

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Radiolaboratorio

Jami Wilenius

Mikroaaltoyksikön toteutus pintaliitoskomponenteilla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 23.8.2007

Työn valvoja: Professori Antti Räisänen

Työn ohjaaja: DI Petri Nyberg

Tekijä:	Jami Wilenius	
Työn nimi:	Mikroaaltoyksikön toteutus pintaliitoskomponenteilla	
Päiväys:	23.8.2007	Sivumäärä: 58
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professori:	S-26 Radiotekniikka	
Työn valvoja:	Professori Antti Räisänen	
Työn ohjaaja:	DI Petri Nyberg	
<p>Mikroaaltoradioiden käyttö tiedonsiirrossa lisääntyy nopeasti. Ominaisuudet paranevat, mutta paine hintojen laskemiseen on kova. Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta valmistaa mikroaaltoradion mikroaaltoyksikkö lankabondattujen piirien asemesta pintaliitoskoteloituilla piireillä. Tutkimuksessa osoitettiin valmistuksen olevan selvästi halvempaa ja nopeampaa pintaliitoskomponentteja käytettäessä.</p> <p>Työssä selvitettiin komponenttien saatavuus mikroaaltoyksikköön 7-38 GHz:n taajuuksille. Kaikki mikroaaltoyksikköön tarvittavat pintaliitoskomponentit löydettiin 30 GHz:iin saakka ja osa korkeimmillekin taajuuksille.</p> <p>Pintaliitoskomponenttien käytön eroja lankabondattuihin piireihin tutkittiin. Havaittiin, että vahvistinpiirien lämpeneminen voi muodostua ongelmaksi korkeissa ulkoisissa lämpötiloissa. Lisäksi todettiin käytettävien GaAs MMIC -piirien olevan erittäin herkkiä sähköstaattisille purkauksille.</p> <p>Pintaliitoskomponenteista valmistettua mikroaaltoyksikköä verrattiin bondattuun mikroaaltoyksikköön useilla mittauksilla. Mittauksissa tutkittiin mm. lineaarisuutta ja kohinaa. Tulokset olivat lähellä toisiaan ja mikroaaltoyksiköt täyttivät vaatimukset valmistustekniikasta riippumatta.</p>		
Avainsanat:	mikroaaltoyksikkö, pintaliitostekniikka, mikroaaltoradio	

Author:	Jami Wilenius	
Name of the thesis:	Implementation of a microwave unit using surface mount devices	
Date:	23.8.2007	Number of pages: 58
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering	
Professorship:	S-26 Radio Engineering	
Supervisor	Prof. Antti Räisänen	
Instructor:	Mr. Petri Nyberg, M. Sc. (EE)	
<p>Use of microwave radios in data transfer is increasing rapidly. Features are improving, but the pressure towards lower prices is high. The purpose of this Master's Thesis was to study the possibility to implement a microwave unit for a microwave radio using surface mount devices instead of wire bonding. The study indicates that manufacturing is faster and more lucrative using surface mount devices.</p> <p>The availability of components to microwave units for 7-38 GHz frequencies was found out in this thesis. All the necessary surface mount devices were found up to 30 GHz and also some devices for the highest frequencies.</p> <p>Differencies between the use of wire bonded and surface mount devices were examined. It was discovered that temperature rise of amplifiers might cause a problem in high ambient temperatures. It was also noticed that GaAs MMICs are very sensitive to electrostatic discharge.</p> <p>A microwave unit that was manufactured using surface mount devices was compared with a wire bonded one through several measurements. Linearity and noise were studied in the measurements among other things. Results were almost similar and the microwave units fulfilled the requirements regardless of manufacturing technology.</p>		
Keywords:	microwave unit, surface mount technology, microwave radio	

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Nokia Siemens Networks Oy:n mikroaaltoradioyksikön tuotekehitysosastolle kesällä 2007.

Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat auttaneet työn valmistumisessa ja tehneet sen mahdolliseksi. Erityiskiitos kuuluu työn ohjaajalle, Petri Nybergille, joka on ohjannut työtä oikeaan suuntaan ja auttanut ymmärtämään asioita pintaa syvemmillä.

Työn valvoja, professori Antti Räisänen, ansaitsee kiitokset ohjeistaan ja hyvin sujuneista käytännön järjestelyistä.

Kiitos myös vanhemmilleni, Arille ja Seijalle, jotka ovat tehneet opiskeluni mahdolliseksi ja kannustaneet minua tekniikan pariin.

Lämpimät kiitokset myös vaimolleni, Annalle, joka on omalla tavallaan kannustanut paljon ja odottanut työn valmistumista kenties enemmän kuin minä.

Espoossa 23. elokuuta 2007

Jami Wilenius

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
LYHENNELUETTELO	7
SYMBOLILUETTELO.....	8
1. JOHDANTO	9
2. TAUSTATIETOA	10
2.1. Mikroaaltoradio	10
2.2. Mikroaaltoradioiden markkinatilanne	12
2.3. Mikroaaltoyksikkö.....	14
2.4. MMIC-piirien asennustavat	15
3. MARKKINOILLA OLEVAT SMD MMIC-KOMPONENTIT	18
3.1. SMD-pakkaukset	19
3.2. Tehovahvistin	19
3.3. Pienikohinainen vahvistin.....	21
3.4. Yleisvahvistin	22
3.5. Jänniteohjattu vaimennin.....	23
3.6. IQ-sekoitin	25
3.7. Jänniteohjattu oskillaattori.....	26
3.8. Taajuuskertoja.....	26
3.9. Yhteenvedo komponenteista.....	28
4. PINTALIITOSKOMPONENTTIEN ERITYISPIIRTEITÄ	29
4.1. Tekniikan ongelmakohdat	29
4.2. Luotettavuus	30
4.3. Tuotannollisuus.....	32
5. MITTAUKSET	33
5.1. Lineaarisuus	34
5.2. Oskillaattorin vaihekohina.....	37
5.3. Lähetystehon stabiilisuus.....	37

5.4.	Lähdön kohinataso.....	38
5.5.	Vastaanottimen kohinaluku	39
5.6.	Virrankulutus	39
5.7.	Lähetys- ja vastaanottoporttien sovitukset.....	40
5.8.	Spektri.....	41
6.	MITTAUSTULOKSET	43
6.1.	Lineaarisuus	43
6.2.	Oskillaattorin vaihekohina.....	44
6.3.	Lähetystehon stabiilisuus.....	45
6.4.	Lähdön kohinataso.....	46
6.5.	Vastaanottimen kohinaluku	47
6.6.	Virrankulutus	48
6.7.	Lähetys- ja vastaanottoporttien sovitukset.....	49
6.8.	Spektri.....	50
7.	YHTEENVETO.....	53
	LÄHTEET	54

LYHENNELUETTELO

AWG	Arbitrary waveform generator, digitaalinen signaaligeneraattori
BER	Bit error rate, bittivirhesuhde
COB	Chip on board
COM	Chip on metal
ESD	Electrostatic discharge, sähköstaattinen purkaus
ETSI	European telecommunications standards institute
FCA	Flip-chip assembly
GaAs	Gallium-arsenidi
HPA	High power amplifier, tehovahvistin
IF	Intermediate frequency, välitaajuus
IFU	Intermediate frequency unit, välitaajuusyksikkö
IRR	Image rejection rate, peilitaajuusvaimennus
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LNA	Low noise amplifier, pienikohinainen vahvistin
LO	Local oscillator, paikallisoskillaattori
MMIC	Microwave monolithic integrated circuit
MTTF	Mean time to failure, keskimääräinen vikaantumisaika
MWU	Microwave unit, mikroaaltoyksikkö
NF	Noise figure, kohinaluku

OIP3	Output third-order intercept point, lähdön kolmannen kertaluvun keskinäismodulaatiosärön leikkauspiste
PtMP	Point-to-multipoint
PtP	Point-to-point
PSU	Power supply unit, teholähde
QAM	Quadrature amplitude modulation, kvadratuuri-amplitudi-modulaatio
QFN	Quad flat non-leaded
SA	Spectrum analyzer, spektrianalysaattori
SMA	SubMiniature version A (-liitin)
SMD	Surface mount device, pintaliitoskomponentti
SSB	Single sideband, yksisivukaistainen
VCO	Voltage controlled oscillator, jänniteohjattu oskillaattori
WG	Waveguide, aaltoputki
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

SYMBOLILUETTELO

L_{\max}	Suurin vaimennus
L_{\min}	Pienin vaimennus
$P_{1\text{dB}}$	Yhden desibelin kompressiopiste
P_{in}	Tuloteho
P_{out}	Lähtöteho
P_{sat}	Teho kyllästystilassa

1. JOHDANTO

Mikroaaltoradioiden käyttö tiedonsiirrossa on lisääntynyt huomattavasti viime vuosina. Niiden suorituskyky ja tiedonsiirtokapasiteetti ovat jatkuvasti parantuneet ja hinta laskenut, mutta paine hintojen laskuun on edelleen kova. Radiolinkkeihin pohjautuvia matkapuhelinverkkoja rakennetaan nyt kiivaaseen tahtiin erityisesti kehittyvissä maissa, joissa kustannustehokkuus on erityisen tärkeää.

Mikroaaltoradion kallein yksittäinen lohko on mikroaaltoyksikkö, joten siitä on luontevaa lähteä etsimään säästöjä. Se on kenties myös teknisesti haastavin, sillä se on ainoa lohko, jossa komponenttien on toimittava käytössä olevalla lopputaajuudella jopa 40 gigahertsiin saakka. Korkeiden taajuuksien vuoksi on turvauduttu tekniikkaan, jossa paljas siru kiinnitetään ja bondataan joko piirilevyille tai piirilevyn alla olevalle metallitasolle ilman koteloa. Menetelmä on hidas ja kallis ja lisäksi se vaatii erityislaitteita. Radion muut osat on toteutettu pintaliitoskomponenteilla, joten samalla tekniikalla toteutetun mikroaaltoyksikön valmistaminen onnistuisi samoilla laitteilla ja voisi siten tuoda huomattavia kustannussäästöjä.

Tässä työssä tutkitaan mihin taajuuksiin asti (7-38 GHz) on mahdollista käyttää ainoastaan koteloituja pintaliitoskomponentteja mikroaaltoyksikön valmistamisessa. Lisäksi selvitetään valmistustekniikoiden hintaeroja sekä teknologian mukanaan tuomia etuja ja haittoja. Lopuksi työssä vertaillaan mittauksin pintaliitostekniikalla ja perinteisellä tekniikalla toteutettujen mikroaaltoyksiköiden suorituskykyä.

Diplomityö noudattaa seuraavaa rakennetta: Luvussa 2 esitetään yleisesti mikroaaltoradion ja mikroaaltoyksikön rakenne sekä esitellään piirien liitosteknologioita. Luvussa 3 esitellään kaupallisia pintaliitoskoteloituja komponentteja ja pohditaan niiden soveltuvuutta mikroaaltoyksikön valmistamiseen. Luvussa 4 pohditaan mikroaaltotaajuuksilla toimivien pintaliitospiirien erityispiirteitä. Mittaukset on esitelty luvussa 5 ja tulokset luvussa 6. Yhteenveto työstä ja sen tuloksista esitetään luvussa 7.

2. TAUSTATIETOA

2.1. Mikroaaltoradio

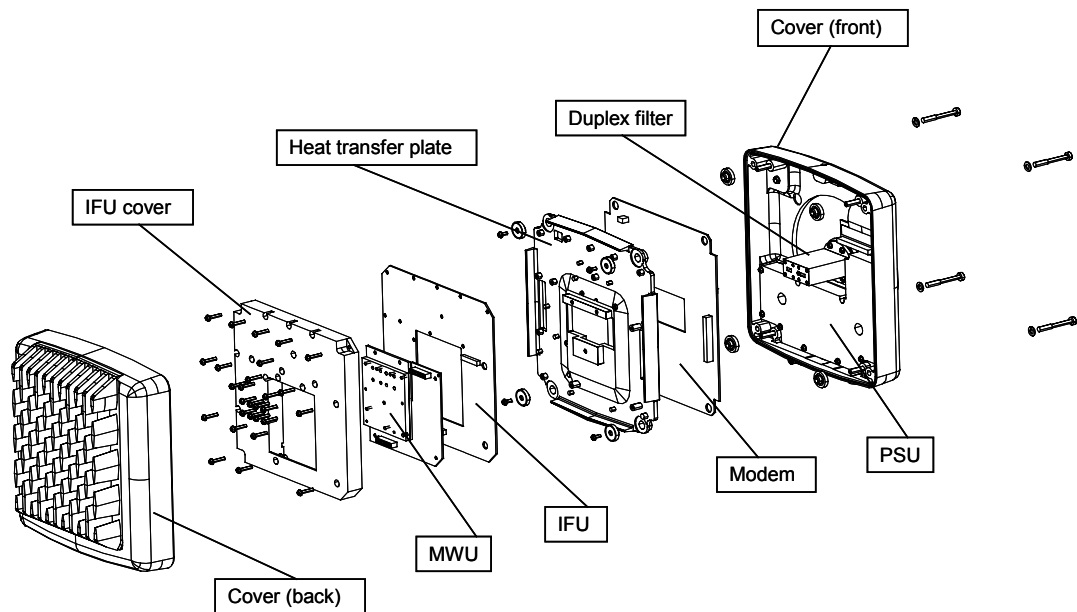
Mikroaaltoradioita voidaan käyttää tietoliikenneyhteyksissä perinteisten kaapeleiden tai optisten kuitujen sijaan. Kaapeleiden kaivaminen maahan on melko hidasta ja kallista etenkin kaupungeissa, ja lisäksi siihen tarvitaan maanomistajan lupa. Maan pinnan alla olevat kaapelit voivat vaurioitua maanjäristyksissä tai kaivuutöissä, jolloin pitkäkin katkos yhteyksissä on mahdollinen.

Mikroaaltoradioilla luotava langaton yhteys on nopea pystyttävä, jolloin yhteyden päätepisteitä voidaan helposti muuttaa tarpeen tullen. Langaton yhteys on oikein suunniteltuna ja toteutettuna myös erittäin luotettava. Rankkasateet saattavat pahimmillaan jopa katkaista radioyhteyden, jos sadevaimennusta ei ole otettu huomioon riittävän suurella vaimennusvaralla. Sateen laannuttua yhteys kuitenkin alkaa jälleen toimia. Radiolinkki on usein kaapelia halvempi vaihtoehto, jos kaivaminen on syystä tai toisesta tavanomaista vaikeampaa. Korkeita taajuuksia käytettäessä tarvitaan käytännössä näköyhteys lähettimen ja vastaanottimen välille, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia etenkin kaupunkiympäristössä. Yhteyksien pituudet ovat mikroaaltotaajuuksilla pisimmillään lähes sata kilometriä, kun käytetään matalaa taajuutta, pientä tiedonsiirtokapasiteettia ja suurta antennia. Käytettäessä korkeaa taajuutta, suurta tiedonsiirtokapasiteettia ja pientä antennia, jää yhteyden pituus alle viiteen kilometriin.

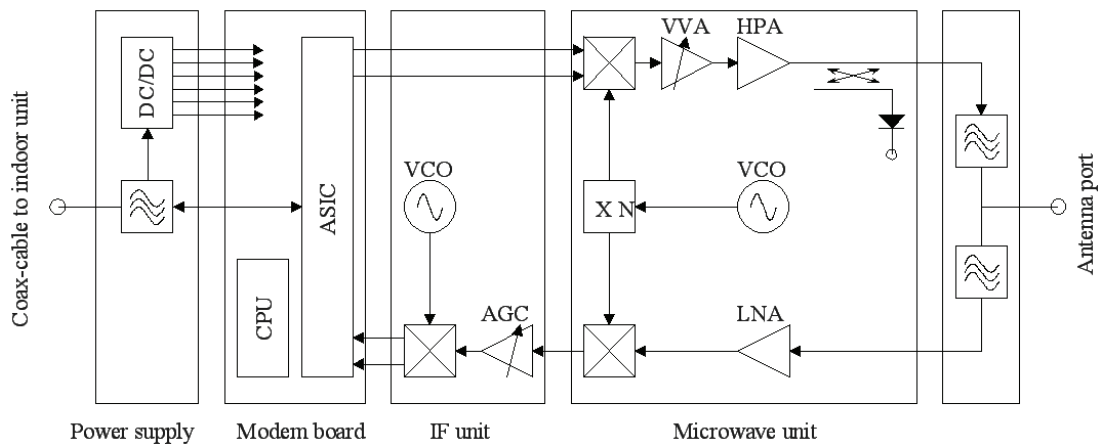
Mikroaaltoradiot voidaan jakaa kahteen ryhmään vastaanottajien määrän perusteella. Nopeissa liityntäjärjestelmissä on yksi keskusasema, joka lähettää ja vastaanottaa tietoa useiden käyttäjien kesken. Näin voidaan esimerkiksi jakaa Internet-yhteys usealle käyttäjälle vetämällä kaapeli vain keskusasemalle. Tällaista järjestelmää kutsutaan englanniksi nimellä point-to-multipoint (PtMP), ja tämän kaltaisia järjestelmiä ovat mm. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ja LMDS (Local Multipoint Distribution Service) [1].

Toinen ryhmä ovat point-to-point (PtP) radiot, jotka muodostavat yleensä kiinteän, kaksisuuntaisen tietoliikenneyhteyden kahden radion välille. Lähetys ja vastaanotto tapahtuvat eri taajuuksilla siten, että toisen radion vastaanottotaajuus on toisen lähetystaajuus ja päinvastoin. Näin voidaan lähettää ja vastaanottaa samanaikaisesti. Mikroaaltoradioilla tarkoitetaan tässä työssä jatkossa point-to-point-radioita, joihin työ pääasiassa liittyy.

Kuvassa 2.1 on esitetty erään mikroaaltoradion kokoonpanokuva, josta ilmenee sen sisältämät osat. Kuvassa 2.2 on esitetty vastaava lohko-kaavio. Teholähde (PSU) tarjoaa muiden osien tarvitsemat virrat ja jännitteet. Lähetyksessä modeemi (Modem) moduloi kantataajuudella olevan hyötysignaalin, josta se jatkaa välitaajuusyksikölle (IFU), jossa moduloitu signaali sekoitetaan välitaajuudelle. Mikroaaltoyksikössä välitaajuinen moduloitu signaali sekoitetaan lähetystaajuudelle ja vahvistetaan, jonka jälkeen se kulkee suodattimen (Duplex filter) läpi antennille. Vastaanotossa periaate on vastaava, mutta päinvastaisessa järjestyksessä.



