

Leo Leppäkoski

NEW HORIZONS- JA VOYAGER -LUOTAIMIEN TIETOKONE- JÄRJESTELMIEN VERTAILU

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Leo Leppäkoski: New Horizons- ja Voyager-luotaimien tietokonejärjestelmien vertailu
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikka
Syyskuu 2019

Tämä työ on kirjallisuusselvitys, jossa vertaillaan New Horizons- ja Voyager-luotaimien tietokonejärjestelmien toteutustapoja toisiinsa ja selvitetään, miltä osin toteutukset eroavat toisistaan ja missä on päädytty samankaltaisiin toteutuksiin. Työssä keskitytään luotaimien tietokoneiden hajautukseen ja suojaamiseen avaruuden vaaroilta sekä luotaimien maayhteyteen.

Vertailussa selvisi, että New Horizons hyödyntää paljon samoja ratkaisuja kuin Voyager-luotaimet. Suurin ero tietokoneratkaisuissa näiden välillä on se, että Voyager-luotaimissa on käytetty hyvin kokeellisia ratkaisuja kun taas New Horizons -luotaimessa on hyödynnetty valmiita, turvallisia ratkaisuja. Näistä osa on juuri Voyager-luotaimissa toimiviksi osoittautuneita toteutuksia. Voyager- ja New Horizons -luotaimet ovat onnistuneet erinomaisesti tehtävissään. Etenkin Voyager-luotaimien tietokoneet ovat osoittaneet esimerkillistä toimintavarmuutta 42 vuoden matkalla halki aurinkokunnan ja New Horizons-luotaimenkin tietokoneet ovat toimineet luotettavasti jo 15 vuotta.

Avainsanat: tietokone, luotain, New Horizons, Voyager, säteily suojaus, tiedonsiirto

Comparison of New Horizons and Voyager space probes' computer systems

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AVARUUSLUOTAIMET	2
2.1 Avaruusluotaimien historia	3
2.2 Avaruustietokoneiden erityispiirteet ja teknologiset haasteet.....	5
3. VERTAILU JÄRJESTELMÄKOHTAISESTI	7
3.1 Luotaimien tietokoneet ja niiden virrankulutus	7
3.2 Tietokoneiden suojaus avaruuden vaaroilta	11
3.3 Luotaimien maayhteys	12
4. YHTEENVETO.....	15
LÄHTEET	17

LYHENTEET JA MERKINNÄT

APL	Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DSN	NASA Deep Space Network
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PET	polyeteenitereftalaatti
RTG	radioisotope thermoelectric generator
SSD	solidstate drive

<i>B</i>	tavu
<i>b</i>	bitti
<i>Hz</i>	hertsi
<i>I</i>	intensiteetti
<i>r</i>	etäisyys
<i>s</i>	sekunti
<i>W</i>	watti

1. JOHDANTO

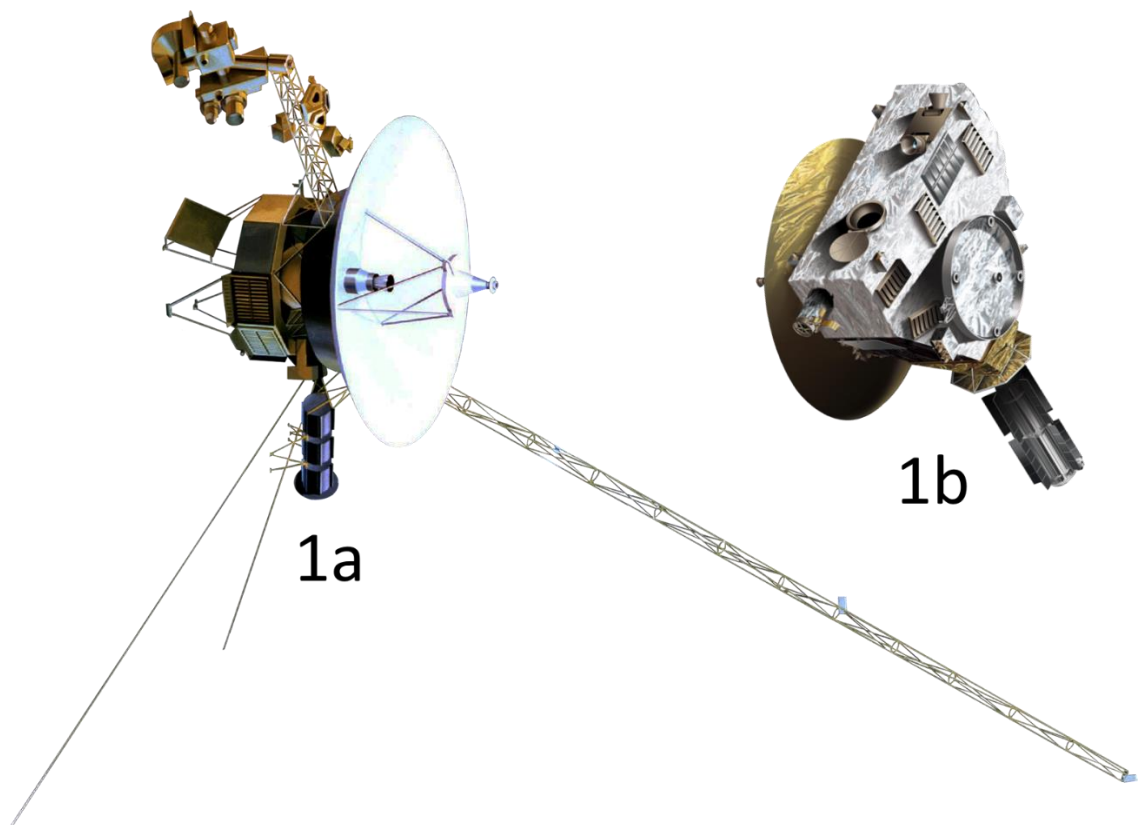
Aurinkokunnan kappaleilla, kuten planeetoilla ja asteroideilla, on monia ominaisuuksia, joiden havainnoiminen on vaikeaa tai mahdotonta etäältä. Luotaimet ovat miehittämättömiä avaruusaluksia, joiden tehtävä on tutkia tällaisia kaukaisia kohteita lähietäisyydeltä. Tämä työ on kirjallisuusselvitys, jossa vertaillaan New Horizons- ja Voyager-luotaimien tietokonejärjestelmien toteutustapoja. Työn tavoitteena on selvittää, miltä osin toteutukset eroavat toisistaan ja missä luotaimien suunnittelijat ovat päätyneet samankaltaisiin toteutuksiin. Kun toteutustavat eroavat, pyritään vertailemaan toteutusten onnistumista tehtävässään.

Selvityksen kohteiksi on valittu New Horizons- ja Voyager-luotaimet, koska ne edustavat kahta ääripäätä aurinkokuntamme reunamien tutkimuksessa. Voyager 1 ja Voyager 2 luotaimet olivat ensimmäiset digitaalisten avaruustietokoneiden aikakauden alkupäässä aurinkokuntamme kaasuplaneettoja tutkimaan lähetetyt luotaimet. New Horizons puolestaan on tuorein samankaltaista tehtävää varten rakennettu luotain.

