

**Tietokonelaitteistot NASA:n miehitetyillä avaruuslennoilla
Geministä Skylabiin**

Sampo Luukkainen

Helsingin yliopisto

Tietojenkäsittelytieteen laitos

Tietojenkäsittelytieteen historia -seminaari

Helsinki, 3.3.2005

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Gemini-avaruusohjelma	1
3	Apollo-projekti	4
4	Skylab-avaruusohjelma	7
5	Yhteenveto	10

1 Johdanto

Yhdysvaltojen avaruushallinnolla NASA:lla (*National Aeronautics and Space Administration*) on suuri merkitys tietokoneiden kehityksessä. Kun NASA perustettiin vuonna 1958, tietokoneet olivat hyvin suurikokoisia. Tietokoneiden rakentaminen ja ylläpito oli hyvin kallista ja niiden käyttämiseen tarvittiin paljon henkilökuntaa. Tietokoneiden koko pieneeni seuraavan vuosikymmenen aikana niin voimakkaasti, että tietokoneen ottaminen mukaan avaruuslennoille tuli mahdolliseksi. Tietokoneet tulivat samaan aikaan välttämättömiksi avaruuslennoilla. Niitä tarvittiin mm. avaruusalusten ohjauksessa ja navigoinnissa, asennon kontrolloinnissa sekä telakoitumisissa. Olosuhteet avaruusaluksilla asettivat suuria vaatimuksia tietokoneille. Niiden tuli olla äärimmäisen toimintavarmoja, ja niiden tuli kestää avaruuslentojen fyysisesti vaativissa olosuhteissa. Vaikka 60-luvulla markkinoilla olevat tietokoneet olivat kelvollisia NASA:n maanpäällisiin järjestelmiin, ne eivät kuitenkaan täyttäneet avaruuslentojen asettamia vaatimuksia. Tämän seurauksena NASA päätyi ensimmäisillä miehitetyillä avaruuslennoilla tilaustyönä tehtyihin tietokoneratkaisuihin. Avaruuslentojen asettamien vaatimuksien seurauksena NASA vaikutti tuona aikana suuresti tietokonelaitteistojen kehitykseen.

Tässä seminaarityössä luodaan lyhyt katsaus tietokonelaitteistojen käyttöön NASA:n miehitetyillä avaruuslennoilla Geministä Skylabiin. Kantorakettien tietokonejärjestelmät on jätetty käsittelyn ulkopuolelle. Työn lähde on *Computers in Spaceflight - The NASA Experience* [Tom88]. Luku 2 käsittelee tietokoneiden käyttöä Gemini-avaruusprojektissa. Luvussa 3 puolestaan kerrotaan tietokonejärjestelmistä Apollolennoilla. Luvussa 4 esitellään Skylab-avaruusaseman tietokonejärjestelmä. Viimeisessä luvussa luodaan yhteenveto esityksessä käsitellyistä asioista.

2 Gemini-avaruusohjelma

Gemini oli Yhdysvaltojen toinen miehitetty avaruusohjelma. Ensimmäisessä miehitetyssä avaruuskapselissa Mercuryssä, jolla suoritettiin kuusi avaruuslentoa vuosina 1961-1963, ei ollut käytössä digitaalista tietokonetta. Gemini-avaruusohjelmassa lennettiin vuosina 1965 ja 1966 yhteensä 10 avaruuslentoa, joista pisin kesti hieman alle kaksi viikkoa. Geminissä oli kahden hengen avaruuskapseli. Se oli ensimmäinen digitaalisella tietokoneella varustettu miehitetty avaruusalus. Aluksessa oli yksi tietokone, joka huolehti ohjauksesta ja

navigoinnista. Gemini muistutti ulkoisesti paljon edeltäjänsä Mercuryä. Suurimmat eroavaisuudet alusten välillä olivat Geminin suurempi koko, suurempi miehistö, oma tietokone sekä aluksen ohjauksessa käytettävä apuraketti. Avaruusaluksen uudet toiminnot vaativat oman tietokoneen. Nousuvaiheen aikana Titan-kantoraketin tietokone huolehti kantoraketin ohjauksesta. Gemini-tietokone toimi varakoneena Titanin tietokoneelle tämän vaiheen aikana. Oma tietokone oli myös sen takia tarpeellinen, että maassa ei tällöin tarvittu koko lentorataa kattavaa tietokoneverkkoa, jonka avulla Geminiä oltaisiin voitu ohjata. Geminin suorittamat laskelmat varmistettiin kuitenkin maassa sijaitsevalla tietokonejärjestelmällä.

