

Paula Holmlund

Aalto-1-nanosatelliitin spektrikameran elektroniikan lämpövuorottelutestaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikka

Insinöörityö

28.1.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Paula Holmlund Aalto-1-nanosatelliitin spektrikameran elektroniikan lämpö- vuorottelutesti 27 sivua 28.1.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	Lehtori Timo Kasurinen Erikoistutkija Christer Holmlund
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin Aalto-1-nanosatelliitin Aasi-spektri- kameran pääpiirilevyn kiihdytetty lämpövuorottelutesti. Tavoitteena oli testata muovisten BGA-piirien juotosten kestävyyttä. Testiä varten suunniteltiin testipiirilevy, johon testattava piirilevy asennettiin.</p> <p>Työssä laskettiin Norris–Landzbergin kaavalla testin kiihdytyskerroin, jonka mukaan kortti- en tulisi kestää testissä 732 jaksoa rikkoutumatta. Tämä vastaisi kahden vuoden käyttöä avaruudessa.</p> <p>Lämpövuorottelutesti käsitti 283 jaksoa lämpötilan vaihdellessa -45 °C ja 90 °C välillä. Tes- ti keskeytettiin suuren vikamäärän vuoksi. Kortit eivät läpäisseet testiä, mutta testi antoi arvokasta tietoa kortin seuraavan version suunnittelua varten.</p>	
Avainsanat	Kiihdytetty testaus, lämpövuorottelutesti, juotos, luotettavuus

Author Title	Paula Holmlund Thermal Cycling Test of the Spectral Camera Electronics of the Aalto-1-Nanosatellite
Number of Pages Date	27 pages 28 January 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Specialisation option	
Instructors	Timo Kasurinen, Senior Lecturer Christer Holmlund, Senior scientist
<p>In this final project a thermal cycling test of the main circuit board of the Aasi spectral imager of the Aalto-1-nanosatellite was developed and implemented. The aim of the work was to qualify the use of plastic BGA components.</p> <p>According to Norris – Landsberg’s formula for the acceleration factor the circuit boards should endure 732 test cycles without failures. This corresponds to two years operation in space.</p> <p>The thermal cycling test spanned 283 cycles of temperature variation between -45 °C and 90 °C. The test was interrupted due to the high number of failures. The circuit boards did not pass the test, but the test gave valuable information for the design of the next version of the board.</p>	
Keywords	Accelerated test, thermal cycling, solder, reliability

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aalto-1-satelliitti	2
2.1	Spektrikamera Aasi	3
2.2	Plasmajarru ja säteilyilmaisin	5
3	Kiihdytetty lämpövuorottelutestaus	5
3.1	Lämpölaajeneminen	6
3.2	Norris–Landzbergin kiihdytyskerroin	7
3.3	Juotosten testaus	8
4	Pääpiirilevyjen testaus	10
4.1	Tiedonsiirto FPGA:n ja mikrokontrollerin välillä	12
4.2	Kuvasensorisignaalien testaus	13
4.3	Muistipiirin signaalien testaus	14
4.4	FPGA:n ja OBC:n välisten signaalien testaus	15
4.5	Testattujen signaalien juotoskohdat FPGA:ssa	17
5	Lämpövuorottelutestin kulku	19
5.1	Kiihdytyskertoimen laskeminen	20
6	Tulosten käsittely	21
6.1	Vika-analyysi	23
6.2	Jatkotoimenpiteet	24
7	Yhteenveto	24
	Lähteet	26

Lyhenteet

AaSI	Aalto Spectral Imager; Aalto-1–satelliitin spektrikamera
BGA	Ball Grid Array; integroidun piirin kotelotyyppi
EPS	Electrical Power Supply; satelliitin tehon syöttöyksikkö
FPGA	Field Programmable Gate Array; ohjelmoitava logiikkapiiri
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit; satelliitin kiertorata, 35 786 km korkeudella
ISS	International Space Station; kansainvälinen avaruusasema
LEO	Low Earth Orbit. Satelliitin kiertorata; tyypillisesti 150 - 900 km korkeudella
LVDS	Low-Voltage Differential Signaling; signaalin siirtotapa
OBC	Onboard Computer; satelliitin tietokone
PADS	Mentor Graphics -piirilevysuunnitteluohjelmisto.
RGB	Red Green Blue; näkyvän valon spektrialue
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances; Euroopan unionin säännös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa
UHF	Ultra high frequency; radiotaajuusalue 0,3 - 3 GHz
VHF	Very high frequency; radiotaajuusalue 30 - 300 MHz
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT

1 Johdanto

Tämä insinööriyö on tehty Teknologian tutkimuskeskus VTT:ssä. VTT suunnittelee ja rakentaa Aalto-1-satelliittiin spektrikameran Aasi. Työssä tehdään Aalto-1-nanosatelliitin Aasi-instrumentin pääpiirilevylle kiihdytetty lämpövuorottelutesti, jolla pyritään selvittämään, onko muovisten BGA-koteloisten komponenttien käyttäminen mahdollista tässä sovellutuksessa.

Lämpövuorottelutesti ei kuulu satelliitti-instrumentin ympäristötestausohjelmaan. Siihen kuuluvat mm. tärinä- ja termovakuumitestit. Ympäristötestit tehdään tasoilla, joita testattavan instrumentin pitää kestää rikkoutumatta. Lämpövuorottelutesti tai lämpövaihtelutesti sen sijaan on kiihdytetty elinikätesti, jossa testattavaa laitetta tai komponenttia rasitetaan normaalikäyttöä enemmän ja testataan, kunnes laite tai komponentti rikkoutuu.

Tässä työssä käytetyt ohjelmat ovat vain hieman muutettuja aikaisemmin käytetyistä spektrikameroiden ohjelmista.

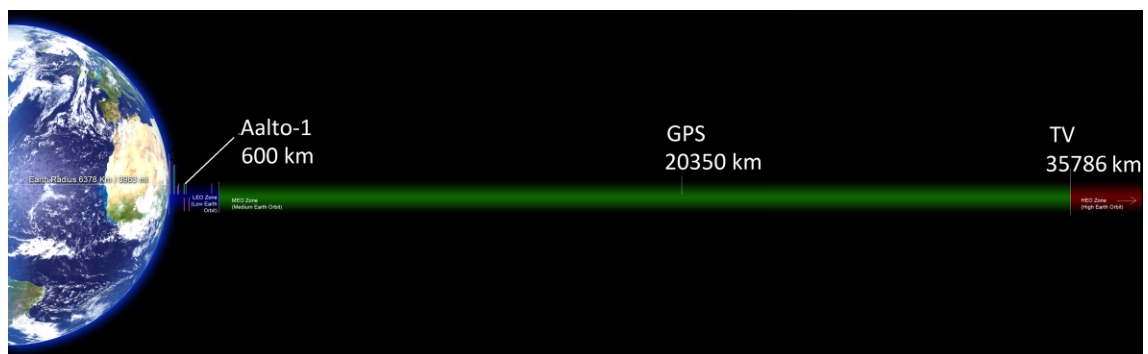
2 Aalto-1-satelliitti

Aalto-1-satelliitti on Aalto-yliopiston opiskelijaprojektina toteutettava Suomen ensimmäinen satelliitti. Satelliitin hyötykuormina on VTT:n kehittämä spektrikamera Aasi, Helsingin ja Turun yliopistojen suunnittelema säteilyilmaisin Radmon ja tämän alapuolella Ilmatieteen laitoksen suunnittelema plasmajarru Plasma brake (kuva 2, ks. s. 3). Muut kuvassa näkyvät osat ovat tehonsyöttöjärjestelmä EPS, asennon määrittely ja säätöjärjestelmä ADCS, S-alueen radiolähetin, akut, tietokone OBC- ja VHF- ja UHF-radio. Kuvasta puuttuvat radioantennit sekä aurinkokennot, jotka peittävät satelliitin joka puolelta.

Nanosatelliitti on hyvin pieni satelliitti, jonka massa on 1 - 10 kg. Tätä pienempiä satelliitteja sanotaan pikosatelliiteiksi ja 10 - 100 kg painavia mikrosatelliiteiksi. Isot satelliitit voivat painaa tuhansia kilogrammoja, esimerkiksi Envisat-satelliitin lähtömassa oli 8211 kg. [1.]

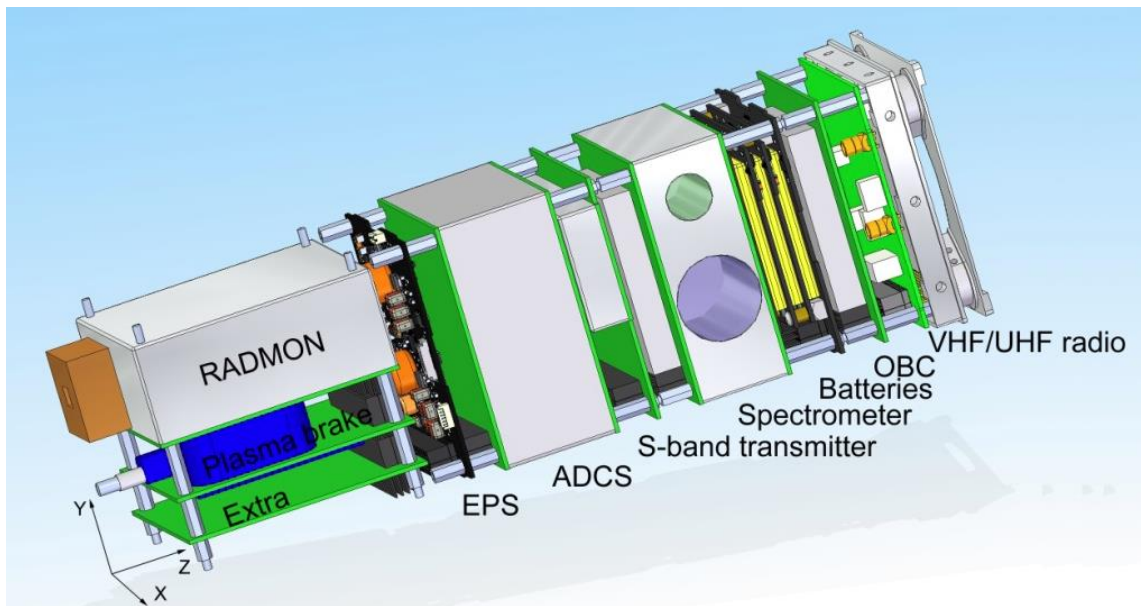
Aalto-1-satelliitti tulee kiertämään maapalloa matalalla aurinkosynkronisella radalla. Satelliitti kiertää maapalloa aina aurinkoon nähden samassa kulmassa. Yksi kierros kestää noin 90 minuuttia. Kiertoaika määräytyy radan korkeudesta, joka on noin 600 km maan pinnasta. Tällaista rataa kutsutaan LEO:ksi (Low Earth Orbit). Tällä ratakorkeudella kiertävät myös vakoilu- ja kaukokartoitussatelliitteja sekä kansainvälinen avaruusasema ISS. [2.]

