat yhdistetty JPL:n operaatiokeskukseen NASAn NISN-verkon avulla (engl. NASA Integrated Services Network). Operaatiokeskuksessa jokaista avaruusoperaatiota hallitsee "reaaliajassa" operaatiolle nimetty ryhmä, joka jakaa muille saman operaation ryhmille DSN:n antennien sieppaamaa dataa hyödynnettäväksi. [5, alaluku 1.2.1]

Jokainen DSN:n radioasema sisältää useita antennia, joiden halkaisijat voivat olla 11 m, 26 m, 34 m tai 70 m. Koska DSN on ollut toiminnassa vuosikymmeniä (ensimmäinen DSN:n antenni aloitti toiminnan 1958 [21, luku 1]), on asemien antennejakin uusittu, rakennettu lisää tai poistettu DSN:n aktiivisesta käytöstä. Mikään 11 m tai 26 m antennista ei ole enää käytössä DSN:ssä vaan nykyään verkkoa operoidaan taulukon 3.1 antenneilta. Taulukon antennityypeistä kerrotaan lisää alaluvussa 3.2.1.

**Taulukko 3.1.** Tällä hetkellä DSN:n käytössä olevat antennit eri radioasemilla.

Asema	Nimi	Halkaisija	Tyyppi	Taajuuskaistat <sup>[3]</sup>	
				Lähetys	Vastaanotto
Madrid	DSS-63	70 m	CFH*	S, X	L, S, X, K <sub>u</sub>
	DSS-65	34 m	HEF <sup>[1]</sup>	S, X	S, X
	DSS-53	34 m	BWG <sup>[1]</sup>	X	X, K <sub>a</sub>
	DSS-54	34 m	BWG <sup>[1]</sup>	S, X, K	S, X, K, K <sub>a</sub>
	DSS-55	34 m	BWG <sup>[1]</sup>	X	X, K <sub>a</sub>
	DSS-56	34 m	BWG <sup>[1]</sup>	S, X, K	S, X, K, K <sub>a</sub>
Goldstone	DSS-14	70 m	CFH*	S, X	L, S, X, K <sub>u</sub>
	DSS-24	34 m	BWG <sup>[2]</sup>	S, X, K	S, X, K
	DSS-25	34 m	BWG <sup>[2]</sup>	X, K <sub>a</sub>	X, K <sub>a</sub>
	DSS-26	34 m	BWG <sup>[2]</sup>	S, X, K	S, X, K, K <sub>a</sub>
Canberra	DSS-43	70 m	CFH*	S, X	L, S, X
	DSS-34	34 m	BWG <sup>[2]</sup>	S, X, K	S, X, K, K <sub>a</sub>
	DSS-35	34 m	BWG <sup>[2]</sup>	X	X, K <sub>a</sub>
	DSS-36	34 m	BWG <sup>[2]</sup>	S, X, K	S, X, K, K <sub>a</sub>

\* Tyypimerkintä ei ole virallinen. Yleisesti 70-metrin antennista puhutaan niiden koon nimellä. HEF ja BWG ovat yleisesti käytettyjä lyhenteitä 34-metrin antennissa, ks. esim. lähteet [22] ja [23].

<sup>[1]</sup> Antennityypit lähteestä [24]

<sup>[2]</sup> Antennityypit lähteestä [23, luku 2]

<sup>[3]</sup> 34 metrin antennien kaistat ovat otettu lähteestä [23, taulukko 1] ja 70 metrin antennien kaistat lähteestä [22, luku 2].

DSN:n antennilla voidaan hyödyntää niin kutsuttua antenniryhmärakennetta (engl. arraying), joka tarkoittaa sitä, että useita eri DSN:n antennia hyödynnetään vastaanottamaan avaruusalueen lähettämiä signaaleja. Kaikki tähän prosessiin osallistuvat antennit suunnataan samaa avaruusalueesta kohti, jolloin alukselta vastaanotettava signaali voidaan siepata fyysisesti laajemmalla alueella kuin vain yhdellä antennilla olisi mahdollista. Tämä vastaa sitä, että Maassa vastaanottavan pään tehollista apertuuria kasvatetaan. Tämän tekniikan avulla vastaanotettavan signaalin vahvistusta saadaan vastaanottavassa päässä kasvatettua. [5, s. 17-18] Antennin vaikutuksesta vahvistukseen kerrotaan lisää alaluvussa 3.3.1. Hyödynnettäessä antenniryhmärakennetta ryhmitetään neljä BWG-tyyppistä antennia yhdeksi ryhmäksi. Lähetettäessä dataa avaruuteen näistä neljästä antennista yksi lähettää 80 kW teholla signaaleja. Puolestaan vastaanottaessa dataa nämä kaikki neljä antennia vastaanottavat signaaleja, ja vastaanotetut signaalit yhdistetään yhdeksi hyötysignaaliiksi. [25]

### 3.2.1 DSN:n antennityypit

Taulukossa 3.1 esiteltiin kaikki DSN:n käytössä olevat antennit. Tässä alaluvussa esitellään antennien tyypit. Jokainen DSN:n antenni on Cassegrain-tyyppinen antenni, josta puhutaan lisää alaluvussa 3.3.

Ensimmäinen taulukossa esitetty syöttötyyppi on 70 metrin antennien tyyppi CFH (engl. Cassegrain Feed Horn). Käytän CFH lyhennettä Cassegrain-tyyppisestä antennista, jossa syöttötorvi sijaitsee antennin pääheijastimen sisäpinnalla, kuten kuvassa 3.2 esitetään. Syöttötorvi sisältää signaalien lähettämiseen ja vastaanottamiseen tarvittavan elektronikan. 70 metrin antennin kehityksen aikana päädyttiin kolmihaaraiseen syöttötorveen, joka pystyy lähettämään S- ja X-taajuuksilla sekä vastaanottamaan L-, S- ja X-taajuuksilla [21, luku 5]. Nykyään antennit DSS-14 ja DSS-63 pystyvät vastaanottamaan signaaleja myös  $K_u$ -taajuuksilla (ks. taulukko 3.1) [26, alaluku 3.2].

Toinen taulukossa esitetty antennityyppi on HEF (engl. High-efficiency). High-efficiency on peräisin DSN:n historiasta, jolloin käytössä oli erikseen *high-* ja *low-efficiency*-verkot, minkä vuoksi HEF-merkintä on jäänyt käyttöön. HEF-antenni sisältää yhden ulkoisen syöttötorven, jolla voidaan lähettää ja vastaanottaa S- ja X-taajuuksilla viestejä. HEF-antenni pystyy suurinpiirtein samantasoiseen suorituskykyyn kuin uudempi BWG-tyyppinen antenni [27, luvut 1 ja 2].

Kolmas taulukon antennityyppi on BWG (engl. Beam Waveguide) eli aaltokeilajohto. BWG-tyyppisessä antennissa syöttötorvea ei ole, vaan sen tilalla on aukko signaalien kulkemiseksi. Toimintaperiaate on samanlainen kuin syöttötorvellisessä antennissa, mutta lähetettävän säteilyn rakentaminen ja vastaanotettavan säteilyn tulkitseminen tapahtuu maan alla ohjauskeskuksessa pääheijastimessa olevan syöttötorven sijasta. Lähetettävä säteily rakennetaan BWG-tyyppisessä antennissa maan alta ohjauskeskuksessa, minkä jälkeen säteily ohjataan peilien ja linssien avulla pääheijastimen aukon kautta sivuheijastimelle. Vastaanotettaessa signaaleja säteily ohjautuu vastakkaiseen suuntaan aukon läpi, jonka jälkeen peilit ohjaavat signaalit vastaanottimelle maan alla. [21, alaluvut 1.4-1.4.1] Tällainen laitteiden sijoittaminen maan alle tarjoaa useita hyötyjä ulkoiseen syöttötorveen verrattuna esimerkiksi lähettimien ja vahvistimien suunnittelussa [21, alaluku 1.4].