Kuva 2.1 Mikroaaltoradion osat [2]



Kuva 2.2 Mikroaaltoradiation lohkokaavio [2]

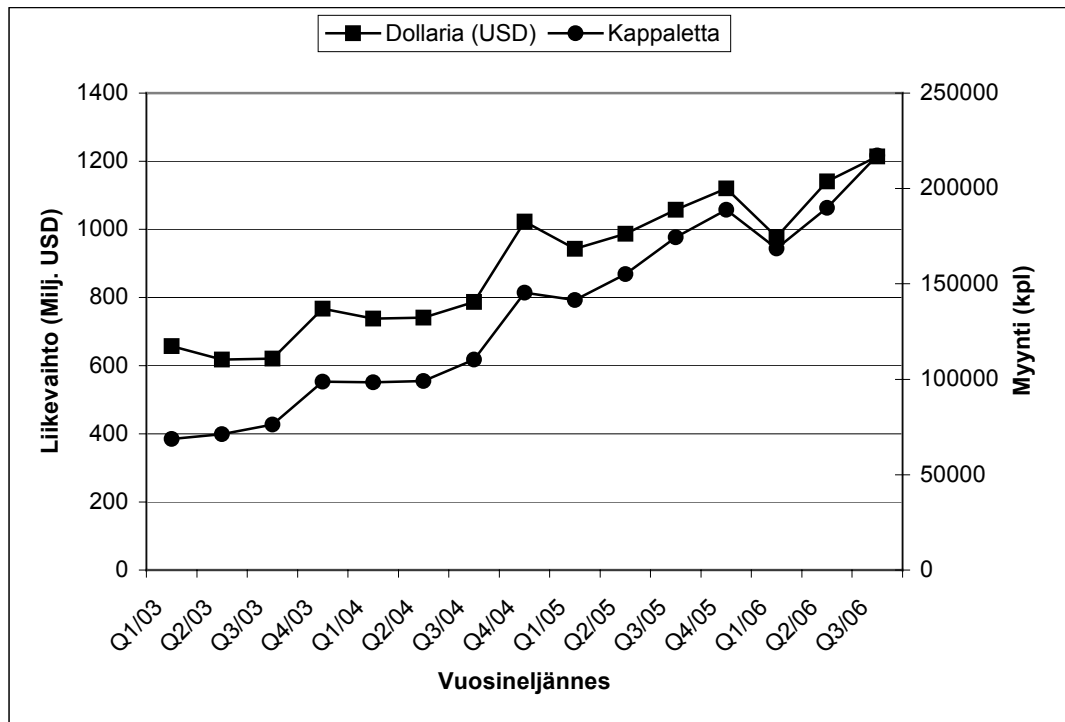
2.2. Mikroaaltoradioiden markkinatilanne

Mikroaaltoradioiden myynti on kasvanut 2000-luvulla noin 15-30 % vuosittain ja kasvun ennustetaan jatkuvan. Myynnin kasvua vauhdittavat

- mobiilikäyttäjien määrän kasvu
- mobiililaajakaistan lisääntynyt kysyntä
- suurta kapasitettia vaativien sovellusten, kuten videokonferenssien ja Internetin kautta katsottavien videoiden ja lähetysten lisääntynyt käyttö
- kaapeleihin perustuvan tiedonsiirtoverkon vajavaisuus tai puuttuminen kehittyvissä maissa [3].

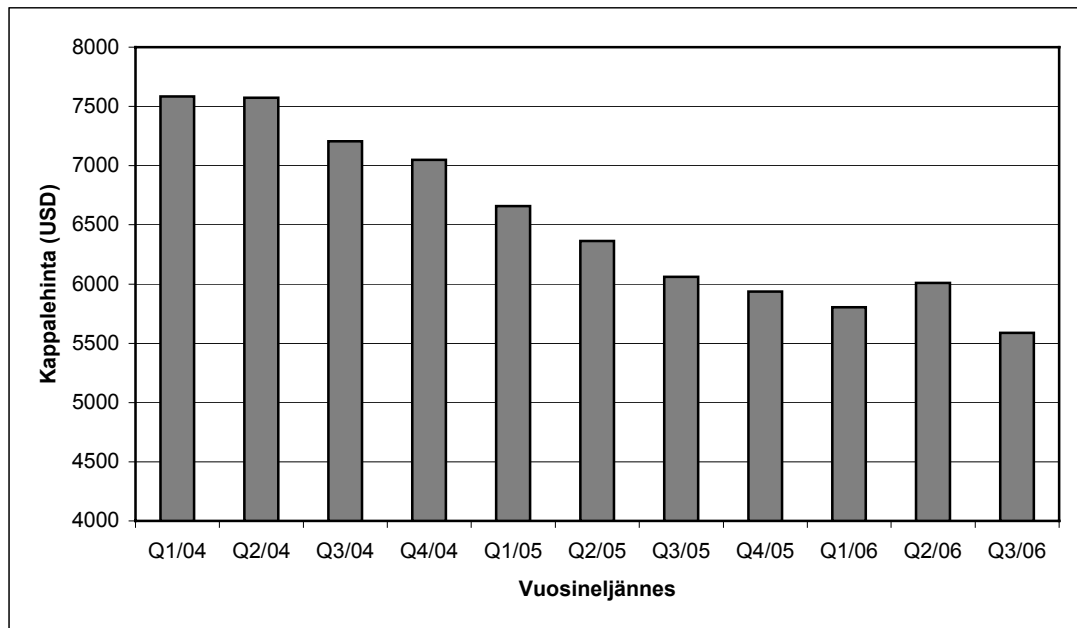
Myyntiä kasvattaa erityisesti kehittyvissä maissa lisääntyvä mobiilikäyttäjien määrä ja sitä kautta verkon laajentuminen. Langattomat datayhteydet lisäävät siirretyn tiedon määrää ja se luo tarvetta käyttää suuren kapasiteetin radioita. Tällä hetkellä jo noin 70 % mikroaaltoradioiden myynnistä tulee mobiilimarkkinoista.

Kuvassa 2.3 esitetään mikroaaltoradioiden maailmanlaajuinen kappalemääräinen myynti sekä liikevaihto miljoonissa dollareissa vuosineljänneksittäin. Kuvasta 2.3 huomataan, että mikroaaltoradioiden liikevaihto ei ole kasvanut samaa tahtia myyntimäärän kanssa. Kilpailu alalla näyttää pudottavan radioiden hintaa nopeasti.



Kuva 2.3 Mikroaltoradioiden myyntimäärä ja liikevaihto [3]

Kuvassa 2.4 on esitetty myytyjen mikroaltoradioiden keskihinta vuosineljänneksittäin. Tilanne ei tosin ole aivan näin yksiselitteinen, koska radiot kehittyvät nopeasti, ja myöhemmin myydyt radiot ovat mahdollisesti edeltäjiään suorituskykyisempiä tai niillä on parempi tiedonsiirtokapasiteetti. Yksikköhinnan lasku olisi todennäköisesti siis vielä jyrkempi, jos tutkittaisiin myytyjen radioiden sijaan esimerkiksi myytyä tiedonsiirtokapasiteettia. Valmistuskustannuksia olisi alennettava, jotta nykyinen hintakehitys voisi jatkua. Tässä työssä tutkitaan mahdollisuuksia valmistaa mikroaltoradion kallein yksikkö, mikroaltoyksikkö, uudella menetelmällä, jotta valmistuskustannuksia saataisiin mahdollisesti pienemmiksi.



Kuva 2.4 Mikroaaltoradioiden kappalehinnan kehitys [3]

2.3. Mikroaltoyksikkö

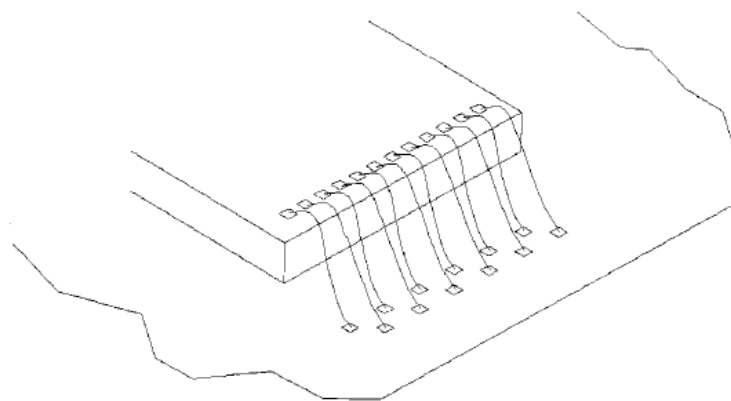
Mikroaltoyksikön yksinkertaistettu lohkokaavio on esitetty kuvassa 2.2. Kuvassa esitettyjä mikroaltoyksikön toiminnan kannalta oleellisia piirejä ovat mm. sekoitin, jänniteohjattu oskillaattori (VCO), tehovahvistin (HPA) ja pienikohinainen vahvistin (LNA). Piirien tarkempi toiminta ja vaatimukset esitellään luvussa 3, jossa tutkitaan kunkin komponentin saatavuutta paketoituna.

Välitaajuusyksiköltä tuleva lähetettävä signaali sekoitetaan oskillaattorilta kertojan kautta tulleella signaalilla lähetystaajuudelle. Sen jälkeen signaalia vaimennetaan ja vahvistetaan halutun tehon saavuttamiseksi. Suuntakytkimellä otetaan signaalista näyte, jonka perusteella vaimennusta tai vahvistusta muutetaan halutun tehon saamiseksi. Suuntakytkimen jälkeen signaali kulkee duplex-suodattimen läpi antennille.

Vastaanotossa antennilta tulee duplex-suodattimen läpi haluttu signaali mikroaltoyksikön vastaanottimeen. Vastaanotettu signaali vahvistetaan pienikohinallisella vahvistimella ja sekoitetaan alaspäin välitaajuudelle. Signaali jatkaa välitaajuusyksikölle, jossa signaalin taso vakioidaan ja sekoitetaan kantataajuudelle.

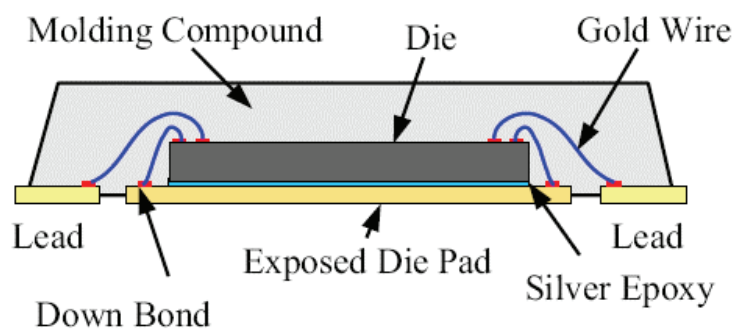
2.4. MMIC-piirien asennustavat

Mikroaaltoyksikön mikroaltopiirit ovat tyypillisesti COB- tai COM-tekniikalla piirilevyyn liitetyjä MMIC-piirejä. COB-tekniikassa koteloimaton siru liimataan piirilevyille ja yhdistetään sähköisesti piirilevyyn yleensä kultalangoilla eli bondataan. COM-tekniikka on kuten COB, mutta piiri liimataan piirilevyille tehdystä aukosta suoraan piirilevyn alla olevaan metalliin. COM-tekniikalla piirissä syntyvä lämpö saadaan nopeammin johdettua pois piiristä. Kuvassa 2.5 on periaatekuva bondatusta piiristä. Bondaus tehdään siis vasta piirilevyn ladontavaiheessa, jolloin on investoitava myös latomisen yhteydessä tarvittavaan bondauslaitteistoon. Piirilevyjen ladonnasta tulee hitaampaa ja kalliimpaa kuin käytettäessä vain juotettavia komponentteja. Asennuksen hinta on noin kolminkertainen pintaliitoskomponentteihin verrattuna, kun otetaan huomioon tarvittavat lisäinvestoinnit sekä hitaamman ladonnan aiheuttamat kustannukset [4].



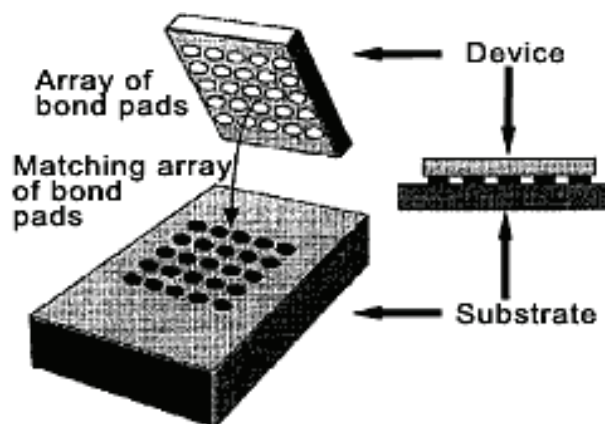
Kuva 2.5 Periaatekuva COB-asennuksesta (lankabondaus) [5]

Pintaliitoskoteloitunut piirit (SMD) bondataan jo valmistusvaiheessa kotelossa oleviin kontakteihin, joten ne voidaan juottaa suoraan piirilevyille ladontavaiheessa. Kuvassa 2.6 on poikkileikkaus QFN-koteloitusta piiristä. Koteloituja piirejä valmistetaan tyypillisesti suurissa erissä ja piirin toiminta testataan usein ennen ja jälkeen koteloinnin. Suuret erät ja kunnollinen testaus mahdollistavat SMD-piireille COB-piirejä huomattavasti nopeamman ladonnan sekä edullisemmän kokonaishinnan [4].



Kuva 2.6 Poikkileikkaus QFN-paketoidusta piiristä [6]

SMD- ja COB-menetelmien lisäksi käytetään myös ns. flip-chip-asennusta (FCA), joka on eräänlainen välimuoto edellä mainituille menetelmille. Flip-chip-piirit ovat koteloimattomia siruja, joiden yläpinnalla on kontaktinastat, joihin laitetaan juotetta. Vastaaviin kohtiin piirilevyllä tehdään kontaktit. Ladontavaiheessa nimensä mukaisesti käännetään flip-chip-tyyppinen piiri piirilevyllä varattuun kohtaan ja kontaktit juotetaan kiinni toisiinsa kuumentamalla piirissä ollut juote uudelleen. Flip-chip-piirien asennuksen kokonaishinnan on laskettu olevan noin kaksinkertainen SMD-piireihin verrattuna ja noin 2/3 COB-piirien asennushinnasta [4]. Periaate on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7 Periaatekuva flip-chip-tyyppisen piirin asennuksesta [7]

Piirin koteloinnilla ja asennustavalla on huomattava vaikutus ladonnan kokonaiskustannuksiin. Taulukosta 2.1 nähdään kustannuksia nostavat tekijät eri valmistusteknologioissa. Tarvittavan laitteiston hankinnasta aiheutuvat kulut on huomioitu kustannuksissa 50 % osuudella ja valmistusnopeuden aiheuttamat kulut täysimääräisinä. Laskentatapa perustuu siihen, että laitteisto säilyttää osan arvostaan, mutta hitaan valmistustahdin kulut tuntuvat jokaisessa valmistetussa tuotteessa. Kustannuksiin ei ole laskettu materiaali- eikä korjauskustannuksia, jotka

ovat lähteen [4] mukaan lähes varmasti pienimmät SMD-piireillä, eikä niiden vaikutusta voi jättää huomioimatta lopullista päätöstä tehdessä. Tulevaisuudessa COB- ja FCA-teknologioiden yleistymisen saattaa pienentää kyseisten teknologioiden valmistuskustannuksia [4].

Taulukko 2.1 Valmistuskustannukset asennusteknologian mukaan [4]

Asennusteknologia	SMD	COB	FCA
Valmistusnopeus (levyä/h)	327	72	257
Laitteistokerroin (50%)	X	2,6 X	1,9 X
Valmistusnopeuserroin (100%)	X	1,8 X	1,2 X
Ennustettu valmistuskustannus	X	3,1 X	2,2 X
Mitattu valmistuskustannus	X	3,0 X	-

Edellä esitetyn tuloksen perusteella kustannussäästöt voisivat olla huomattavia, jos mikroaltoyksiköissä nykyisin käytettävät bondattavat piirit pystyttäisiin kaikki korvaamaan pintaliitospiireillä. Oleellista on nimenomaan saada kaikki piirit pintaliitoskoteloituna, jotta ei tarvittaisi kahta teknologiaa rinnakkain. Mikroaaltoradion muut piirilevyt sisältävät vain pintaliitoskomponentteja, joten kaikki levyt voitaisiin periaatteessa valmistaa samoilla laitteilla, jos bondaus-tekniikasta voitaisiin luopua.

3. MARKKINOILLA OLEVAT SMD MMIC-KOMPONENTIT

Tässä luvussa esitellään kaupallisesti tarjolla olevia pintaliitoskoteloituja MMIC-komponentteja, joita voidaan käyttää linkkiradion mikroaaltoyksikössä 7-38 GHz:n taajuuksilla. Tarkoituksena on selvittää komponenttien saatavuus eri taajuusalueiden radioille.

Lähetysketjussa IQ-sekoittimelta pyritään saamaan suuritehoinen signaali, joka on käytännössä noin -15 dBm. Signaali kulkee vahvistin-vaimennin-ketjun läpi, jossa tarvitaan noin 40 dB:n vahvistus. Lopuksi signaalista osa otetaan suuntakytkimellä tehon mittaukseen, jonka perusteella säädetään ketjun vaimentimien vaimennusta. Signaalitasot riippuvat käytetystä taajuudesta, mutta tyypillisesti signaalin tason on oltava lähetysketjun päässä 20-25 dBm.

Vastaanottoketjussa signaali vahvistetaan pienikohinaisella vahvistimella IQ-sekoittimelle. Vahvistusta tarvitaan noin 15 dB ja kohinaluvun on oltava noin 5 dB taajuusalueesta riippuen.

Vahvistinketjun vahvistusta ei saada suoraan laskemalla ilmoitettuja vahvistuksia ja vaimennuksia yhteen, koska piirien ominaisuudet muuttuvat vallitsevien olosuhteiden mukaan. Käytännössä prosessivaihtelut sekä muutokset taajuuden ja lämpötilan suhteen pudottavat tehoa huonoimmassa tapauksessa muutaman desibelin, ja sen mukaan on vahvistinketju mitoitettava. Tämä pätee lähes kaikkiin komponentteihin ja tyypillisiä arvoja käytettäessä se on muistettava ottaa huomioon.

Komponentteja etsittiin julkisista lähteistä suurten mikroaaltopiirien valmistajien valikoimista. Valmistajiin kuuluivat Hittite, Triquint, UMS, Velocium, Avago Technologies ja Mimix Broadband. Tiedot on kerätty valmistajien sivuilta löytyvistä ohjelehdistä (engl. *data sheet*), joihin on viittaukset taulukoissa. Tiedot kerättiin heinäkuussa 2007.

3.1. SMD-pakkaukset

Erilaisia pintaliitoskoteloita on lukuisia ja niitä kehitetään jatkuvasti lisää. Koteloilta vaaditaan paljon käytettäessä korkeita taajuuksia ja tehotasoja. Parasiittisten kapasitanssien ja induktanssien on oltava mahdollisimman pieniä, kotelon on johdettava hyvin lämpöä pois itse piiristä, kotelon on oltava helposti juotettava ja lisäksi edullinen.

Löydetyistä mikroaaltoyksikköön sopivista komponenteista selvä enemmistö oli QFN-kotelossa. Esitellyistä komponenteista ainoastaan Hittiten piirit eivät olleet kyseisessä kotelossa. Myös Hittiten kotelot muistuttivat ainakin ulkoisesti hyvin paljon QFN-koteloita, mutta kotelo oli keraaminen (alumina, Al_2O_3) eikä muovia, kuten QFN-koteloissa. Poikkileikkaus QFN-kotelosta on esitetty kuvassa 2.6.