Esimerkiksi TV-satelliitit kiertävät maapalloa paljon korkeammalla radalla ja niiden yksi kierros kestää 24 tuntia (kuva 1). Tällä samalla ratakorkeudella GEO (Geosynchronous Equatorial Orbit) kiertävät myös esim. Meteosat-säätösatelliitit. [3.]



Kuva 1. Esimerkkejä eri satelliittien ratakorkeuksista (lähdettä 2 mukaillen)

Aalto-1-satelliitti on hieman maitopurkkia suurempi, $34 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ja painaa noin 4 kg. Runko on rakennettu erityisesti yliopistosatelliitteja varten kehitettyä Cubesat-konseptia käyttäen. Siinä runko koostuu $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ kuutioista, joita voidaan laittaa päällekkäin yhdestä kolmeen kappaletta. Standardoiduille rungoille on mahdollista käyttää muualla kehitettyjä osia. Myös laukaisualustoissa on valmiita paikkoja Cubesat-nanosatelliiteille. Kuvassa 2 esitetään Aalto-1-satelliitin eri osat. [4;5.]



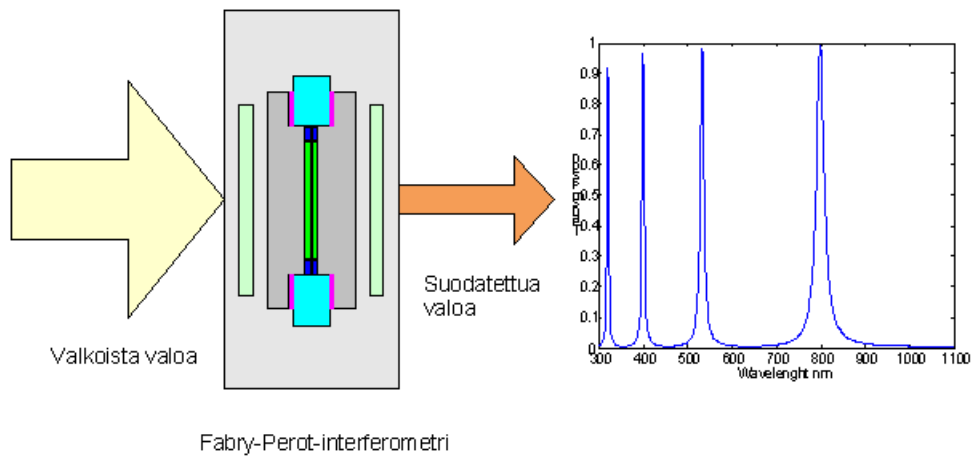
Kuva 2. Aalto-1-satelliitin osat [4.]

2.1 Spektrikamera Aasi

Spektrikamera Aasi (Aalto-1 Spectral Imager) perustuu kahteen puoliläpäisevään peiliin, jotka ovat yhdensuuntaiset ja lähellä toisiaan. Tätä komponenttia kutsutaan Fabry-Perot-interferometriksi ja se toimii säädettävänä valon suodattimena. Säättämällä peilien etäisyyttä toisiinsa nähdessä voidaan valita, minkä aallonpituista valoa pääsee suodattimen läpi (kuva 3, ks. seur. s.). Peilien etäisyyttä toisiaan nähdessä voidaan säätää 0,5:stä 1,5 μm :iin (vertaa hiuksen paksuus on noin 50 μm).

Käytettävä aallonpituusalue on väliltä 500–900 nm. Aallonpituus 500 nm vastaa sinivihreää väriä ja 900 nm on näkymätöntä infrapunaa. Tarvittaessa käytettävät aallonpituuskaistat voidaan valita myös maasta käsin. Spektrikamerassa on optiikka, joka

muodostaa kuvan kuvailmaisimelle halutulla aallonpituudella. Spektrikameran lisäksi Aasissa on tavallinen RGB-värikamera, jonka aallonpituusalue on 400–700 nm. Tarkoituksena on osoittaa, että myös pienet spektrikamerat pystyvät toimimaan avaruudessa. [6.]



Kuva 3. Spektrikameran säädettävä suodin

Aasin elektronikka perustuu aikaisemmin VTT:ssä toteutettujen spektrikameroiden elektronikkaan. Vaikka instrumentin käyttökohde on satelliitissa, toteutus perustuu kuitenkin teollisuuselektronikan laatuvaatimukseen eikä esim. Euroopan avaruusjärjestön laatuvaatimukseen kustannussyistä. Spektrikameran elektronikalle suunniteltiin kuitenkin uusi pääpiirilevy käyttäen PADS-ohjelmistoa. Pääpiirilevyn täytyi olla tietyn muotoinen mahtuakseen annettuun tilaan (kuva 4, ks. seur. s.). Myös sähköiset liittynät satelliitin muihin yksiköihin olivat uusia.



Kuva 4. Aasin pääpiirilevy

2.2 Plasmajarru ja säteilyilmaisim

Plasmajarru on pitkä johtava lanka, joka varataan joko negatiivisesti tai positiivisesti. Varattu lanka jarruttaa satelliitin vauhtia, ja se painuu vähitellen alas ilmakehään ja tuhoutuu. Näin avaruuteen jää vähemmän avaruusromua. [7.]

Radmonin säteilyilmaisimilla voidaan mitata niihin osuvien elektronien ja protonien määrää ja energiaa. Hiukkassäteily on tuhoisaa avaruuselektronikalle. Tulevia nanosatelliittiprojekteja varten halutaan mitata säteilyn määrää, jotta osataan rakentaa sopivat säteilysuojat.

3 Kiihdytetty lämpövuorottelutestaus

Avaruuselektronikan keskeisimpiä laadunvarmistusmenetelmiä on juotosliitosten silmäääräinen tarkastus. Tämän suorittaa siihen koulutettu henkilö. Aasin elektronikas-
sa käytetään BGA-kotelossa olevia komponentteja, joita ei käytetä avaruuselektronii-
kassa sen takia, ettei visuaalisesti pystytä tarkastamaan piirin alla olevia juotoksia.

Aalto-1-nanosatelliitin kannalta on aina päivä tai yö. Se on puolet ajastaan auringon puolella ja puolet aurinkoon nähden maapallon varjossa. Satelliitin lämpötila vaihtelee koko ajan. Aurinko lämmittää sitä päiväpuolella, ja yöpuolella se luovuttaa lämpöä ava-

ruuteen. Lämpötilan muutos aiheuttaa piirilevyillä lämpölaajenemisen takia muuttuvia jännityksiä komponenttien juotoksiin, jotka ajan myötä aiheuttavat juotoksiin halkeamia ja kontaktien menettämisiä.

3.1 Lämpölaajeneminen

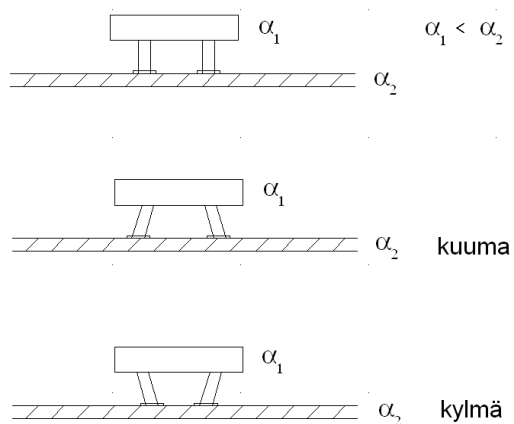
Elektroniikan vioista usein valtaosa liittyy jollain tavalla lämpörasitukseen. Lähes kaikkien materiaalien ja komponenttien ominaisuudet muuttuvat lämpötilan mukaan erilaisilla. Piirilevyn vikaantumiseen liittyy keskeisesti eri materiaalien lämpölaajenemiskertoimien erot.

Kappaleen lämpölaajenemista Δl kuvaa yhtälö

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$

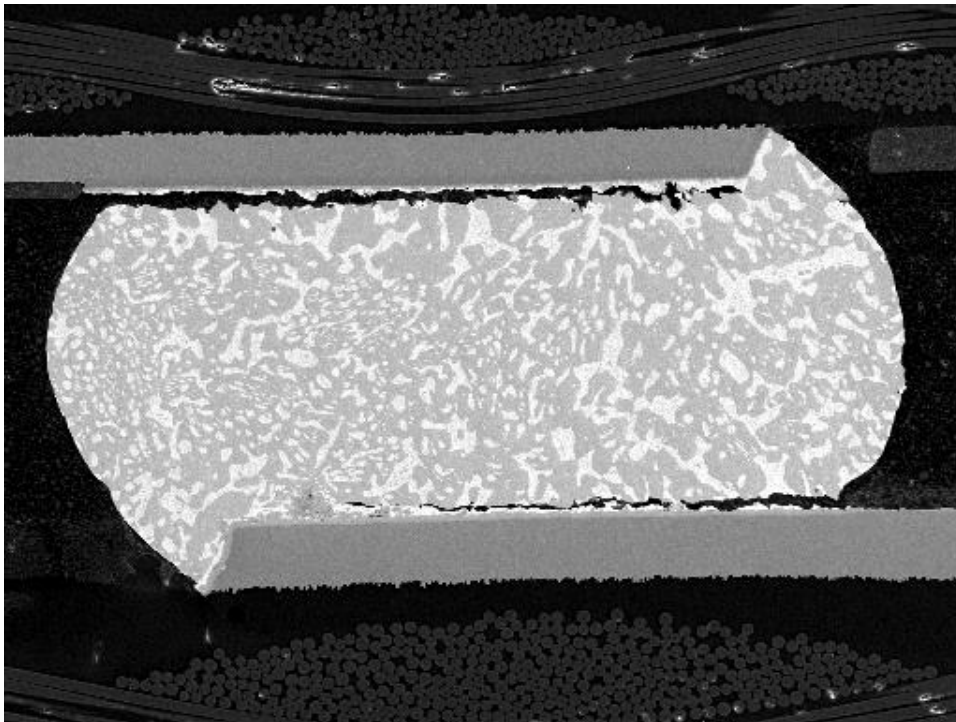
missä α on materiaalin lämpölaajenemiskerroin, l_0 on kappaleen alkuperäinen pituus ja ΔT on lämpötilan muutos.