Koneen rakenne

NASA solmi IBM:n kanssa sopimuksen Gemini-tietokoneen rakentamisesta Gemini-avaruuslentoja varten huhtikuussa vuonna 1962 ja toimitti 20 konetta vuoteen 1965 mennessä [Tom88]. Vaativat käyttöolosuhteet vaikuttivat suuresti koneen suunnitteluun ja komponenttien rakenteeseen. Sen kokoa ja painoa rajoittivat avaruusaluksen rajalliset tilat sekä kantoraketin kuljetuskyky. Kone oli kooltaan 50 cm x 35 cm x 30 cm, ja sillä oli painoa noin 27 kg. Se ei sisältänyt integroitua piirejä, vaan kaikki olivat diskreettejä komponentteja. Koneen kaikki puolijohteet oli ensimmäistä kertaa historiassa valmistettu kokonaan piistä. Geminin komponentteja ei oltu kahdennettu. Tietokoneen pääosat olivat aritmetiikka yksikkö, kontrolliyksikkö sekä keskusmuisti. Kuudennesta avaruuslennosta eteenpäin Geminin tietokoneen varusteluun lisättiin massamuistiasema. Kone pystyi suorittamaan 7000 käskyä sekunnissa eli yhden jakson aika oli noin 140 mikrosekuntia [Nas71]. Kone suoriutui yhteenlaskutoimituksesta yhden jakson aikana. Kertolaskukäskyn suorittamiseen tarvittiin aikaa kolme jaksoa eli 420 mikrosekuntia ja jakolaskun suorittamiseen kuusi jaksoa eli 840 mikrosekuntia. Kone oli oman aikansa koneeksi hidas. Hidas laskentanopeus johtui siitä, että laskutoimitukset suoritettiin sarjallisesti yksi bitti kerrallaan. Laskentanopeus oli jopa alhaisempi kuin joillakin tyhjiöputkiin perustuvilla tietokoneilla. Desimaaliaritmetiikkayksikön toteutus rajoitti suuresti myös laskentatarkkuutta. Rajoittunut laskentanopeus ja tarkkuus kuitenkin mahdollistivat tietokoneen yksinkertaisemman rakenteen ja pienemmän koon.

Keskusmuisti

Geminin keskusmuisti perustui ferriittiytimien käyttöön [Tom88]. Energian säästämiseksi tietokone voitiin sammuttaa avaruusaluksen ollessa vakaasti kiertoradalla. Koneen keskusmuisti ei tällöin kuitenkaan tyhjentynyt. Keskusmuisti koostui fyysisesti 39 tasosta, joista

jokainen oli taulukko kooltaan 64 x 64 bittiä. Tämä mahdollisti 4096 muistiosoitetta, jotka viittasivat 39 bitin mittaisiin sanoihin. Yksi sana puolestaan koostui kolmesta 13 bitin mittaisesta tavusta. Koneen käskyt olivat pituudeltaan 13 bittiä ja datan esitys 26 bittiä. Yksi muistipaikka voi siis sisältää joko 3 käskyä tai esimerkiksi yhden kokonaisluvun.

Massamuisti

1960-luvun alussa yleisin käytössä oleva tiedon massatallennusmenetelmä oli magneettinauha. Magneettinauha-asemien haku aika on kuitenkin erittäin huono. Levyihin perustuvat massamuistit olivat tuolloin vielä suurikokoisia ja liian epävarmoja avaruuslentoja varten. Geminin kehitysvaiheen aikana keskusmuisti alkoi kuitenkin vähitellen käydä liian pieneksi tarvittavalle ohjelmistolle. IBM:n ratkaisu ongelmaan oli magneettinauha-asema, jolta voitiin ladata tarvittavat ohjelmat keskusmuistiin avaruuslennon eri vaiheiden aikana [Tom88]. Massamuistin koko oli 1170000 bittiä. Yhden ohjelman lataaminen massamuistista keskusmuistiin kesti noin kuusi minuuttia. Magneettinauha-asema oli kooltaan noin 11 l. Magneettinauhat olivat 60-luvulla kohtuullisen virhealttiita. IBM saavutti Geminin nauha-asemassa virhetodennäköisyyden 1/1000 000 000 tallentamalla jokaisen bitin nauhalle kolmeen kertaan. Nauhaa luettaessa kolmen bitin välillä suoritettiin "äänestys", jonka voittaja-arvo ladattiin keskusmuistiin. Gemini-lentojen aikana havaittiin ainoastaan kerran laitteistovika. Koneen sammuttaminen ei onnistunut normaalilla tavalla uuden ohjelman keskusmuistiin latauksen yhteydessä. IBM ei kuitenkaan pystynyt toistamaan tätä vikaa maan päällä.