Luvussa 2 esitetään karkeasti avaruusluotaimien tietokoneiden yleistä kehitystä ja perehdytään tarkemmin Voyager ja New Horizons- luotaimien tehtäviin sekä avaruustietokoneiden teknologisiin haasteisiin. Luvussa 3 vertaillaan Voyager ja New Horizons- luotaimien tietokonejärjestelmiä kiinnittäen erityistä huomiota aiemmassa luvussa esiteltyihin haasteisiin. Luvussa 4 esitetään yhteenveto työstä.

2. AVARUUSLUOTAIMET

Luotaimet ovat miehittämättömiä avaruusaluksia, joiden tehtävä on tutkia kaukaisia kohteita lähietäisyydeltä. Planeettojen ja asteroidien ominaisuuksia etäältä havainnoitaviksi haastavia ovat esimerkiksi magneettikenttä ja yleiset säteilyolosuhteet kappaleiden ympärillä. Myös luotaimien lähietäisyydeltä ottamille hyville, tarkoille valokuville on laaja-alaista käyttöä tutkijoiden keskuudessa ja ne innostavat harrastelijoita ja opiskelijoita. Luotaimet ovat turvallinen tapa tutkia aurinkokuntaamme altistamatta ihmisiä avaruuden vaaroille. Tässä kirjallisuusselvityksessä käsitellään luotaimia Voyager 1 (Kuvassa 1a), Voyager 2 ja New Horizons (Kuvassa 1b). Tässä työssä viitataan termillä Voyager-luotain molempiin Voyager-luotaimiin. Tällainen yleistäminen on perusteltua, koska ne ovat identtiset. Voyager- ja New Horizons -luotaimissa on monenlaisia instrumentteja planeettojen tutkimista varten, mutta tässä työssä käsitellään vain luotaimien tietokonejärjestelmiä. Erilaisiin tehtäviin aurinkokunnan tutkimisessa käytettävät luotaimet voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon. Tässä työssä käsiteltävät luotaimet ovat vain pieni osajoukko kaikista avaruusluotaimista.



Kuva 1. Voyager (1a) ja New Horizons (1b). [1]

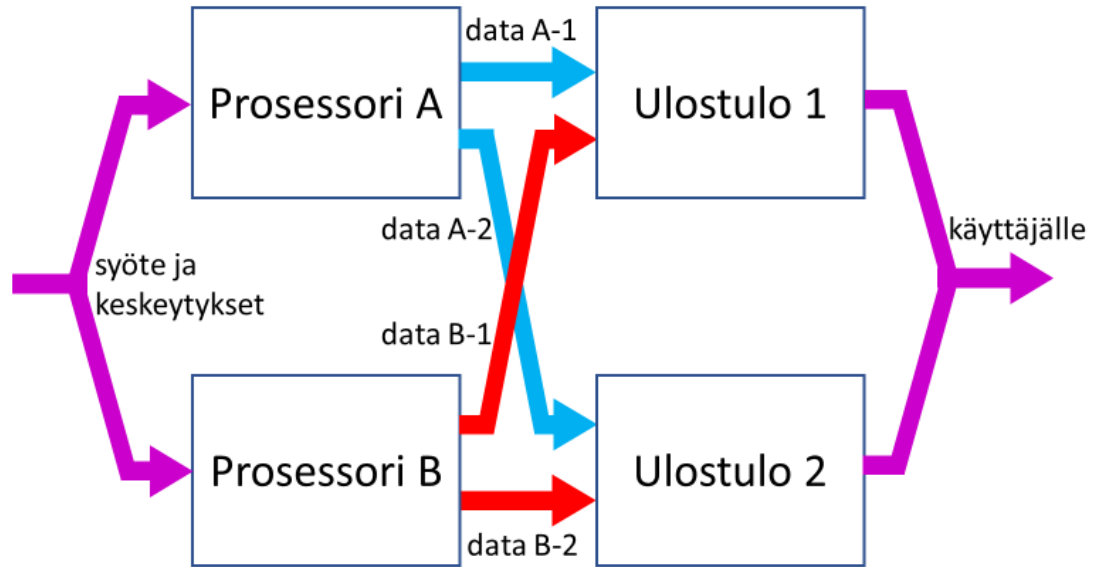
2.1 Avaruusluotaimien historia

Ensimmäisissä avaruusaluksissa ei ollut vielä uudelleen ohjelmitavia tietokoneita, vaan niiden ohjelmisto oli pääasiassa ohjelmoitu kiinteään fyysiseen muistiin, jota ei voitu enää muuttaa tietokoneiden lähdettyä tehtaalta [2]. Koska ohjelmistoa ei voitu muuttaa, täytyi kaiken ohjelmiston mahtua tietokoneen rajalliseen muistiin. Tämä oli merkittävä rajoite luotaimien tehtävien monimutkaisuudelle.

Pioneer 10- ja Pioneer 11-luotaimet, jotka laukaistiin 1972 ja 1973, olivat Voyager-luotaimien edeltäjät ja ensimmäisinä luotaimina ohittivat Jupiterin. Niissä ei ollut varsinaisia itsenäisiä tietokoneita, vaan niiden muistissa mahtui olemaan viiden komennon jono, josta yksinkertainen prosessori jakoi komennot oikeille instrumenteille. Maassa oleva tietokone laski kaikki tarvittavat laskut, ja luotaimien komentojonoa päivitettiin radion välityksellä. [3]

Vuonna 1975 Marsiin laukaistuissa Viking-luotaimissa oli ensimmäistä kertaa avaruusaluksissa tietokoneet, joiden ohjelmistoa olisi voitu päivittää tehtävän aikana. Tämä ominaisuus mahdollistaisi vanhojen ohjeiden ja rutiinien korvaamista muistissa uusilla ohjeilla ja rutiineilla. Viking-luotaimien ohjelmisto ei hyödyntänyt tätä, mutta siitä tuli tärkeä ominaisuus myöhemmissä luotaimissa. [2]

Voyager-luotaimiin rakennettiin tietokoneet Viking-luotaimien tietokoneiden pohjalta käyttäen mahdollisimman paljon samoja elementtejä. Innovaationa Voyager-luotaimissa oli tietokoneiden tehtävien hajauttaminen usealle tietokoneelle. Luotaimissa on kolme kahdennettua tietokonetta. Kahdennus tuo merkittävän parannuksen tietokonejärjestelmän toimintavarmuuteen, ja sitä oli käytetty jo Apollo-lennoilla. Kuvassa 2 on lohkoavaio geneerisestä kahdennetusta tietokoneesta. Toinen innovaatio Voyager-luotaimien tietokonejärjestelmissä oli horrostaminen. Kun kaikkia tietokoneita ei tarvita samanaikaisesti, tarpeettomat voivat horrosta. Tästä on hyötyä etenkin pitkien planeettojen välisten matkojen aikana, jolloin vain lentämiseen tarvittavat tietokoneet kuluttavat resursseja. [2]



Kuva 2. Kahdennetuissa tietokonejärjestelmissä sama syöte jaetaan molemmille prosessoreille. Ulostuloja voidaan vertailla automaattisesti keskenään ennen kuin ne lähetetään käyttäjälle, kuten ihmiselle tai toiselle tietokoneelle.