### 3.2.2 Kehityssuunta

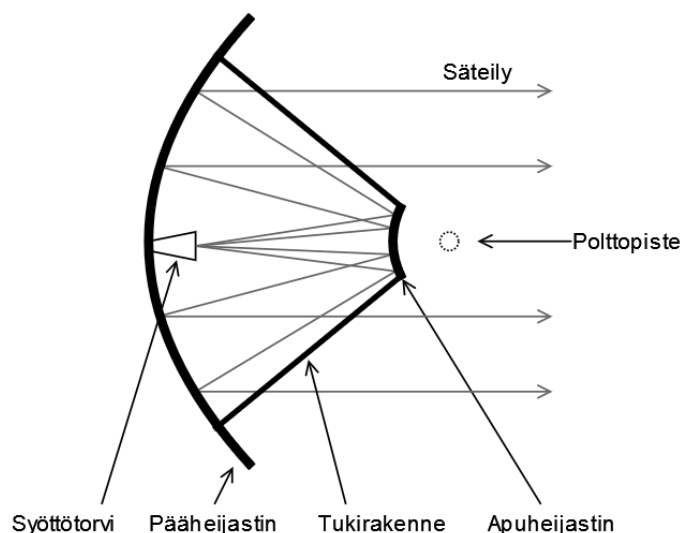
NASAn vanhojen lähteiden mukaan, kuten [28] vuodelta 2017 ja [25] vuodelta 2012, DSN:n 70 metriset antennit aiottiin korvata uusilla 34 metrin BWG-antenneilla vuoteen 2025 mennessä. Näitä uusia 34 metrin antenneja käytettäisiin antenniryhmänä (engl. arraying), mitä hyödyntämällä neljä 34 metrin antennia tarjoaisivat yhdessä suurinpiirtein samantasoisien vastaanottosuorituskyvyn kuin yksi 70 metrin antenni [5, s. 18]. Kuiten-

kin uudempien NASAn lähteiden mukaan 70 metrin antenneihin tullaan tekemään päivityksiä, ja esimerkiksi DSS-43 päivitykset ovat jo valmistuneet. Samalla 34 metrin BWG-antenneja rakennetaan ja tullaan rakentamaan myös tulevaisuudessa. [29]. Liitteen A kuvassa A.1 on esitetty kuva 70 metrin antennista.

DSN:ään on suunniteltu rakennettavan uusia 34 metrin BWG-antenneja. Goldstonen asemalle alettiin rakentamaan vuonna 2021 uutta 34 metrin BWG-antennia DSS-23, jonka arvioitu valmistumisajankohta on 2024. Tämä antenni pystyy kommunikoimaan sekä mikroaalloilla että uudemmalla optisella tekniikalla, joka hyödyntää lasereita telekommunikaatiossa. [30, DSS-23] Tämä uusi optinen tekniikka pystyy kykenee suurempiin datansiirtomääriin kuin mikrotaajuudet: esimerkiksi Marsiin lähtevän datan määrä optisella tekniikalla pystyisi noin 100 kertaa parempaan siirtokykyyn kuin mikrotaajuudet pystyvät. Vuosina 2023-2025 NASAn on tarkoitus testata tätä uudempaa optista tekniikkaa Psyche-operaatiossa sekä miehittyillä operaatioilla. Myös Canberran asemalle aiotaan rakennetaan uusi BWG-antenni DSS-33, jonka arvioitu valmistumisajankohta on vuonna 2026. [24]

### 3.3 Antennit

Antenni on langattoman radiotietoliikenteen perusosa, joka mahdollistaa signaalien lähettämisen ja vastaanottamisen. Antennityyppejä on erilaisia, mutta ulkoavaruuden tietoliikennesovelluksissa, joissa Maan ja aluksen välinen etäisyys voi kasvaa suureksi, käytetään paljon yhtä antennityyppiä: Cassegrainin antennia. Ulkoavaruusoperaatioissa Maassa kommunikoidaan ulkoavaruudessa olevan aluksen kanssa vain DSN:n avulla, mikä hyödyntää Cassegrain-tyyppisiä antenneja eli paraboloidisia antenneja. Kuva 3.2 esittää syöttötorvellisen Cassegrainin antennin rakenteen [31, alaluku 1.3.3.2][21, alaluku 2.2].



**Kuva 3.2.** Syöttötorvellisen Cassegrainin antennin rakenne

Cassegrainin antenni muodostuu kahdesta paraboloidisesta heijastimesta, jotka ovat pää- ja sivuheijastin. Sivuheijastin on kiinnitetty pääheijastimeen tukiputkien avulla. DSN:n antennien pääheijastimet ovat kiinni maanpinnalla koko antenna liikuttavassa tukirakenteessa, jota ei ole esitetty kuvassa 3.2. Tukirakenne voidaan nähdä liitteen A kuvassa A.1.

Cassegrain-tyyppisessä antennissa avaruuteen kohdistettava säteily ammutaan ensin sivuheijastimeen, joka hajauttaa säteilyn mahdollisimman tasaisesti pääheijastimelle. Pääheijastin kokoaa säteet yhdensuuntaisiksi ja heijastaa säteilyn avaruuteen kohti avaruusalusta. Vastaanottaessa säteilyä pääheijastin puolestaan kokoaa avaruudesta tulevan säteilyn polttopistettä kohden. Polttopisteen edessä oleva sivuheijastin kokoaa pääheijastimelta tulevat säteet yhteen pisteeseen kohti pääheijastimen pintaa. [21, alaluku 2.2] Kuvan 3.2 antenniin on piirretty syöttötorvi, jota käsiteltiin alaluvussa 3.2.1.

Avaruusaluksen antennityyppien valintaan sekä niille asetettuihin vaatimuksiin vaikuttaa useita tekijöitä ulkoavaruusoperaatiosta ja aluksen käyttötarkoituksesta riippuen. Avaruusaluksen ja sen antenneihin kohdistuu vaatimuksia jo operaation alkuvaiheilla, kun avaruusaluksen sisältämä kantoraketti laukaistaan Maasta: avaruusaluksen kohdistuu suurta mekaanista värähtelyä, akustista kohinaa ja kiihtyvyyksiä. Alus voi kokea näitä voimia myöhemmin uudestaan, jos aluksen tavoitteena on laskeutua jollekin taivaan-kappaleen pinnalle kuten planeetalle. Aluksen pinnalle laskeutuessa pitää huomoida laskeutumisessa syntyvä lämpötila. Pinnalla toimiessaan antennien pitää kyetä toimimaan paikallisessa ympäristössä, johon vaikuttavat paikallisen kaasukehän paine, itse kaasut, lämpötilavaihtelu ja mahdollinen pöly. Yleisesti antennit voivat kokea aluksen päämäärästä riippuen joko äärimmäisen kylmiä tai kuumia lämpötiloja ja niiden tulee kyetä toimimaan ympäristöissä, joissa säteily määrä on suuri. [31, alaluku 17.1]

Erilaiset räjähdyksistä aiheutuvat iskuvoimat voivat vaikuttaa avautuvien komponenttien, kuten aurinkopaneelien, toimintaan. Alus voi kokea näitä voimia esimerkiksi silloin, kun aurinkopaneelit asetetaan käyttöasentoon tai kantoraketista irroitetaan eri osia avaruusalennon aikana. [32] Nämä kaikki tekijät pitää huomioida niin aluksen kuin sen sisältämien antennien suunnittelussa.

### 3.3.1 Antennin luontainen vahvistus

Vahvistuksen (engl. gain) avulla antennien lähettimet ja vastaanottimet saadaan vaikuttamaan tehokkaammilta, kuin ne oikeasti ovat [5, s. 13]. Vahvistusta kuvataan desibeleissä, joka kuvaa mitatun tehon suhdetta vertailutehoon nähden. Desibeli on logaritminen asteikko:

$$n \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{mitattu teho}}{\text{vertailuteho}} \right) = 10^{n/10}, \quad (3.1)$$



jossa  $n$  on desibelimäärä. Esimerkiksi 10 dB tarkoittaa sitä, että mitattu teho on 10-kertainen vertailutehon suhteen, ja 20 dB tarkoittaa puolestaan sitä, että mitattu teho on 100-kertainen vertailutehoon nähden.

Ulkoavaruuden antennien yhteydessä yksikkönä voidaan käyttää desibelin sijasta mitattun tehon suhdetta yhteen milliwattiin, mitä merkitään tunnuksella dBm. Tätä notaatiota on käytetty virallisissa teknillisten spesifikaatioiden yhteydessä esimerkiksi lähteessä [23]. Samassa lähteessä esitetään joitain antennin parametreja negatiivisilla dBm-luvuilla, mikä tarkoittaa sitä, että mitattu teho on pienempi kuin 1 mW. Esimerkiksi jos signaalin mitattu teho on -30 dBm, niin signaalin teho on 0,001-kertainen milliwatin suhteen eli yksi tuhannesosa milliwatista. Esimerkiksi osa DSN:n BWG-antenneista voi vastaanottaa K-taajuuksilla "normaalitoimintatilassa" -85 dBm signaaleja [23, taulukko 7], mikä karkeasti pyöristettynä tarkoittaa milliwatin miljardisosaa.

Teknillisissä spesifikaatioissa hyödynnetään usein antennien vertailukohteena ideaalista *isotrooppista* antennia, joka säteilee ympärilleen tasaisesti kaikkiin suuntiin. Tällaisen antennin vahvistusta kuvataan yksiköllä dBi, joka tarkoittaa desibelisuhdetta isotrooppisen antennin säteilyyn. [5, s. 13]

EIRP (engl. Effective/Equivalent Isotropic Radiated Power) kuvaa signaaleja lähettävän isotrooppisen antennin vahvistuksen ja lähettimen antenniin syöttämän tehon välistä tuloa. Tämän avulla voidaan laskea antennien absoluuttinen teho, jonka avulla eri antenneja voidaan verrata keskenään. [31, alaluku 1.2.7] EIRP-luvun laskemiseen voidaan hyödyntää suoraan antennin dBi-lukua [12, alaluku 1.3.3.2].