Rajapinnat

Gemini-tietokoneen käyttäjärajapinta koostui kolmesta osasta: kontrolliyksiköstä (*computer's controls*), manuaalisesta tiedonsyöttöyksiköstä (*Manual Data Insertion Unit*) sekä inkrementaalisesta nopeusmittarista (*Incremental Velocity Indicator*) [Tom88]. Kontrolliyksikkö koostui toimintamoodin valitsimesta, *start*-näppäimestä, toimintahäiriövalosta, laskevalosta sekä *reset*-näppäimestä. Toimintamoodin valitsimella voitiin valita ohjelma, jota haluttiin ajaa tietokoneella. Mahdollisia ohjelmia oli 6, joista kukin oli tarkoitettu eri lennon vaihetta varten. Valitsinta kääntämällä kyseinen ohjelma ladattiin massamuistista keskusmuistiin. *Start*-näppäin aloitti valitun ohjelman suorittamisen. Manuaalinen tiedonsyöttöyksikkö koostui *on/off*-, *readout*-, *clear*- ja *enter*-näppäimistä sekä numeronäppäimistä 0-9. Lisäksi yksikössä oli seitsemän numeron näyttö. Näytön kaksi ensimmäistä numeroa kuvasivat muistiosoitetta ja loput viisi muistipaikan sisältämää lukuarvoa. Tie-

donsyöttöyksiköllä voitiin kirjoittaa tai lukea yhteensä 99:ää eri muistiosoitetta. Inkrementaalinen nopeusmittari ilmaisi tietokoneen laskemat lennon aikana tarvittavat nopeuden muutokset kunkin kolmen koordinaattiakselin suhteen.

Järjestelmään oli myös kytketty inertiaalimittausyksikkö (*Inertial Measurement Unit*), tutka, referenssiaikajärjestelmä (*Time Reference System*), digitaalinen komentojärjestelmä (*Digital Command System*), asennon hallintajärjestelmä (*Attitude Control and Maneuver Electronics*) ja tiedonkeräysjärjestelmä (*Data Acquisition System*) [Tom88]. Inertiaalimittausyksikkö välitti tietokoneelle ja astronauteille tietoa aluksen kiihtyvyydestä kunkin kolmen koordinaattiakselin suhteen. Tutkaa käytettiin telakoitumisen yhteydessä etäisyyden ja tulokulman mittaamisessa. Digitaalisen komentojärjestelmä avulla koneelle voitiin syöttää maastakäsin komentoja. Tietokone syötti dataa asennon hallintajärjestelmälle, joka sääтели aluksen asentoa. Tiedonkeräysjärjestelmän avustuksella alukselta puolestaan kerättiin mittaustietoa, joka voitiin lähettää maahan.

3 Apollo-projekti

Apollo oli Yhdysvaltojen kuuhun kohdistunut miehitetty avaruusohjelma. Avaruusohjelmassa avaruuteen lennettiin vuosina 1968-1975 yhteensä 12 kertaa, joista 6:lla kerralla käytiin kuun pinnalla. Vuonna 1975 tehdyllä lennolla suoritettiin telakoituminen neuvostoliittolaisen Sojuz-aluksen kanssa.

NASA:n aikaisempien kokemusten mukaan oli tullut selväksi, että tietokone oli välttämätön varuste avaruuslennoilla. Kuuhun kohdistuvalla avaruuslennolla avaruusaluksen suuri etäisyys maasta aiheuttaa ylimääräisiä ongelmia verrattuna maata kiertävälle radalle kohdistuviin miehitettyihin lentoihin. Pitkä etäisyys olisi aiheuttanut aluksen ohjaukseen ylimääräisen 1.5 sekunnin viiveen, jos olisi turvauduttu pelkästään maanpäällisten tietokoneiden ohjaukseen. Vaativissa oloissa tapahtuvan kuun pinnalle laskeutumisen kannalta tämä viive olisi ollut liian pitkä. Vaikka alun perin Apollo-projektissa olikin tarkoitus rakentaa autonomisesti toimiva järjestelmä, joka ei olisi ollut kovinkaan riippuvainen maanpäällisistä järjestelmistä, lopulta päädyttiin ratkaisuun, jossa maanpäällisellä järjestelmällä oli suurempi rooli. Lopullisessa ratkaisussa suuri osa laskennasta suoritettiin maassa. Avaruusaluksella oleva järjestelmä huolehti kuitenkin itsenäisesti telakoitumisista sekä kuumoduulin laskeutumisesta kuuhun ja noususta kuun pinnalta. Lisäksi järjestelmä oli suunniteltu niin, että alus olisi tarvittaessa pystynyt palaamaan maanpinnalle itsenäisesti ilman maanpäälli-