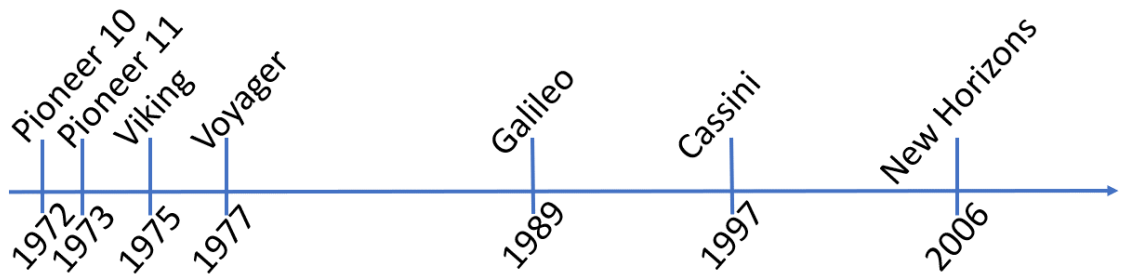
Molemmat Voyager-luotaimet laukaistiin 1977 matkalleen havainnoimaan kaasuplaneettoja. Ne ohittivat 1979 Jupiterin, jonka vetovoimaa hyödynnettiin kiihdyttämään luotaimia entisestään¹. Sen ansiosta Voyager 1 saavutti Saturnuksen jo 1980 ja Voyager 2 vuonna 1981. Saturnuksen jälkeen Voyager 1 on ollut pitkällä matkallaan kohti tähtienvälistä avaruutta. Voyager 2 suunnattiin vielä Uranuksen ja Neptunuksen ohitse myös kohti tähtienvälistä avaruutta. Uranuksen se ohitti 1986 ja Neptunuksen 1989. [4]

Voyager-luotaimet rakensi Yhdysvaltojen avaruushallinnon (engl. National Aeronautics and Space Administration, NASA) Jet Propulsion Laboratory (JPL). New Horizons -luotaimen rakentamisesta vastuun sai Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (APL), joka tekee yhteistyötä NASA:n kanssa.

New Horizons laukaistiin 2006 matkalleen kohti Plutoa maailman voimakkaimmalla kantoraketilla, jotta sen pitkä matka halki aurinkokunnan taittuisi mahdollisimman nopeasti. Voyager-luotaimien tapaan Jupiteria hyödynnettiin myös New Horizons -luotaimen kiihdyttämiseen. Osaa New Horizons- luotaimen instrumenteista testattiin havainnoimalla Jupiteria ja sen kuita, jolloin luotaimen operoijat saivat mahdollisuuden varmistaa instrumenttien toimivan suunnitellusti. Vuonna 2015 luotain

¹ Planeettojen painovoimia voidaan käyttää linkoamaan avaruusaluksia kiihdytetyillä nopeuksilla jotta muuta kohdetta kohti. Painovoimalinko on erittäin hyödyllinen tekniikka, koska sillä säästetään paljon polttoainetta, jota muutoin käytettäisiin avaruusaluksien kiihdyttämiseen niiden paetessa Auringon painovoimakuopasta. Lähteessä [5] NASA kertoo aiheesta lisää.

saavutti Pluton, jonka ohituksen jälkeen se ohjattiin kohti täysin tuntematonta Kuiperin vyöhykkeen kohdetta nimeltä 2014 MU69. Tämän se saavutti vuoden 2019 alussa. Nimensä mukaisesti 2014 MU69 oli löydetty vuonna 2014. Matkallaan Kuiperin vyöhykkeen läpi New Horizons pyrkii havainnoimaan kaikkia mahdollisia kohteita, jotka sen instrumenttien mielekkäälle havainnointitietäisyydelle sattuvat. [6]



Kuva 3. Aikajanalla on esitetty laukaisuvuosineen kaikki kaasuplaneettojamme havainnoimaan lähetetyt luotaimet ennen New Horizons -luotainta sekä New Horizons, joka käytti Jupiteria painovoimalinkona kiihdyttääkseen matkaansa Plutoon. Galileo-luotain tutki Jupiter-järjestelmää ja Cassini-luotain Saturnus-järjestelmää. Joukossa on myös Viking, joka tutki vain Marsia, mutta se on mukana, koska sen tietokonetta käsiteltiin lyhyesti tässä luvussa.

2.2 Avaruustietokoneiden erityispiirteet ja teknologiset haasteet

Samaan tapaan kuin monissa nykyajan tietokonetoteutuksissa, esimerkiksi puhelimissa ja kauko-ohjattavissa lennokeissa, avaruustietokoneissa virtalähde asettaa rajoituksensa virrankulutukselle. Puhelimista ja lennokeista poiketen avaruustietokoneita ei kuitenkaan voida kytkeä sähköverkkoon lataamista varten. Tähän ongelmaan on toistaiseksi vain kaksi käytössä olevaa ratkaisua: aurinkopaneelit tai erilaiset paristot ja muut energiavarastot, joista voidaan saada sähköä.

Aurinkopaneelien tehokkuus kuitenkin heikkenee niiden loitossa Auringosta käänteisen neliön lain mukaan

$$I_1 = I_2 \frac{r_2^2}{r_1^2}, \quad (1)$$

jossa r_1 on ensimmäisen aurinkopaneelin etäisyys Auringosta ja r_2 on toisen. Vastaavasti I_1 on ensimmäisen ja I_2 on toisen vertailtavan aurinkopaneelin kaappaamien Auringon säteilyjen intensiteetit. [7] Koska aurinkopaneelien tehokkuus heikkenee tällä tavalla, ne eivät sovellu aurinkokunnan ulko-osia tutkiviin luotaimiin. Tällaisissa luotaimissa on käytettävä varastoitua energiaa hyödyntävää virtalähdettä.

Sekä Voyager- että New Horizons -luotaimissa on lämpösähköinen radioisotooppigeneraattori (engl. radioisotope thermoelectric generator, RTG), joka tuottaa sähköä plutoniumdioksidipolttoaineen radioaktiivisesta hajoamisesta syntyvästä lämmöstä [6][8][9]. Lämpöä muunnetaan sähköksi lämpösähköpareilla, joissa kaksi sähkönjohtavuudeltaan erilaista johdinta on suljetussa piirissä ja johtimien liitokset pidetään eri lämpötiloissa. Näissä luotaimissa toista liitosta lämmitetään RTG:n omalla lämmöllä ja toinen liitos pidetään viileänä altistamalla se avaruuden kylmyydelle. [9] RTG:n virrantuotanto heikkenee polttoaineen kuluessa tehtävän aikana. RTG:tä hyödyntävä luotain lopulta lopettaa toimintansa, kun sen RTG ei enää pysty tuottamaan riittävää tehoa luotaimen tietokoneille ja tietoliikennelaitteistolle.