Eri materiaaleilla on erilaiset lämpölaajenemiskertoimet. Tästä syystä esimerkiksi vastus ja sen alla oleva piirilevy pyrkivät laajenemaan eri tavalla lämpötilan muuttuessa. Tätä kuvataan kuvassa 5, missä vastuksella (α_1) on pienempi lämpölaajenemiskerroin kuin piirilevyllä (α_2). Vastus on juotettu lujasti kiinni piirilevyyn, joten lämpölaajeneminen aiheuttaa jännityksiä sekä vastukseen, piirilevyyn että juotoksiin.



Kuva 5. Esimerkki eri lämpölaajenemiskertoimien aiheuttamista muodonmuutoksista

Piirilevyn joutuessa toistuvasti vaihteleviin lämpötiloihin voivat muuttuvat jännitykset aiheuttaa väsymismurtumia juotoksissa. Vastaava tilanne syntyy myös piirilevyn kuparin ja juotteen rajapinnassa (kuva 6). Väsymismurtumia voi syntyä usein toistuvista pienistä tai harvemmin esiintyvistä suurista jännitysvaihteluista. Vikoja voidaan analysoida väriaine- ja hietutkimuksilla, joissa väriaineet tunkeutuvat murtuneisiin kohtiin, mutta nämä eivät kuuluneet tähän työhön.



Kuva 6. Termomekaanisen rasituksen aiheuttama juotosliitoksen väsymismurtuma [8.]

3.2 Norris–Landzbergin kiihdytyskerroin

On todettu, että jännitysmurtumien kasvuvauhtia voidaan nopeuttaa lisäämällä jännitysvaihteluita. Lämpötilasta johtuvien murtumien esiintymistodennäköisyyttä voidaan kiihdyttää kasvattamalla lämpötilavaihteluita esimerkiksi sääkaapissa. Tätä kutsutaan kiihdytetyksi lämpövuorottelutestiksi. Se, miten suurempi lämpötilavaihtelu vaikuttaa halkeamien ja vikojen syntyyn, voidaan arvioida Coffin - Mansonin tai Norris - Landzbergin kaavoilla, joita käytetään kiihdytetyn lämpövuorottelutestin ja normaaliolosuhteiden vertaamiseen. Jos kiihdytetyssä testissä vikaantuminen tapahtuu N_{testi} :n syklin

jälkeen, voidaan arvioida normaalitilanteessa vikaantumiseen menevä syklien lukumäärä $N_{kenttä}$ kaavasta

$$N_{kenttä} = AF * N_{testi}$$

Kiihdytyskerroin AF lasketaan kaavasta

$$AF = \left(\frac{\Delta T_{testi}}{\Delta T_{kenttä}} \right)^a \left(\frac{f_{kenttä}}{f_{testi}} \right)^b e^{\left[c \left(\frac{1}{T_{max,kenttä}} - \frac{1}{T_{max,testi}} \right) \right]}$$

missä ΔT_{testi} on lämpötilan muutos testin aikana, $\Delta T_{kenttä}$ on lämpötilan muutos normaalikäytössä, f_{testi} on testisyklien lukumäärä esimerkiksi vuorokaudessa, $f_{kenttä}$ on syklien määrä normaalikäytössä esimerkiksi vuorokaudessa. $T_{max,kenttä}$ ja $T_{max,testi}$ ovat maksimilämpötiloja normaali- ja testitilanteessa. Kaavan vakiotermit a , b ja c on määritelty kokeellisesti ja ne riippuvat komponenttityypistä. Tässä työssä ollaan kiinnostuneita lähinnä muovisista BGA-piireistä, joille on käytetty arvoja $a = 1,26$, $b = 0,02$ ja $c = 3503$. [9.]

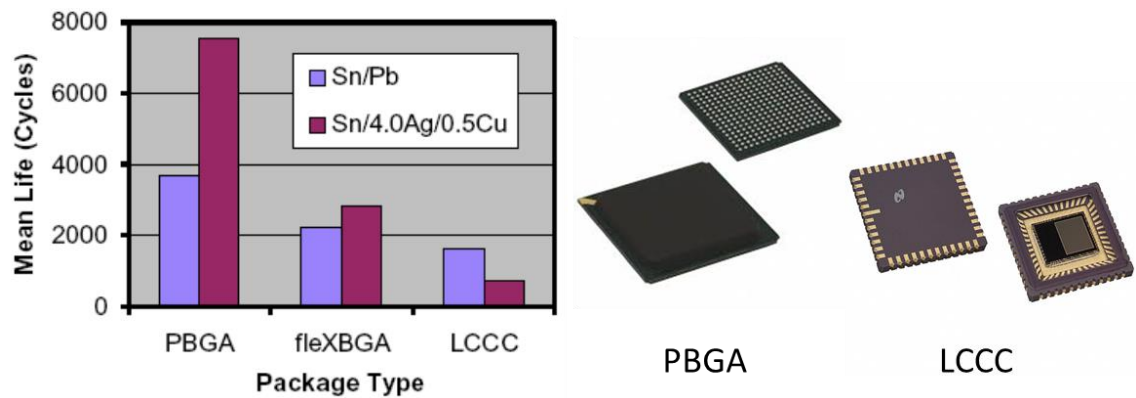
Lämpövuorottelutestissä käytetty stabilointiaika eli tasaantumisaika kuumassa ja kylmässä vaikuttaa juotoksen vikaantumisherkkyyteen erityisesti korkeissa lämpötiloissa. Tämä johtuu juotteen virumisesta eli jännityksen alla olevan juotoksen muodonmuutoksesta. Tämä otetaan huomioon kaavan AF termillä $f_{kenttä} / f_{testi}$. [9.]

Elektroniikan luotettavuuden tutkimuksessa kaava tuli käyttöön, kun siirryttiin lyijyttömiin juotteisiin EU:n RoHS-direktiivin myötä ja haluttiin tutkia, miten uudet juoteseokset käyttäytyvät lyijyllisiin verrattuna. Avaruuselektroniikassa käytetään edelleen lyijyllisiä juotteita, koska vielä ei ole pystytty todistamaan lyijyttömiä juotoksia luotettavammiksi. Aasi on tehty kustannussyistä komponenteista, jotka on juotettu RoHS-vaatimusten mukaan lyijyttömällä juotteilla.

3.3 Juotosten testaus

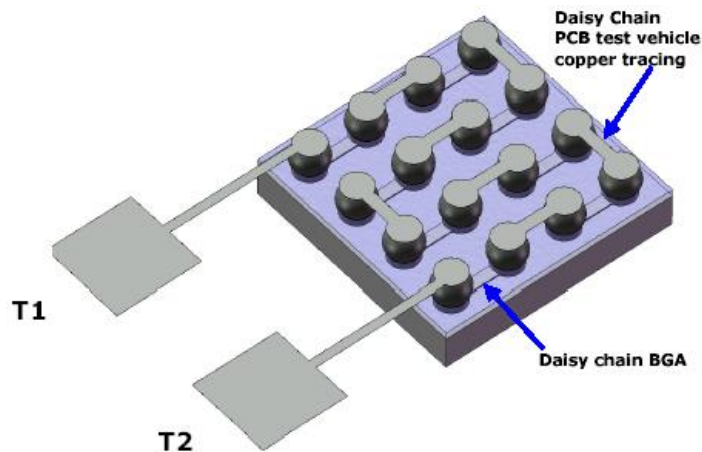
On olemassa paljon tutkimuksia, joissa on vertailtu tina-lyijyllisen ja lyijyttömän juotteen luotettavuutta. Riippuen ympäristöolosuhteista, kotelotyypeistä ja piirilevy materiaalista mikään yhdistelmä ei ole aina toista parempi. Tästä on esimerkki kuvassa 7 (ks. seur.

s.). Kuvan PBGA-lyhenne tulee sanoista Plastic Ball Grid Array ja LCCC-lyhenne Leadless Ceramic Chip Carrier. Kuvan vasen pylväs on tina-lyijyjuotettu ja oikea lyijytön juotos. [10.]



Kuva 7. Esimerkki eri kotelotyyppien juotosten eliniästä eri juotteilla [10.]

Kun testataan juotosten luotettavuutta, käytetään usein piirejä, joissa liitokset on kytketty pareittain yhteen. Piirit eivät sisällä lainkaan pii-sirua. Testiä varten tehdään erillisiä piirilevyjä, missä ketjutetaan sopiva määrä liitoksia, joiden resistanssia mitataan (kuva 8). Tämän menetelmän hyöty on se, että pystytään käyttämään kaikkia piirin juotosliitoksia testaukseen verrattuna oikeaan piiriin, missä usein on rinnankytkettyjä maa- ja syöttöjännitejuotosliitoksia, joissa mahdolliset yksittäiset katkokset ovat vaikeasti havaittavissa. [11.]



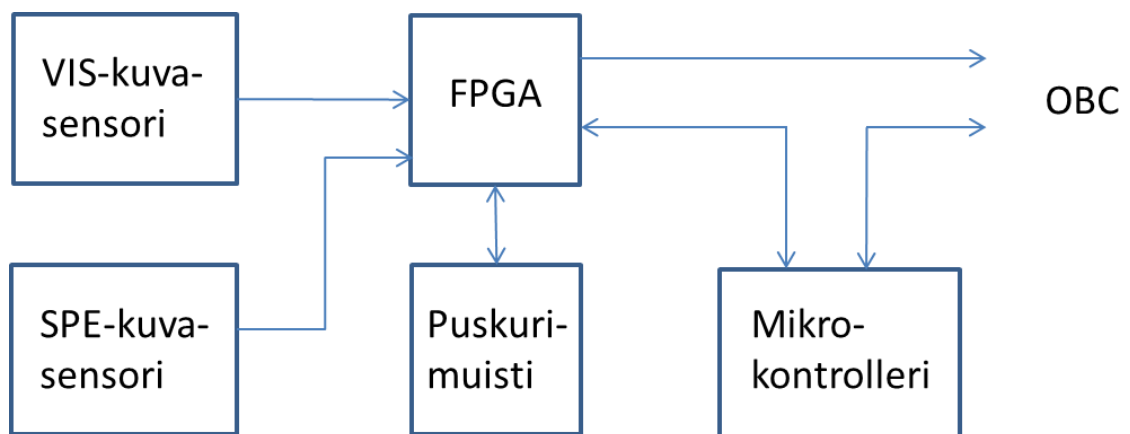
Kuva 8. Siruttoman testipiirin ketjutus [11.]