sen järjestelmän tukea. Kaiken kaikkiaan Apollon tietokonejärjestelmä oli integroitu hyvin moniin tehtäviin aluksella, ja se oli huomattavasti paljon monimutkaisempi kuin Geminin tietokonejärjestelmä.

NASA solmi vuonna 1961 sopimuksen MIT:n (*The Instrumentation Laboratory of the Massachusetts Institute of Technology*) kanssa Apollo-projektiin tarvittavan ohjaus ja navigointijärjestelmän kehittämiseksi [Tom88]. MIT toimitti sekä tietokonelaitteiston että siihen kuuluvan ohjelmiston Apolloon. Itse tietokoneen rakentamisesta vastasi Raytheon. MIT:llä oli aikaisempaa kokemusta Polaris-ohjuksen ohjausjärjestelmän rakentamisesta, jota hyödynnettiin Apollo-projektissa.

Apollo-projektissa päädyttiin ratkaisuun, jossa kuuhun laskeutuisi pelkästään kuumoduuli komentomoduulin jäädessä samaan aikaan kuutakiertävälle radalla. Yhden tietokoneen järjestelmä ei siis ollut riittävä. Projektissa päädyttiin ratkaisuun, jossa Apolloon sijoitettiin kolme tietokonetta, joista kaksi oli identtisiä. Identtisistä *MIT/Raytheon AGC Block II* koneista toinen sijoitettiin komentomoduuliin ja toinen kuumoduuliin. Komentomoduulin AGC Block II kone toimi Apollon ohjaus- ja navigointijärjestelmässä, jonka varajärjestelmä sijaitsi maassa. Kuumoduulin AGC Block II kone puolestaan toimi kuumoduulin ohjausjärjestelmässä. Siinä käytettiin eri ohjelmistoa kuin komentomoduulissa sijaitsevassa koneessa. Kolmas kone *MARCO 4418 (Man Rated Computer)* sijoitettiin myös kuumoduuliin. MARCO oli osa kuumoduulin ohjausjärjestelmän varajärjestelmää. Jos kuumoduulin ohjausjärjestelmään olisi tullut vika kuuhun laskeutumisen aikana, varajärjestelmä olisi keskeyttänyt laskeutumisen. Kuumoduulin paluu kuutakiertävälle radalle ja telakoituminen komentomoduulin kanssa olisi tällöin tapahtunut varajärjestelmän avulla. Kuumoduulin varajärjestelmää ei tarvittu kertaakaan Apollo-lentojen aikana.

Apollon ohjaus- ja navigointijärjestelmään kuului kolme alijärjestelmää: inertiaaliohjaus- ja optinen navigointijärjestelmä sekä tietokone [Par74]. Inertiaaliohjausjärjestelmä havaitsi aluksen nopeuden ja asennon muutokset ja välitti tarvittavat ohjauskäskyt ohjauraketeille. Optisen navigointijärjestelmän avulla aluksen sijainti ja nopeus saatiin selville taivaankappaleiden sekä maan ja kuun maamerkkien sijainnin perusteella. Komentomoduulin ja kuumoduulin ohjausjärjestelmät olivat laitteistoltaan muuten samanlaiset, mutta kuumoduulissa ei ollut sekstanttia. Lisäksi moduulien optiset teleskoopit olivat erilaiset. AGC Block II koostui seitsemästä toiminnallisesta osasta, jotka olivat: ajastin, sekvenssigeneraattori, prosessori, keskusmuisti, syöttö ja tulostus, prioriteettikontrolli ja virtalähde [Par74]. Kone oli kooltaan noin 61 cm x 32 cm x 15 cm, ja sen paino oli 26 kg. Sähkön kulutus oli 100 W.