Toisin kuin puhelimissa ja lennokeissa, avaruudessa tietokoneita pitää suojata avaruuden vaaroilta, kuten ionisoivalta säteilyltä, mikroasteroideilta sekä äärimmäisiltä lämpötiloilta. Myös luotaimen oma RTG on ionisoivan säteilyn lähde, mikä on huomioitava luotaimen suunnittelussa [8]. Fyysisen suojauksen lisäksi tietokoneiden toimintaa tulee myös suojata toimintavioilta. Vikoja voi tietokoneen toiminnassa aiheuttaa laitteiston suunnitteluviat, ohjelmistoviat sekä säteilyn aiheuttamat bittivirheet. Näistä tietokoneiden toiminnan haasteista tulee luotaimen pääosin selviytyä omin avuin, koska luotaimen etäisyys Maahan on jopa valotunteja luotaimien suunnitellulla toiminta-alueella. Pitkästä matkasta aiheutuvan tiedonkulkuviiveen takia vianmääritys voi olla mahdotonta Maassa oleville insinööreille. Luotaimen on itse selviydyttävä ongelmasta. Jälkikäteen voidaan ohjelmistobugeja korjata lähettämällä luotaimelle uusi versio ohjelmasta, mutta laitteistovikoja voidaan enintään kiertää ja niiden vaikutuksia minimoida ohjelmistolla.

3. VERTAILU JÄRJESTELMÄKOHTAISESTI

Monissa nykyajan tietokoneissa on eri prosessorit eri tehtäviä varten. Esimerkiksi monesta kodista löytyy tietokone, jossa on keskusprossessorin lisäksi ainakin oma prosessori näyttöpäätteen grafiikkaa varten, eli näyttökortti. Samoin Voyager- ja New Horizons -luotaimissa on hajautetut tietokonejärjestelmät, joissa eri prosessorit suorittavat omia tehtäviään. Niiden prosessorit ovat myös kahdennetut toimintavarmuuden varmistamiseksi. [2][6]

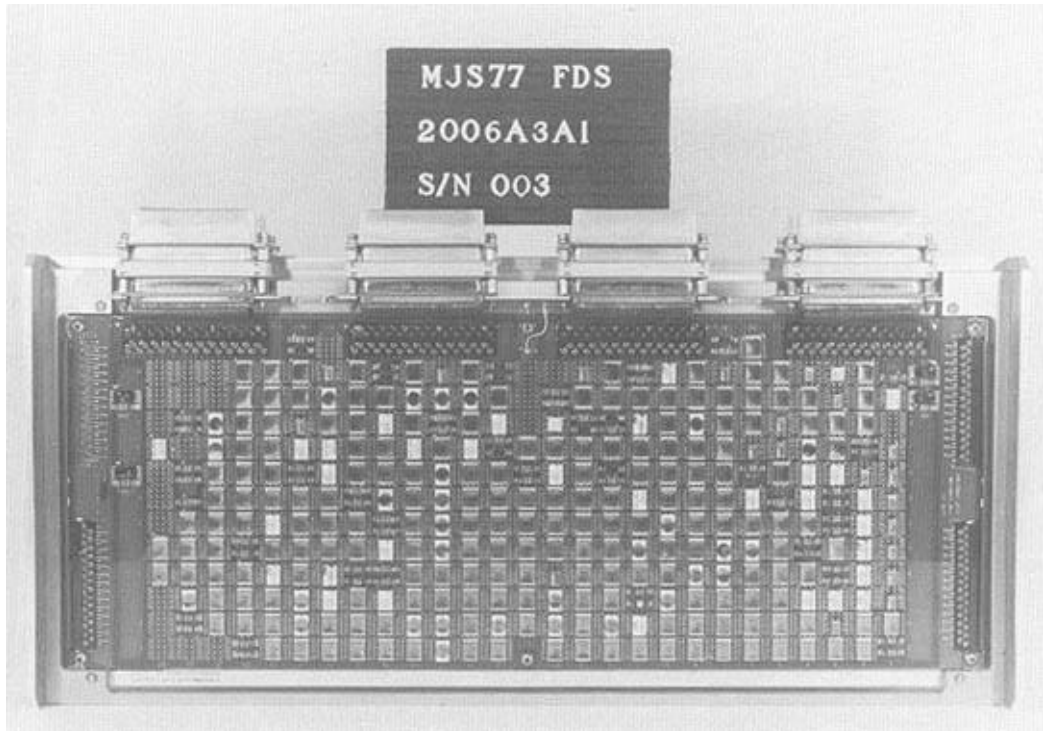
3.1 Luotaimien tietokoneet ja niiden virrankulutus

Voyager luotaimien tietokonejärjestelmät on hajautettu kolmeen eri järjestelmään. Ohjaus- ja hallintajärjestelmä käsittelee vastaanottimelta tulevat lähetykset ja jakaa komennot eri instrumenteille ja lentotietojärjestelmälle. Se myös lähettää tieteellisen datan instrumenteilta Maahan ja seuraa kaikkien järjestelmien kuntoa ja tarvittaessa vie luotaimen oikeanlaiseen viansietotilaan havaitun vian mukaan. [8]

Voyager-luotaimien asennonohjaustietokone on sama kuin Viking luotaimien satelliittiosan² ohjaustietokone. Voyager-luotaimien tietokoneista se edustaa yksinkertaisinta ja vanhinta tekniikkaa. Asennonohjaustietokoneen tehtävä on seurata ja ohjata luotaimen asentoa ja seurata luotaimen sijaintia Aurinkoon nähden. Sen lisäksi se myös ohjaa havainnointialustoille asennettujen instrumenttien asentoa. Se myös ohjaa luotaimen asentoa luotaimen havainnoissa runkoonsa kiinteästi asennetuilla instrumenteilla. Luotaimen asentoa säädetään hydratsiinisäätöraketeilla. [2]

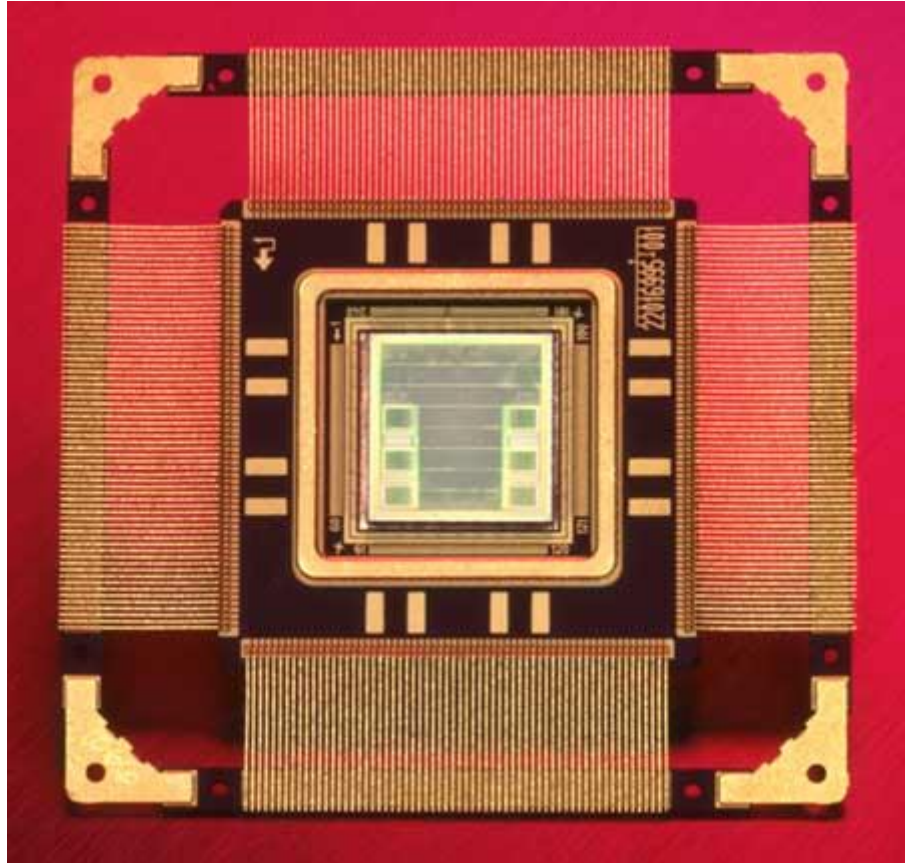
Lentotietojärjestelmä (Kuvassa 4) vastaanottaa dataa tieteellisiltä instrumenteilta ja välittää sen ohjaus- ja hallintajärjestelmälle lähetettäväksi Maahan. Silloin kun dataa ei voida lähettää Maahan, järjestelmä tallentaa dataa magneettinauhalle odottamaan seuraavaa mahdollista lähetyshetkeä. Pisin yhtäjaksoinen este datan lähettämiseksi on silloin, kun Maa on luotaimeen nähden Auringon katveessa. [2]