Toinen mahdollisuus on testata oikeita komponentteja ja piirilevyjä kuten tässä työssä tehtiin.

Standardeja, jotka määrittelevät lämpövuorottelutestejä, ovat esimerkiksi Euroopan avaruusjärjestön ECSS-Q-ST-70-38C [12.] ja yhdysvaltalaiset JEDEC Temperature Cycling JESD22-A104D [13.] ja MIL-STD-883J method 1010.8. [14.]

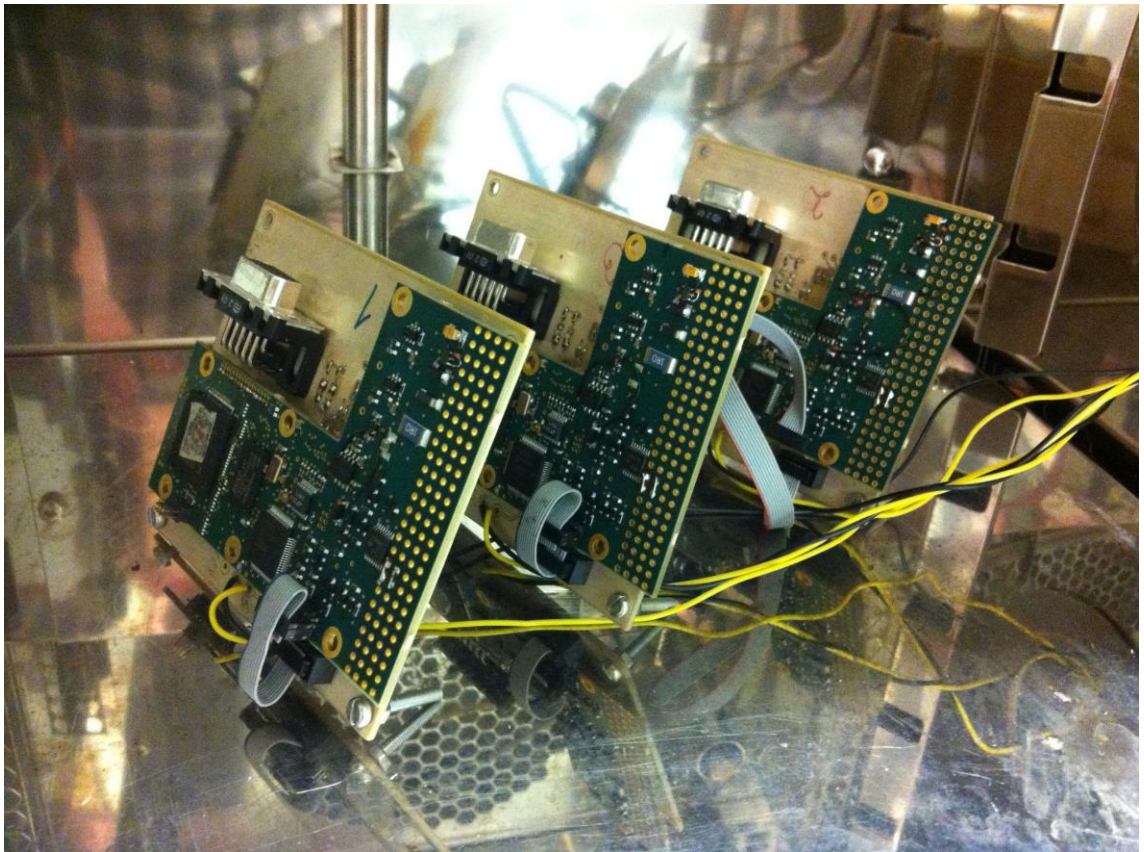
4 Pääpiirilevyjen testaus

Testattavan piirilevyn lohkokaaavio esitetään kuvassa 9. Piirilevyllä on kaksi BGA-piiriä: 90-pallonen muistipiiri ja 256-pallonen FPGA-piiri. Erityisesti näiden kahden piirin juostosten kestävyyttä haluttiin lämpövuorottelutestin avulla seurata. Työssä testattiin nimenaan liitoksia FPGA:n ja kuvasensoreiden liittimien sekä FPGA:n ja puskurimuistin välillä. Tätä varten suunniteltiin ja toteutettiin erillinen testauspiirilevy, jonka kautta ohjattiin FPGA:lta kuvasensoreille lähetettävät signaalit takaisin FPGA:lle niiden menettä lainkaan kuvasensoreille. Signaalit on kytketty pareittain yhteen testikortilla.



Kuva 9. Aasin pääpiirilevyn lohkokaaavio

Testikortilla oli myös RS-232-sovitinpiiri, jonka kautta lähetettiin mikrokontrollerin lähettämät vikakoodit tiedonkeruutietokoneelle. Koska RS-232 on vain pisteestä pisteeseen lähetävä väylä, käytettiin diodeista tehtyä OR-porttia. Näin voitiin testata kolme korttia samanaikaisesti (kuva 10, ks. seur. s.).



Kuva 10. Kolme testattavaa korttia testikortteineen lämpökaapissa

Mikrokontrollerille ja FPGA:lle laadittiin testausohjelmat juotosten testausta varten. Ohjelmat ovat erilaiset kuin lopullisessa spektrikamerassa. Tarkoituksena oli vain selvittää korttien toimivuutta.

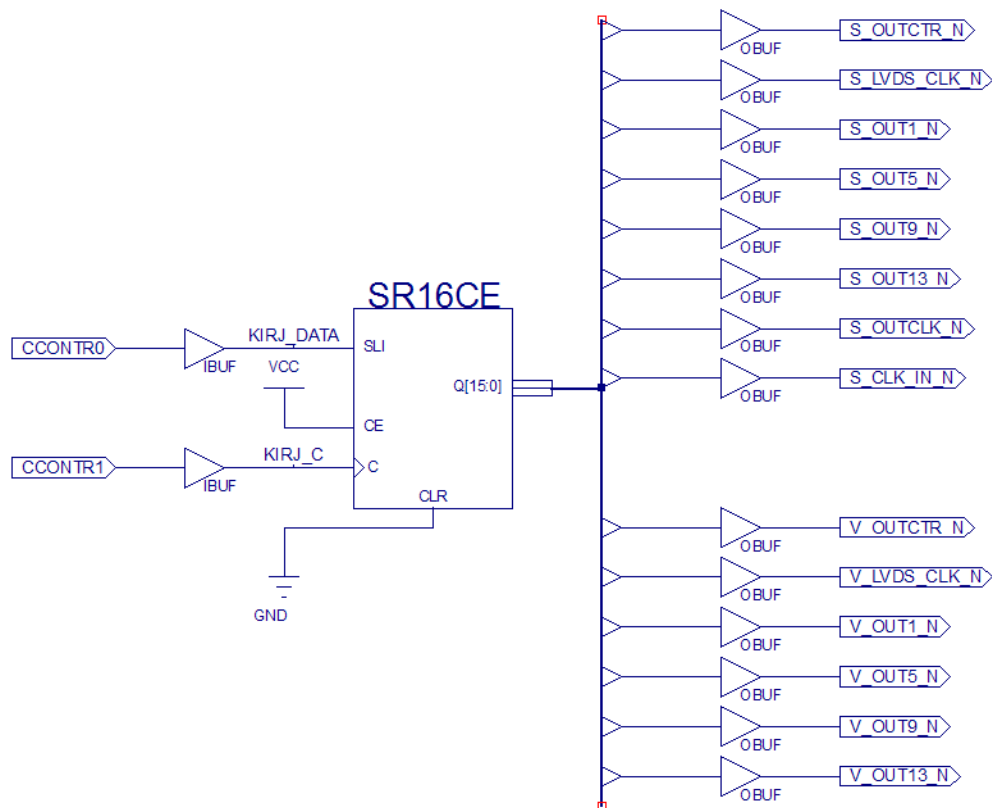
FPGA:n signaalit voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin:

- kuvasensorien ja FPGA:n välisiin signaaleihin
- muistipiirin ja FPGA:n välisiin signaaleihin
- mikrokontrollerin ja FPGA:n välisiin signaaleihin
- satelliitin tietokoneen (OBC) ja FPGA:n välisiin signaaleihin. (Kuva 9.)

Eri signaaliryhmien testaustavat on esitetty seuraavissa kappaleissa. Mikrokontrollerin ja FPGA:n väliset viat ilmenisivät muiden ryhmien testauksien yhteydessä.