Antennin vahvistus on suoraan verrannollinen antennin hyötypinta-alaan (engl. effective aperture) ja kääntäen verrannollinen aallonpituuden neliöön:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \text{ [dB]}, \quad (3.2)$$

jossa  $A_e$  kuvaa antennin hyötypinta-alaa ja  $\lambda$  säteilyn aallonpituutta. Käytännössä hyötypinta-alaan on sisällytetty kertoimena esimerkiksi antennin epämuodostumat, heijastusilmiot ja sivuheijastimen tukiputkien estämän säteilyn määrä. [5, alaluku 1.2.3]

Maassa antennin vahvistukseen vaikuttaa myös muita ulkoisia tekijöitä, kuten tuuli ja antennin asento. Tuuli aiheuttaa DSN:n suurissa antenneissa pieniä muodonmuutoksia sekä suuntausvirhettä, minkä vuoksi esimerkiksi 34:n metrin antenneissa X-, K- ja  $K_a$ -taajuuksilla on huomattavissa vastaanotettavan signaalin vahvistuksen laskua sitä enemmän, mitä nopeampi tuulen nopeus on. S-taajuuksilla huomattavaa vaikutusta ei ole, kun taas  $K_a$ -taajuuksilla vahvistuksen lasku on voimakkainta. Esimerkiksi  $K_a$ -taajuuksilla havaittu vahvistuksen lasku on noin 0,03 dB 10 km/h tuulen nopeudella ja 0,80 dB 50 km/h tuulen nopeudella. [23, taulukko 10] Antennin asennon vaihtuessa sen heijastuspinnoille syntyy muodonmuutoksia, jotka vähentävät vahvistusta [23, alaluku 2.1.1.2]. Yleensä

noin 50° kulmilla antennit vastaanottavat parhaiten signaaleja [23, kuvat 13-29].

### 3.3.2 Tehohäviöt

Alaluvussa 2.2 esitettiin, että langaton viesti, eli signaali, koostuu väliaineessa liikkuvasta kantoaallostasta, johon on sisällytetty hyötyviesti. Signaalin tehohäviö voi olla merkittävä, kun puhutaan esimerkiksi planeettainvälisistä matkoista. Vaikka antenni olisikin edellä esitetty Cassegrain-tyyppinen suunnattu antenni, niin antennin lähettämä signaali laajenee kartionmuotoisesti edetessään avaruudessa. Tämä tarkoittaa sitä, että suurilla etäisyyksillä vastaanottava pää (Maa tai avaruusalus) vastaanottaa vain pienen osan etenevästä aaltorintamasta. Tätä häviötä kutsutaan vapaan tilan vaimennukseksi:

$$L_s = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2, \quad (3.3)$$

jossa  $4\pi r$  kuvaa etenevän aaltorintaman vastaanotettua aluetta Maan ja aluksen etäisyydellä  $r$  ja  $\lambda$  signaalin aallonpituutta. Aallonpituus ei itsessään vaikuta häviöihin avaruudessa, mutta vastaanottavan antennin häviöt puolestaan riippuvat signaalin aallonpituudesta yhtälön (3.2) mukaisesti. [5, alaluku 1.2.4]

Maahan saapuvaa signaalia voidaan kuvata niin kutsutulla linkkibudjetilla (engl. link budget), joka huomioi Maan ja avaruusaluksen välillä tapahtuvat signaalin häviöt ja vahvistukset. Logaritmisena linkkibudjetti on muotoa [5, alaluku 1.2.4]:

$$P_R = P_T - L_T + G_T - L_{TP} - L_S - L_A - L_P - L_{RP} + G_R - L_R, \quad (3.4)$$

jossa (kaikkien termien yksiköt voidaan esittää dB:nä tai dBm:nä)

$P_R$  on Maassa havaittu aluksen lähettämän signaalin teho milliwatteina,

$P_T$  on aluksen lähettimen teho, yleensä useita kymmeniä watteja,

$L_T$  kuvaa summana lähettimen häviöt esimerkiksi kaapeleissa ja/tai aaltojohtimessa, yleensä noin 1 dB luokkaa,

$G_T$  on lähettimen antennin vahvistus (ks. yhtälö (3.2)),

$L_{TP}$  on lähettimen suuntaushäviö. Suuntaushäviön suuruus riippuu siitä, kuinka vinossa antennia suunnataan Maata kohti. Häviö on nolla, kun antenni osoittaa suoraan Maahan, ja kasvaa äärettömyyttä kohti sen mukaan, kuinka vinossa antenni on Maahan nähden,

$L_S$  on avaruuden etäisyyksien aiheuttama häviö (ks. yhtälö 3.3),

$L_A$  on ilmakehän häviö. Tämä termi voi sisältää avaruusaluksen ympäröimän ilmakehän häviön. Esimerkiksi jos Maasta lähetetään signaaleja Marsin pinnalla olevaan

alukseen, niin tämä termi sisältää sekä Maan että Marsin ilmakehien häviöt. Selkeällä kelillä Maan ilmakehä aiheuttaa noin 1 dB häviöt,

$L_P$  on polarisaatiohäviö, joka aiheutuu jos lähettävän ja vastaanottavan antennin polarisaatioissa (sähkömagneettisen säteilyn värähtelysuunnassa) on eroa. Tyypillisesti lähellä nollaa, mutta polarisaatiovirheen sattuessa häviö voi olla useita kymmeniä desibelejä,

$L_{RP}$  on vastaanottavan antennin suuntaushäviö. Vastaanottimessa pitää huomioida esimerkiksi ilmakehän aiheuttama diffraktio sekä tuulen vaikutus antenneihin. Tyypillisesti vaihtelee lähellä nollaa,

$G_R$  on vastaanottavan DSN:n antennin vahvistus (ks. yhtälö (3.2)). Tyypillisesti noin 70 dB luokkaa antennista ja taajuudesta riippuen eli noin 10 000 000-kertainen vahvistus,

$L_R$  kuvaa summana vastaanottimen häviöt esimerkiksi kaapeleissa ja antennijohtimissa. Tyypillisesti 1 dB luokkaa.

Näistä linkkibudjetin termeistä vastaanotetun signaalin tehoon  $P_R$  voidaan vaikuttaa avaruusaluksen suunnittelun ja valmistuksen aikana termeillä  $P_T$  ja  $G_T$ . Lisäksi missä vaiheessa tahansa aluksen elinkaarta voidaan vastaanotettuun tehoon vaikuttaa vastaanottavan DSN:n antennin termin  $G_R$  avulla. Käytännössä termiä  $P_T$  kasvatetaan tehokkaamalla lähettimellä, joka voi vaikuttaa aluksen sähkönkulutukseen ja massaan ja siten koko aluksen suunnitteluun. Termin  $G_T$  kasvattaminen tarkoittaa aluksen antennin koon kasvattamista, mikä voi vaikuttaa aluksen massaan. Myös kantoaluksen koko voi rajoittaa alukseen sijoitettavan antennin kokoa, mutta tähän voidaan vaikuttaa levitettävällä antennilla, joka asettaa omat haasteensa. DSN:n antennin termiä  $G_R$  voidaan kasvattaa esimerkiksi antennin pintaa muokkaamalla tarkemmaksi ja tehokkaammaksi (engl. efficient) tai kasvattamalla antennin hyötypinta-alaa, mikä tehtiin esimerkiksi silloin, kun 64-metriset antennit laajennettiin 70-metrisiksi. Hyötypinta-alaa voidaan kasvattaa myös edellä esitetyn antenniryhmä-tekniikan avulla. [5, alaluku 1.2.4]

### 3.3.3 Kohina

Antenni ei vastaanota vain avaruusaluksen tai DSN:n lähettämää hyötysignaalia. Signaalia vastaanottavaan antenniin saapuu myös muita ympäristön signaaleja, jotka peittävät hyötysignaalia. Näitä hyötysignaalin ulkoisia signaaleja kutsutaan kohinaksi. "Signaali-kohinasuhde" (engl. signal-to-noise ratio, SNR) tarkoittaa hyötysignaalin tehon suhdetta ympäristön kohinan tehoon [5, alaluku 1.2.6]. Avaruudessa mikroaaltojen taajuuksilla ei ole paljoa kohinaa lukuun ottamatta alkuräjähdyksestä aiheutuvaa kosmista taustasäteilyä.