AGC Block koneita rakennettiin yhteensä 75 kappaletta. Koneen keskimääräinen vikaväli arvioitiin noin 4200 tunniksi, joka oli yli 10 kertaa pidempi aika kuin kuumatkan kesto.

Proessori

AGC Block koneen prosessori oli toteutettu integroitujen piirien avulla. Koneessa päädyttiin 16 bitin sanakokoon, vaikka 24-bittiset järjestelmät olivat tuolloin yleisiä [Tom88]. Sanan 16-bittistä yksi vastasi etumerkkiä ja toista käytettiin pariteettibittinä. Suurempaan kuin 14-bitin ilmaisemaan tarkkuuteen päästiin käyttämällä useampia 16 bitin sanoja. 16-bitin käskystä 4 bittiä käytettiin käskyn operaatiokoodina. Koneessa oli 34 eri käskyä. Jäljelle jäävillä 12 bitillä voitiin viitata 4096 eri muistiosoitteeseen. Koneessa oli kuitenkin muistia yhteensä 38 kilosanaa, johon viittaamiseen tarvitaan 16 bittiä. Muistiin viittaus on kuvattu tarkemmin keskusmuistia käsittelevässä kappaleessa. 16-bittisen järjestelmän etuja olivat mm. suurempi laskentanopeus ja laitteiston yksinkertaisempi rakenne. Suurin ongelmana 16-bittisessä järjestelmässä liittyi muistiviittauksiin.

AGC Block II suoriutui yhteenlaskutoimituksesta 23.4 mikrosekunnissa [Hal66]. Kertolaskukäskyn suorittamiseen tarvittiin aikaa 46.8 mikrosekuntia ja jakolaskun suorittamiseen 81.9 mikrosekuntia. Yksinkertaisen rakenteen saavuttamiseksi AGC Block koneissa oli vain yksi yhteenlaskupiiri, joka vastasi mm. *next address*-rekisterin päivittämisestä, muistiosoitteiden muodostamisesta ja aritmeettisista laskutoimituksista.

Keskusmuisti

Tietokoneen muisti koostui kahdesta eri tyyppisestä muistista: pysyvästä muistista (*fixed memory*) ja pyyhkiytyvästä muistista (*erasable memory*) [Hal72]. Pysyvään muistiin, jota oli 36 kilosanaa, oli tallennettu mm. kaikki ohjelmat sekä tarvittavat vakiot. Pysyvän muistin *core rope* -toteutustapa oli melko harvinainen. Sen tärkein etu verrattuna muihin tallennustapoihin oli tiedon tallentamisen suuri tiheys. Tallennustiheys tällä menetelmällä oli 2000 bittiä/kuutiotuuma. Pysyvään muistiin kirjoittaminen tapahtui muistia valmistavalla tehtaalla. Tämän jälkeen muistin sisältöä pystyttiin ainoastaan lukemaan. Pyyhkiytyvä muisti (*erasable memory*), jota oli vain 2 kilosanaa, oli toteutettu samalla tavalla kuin Geminin tietokoneen keskusmuisti. Tätä muistia käytettiin välitulosten tallentamiseen. Vaikka muistit olivat toteutukseltaan erilaisia, niiden hakuaika oli kuitenkin sama eli 11.7 mikrosekuntia [Hal66].

Jotta koko muistiin voitiin viitata, muisti oli jaettu 6144 sanan moduuleihin ja edelleen

