



Passiivisen koaksiaalisuodattimen kokoonpanon toistuvuuden seuranta RF-parametrien avulla

Toni Juntunen

Opinnäytetyö
Joulukuu 2011
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot
Tampereen ammattikorkeakoulu

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma, tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

Tekijä	Toni Juntunen
Työn nimi	Passiivisen koaksiaalisuodattimen kokoonpanon toistuvuuden seuranta RF-parametrien avulla
Sivumäärä	39 sivua, liitteet 27 sivua
Valmistumisaika	Joulukuu 2011
Työn ohjaaja	Ari Rantala
Työn tilaaja	Nokia Siemens Networks Oyj

TIIVISTELMÄ

Nokia Siemens Networks on yksi maailman johtavista tukiasemajärjestelmien toimittajista. Se suunnittelee ja valmistaa Oulussa RF-suodattimia, joita käytetään tukiaseman etupäässä, eli Front-end-osassa. RF-suodatin estää vastaanottimeen tulevat sekä tukiasemasta antennin kautta lähtevät ei-toivotut signaalit. Suodattimen vasteeseen voidaan vaikuttaa virittämällä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kerätä tarvittavaa tietoa RF-suodattimien kokoonpanon laadun vaihteluista ja siitä, kuinka tuloksia voidaan hyödyntää tasaisen laadun takaamiseksi kokoonpanossa ja tästä seuraavana viritysaikojen nopeutumisena.

Työn yleisessä osassa on kerrottu suodattimen toiminnasta, sen olennaisimmista komponenteista sekä suodatuksessa tapahtuvista fysikaalisista ilmiöistä. Työssä käsitellään opinnäytetyöhön liittyviä suodattimen ominaisuuksia, kuten resonaattoreita, kytkentäliuskoja sekä viritysprosessia yleisesti. Luottamuksellinen osio käsittää työvaiheita ja mittauksia. Nämä sivut ovat salaisia Nokia Siemens Networksin pyynnöstä.

Asiasanat: RF-suodatin, resonaattori, kytkentäliuska, resonanssi, viritys

Author	Toni Juntunen
Title	Monitoring the repetitiveness of the passive coaxial filter assembly in terms of RF-parameters
Number of pages	39 pages, appendices 27 pages
Graduation time	December 2011
Thesis supervisor	Ari Rantala
Commissioned by	Nokia Siemens Networks Oyj

ABSTRACT

Nokia Siemens Networks is one of the world's leading manufacturers of Base Transceiver Station (BTS) systems. NSN designs and manufactures RF-filters, located in Oulu, Finland. These filters are used in the front end part of the BTS and their main function is to allow the wanted frequencies to pass through. By tuning the filter properly it can be assured that it performs flawlessly in the field.

The purpose of this thesis was to examine the quality of repetitiveness in the product assembly by hand, so that the tuning time can be reduced. By setting the coupling strips correctly in the hand assembly phase, the average tuning time can be reduced.

This thesis is divided into two parts where the first part is the description of theory, the physics and principles behind the components and filters. The second part is confidential due to request from Nokia Siemens Networks, in which the descriptions of working methods are described regarding the filters and couplings.

Key words: RF-filter, resonator, coupling, resonance, tuning

ALKUSANAT

Tämä tutkimustyö on tehty Nokia Siemens Networks Oulun tehtaalle tuotannon tarpeisiin.

Työ on kokonaisuudessaan kestänyt noin vuoden. Haluan kiittää Tuomo Rätystä mahdollisuudesta tehdä tämä työ sekä hänen avustaan suodattimien virityksessä. Kiitän myös Teemu Vedenojaa viritysavusta sekä työnjohtajaa Mika Heikkistä, joka mahdollisti tuotannossa työn tekemisen. Erityisesti haluan kiittää valvojaani Veijo Moilasta, joka on auttanut teorian ymmärtämisessä sekä tukenut minua läpi tämän opinnäytetyöprosessin ja korjannut tekstin sisältöä. Haluan kiittää myös valvojaani Ari Rantalaa, joka on joutanut aikataulujen pitkittyessä.

Kiitän avopuolisoani Heljä Pietilää, joka on kannustanut ja myötäelänyt matkan varrella sekä korjannut kielioppia. Kiitoksen ansaitsee myös äitini Tuula, isäni Veli ja veljeni Niko sekä Pirkko-mummoni, jotka ovat kannustaneet työn kuluessa. Kiitos myös serkulleni Jarno Kelalle, joka korjasi kielioppia ja oli hengessä mukana.