4.1 Tiedonsiirto FPGA:n ja mikrokontrollerin välillä

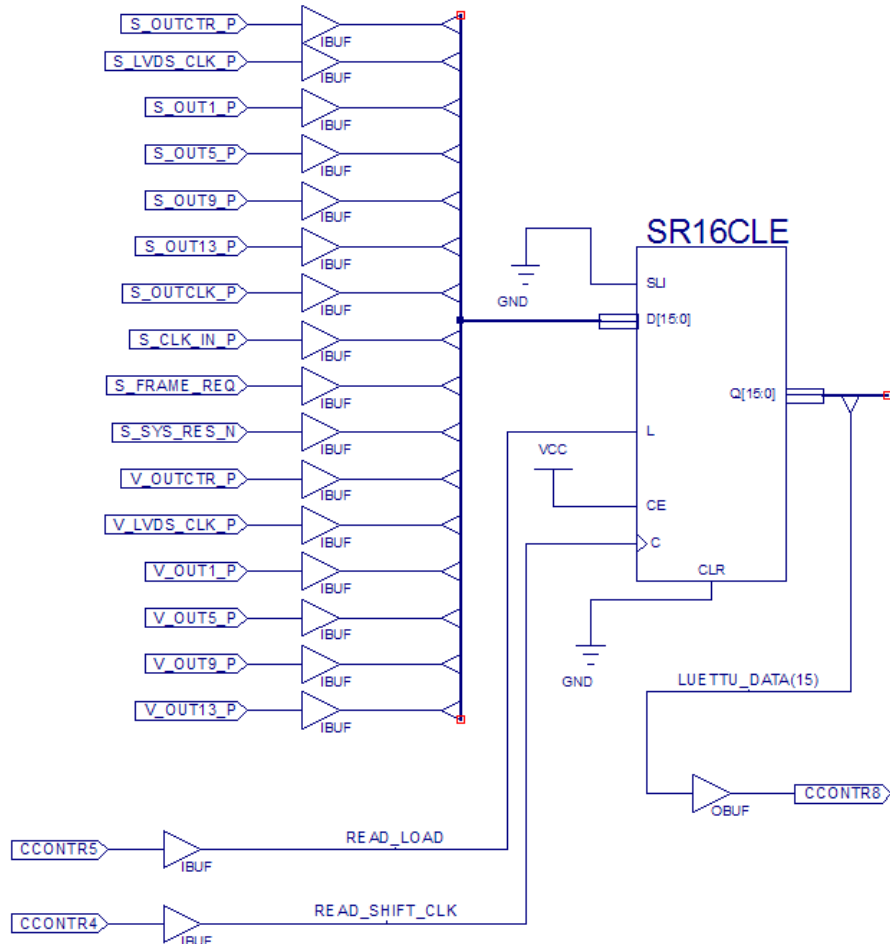
Mikrokontrolleri on ohjelmoitu syöttämään vaihtelevaa dataa FPGA:lle sarjamuodossa. FPGA:ssa data muutetaan rinnakkaismuotoon siirtorekistereillä, joiden lähdöt on kytketty testattaviin liitoksiin. Kuva 11 esittää siirtorekisteri 1:n, kuten se on FPGA:n konfigurointiohjelmassa piirretty. FPGA:ta on ohjelmoitu Xilinx ISE Design Suiten graafisella työkalulla. Vastaavia siirtorekistereitä käytetään kaikissa signaaliyhmissä.



Kuva 11. Mikrokontrollerin lähettämän datan muuntaminen rinnakkaismuotoon

Datan siirto FPGA:lta mikrokontrollerille tapahtuu myös siirtorekisterin kautta (kuva 12, ks. seur. s.). Siirtorekisteriin ladataan tulosaalien tila, kun mikrokontrolleri asettaa READ_LOAD-signaalin ykköseksi ja antaa kellopulssin READ_SHIFT_CLK. Siirtorekisterin eniten merkitsevä bitti, LUETTU_DATA(15), siirretään lähtöpuskurin OBUF kautta mikrokontrollerille. Seuraava kellopulssi READ_LOAD-signaalin ollessa nolla siirtää siirtorekisterin datan yhden askeleen vasemmalle, ja kontrolleri voi lukea seuraavan

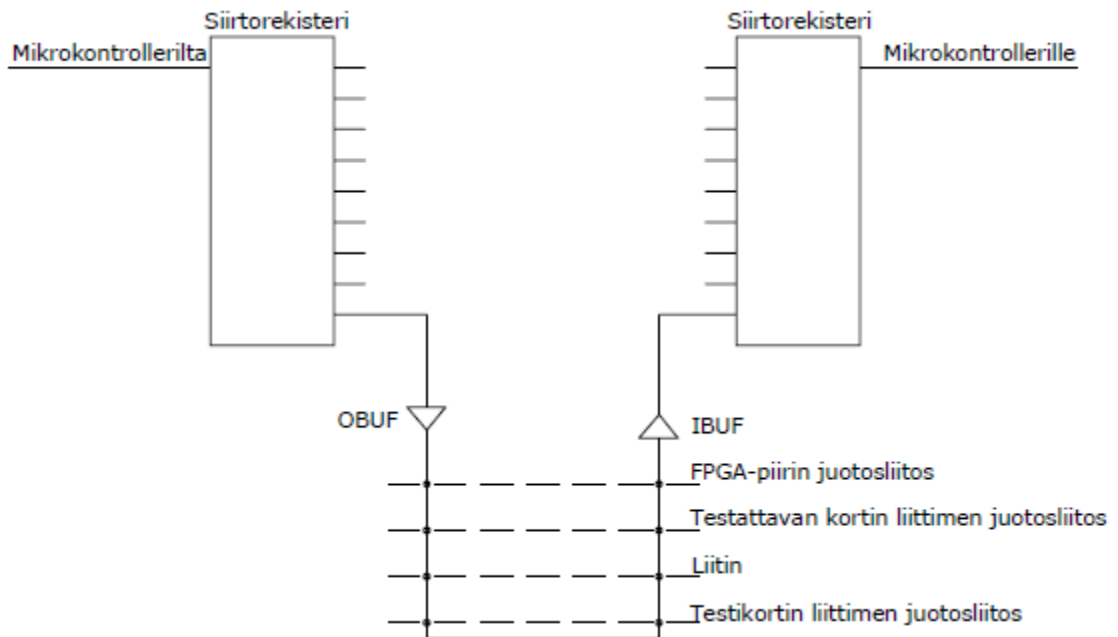
bitin. Siirtorekistereitä voidaan kytkeä useita peräkkäin, jos tarvitaan leveämpiä data-väyliä.



Kuva 12. Datan siirto FPGA:lta mikrokontrollerille

4.2 Kuvaseensorisignaalien testaus

Testattavan kortin FPGA:n ja kummankin kuvaseensorin välillä on 18 signaalia. Kuvaseensorisignaaleja testataan pareittain kuvan 13 (ks. seur. s.) esittämällä tavalla välittämättä siitä, ovatko ne FPGA:ssa tuloja vai lähtöjä lopullisessa sovelluksessa. Kuvassa esitetään vain yksi signaalipari, joista toinen signaali on valittu lähdöksi ja toinen tuloksi. Katkoviivat esittävät eri liitosten rajapintoja.



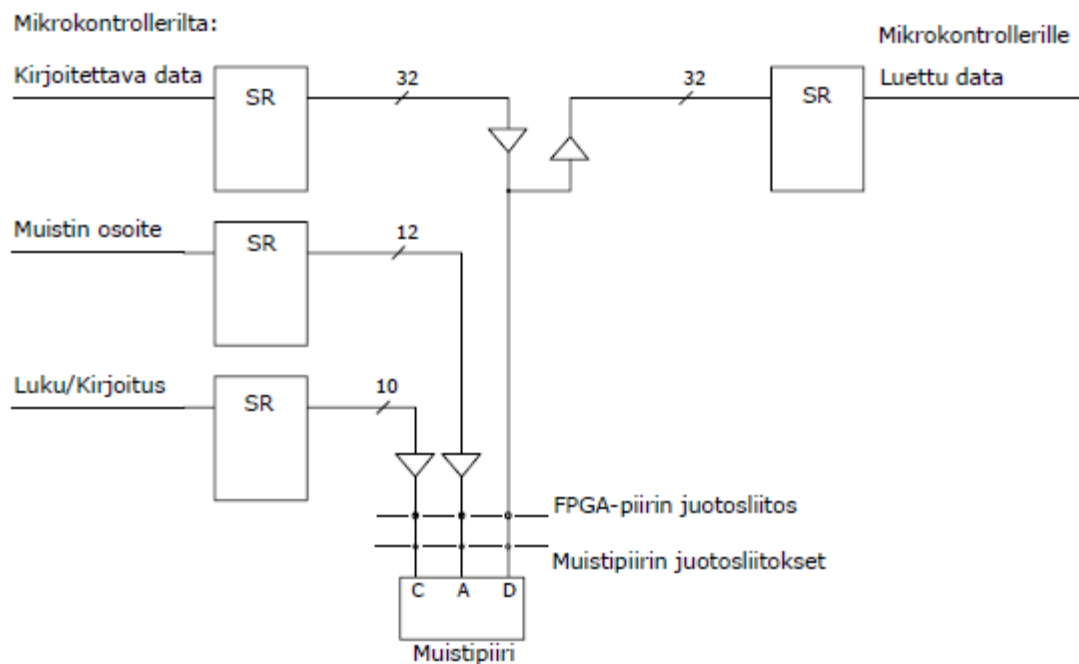
Kuva 13. Testisignaalin kierrätys FPGA:lta testikortin kautta takaisin FPGA:lle

Mikrokontrollerilta tulee testidata sarjamuodossa FPGA:han ohjelmoituun siirtorekisteriin 1, jonka lähdöt on kytketty lähtöpuskureiden (OBUF) kautta FPGA:n juotosliitoksiin, joista signaalit siirtyvät kuvasensoreille meneville liittimille. Testikortin kautta signaali palaa takaisin samalle liittimelle ja siitä FPGA:n juotosliitoksen ja tulopuskurin (IBUF) kautta siirtorekisteriin 2. Siirtorekisteristä 2 data lähetetään sarjamuodossa takaisin mikrokontrollerille, jossa verrataan, onko lähetetty ja vastaanotettu bittikuvio sama. Kuvasensorisignaalien testausketjuissa on kahdeksan liitoskohtaa, eikä mahdollisen virheen tarkkaa paikkaa pystytä tämän testin perusteella sanomaan.

4.3 Muistipiirin signaalien testaus

FPGA:n ja puskurimuistin väliset signaalit esitetään kuvassa 14 (ks. seur. s.). Data-väylässä on 32, osoiteväylässä 12 ja ohjausväylässä 10 signaalia. Siirtorekistereihin mikrokontrolleri kirjoittaa testidatan ja -osoitteen sekä tiedon siitä, luetaanko vai kirjoitetaanko. Muistista luettu data siirretään FPGA:han ohjelmoidun siirtorekisterin kautta takaisin mikrokontrollerille.

Muistipiirin signaaleissa on kaksi liitoskohtaa, FPGA:n ja muistipiirin liitokset. Testin perusteella ei pystytä sanomaan, kummassa mahdollinen vika on.