3.2. Tehovahvistin

Tehovahvistin on lähetysketjun viimeinen vahvistin. Tehovahvistimen jälkeen ketjussa on suuntakytkin ja duplex-suodatin, jotka aiheuttavat taajuusalueesta riippuen yhdestä kolmeen desibeliä vaimennusta. Tehovahvistimesta on saatava tehoa halutun lähetystehon lisäksi em. vaimennusten verran. Tehovahvistimista tutkittiin taajuusaluetta, yhden desibelin kompressiopistettä sekä lineaarisuutta. Vaatimukset täyttäviä koteloituja tehovahvistimia on esitelty taulukossa 3.1. Taulukossa on käytetty ilmoitettuja tyypillisiä arvoja ja P_{1dB} on tarvittaessa laskettu vähentämällä kaksi desibeliä P_{sat} -arvosta.

Taulukko 3.1 Sopivia tehovahvistimia

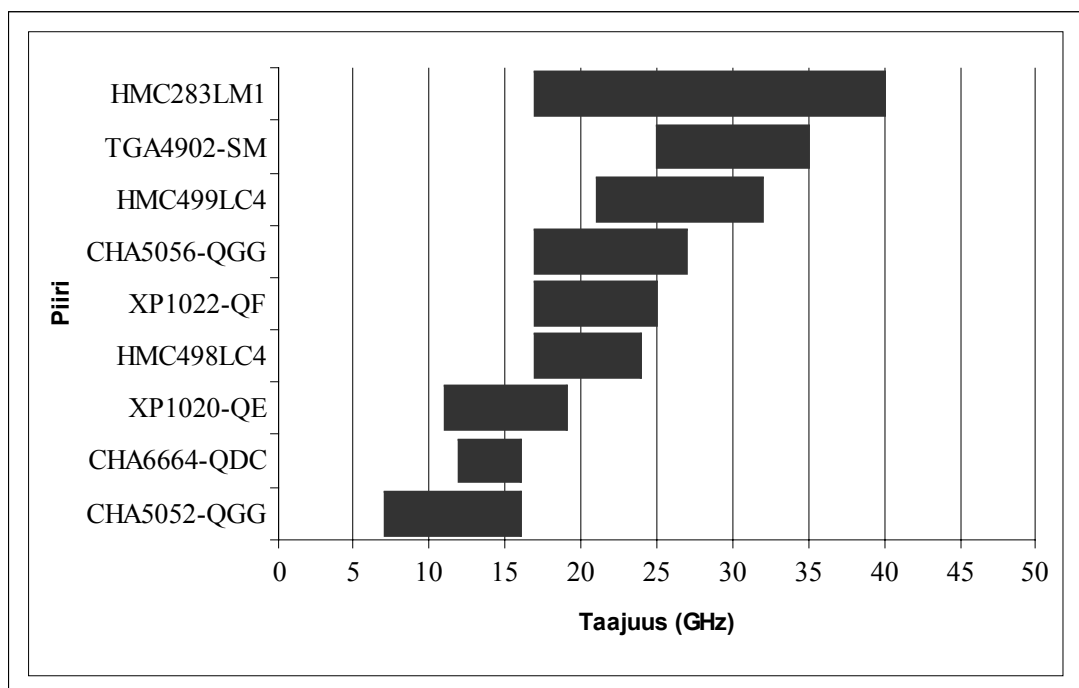
Valmistaja	Piiri	Taajuus (GHz)	P_{1dB} (dBm)	OIP3 (dBm)	Kotelo
Hittite	HMC283LM1	17-40	18	27	LM1 [8]
Triquint	TGA4902-SM	25-35	25	-	QFN [9]
Hittite	HMC499LC4	21-32	23	34	LC4 [10]
UMS	CHA5056-QGG	17-27	28,5	38	QFN [11]
Mimix	XP1022-QF	17-25	28	35	QFN [12]
Hittite	HMC498LC4	17-24	25	36	LC4 [13]
Mimix	XP1020-QE	11-19	25*	-	QFN [14]
UMS	CHA6664-QDC	12-16	30	-	QFN [15]
UMS	CHA5052-QGG	7-16	29	37	QFN [16]

*laskettu arvo

Hittiten valmistama HMC283LM1 ylittää korkeimmille taajuuksille, mutta lähtöteho on melko pieni. Lähtötehoa luvataan yhden desibelin kompressiossa vain 18 dBm, joka on liian vähän. Käyttämällä kahta vahvistinta rinnan, saadaan tehoa teoriassa 3 dB lisää, jolloin teho olisi riittävä. Kyseinen vahvistin on erittäin laajakaistainen, joten on huomioitava myös kaukana hyötysignaalin taajuudesta olevien häiriöiden eteneminen. Tämä ei muodostu ongelmaksi, jos ketjun aikaisemmat vahvistimet ovat kapeakaistaisia ja suodattavat siten tehokkaasti käytetyn kaistan ulkopuolella olevia häiriöitä.

Triquintin TGA4902-SM on riittävän tehokas vahvistin, mutta sen taajuusalue loppuu 35 GHz:iin. Tehon ja ominaisuuksien puolesta vaikuttaa siltä, että kyseistä vahvistinta voitaisiin hyvin käyttää esimerkiksi 32 GHz:n mikroaaltoyksiköissä.

Kuvasta 3.1 nähdään, että valituilla tehovahvistimilla saadaan hyvin katettua kaikki linkk radioiden käyttämät taajuusalueet. Tehovahvistimien tarjonta on runsasta noin 25 GHz:iin saakka, jonka jälkeen valmistajien ja piirien määrä pienenee selvästi.



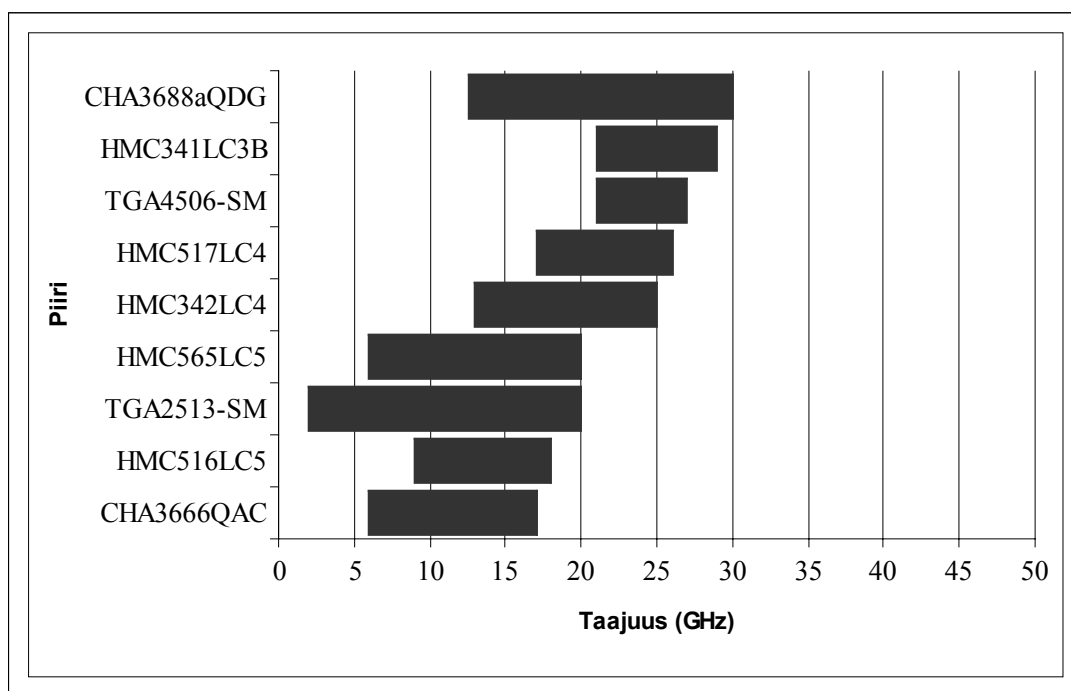
Kuva 3.1 Tehovahvistimien toimintataajuudet

3.3. Pienikohinainen vahvistin

Pienikohinainen vahvistin (LNA) vahvistaa vastaanotetun signaalin ennen alasekoittamista, joten myös sen on toimittava lopputaajuudella. Taulukossa 3.2 on esitelty parhaiten sopivia vahvistimia ja kuvassa 3.2 niiden toimintataajuudet.

Taulukko 3.2 Pienikohinaisia vahvistimia

Valmistaja	Piiri	Taajuus (GHz)	Vahvistus (dB)	NF (dB)	Kotelo
UMS	CHA3688aQDG	12,5-30	26	2	QFN [17]
Hittite	HMC341LC3B	21-29	13	3	LC3B [18]
Triquint	TGA4506-SM	21-27	21	2,5	QFN [19]
Hittite	HMC517LC4	17-26	19	2,5	LC4 [20]
Hittite	HMC342LC4	13-25	20	3,5	LC4 [21]
Hittite	HMC565LC5	6-20	21	2,5	LC5 [22]
Triquint	TGA2513-SM	2-20	17	2,5	QFN [23]
Hittite	HMC516LC5	9-18	20	2	LC5 [24]
UMS	CHA3666QAC	6-17	21	1,8	QFN [25]



Kuva 3.2 Pienikohinaisten vahvistimien toimintataajuudet

Kuten kuvasta 3.2 nähdään, tutkituilta valmistajilta ei löytynyt yhtään koteloitua LNA:ta, jonka luvattaisiin toimivan yli 30 GHz:n taajuuksilla, joten korkeimpien taajuuksien mikroaaltoyksiköitä ei näillä voida valmistaa. Sen sijaan alle 30 GHz:n taajuudet saadaan hyvin katettua. Jokaiselle taajuusalueelle löytyy useita vahvistimia.

Näin voidaan hieman painottaa jotain tiettyä ominaisuutta, kuten kohinalukua, vahvistusta, saatavuutta tai hintaa. Kohinaluvuissa tai vahvistuksissa ei ole suuria eroja muutamaa poikkeuksia lukuunottamatta.

3.4. Yleisvahvistin

Yleisvahvistinta käytetään mm. tehovahvistimen ohjaamiseen. Vahvistimen tehtävänä on sovittaa impedanssi sopivaksi tehovahvistimelle ja vahvistaa signaali sopivalle tasolle seuraavaa vahvistinta varten. Taulukossa 3.3 on esitelty yleisvahvistimia ja kuvassa 3.3 niiden toimintataajuuudet.

Taulukko 3.3 Yleisvahvistimia

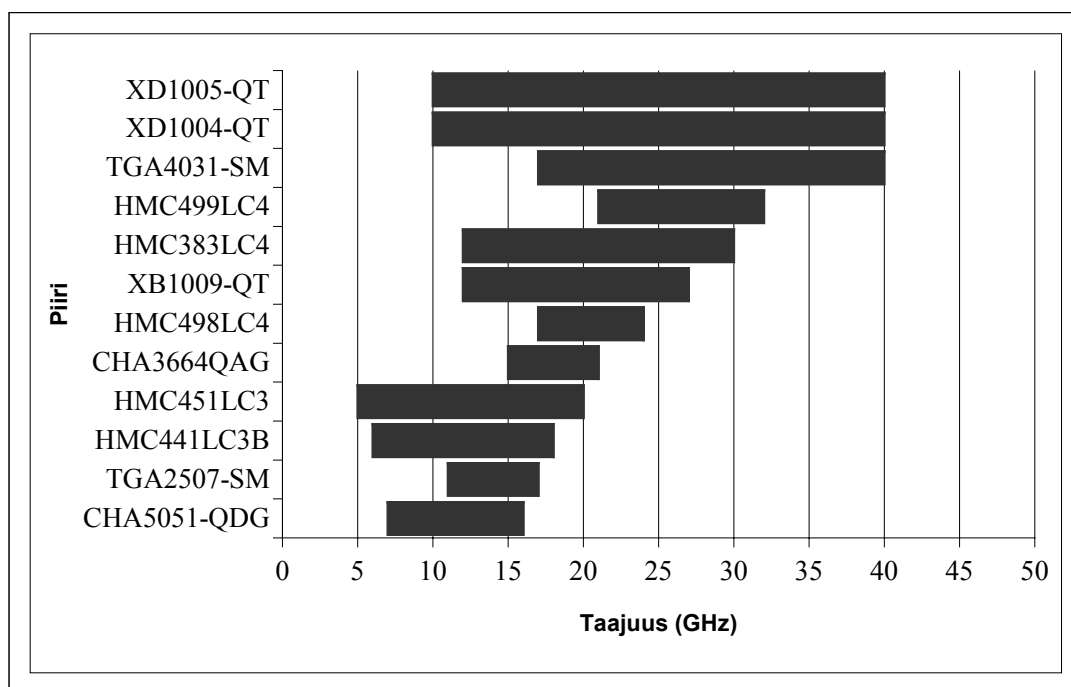
Valmistaja	Piiri	Taajuus (GHz)	Vahvistus (dB)	P_{1dB} (dBm)	NF (dB)	Kotelo
Mimix	XD1005-QT	10-40	18	-	6	QFN [26]
Mimix	XD1004-QT	10-40	12	-	6	QFN [27]
Triquint	TGA4031-SM	17-40	22	18	8	QFN [28]
Hittite	HMC499LC4	21-32	16	23	5	LC4 [29]
Hittite	HMC383LC4	12-30	15	16	8	LC4 [30]
Mimix	XB1009-QT	12-27	16	22	5	QFN [31]
Hittite	HMC498LC4	17-24	22	25	4	LC4 [32]
UMS	CHA3664QAG	15-21	15	18,5*	6	QFN [33]
Hittite	HMC451LC3	5-20	19	19	7	LC3 [34]
Hittite	HMC441LC3B	6-18	17	20	4,5	LC3B [35]
Triquint	TGA2507-SM	11-17	23	17	-	QFN [36]
UMS	CHA5051-QDG	7-16	25	25	3,2	QFN [37]

*laskettu arvo

Mimix Broadband valmistaa kahta lähes samanlaista vahvistinta, XD1005-QT ja XD1004-QT. Näkyvin eroavaisuus on kuuden desibelin ero vahvistuksessa, mutta molemmat todennäköisesti toimisivat mikroaaltoyksikössä yleisvahvistimina korkeimmille taajuuksille saakka. Kyseiset mallit olivat ”Pre-production”-tilassa eikä ulostulotehoa yhden desibelin kompressiopisteessä oltu ilmoitettu. Vahvistimet ovat todella laajakaistaisia kattaen lähes koko mikroalatoradioiden käyttämän taajuusalueen (7-38 GHz.) Kyseisiä vahvistimia voinee käyttää kaikkien aiemmin esiteltyjen tehovahvistimien yhteydessä. Pieni huolenaihe kyseisissä vahvistimissa on epätasainen vahvistus, jonka vaihtelu taajuuden funktiona on jopa ± 5 dB.

Vahvistus vaihtelee todella jyrkästi alueella 25...35 GHz, ja se voi haitata kyseisillä taajuuksilla toteutettavia mikroaaltoyksiköitä.

Triquintin TGA4031-SM on vahvistukseltaan tasainen korkeilla taajuuksilla, mutta sen kohinaluku on Mimixin vahvistimia suurempi. Matalemmilla taajuuksilla tarjontaa on runsaasti, kuten kuva 3.3 osoittaa.



Kuva 3.3 Yleisvahvistimien toimintataajuudet

Kuvasta 3.3 nähdään, että osa vahvistimista on hyvin laajakaistaisia, etenkin ylimpänä olevat mallit. Hyötysignaalin ulkopuolella olevat häiriöt pääsevät vapaasti etenemään, jos lähetinketjun kaikki vahvistimet ovat laajakaistaisia. Tyypillisesti vahvistimien vahvistus laskee taajuuden kasvaessa, joten käytettäessä laajakaistaisia vahvistimia korkeilla taajuuksilla, voivat häiriöt kasvaa jopa hyötysignaalia suuremmiksi.

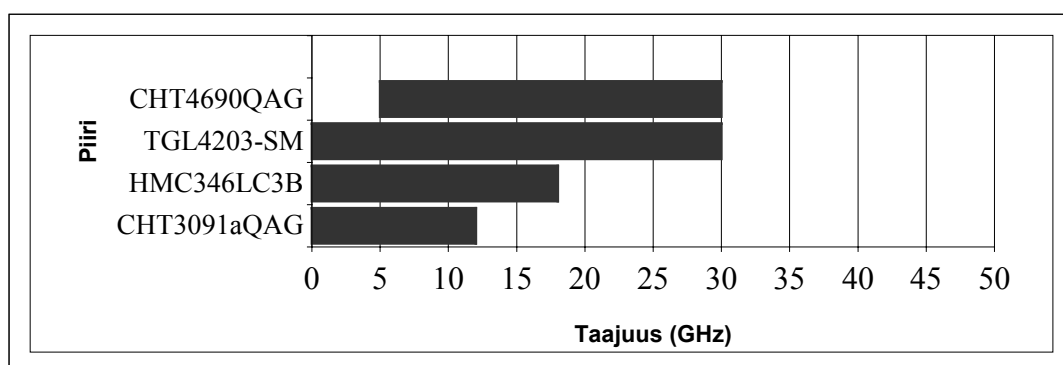
3.5. Jänniteohjattu vaimennin

Jänniteohjattua vaimenninta käytetään lähetinketjussa lähtötehon säätöön sekä kompensoimaan lähetinketjun vahvistuksen vaihteluita. Mikroaaltotaajuisilla vahvistimilla on yleensä kiinteä vaimennus ja lähtötehoa säädetään vahvistinketjussa olevilla vaimentimilla. Vaimentimen vaimennuksen dynaamisen säätöalueen on

oltava vähintään saman verran kuin suurin mahdollinen lähtötehon muutos lisätynä ketjun vahvistuksen vaihtelulla. Taulukossa 3.4 on jänniteohjattuja vaimentimia.

Taulukko 3.4 Jänniteohjattuja vaimentimia

Valmistaja	Piiri	Taajuus (GHz)	L_{\min} (dB)	L_{\max} (dB)	Kotelo
UMS	CHT4690QAG	5-30	4	35	QFN [38]
Triquint	TGL4203-SM	0-30	2	17	QFN [39]
Hittite	HMC346LC3B	0-18	2,8	28,8	LC3B [40]
UMS	CHT3091aQAG	0-12	3	23	QFN [41]



Kuva 3.4 Jänniteohjattujen vaimentimien toimintataajuudet

Tutkituilta valmistajilta ei löytynyt ainuttakaan koteloitua jänniteohjattua vaimenninta, jonka luvattaisiin toimivan 40 GHz:iin asti. Tosin UMS:n CHT4690QAG-vaimentimen ohjelehdessä on esitetty vaimentimen vaimennus taajuuden funktiona 40 GHz:iin asti, jolloin pienin vaimennus on 12 dB ja suurin 32 dB. Vaimentimen käyttö on melko hankalaa näin korkeilla taajuuksilla, koska saatetaan tarvita yksi vahvistin suuren väliinkytkemisvaimennuksen kompensoimiseksi. Korkeilla taajuuksilla myös kyseisen vaimentimen dynaaminen alue kutistuu 20 desibeliin, joten vaimentimia tarvitaan ainakin kaksi. Vaimentimen käyttö saattaa onnistua yli 30 GHz:n taajuuksilla, mutta sitä varten on syytä tehdä perusteellisempi selvitys vaimentimen käyttäytymisestä korkeilla taajuuksilla.