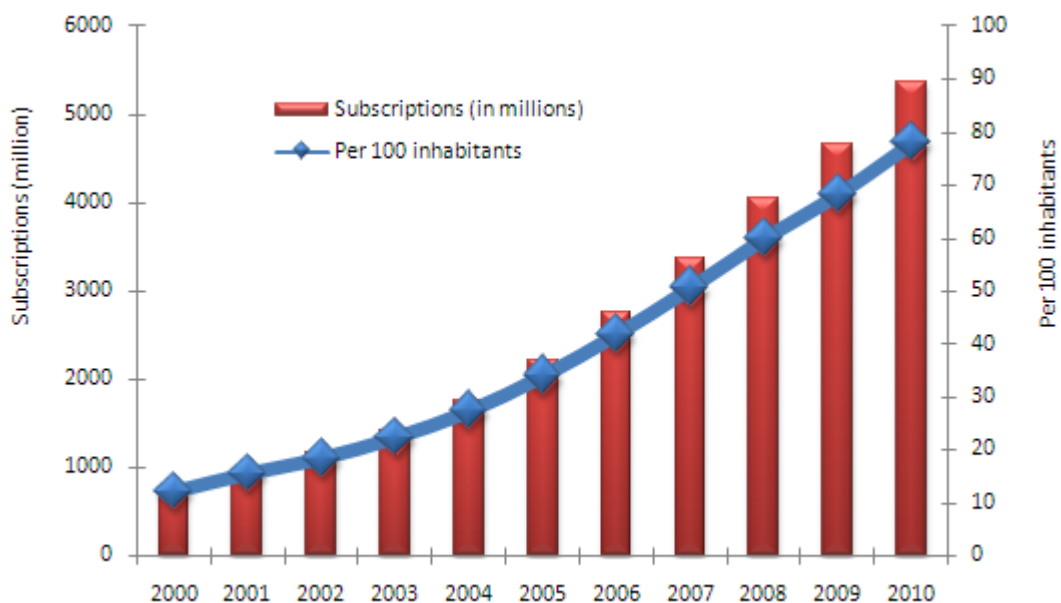
Tampereella Joulukuussa 2011

SISÄLLYS

1 MATKAPUHELIMET, NYKYTILANNE JA TULEVAISUUS.....	1
2 LANGATON TIEDONSIIRTO JA MODULAATIO	3
3 KONDENSAATTORI, KELA, LC-PIIRI JA RESONANSSI.....	6
4 SUODATIN	8
5 RESONAATTOREIDEN VÄLISET KYTKENNÄT	11
6 RYHMÄKULKUAIKA.....	15
7 S-PARAMETRIT.....	19
8 EPÄSOVITUS	21
9 RESONAATTORIT JA VIRITYS	23
LÄHTEET	26

1 MATKAPUHELIMET, NYKYTILANNE JA TULEVAISUUS

Matkapuhelimia on maailmassa arviolta yli 5 miljardia kappaletta /3/. ITU:n (*International Telecommunication Union*) laatimasta kuviosta 1 voidaan havaita, kuinka matkapuhelinliittymien määrä on kasvanut vuosina 2000—2010 /8/. Tästä voidaan arvioida tulevaa kasvua. Määrällisesti liittymiä tulee eniten Kiinaan ja Intiaan. Ministry of Industry and Information Technology on arvioinut, että Kiinassa on pian yli 900 miljoonaa matkapuhelimen omistajaa. Intiassa kasvuvauhti on vielä suurempi, koska puolessa vuodessa matkapuhelinten määrät ovat nousseet 687 miljoonasta 791 miljoonaan syyskuun 2010 ja helmikuun 2011 välillä /7/.



Kuvio 1. Matkapuhelintilausten määrä maailmanlaajuisesti /8/

Nykyiset teknologiat mahdollistavat kaupunkiolosuhteissa testattuna 37,66 megabittia sekunnissa (Mbits). Tämän nopeuden mahdollisti Verizonin 4G-verkko Chicagossa yhdysvalloissa tehdyissä kokeissa /1/ tiedonsiirtonopeuden tukiaseman ja matkapuhelimen välillä latausnopeuden (downlink) ja 2,33 Mbps matkapuhelimesta tukiasemaan päin (uplink). Digitaalisen median eli liikkuvan kuvan ja äänen sekä internetin käytön kasvun myötä jatkuvasti kasvava joukko ihmisiä käyttää matkapuhelintaan enemmän tiedon siirtoon, jolloin matkapuhelinverkkojen

tiedonsiirtokapasiteettia joudutaan kasvattamaan, mikäli näihin tulevaisuuden tarpeisiin aiotaan vastata. Vuosittaisen mobiilidatamäärän on ennustettu kasvavan 0,6 eksatavusta (EB) 6,3 eksatavuun vuodesta 2010 vuoteen 2015 mennessä /2/.

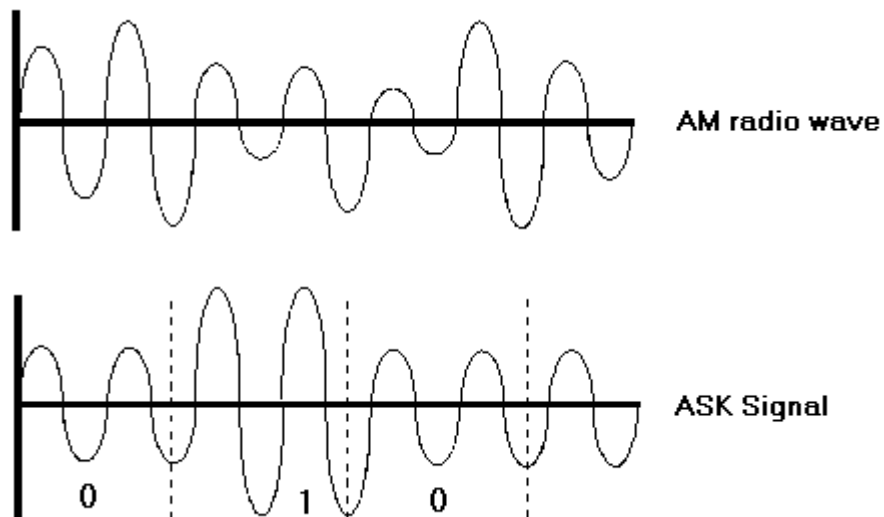
Kasvun odotetaan nousevan joka vuosi älypuhelimien yleistyessä. Älypuhelin mahdollistaa nopean datayhteyden internetiin. Näin ollen siitä aiheutuva dataliikenne kasvaa. Ihmiset käyttävät matkapuhelimiaan yhä enemmän internetin mediasivujen selaamiseen, josta tulee suuret tiedonsiirtokuormat verkoille. Matkapuhelimia käytetään myös valokuvien ja videoiden jakamiseen sosiaalisissa medioissa ja muissa mediapalveluissa /2/.

2 LANGATON TIEDONSIIRTO JA MODULAATIO

”Sähkömagneettinen säteily on poikittaista aaltoliikettä, joka etenee suoraviivaisesti valon nopeudella $c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ tyhjiössä” /5/. ”Sähkömagneettista säteilyä syntyy, kun varaus on kiihtyvässä liikeillassa” /5/. Tämä liiketila saadaan aikaan siten, että indusoidaan jännite antenniin, joka säteilee radioaallot ympäristöön valon nopeudella. Taajuus on jokin värähtelyn nopeus sekuntia kohden. Värähtelyn nopeuden yksikkö on hertsi (Hz).