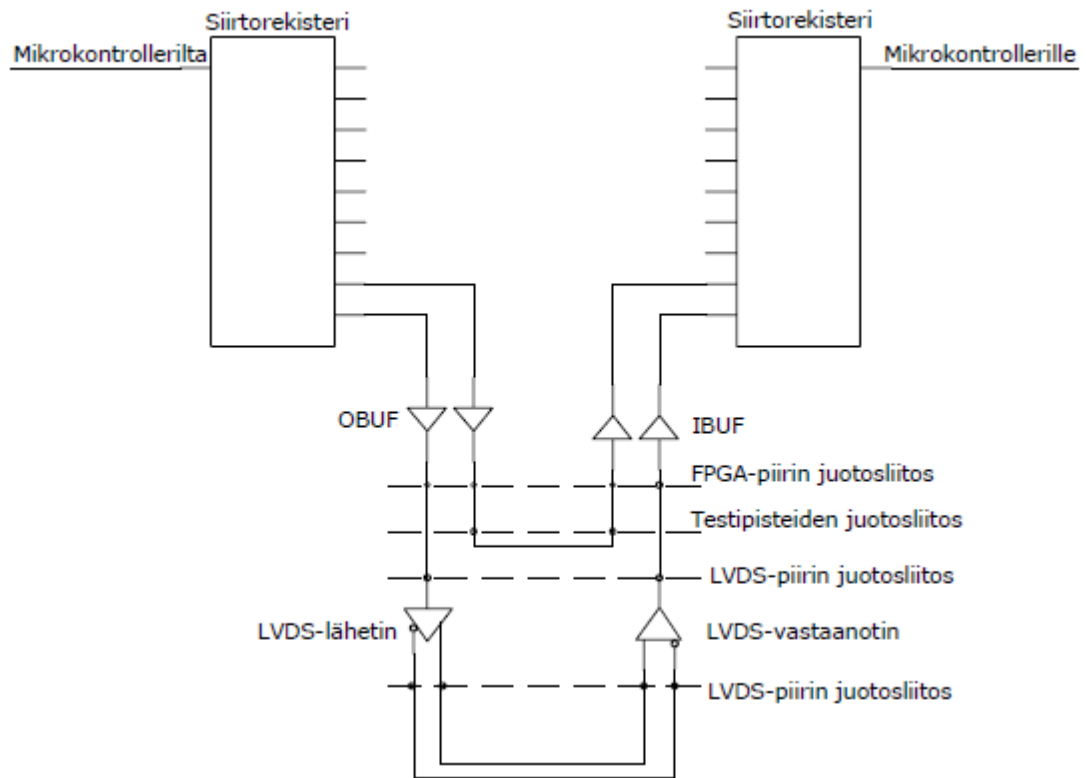


Kuva 14. FPGA:n ja muistipiirin väliset signaalit

4.4 FPGA:n ja OBC:n välisten signaalien testaus

Testattavan kortin FPGA:n ja satelliitin tietokoneen (OBC) välillä on 2 signaalia, OBC:lta tuleva kello ja OBC:lle lähtevä sarjamuotoinen data, kuva 15. Data siirretään LVDS-tasoisena (Low-Voltage Differential Signaling). Signaalin takaisinsyöttö tapahtuu LVDS-sovitinpiiriin kautta.

Kuvassa 15 (ks. seur. s.) FPGA:han on kytketty 16 testipistettä, jotka on kytketty pareittain yhteen, ja joiden juotoksia myös testattiin. Koska ne on kytketty pareittain yhteen, ei pystytä testin perusteella sanomaan, kummassa mahdollinen vika on.



Kuva 15. FPGA:n ja OBC:n väliset signaalit

4.5 Testattujen signaalien juotoskohdat FPGA:ssa

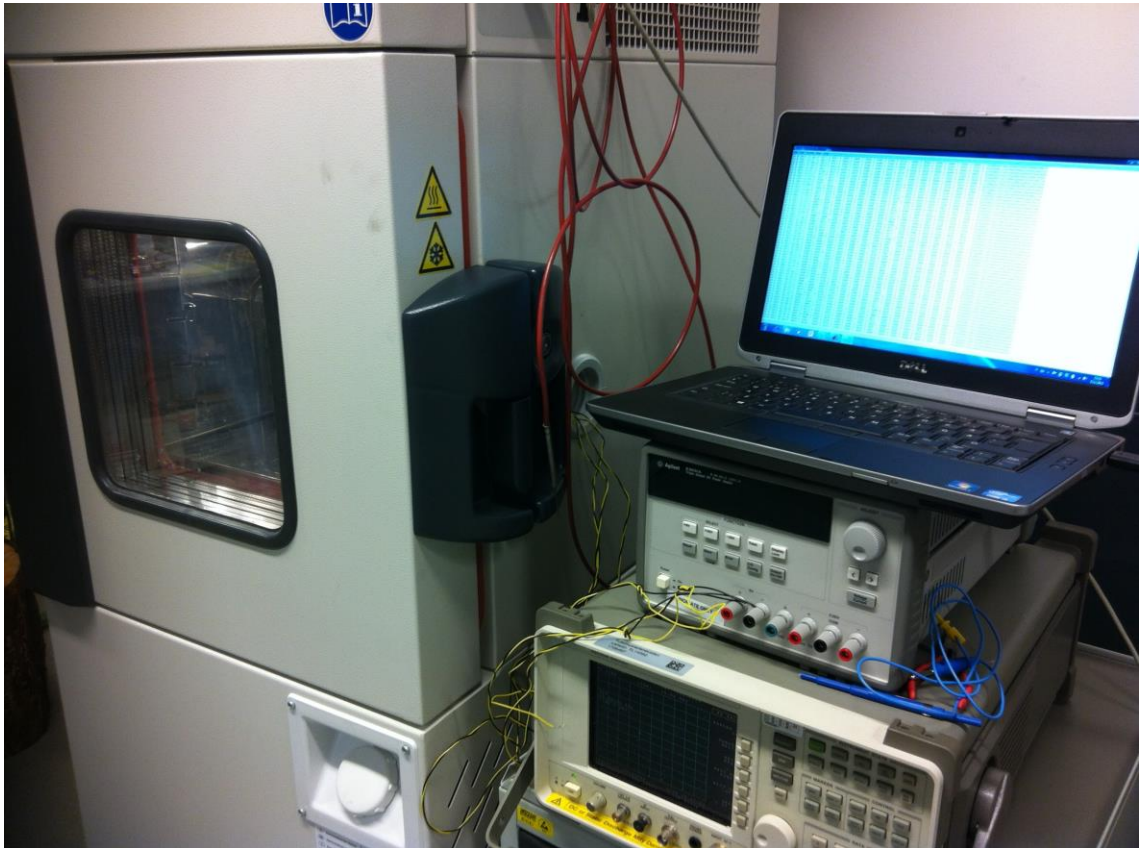
Taulukko 1. Testatut signaalit ja niiden juotospaikat FPGA:ssa

Testisignaali	Testisignaali	FPGA:n juotospallo	FPGA:n juotospallo	Siirtore- kisterin bitti	Huom.
S_OUTCTR_N	S_OUTCTR_P	P15	R15	0	
S_LVDS_CLK_N	S_LVDS_CLK_P	N16	P16	1	
S_OUT1_N	S_OUT1_P	N14	N13	2	
S_OUT5_N	S_OUT5_P	M14	M13	3	
S_OUT9_N	S_OUT9_P	M16	M15	4	
S_OUT13_N	S_OUT13_P	K13	L13	5	
S_OUTCLK_N	S_OUTCLK_P	L16	L14	6	
S_CLK_IN_N	S_CLK_IN_P	K14	K15	7	
	S_FRAME_REQ		A7	8	1
	S_SYS_RES_N		C7	9	2
V_OUTCTR_N	V_OUTCTR_P	J16	K16	10	
V_LVDS_CLK_N	V_LVDS_CLK_P	H14	J14	11	
V_OUT1_N	V_OUT1_P	H16	H15	12	
V_OUT5_N	V_OUT5_P	G14	H13	13	
V_OUT9_N	V_OUT9_P	F16	G16	14	
V_OUT13_N	V_OUT13_P	D14	E13	15	
V_OUTCLK_N	V_OUTCLK_P	F15	E16	16	
V_CLK_IN_N	V_CLK_IN_P	C15	C16	17	
	V_SYS_RES_N		E7	18	3
	V_FRAME_REQ		A6	19	4
TP100	TP101	P8	N8	20	
TP102	TP103	R9	M10	21	
TP104	TP105	P10	N10	22	
TP106	TP107	T10	T11	23	
TP108	TP109	N11	P11	24	
TP110	TP111	R11	N12	25	
TP112	TP113	P12	R13	26	
TP114	TP115	T13	P13	27	
AASI_MISO	AASI_CLK	F13	E14	28	

1. Tulee mikrokontrollerin MISO1-lähdöstä
2. Tulee mikrokontrollerin S_SPI_EN-lähdöstä
3. Tulee mikrokontrollerin V_SPI_EN-lähdöstä
4. Tulee mikrokontrollerin MISO1-lähdöstä

5 Lämpövuorottelutestin kulku

Kolme Aasin pääpiirilevyä asennettiin testikortteihin ja laitettiin lämpökaappiin (kuva 10, ks. s. 11). Lämpökaapin malli oli Weiss WKL34. Kaapin kosteuden säätö kytkettiin pois päältä ja kaappiin johdettiin typpikaasua, jotta kosteus ei tiivistyisi vedeksi ja jäätyisi korttien päälle siirryttäessä alhaisesta lämpötilasta korkeampaan. Kuvassa 17 näkyy mittaussympäristö.