Mikroaaltotaajuuksien kohinaa kuvataan tyypillisesti Kelvin-asteikolla. 0 K tarkoittaa ab-

soluuttista nollapistettä, jossa mikään kohinaa aiheuttava partikkeli ei liiku, eli kohinaa ei ole. Käytännössä mikään objekti ei ole tässä tilassa, vaan kaikilla objekteilla on jokin lämpötila, mikä tarkoittaa sitä, että nämä objektit säteilevät elektromagneettisella spektrillä kohinaa ympärilleen. Mitä lämpimämpi objekti on, sitä korkeammilla taajuuksilla kappale säteilee. "Kohinalämpötila" (engl. noise temperature) on esimerkiksi kosmisella taustasäteilyllä noin 2,7 K, Maan pinnalla noin 300 K ja Auringon pinnalla noin 5800 K. [5, alaluku 1.2.6] Kohinalämpötila on siis kohinaa, jota kuvataan Kelvin-asteikolla.

DSN:n antennit voivat mitata kohinalämpötilaa, jota voidaan käyttää laskemaan kohinatehon spektritiheys eli kohinan määrä yhden hertsin näytteellä:

$$N_0 = kT, \text{ [W/Hz]} \quad (3.5)$$

jossa  $k$  on Boltzmannin vakio ja  $T$  DSN:n mittaama kohinalämpötila Kelvineissä. Koko taajuuskaistan kohinateho saadaan olettamalla kohinan olevan tasaista koko taajuuskaistalla:

$$N = BN_0, \text{ [dBm]} \quad (3.6)$$

jossa  $B$  on taajuuskaistan leveys hertseissä. Huomattavaa on, että mitä enemmän taajuuskaistaa kasvatetaan, sitä enemmän vastaanotin altistuu kohinalle. Puolestaan mitä kapeampi taajuuskaista on, sitä vähemmän kohinaa vastaanotetaan, jolloin signaali-kohinasuhde saadaan hyväksi. [5, alaluku 1.2.6] Kapeampi taajuuskaista synnyttää kuitenkin haasteita, joita käsitellään alaluvussa 3.3.4.

Vaikka vastaanotettava signaali olisikin heikko, hyötysignaalin suhteellinen teho kohinaan nähden on kuitenkin suuri. Lähteen [5, alaluku 1.2.6] esimerkki Saturnusta tutkineesta Cassini-luotaimesta antaa hyvän kuvan hyötysignaalin ja kohinan suhteesta. Kun vastaanottimen havaitsema Cassini-luotaimen lähettämä signaalin teho  $P_T$  jaettiin yllä esitetyllä ympäristön kohinan tehon spektritiheydellä, niin suhdeluvuksi saatiin noin 53,5 dB/Hz, mikä vastaa yli 220 000-kertaista tehoa hyötysignaalin hyväksi kohinaan nähden.

Vaikka edellä esitetty 220 000-kertainen suhde hyötysignaalin hyväksi on huomattava, niin vastaanotettu signaali on kuitenkin äärimmäisen heikko, minkä vuoksi signaalia pitää vahvistaa vahvistimen avulla. Vahvistin ottaa syötteenä heikon signaalin, kopioi syötteen vaiheen sekä korostaa amplitudimuutoksia, minkä jälkeen vahvistin lähettää vahvistetun signaalin eteenpäin. Vahvistimen elektroniset komponentit lämpenevät tämän prosessin seurauksena, mikä aiheuttaa kohinan lisääntymisen generoidussa signaalissa. [5, alaluku 1.2.7]

### 3.3.4 Signaalin vahvistaminen

Antennin "luontaisesta" vahvistuksesta kerrottiin alaluvussa 3.3.1, eli miten itse antenni vaikuttaa vahvistukseen ilman erillisiä laitteita. Tässä alaluvussa tarkastellaan sitä, miten antennin keräämää heikkoa signaalia vahvistetaan erilaisilla laitteilla.

Kun DSN:n antenni on kerännyt signaalin ja heijastanut sen kohti antennin vastaanottoelektroniikkaa, signaali etenee "pienikohinaiseen vahvistimeen" (engl. Low-Noise Amplifier, LNA). LNA jäädytetään alle 7 K lämpötilaan nestemäisen heliumin avulla, mikä vähentää elektroniikan aiheuttamaa kohinaa. LNA:n nykyisiä tyyppejä ovat HEMT ja Maser. HEMT tulee englannin sanoista "high-electron mobility transistor", ja sitä voidaan vaihtoehtoisesti kutsua myös nimellä HFET, joka tulee sanoista "heterostructure field-effect transistor". Maser puolestaan tulee englannin sanoista "microwave amplification by simulated emission of radiation". Näistä kahdesta tyypistä Maser aiheuttaa vähemmän kohinaa vahvistaessaan signaalia ja sen avulla DSN:n antenni voi saavuttaa yli 50 dB vahvistuksen. [5, alaluvut 1.2.7-1.2.9]

LNA:n vaatimuksena on kyky toimia usealla taajuuskaistalla. Tämä vaatimus aiheutuu siitä, että ulkoavaruudessa olevia aluksia on paljon ja niistä jokainen toimii omalla taajuusalueella ja vastaanotettavan signaalin taajuus on voinut muuttua lähettimen ja vastaanottimen välillä Doppler-ilmiön vuoksi. Näiden syiden vuoksi LNA:n taajuuskaista on noin 100 MHz luokkaa ja DSN:n antenneissa on useita eri LNA-optioita eri mikroaaltotaajuuksille (eri LNA esimerkiksi S- ja X-kaistoille). Tässä taajuuskaistan valintaprosessissa auttaa LNA:n jälkeinen komponentti *radiovastaanotin*, josta kerrotaan alaluvussa 3.3.5. [5, alaluku 1.2.10]

LNA syöttää vahvistetun signaalin optiseen modulaattoriin, joka koodaa signaalin valolla esitetyksi optiseksi signaaliksi valokaapeliin, joka on yhteydessä DSN:n aseman signaalinkäsittelykeskukseen. Modulaattori muuntaa valokaapeliin syötettävän valon intensiteettiä ajan suhteen vastaamaan LNA:n signaalia: aallonhuippujen kohdilla lähtevän valon intensiteetti on suurin ja aallonpohjilla pienin. [5, alaluku 1.2.11]

### 3.3.5 Vastaanottimet

Valokaapelin toisessa päässä signaalinkäsittelykeskuksessa valon vastaanottaa vastaanotin. Vastaanottimia on kahta eri tyyppiä: suljettu ja avoin vastaanotin.

Suljetusta tyypistä tyypillisin käytettävä vastaanotin DSN:n yhteydessä on BVR (engl. Block-V Receiver). BVR toimii siten, että se valitsee vastaanotettavasta signaalista halutun taajuuskaistan (tavallisesti noin 10 Hz luokkaa), lukitsee tämän taajuuskaistan ja erottaa sen muusta signaalista. Tässä hyödynnetään FFT-algoritmia (engl. Fast-Fourier-Transform). Taajuuslukituksen jälkeen taajuuskaistaa pienennetään entisestään muuta-

maan hertsiiin. Lukitus tapahtuu BVR:n vaihelukitun silmukan avulla (engl. PLL, phase-locked-loop). Tämä piiri generoi eräänlaisen virhesignaalin, kun vastaanotettu signaali avaruudesta muuttaa vaihettaan tai taajuuttaan. Virhesignaali on negatiivisesti takaisin-kytketty taajuuden systeemiin, jolloin taajuus seuraa automaattisesti avaruudesta tulevaa muuttuvaa signaalia. Muita BVR:n toimintoja ovat signaalin demodulointi, eli hyötyinformaation erottaminen kantaaallostaa, avaruusaluksen nopeuden laskeminen Doppler-ilmiön avulla ja avaruuteen lähetettävän signaalin modulointi. Lisäksi BVR lähettää tilatietoja signaalinkäsittelykeskuksesen koko ajan. [5, alaluvut 1.2.12-1.2.13]

Avoimen silmukan vastaanotin, jota kutsutaan myös täyden spektrin vastaanottimeksi, vastaanottaa signaalia ja kohinaa laajalta taajuuskaistalta ja näytteistää sen suurella näytteistystaajuudella. Erona suljetun silmukan vastaanottimeen on se, että avoin ei keskity vain yhteen pieneen taajuuskaistaan, vaan avoin vastaanotin tutkii koko vastaanotetun signaalin taajuuksia, amplitudeja ja vaiheita koko spektrin leveydeltä. [5, alaluku 1.2.14]