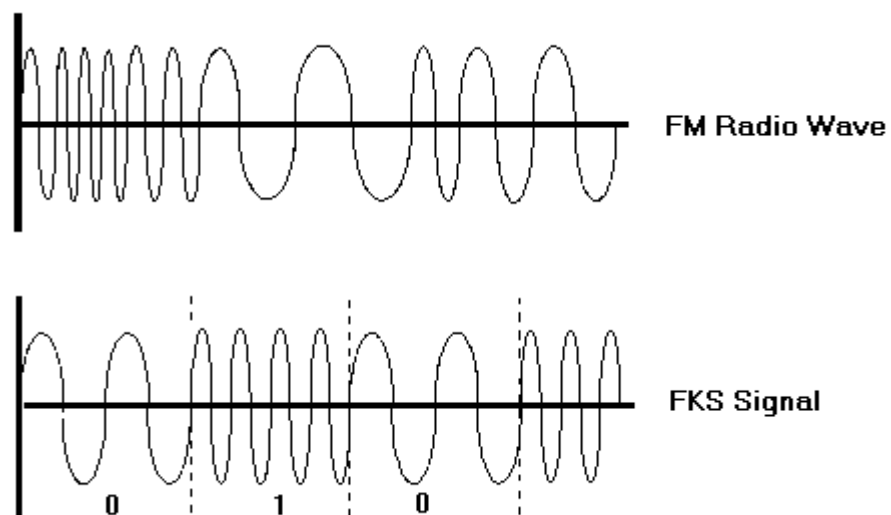
Matkapuhelinverkoissa on käytössä useita eri taajuuksia riippuen siitä, missä maassa ollaan. Suomessa ovat käytössä 900, 1800 ja 2100 MHz:n taajuusalueet. Taajuuksista riippuen aallonpituus joko kasvaa tai pienenee. Matkapuhelinverkon tukiasema hoitaa puhelinten välisen liikenteen ja tukiasemat kommunikoivat keskenään linkeillä. Tukiasemilla on myös yhteys lankaverkkoon.

Modulaatio on perusta kaikelle tiedonsiirrolle, kun siirtotielle on saatava signaali, joka kuljettaa tietoa vastaanottimelle. Signaali koostuu kahdesta osasta: kantoaallost (Carrier Wave) ja modulaatiosta (Modulation). Kantoaallon muoto on siniaalto, jossa ei ole mitään informaatiota. Modulaatio muokkaa kantoaaltoa siirtotielle, jolloin tästä tulee tietoa sisältävä signaali. Siniaallolla modulaatiota on kolmea eri päätyyppiä, joista käsittelem ensin amplitudimodulaatiota eli AM-modulaatiota. Tämä modulaatio muokkaa kantoaallon amplitudia eli voimakkuutta, jolloin kantoaalto pienenee ja suurenee riippuen modulaation nopeudesta eli taajuudesta. Digitaalisessa maailmassa puhutaan amplitudi-avainuksesta (amplitude-shift keying ASK). Digitaalimaailmassa tietty amplitudin muutos tarkoittaa ykkösbittiä (1) ja perustila nollabittiä (0) /25/. Kuvasta 2 voidaan havaita analogisen ja digitaalisen amplitudimodulaation ero /26/.



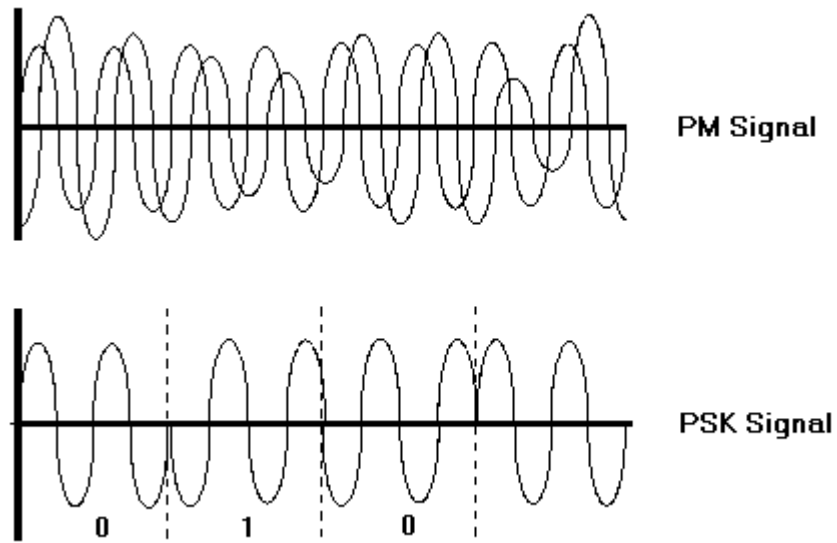
Kuva 2. Amplitudimodulaatio /26/

Toinen modulaatiotapa on taajuusmodulaatio (Frequency Modulation FM), jossa kantaaltoa muokataan taajuuden suhteen. Digitaalisena tämä modulaatiotapa on taajuus-avainnus (Frequency-Shift Keying FSK), jossa suurempi taajuus tarkoittaa ykkösbitiä ja pienempi taajuus tarkoittaa nollabittiä (0), kuva 3. Taajuuden muuttuessa signaalin tiheys muuttuu, jolloin signaali liikkuu jousimaisesti /26/.



Kuva 3. Taajuusmodulaatio /26/

Vaihemodulaatiossa eli vaiheavainnuksessa kantoaaltoa moduloidaan muuttamalla sen vaihetta, jolloin signaaliin saadaan informaatiota PSK eli phase-shift keying - tekniikalla, joka voidaan nähdä kuvasta 4. Tällöin huomataan, kuinka vaiheen muutos vaihtaa binäärisen arvon joko ykköseksi tai nollaksi. Vastaanotin tunnistaa vaiheiden muutokset signaalissa ja tekee tarvittavan käänteisoperaation eli demoduloinnin [26].