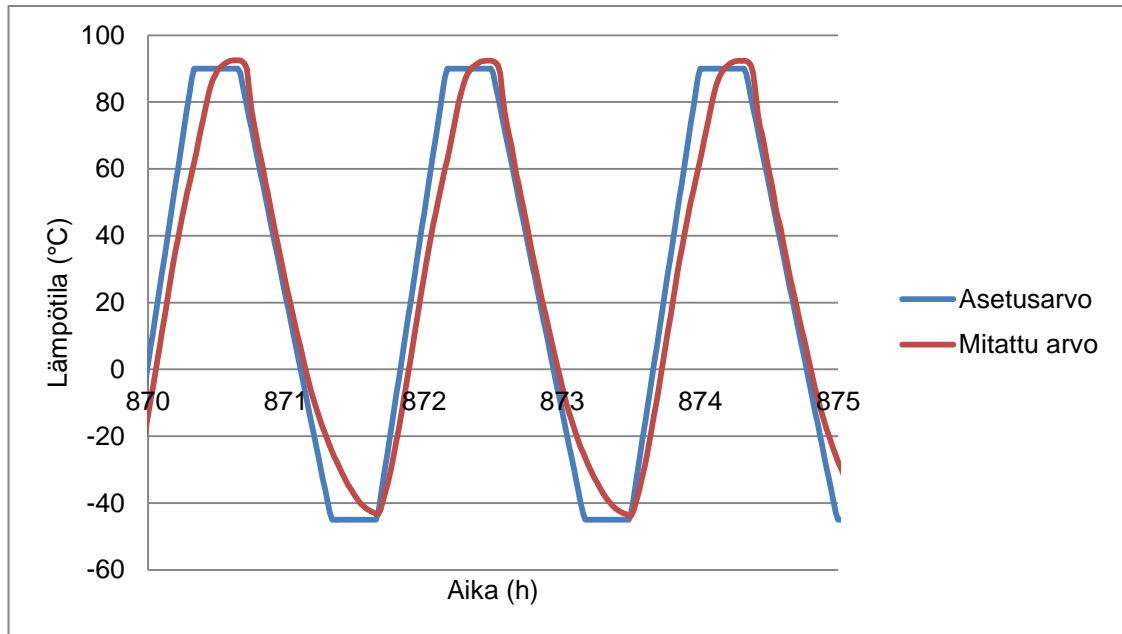


Kuva 17. Lämpökaappi, mittaustietokone ja virtalähde

Euroopan avaruusjärjestön standardissa ECSS-Q-ST-70-08, jossa määritellään avaruuselektronikan lämpövuorottelutestin lämpötilarajat, vaaditaan, että ala- ja ylälämpötilarajat ovat -55 °C ja 100 °C . [12.] Tämä koskee laitteita, joiden käyttölämpötila on -55 °C ja 85 °C välillä. Aasissa ei käytetä avaruuskäyttöön tarkoitettuja komponentteja. Tämän takia käytettiin testissä suppeampaa lämpötila-aluetta -45 °C – 90 °C , koska ei haluttu yllirasittaa komponentteja vaan testata juotoksia.

Kaapin lämpötilasäätimeen ohjelmoitiin lämpötilaprofiili (kuva 18, ks. seur. s.). Lämpötila nostettiin huoneenlämpötilasta 90 °C :een ja pidettiin tässä lämpötilassa 20 minuuttia.

Lämpötila laskettiin -45 °C:een ja odotettiin 20 minuuttia lämpötilan tasaantumista. Päätettiin takaisin 90 °C:een ja tätä jaksoa toistettiin 285 kertaa. Yhden jakson pituus oli 110 minuuttia. Testin aikana tallennettiin tietokoneelle lämpötilan asetusarvo, mitattu piirilevyn lämpötila sekä testattavien korttien lähettämät vikakoodit.



Kuva 18. Ote asetetusta ja mitatusta lämpötilasta

5.1 Kiihdytyskertoimen laskeminen

Kappaleessa 3 esitetyn kiihdytyskertoimen AF laskemiseen tarvittavat tiedot voidaan lukea kuvasta 18. AF-kaavassa lämpötilat ovat kelvineissä eli celsiusarvoihin lisätään 273.

$$AF = \left(\frac{\Delta T_{testi}}{\Delta T_{kenttä}} \right)^{1,26} \left(\frac{f_{kenttä}}{f_{testi}} \right)^{0,02} e^{\left[3503 \left(\frac{1}{T_{max,kenttä}} - \frac{1}{T_{max,testi}} \right) \right]}$$

Maksimilämpötila $T_{max,testi} = 92 \text{ °C}$ ja minimilämpötila $T_{min,testi} = -42 \text{ °C}$, joista saadaan lämpötilan muutos $\Delta T_{testi} = 134 \text{ °C}$. Jos arvioitu maksimilämpötila kiertoradalla on $T_{max,kenttä} = 50 \text{ °C}$ ja minimilämpötila $T_{min,kenttä} = 10 \text{ °C}$ niin $\Delta T_{kenttä} = 40 \text{ °C}$. Kenttälämpötilat ovat arvioita, jotka tarkentuvat satelliitin termovakuumitestissä ja mahdollisessa aurinkosimulaattoritestissä. Piirilevyn lämpötilan muutokset johtuvat sekä siitä, että satelliitti käy välillä auringossa ja välillä maapallon varjossa ja siitä, että Aasi-

instrumentti on aina kytketty pois päältä varjopuolella, jolloin sen oma lämpeneminen vaikuttaa vain päiväpuolella.

Testisyklien lukumäärä vuorokaudessa on $f_{testi} = 24 \text{ h} / 1,9 \text{ h} = 12,6$ sykliä. Kiertoajalla 90 minuuttia $f_{kenttä} = 24 \text{ h} / 1,5 \text{ h} = 16$ sykliä.

Jos kaavan termit lasketaan erikseen, ensimmäisestä termistä havaitaan lämpötilan vaihtelun vaikutus, toisesta termistä liitosten virumisen vaikutus ja viimeisestä termistä metalliseosten muuttumisnopeuden vaikutus kiihdytyskertoimeen.

Sijoitettaessa kaavaan yllämainitut arvot, saadaan $AF = 4,59 * 1,00 * 3,48 = 15,96$. Tämä tarkoittaa, että yksi testisykli vastaa kuuttatoista ratakierrosta. Jos instrumentilta vaaditaan esim. kahden vuoden elinikää, joka vastaa


$(2 \text{ vuotta} * 8760 \text{ h} / \text{vuosi}) / 1,5 \text{ h} / \text{ratakierrros} = 11680$ ratakierrosta,

vaaditaan, että testattava kortti kestää testissä vähintään $11\,680/15,96$ testisykliä eli 732 testisykliä. Tämä on pahin tilanne, koska joka kierroksella tuskin käytetään Aasi-instrumenttia.

6 Tulosten käsittely

Mikrokontrollerin vikakoodeista pystyttiin päättämään mahdolliset testisignaaleissa ilmenneet viat. Kuvassa 19 on ote kortin 2 mikrokontrollerin tulostamasta vikakoodista, josta nähdään, että muistivirheitä ei ole ilmennyt. Kvasensorien testisignaaleissa sen sijaan on ilmennyt uusi virhe, merkitty kuvassa nuolella.

```
Kortti 2, aika 324460, vikoja: 0x00000231
Kortti 2, aika 324460, muistivirheita 0x00000000
Kortti 2, aika 324471, vikoja: 0x00000239
Kortti 2, aika 324471, muistivirheita 0x00000000
```



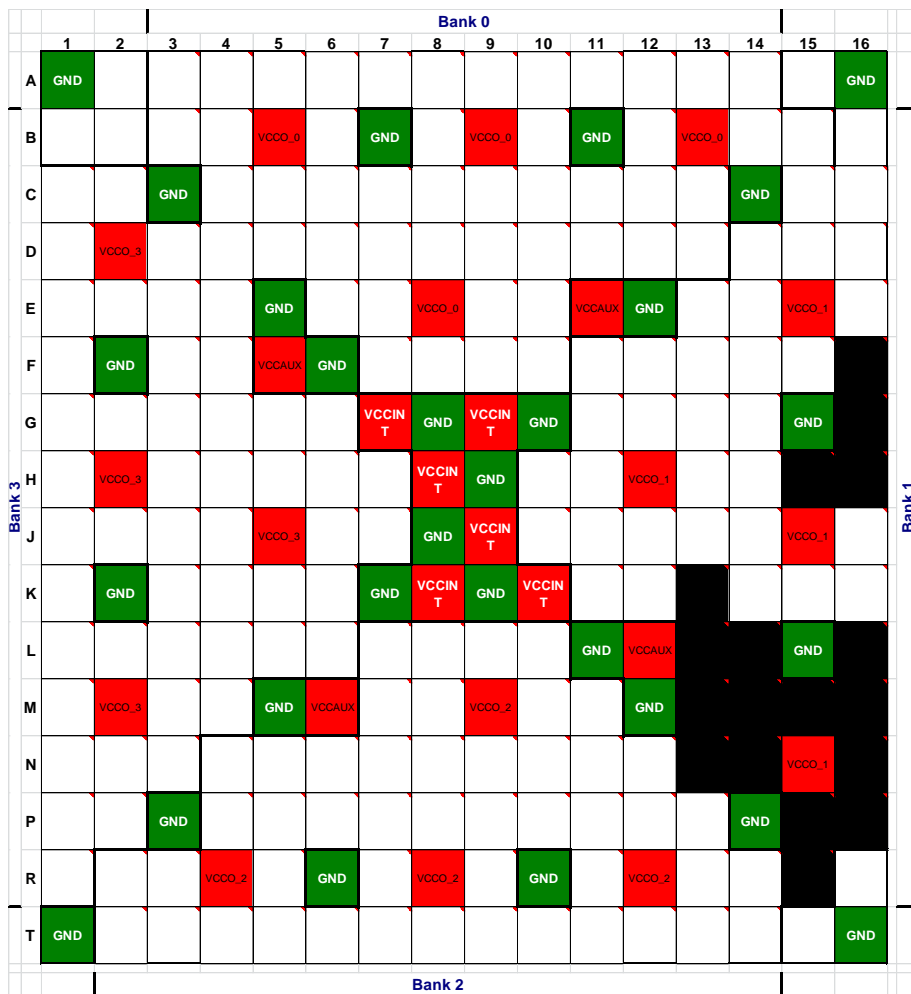
Kuva 19. Ote mikrokontrollerin tulostamasta vikakoodista

Esitettäessä vikakoodi binäärilukuna nähdään, että syntynyt virhe on bitin kolme kohdalla (kuva 20, ks. seur. s.). Taulukossa 1 (ks. s. 17) tämä vastaa siirtorekisterin bittiä 3, jonka testisignaali on johdotettu FPGA:n juotospalojen M14 ja N14 kautta.

Siirtorekisterin bitti	Bitti 11	Bitti 10	Bitti 9	Bitti 8	Bitti 7	Bitti 6	Bitti 5	Bitti 4	Bitti 3	Bitti 2	Bitti 1	Bitti 0
vikoja: 0x00000231	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
vikoja: 0x00000239	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1

Kuva 20. Esimerkki vikakoodin tulkinnasta

Korttien mikrokontrollerit vertaavat FPGA:lle lähetettyä dataa vastaanotettuun. Mikrokontrolleri tulostaa tuloksen kerran minuutissa sarjavyölyn kautta PC:lle, joka tallettaa datan.