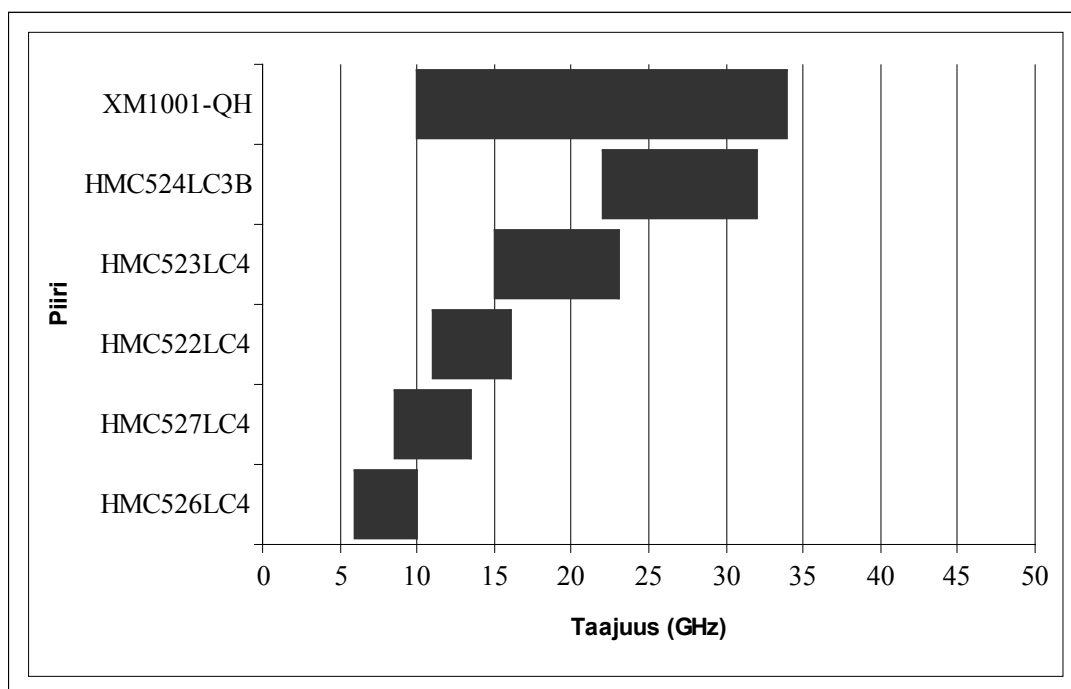
Sekä UMS että Triquint valmistavat vaimentimia 30 GHz:iin saakka, ja molempien piirien taajuusalue kattaa myös kaikki matalammat linkkiradiotaajuudet. Matalille taajuuksille on saatavana myös muita malleja.

3.6. IQ-sekoitin

IQ-sekoittimen tehtävänä lähetyspuolella on muuntaa välitaajuudella (IF) oleva IQ-moduloitu signaali käytettävälle lopputaajuudelle ja vastaanotossa päinvastoin. Sekoittimesta saatavavasta signaalin tehotasosta riippuu lähetysketjussa tarvittava vahvistus. Lisäksi sekoittimen lineaarisuus määrää suurimman mahdollisen tehotason lopputaajuudella. Aivan korkeimmille linkkiradiotaajuuksille yltäviä IQ-sekoittimia ei näyttäisi olevan tällä hetkellä tuotannossa. Tarkemmat tiedot ovat taulukossa 3.5.

Taulukko 3.5 IQ-sekoittimien tiedot

Valmistaja	Piiri	Taajuus (GHz)	$P_{in, 1dB}$ (dB)	Sekoitusvaim.(dB)	IRR (dB)	Kotelo
Mimix	XM1001-QH	10-34	20	6	20	QFN [42]
Hittite	HMC524LC3B	22-32	16	10	20	LC3B [43]
Hittite	HMC523LC4	15-23	15	8	25	LC4 [44]
Hittite	HMC522LC4	11-16	14	7,5	25	LC4 [45]
Hittite	HMC527LC4	8,5-13,5	21	8	25	LC4 [46]
Hittite	HMC526LC4	6-10	19	7,5	30	LC4 [47]



Kuva 3.5 IQ-sekoittimien toimintataajuudet

Ainoastaan Hittiten valikoimasta löytyi täydellinen sarja IQ-sekoittimia. Niiden toimintataajuudet menevät päällekkäin sopivassa kohdassa linkkiradiotaajuuksien välisellä alueella, joten niitä voidaan hyvin käyttää tähän tarkoitukseen. Myös Mimix

tarjoaa sekoitinta, mutta se on huomattavasti laajakaistaisempi kuin Hittiten mallit ja kattaa lähes koko Hittiten tarjoaman sarjan taajuudet.

Kaikkien sekoittimien välitaajuusalue alkoi nolasta hertsistä ja jatkui vähintään kahteen gigahertsiin, joten kaikki mallit sopivat käyttötarkoitukseen myös siinä mielessä.

3.7. Jänniteohjattu oskillaattori

Sekoittimen tarvitsema paikallisoskillaattorisignaali tuotetaan jänniteohjatulla oskillaattorilla sekä tätä mahdollisesti seuraavalla taajuuskertojalla. Taulukossa 3.6 on esitelty jänniteohjattuja oskillaattoreita.

Taulukko 3.6 Jänniteohjattuja oskillaattoreita

Valmistaja	Piiri	Taajuus (GHz)	SSB vaihekohina (dBc/Hz)		Kotelo
			100 kHz	1 MHz	
Hittite	HMC587LC4B	5-10	-95	-120	LC4B [48]
Hittite	HMC588LC4B	8-12,5	-93	-114	LC4B [49]

Hittite valmistaa kahta laajakaistaista oskillaattoria, HMC587LC4B ja HMC588LC4B. Koska korkeampiin taajuuksiin yltäviä oskillaattoreita ei löytynyt, on käytettävä neljällä kertojaa tai kahta kahdella kertojaa, jotta saadaan tuotettua kaikki linkkiradioiden taajuudet.

Käytännössä oskillaattoreita on tarjolla linkkiradiotaajuuksille huomattavasti enemmän, mutta niistä ei ollut julkista tietoa saatavilla.

3.8. Taajuuskertoja

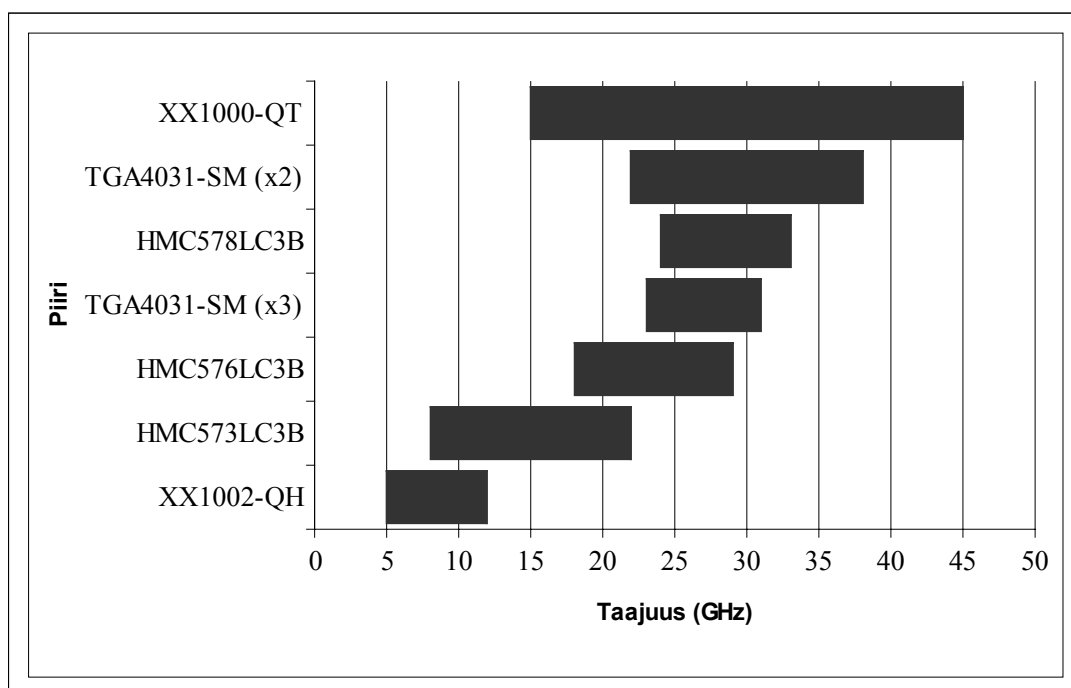
Taajuuskertojaa käytetään jänniteohjatun oskillaattorin signaalin taajuuden nostamiseen sekoittimille sopivaksi. Yleensä oskillaattorilta tuleva signaali on taajuudeltaan alle 10 GHz ja sitä kerrotaan tarvittaessa kahdella, kolmella tai neljällä halutun paikallisoskillaattorisignaalin tuottamiseksi. Taulukossa 3.7 on kertojia, joilla voidaan kattaa kaikki linkkiradioiden käyttämät taajuudet.

Taulukko 3.7 Taajuuskertojia

Valmistaja	Piiri	Lopputaajuus (GHz)	Kerroin	P_{in} (min) (dBm)	Kotelo
Mimix	XX1000-QT	15-45	2	-10	QFN [50]
Triquint	TGA4031-SM (x2)	22-38	2	9	QFN [28]
Hittite	HMC578LC3B	24-33	2	0	LC3B [51]
Triquint	TGA4031-SM (x3)	23-31	3	9	QFN [28]
Hittite	HMC576LC3B	18-29	2	0	LC3B [52]
Hittite	HMC573LC3B	8-22	2	0	LC3B [53]
Mimix	XX1002-QH	5-12	2	-3	QFN [54]

Esitellyistä taajuuskertojista yksi oli kolmella kertova ja loput kahdella kertovia. Koska neljällä kertovia piirejä ei löytynyt, on korkeilla taajuuksilla käytettävä kahta kahdella kertovaa peräkkäin. Kuvassa 3.6 on esitetty kertojien toimintataajuudet.

Taajuuskertojien kiinnostavin malli on Triquintin TGA4031-SM, joka on esitelty myös yleisvahvistimien joukossa. Yhdessä kotelossa on 17-40 GHz yleisvahvistin sekä kahdella ja kolmella kertojat. Käyttämällä kyseistä piiriä vahvistimena saataisiin samalla taajuuskertoja ja mahdollisesti tilaa säästyisi piirilevyiltä.

**Kuva 3.6** Taajuuskertojien toimintataajuudet

3.9. Yhteenveto komponenteista

Pintaliitoskomponenttien tarjonta korkeille taajuuksille on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosina. Osa tämän katsauksen komponenteista olikin prototyyppejä tai juuri tulossa sarjatuotantoon. Taulukosta 3.8 nähdään, että vaikeimmaksi komponentiksi osoittautui pienikohinainen vahvistin. Julkisesti esillä olevista LNA-piireistä kaksi pääsi 30 GHz:in taajuuksiin. Esitetyn kaltaista mikroaaltoyksikköä ei voida toteuttaa ilman kyseistä vahvistinta, joten 26 GHz on korkein käytetty taajuusalue, jolle linkkiradiota voidaan valmistaa käyttämällä ainoastaan pintaliitoskomponentteja.

Taulukko 3.8 Komponenttien saatavuus taajuusalueittain

Komponentti	Taajuusalue (GHz)							
	7	8	13	15	23	26	32	38
Tehovahvistin	•	•	•	•	•	•	•	○
Pienikohinainen vahvistin	•	•	•	•	•	•		
Yleisvahvistin	•	•	•	•	•	•	•	•
Jänniteohjattu vaimennin	•	•	•	•	•	•	○	○
IQ-sekoitin	•	•	•	•	•	•	•	
Jänniteohjattu oskillaattori	•	•	•	•	•	•	•	•
Taajuuskertoja	•	•	•	•	•	•	•	•

• saatavilla
○ saatavilla, vaatii lisäselvityksiä

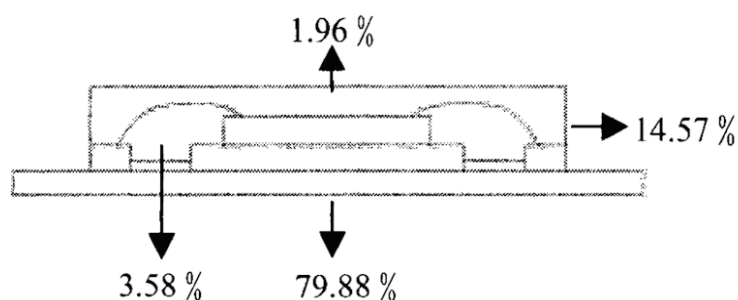
4. PINTALIITOSKOMPONENTTIEN ERITYISPIIRTEITÄ

4.1. Tekniikan ongelmakohdat

Koteloidut piirit ovat usein samoja, joita myydään myös paljain siruina, jolloin itse piirin sisäinen toiminta ei riipu kotelosta. Kotelon tuomat vaikutukset liittyvät lämpötalouteen ja sovitukseen. Hyvien sovitusten saamiseksi ovat useimmat piirivalmistajat tehneet seikkaperäiset ohjeet piirilevyn suunnitteluun ja valmistukseen.

Koteloidun piirin lämpeneminen voi muodostua ongelmaksi varsinkin tehovahvistimessa, joka kuluttaa paljon virtaa. On selvää, että suoraan metalliseen runkoon kiinnitetty piiri johtaa paremmin lämpöä pois itse piiristä kuin piirilevyn päällä muovikotelon sisällä oleva piiri.

Tutkitaan lämmön siirtymistä QFN-kotelon tapauksessa, koska se oli selvästi yleisin kotelotyyppi esiteltyjen komponenttien joukossa. Lämpötaloutta voidaan parantaa pienentämällä lämpöresistanssia kotelon pohjan ja piirilevyn välillä, jotta lämpö siirtyisi piirilevyyn, sekä lisäämällä kotelon efektiivistä pinta-alaa [55]. Kuvasta 2.6 nähdään, että siru on kiinni kotelon pohjan johdinrakenteessa hopeaepoksilla lämmönjohtavuuden parantamiseksi ja suurin osa lämmöstä johtuukin pohjan kautta pois piiristä. Kuvasta 4.1 selviää tarkemmat osuudet lämmönsiirtymisestä luonnollisessa konvektiossa, kun ilma on saanut liikkua vapaasti.



Kuva 4.1 Lämmön siirtyminen QFN-kotelosta luonnollisessa konvektiossa [55]

Tehovahvistimen lämpenemisestä ei saada tarkkaa tietoa ilman lisätutkimuksia. Esimerkiksi Triquintin TGA4902-SM –tehovahvistimen ohjelehdessä selviää, että 60 asteen lämpötilassa tehon kulutuksen olisi oltava alle 1,5 W ja 30 asteessa 2 W, jotta päästään miljoonan tunnin keskimääräiseen elinikään [9]. Kyseisen piirin maksimi tehonkulutus on noin 2,5 W, joten varsinkin kuumissa olosuhteissa voi tulla ongelmia saada suuria tehoja.

Lämpötalouden tutkimisen tekee ongelmalliseksi mikroaaltoradion rakenne. Mikroaltoyksikön piirilevy on kiinnitetty suoraan metalliseen koteloon, joka taas on kiinnitetty radion metalliseen runkoon. Rakenteessa lämpö johtuu hyvin piirilevystä mikroaltoyksikköön ja siitä edelleen koko radion koteloon, jolloin lämpötilan sekä mikroaltoyksikössä että sen piirilevyssä ja piireissä pitäisi laskea huomattavasti verrattuna ilmassa olevaan piirilevyyn. Ilman lisäselvityksiä lämmön johtumisesta mikroaltoyksikön piirilevystä eteenpäin ei voida sanoa aiheuttaako lämpeneminen ongelmia.

4.2. Luotettavuus

Pintaliitoskomponenttien juotosten luotettavuudesta on tehty useita tutkimuksia. Myös tässä keskitytään juotosten luotettavuuden tutkimiseen. Tietoa itse piirin luotettavuudesta lämpötilan funktiona saa piirin ohjelehdessä esitettyjen MTF-tietojen perusteella.

Koska mikroaaltoradio vaatii kunnolla toimiakseen käytännössä näköyhteyden toiseen radioon, ne sijoitetaan usein korkeille paikoille, kuten mastoihin tai talojen katoille. Tällöin ne altistuvat sään vaihteluille, kuten sateelle, kuumuudelle ja kylmyydelle. Vaihtelevat olosuhteet aiheuttavat kosteuden ja lämpölaajenemisen vuoksi rasiutusta etenkin juotoksille.

QFN-kotelon juotoksen elinikä on melko lyhyt verrattuna perinteiseen koteloon, jossa on ulkonevat johtimet. Lähteessä [56] on esitetty laajahko tutkimus QFN-kotelon juotoksien eliniästä ja vikaantumismekanismeista. Tutkimuksessa käytettiin eri kokoisia *daisy chain* -kytkettyjä QFN-koteloita. *Daisy chain* tarkoittaa piirien johtimien kytkemistä sarjaan siten, että yhden juotoksen pettäminen näkyy heti resistanssissa. Tässä esimerkissä parittomat johtimet yhdistettiin piirissä parillisiin (1-2, 3-4, 5-6, jne) ja vastaavasti piirilevyllä parilliset parittomiin (2-3, 4-5, 6-7, jne).

Näin muodostuu ketju, joka kulkee piirin ensimmäisestä johtimesta järjestyksessä viimeiseen saakka. Juotoksen pettäminen nähdään kasvaneena resistanssina ensimmäisen ja viimeisen johtimen välillä. Tyypillisesti resistanssi on noin kymmenen ohmia juotosten ollessa kunnossa. Tutkimuksessa kytkentä luokiteltiin vikaantuneeksi, kun resistanssi ylitti kolmesataa ohmia.

Tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista lämpösykliä. Ensimmäisellä tavalla lämpötila vaihteli välillä 0 °C ... 100 °C siten, että lämpötilan muutos ääripäiden välillä kesti kymmenen minuuttia ja molemmissa päissä odotettiin viisi minuuttia. Toisella tavalla lämpötila vaihteli välillä -40 °C ... 125 °C vaihdoksen kestäessä 15 minuuttia ja molemmissa päissä odotettiin myös 15 minuuttia. Lämpötilat olivat ympäröivän ilman lämpötiloja. Taulukossa 4.1 on esitetty tutkimuksen tulokset, joista selviää lämpösykliä lukumäärä ensimmäiseen vikaantumisen tapahtuessa.