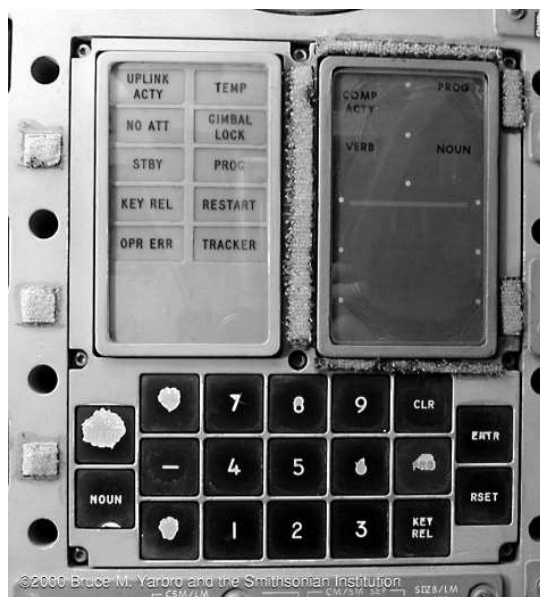
1024 sanan pankkeihin. Kahta ensimmäistä pankkia kutsuttiin pysyvä-pysyvä-muistiksi (*fixed-fixed memory*). Tähän muistiosaan voitiin viitata suoraan käskyjen 12 bitin muistiosoiteosasta. Prosessorissa otettiin käyttöön lisäksi kolme uutta erikoisrekisteriä (*erasable bank register*, *fixed bank register* ja *both bank register*) sekä superpankkibitti (*super bank bit*). Erikoisrekistereissä olevat bitit osoittivat missä muistipankissa osoite oli. Koko muistiavaruuteen viitattiin liitämällä käskyn muistiosoitteosaan rekisterissä olevat bitit sekä superpankkibitti. Tähän muistiin viittaamisratkaisuun päädyttiin, koska alkuperäisessä suunnitelmassa koneessa oli pysyvään muistia vain 4 kilosanaa ja pyyhkiytyvää muistia 256 sanaa, jolloin 12-bittinen osoiteavaruus olisi ollut riittävä. Toinen syy oli se, että ratkaisu yksinkertaisti tietokoneen rakennetta. Ratkaisun seurauksena ohjelmistosta tuli monimutkaisempi, koska muistiviittausten yhteydessä piti käyttää kiinteää osoitetta, kolmea rekisteriä sekä superpankkibittiä. Koneen vähäinen muisti aiheutti myös muita ongelmia ohjelmistojen suunnittelussa.

Käyttäjäraja

Astronautit kommunikoivat molempien AGC Block II koneiden kanssa näyttö- ja näppäimistöyksikkö *DSKY:n* (*Display & Keyboard*) (Kuva 1) välityksellä [Hal72]. Kaksi yksikköä oli liitetty komentomoduulissa olevaan ja yksi yksikkö kuomodulissa olevaan koneeseen. *DSKY* painoi noin 3.5 kg. *DSKY:ssä* oli kahden numeron verbi (*VERB*) ja substantiivi (*NOUN*) näytöt, kolme viiden numeron näyttöä, 19 näppäiminen näppäimistö sekä joukko varoitusvaloja. Viiden numeron näytöissä luvut voitiin näyttää joko 8- tai 10-lukujärjestelmän esitysmuodossa. Näppäimistö sisälsi numerot 0-9, mutta siinä ei ollut aakkosia. Ajettavien ohjelmien vaihtaminen ja interaktio niiden kanssa tapahtuivat verbi ja substantiivi näppäinten ja näyttöjen avulla. Astronautit olivat yleisesti sitä mieltä, että Apollon tietokoneet olivat helppokäyttöisiä.

4 Skylab-avaruusohjelma

Skylab oli kolmen hengen maata kiertävä avaruusasema. Se painoi 90 tonnia ja sen kierto-
radan etäisyys maasta oli noin 430 km. Skylab laukaistiin avaruuteen 14.05.1973 [Bel77]. Alun perin tarkoituksena oli lähettää avaruusasemalle heti seuraavana päivänä kolmen hengen miehistö, mutta Skylab vaurioitui laukaisun yhteydessä. Yksi sen aurinkopaneelista oli tuhoutunut kokonaan. Lisäksi toinen aurinkopaneeli ja aluksen suojakilpi olivat vaurioituneet. Skylab oli yhdysvaltojen ensimmäinen miehitetty avaruusalus, joka käytti



Kuva 1: Apollo 13:sta näyttö- ja näppäimistöyksikkö
(<http://history.nasa.gov/afj/pics/dsky.jpg> - 3.3.2005).

aurinkoenergiaa voimanlähteenään. Aurinkopaneelien vaurioituminen aiheutti siis ongelmia myös sen tietokonejärjestelmälle. Ensimmäinen miehistö saapui avaruusasemalle 10 päivää sen laukaisua myöhemmin. Miehistö sai korjattua avaruusaseman käyttökuntoon. Avaruusasemalla kävi yhteensä kolme eri miehistöä vuosien 1973 ja 1974 aikana. Miehistöt olivat asemalla 1-3 kuukautta kerrallaan.