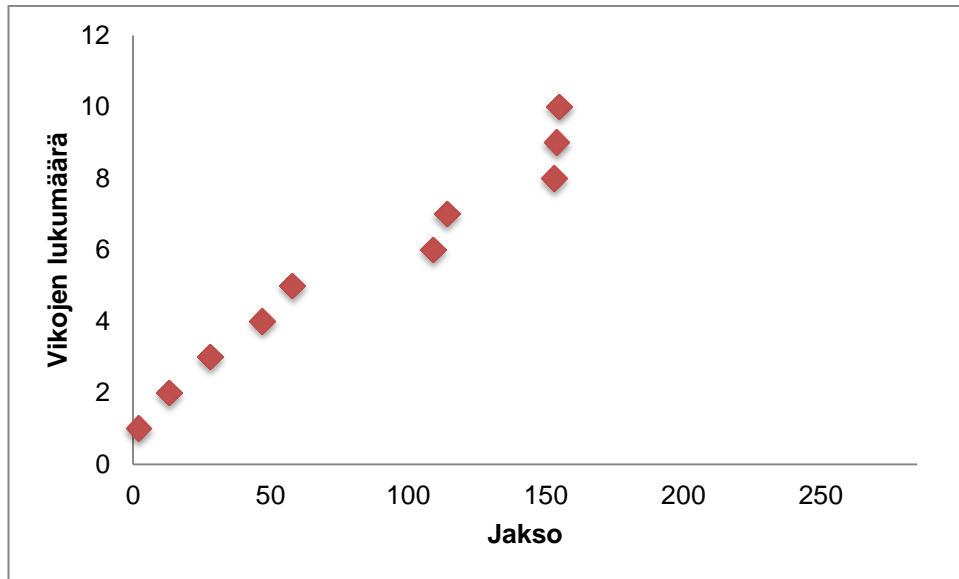


Kuva 21. Mahdolliset vikapaikat FPGA:n juotoksissa

Kuvaan 21 on merkitty niiden testisignaalien juotoskohdat mustalla, joihin testin aikana tuli virheitä. Kuva on koottu kaikkien kolmen kortin vikakoodien ja vastaavien FPGA:n juotospalojen sijainnin perusteella (taulukko 1, ks. s. 17). Testin aikana syntyneet viat näyttävät kasaantuneen yhteen alueeseen FPGA:n reunalle. Kaikkien testattujen

korttien viat ilmenivät tällä alueella. Yleisesti rasisuurtumat ilmenevät ensin piirien kulmissa ja ulkoreunoilla, missä jännitysvaihtelut ovat suurimpia. [15.]

Kuvassa 22 esitetään testin aikana ilmenneiden vikojen lukumäärä kaikilla kolmella kortilla. Ensimmäinen vika ilmeni jo toisessa syklissä. Vaikka vikojen lukumäärä jaettaisiinkin testikorttien lukumäärällä, ollaan kaukana vaaditusta 732 testisyklistä ennen ensimmäistä vikaa. Tämän takia testi keskeytettiin jo 285 syklin jälkeen.



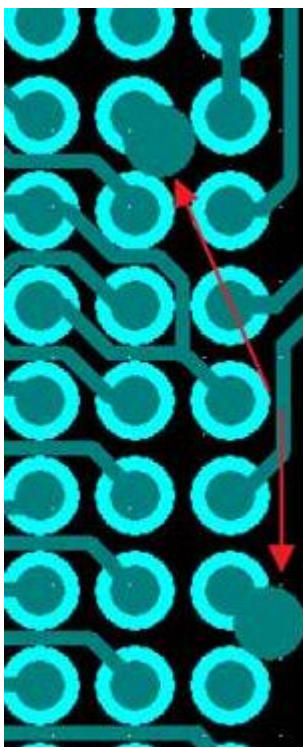
Kuva 22. Syntyneiden vikojen lukumäärä testin aikana

6.1 Vika-analyysi

Yksi syy juotosten huonoon kestävyYTEEN voi olla liian lähelle juotostäpliä sijoitetut läpiviennit (kuva 23, ks. seur. s.). Kuvassa vaaleampi ympyrä on juotteenestopinnoitteen aukko, jonka keskellä näkyy juotostäplä tummempana. Nuolet osoittavat läpivientejä, jotka ovat sijoitettu niin lähelle juotostäpliä, ettei niiden väliin mahdu juotteenestopinnoitetta. Tällöin on riski, että juote valuu läpivientireikiin, ja juotos jää vaillinaiseksi ja rikkoutuu helpommin. Juotokset muistipiirissä ja FPGA:ssa ovat piirien alla eikä niitä pystytä mikroskoopin avulla tarkistamaan.

6.2 Jatkotoimenpiteet

Työssä todettujen puutteiden korjaamiseksi suunniteltiin uusi pääpiirilevy, jossa kiinnitettiin erityistä huomiota siihen, että kaikkien läpivientireikien ympärillä on juotteenestopinnoite. Samalla vaihdettiin kuvailmaisimien liitintyyppiä, AD-muunnin ja yksi jännite-regulaattoreista.



Kuva 23. Liian lähelle juotostäpliä sijoitettuja läpivientejä

7 Yhteenveto

Tässä työssä tehtiin Aalto-1-nanosatelliitin Aasi-spektrikameran pääpiirilevyn lämpövuorottelutesti. Pääpiirilevyllä käytettiin kahta muovi-BGA-piiriä: FPGA- ja muistipiiriä. Testissä oli tarkoituksena todeta näiden piirien juotosten kestävyyttä. Testiä varten suunniteltiin testipiirilevy, johon pääpiirilevy asennettiin. Testikortit suunniteltiin niin, että testiä varten tehtyjen pääpiirilevyn mikrokontrollerin ja FPGA:n ohjelmien avulla pystyt-

tiin seuraamaan muistipiirin ja FPGA:n juotosten toimivuutta. Mikrokontrollerissa ja FPGA:ssa toimi testin aikana testiohjelma eikä spektrikameran varsinainen ohjelma. Tämän testiohjelman avulla pystyttiin seuraamaan korttien toimivuutta testin aikana. Testisignaalit eivät kulkeneet ainoastaan BGA-piirien kautta, vaan myös testikortin ja sen liittimien kautta, joten ei voida varmuudella sanoa, mihin liitoksiin viat syntyivät. Tarkempaa liitosten analyysia kuten hie- tai väriaineanalyysiä ei tässä työssä suoritettu.

Lämpövuorottelutesti oli 283 sykliä -45 °C:een ja 90 °C:een välillä. Lämpövuorottelutestin lasketun kiihdytyskertoimen arvon mukaan pääpiirilevyjen olisi pitänyt kestää keskimäärin 700 sykliä vikaantumatta. 150 syklin jälkeen oli kuitenkin syntynyt jo keskimäärin kolme vikaa/kortti. Tämän testin perusteella voidaan todeta, että kortit eivät läpäisseet testiä.

Lähteet

- 1 ESA. Envisat. Verkkajulkaisu. <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/satellite/space-segment>. Luettu 27.12.2013
- 2 Wikipedia. 2013. Verkkajulkaisu. http://en.wikipedia.org/wiki/Low_Earth_orbit. Luettu 11.1.2014
- 3 Wikipedia. 2013. Verkkajulkaisu. http://en.wikipedia.org/wiki/Geostationary_orbit. Luettu 11.1.2014
- 4 Antti Näsilä, Anssi Hakkarainen, Jaan Praks, Antti Kestilä, Kalle Nordling, et al. 2011. Aalto-1: a hyperspectral Earth observing nanosatellite. Verkkajulkaisu. <http://dx.doi.org/10.1117/12.898125>. Luettu 26.12.2013
- 5 CubeSat Kit. 2013. Verkkajulkaisu. <http://www.cubesatkit.com/>. Luettu 27.12.2013
- 6 Antti Näsilä. 2013. Diplomityö. Validation of Aalto-1 Spectral Imager Technology to Space Environment. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/10451/master_N%C3%A4sil%C3%A4_Antti_2013.pdf?sequence=1.
- 7 Ilmatieteen laitos. 2013. Plasmajarrua testataan Aalto-1 –satelliitissa. Verkkajulkaisu. http://ilmatieteenlaitos.fi/tiede uutisten-arkisto-to?p_p_id=101_INSTANCE_1R4q&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&_101_INSTANCE_1R4q_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_INSTANCE_1R4q_urlTitle=plasmajarrua-testataan-aalto-1-satelliitissa&_101_INSTANCE_1R4q_type=content&redirect=%2Ftiede uutisten-arkisto. Luettu 2.12.2013
- 8 Jeffrey C. Suhling, R. Wayne Johnson, John L. Evans, Nokibul Islam, Jing Liu, and Shyam Gale. Reliability of Small BGAs in the Automotive Environment. Verkkodokumentti. www.eng.auburn.edu/apl/files/Small_BGAs.pdf. Luettu 22.12.2013
- 9 Syed, A. 2010. Limitations of Norris-Landzberg equation and application of damage accumulation based methodology for estimating acceleration factors for Pb free solders. Verkkodokumentti. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5464546&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5464546. Luettu 26.12.2013

- 10 DfR Solutions. 2008. Verkkodokumentti.
http://www.dfrsolutions.com/uploads/courses/2010-05_Reality_Pb-Free_2.pdf.
Luettu 11.2.2013
- 11 TopLine. Understanding Benefits of Daisy Chain. Verkkójulkaisu.
<http://www.topline.tv/DaisyChain.html>. Luettu 9.1.2014
- 12 ECSS. 2009. Space product assurance, Manual soldering of high-reliability electrical connections. Verkkodokumentti.
<https://escies.org/download/webDocumentFile?id=48636>. Luettu 11.2.2013
- 13 JEDEC. 2009. Temperature cycling 22a104d. Verkkodokumentti.
www.jedec.org/sites/default/files/docs/22A104D.pdf. Luettu 9.9.2013
- 14 DEPARTMENT OF DEFENSE. 2013. Test method standard microcircuits, MIL-STD-883J. Verkkodokumentti.
<http://www.dsccl.dla.mil/downloads/milspec/docs/mil-std-883/std883.pdf>. Luettu 11.9.2013
- 15 Martti Mattila. 2008. Diplomityö. Lämpötilan vaihteluiden vaikutukset vaihtosuuntaajan IGBT-moduuliin. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2008/urn012395.pdf>