² Viking-luotaimet koostuivat laskeutuja- ja satelliittiosista.



Kuva 4. Voyager-luotaimien lentotietokoneet ovat toteutettu CMOS-tekniikalla. Ne ovat Voyager-luotaimien moderneimmat tietokoneet. [2]

Prossessorit kaikkiin kolmeen järjestelmään valmistettiin ja suunniteltiin varta vasten Voyager-luotaimia varten. [2] Sen sijaan New Horizons -luotaimen prosessorit eivät ole uniikkeja. Ne ovat Synova Inc:in valmistamia kaupallisia Mongoose-V prosessoreja, joita NASA on hankkinut aiemmin muihinkin luotaimiinsa [6]. Mongoose-V on 32-bittinen säteilysojattu versio MIPS R3000 suorittimesta (Kuvassa 5) [2]. Myös hajautus New Horizons -luotaimessa on eri tavalla toteutettu. Siinä on vain kaksi eri tietokonejärjestelmää: ohjaus- ja hallintalaitejärjestelmä sekä komento- ja datankäsittelyjärjestelmä [6].



Kuva 5. *New Horizons* -luotaimessa käytetty *Mongoose-V*. Niitä on luotaimessa yhteensä neljä kappaletta, sillä molemmat tietokonejärjestelmät ovat kahdennettuja. *Mongoose-V* muistuttaa ulkonäöltään ja -mitoiltaan modernien tietokoneiden prosessoreja. [10]

Komento- ja datankäsittelyjärjestelmä jakaa komentoja kaikille muille järjestelmille ja instrumenteille, pitää huolta luotaimen kunnosta ja kommunikoi Maan kanssa. Kuten *Voyager* luotaimien lentotietojärjestelmä, tämäkin tallentaa instrumenttien dataa, mutta magneettinauhojen sijaan SSD-muistiin. [6]

New Horizons -luotaimen ohjaus- ja hallintalaittejärjestelmä käyttää luotaimen inertiaaliantureita, tähtikameroita ja aurinkoanturia varmistamaan luotaimen asennon avaruudessa. Se myös käyttää hydratsiiniraketteja, kun luotaimen asentoa pitää muuttaa kolmiakselisessa osoitustilassa tai pyörimisvakavoidussa tilassa. Ensimmäistä käytetään, koska luotaimen kaikki instrumentit ovat kiinteästi luotaimen runkoon asennettuja, jolloin täytyy koko luotain kääntää havainnointia varten haluttuun asentoon. Toisessa tilassa luotain matkustaa havainnoitavien kappaleiden välillä. [6]

Luotaimien matkatessa aurinkokuntamme poikki niiden ydinpolttoaine hajoa radioaktiivisten isotooppiensa puoliintumisaikojen määräämää vauhtia, luotaimen virrankulutuksesta riippumattomasti. Siksi virtaa ei varsinaisesti tarvitse eikä voi säästellä, mutta mitä vähemmän laitteet tarvitsevat sähköä, sitä pitempään niitä voidaan

käyttää. Lopulta luotaimen RTG:n sähköteho kuitenkin laskee sen instrumenttien ja järjestelmien tarvitseman tehon alle. Luotaimien elinikää pidennetään karsimalla instrumentteja ja tietokonejärjestelmiä kokonaan pois käytöstä, kun virtalähde ei pysty tuottamaan tarvittavaa tehoa kaikille laitteille. [9] Esimerkiksi Voyager 1:llä on käytössä enää neljä sen kymmenestä instrumentista ja Voyager 2:lla on viisi kymmenestä. Käytöstä on karsittu ensimmäisenä instrumentit, joille ei ole käyttöä planeettojen välisessä avaruudessa [4].

Taulukossa 1 on verrattu edellä mainittujen tietokonejärjestelmien ominaisuuksia. New Horizons -luotaimen uudemmat tietokoneet ovat moninkertaisesti nopeampia kuin Voyager-luotaimien, mutta kuluttavat huomattavasti vähemmän tehoa. Samoin tietokoneiden muistit ovat moninkertaiset uudemmassa luotaimessa. Pienempi tehonkulutus on tyypillistä uudemmissa tietokoneille, joissa pienempien transistorien tilojen muuttamiseen tarvitaan vähemmän sähköä.

Taulukko 1 Voyager- ja New Horizons -luotaimien tietokoneiden ominaisuuksia.

Ominaisuus	Voyager			New Horizons	
	Ohjaus ja hallinta	Asennon-ohjaus	Lentotieto	Ohjaus ja hallinta	Komento ja data
Nopeus	11,3 Hz	11,3 Hz	80 kHz	12 MHz	12 MHz
Sanan pituus	18 bittiä	18 bittiä	18 bittiä	32 bittiä	32 bittiä
Muisti	60 kB	4 kB	4 kB	1 GB	7 GB
Käyttöteho	24,7 W	54,9 W	9,9 W	1,2 W	1,2 W

Voyager- ja New Horizons -luotaimien tietokonejärjestelmät ovat suorittaneet tehtäviensä pääosin onnistuneesti. Silti Voyager 2 joutui aivan matkansa alussa vaaratilanteeseen, joka aiheutui Voyager-luotaimien lentotietojärjestelmän ohjelmiston suunnitteluvirheestä. Kantoraketti tärisytti Voyager 2:ta sen laukaisun aikana siten, että luotain päätteli olevansa vapaapudotuksessa. Se yritti selvittää tilannetta erilaisilla vikasietotiloilla, joista ei ollut apua, koska luotain ei ollut oikeassa vaarassa. Kun luotaimelle lopulta onnistuttiin lataamaan uusia ohjeita Maasta, ongelma saatiin korjattua.

New Horizons -luotain puolestaan joutui vikatilaan vuonna 2015. Se vastaanotti suurta tehtäväpäivitystä samaan aikaan, kun se yritti pakata tieteellistä dataa lähetystä varten. Epäonninen tapahtumien ajoitus johti virhetilaan, josta komento- ja datankäsittelyjärjestelmä siirtyi käyttämään varaprosessoria ja selviytyi itse ongelmasta kolmessa päivässä. Planeettojenvälisillä matkoillaan luotaimen molempien tietokonejärjestelmien toinen tietokone horrostaa, joten sitä voitiin käyttää varalaitteena.