Taulukko 4.1 QFN-kotelon juotosten luotettavuus [56]

Kotelon koko (mm x mm)	Pinnijako (mm)	Pinnejä (kpl)	Lämpösykli (°C)	Aika 1. vikaan (sykliä)
5 x 5	0,65	20	0...100	2958
5 x 5	0,65	20	-40...125	1740
5 x 5	0,50	32	0...100	3048
5 x 5	0,50	32	-40...125	1853
7 x 7	0,65	32	0...100	5057
7 x 7	0,65	32	-40...125	>2000
7 x 7	0,50	44	0...100	4914
7 x 7	0,50	44	-40...125	1505
7 x 7	0,50	48	0...100	3950
7 x 7	0,50	48	-40...125	1340
8 x 8	0,50	56	0...100	1293
8 x 8	0,50	56	-40...125	621
9 x 9	0,65	44	-40...125	3500

Kolmannessa luvussa esitellyt komponentit ovat kooltaan kolmesta kuuteen millimetriä, joten todennäköisesti viiden millimetrin kotelo antaa parhaan kuvan kyseisten komponenttien juotosten luotettavuudesta.

Mikroalatoradion toimintaympäristö voidaan yksinkertaistaa vuorokauden kestäväksi lämpösykliksi. Yöllä on viileää, päivällä lämpötila kohoaa huippuun ja laskee jälleen illalla. Luonnon lämpösykli on huomattavasti hitaampi kuin esitetyssä tutkimuksessa ja ääripäiden erokin on pienempi. Ulkoilmassa rasiuksen pitäisi siis olla huomattavasti koejärjestelyn rasiusta pienempi. Jos otetaan kevyemmän

lämpösyklin antama tulos huomioon sellaisenaan, mutta muutetaan syklien lukumäärä päiviksi, saadaan vikaantumisajaksi noin kahdeksan vuotta.

Lisäksi on huomioitava, että piiristä riippuen kytkettyjen pinnien lukumäärä vaihtelee, eikä yleensä läheskään kaikki pinnit ole kytkettyjä. Esimerkiksi HMC383LC4-yleisvahvistimella on kotelossaan 24 pinniä, joista vain kolme pinniä on kytketty. Piiri toimii edelleen moitteettomasti, jos joku kytkemättömien pinnien juotoksista vikaantuu, joten piirin toiminnan vikaantumisen todennäköisyys pienenee edelleen.

Käytännössä mikroaaltoyksikön kokemissa olosuhteissa eliniän voidaan olettaa olevan selvästi tutkimuksissa havaittua korkeampi ja siten riittävän pitkä kestäämään radion elinkaaren ajan.

4.3. Tuotannollisuus

Kaikki elektroniset komponentit ovat ainakin jossain määrin herkkiä sähköstaattisille purkauksille (ESD), eivätkä GaAs MMIC -piirit tee poikkeusta. Useimmissa digitaalisissa puolijohteissa on jonkinlainen suojapiiri lähtö- ja tuloporteissa ESD:n varalta. GaAs MMIC -piireissä ei kuitenkaan yleensä ole mitään suojausta, sillä se heikentäisi suorituskykyä. Suojapiirit aiheuttavat parasiittista reaktanssia, joka rajoittaa suorituskykyä korkeilla taajuuksilla. [57]

Elektrostaattinen purkaus voi tapahtua neljällä eri tavalla: ihmisen varautunut keho koskettaa piiriä, varautunut piiri koskettaa maatasoa, varautunut laite koskettaa piiriä tai elektrostaattinen kenttä indusoi niin suuren jännitteen eristeen yli, että tapahtuu läpilyönti [58]. Yleensä GaAs MMIC -piirit kuuluvat 1A ESD-luokitukseen, jolloin ne voivat vaurioitua yli 250 V:n sähköstaattisesta purkauksesta. Negatiivinen jännite hilalla aiheuttaa herkimmin vikaantumisen. Piirien käsittely vaatii ESD-suojauksen noudattamista tiukasti.

ESD-ongelmat ovat lisääntymässä elektroniikkateollisuudessa, koska alalla suunnataan jatkuvasti suurempiin nopeuksiin ja pienempiin piireihin [58]. ESD-suojaukseen on syytä kiinnittää huomiota, sillä GaAs MMIC -piirit ovat erityisen herkkiä. ESD-ongelmat näkyvät heti huonontuneina saantoina ja pidemmällä aikavälillä tuotteiden laadun alenemisena.

5. MITTAUKSET

Tässä luvussa esitetään työssä tehdyt mittaukset. Jokaisen väliotsikon jälkeen esitellään kyseinen mittausta ja perustellaan sen tarpeellisuus. Tehdyistä mittauksista esitetään mittauskentän laitteineen ja selostetaan mittaustapahtuma tarkemmin.

Mittauksissa tutkittiin kriittisimpiä parametreja eri mikroaaltoyksiköistä. Mittauksia jouduttiin hieman karsimaan tiukan aikataulun vuoksi. Valitut mittaukset antavat melko kattavasti tietoa mikroaaltoyksikön käytännön suorituskyvystä.

Ryhmä erilaisia bondaamalla tehtyjä mikroaaltoyksiköitä mitattiin ja tuloksista laskettiin keskiarvo. Näihin mikroaaltoyksiköihin viittaa mittauksissa ja mittaustuloksissa lyhenne COB. Mittauksista laskettuja keskiarvoja verrattiin yhden pintaliitoskomponenteista valmistetun mikroaaltoyksikön mittaustuloksiin. Pintaliitostekniikalla tehtyyn mikroaaltoyksikköön viittaa mittauksissa ja tuloksissa lyhenne SMD. Kaikki mittaukset tehtiin saman taajuusalueen mikroaaltoyksiköillä. Osasta mittauksista mittaukset tehtiin taajuusalueen ala- ja yläpäässä mahdollisten muutosten löytämiseksi.

Pintaliitoskomponenteista valmistettu mikroaaltoyksikkö on vasta kehitysvaiheessa, joten sen ominaisuuksia vielä säädetään ja parannellaan. On siis hyvinkin mahdollista, että ainakin osa mitatuista tuloksista paranee vielä kehityksen myötä.

Koska kyseessä on vertaileva mittausta, pyrittiin absoluuttisen mittaustarkkuuden tarkan laskemisen sijaan pitämään mittaussympäristö stabiilina. Tärkeänä pidettiin mittaustarkkuuden ja mittaukseen liittyvien muuttujien pysymistä mahdollisimman muuttumattomina eri yksiköiden mittausten välillä. Se mahdollistaa luotettavan vertailun yksiköiden ja valmistustekniikoiden välillä.

Mittauksissa käytettyjen kaapeleiden ja tehonjakajan vaimennukset mitattiin tutkittavilla taajuuksilla ennen varsinaisia mittauksia. Vaimennukset otettiin huomioon mittaustuloksia käsitellessä.

Mittauksissa käytetyt laitteet ja mittauskentän esineet esiintyvät lyhenteet ovat taulukossa 5.1. Mittauskentän kuvissa koaksiaalikaapeli on merkitty lohkojen väliin

kolminkertaisella viivalla ja selostuksesta ilmenee käytetyn kaapelin malli. SMA→WG ja WG→SMA ovat yksi ja sama adapteri, jolla siirrytään SMA-liittimestä aaltoputkeen tai päinvastoin. Käytetty lyhenne ilmaisee vain siirtymän suunnan.

Taulukko 5.1 Mittauksissa käytetyt lyhenteet ja niitä vastaavat mittauslaitteet

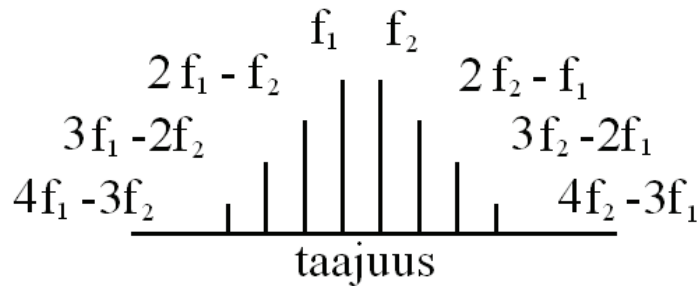
Lyhenne	Toiminto	Valmistaja ja malli
AWG	Signaaligeneraattori	Sony Tektronix AWG520
DC-BLOCK	Tasavirtaestin	Suhner DC Block
MWR	Mikroaaltoradio	Nokia Flexihopper XC
MWU	Mikroaaltoyksikkö	-
NOISE METER	Kohinalukumittari	HP 8970B
NOISE SOURCE	Kohinalähde	HP 346C
POWER METER	Tehomittari	HP 437B
-	Tehomittarin sensori	HP 8481A
SA	Spektrianalysaattori	HP 8563E
SMA→WG	Aaltoputkisiirtymä	Flann Microwave
SPLIT	Tehonjakaja	HP 11667B
WG→SMA	Aaltoputkisiirtymä	Flann Microwave
-	Koaksiaalikaapeli	Suhner Sucoflex 101
-	Koaksiaalikaapeli	Suhner Sucoflex 104

5.1. Lineaarisuus

Lineaarisen vahvistimen ulostulo muuttuu lineaarisesti sisäänmenon funktiona. Sisäänmenevän tehon kasvaessa vahvistimen toiminta muuttuu epälineaariseksi. Lopulta saavutetaan taso, jossa ulostulon teho ei enää kasva vaikka sisäänmenevää tehoa lisättäisiin.

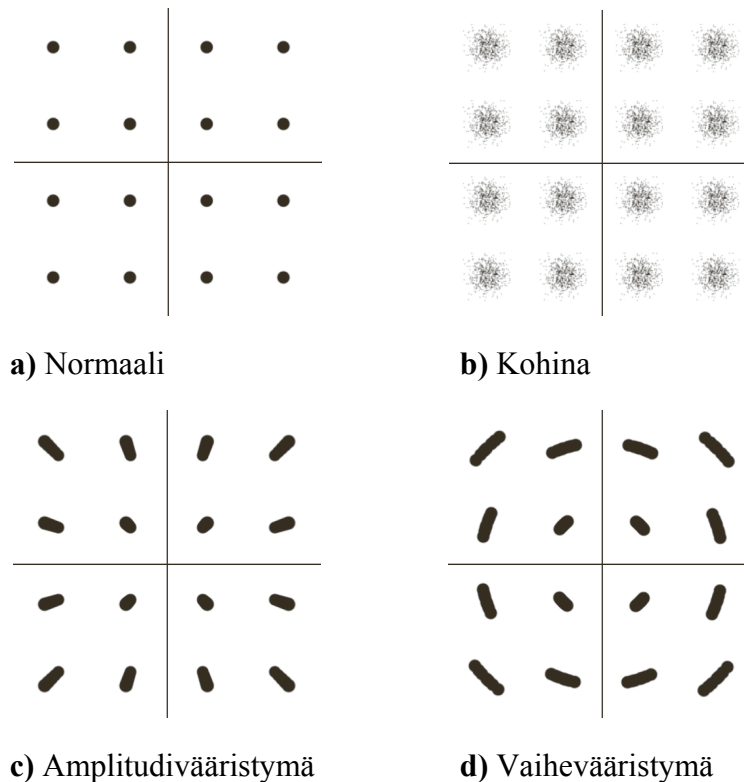
Lineaarisuutta voidaan mitata useilla tavoilla. Yksinkertaisin tapa on tutkia yhden desibelin kompressiopistettä. Tällä tarkoitetaan pistettä, jossa ulostuloteho on pudonnut yhden desibelin lineaariseen käytökseen verrattuna. Usein mitataan kuitenkin keskinäismodulaatiosäröä, joka kertoo enemmän piirin epälineaarisuudesta. Keskinäismodulaatiosäröä mitataan usein ns. *two-tone*-testillä, jossa mitattavaan piiriin syötetään kaksi lähellä toisiaan olevaa taajuutta f_1 ja f_2 .

Epälinearisessa piirissä syntyy keskinäismodulaatiotuloksia taajuuksille $m f_1 + n f_2$, jossa $m + n$ on keskinäismodulaatiotuloksen asteluku [59]. Kuvassa 5.1 on esitetty periaate tarkemmin spektrikuvan avulla.



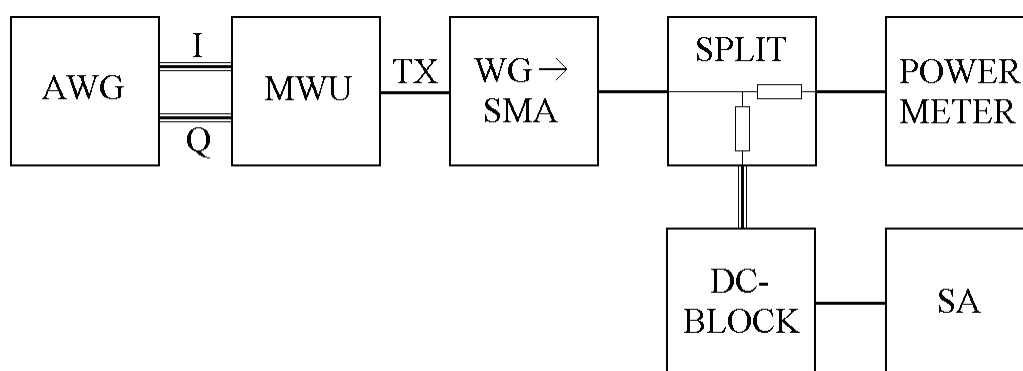
Kuva 5.1 Keskinäismodulaatiosärön muodostumisen periaate

Lineaarisuus on tärkeää, jotta lähetetty informaatio voidaan vastaanottaa virheettömästi. Epälineaarisuus aiheuttaa amplitudin ja vaiheen vääristymistä, jotka vääristävät konstellaatiokuvioita. Konstellaation vääristyminen edesauttaa virheellisten tulkintojen tekoa vastaanottimessa. Jos vääristymisen lisäksi signaali vaimenee runsaasti matkalla vastaanottiin, on mahdollista, että symboli tulkitaan vastaanottimessa väärin. Konstellaation vääristyminen näkyy suoraan myös BER-arvojen huonontumisena. Kuvasta 5.2 selviää, miten amplitudi- ja vaihevääristymät näkyvät konstellaatiokuviossa.



Kuva 5.2 16-QAM:n konstellaatiokuva ja vääristymien vaikutukset

Kuvassa 5.3 on esitetty lineaarisuusmittausten mittauskytkentä. Signaaligeneraattorilta (AWG) saadaan I- ja Q-signaalit, joiden vaihe-ero on 90° ja jotka kummatkin sisältävät 9 MHz ja 10 MHz sinisignaalit. Kyseessä on siis IQ-moduloitu *two-tone*-signaali. Nämä signaalit syötetään koaksiaalikaapeleilla mikroaaltoyksikön testausalustaan (MWU). Testausalustassa I- ja Q-signaaleista muodostetaan välitaajuinen signaali, joka syötetään mikroaaltoyksikköön. Mikroaaltoyksikön lähetyspuolen (TX) aaltoputkiporttiin on kiinnitetty aaltoputki-SMA-adapteri (WG→SMA). Adapterissa on kiinni resistiivinen tehonjakaja (SPLIT). Tehonjakajaan toiseen ulostuloon on kiinnitetty tehomittarin anturi ja toiseen Sucoflex 101 -koaksiaalikaapeli. Signaali kulkee koaksiaalikaapelia pitkin tasavirtaestimen (DC-BLOCK) läpi spektrianalysaattorille (SA). Mittauksessa säädettiin tehomittarin avulla haluttu lähtöteho ja sen jälkeen luettiin spektrianalysaattorin näytöltä keskinäismodulaatiotulosten taso suhteessa kantaaltoon. Spektrianalysaattorissa käytettiin ”Max hold”-toimintoa, joka jättää näytölle suurimman mitatun tehotason, joka mittauksen aikana on esiintynyt. Toimintoa päätettiin käyttää, koska etenkin pienillä tehotasoilla ylimpien kertalukujen keskinäismodulaatiotulokset eivät pysyneet vakioina. IM-tulokset on valittu ns. *worst case* -periaatteella eli aina suurempi (huonompi) arvo otettiin huomioon. Varsinkin SMD-mikroaaltoyksikössä erot olivat huomattavia eri puolten välillä.

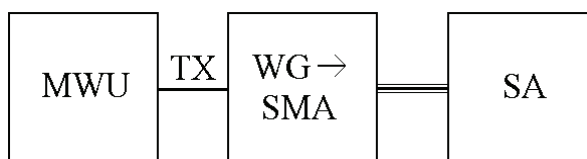


Kuva 5.3 Mittauskytkentä lineaarisuusmittauksissa

5.2. Oskillaattorin vaihekohina

Vaihekohina aiheuttaa konstellaatiokuvion kiertymistä origon ympäri. Periaate on sama kuin vaihevääristymässä (kuva 5.2), mutta kiertymän suunta ja suuruus vaihtelevat jatkuvasti kuten kohinalle on ominaista. Mitä korkea-asteisempi modulaatio on käytössä, sitä lähempänä konstellaation pisteet ovat toisiaan ja sitä pienempi muutos vaiheessa muuttaa symbolin toiseksi symboliksi. Toisin sanoen korkea-asteinen modulaatio on matala-asteista modulaatiota herkempi vaihekohinalle. Vaihekohinan vaikutus näkyy BER-arvojen huonontumisena, kun vaihekohina kasvaa [60].

Kuvassa 5.4 on esitetty oskillaattorin vaihekohinan mittauskytkentä. Mikroaltoyksikön lähetyksenpuolen aalputkiporttiin on liitetty aalputki-SMA-adapteri, joka on yhdistetty spektrianalysaattoriin Sucoflex 101–koaksiaalikaapelilla. Vaihekohinan mittausta varten oli spektrianalysaattorissa oma toiminto, jota käytettiin mittauksessa. Vaihekohinan suuruus mitattiin 10 kHz:n, 100 kHz:n, 1 MHz:n ja 10 MHz:n päässä kantaaallostasta.



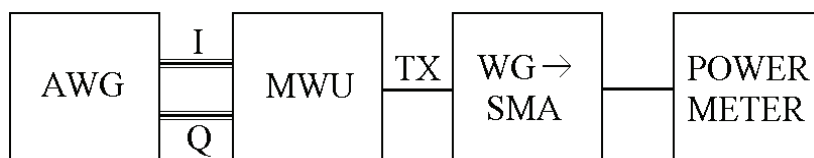
Kuva 5.4 Mittauskytkentä oskillaattorin vaihekohinan mittauksessa

5.3. Lähetyksen stabiilisuus

Lähetyksen pitäisi pysyä samana lähetystaajuudesta riippumatta. Käytännössä pientä vaihtelua kuitenkin on. Lähetyksen loppupäässä signaalista otetaan näyte suuntakytkimellä tehon mittausta varten. Suuntakytkin ei ole täysin ideaalinen, joten sen suuntaavuus on rajallinen. Samoin suuntakytkimen sovitukseen ei ole täydellinen läpi koko taajuusalueen. Myös suuntakytkimen jälkeisistä rajapinnoista voi tapahtua heijastumisia huonojen sovitusten vuoksi.

ETSI määrittelee käytettävän lähetyksen rajat sekä suurimman sallitun poikkeaman käytetystä tehosta, joten lähetyksen on oltava melko stabiili. Liian suuri lähetysteho huonontaa lineaarisuutta, jolloin spektrimaski levenee.

Kuvassa 5.5 on esitetty lähetystehon stabiilisuuden mittauskytkentä. Signaaligeneraattorilta tulee *two-tone*-signaali, joka syötetään mikroaaltoyksikölle kuten lineaarisuusmittauksessa. Mikroaaltoyksikön lähetyspuolen aaltoputkiporttiin on kiinnitetty aaltoputki-SMA-adapteri, johon on kiinnitetty tehomittarin anturi. Teho säädettiin 21 dBm:n tasolle matalimmalla käytössä olevalla taajuudella. Taajuutta nostettiin asteittain ja mitattiin teho kullakin taajuudella.