### 3.4 Modulaatio

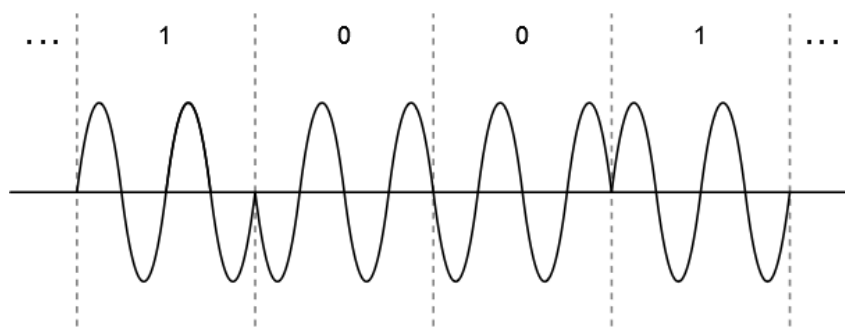
Alaluvun 2.2 langattoman tietoliikenteen esimerkissä mainittiin modulaatio. Modulaatiolla tarkoitetaan matalataajuuksisen hyötyinformaation liittämistä korkeampitaajuuksiseen kantaaaltoon. Signaali voidaan esittää muodossa

$$U(t) = A_C \cos(\omega_C t + \phi_C), \quad (3.7)$$

jossa  $A_C$  tarkoittaa signaalin amplitudia,  $\omega_C$  taajuutta ja  $\phi_C$  vaihetta. [12, alaluku 1.3.2.4]

Modulaatiotekniikat jaetaan hyötysignaalin tyypin mukaan analogiseen tai digitaaliseen modulaatioon. Analogisia modulaatiotapoja ovat amplitudin (engl. amplitude modulation, AM), taajuuden (engl. frequency modulation, FM) ja vaiheen modulaatiot (engl. phase modulation, PM). Digitaaliset vastineet näille ovat englanniksi ASK (amplitude shift keying), FSK (frequency shift keying) ja PSK (phase shift keying). Digitaalisia modulaatiotapoja on muitakin. [33, alaluvut 1.1–1.3] Mikroaaltojen tapauksessa vaiheen muuttaminen on yleisin modulaatiokäytäntö informaation sisällyttämiseksi kantaaaltoon [5, s. 12]. Tässä työssä esitellään tarkemmin digitaalinen vaihemodulaatiotapa PSK, koska monet ulkoavaruuden alukset käyttävät sitä [5, alaluku 1.2.15]. PSK:ta käytetään sen kohinan vastustuskyvyn sekä paremman bitti-energia-suhteen vuoksi [12, alaluku 1.3.2.4].

PSK:n yksi toteutustavoista on BPSK (engl. Binary Phase Shift Keying), eli suomeksi binäärinen avainvaiennus. Pohjimmiltaan BPSK:ssa signaalin vaihetta siirretään joko  $0^\circ$  tai  $180^\circ$  riippuen siitä, halutaanko signaalissa esittää bitti 0 vai 1 [5, alaluku 1.2.15][12, alaluku 1.3.2.4]. Signaali säilyttää tämän vaiheen siirretyn tilan (tai ei-siirretyn tilan) tietyn ajanjakson ajan, minkä jälkeen signaalin vaihetta mahdollisesti muutetaan uudelleen. Tämän aikaan sidotun vaihesiirron avulla voidaan sisällyttää bittejä signaaliin, joka kantaa



**Kuva 3.3.** Havainnekuva BPSK:n vaiheenmuunnoksesta.

mukanaan hyötyinformaatiota. Kuva 3.3 esittää BPSK:n periaatteen.

Niin kutsuttu modulaatioindeksi kuvaa sitä, kuinka paljon signaalin vaihe muuttuu ei-moduloidun signaalin vaiheeseen nähden asteissa mitattuna. BPSK:ssa modulaatioindeksi on yllä esitetty  $180^\circ$  mutta modulaatioindeksiä voitaisiin teoriassa pienentää äärimmäisen pieneksi, jolloin pienikin vaihesiirto tarkoittaisi jotain omaa ennaltasovittua merkkiä. Käytännössä kuitenkin kohinaa on aina läsnä signaalia vastaanottaessa, mikä rajoittaa modulaatioindeksin pienentämistä äärettömästi. [5, alaluku 1.2.15] DSN:ssä voidaan nykyään käyttää BPSK:n lisäksi QPSK:ta (engl. quadrature-phase-shift keying) [34], jossa käytetään neljää eri vaiheen arvoa symbolien merkitsemiseksi.

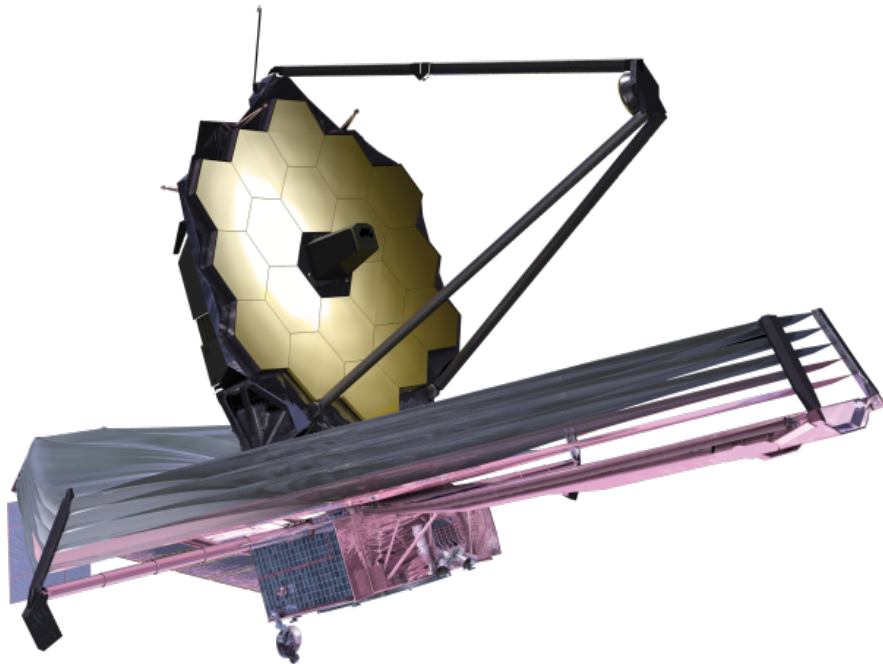
### 3.5 Virheenkorjaus

Yhdellä kohinaisella informaatiokanavalla voidaan lähettää virheetöntä dataa aikayksikköä kohden vain tietty määrä. Informaation lähetysmäärää rajoittaa niin kutsuttu Shannonin raja, joka on saanut nimensä amerikkalaisen insinöörin ja matemaatikon Claude Shannonin mukaan. Shannonin raja esittää rajaa, jolloin tietty informaatiokanava, ulkoavaruuden tapauksessa jokin mikroaaltotaajuus, ikään kuin täyttyy hyötyinformaatiosta. Jos tämä raja ylitetään, niin kohinan seasta ei voida enää havaita hyötyinformaatiota. Shannonin rajaa lähestyttäessä tarvitaan varmuutta viestien lähettämiseen, jolloin tarvitaan erilaisia virheenilmais- ja -korjauskoodia signaaleihin. [5, alaluku 1.2.17]

Tyypillinen ulkoavaruuden sovellusten virheenkorjausmenetelmä on FEC (engl. Forward error-correction) eli suomeksi toistokorjaus. Tässä virheenkorjausmenetelmässä lähetetään hyötyinformaation lisäksi informaatiota hyötyinformaatiosta, käytännössä mitä hyötyinformaatio sisältää. Jos hyötyinformaatiosta on tapahtunut virheitä, niin virheenkorjausmenetelmien avulla hyötydata voidaan uudelleenrakentaa. [5, alaluku 1.2.17] Virheenkorjausmenetelmää valittaessa täytyy tasapainotella neljää tekijää: yhtä hyvä signaali-kohinasuhde kuin koodaamattomalla signaalilla (engl. coding gain), taajuuskaista, latenssi ja alin virhetaso, mikä virheenkorjauskoodauksesta on aiheutunut (engl. error floor) [34]. Tyypillisiä koodausmenetelmiä ovat konvoluutiokoodaus, Reed-Solomon, "turbokoodaus" (engl. turbo code) ja LDPC (engl. low-density parity-check) [35].

## 4 ESIMERKKI - JAMES WEBB -AVARUUSTELESKOOPPI

James Webb -avaruusteleskooppi (engl. James Webb Space Telescope, jäljempänä vain JWST) on avaruudessa Lagrangen pisteellä L2 toimiva infrapuna-alueella kuvantamiseen erikoistunut avaruusteleskooppi [36, luku 1, alaluku 1.2]. Tässä työssä ulkoavaruus on määritelty alkavan yli 2 000 000 km päästä Maasta. Vaikka JWST ei tämän määritelmän mukaan sijaitse ulkoavaruudessa, niin se on otettu tähän työhön esimerkiksi sen ajankohtaisuuden ja ulkoavaruudelle tyypillisen tietoliikenteen vuoksi: JWST:tä käskytetään ja sen dataa vastaanotetaan DSN:n kautta [37]. JWST on esitetty kuvassa 4.1.