3.2 Tietokoneiden suojaus avaruuden vaaroilta

Voyager-luotaimissa tietokoneita on suojattu pääosin kahdella tavalla säteilyltä, jolle ne avaruudessa altistuvat. Laitteisiin vaikuttavan säteilyn määrää on vähennetty koteloimalla tietokoneet ja muu herkkä elektroniikka metallikuoreen sekä asettamalla luotaimien RTG kauas luotaimien rungosta tukivarren päähän [8][11]. Toinen käytetty tapa on tietokoneiden säteilynkeston parantaminen. Säteilylle erityisen herkän CMOS logiikan sietokykyä onnistuttiin parantamaan käyttämällä normaalista lämpökäsittelylämmöstä poikkeavaa, matalampaa lämpötilaa, jossa logiikkaporteista saatiin vähemmän herkkiä avaruuden säteilylle [11].

New Horizons -luotaimen pyörimisvakavoidun matkustustavan takia sen RTG:tä ei voitu sijoittaa varren päähän kuten Voyager-luotaimissa. Koska New Horizons -luotaimessa RTG on pienempi kuin Voyager-luotaimissa, on se säteilynlähteenäkin pienempi. Siksi se on voitu sijoittaa luotaimen kuoren sisään [6]. RTG on myös säteilysuojattu kilvellä, joka vähentää sen elektroniikalle aiheuttamaa häiriötä [9]. New Horizons

-luotaimessa on käytetty erityisesti avaruusaluksia varten suunniteltuja Mongoose-V prosessoreja. Koska Mongoose-V on kaupallinen tuote, ei sen säteilynsuojauksen yksityiskohtaisesta toteutuksesta ole saatavilla julkista tietoa. Kuten valtaosa Voyager-luotaimien elektroniikasta, myös Mongoose-V prosessorit ovat CMOS teknologiaa. [12]

Virheiden korjauksessa Voyager- ja New Horizons -luotaimet hyödyntävät pitkälti samoja metodeja. Virheen sattuessa kahdennetun tietokonejärjestelmän toisessa tietokoneessa antavat tietokoneet eri tuloksen samalle syötteelle, minkä perusteella virhe havaitaan. Tällaiset virheet ovat avaruudessa usein bittivirheitä, joita ionisoiva säteily aiheuttaa muuttamalla bitin toiseksi. Suorittamalla laskuoperaatio uudelleen saadaan usein oikea, virheetön tulos.

New Horizons -luotaimen esittelyssä APL kutsuu suojakuoren rakennetta termospullomaiseksi. Suojakuori on kerrostettua PET-muovia, joka on alumiinoitujen Mylar- ja Kaptonmuovikelmujen välissä. Tällainen muovikelmujen laminaatti suojaa luotainta paitsi äärimmäisiltä lämpötiloilta, myös mikrometeoriittien iskeymiltä. [6] Voyager-luotaimien kuori on sen sijaan alumiinikennoa, jossa kahden ohuen alumiinilevyn välissä on hunajakennon tapaan alumiinisia väliseiniä [7]. Se ei eristä lämpöä yhtä hyvin ja on raskaampi, mutta tarjoaa suojaa mikrometeoriiteilta.

Suojautuminen avaruuden vaaroilta on onnistunut yli odotusten, sillä Voyager-luotaimet ovat edelleen toimintakuntoisia 42 vuoden matkansa jälkeen. Yksi häiriötila tapahtui vuonna 2010, jolloin Voyager 2 alkoi lähettämään tulkitsemiskelvotonta signaalia Maahan. Häiriön syyksi osoittautui bittivirhe luotaimen digitaalisessa muistissa,

jossa säteily oli vaihtanut yhden bitin tilan toiseksi. Ongelma onnistuttiin korjaamaan nollaamalla muisti. Suojaaminen on onnistunut myös New Horizons -luotaimessa, joka ei ole kärsinyt ongelmista.

3.3 Luotaimien maayhteys

Tiedonsiirtoyhteys Voyager- ja New Horizons -luotaimien ja Maan välillä onnistuu NASA:n Deep Space Network (DSN) -radioantenniverkoston avulla. DNS koostuu kolmesta jättiläismäisestä radioasemasta Maan pinnalla. Nämä asemat ovat sijoitettu noin 120° välein toisistaan pituuspiirien suunnassa. Ensimmäinen on Kaliforniassa, toinen on Madridissa, Espanjassa ja viimeinen on Canberrassa, Australiassa niin, että jokin niistä voi kommunikoida luotaimen kanssa mihin tahansa aikaan päivästä luotaimen näennäisestä sijainnista huolimatta. New Horizons- ja Voyager-luotaimien lisäksi DNS tukee kaikkia muitakin ulkoavaruuden luotaimia ja ryömijöitä sekä joitakin satelliitteja, joten luotaimien ja DNS:n välisen kommunikaation suunnittelussa on pitänyt ottaa huomioon ruuhkatilanteet. Esimerkiksi New Horizons- ja Voyager- luotaimien lisäksi vuonna 2018 DNS palveli muun muassa Curiosity-Marsryömijää, Kepler-teleskooppia ja JAXA:n³ Hayabusa2- luotainta. [13]

Aurinkokunnan reunamilla toimivien luotaimien radioyhteydet DNS:ään ovat heikot ja tiedonsiirtonopeudet ovat hitaita. Kuten aurinkopaneelien teho luvussa 2.2, Maassa vastaanotettujen radiolähetysten teho heikkenee yhtälön 1 mukaan, jossa r_1 ja r_2 ovat DNS aseman ja luotaimen väliset etäisyydet [7]. Vastaanottotehon heiketessä luotaimien on lähetettävä dataa hitaammin, käyttämällä jokaisen bitin lähettämiseen enemmän aikaa. Pidemmät bitit helpottavat heikon signaalin tehotasojen onnistunutta tulkittamista. Data on koodattu näihin tehotasoihin. Kuvassa 6 on esitetty Voyager- ja New Horizons -luotaimien tiedonsiirtonopeuksia eri etäisyyksillä Maasta.