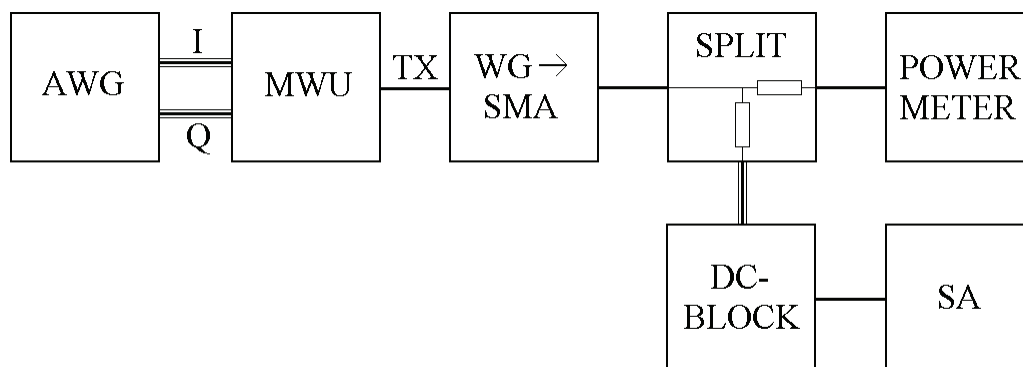


Kuva 5.5 Mittauskytkentä lähetystehon stabiilisuuden mittauksissa

5.4. Lähdön kohinataso

Lähdön kohinatasa rajoittaa periaatteessa vain ETSI:n spektrimaski, joka ei ole kohinatason osalta kovin tiukka. Suuremmaksi ongelmaksi suurilla kohinatasoilla tulee todennäköisesti ylikuuluminen vastaanottopuolelle. Lähetys- ja vastaanottoporttien pitäisi olla eristetty toisistaan, mutta jonkin verran ylikuulumista voi esiintyä, jolloin osa lähetyspuolen kohinasta kytkeytyy suoraan vastaanottoon.

Lähdön kohinataso mitattiin kuvan 5.6 mukaisella mittauskytkennällä. Mittauskytkentä on sama kuin lineaarisuusmittauksissa, mutta spektrianalysaattorilla tutkittiin kohinatasa 20 MHz:n päässä signaalista. Kohinataso mitattiin molemmin puolin signaalia, ja korkeampi tulos jäi voimaan.

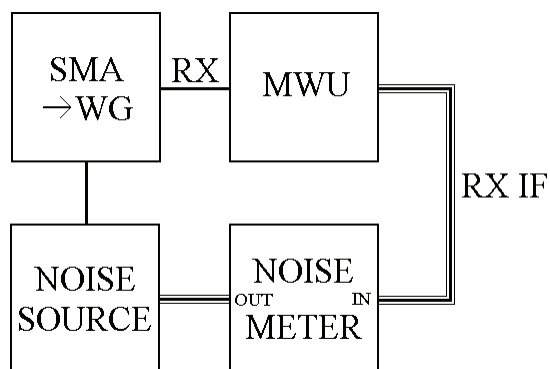


Kuva 5.6 Mittauskytkentä lähdön kohinatason mittauksessa

5.5. Vastaanottimen kohinaluku

Vastaanottimen kohinaluvulla on suora yhteys herkkyyteen. Kohinan kasvaessa herkkyys huononee, koska pienillä tehotasoilla haluttua signaalia ei voida enää erottaa kohinasta.

Kuvassa 5.7 on esitetty vastaanottimen kohinaluvun mittauskytkentä. Kohinalähde on kytketty kohinalukumittarin ulostuloon, joka syöttää jännitepulsseja kohinalähteelle. Kohinalähteestä tuleva kohina syötetään SMA-aaltoputkiadapterilla mikroaaltoyksikön vastaanottopuolen aaltoputkiporttiin. Vastaanottoketjun loppupäästä siirretään vahvistettu ja välitaajuudelle sekoitettu signaali (tässä tapauksessa kohinalähteen kohina) Sucoflex 104 -koaksiaalikaapelilla kohinalukumittarin sisääntuloon.



Kuva 5.7 Vastaanottimen kohinaluvun mittauskytkentä

5.6. Virrankulutus

Virrankulutus on oleellinen tekijä mikroaaltoyksikön lämpötaloudessa. Suurin osa mikroaaltoyksikön kuluttamasta sähkötehosta muuttuu lämmöksi. Koko mikroaaltoyksikön teho on lähes 10 W, kun taas lähetysteho on suurimmillaankin alle 500 mW (27 dBm). Lämpenemisongelman lisäksi teholähde rajoittaa virrankulutusta, koska se on mitoitettu etukäteen tietylle tehotasolle, jota ei voi ylittää.

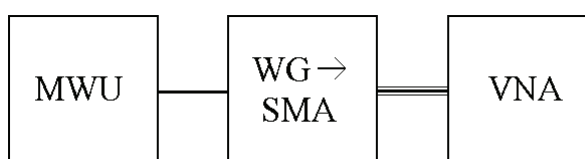
Mikroaaltoyksikön virrankulutus mitattiin lineaarisuusmittausten yhteydessä käyttöjännitekaapeliin kytketyllä virtamittarilla.

5.7. Lähetys- ja vastaanottoporttien sovitukset

Porttien sovitukset ovat oleellinen osa mikroaaltoyksikön toimintaa. Teho ei kulje epäsovituksessa olevan portin läpi kunnolla, vaan osa heijastuu siitä takaisin. Jos sovitus on erittäin huono saattaa merkittävä osa hyötysignaalin tehosta kadota heijastuksiin. Se näkyy lähetyspuolella huonompina lineaarisuusarvoina, koska on käytettävä suurempaa lähetystehoä häviöiden kompensoimiseksi. Vastaanotto puolella suorituskyky huononee suoraan suhteessa sovitukseen, sillä osa tehosta ei koskaan saavuta vastaanotinta. Huono sovitus voi heikentää myös duplex-suodattimen toimintaa aiheuttaen epätasaisen taajuusvasteen päästökaistalle.

Lähdön huono sovitus aiheuttaa myös epävarmuutta tehon mittauksessa. Tehodetektorille kytkeytyy näyte suuntakytkimen kautta lähetysketjun lopussa, ja huonot sovitukset aiheuttavat käytännössä taajuusriippuvuutta kytkeytyvälle signaalille.

Porttien sovitukset mitattiin vektoripiirianalysointilaitteella kuvan 5.8 mukaisella kytkennällä. Piirianalysointilaitteella oli kytketty SMA-aaltoputki-adaptterilla mikroaaltoyksikön lähetys- tai vastaanotto puolen porttiin ja S_{11} -parametrit mitattiin käytettävän taajuusalueen yli. S_{11} -parametri kertoo portista 1 lähtevän tehon suhteen porttiin 1 tulevaan tehoon. Käytännössä se tarkoittaa heijastuneen tehon suhdetta lähetettyyn tehoon. Mitä enemmän tehoa heijastuu, sitä huonompi on sovitus. Ideaalitapauksessa kaikki teho menisi kuormaan eikä heijastusta tapahtuisi.

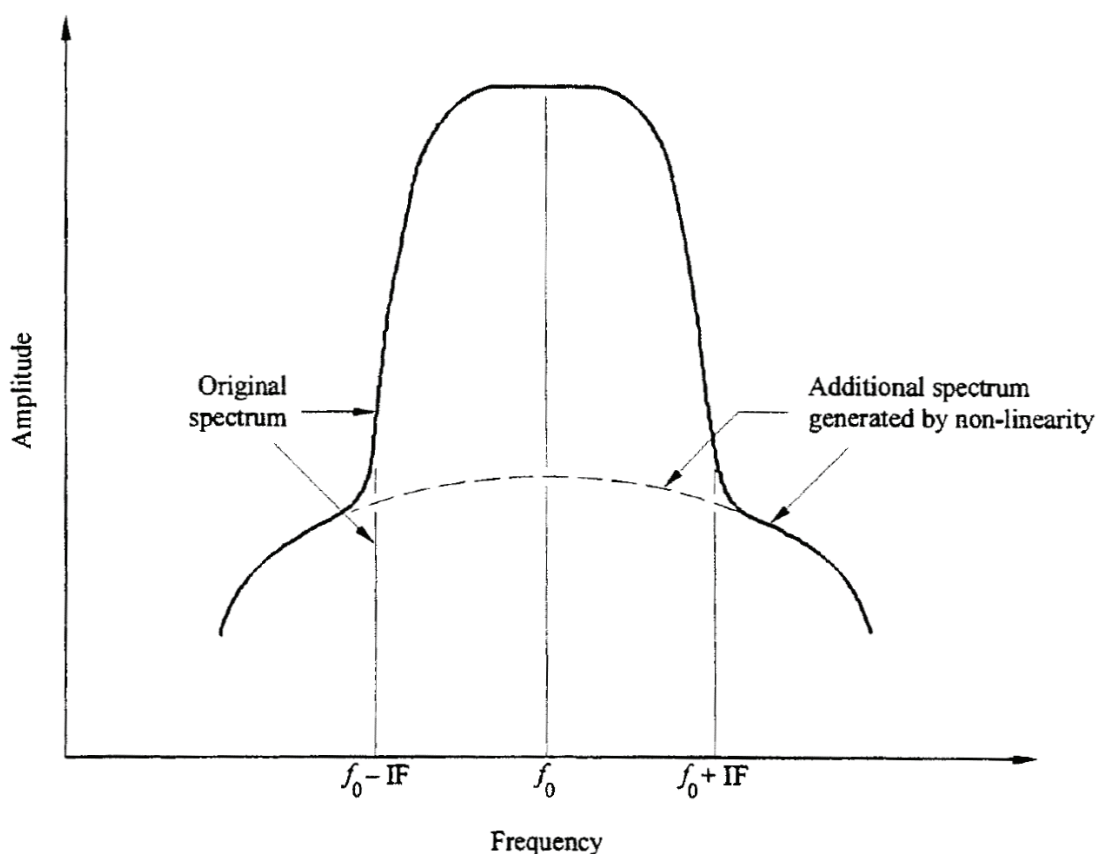


Kuva 5.8 Lähetys- ja vastaanottoporttien sovitusten mittauskytkentä

5.8. Spektri

Spektri kuuluu periaatteessa lineaarisuusmittausten piiriin, mutta sen mittaaminen päätettiin käsitellä erikseen erilaisen mittaustavan ja erityyppisten tulosten vuoksi. Ainoastaan spektrin mittausta tehtiin käyttämällä koko mikroaaltoradiota, ja tuloksina on spektrikuvia.

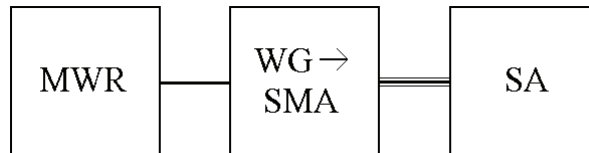
Spektrin ja lineaarisuusmittausten yhteys näkyy intermodulaation aiheuttamana spektrin leviämisenä. Epälineaarisuuden aiheuttama spektrin leviäminen on esitetty kuvassa 5.9. Esimerkiksi kolmannen kertaluvun keskinäismodulaatiotulokset (IM3) näkyvät spektrissä jopa kolme kertaa alkuperäisen lähetettävän signaalin levyisenä [60]. Tämä näkyy erittäin hyvin myös kappaleen 6.8 spektrikuvissa. Lähtötehon noustessa varsinaisen signaalin molemmiin puolin näkyvä intermodulaation aiheuttama spektri kasvaa huomattavasti voimakkaammin kuin itse signaali.



Kuva 5.9 Epälineaarisuuden aiheuttama spektrin leviäminen [60]

ETSI:n säädökset rajoittavat spektrin muotoa, joten lineaarisuuden on oltava riittävä käytetyllä tehotasolla. Rajoituksia tarvitaan, jotta lähetettävä signaali ei häiritsisi viereisten kanavien signaaleita. Tarkemmat säännökset ovat saatavilla ETSI:n verkkosivuilla dokumentissa *ETSI EN 301 390* [61].

Käytetty mittauskytkentä on esitetty kuvassa 5.10. Spektriä tutkittiin asentamalla mikroaaltoyksikkö mikroaaltoradioon. Mikroaaltoradio lähetti moduloitua signaalia 28 MHz:n kaistanleveydellä ja tehoa säädettiin desibelin portain. Signaali siirrettiin radion antenniporttiin kiinnitetystä aaltoputki-SMA-adapterista Sucoflex 101 kaapelilla spektrianalysaattorille. Spektrianalysaattorin sisäinen vaimennus oli 20 dB, resoluutiokaistanleveys 100 kHz ja videokaistanleveys 100 Hz. Lähtöteho mitattiin tehomittarilla ennen jokaisen kuvan ottamista.

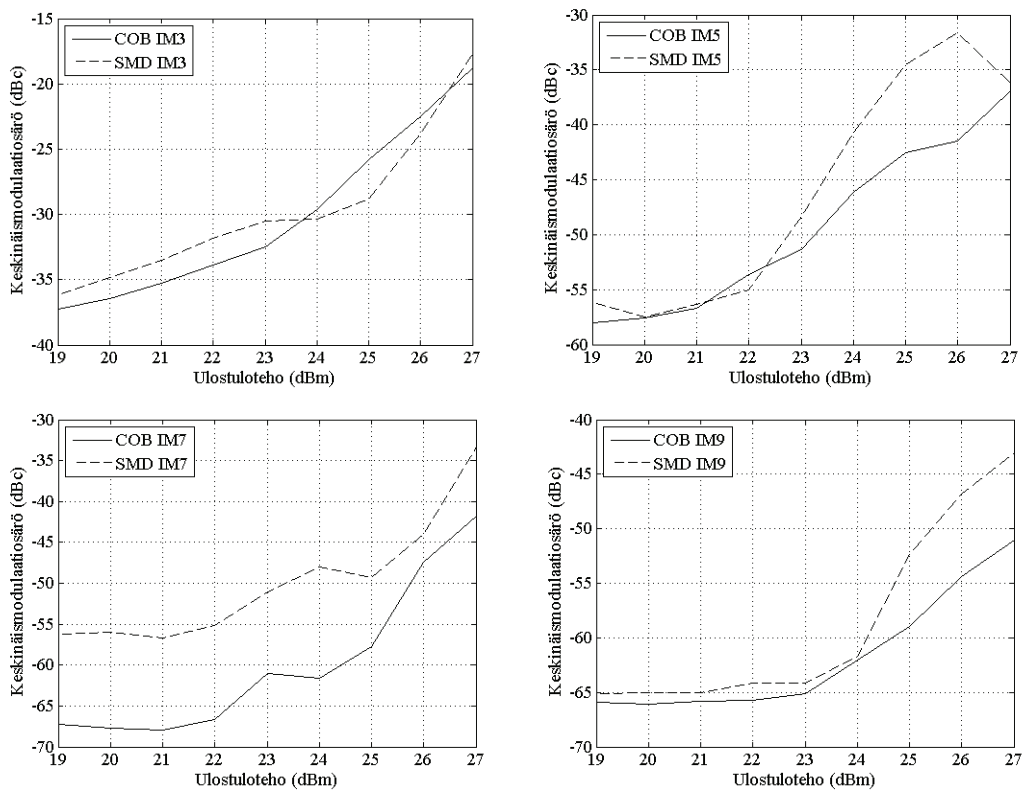


Kuva 5.10 Spektrin mittauskytkentä

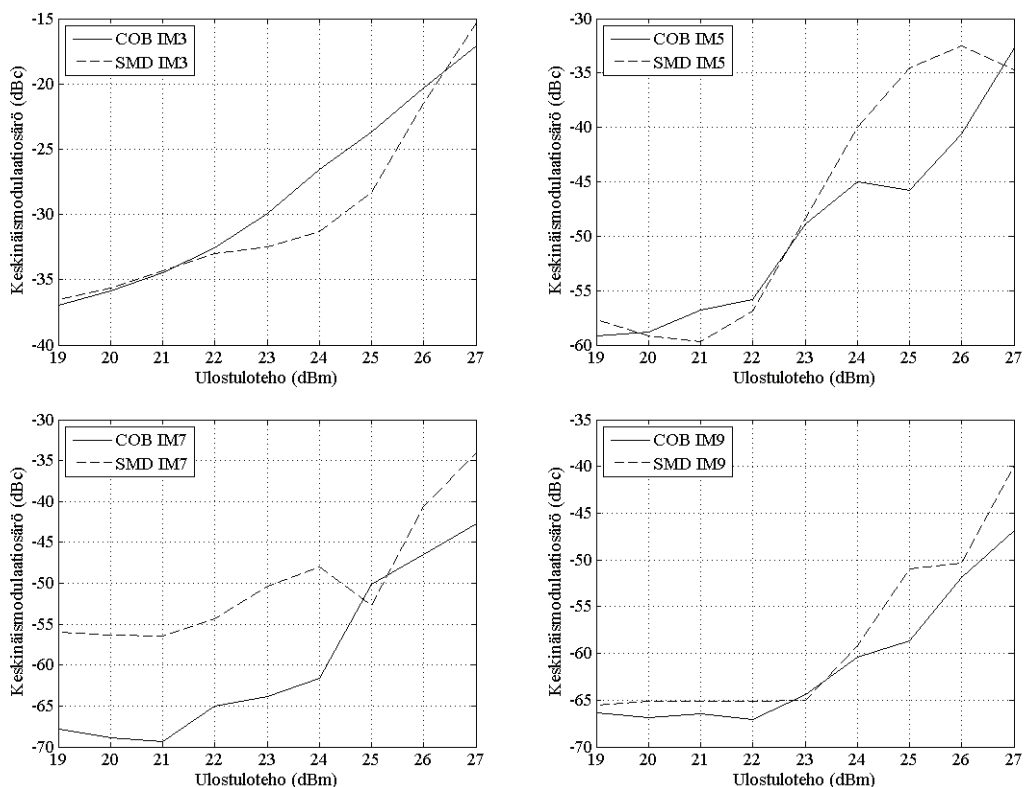
6. MITTAUSTULOKSET

6.1. Lineaarisuus

Kuvissa 6.1 ja 6.2 on esitetty keskinäismodulaatiosärömittausten tulokset taajuusalueen ala- ja ylärajalla. Kuvista havaitaan, että IM3-tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan eri tekniikalla valmistettujen yksiköiden välillä, ja SMD-yksikkö on jopa hieman parempi. Myös IM9-tulokset ovat melko samankaltaisia. Sen sijaan IM5- ja etenkin IM7-käyrät poikkeavat merkittävästi. Mittauksissa havaittiin SMD-mikroaltoyksikön eri sivunauhojen tulosten poikkeava jopa yli 10 dB toisistaan IM5- ja IM7-tuloksissa. Huonompi tulos otettiin aina huomioon, joten se nostaa epätasapainossa olevan SMD-yksikön käyriä selvästi.