Proessori ja laitteiston rakenne

Vuonna 1969 NASA teki sopimuksen IBM:n kanssa tietokonejärjestelmän toimittamisesta Skylabiin [Tom88]. Järjestelmään kuului kaksi täysin samanlaista *Apollo Telescope Mount Digital Computer (ATMDC)* konetta, joissa molemmissa oli myös sama ohjelmisto. Koneet olivat osa Skylabin asento- ja suuntaushallintajärjestelmää (*Skylab Attitude and Pointing Control System - APCS*). Toinen koneista toimi primäärikoneena ja toinen sekundäärisenä koneena. Aktiivinen kone voitiin valita valitsimella manuaalisesti, mutta normaalin toiminnan aikana redundanssinhallintaohjelmisto huolehti aktiivisen koneen valinnasta automaattisesti. ATMDC-tietokonejärjestelmä koostui kahdesta prosessorista, kahdesta erilli-

sestä keskusmuistista, kahdesta I/O-sektiosta, ohjelmanlatausyksiköstä, virtalähteestä sekä yleisestä osasta. Yleinen osa sisälsi mm. redundanssin hallinnan. APCS oli ensimmäinen todellinen digitaalinen kaksinnettu tietokonejärjestelmä, joka oli käytössä avaruusaluksella.

Kahdesta edellisestä miehitetystä avaruuslento-ohjelmasta poiketen NASA päätyi kaupallisen prosessoriin Skylabin tietokoneparatkaisussa. Prosessoriksi valittiin *IBM 4Pi* sarjan prosessorin 16-bittinen *TC-1* versio. *4Pi* perustui IBM:n 60-luvun alussa kehittämään *System 360* arkkitehtuuriin. Käyttämällä valmista kaupallista prosessoria NASA välttyi niiltä suurilta laitteisto-ongelmilta, joita se oli kohdannut Gemini- ja Apollo-projekteissa. Kyseinen kaupallinen prosessoriratkaisu osoittautui niin onnistuneeksi, että samaan ratkaisuun päädyttiin myöhemmin myös avaruussukkulan kohdalla. Avaruussukkulassa, kuten myös F-15 hävittäjässä ja B-52 pommikoneessa, käytettiin Skylabista poiketen *4Pi*:n 32-bittistä *AP-101* versiota.

Tietokoneen käyttöliittymä oli hyvin yksinkertainen. Se koostui kymmenestä näppäimestä (luvut 0-7, *clear* ja *enter*), aktiivisen tietokoneen valitsimesta sekä digitaalisesta näytöstä. Koneelle annettava syöte annettiin 8-järjestelmän lukuina.

Keskusmuisti

Molemmissa ATMDC-tietokoneissa oli keskusmuistia 16384 sanaa [Tom88]. Muisti oli jaettu kahteen eri moduuliin. Koska koneen muistiavaruuden laajuus oli vain 8192 osoitetta, käytössä oli erillinen valitsin, joka osoitti kumpi moduuleista oli käytössä. Käytetty muistityyppi (*destructive readout core memory*) oli rakenteeltaan sellainen, että luettu muisti paikka piti aina lukemisen jälkeen virkistää, jotta dataa ei olisi kadonnut. Muistista juuri luetusta datasta kirjoitettiin aina kopio puskuriin ennen kuin data välitettiin prosessorille. Tämän jälkeen puskurin sisältö kirjoitettiin uudelleen muistiin samaan kohtaan mistä se oli juuri luettu.

Ohjelmanlatausyksikkö

Skylabin alkuperäiset suunnitelmat eivät sisältäneet ollenkaan massamuistia. Vuonna 1971 järjestelmään kuitenkin lisättiin ohjelmanlatausyksikkö [Tom88]. Ohjelmanlatausyksikössä tiedon tallentamiseen käytettiin magneettinauhaa. Yksikön tarkoitus oli järjestelmän toimintavarmuuden lisääminen. Se sisälsi kopion keskusmuistissa normaalisti olevasta ohjelmistosta, joka voitiin virhetilanteen sattuessa ladata uudelleen keskusmuistiin. Koko ohjelmiston lataaminen keskusmuistiin kesti noin 11 sekuntia. Ohjelmanlatausyksikkö sisälsi

myös pelkistetyn version ohjelmistosta. Pelkistetty versio oli noin 8 kilosanoin pituinen ja se voitiin ladata yhteen muistimoduuliin. Kolmen muistimoduulin mennessä epäkuuntoon pelkistetty ohjelmaversio voitiin ladata jäljellä jääneeseen toimivaan muistimoduuliin.