**Kuva 4.1.** James Webb -avaruusteleskooppi. Kuva NASA, saatavissa: <https://science.nasa.gov/get-involved/toolkits/spacecraft-icons>

Lagrangen piste L2 on noin 1 500 000 km päästä Maasta sijaitseva alue, joka kiertää Aurinkoa Maan mukana, eli tämä piste pysyy "paikoillaan" Maahan nähden. JWST kiertää tätä pistettä noin 6 kuukauden kiertoajalla ja sen suunniteltu toiminta-aika on vähintään 5 vuotta. Alus on kuitenkin varustettu polttoainemäärällä, joka riittää ainakin 10 vuodeksi. [36, alaluku 1.2.5]

Teleskooppi on saanut nimensä NASA:n edesmenneen johtajan James Webbin mukaan [36, s. 32]. JWST rakennettiin kansainvälisessä yhteistyössä pääasiassa NASA:n, ESA:n ja



CSAn (Canadian Space Agency) yhteistyönä, mutta projektissa oli muitakin yhteistyöteki-  
jöitä [38]. Alus lähetettiin Maasta kohti päämääräänsä 25.12.2021 Ariane 5 -kantoraketin  
mukana, ja se saapui päämääräänsä 24.1.2022 [39]. JWST:tä operoidaan STScI:n (engl.  
Space Telescope Science Institute) "Tiede- ja operaatiokeskuksesta" käsin USA:n itäran-  
nikolta Baltimoresta [36, alaluku 1.2.6]. Huomionarvoista on myös se, että JWST ei ole  
tarkoitettu esimerkiksi Hubble-avaruusteleskoopin korvaajaksi vaan seuraajaksi [40].

#### 4.1 Rakenne ja tutkimustehtävät

JWST koostuu neljästä eri osasta, jotka ovat optinen teleskooppielementti, integroitu tie-  
delaitteistomoduuli, lämpösuoja ja itse kantorakenne [36, alaluku 1.2]. Optinen teleskoop-  
pi muodostuu kahdesta kullalla päällystetystä berylliumpeilistä, joiden avulla infrapunasä-  
teily ohjataan tiedelaitteistolle. Kuvassa 4.1 näkyvä 18-segmenttinen heksagoneista muo-  
dostuva peili on pääpeili. [36, alaluku 1.2.3.1]

Integroitu tiedelaitteistomoduuli sisältää kaikki neljä kuvantamislaitetta: NIRCам (engl.  
Near-Infrared Camera), NIRSpec (engl. Near-Infrared Spectrograph), MIRI (engl. Mid-  
Infrared Instrument) ja FGS/NIRISS (engl. Fine Guidance Sensor/ Near InfraRed Imager  
and Slitless Spectrograph) [41]. Yhteensä kamerat kykenevät toimimaan 0,6 - 28,5  $\mu\text{m}$   
taajuuskaistalla [42].

Lämpösuoja koostuu viidestä "Kaptonista" tehdystä suojasta, joiden kaksikulotteinen koko  
yhteensä on noin 21 m x 14 m. Jokainen kerros on päällystetty alumiinilla, ja Aurinkoa  
lähimmät kaksi kerrosta on päällystetty vielä käsitellyllä silikonilla. Lämpösuojat ovat aina  
optisen teleskoopin ja Auringon/Maan/Kuun välissä, jotta näistä taivaankappaleista tuleva  
ylimääräinen valo ja lämpö eivät vaikuta teleskooppiin. Lämpösuojat heijastavat lämpöä  
pois itsestään passiivisesti. Auringon puoleinen suoja voi korkeimmillaan saavuttaa noin  
110 °C lämpötilan, kun taas kylmällä puolella oleva suoja voi saavuttaa noin -240 °C läm-  
pötilan. [43]

Kantorakenteeseen on kiinnitetty teleskooppi, tiedelaitteisto ja lämpösuojat. Kantora-  
kenteessa on näiden lisäksi muita laitteita esimerkiksi kommunikointiin Maan kanssa ja  
navigointiin, mutta myös aurinkopaneeleita energiantuotantoon. [36, alaluku 1.2.3.6] Li-  
sätietoa JWST:n rakenteesta on liitteessä B liitekuvassa B.1.

JWST:n päätutkimustehtävät jaetaan neljään eri kategoriaan, jotka ovat "aikainen univer-  
sumi", "galaksit ajan myötä", "tähdien elinkaari" ja "muut maailmat". Aikaisessa univer-  
sumissa pyritään löytämään tietoa universumin syntyajalta. "Galaksit ajan myötä" pyrkii  
saamaan vastauksia galaksien syntymisestä ja kehittymisestä. Tähdien elinkaareissa et-  
sitään vastauksia tähtien syntymiseen, ja "muut maailmat" keskittyy etsimään elämää ja  
sen syntyä niin Aurinkokunnasta kuin sen ulkopuoleltakin. [36, luku 1][44]

## 4.2 Tietoliikenne

JWST:n yhteydenpito Maahan tapahtuu kantorakenteessa olevan viestintäjärjestelmän kautta. Viestintäjärjestelmässä on kaksi antennia: 0,2 m S-taajuuden keskivahvistuksinen antenni (engl. medium-gain antenna, MGA) ja 0,6 m  $K_a$ -taajuuden suurivahvistuksinen antenni (engl. high-gain Antenna, HGA). Nämä antennit ovat kiinnitettynä yhteiseen alustaan, joka voidaan kääntää kohti Maata. Molempia antennia voidaan käyttää yhtäaikaisesti. [45]

MGA:ta käytetään Maasta-alukseen-ohjaukseen, hitaaseen tiedonsiirtoon Maahan (tarpeen vaatiessa) ja etäisyyden mittaamiseen (engl. ranging, ks. alaluku 3.1.2). MGA kykenee laajemman keilakuvionsa avulla 40 kbit/s tiedonsiirtonopeuteen Maahan. [37]

HGA:ta puolestaan käytetään vain aluksen keräämän tieteellisen datan ja tilatietojen välitykseen Maahan. HGA:lla on valittavana kolme tiedonsiirtonopeutta Maahan: 0,875, 1,75 ja 3,5 MB/s. Hitaampi nopeus voidaan valita, jos Maassa vastaanottavan DSN:n aseman säätötilanne on huono. HGA:n keilakuvio on tiukempi kuin MGA:lla, mikä aiheuttaa sen, että antennia tulee uudelleenkohdistaa Maahan 10 000 s välein. Uudelleenkohdistus aiheuttaa huomattavissa olevaa osoitusvirhettä, mikäli uudelleenkohdistus tehdään kesken datan lähettämisen Maahan. Operaatiosta riippuen tämä voidaan sallia. Toisaalta on myös olemassa aluksen kanssa tehtäviä toimintoja, jotka vaativat reaaliaikayhteyden Maahan. Tällöin kuvantamistoimintoja ei suoriteta ollenkaan samaan aikaan. [37]

DSN:n ja JWST:n välillä kulkeva data noudattaa CFDP-protokollaa (engl. CCSDS File Delivery Protocol) [45, luku 5]. Protokolla on suunniteltu luotettavaan tiedonsiirtoon, jossa tieto siirretään "tiedostoina" tiedonluojan ja tiedontallentajan välillä [46, alaluku 2.2]. JWST:n keräämän ja vain hiukan prosessoituun dataan (esim. kompressio, datan uudelleenjärjestely) lisätään CFDP:n käyttämä metatieto, minkä jälkeen data lähetetään Maahan prosessoitavaksi hyötykäyttöön [45, luku 5].

JWST:n käskyt menevät jonoon, josta ne suoritetaan järjestyksessä riippumatta siitä, onnistuuko käsky vai ei. JWST suorittaa "havaintosuunnitelmaa", joka koostuu pienemmistä "käynneistä", joissa tiedelaitteet keräävät dataa. [36, alaluku 1.2.6.2] Näistä käynneistä saatava data tallennetaan SSR:lle (engl. solid state recorder), josta data lähetetään Maahan. Dataa voidaan lähettää kahdessa 4-tunnin sessiossa, jossa kummassakin voidaan yhteensä lähettää 28,6 GB dataa. Tiedonsiirtonopeuden raja Maahan on noin 48 Mbit/s. [47] Maassa raakadataa säilötään ja prosessoidaan STS:n Tiede- ja operaatiokeskuksessa [36, alaluku 1.2.6].

## 5 YHTEENVETO

Tässä työssä tutustuttiin kaksisuuntaiseen radiotietoliikenteeseen Maan ja ulkoavaruuden aluksen välillä. Ensiksi työssä perehdyttiin avaruuteen ympäristönä sekä langattoman tietoliikenteen perusteisiin. Ulkoavaruuden tietoliikenteessä käytetään langattoman tiedon välitykseen mikroaaltoja, joihin paneuduttiin omassa alaluvussa. Työn tutkimuskysymykset olivat "miten tietoliikenne ulkoavaruuden aluksen ja Maan välillä toimii" sekä "miten ulkoavaruudessa oleva alus paikannetaan tietoliikenteen mahdollistamiseksi".