Kuva 4. Vaihemodulaatio [26]

3 KONDENSAATTORI, KELA, LC-PIIRI JA RESONANSSI

Kondensaattori on kahdesta levyistä koostuva passiivinen elektroniikan komponentti, joka varastoi levyjen väliseen sähkökenttään energiaa ja purkaa sitä. Tätä varauskykyä kutsutaan kapasitanssiksi ja se on suoraan verrannollinen levyjen pinta-alaan ja käänteisesti verrannollinen näiden väliseen etäisyyteen. Kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi on kondensaattorin sisäinen vastus, joka on kääntäen verrannollinen sen läpi menevään jännitteen vaihtelunopeuteen eli taajuuteen. Taajuuden kasvaessa kondensaattorin sisäinen vastus pienenee ja signaalit pääsevät sen läpi entistä helpommin. Ilmiö muistuttaa oikosulkua taajuuden kasvaessa. Kun taajuus on pieni, kondensaattori lähestyy avonaista piiriä ja pyrkii jarruttamaan sen läpi menevää signaalia /9/.

Kela säilöo energiaa ympärilleen muodostuvaan magneettikenttään. Magneettikenttä muodostuu, kun virta kulkee kelan läpi. Magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen virran voimakkuuteen. Kela vastustaa virran vaihtelunopeutta ja kelan induktanssin suuruus määrää, kuinka kauan kestää tietyn jännitteen muodostuminen kelan napoihin. Jännitteen suuruus on suoraan verrannollinen kelan läpi kulkevan virran suuruuteen /10/.

Resonanssi tarkoittaa säännöllistä värähtelyä, jota ohjaa ulkopuolinen voima. ”Rakenne, jolla on luonnollinen värähtelytaajuus eli resonanssitaajuus, on resonaattori” /5/. Kondensaattori varastoi energiaa levyjensä väliin ja kela ympärilleen muodostuvaan magneettikenttään. Kun kondensaattori ja kela laitetaan rinnakkain, niistä tulee LC-piiri.

LC-piiri on kelasta ja kondensaattorista koostuva piiri, jolla on jokin värähtelytaajuus. Tämä värähtelytaajuus voidaan laskea kaavalla 1, jossa L on kelan induktanssi henreinä ja C on kondensaattorin kapasitanssi faradeina. Kaavasta nähdään, kuinka piirin ominaistajuus pienenee kapasitanssin kasvaessa /5/.

f = taajuus hertseinä (Hz)

ω = kulmataajuus radiaania sekunnissa (rad/s)

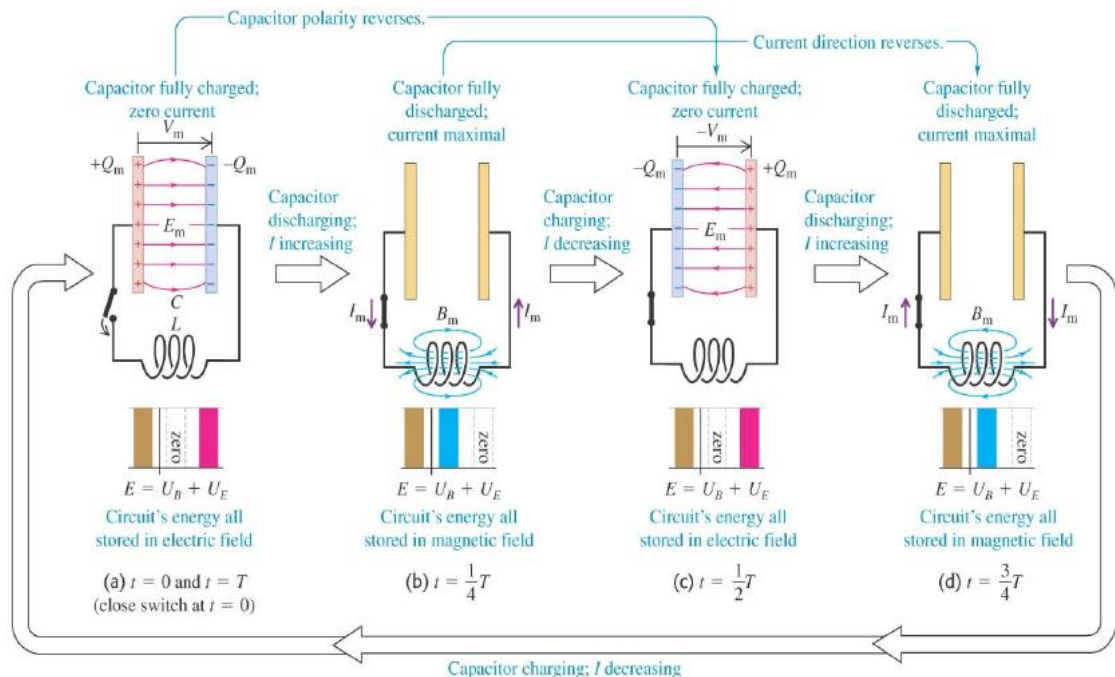
L = kelan induktanssi henreinä (H)

C = kondensaattorin kapasitanssi faradeina (F)

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

1.

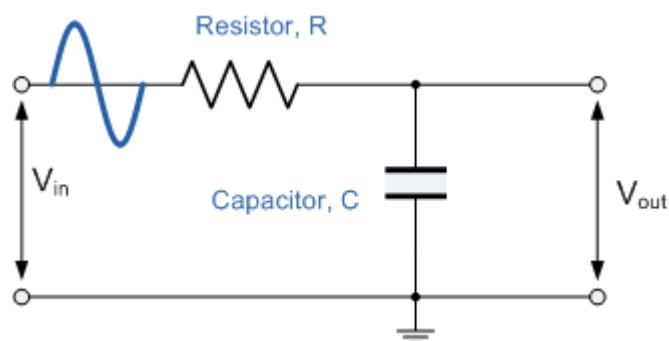
LC-piirin toimintaa voidaan havainnollistaa selkeällä kuvalla. Kuvasta 5 nähdään, kuinka LC-piiri värähtelee. Aluksi kytkimen ollessa auki on jännite ainoastaan kondensaattorin napojen välissä. Kun energia on sähkökentässä kondensaattorin levyjen välissä, kelassa ei ole yhtään energiaa. Kun kohdassa kaksi kytkin laitetaan kiinni ja virta alkaa kulkea kondensaattorin navasta kohti kelaa, kela alkaa muodostamaan ympärilleen magneettikenttää, jonne energia varastoituu. Seuraavassa kohdassa kondensaattori alkaa taas latautua kelan tyhjentyessä. Tämän seurauksena piiri on jälleen alkupisteessä, mutta nyt polariteetti (napaisuus) on muuttunut. Viimeisessä vaiheessa kondensaattori alkaa jälleen purkaantua. Tällöin virta kulkee kelaan, jonka magneettikenttä saavuttaa huippunsa, kunnes se alkaa jälleen ladata kondensaattoria ja piiri on alkutilanteessa. Sitten kierros voi alkaa alusta $/12/$. Tämän koko prosessin kesto riippuu piirin Q -arvosta $/5/$.