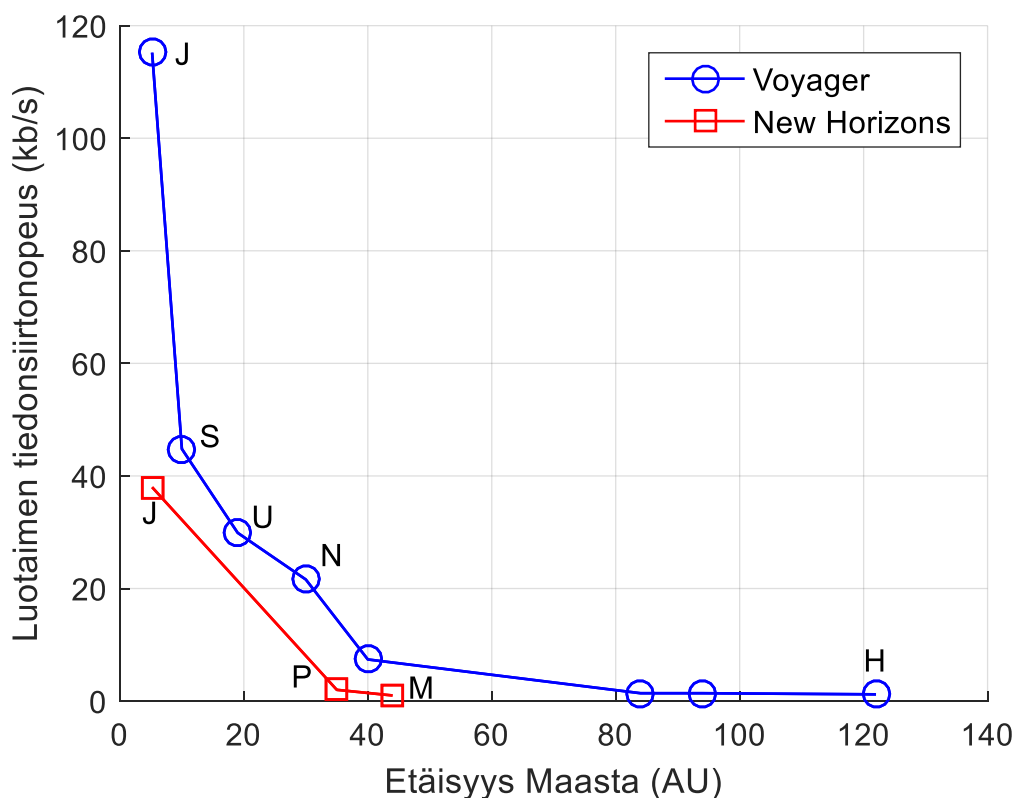
Pioneer 10 ja 11 sekä Voyager- luotaimet rakennettiin ilman käytännön kokemusta mistään aiemmista samanlaisista luotaimista. Voyager-luotaimien valmistuessa vuonna 1977 etäisin luotain, Pioneer 10, oli vasta juuri ohittanut Saturnuksen.

Voyager-luotaimien yhteys Maahan aurinkokunnan reunalta on niiden mikroaaltotaajuusalueella 8.0-12.0 GHz toimiva radiolaitte. Tämä radiolähetin voi lähettää signaalia kahdella eri tehoasetuksella. Luotaimen muiden laitteiden

³ JAXA on Japanin avaruusjärjestö

tehovaatimuksista riippuen lähetin käyttää joko tehoasetusta 71,9 W tai 48,3 W. Radiovastaanotin puolestaan tarvitsee vain 4,3 W tehoa. [14]

Voyager-luotaimien laukaisun jälkeen vuonna 1988 DSN:stä tuli tehokkaampi, kun sen yksi 64-metrinen antenni laajennettiin 70-metriseksi. Tämä päivitys oli merkittävä Voyager 2:n Uranuksen ja Neptunuksen ohitusten kannalta. Se pystyi lähettämään dataa paljon suuremmilla nopeuksilla kuin alun perin oli suunniteltu. Molemmat Voyager -luotaimet sekä New Horizons hyötyvät saman päivityksen tuomasta vastaanottokyvyn parannuksesta, kun ne lähettävät dataa Kuiperin vyöhykkeen toiselta puolelta. [14] Tämän lisäksi signaalinkäsittelyssä tehokkaammat tietokoneet auttavat heikkojen signaalien vastaanottamista luotaimilta. Kokemukset Pioneer 10:stä ja 11:sta ja Voyager 1:stä ja 2:sta mahdollistavat New Horizons -luotaimen ennätyspienen lähetystehon signaalien vastaanottamisen onnistuneesti. New Horizons -luotaimen radiolähetin toimii samalla taajuualueella kuin Voyager-luotaimien, mutta sen teho on vain 12 W [15].



Kuva 6. Kuvaajassa kirjaimet esittävät eri kohteita ja paikkoja aurinkokunnassa, joiden läheisyydessä tiedonsiirtonopeuksia on mitattu. J = Jupiter, S = Saturnus, U = Uranus, N = Neptunus, P = Pluto, M = 2014 MU69 ja H = heliopaussi. Sinisessä kuvaajassa on myös kolme nimeämätöntä pistettä. Ne esittävät Voyager-luotaimien tiedonsiirtonopeuksia paikoista, jotka eivät ole lähellä nimettyjä kohteita. Heliopaussi on aurinkokunnan reuna, jossa aurinkotuuli ja tähtienvälisen avaruuden säteilypainetta kumoavat toisensa.

Kuvasta 5 nähdään, että Voyager-luotaimien tietoliikennenopeuksien hidastuminen ei ole tasaista. Tiedonsiirtonopeudet olivat paremmat kuin alun perin oli suunniteltu Uranuksen ja Neptunuksen etäisyyksillä, koska DSN-Maaverkostoa päivitettiin. Kun Voyager-luotaimien tähtienvälinen tehtävä alkoi noin 40 AU etäisyydellä Maasta, olivat tietoliikennenopeudet pudonneet huomattavan mataliksi verrattuna nopeuksiin Neptunuksen etäisyydellä. Tämä johtui siitä, että luotaimet tuottivat dataa hitaammin uudessa tehtävässään, joten luotaimien prioriteettia pudotettiin DSN:än antennien työnjaossa. [14]

Luotaimien tuottaman datan määrä pieneni tämän tehtävän aikana niiden instrumenttien sammuaessa yksitellen ja niiden magneettinauhamuisti surkastui ajan kuluessa. Radioantenneja voidaan yhdistää voimakkaiksi verkoiksi, jolloin niiden vastaanottoteho paranee. Paras mahdollinen tiedonsiirtonopeus riippuu siitä, mitä antenneja käytetään luotaimien kuuntelemiseen. DSN on vuosien saatossa kuunnellut Voyager-luotaimien dataa eri antennien yhdistelmillä, jotka ovat ajoittain olleet voimakkaampia, ja ajoittain heikompia. Voyager-luotaimet lähettävät nykyään dataa Maahan noin kolme kertaa vuodessa. Muun ajan matkastaan Voyager-luotaimet ilmoittavat vain omasta kunnostaan nopeudella 160 b/s. [14]

New Horizons -luotaimen alun perinkin heikomman lähetystehon takia sen tiedonsiirtonopeudet ovat tällä hetkellä vastaavanlaisia kuin Voyager-luotaimien. Tiedonsiirto jatkuu nykyisellä vauhdillaan siihen asti, kun kaikki luotaimen Ultima Thule -ohituksen aikana kerätty data on lähetetty Maahan syyskuussa 2020. [6]

Voyager- ja New Horizons -luotaimien tiedonsiirtoyhteydet ovat toimineet suunnitellusti eivätkä ole katkenneet kertaakaan luotaimien pitkien tehtävien aikana. NASA odottaa pystyvänsä kommunikoidaan luotaimien kanssa niin kauan kuin luotaimilla riittää virtaa. Voyager-luotaimien virran odotetaan riittävän 2020-luvun puoliväliin saakka [14] ja New Horizons -luotaimen 2030-luvun puoliväliin [6].