Maassa ulkoavaruuden aluksiin pidetään yhteyttä aina ulkoavaruusverkko DSN:n avulla. Tämä verkko on hajautettu kolmelle eri mantereelle, jotta Maapallon pyörimisliikkeestä huolimatta Maasta voidaan pitää yhteyttä aluksiin. DSN:n asemilla on useita erilaisia antennejä, joiden taajuustoiminta-alueet esitettiin taulukossa 3.1. Näiden antennien avulla kyetään kommunikoimaan kaksisuuntaisesti minkä tahansa ulkoavaruuteen lähetetyn aluksen kanssa. Tällä hetkellä DSN:ään toteutetaan 70 metrin antennien kunnostamista sekä uusien antennien rakennusprojekteja. Uudet antennit ovat BWG-antenneja, mutta rakennusprojekteihin kuuluu lisäksi yksi uudemman optisen tekniikan antenni.

DSN:n antennit vastaanottavat hyvin heikkoa signaalia ulkoavaruudesta, mikä vaatii isojen antennien lisäksi huolellista signaalinkäsittelyä. Vastaanotettu signaali on aina kohinaista ja heikkotehoista, jonka vuoksi vaaditaan signaalin vahvistamista. Vahvistimilla toteutettu signaalin vahvistus aiheuttaa lisäkohinaa signaaliin. DSN:n tehtävänä ei ole ainoastaan löytää heikko signaali kohinan seasta, vaan myös saada alkuperäinen signaali jäljitettyä pitkienkin matkojen jälkeen siten, että hyödyllinen data saadaan selville. Tässä voidaan hyödyntää antennien ryhmittämistekniikkaa, jolloin signaalia saadaan kerättyä laajemmalla alueella, kuin vain yhden antennin avulla saataisiin kerättyä.

Lähetettyihin ja vastaanotettuihin signaaleihin liittyy epävarmutta, koska vastaanottava antenni saa kiinni vain hyvin pienen osan lähetetystä signaalista, jolloin signaali on hyvin heikko. Jotta heikkojen viestisignaalien sisällön muuttumattomuudesta voidaan paremmin varmistua, käytetään hyväksi erilaisia virheenkorjausmenetelmiä. Virheenkorjausmenetelmien avulla signaalin alkuperäinen hyötyviesti voidaan jälleenrakentaa tarvittaessa. Heikkojen signaalien vahvistuksessa hyödynnetään hyvin alhaisissa lämpötiloissa toimivia vahvistimia. Nämä vahvistimet auttavat vahvistamaan vastaanotettua signaalia siten, että hyötydata voidaan erottaa signaalista.

Tietoliikenne ei ole vain viestien vastaanottamista, vaan myös viestien lähettämistä. Langattomassa tietoliikenteessä hyötyviesti voidaan sisällyttää kanta-aaltoon erilaisten modulaatiotekniikoiden avulla. Näistä tekniikoista digitaalinen vaiheen muunnos on ulkoavaruuden tapauksessa tyypillisin. Modulaatiota käsiteltiin alaluvussa 3.4.

Jälkimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin lyhyesti alaluvun 3.1.2 avulla. Ensimmäinen tutkimuskysymys oli puolestaan erittäin laaja. Tutkimuskysymyksessä ulkoavaruuden tietoliikennesovelluksia käsiteltiin selvästi vähemmän, mutta tämä oli tietoinen päätös tässä työssä työn pituuden puitteissa. Esimerkiksi New Horizons -avaruusluotain, Mars-kulkijat ja tässä työssä esitetty James Webb -avaruusteleskooppi ovat kaikki hyvin erilaisia sovelluksia sekä tavoitteiltaan, rakenteiltaan että tietoliikenteen osalta. Tässä työssä tehtiin tietoinen päätös siitä, että kaksisuuntaiseen tietoliikenteeseen perehdytään enemmän Maan osalta. Tämä tarkoitti sitä, että ulkoavaruusverkko DSN muodostui keskeiseksi tutkimuskohteeksi työssä, ja tietoliikenne ulkoavaruuden osalta jäi yhteen lyhyeen esimerkkiin. DSN:n viestien vastaanottoa ja lähettämistä käsiteltiin alaluvuissa 3.2 ja 3.3. Tietoliikenteen toteutusta ulkoavaruuden sovelluksissa käsiteltiin luvussa 4 James Webb -avaruusteleskoopin avulla.

Optinen kommunikointi tarjoaa tehokkaampia mahdollisuuksia tietoliikenteen datamäärien suhteen nykyiseen radiotekniikkaan verrattuna. Koska tällä hetkellä DSN:ään rakennetaan uutta optisesti toimivaa antennia, on optinen kommunikointi hyvä jatkotutkimusaihe ulkoavaruuden tietoliikenteelle. Ulkoavaruuden tietoliikennesovellusten käsitteleminen jäi vähemmälle tässä työssä, mutta esimerkkeinä edellä mainittuihin New Horizons -avaruusluotaimen ja Mars-kulkijoihin perehtyminen tarjoaa jatkotutkimusaiheita myös.

## LÄHTEET

- [1] *Cosmic Microwave Background (CMB) radiation*. European Space Agency, ESA. URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Herschel/Cosmic\\_Microwave\\_Background\\_CMB\\_radiation](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Herschel/Cosmic_Microwave_Background_CMB_radiation) (viitattu 1.11.2022).
- [2] *Where is space?* National Environmental Satellite, Data, and Information Service, NESDIS. 22.2.2016. URL: <https://www.nesdis.noaa.gov/news/where-space> (viitattu 14.9.2022).
- [3] *Statement about the Karman Line*. Fédération Aéronautique Internationale, FAI. 30.11.2018. URL: <https://www.fai.org/news/statement-about-karman-line> (viitattu 14.9.2022).
- [4] *Recommendation ITU-R SA.1157-1: Protection criteria for deep-space research*. International Telecommunication Union, ITU. 19.3.2006. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SA.1157-1-200603-I/en> (viitattu 12.5.2022).
- [5] D. Doody. *Deep Space Craft An Overview of Interplanetary Flight*. 1st ed. Springer Berlin Heidelberg, 2009, 440 p.
- [6] P. Davis (ed.) *Our Solar System*. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 30.8.2021. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/our-solar-system/in-depth/> (viitattu 17.11.2022).
- [7] P. Davis (ed.) *Kuiper Belt*. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 17.11.2021. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/in-depth/> (viitattu 17.11.2022).
- [8] P. Davis (ed.) *Oort Cloud*. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 19.12.2019. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/oort-cloud/in-depth/> (viitattu 17.11.2022).
- [9] *SI Units*. International Astronomical Union, IAU. URL: [https://www.iau.org/publications/proceedings\\_rules/units/](https://www.iau.org/publications/proceedings_rules/units/) (viitattu 2.12.2022).
- [10] *Mission Status*. Jet Propulsion Laboratory, JPL. URL: <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/> (viitattu 17.11.2022).
- [11] L. K. Erickson. Government Institutes, 2010, 668 p.
- [12] T. Uhlig, F. Sellmaier ja M. Schmidhuber. *Spacecraft Operations*. 1st ed. Springer Vienna, 2015, 425 p.

- [13] S. Faruque. *Radio Frequency Source Coding Made Easy*. 1st ed. Springer Cham, 2015, 155 p.
- [14] S. Faruque. *Radio Frequency Channel Coding Made Easy*. 1st ed. Springer Cham, 2016, 136 p.
- [15] A. Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, 674 p.
- [16] *IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. IEEE Std 521-2019 (Revision of IEEE Std 521-2002), 14.2.2020, 1–15 pp.
- [17] D. K. Shin. *DSN Telecommunications Link Design Handbook. Frequency and Channel Assignments*. 201, Rev. F. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 4.5.2022. URL: <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/downloads/> (viitattu 25.10.2022).
- [18] Event Horizon Telescope Collaboration. *Press Release (April 10, 2019): Astronomers Capture First Image of a Black Hole*. Event Horizon Telescope. 10.4.2019. URL: <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole> (viitattu 31.3.2023).
- [19] H. Monaghan (ed.) *What is the Deep Space Network?* National Aeronautics and Space Administration, NASA. 30.3.2020. URL: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/deep\\_space\\_network/about](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/deep_space_network/about) (viitattu 16.5.2022).
- [20] H. Monaghan (ed.) *DSN Complexes*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. 25.2.2022. URL: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/deep\\_space\\_network/complexes](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/deep_space_network/complexes) (viitattu 25.1.2023).
- [21] W. A. Imbriale. *Large Antennas of the Deep Space Network*. Deep Space Communications and Navigation Systems, DESCANSO, 2002, 314 p.
- [22] S. D. Slobin. *DSN Telecommunications Link Design Handbook. 70-m Subnet Telecommunications Interfaces*. 810-005, 101, Rev. G. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 23.7.2019. URL: <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/downloads/> (viitattu 26.1.2023).
- [23] S. D. Slobin. *DSN Telecommunications Link Design Handbook. 34-m BWG Stations Telecommunications Interfaces*. 810-005, 104, Rev. O. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 27.7.2022. URL: <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/downloads/> (viitattu 30.1.2023).