Kuva 5. LC-piirin toiminta $/12/$

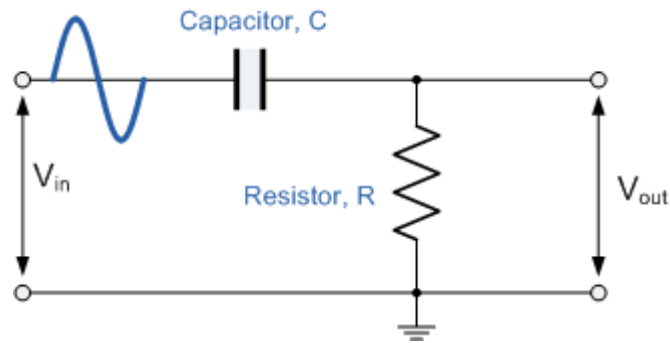
4 SUODATIN

RF-suodatin suodattaa RF-taajuuksia (Radio Frequency) eli radioaaltoja, jotka ovat sähkömagneettisessa spektrissä taajuusvälillä välillä 3 kHz - 300 GHz. Koska taivaalla on paljon erilaisia taajuuksia eikä kaikkia tarvitse ottaa huomioon vastaanottimessa, on pakko suodattaa tarpeettomat taajuudet pois, jotta tarvittava informaatio saadaan otettua vastaan. Vastaanottimen ja antennin selektiivisyys (valintatarkkuus) määrää, kuinka tarkasti taajuudet voidaan ottaa vastaan. Suodatuksen hoitaa antenniin kytketty suodatin (RF-filter), joka yleensä on passiivinen koaksiaali onteloresonaattorisuodatin. Nämä suodattimet koostuvat yleensä hyvin johtavasta metalliseoksesta, kuten hopeasta ja alumiinista tai näiden seoksesta. Suodattimen pinnat pinnoitetaan hyvin johtavalla materiaalilla mutta rungon materiaali voi olla esimerkiksi muovia. Suodattimen fyysiset mitat määräytyvät annettujen ulkomittojen mukaan ja resonaattorien mitat määräytyvät käytössä olevan aallonpituuden mukaan. Poteroiden mitat määräytyvät taajuuden mukaan ja poteroiden lukumäärään vaikuttavat sähköiset suodatusvaatimukset /5/, /6/.

RF-tekniikassa on alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö- ja kaistanestosuodattimia. Alipäästösuodatin (low-pass filter) päästää läpi matalammat taajuudet ja suodattaa pois suuremmat taajuudet. Taajuuksien suodattamiset tapahtuu yksinkertaisimmillaan siten, että valitaan sopivan suuruinen kondensaattori, jonka avulla suuret taajuudet oikosulkeutuvat maahan. Alipäästösuodattimen voi nähdä kuvasta 6. Ylipäästösuodatin (high-pass filter) toimii päinvastaisella tavalla, jossa alemmat taajuudet suodatetaan pois ja ylempät päästetään läpi. Ylipäästösuodatin voidaan tehdä kuvan 7 mukaisesti. Siinä kondensaattori C päästää lävitseen ylätaajuuksia ja toimii vastuksena alemmille taajuuksille. Tässä on kyse reaktanssi-ilmiöstä, josta kerrotaan kappaleessa 3 /13/.



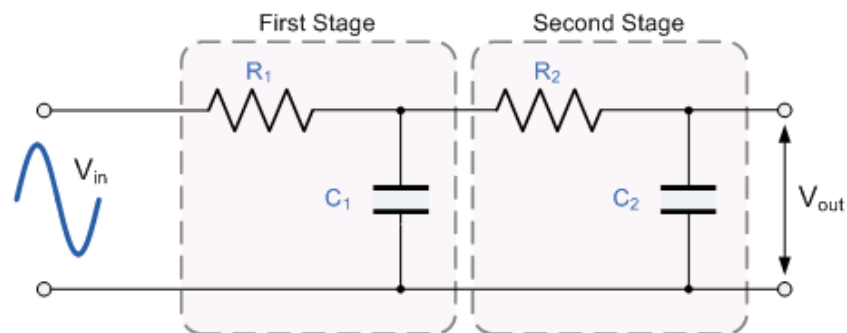
Kuva 6. Alipäästösuodin /13/



Kuva 7. Ylipäästösuodin /32/

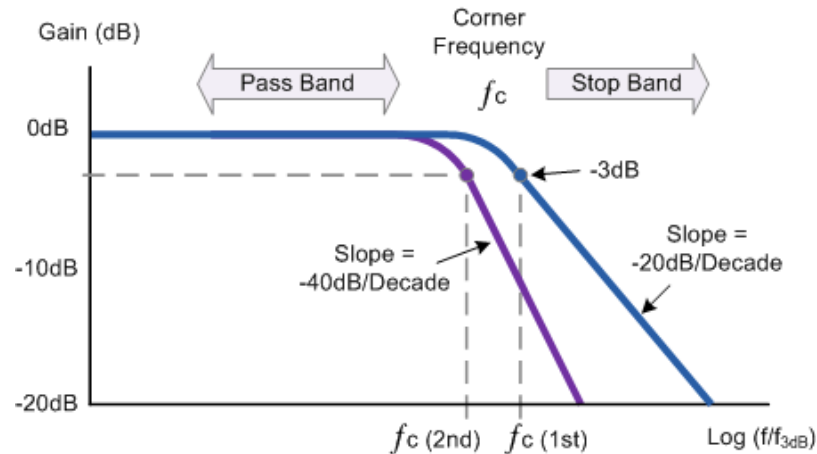
Suodattimia on kahdenlaisia: passiivisia ja aktiivisia. Käsittelem opinnäytetyössäni passiivisia suodattimia. Passiivinen suodatin on suodatin, jossa ei ole aktiivisia komponentteja, kuten transistoreja tai operaatiovahvistimia. Piirilevyllä erilliskomponenteilla rakennettu passiivinen suodatin koostuu pääasiassa vain vastuksista, kondensaattoreista ja keloista.