Kuva 6.1 Keskinäismodulaatiosärö ulostulotehon funktiona alarajataajuudella

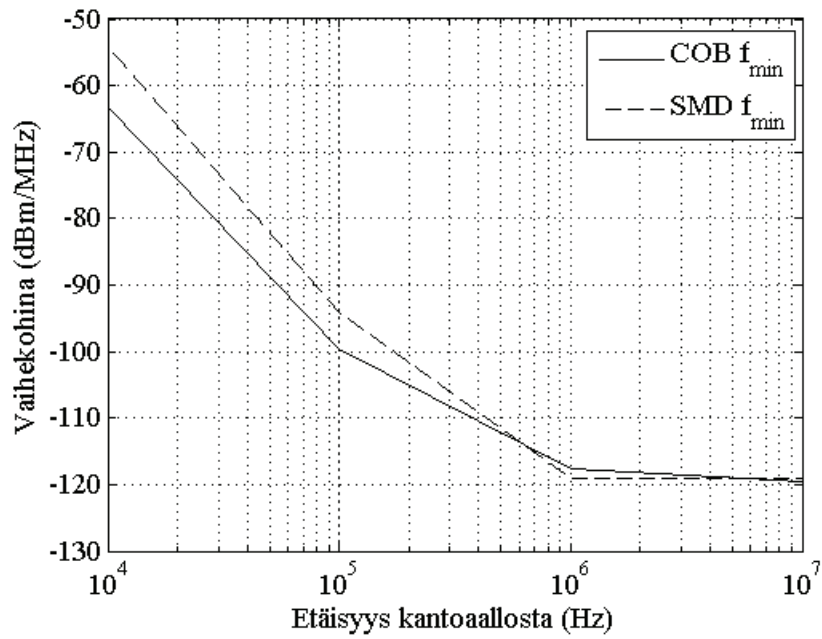


Kuva 6.2 Keskinnäismodulaatiosärö ulostulotehon funktiona ylärajataajuudella

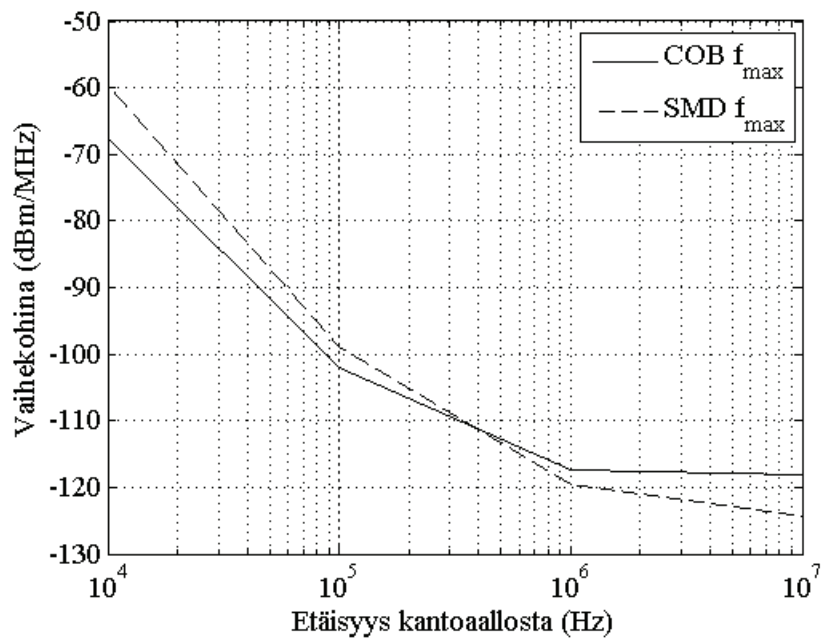
Mikroaaltoyksiköiden välillä oli pahimmillaan lähes 15 desibelin ero (IM7, 21 dBm), joka on yllättävän suuri ja vaatii vielä lisätutkimuksia SMD-yksikön osalta. Samoin sivunauhojen epätasapaino on tutkimisen arvoinen asia. Kyse on prototyyppiasteella olevasta mikroaaltoyksiköstä, joten muutoksia vielä tehdään. Mikroaaltoyksiköt täyttävät ETSI:n vaatimukset. Epälinearisuuden aiheuttamat muutokset spektriin nähdään kappaleen 6.8 spektrikuvisa.

6.2. Oskillaattorin vaihekohina

Kuvissa 6.3 ja 6.4 on kuvattu vaihekohina eri etäisyyksillä kantoaaltoa taajuusalueen reunoilla. SMD-yksikön vaihekohina on noin kahdeksan desibeliä suurempi, kun mitataan 10 kHz:n päässä kantoaaltoa, mutta ero pienenee mitä kauempana kantoaaltoa ollaan. Megahertsin päässä SMD-yksiköstä mitattiin jo pienempi vaihekohina molemmissa tapauksissa. Molempien vaihekohinataso on riittävä. Kymmenen megahertsin päässä signaalista spektrianalysaattorin pohjakohinataso heikentää mittaustuloksia merkittävästi.



Kuva 6.3 Vaihekohina alarajataajuudella

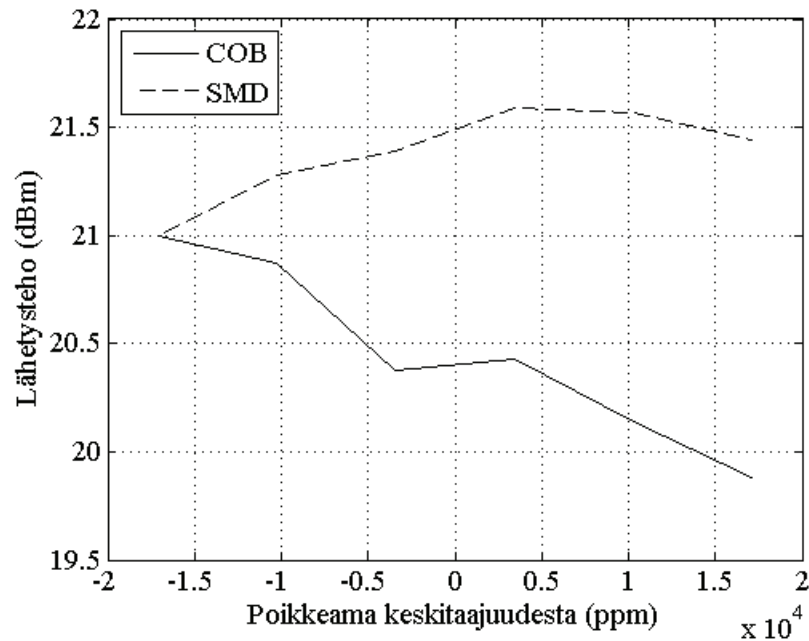


Kuva 6.4 Vaihekohina ylärajataajuudella

6.3. Lähetyshon stabiilisuus

Lähetyshon stabiilisuus lähetystaajuuden funktiona on esitetty kuvassa 6.5. Erot olivat huomattavan suuria SMD:n ja COB:n välillä. SMD-yksikön lähetysho pysyy stabiilimpana, mutta kasvaa hieman taajuutta kasvatettaessa. COB-yksiköillä

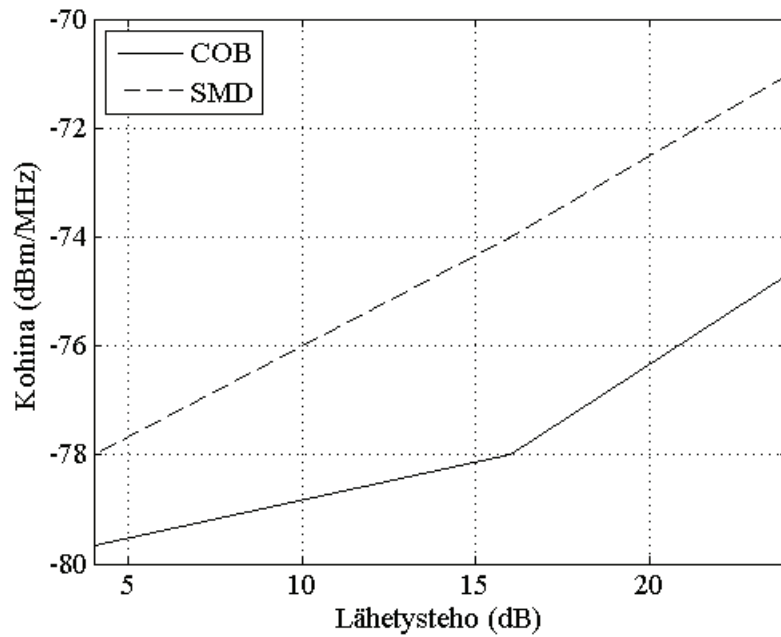
lähetystehon muutos oli rajumpaa ja teho laski taajuuden kasvaessa. Mittausten perusteella molemmat yksiköt täyttävät vaatimukset.



Kuva 6.5 Lähetystehon stabiilisuus taajuuden funktiona

6.4. Lähdön kohinataso

Lähdön kohinataso on esitetty kuvassa 6.6. SMD-yksikön kohinataso oli suurilla tehotasoilla lähes neljä desibeliä suurempi kuin COB-yksiköllä. Pienillä tehotasoilla ero oli alle kaksi desibeliä. Kohinatasoista on matkaa ETSI:n speksiin vielä toistakymmentä desibeliä, joten siitä ei aiheudu ongelmaa. BER-mittauksissa olisi saattanut näkyä eroa COB:n hyväksi, jos SMD-yksikössä tapahtuu ylikuulumista lähetyksen ja vastaanoton välillä. Mittauksiin olisi kuitenkin tarvittu kaksi mikroaaltoyksikköä, joten sitä ei voitu tehdä. Toisaalta BER-arvoihin vaikuttavat lähes kaikki tämän työn mittauskohteet, jolloin yksittäisen ominaisuuden tutkiminen voi olla hyvinkin hankalaa pelkästään BER-arvoja vertailemalla.



Kuva 6.6 Lähden kohinataso lähetystehon funktiona

6.5. Vastaanottimen kohinaluku

Taulukossa 6.1 on esitetty vastaanottimesta mitatut kohinaluvut eri taajuuksilla. Erot ovat alle desibelin, ja pienimmät arvot mitattiin SMD-yksiköstä. Periaatteessa SMD-yksiköllä varustettu radio voisi vastaanottaa hieman heikompaa signaalitasoa samalla BER-arvolla kuin mitä COB-yksiköllä varustettu, jos muut parametrit olisivat identtiset. Käytännössä ero on melko olematon ja molempien tulokset ovat riittävää tasoa.

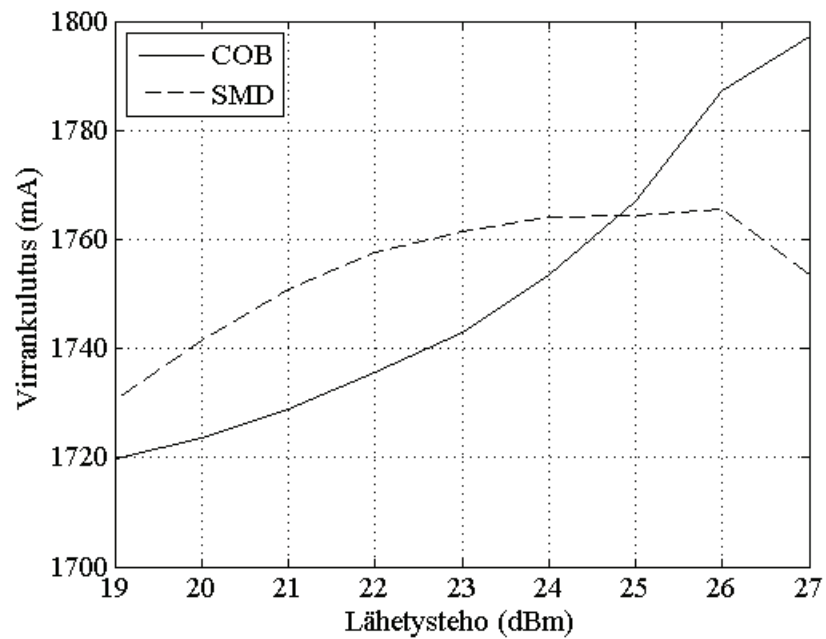
Taulukko 6.1 Vastaanottimen kohinaluku

Taajuus	NF, SMD	NF, COB
Alarajataajuudella	2,92 dB	3,78 dB
Ylärajataajuudella	2,80 dB	3,38 dB

6.6. Virrankulutus

Kuvassa 6.7 on esitetty mikroaltoyksiköiden virrankulutukset lähetystehon funktiona. COB-yksiköillä virrankulutus nousee suurilla tehotasoilla selvästi tehon kasvaessa ja erot virrankulutuksessa ovat selvästi nähtävissä riippuen käytetystä lähetystehosta. SMD-yksiköllä vaihtelu on pienempää ja kulutus jopa putoaa suurimmalla lähetysteholla, kun vahvistin on voimakkaasti saturoitunut.

Tehonkulutuksessa on eroa normaaleilla lähetystehoilla sadan milliwatin luokkaa eli niiden voidaan olettaa lämpenevän yhtä paljon. Suurin osa tehosta kuitenkin kuluu tehovahvistimessa, joten lämmön siirtyminen siitä pois lienee lämpötalouden kannalta suuremmissa roolissa kuin kokonaistehonkulutus.

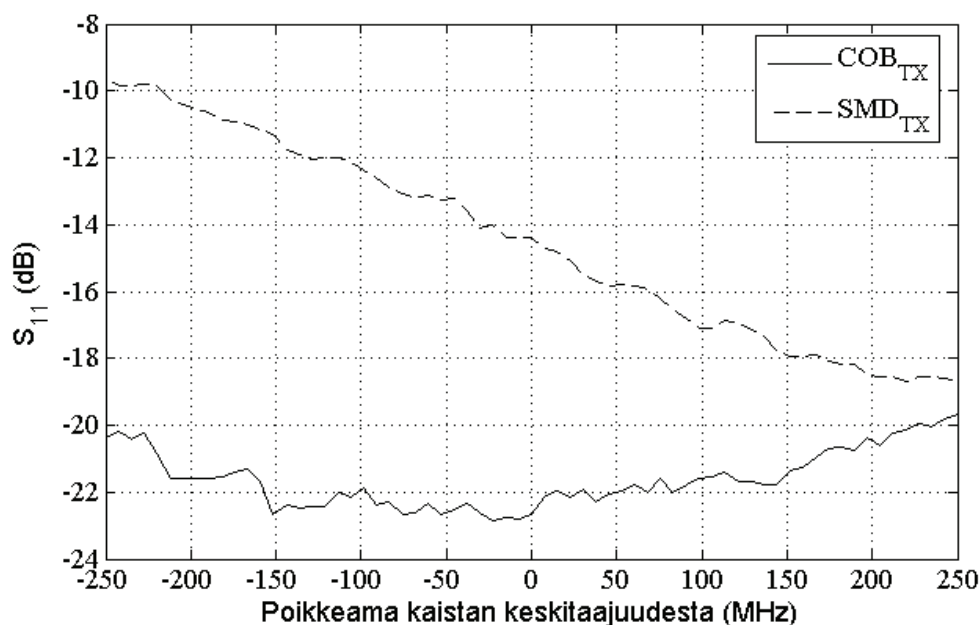


Kuva 6.7 Mikroaltoyksikön virrankulutus lähetystehon funktiona

6.7. Lähetys- ja vastaanottoporttien sovitukset

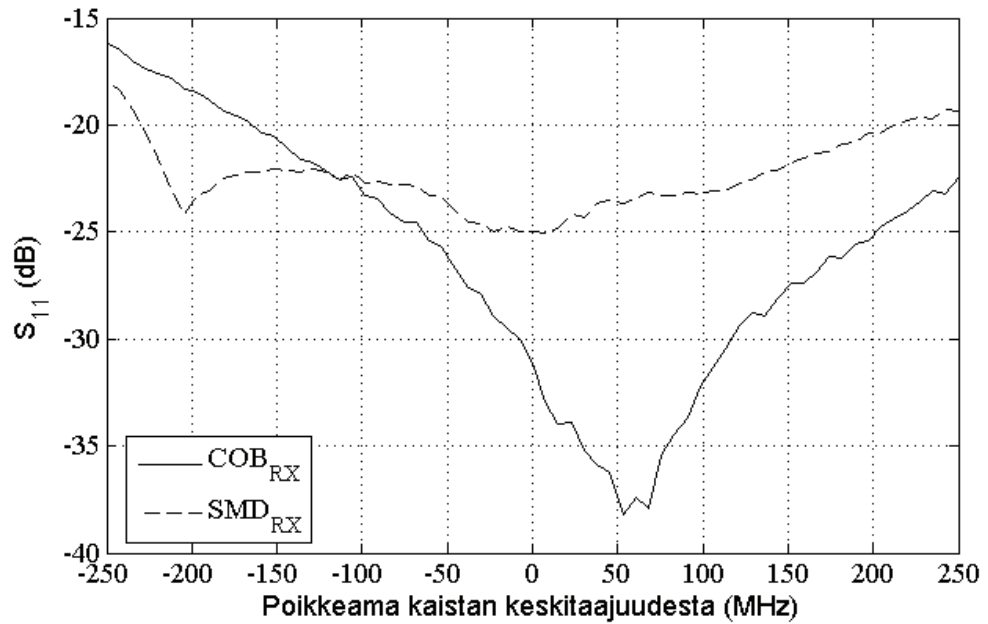
Lähetysportin sovitusmittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.8. Kuvasta nähdään, että molempien yksiköiden sovitus on koko lähetyskaistalla vähintään 10 dB, joka on yleensä riittävän hyvä sovitus.

COB-yksikön sovitus on varsinkin taajuusalueen alarajalla huomattavasti parempi kuin SMD-yksiköllä. Alarajalla ero on yli kymmenen desibeliä ja ylärajalla enää noin yhden desibelin. Ero johtuu siitä, että SMD-yksikön lähtö on sovitettu kattamaan koko taajuusalue, joten paras sovitus on lähetys- ja vastaanottokaistojen välissä. Kyseinen sovitus mahdollistaa saman sovituksen käytön radiolinkin molempien päiden mikroaaltoyksiköissä vaikka ne lähettävät eri taajuudella.



Kuva 6.8 Lähdön sovitukset

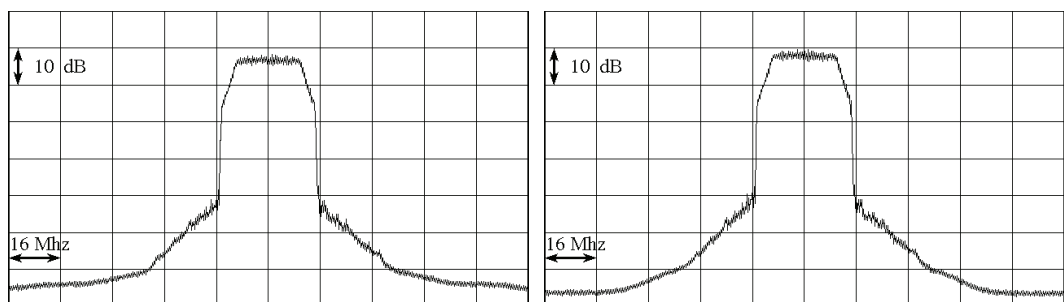
Kuvassa 6.9 on esitetty mitatut tulon sovitukset. Vertaamalla kuvaan 6.8, huomataan vastaanottoportin olevan lähtöporttia paremmin sovitettu molemmilla yksiköillä. Sovitukset ovat molemmilla yksiköillä riittävän hyvät. Tulopuolen sovittaminen onkin tärkeää, koska vastaanotettavasta signaalista on hyvä saada mahdollisimman paljon tehoa sisään ensimmäiselle vahvistimelle. Huono sovitus voi aiheuttaa epätasaisen päästökaistan duplex-suodattimessa, jolloin signaali vääristyy ja sen tulkitseminen vastaanottimessa vaikeutuu.