4. YHTEENVETO

Tässä työssä verrattiin Voyager- ja New Horizons –luotaimien tietokonejärjestelmiä ja arvioitiin niiden tehtävissään suoriutumista. Voyager- ja New Horizons -luotaimien tehtävät ovat onnistuneet tähän mennessä suunnitellusti, ja luotaimet ovat saavuttaneet kaikki niille asetetut tavoitteet. Tarkoituksenmukaiset tietokonejärjestelmät ovat olleet luotaimien tehtävien onnistumisen kannalta elintärkeitä.

Voyager-luotaimien tietokonejärjestelmien toteutustapoja on käytetty lähes sellaisenaan myöhemmissä luotaimissa, kuten New Horizons -luotaimessa. Etenkin onnistunutta tietokonejärjestelmien hajautusta on jäljitelty, vaikkakin tietokoneiden määrä on toteutuksissa vaihdellut ja esimerkiksi New Horizons -luotaimessa tietokonejärjestelmässä on kaksi tietokonetta Voyager-luotaimien kolmen sijaan. Voyager-luotaimet myös käyttivät ensimmäistä kertaa CMOS-tietokoneita avaruusluotaimessa. Nykyään CMOS-mikroprosessorit ovat yleisiä niin satelliiteissa kuin luotaimissakin.

New Horizons -luotaimen tietokoneet eivät ole tietokonetekniikan kannalta erityisen innovatiivisia, vaan niissä on käytetty toimiviksi tunnettuja, turvallisia tietokoneratkaisuja. Luotainta rakennettaessa tietokonetekniikka oli jo kypsempi tekniikanala kuin Voyager-luotaimia toteutettaessa. Nykyään tietokoneet ovat halpoja verrattuna luotaimien kokonaiskuluihin ja uusien luotaimien toiminnalle asettaa rajat lähinnä niiden tietoliikennenopeudet, joten tietokoneiden valinnassa ei oteta riskejä vaan tyydytään mieluummin vähäisempään laskentatehoon.

Voyager- ja New Horizons -luotaimien tietoliikennemetodit ovat hyvin samanlaisia. New Horizons -luotaimessa kuitenkin pienempi antenni ja matalatehoisempi laitteisto rajoittaa sen tiedonsiirtokykyä verrattuna Voyager-luotaimiin. Voyager- sekä Pioneer 10 ja Pioneer 11 -luotainkokemusten avulla New Horizons -luotaimen heikomman tiedonsiirtolaitteiston signaaleja kuitenkin vastaanotetaan onnistuneesti.

Luotaimien suojauksessa erilaisten muovikelmujen kehittäminen mahdollisti New Horizons -luotaimen kevyen rakenteen verrattuna Voyager-luotaimien alumiiniseen rakenteeseen. Muovikelmut myös suojaavat New Horizons -luotainta paremmin lämpötilan vaihteluilta. Lukuun ottamatta luotaimien RTG:n sijoittelua, niiden tietokoneiden suojaaminen on toteutettu käyttäen samanlaisia keinoja.

Tämän kandidaatintyön tavoitteet on pääosin saavutettu. Ainoastaan Mongoose-V –prosessorin valmistajan toteuttamasta säteilysuojauksesta ei ollut maksuttomasti saatavilla tietoa. Muilta osin kaikkia vertailtavaksi suunniteltuja ominaisuuksia pystyttiin

vertailemaan. Mielenkiintoinen jatkoselvityksen aihe olisi New Horizons- ja Juno-luotaimien tietokonejärjestelmien vertailu. Juno on New Horizons- luotainta uudempi luotain, joka tutkii Jupiter-järjestelmää. Toinen mielenkiintoinen signaalinkäsittelyyn liittyvä jatkoselvityksen aihe olisi laajempi selvitys siitä, miten NASA:n DSN perustettiin, miten se toimii ja miten sen resursseja jaetaan eri luotaimille ja satelliiteille.

LÄHTEET

- [1] NASA Science Toolkits, NASA. Voyager and New Horizons PNG files. Verkkosivu saatavissa (viitattu 29.8.2019):
<https://science.nasa.gov/toolkits/spacecraft-icons>
- [2] Computers in Spaceflight: The NASA Experience, NASA, Ch2-5, Ch5-6 - Ch6-2. Verkkosivu saatavissa (viitattu 30.5.2019):
<https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/computers/CompSPACE.html>
- [3] SP-349/396 Pioneer Odyssey, NASA, Ch2. Verkkosivu saatavissa (viitattu 20.8.2019): <https://history.nasa.gov/SP-349/ch2.htm>
- [4] Voyager, Jet Propulsion Laboratory. Verkkosivu saatavissa (viitattu 25.7.2019):
https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/#where_are_they_now
<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-a-once-in-a-lifetime-alignment>
- [5] Basics of Space Flight: A Gravity Assist Primer, NASA. Verkkosivu saatavissa (viitattu 3.9.2019):
<https://solarsystem.nasa.gov/basics/primer/>
- [6] New Horizons NASA's Mission to Pluto and the Kuiper Belt, The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory. Verkkosivu saatavissa (viitattu 29.5.2019):
<http://pluto.jhuapl.edu/>
- [7] H. D. Young & R. A. Freedman, Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics 13th edition, Pearson Education, 2011, p. 488.
- [8] R. L. Heacock, "The Voyager Spacecraft", in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol 194 No.28 1980, s. 267-270. Verkkosivu saatavissa (viitattu 21.7.2019):
<https://web.archive.org/web/20140407063007/http://www.stickings90.webspace.virginmedia.com/voyager.pdf>
- [9] Spacecraft Power for New Horizons, NASA 2005. Verkkosivu saatavissa (viitattu 5.8.2019):
http://pluto.jhuapl.edu/Mission/Spacecraft/docs/NHRTG_FS_100804.pdf
- [10] Mongoose-V -kuva
https://www.geek.com/wp-content/uploads/2015/01/Mongoose-V-chip_inside.jpg
- [11] A. G. Stanley, K. E. Martin & W. E. Price, Voyager Electronic Parts Radiation Program, Volume I: Final Report, Jet Propulsion Laboratory publication 77-41. Verkkosivu saatavissa (viitattu 11.8.2019):
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780007219.pdf>
- [12] Mongoose-V MIPS R3000 Rad-Hard Processor, Synova Inc. tuote-esittely sivu. Verkkosivu saatavissa (viitattu 11.8.2019):
<https://web.archive.org/web/20051226235606/http://www.synova.com/proc/mg5.html>

- [13] About the Deep Space Network, NASA. Verkkosivu saatavissa (viitattu 28.8.2019):
<https://deepspace.jpl.nasa.gov/about/>
<https://deepspace.jpl.nasa.gov/about/commitments-office/current-mission-set/>
- [14] Ludwig, R. & Taylor, J. (2002). DESCANSO Design and Performance Summary Series Article 4 Voyager Telecommunications, NASA. Verkkosivu saatavissa (viitattu 29.5.2019):
https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso4--Voyager_ed.pdf
- [15] Greg Rienzi. (17.4.2015). How exactly does New Horizons send all that data back from Pluto?, Johns Hopkins University HUB. Verkkosivu saatavissa (viitattu 28.8.2019):
<https://hub.jhu.edu/2015/07/17/new-horizons-data-transmission/>