Suodattimen esto- tai päästökäyrän jyrkkyys riippuu sen asteluvusta, joka on suoraan verrannollinen päästö- tai estokaistan jyrkkyyteen. Asteluku tarkoittaa passivisilla suodattimilla sitä, että suodattimia laitetaan useita peräkkäin. Kahden suodattimen peräkkäin laittaminen tekee suodattimesta toisen asteen suodattimen, jonka periaatekuvan voi nähdä kuvasta 8 /13/.



Kuva 8. Kaskadikytkentä /13/

Kuvasta 8 havaitaan, miten suodatinasteita voidaan lisätä peräkkäin (cascade) ja saada näin jyrkemmät estokäyrät (kuva 9). Yhdellä asteella vaimentuma on 20 desibeliä per dekadia ja kahdella asteella saavutetaan neljäänkymmenen desibelin vaimennus dekadia kohden. Kuten kappaleesta 6 nähdään, asteiden lisääminen kasvattaa piirin viivettä /14/.



Kuva 9. Alipäästösuodattimen amplitudivaste (logaritminen) /13/

Resonanssipiirin hyvyttä voidaan kuvata Q -arvolla. Q -arvo määritellään resonanssipiirin eli tässä tapauksessa passiivisen koaksiaalisuodattimen resonanssipiirien varastoituneina energioina suhteessa niiden häviöihin. Q -arvo eli hyvyysluku tarkoittaa sitä, kuinka kauan piirillä (resonaattorilla) kestää purkaantua varastoituneesta energiasta alkutilaan. Tähän arvoon vaikuttavat piirissä olevien kelojen ja kondensaattoreiden häviöt. Ontelosuodattimen tapauksessa keloja ja kondensaattoreita kuvastaa passiivisen piirin resonaattorit ja niiden väliset kytkennät /15/. Q -arvon suuruus vaikuttaa myös piirin taajuusselektiivisyyteen /5/.

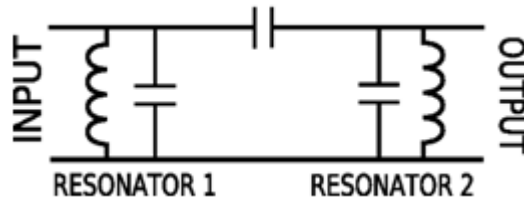
Ontelosuodattimissa resonaattorin hyvyttä mitataan yksi resonaattori kerrallaan ja tuloksia vertailemalla voidaan tarkastella pinnoituksen onnistumista sähköjohtavuuden kannalta. Pintojen tasaisuudet vaikuttavat myös Q -arvoon.

5 RESONAATTOREIDEN VÄLISET KYTKENNÄT

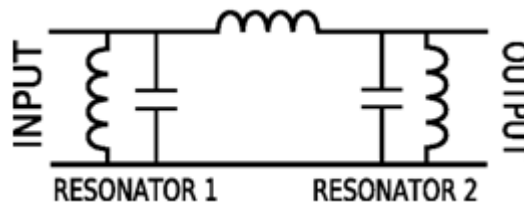
Kytkenät (Couplings) resonaattorien välillä voidaan mieltää energian siirtymisenä piiristä toiseen ja nämä resonaattoreiden väliset kytkennät voidaan kuvailla kahdella tavalla: induktiivinen ja kapasitiivinen. Induktiivinen kytkentä kuvastaa piirissä olevaa kelaa ja tämä induktanssi muodostuu kahden resonaattorin välille magneettikenttänä, kun väliaineessa (tässä tapauksessa ilmassa) oleva magneettivuo kulkee resonaattoreiden välissä. Magneettikentän suuruuden eli resonaattoreiden välisen kytkennän vahvuuden määrää näiden välinen etäisyys toisistaan ja mekaaninen rakenne. Mitä pienempi etäisyys, sitä vahvempi kytkentä ja näin ollen isompi yhteinen magneettikenttä. Magneettikentän suuruuteen voidaan vaikuttaa merkittävästi myös resonaattoreiden välisen seinässä olevan aukon (iris) suuruudella sekä resonaattoreiden koolla. Aukon suurentuessa myös magneettikenttä kasvaa. Sama pätee resonaattoreiden kokoon. Resonaattorit kytkeytyvät onteloissa myös kapasitiivisesti. Kapasitiivinen kytkentä saadaan kun resonaattorien välille muodostetaan yhteys metallisella liuskalla (strip) tai sondilla (probe). /16/.

Suodattimen fyysinen rakenne voidaan määrittellä sen kapasitiivisen ja induktiivisen luonteen perusteella. Resonaattorit voidaan esittää rinnakkaisina LC-piireinä, joista voidaan S-parametreilla (S_{21}) päätellä, mikäli S_{21} -vaihe on 90 astetta vähemmän kuin S_{11} -vaihe, näyttää kytkentä ulospäin kapasitiiviselta (kuva 14). Tätä voidaan kuvailla sarjakondensaattoreilla (kuva 10), kuten muita kapasitiivia kytkentöjä. Mikäli S_{21} -vaihe on vastaavasti 90 astetta enemmän kuin S_{11} -vaihe (kuva 13), näyttää resonaattorin kytkentä ulospäin induktiiviselta ja vastaa näin ollen kelojen sarjakytkentää (kuva 11). S-parametreista lisää kappaleessa 7 /17/.

Kuvat 10 ja 11 näyttävät, kuinka resonaattorit voidaan ajatella koostuvan LC-piiristä ja kuinka näiden välinen kytkentä nähdään joko kapasitiivisena tai induktiivisena riippuen komponentista.