- [24] A. E. Smith. *DSN Aperture Enhancement Project*. Versio 1. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 8. 11. 2018. URL: <https://hdl.handle.net/hdl:2014/49232> (viitattu 28. 1. 2023).
- [25] *Deep Space Network Aperture Enhancement Project*. National Aeronautics and Space Administration. 10. 11. 2012. URL: <https://www.nasa.gov/content/deep-space-network-aperture-enhancement-project/> (viitattu 25. 1. 2023).
- [26] J. Lazio. *The Deep Space Network Radio Astronomy User Guide*. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 3. 4. 2021. URL: [https://deepspace.jpl.nasa.gov/files/DSN\\_Radio\\_Astronomy\\_Users\\_Guide.pdf](https://deepspace.jpl.nasa.gov/files/DSN_Radio_Astronomy_Users_Guide.pdf) (viitattu 26. 1. 2023).
- [27] S. D. Slobin. *DSN Telecommunications Link Design Handbook. 34-m HEF Subnet Telecommunications Interface*. 810-005, 103, Rev. C. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 1. 8. 2014. URL: <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/downloads/> (viitattu 9. 3. 2023).
- [28] T. Mai (ed.) *The New Generation of Antennas*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. 7. 8. 2017. URL: <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/DSN50Gallery-04.html> (viitattu 25. 1. 2023).
- [29] L. Fauconnet. *NASA's Deep Space Network Looks to the Future*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. 1. 9. 2021. URL: <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-s-deep-space-network-looks-to-the-future> (viitattu 25. 1. 2023).
- [30] *Antennas*. Goldstone Deep Space Communications Complex, GDSCC. URL: <https://www.gdsc.nasa.gov/index.php/antennas/> (viitattu 23. 1. 2023).
- [31] W. A. Imbriale, S. Gao ja L. Boccia. *Space Antenna Handbook*. 1st ed. John Wiley & Sons, Incorporated, 2012, 774 p.
- [32] *Pyrotechnic Shock Testing*. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 1. 2. 1999. URL: <https://llis.nasa.gov/lesson/780> (viitattu 25. 10. 2022).
- [33] S. Faruque. *Radio Frequency Modulation Made Easy*. 1st ed. Springer Cham, 2017, 113 p.
- [34] A. O'Dea. *DSN Telecommunications Link Design Handbook. Telemetry General Information*. 810-005, 206, Rev. D. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 4. 8. 2021. URL: <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/downloads/> (viitattu 25. 3. 2023).
- [35] A. O'Dea. *DSN Telecommunications Link Design Handbook. Telemetry Data Decoding*. 810-005, 208, Rev. B. Jet Propulsion Laboratory, JPL. 9. 1. 2013. URL: <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/downloads/> (viitattu 25. 3. 2023).

- [36] Harley A. Thronson, Massimo Stiavelli ja Alexander Tielens (eds.) *Astrophysics in the Next Decade. The James Webb Space Telescope and Concurrent Facilities*. 1st ed. Springer Dordrecht, 2009, 531 p.
- [37] Space Telescope Science Institute, STScI. *JWST Communications Subsystem*. Association of Universities for Research in Astronomy, AURA. 17.5.2017. URL: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-hardware/jwst-spacecraft-bus/jwst-communications-subsystem> (viitattu 9.4.2023).
- [38] Goddard Space Flight Center. *Meet the Team. Partners and Contributors*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. URL: <https://webb.nasa.gov/content/meetTheTeam/team.html> (viitattu 7.4.2023).
- [39] Goddard Space Flight Center. *About. Webb launch*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. URL: <https://jwst.nasa.gov/content/about/launch.html> (viitattu 7.4.2023).
- [40] Space Telescope Science Institute, STScI. *Mission & Launch Quick Facts*. Association of Universities for Research in Astronomy, AURA. URL: <https://webbtelescope.org/quick-facts/mission-launch-quick-facts> (viitattu 7.4.2023).
- [41] Goddard Space Flight Center. *Instruments. ISIM & Instruments*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. URL: <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/instruments/index.html> (viitattu 7.4.2023).
- [42] Space Telescope Science Institute, STScI. *Webb Stats. Fast facts about the James Webb Space Telescope*. Association of Universities for Research in Astronomy, AURA. 25.12.2021. URL: <https://webbtelescope.org/contents/articles/webb-stats> (viitattu 8.4.2023).
- [43] Goddard Space Flight Center. *Observatory. the Sunshield*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. URL: <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/sunshield.html> (viitattu 7.4.2023).
- [44] Goddard Space Flight Center. *Science. Webb's Science Themes*. National Aeronautics and Space Administration, NASA. URL: <https://jwst.nasa.gov/content/science/index.html> (viitattu 6.4.2023).
- [45] A. Johns et al. James Webb Space Telescope - L2 Communications for Science Data Processing. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems II*. Vol. 7016. The International Society for Optics and Photonics, SPIE. 2008, 425–431 pp.
- [46] *CCSDS File Delivery Protocol (CFDP)—Part 1: Introduction and Overview*. Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS. CCSDS 720.1-G-4, 5/2021. URL: <https://public.ccsds.org/Pubs/720x1g4.pdf> (viitattu 9.4.2023).



- [47] Space Telescope Science Institute, STScI. *JWST Solid State Recorder*. Association of Universities for Research in Astronomy, AURA. 2.6.2021. URL: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-hardware/jwst-solid-state-recorder> (viitattu 8.4.2023).

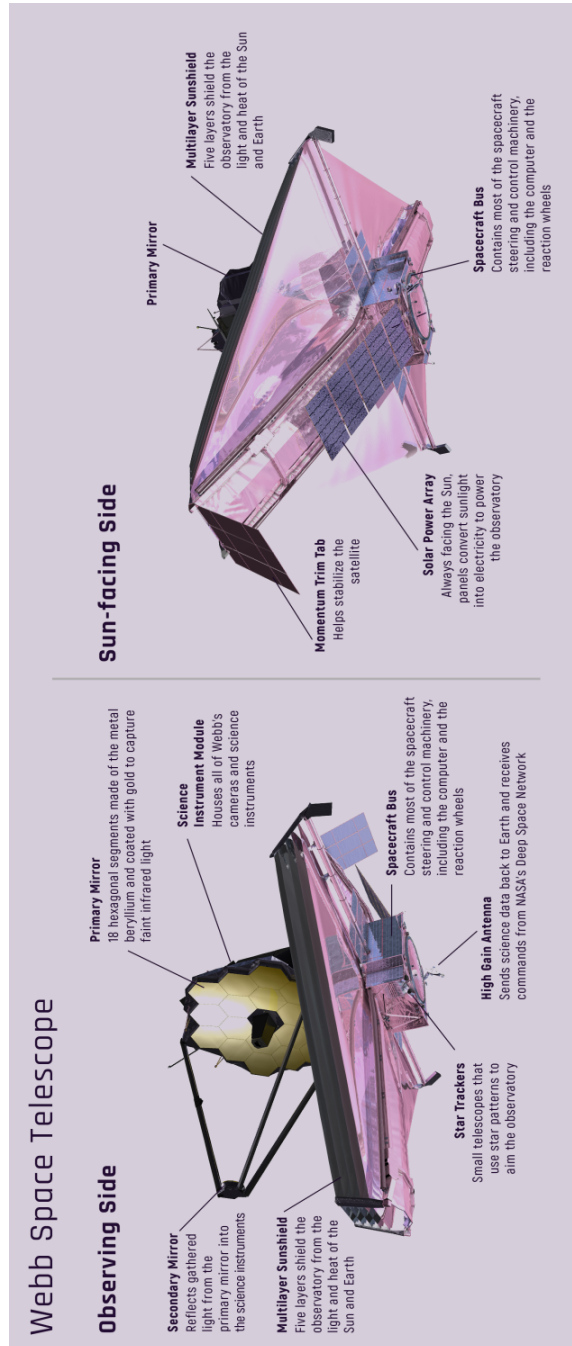
## LIITE A DSS-14 (MARS-ANTENNI)

Kuvassa A.1 esitetään Kalifornian Goldstonen radioaseman antenni DSS-14. Antennin halkaisija on 70 metriä. Antenni tunnetaan myös nimellä Mars-antenni, koska se vastaanotti ensimmäisen Marsin läheisen luotaimen dataa.



*Kuva A.1. DSN:n ensimmäinen 70 metrin antenni. Kuva NASA/JPL, saatavilla: <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/DSN50Gallery-08.html>*

## LIITE B JWST:N KAKSI PUOLTA



**Kuva B.1.** JWST:n kylmän ja kuumen puolen osat. Kuva NASA ja C. Godfrey (STScI), saatavilla <https://webbtelescope.org/contents/media/images/4197-Image>