Kuva 6.9 Tulon sovitukset

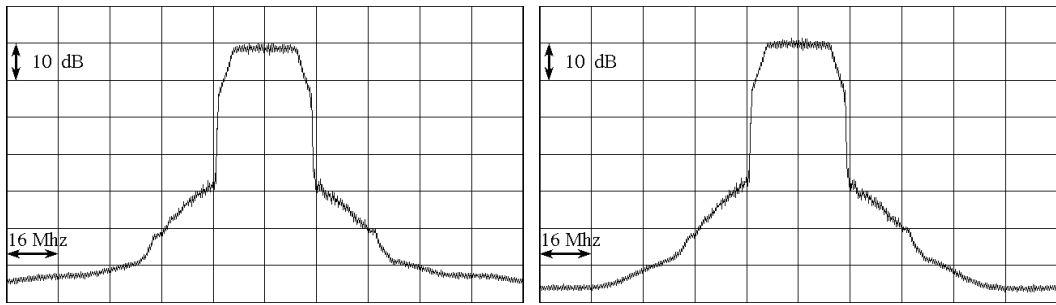
6.8. Spektri

Mikroaaltoradiosta mitatuista moduloidun signaalin spektreistä on havaittavissa selviä yhteyksiä lineaarisuusmittausten tuloksiin, kuten oli odotettavissakin. Spektrikuvissa SMD-yksikön lähetysteho näyttää olevan noin desibelin suurempi vaikka lähtöteho mitattiin tehomittarilla aina ennen kuvan ottamista. Desibeli lähetystehossa nostaa teoriassa IM3-tuloksia 3 dB, IM5 tuloksia 5 dB, jne. Jokaista spektrikuvaparia on kommentoitu lyhyesti.



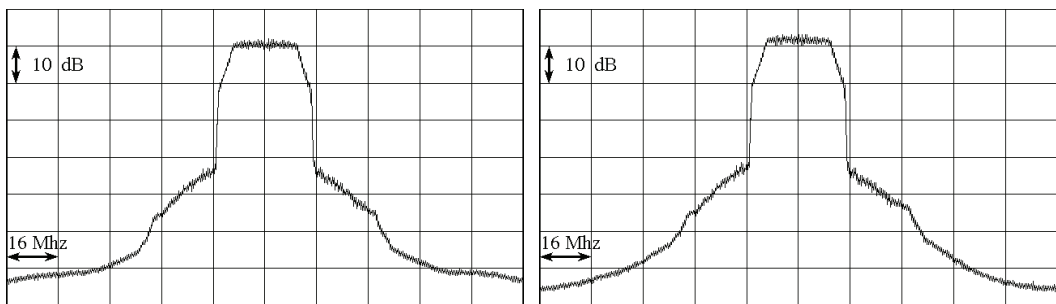
Kuva 6.10 Lähetteen spektri 18 dBm:n lähtöteholla (vas: COB, oik: SMD)

Kuvassa 6.10 on maltillinen 18 dBm:n lähtöteho, joten spektrit ovat siistit ja keskenään lähes identtiset.



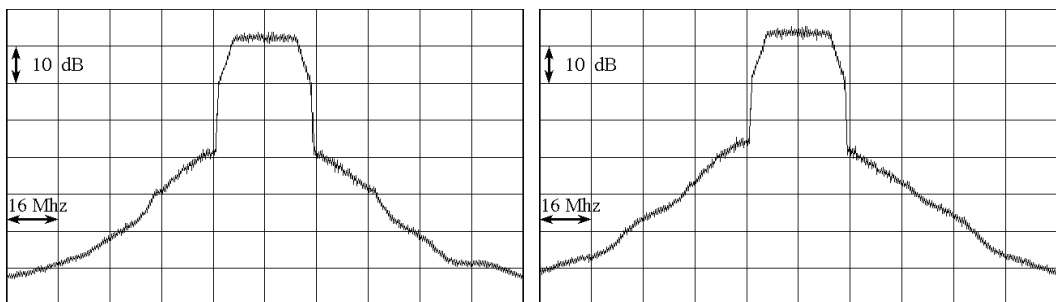
Kuva 6.11 Lähetteen spektri 20 dBm:n lähtöteholla (vas: COB, oik: SMD)

Kun tehoa nostetaan kaksi desibeliä (kuva 6.11), nousevat kolmannen kertaluvun keskinäismodulaatiosärön aiheuttamat ns. olkapäät noin viisi desibeliä ja samalla ne levenevät hieman. Spektrit ovat edelleen lähes identtiset.



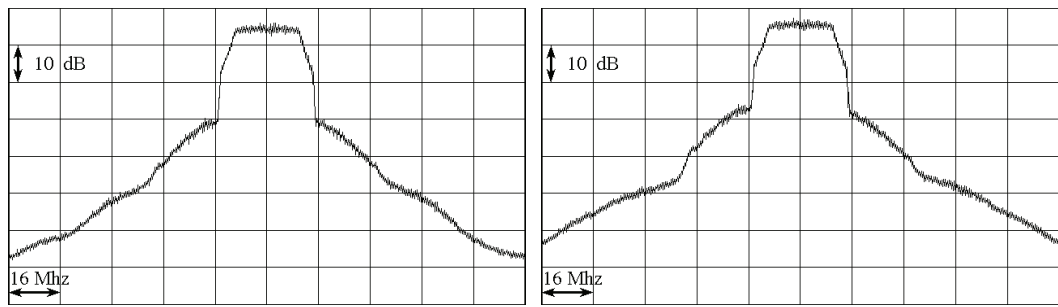
Kuva 6.12 Lähetteen spektri 22 dBm:n lähtöteholla (vas: COB, oik: SMD)

Kuvassa 6.12 on tehotaso jo 22 dBm ja olkapäät ovat nousseet taas viitisen desibeliä. Tässä vaiheessa alkaa lineaarisuusmittausten yhteydessä mainittu keskinäismodulaatiosärön epäsymmetria näkyä SMD-yksikön spektrissä. COB-yksikön spektrin olkapäät ovat edelleen symmetriset, kuten pitääkin.



Kuva 6.13 Lähetteen spektri 24 dBm:n lähtöteholla (vas: COB, oik: SMD)

Kuvan 6.13 spektrit ovat jo melko pahasti levinneitä ja SMD-yksikön epäsymmetria näkyy yhä selvemmin. Myös korkeampien kertalukujen keskinäismodulaatiosärön vaikutus näkyy jo selvästi. Etenkin SMD-yksikön spektrin vasemmalla puolella on selvästi nähtävissä portaita muistuttava muoto.



Kuva 6.14 Lähetteen spektri 26 dBm:n lähtöteholla (vas: COB, oik: SMD)

Kuvassa 6.14 spektrit ovat todella vääristyneet ja mikroaltoyksiköiden päätevahvistimet todella kyllästyneet. COB-yksiköstä ei saatu enempää tehoa, joten sen päätevahvistin on täysin kyllästyneessä tilassa. SMD-yksikön keskinäismodulaatiosärön epäsymmetria on todella selkeästi näkyvissä. Molemmilla yksiköillä 28 MHz:n levyinen spektri on levinnyt jo lähes 200 MHz:iin.

7. YHTEENVETO

Pintaliitoskomponenttien ja bondaamalla kytkettyjen sirujen valmistuskustannuksia haluttiin verrata. Esitetyn tutkimuksen perusteella valmistuskustannukset ovat noin kolminkertaiset bondaustekniikassa ja latominen on huomattavasti hitaampaa.

Mikroaaltoyksikköön sopivia pintaliitoskomponentteja etsittiin ja suurin osa oli QFN-kotelossa tai ulkoisesti vastaavassa. Tämän hetkisen katsauksen perusteella näyttäisi, että 30 GHz:iin saakka on saatavilla kaikki tarvittavat komponentit ja 40 GHz:iin saakkakin noin puolet komponenteista. Eniten rajoittaa pienikohinaisen vahvistimen taajuuskaista, joka ulottuu vain 30 GHz:iin. IQ-sekoittimia on saatavilla ainakin 32 GHz:iin saakka, eivätkä vaimentimetkaan välttämättä toimi halutulla tavalla enää yli 30 GHz:n taajuuksilla.

Pintaliitoskomponentteja käytettäessä on huomioitava bondattuja piirejä huonompi lämmönjohtokyky. Etenkin vahvistimista olisi syytä tutkia mikroalторadioon asennettuna lämpötilojen käyttäytymistä ja tehon kulutusta. Korkeissa lämpötiloissa vahvistimien elinikä lyhenee merkittävästi, jos niitä käytetään liian suurella teholla. Piirien koteloiden juotokset kestivät esitetyssä tutkimuksessa noin 3000 lämpösykliä, joten juotosten voidaan olettaa kestävän yli kymmenen vuotta mikroaaltoyksikössä.

Työssä todettiin hyvän saannon ja laadun edellyttävän, että tuotannossa noudatetaan tiukasti ESD-määräyksiä, sillä GaAs MMIC -piirit ovat erityisen herkkiä sähköstaattisille purkauksille.

Bondaus- ja pintaliitostekniikalla valmistettuja mikroaaltoyksiköitä verrattiin toisiinsa useissa mittauksissa ja tulokset olivat saman suuntaisia. Vaikka pintaliitoskomponenteista valmistettu mikroaaltoyksikkö on vasta prototyyppeä, siitä mitattiin parempia tuloksia mm. vastaanottimen kohinamittauksissa. Mittauksissa saatiin samalla lisää tietoa kehitystä vaativaan keskinäismodulaatiosärön epätasapaino-ongelmaan. Työssä todettiin mikroaaltoyksiköiden täyttävän niille asetetut vaatimukset valmistustekniikasta riippumatta.

LÄHTEET

- [1] A. Lehto, *Radioaaltojen maailma*, s. 197-198. Helsinki: Otatieto, 2006.
- [2] J. Louhi, H. Somerma, “Highly integrated microwave point-to-point outdoor unit optimized for ultra high volume manufacturing”, *2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Volume 2, 2002, s. 795 – 798.
- [3] Skylight Research: Worldwide Microwave Radio Quarterly Market Share Report, Q3 2006.
- [4] R. Roney, “Cost considerations for integrating flip chip and chip on board technologies into high volume manufacturing areas”, *Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 13-15 Oct. 1997, s. 269-273.
- [5] J. Ganasan, “Chip on chip (COC) and chip on board (COB) assembly on flex rigid printed circuit assemblies”, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 23, no. 1, s. 30, January 2000.
- [6] L. Yeong-Lin, H. Cheng-Yu, “Electrical modeling of quad flat no-lead packages for high-frequency IC applications”, *2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004*, 21-24 Nov. 2004, s. 344-347.
- [7] P. Robinson, “Flip chip equipment”, *LiveWire Newsletter*, Issue 3, s. 7, July/August 2002.
- [8] Hittite Microwave Corporation: “HMC283LM1, SMT medium power GaAs MMIC amplifier, 17-40 GHz”, v04.1201
- [9] TriQuint Semiconductor: “TGA4902-SM, Ka-band packaged MPA”, Sep. 2006
- [10] Hittite Microwave Corporation: “HMC499LC4, SMT PHEMT medium power amplifier, 21-32 GHz”, v01.0806
- [11] United Monolithic Semiconductors: “CHA5056-QGG, 17-26 GHz high power amplifier”, Feb. 2007

- [12]Mimix Broadband: “XP1022-QF, 17.0-25.0 GHz GaAs MMIC power amplifier, QFN”, Rev. 15, Nov. 2006
- [13]Hittite Microwave Corporation: “HMC498LC4, GaAs PHEMT medium power amplifier, 17-24 GHz”, v01.0806
- [14]Mimix Broadband: “XP1020-QE, 11.0-19.0 GHz GaAs MMIC power amplifier, QFN”, Rev. 26, Jan. 2007
- [15]United Monolithic Semiconductors: “CHA6664-QDC, 12-16 GHz 1 W high power amplifier”, Nov. 2006
- [16]United Monolithic Semiconductors: “CHA5052-QGG, 7-16 GHz high power amplifier”, Feb. 2007
- [17]United Monolithic Semiconductors: “CHA3688aQDC, 12.5-30 GHz low noise amplifier (preliminary)”, Nov. 2006
- [18]Hittite Microwave Corporation: “HMC341LC3B, SMT GaAs PHEMT MMIC low noise amplifier, 21-29 GHz”, v00.0905
- [19]TriQuint Semiconductor: “TGA4506-SM, K-band packaged low noise amplifier”, Sep. 2006
- [20]Hittite Microwave Corporation: “HMC517LC4, SMT PHEMT low noise amplifier, 17-26 GHz”, v01.0806
- [21]Hittite Microwave Corporation: “HMC342LC4, GaAs PHEMT MMIC low noise amplifier, 13-25 GHz”, v01.0806
- [22]Hittite Microwave Corporation: “HMC565LC5, GaAs SMT PHEMT low noise amplifier, 6-20 GHz”, v00.0906
- [23]TriQuint Semiconductor: “TGA2513-SM, 2-20 GHz LNA/Gain Block”, Jul. 2007
- [24]Hittite Microwave Corporation: “HMC516LC5, SMT PHEMT low noise amplifier, 9-18 GHz”, v00.1204
- [25]United Monolithic Semiconductors: “CHA3666QAC, 5.8-17 GHz low noise amplifier”, Nov. 2006

- [26]Mimix Broadband: “D1005-QT, 10.0-40.0 GHz GaAs MMIC distributed amplifier, QFN”, Rev. 08, Feb. 2007
- [27]Mimix Broadband: “D1004-QT, 10.0-40.0 GHz GaAs MMIC distributed amplifier, QFN”, Rev. 08, Feb. 2007
- [28]TriQuint Semiconductor: “TGA4031-SM, 17-40 GHz MPA/multiplier”, Jul. 2007
- [29]Hittite Microwave Corporation: “HMC499LC4, SMT PHEMT medium power amplifier, 21-32 GHz”, v01.0806
- [30]Hittite Microwave Corporation: “HMC383LC4, GaAs PHEMT MMIC medium power amplifier, 12-30 GHz”, v01.0806
- [31]Mimix Broadband: “XB1009-QT, 12.0-27.0 GHz GaAs MMIC buffer amplifier, QFN”, Rev. 08, Feb. 2007
- [32]Hittite Microwave Corporation: “HMC498LC4, GaAs PHEMT medium power amplifier, 17-24 GHz”, v01.0806
- [33]United Monolithic Semiconductors: “CHA3664-QAG, 5-21 GHz driver amplifier”, Nov. 2006
- [34]Hittite Microwave Corporation: “HMC451LC3, GaAs PHEMT MMIC medium power amplifier, 5- 20 GHz”, v02.1006
- [35]Hittite Microwave Corporation: “HMC441LC3B, GaAs PHEMT MMIC medium power amplifier, 6-18 GHz”, v00.1104
- [36]TriQuint Semiconductor: “TGA2507-SM, Ku-band 3-stage driver packaged amplifier”, Nov. 2005
- [37]United Monolithic Semiconductors: “CHA5051-QDG, 7-16 GHz medium power amplifier”, Jun. 2007
- [38]United Monolithic Semiconductors: “CHT4690-QAC, 5-30 GHz attenuator”, Nov. 2006
- [39]TriQuint Semiconductor: “TGL4203-SM, DC-30 GHz wideband analog attenuator”, Dec. 2006

- [40]Hittite Microwave Corporation: “HMC346LC3B, GaAs MMIC voltage-variable attenuator, DC-18 GHz”, v02.0906
- [41]United Monolithic Semiconductors: “CHT3091aQAC, DC-12 GHz attenuator”, Mar. 2007
- [42]Mimix Broadband: “XM1001-QH, 10.0-34.0 GHz image reject mixer, QFN, 4x4 mm”, Rev. 15, Feb. 2007
- [43]Hittite Microwave Corporation: “HMC524LC3B, GaAs MMIC I/Q mixer 22-32 GHz”, v01.1106
- [44]Hittite Microwave Corporation: “HMC523LC4, GaAs MMIC I/Q mixer, 15-23 GHz”, v01.0806
- [45]Hittite Microwave Corporation: “HMC522LC4, GaAs MMIC I/Q mixer, 11-16 GHz”, v01.0806
- [46]Hittite Microwave Corporation: “HMC527LC4, GaAs MMIC I/Q mixer, 8.5-13.5 GHz”, v01.0806
- [47]Hittite Microwave Corporation: “HMC526LC4, GaAs MMIC I/Q mixer, 6-10 GHz”, v01.0806
- [48]Hittite Microwave Corporation: “HMC587LC4B, wideband MMIC VCO w/ buffer amplifier, 5-10 GHz”, v00.1105
- [49]Hittite Microwave Corporation: “HMC587LC4B, wideband MMIC VCO w/ buffer amplifier, 8.0-12.5 GHz”, v01.1205
- [50]Mimix Broadband: “XX1000-QT, 7.5-22.5/15.0-45.0 GHz active doubler, QFN, 3x3 mm”, Rev. 08, Feb. 2007
- [51]Hittite Microwave Corporation: “HMC578LC3B, SMT GaAs MMIC x2 active frequency multiplier, 24-33 GHz output”, v00.0506
- [52]Hittite Microwave Corporation: “HMC576LC3B, SMT GaAs MMIC x2 active frequency multiplier, 18-29 GHz output”, v00.0506
- [53]Hittite Microwave Corporation: “HMC573LC3B, SMT GaAs MMIC x2 active frequency multiplier, 8-22 GHz output”, v00.0906

- [54]Mimix Broadband: “XX1002-QH, 2.5-6.0/5.0-12.0 GHz active doubler, QFN, 4x4 mm”, Rev. 15, Mar. 2007
- [55]C.-L. Chang, Y.-Y. Hsieh, “Thermal analysis of QFN packages using finite element method”, EuroSimE 2004, May 2004, s. 499-503
- [56]Freescale Semiconductor: “Application note AN 1902, Quad flat pack no-lead”, Rev. 3.0, Dec. 2005
- [57]Hittite Microwave Corporation: “Handling guidelines for ESD protection of GaAs MMICs”, v01.0801
- [58]WORK Microwave GmbH: “Application note WA001, MMVC Package Information”, Nov. 2004
- [59]K. Chang, I. Bahl, V. Nair, *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [60]International Telecommunication Union: *Handbook on Digital Radio-Relay Systems - 1996*, ITU, 1997
- [61] European Telecommunications Standards Institute: *Fixed Radio Systems; Point-to-point and Multipoint Systems; Spurious emissions and receiver immunity limits at equipment/antenna port of Digital Fixed Radio Systems*, v1.2.1, ETSI, Nov. 2003