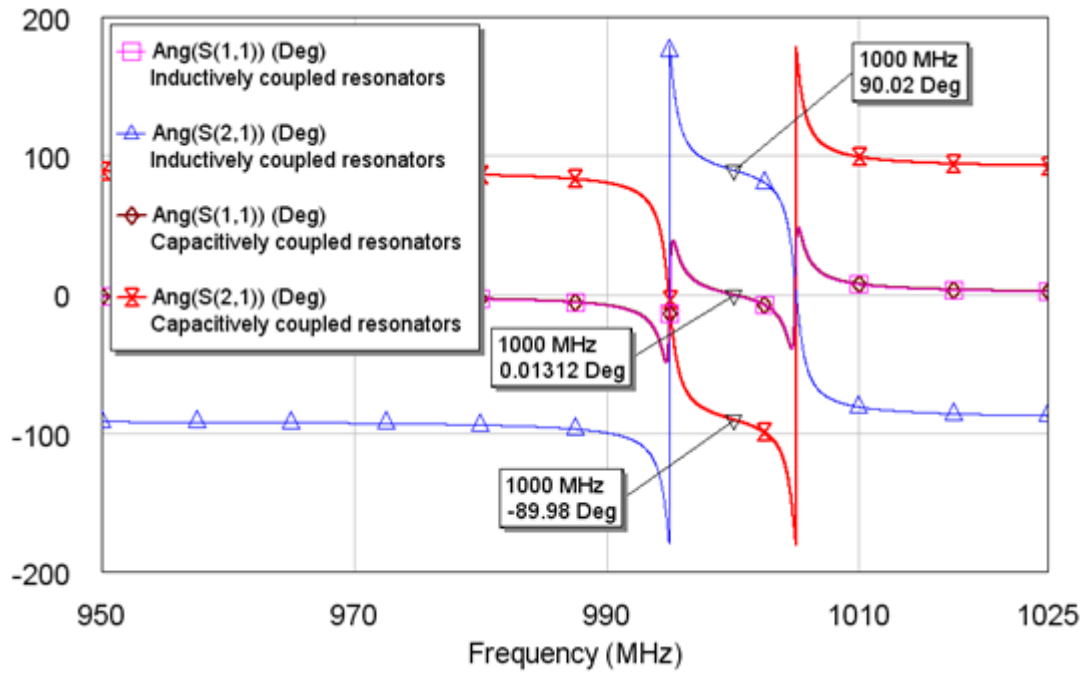


Kuva 10. Kapasitiivinen kytkentä /17/

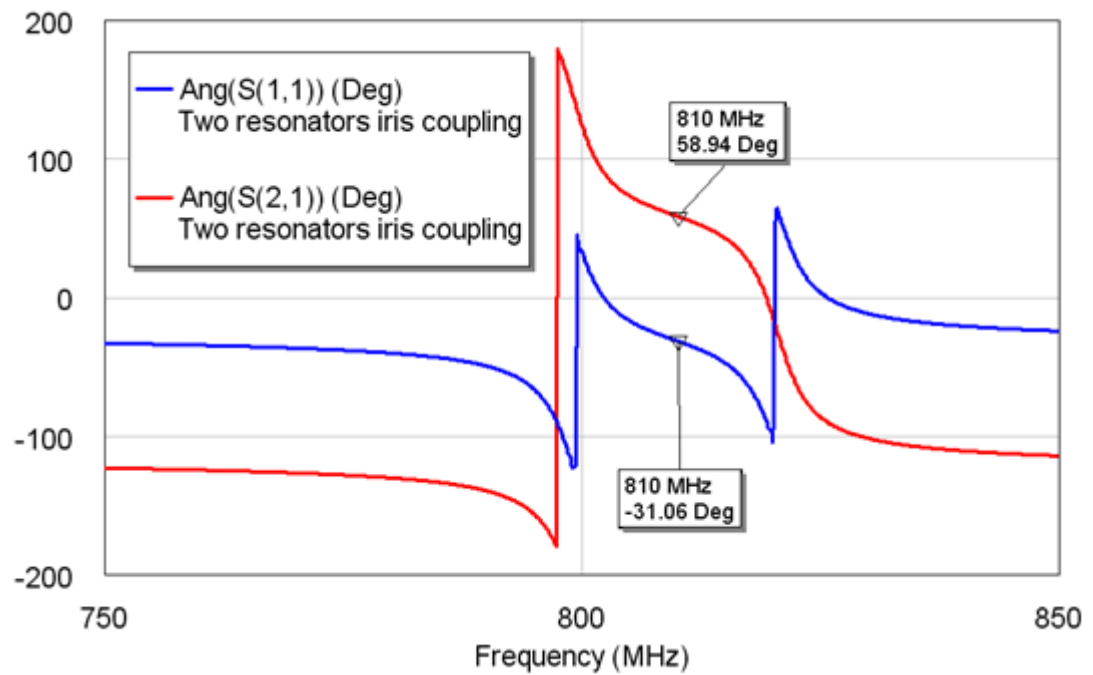


Kuva 11. Induktiivinen kytkentä /17/

Mikäli näiden kahden kuvassa olevan piirin simulointi tehdään lineaarisesti, ovat molempien piirien S-parametrit (S-parameter) samat. Ryhmäkulkuajat (group delay) ovat molemmissa piireissä samat, eikä näin ollen ulkoapäin kyetä näkemään piirien kytkentää (coupling). Heijastunut vaihevaste S_{11} on myös sama eikä tästäkään nähdä piirin kytkennän luonnetta (kuva 12). Piirin läpi menneen vaihevasteen S_{21} voidaan havaita siirtyneen 90 astetta molempiin suuntiin, jolloin syntyy 180 asteen vaihe-ero (out of phase). Piirin vaihevasteita tutkimalla voidaan todeta, että induktiivinen kytkentä on S_{11} -vaihetta 90 astetta edellä ja kapasitiivinen on 90 astetta jäljessä. Kuva 12 näyttää näiden välisen vaihe-eron /17/.