Skylabin loppuvaiheet

Skylabin tietokonejärjestelmä osoittautui hyvin toimivaksi. IBM rakensi ATMDC-tietokonejärjestelmiä Skylab-projektia varten yhteensä 10 kappaletta. Skylabin ensimmäisen ja toisen toimintajakson yhteispituus oli yli 600 päivää. Järjestelmä toimi tuon ajan virheettömästi. Ensimmäisen toimintajakson jälkeen järjestelmä sammutettiin yli neljäksi vuodeksi. Skylabin oli arvioitu pysyvän maatakiertävällä radalla 80-luvun puoliväliin asti, mutta auringon ennakoimattoman toiminnan seurauksena se alkoi vähitellen menettää lentokorkeuttaan [Bel77]. Sen tietokonejärjestelmä aktivoitiin uudelleen avaruusaseman pelastamiseksi. Epäilyistä huolimatta järjestelmän uudelleen aktivoiminen onnistui ilman suurempia ongelmia. Pelkona oli, että muistinvirkistämiseen liittyvät komponentit eivät heti alussa toimisi, jonka seurauksena ohjelmisto pyyhkiytyisi keskusmuistista pois. Skylabin siirtämiseksi kaukaisemmalle kiertoradalle suunniteltiin sukkulalentoa. Skylabin pelastamisesta kuitenkin luovuttiin, koska sukkulalentoja ei ehditty aloittaa riittävän aikaisin. Avaruusasema syöksyi maahan kesällä 1979.

5 Yhteenveto

Tässä seminaarityössä kuvattiin Yhdysvaltojen kolmen eri miehitetyn avaruushjelman (Gemini, Apollo ja Skylab) tietokonelaitteistoja. Lennot olivat järjestyksessään kolme ensimmäistä miehitettyä avaruuslentoa, joissa avaruusaluksella oli mukana digitaalinen tietokone. Työssä keskityttiin pelkästään itse avaruusaluksien tietokonejärjestelmiin. Kantorakettien sekä maassa sijaitsevien avaruuslentoa tukevien tietokonejärjestelmien käsittely sivuutettiin miltei kokonaan.

Avaruuslennot asettavat suuria vaatimuksia tietokoneille. Niiden toimintavarmuus tulee olla huippuluokkaa. Lisäksi niiden tulee mm. kestää ja pysyä toimintakykyisinä rasittavan nousuvaiheen aikana sekä vaihtelevissa lämpötilaolosuhteissa. Kahden ensimmäisen projektin eli Geminin ja Apollon aikaan ei ollut vielä saatavilla kaupallista prosessoria, joka olisi täyttänyt NASA:n prosessoreille asettamat tiukat vaatimukset avaruuslennoilla. Erityisesti Apollo-projektissa oman prosessorin toteuttaminen osoittautui hyvin kalliiksi,

aikaa vieväksi ja hankalaksi ratkaisuksi. Skylab-avaruusohjelmassa puolestaan käytettiin IBM:n kaupallista 4Pi prosessoria. Ratkaisu osoittautui onnistuneeksi ja sitä käytettiin myöhemmin myös avaruussukkuloissa. Kaiken kaikkiaan NASA:lla oli hyvin suuri merkitys tietokonelaitteistojen yleismaailmallisessa kehittämisessä 60- ja 70-luvuilla. Tämä oli seurausta avaruuslentojen tietokoneille asettamista tiukoista vaatimuksista.

Viitteet

- [Bel77] L. Belew. *Skylab, Our First Space Station*. NASA SP-400, Jun. 1977,
http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770020211_1977020211.pdf
(3.3.2005).
- [Hal66] E. Hall. *Case History of the Apollo Guidance Computer*. Manned Spacecraft
Center of NASA, DSR Project 55-238, June 1966,
http://klabs.org/history/history_docs/mit_docs/1675.pdf (3.3.2005).
- [Hal72] E. Hall. *MIT's Roll in Project Apollo, Vol. III: Computer Subsystem*. Final Re-
port on Contracts NAS 9-163 and NAS 94065, Aug 1972,
http://klabs.org/history/history_docs/mit_docs/1029.pdf (3.3.2005).
- [Nas71] *Spaceborne digital computer systems*. NASA SP-8070, Mar. 1971,
http://klabs.org/history/history_docs/sp-8070/sp-8070.htm (3.3.2005).
- [Par74] P. Parker. *The Apollo On-board Computers*. NASA History Office, The Apollo
Flight Journal, 1974,
<http://history.nasa.gov/afj/compassay.htm> (3.3.2005).
- [Tom88] J. Tomayko *Computers in Spaceflight - The NASA Experience*. NASA Contrac-
tor Report 182505, Mar. 1988,
<http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/computers/CompSPACE.html>
(3.3.2005).