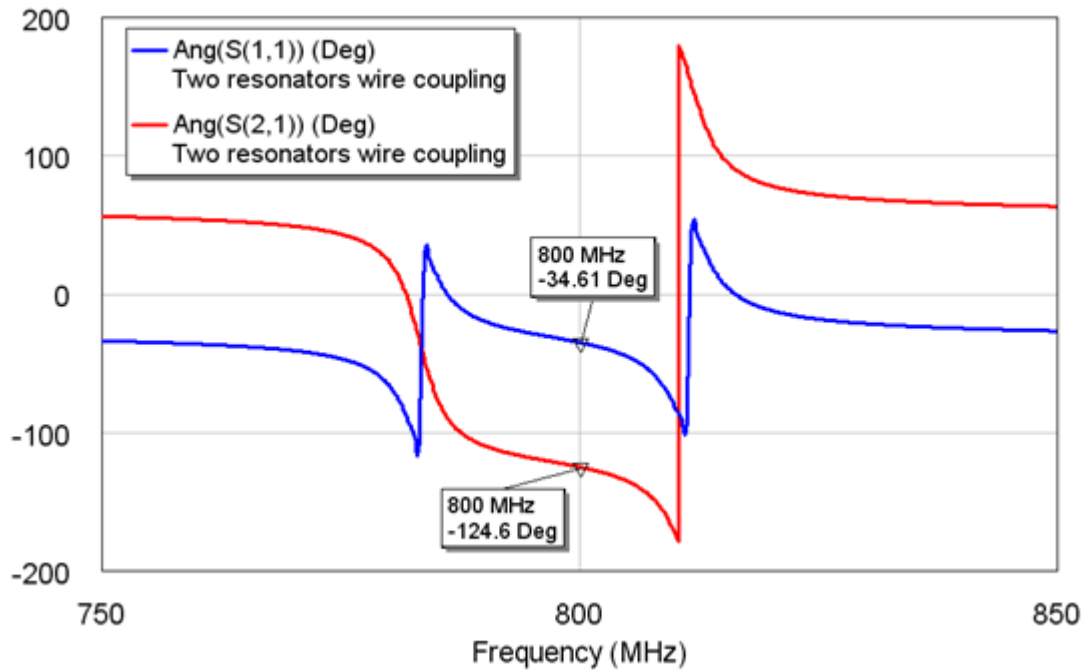


Kuva 12. Vaihevastekuva /17/



Kuva 13. Induktiivinen kytkentä /17/

Kuvasta 13 voidaan tarkastella, millaiset keskitaajuudella siirtyneen vaiheen ja heijastuneen vaiheen erot ovat: $-31.06 - 58.94 = 89.99$ astetta. Kuvasta 13 voidaan huomata, kuinka S_{21} -vaihe kulkee S_{11} -vaiheen edellä 90 astetta, jolloin kytkentä on induktiivinen /17/.

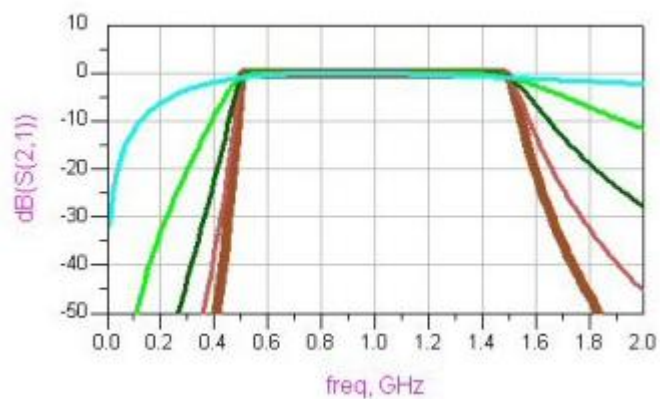


Kuva 14. Kapasitiivinen kytkentä /17/

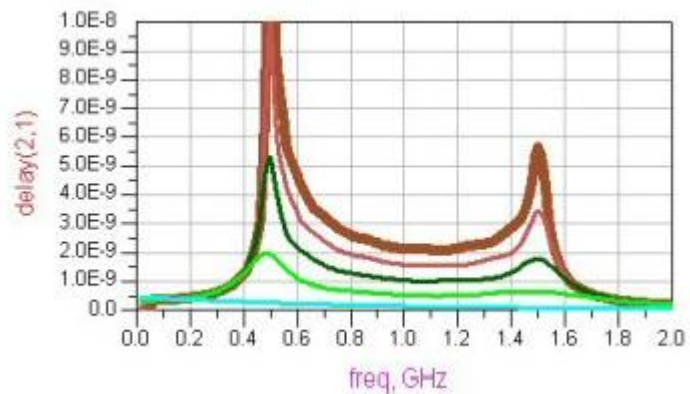
Kuvassa 14 vastaavasti S_{21} kulkee 90 astetta heijastuksen (S_{11}) perässä eli kytkentä on kapasitiivinen. $-124.6 - (-34.61) = 89.99$ astetta /17/.

6 RYHMÄKULKUAIKA

Ryhmäkulkuaika (Group Delay) on viive, joka mitataan piirin ulostulosta, kun halutaan tietää, kuinka kauan signaali on piirin sisällä kulkenut. Eri taajuuskomponentit kulkevat piirissä eri pituisen ajan. Kuvia 15 ja 16 vertailemalla huomataan, kuinka rajataajuuksilla viive (ryhmäkulkuaika) kasvaa. Viive riippuu suodattimen astemäärästä, jonka kasvaessa viive kasvaa /18/.

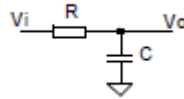


Kuva 15. Taajuusvaste /18/

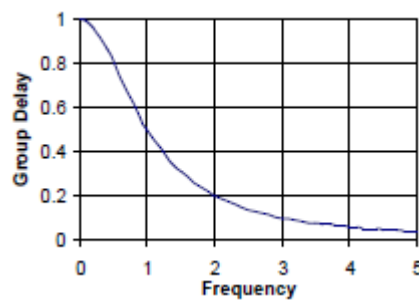


Kuva 16. Viivevaste /18/

Signaali voi olla useista eri taajuuskomponenteista koostuva ryhmä, jossa kullakin taajuudella kestää eri pituinen aika kulkea järjestelmän läpi. Kuvasta 18 voi nähdä RC-piirin (kuva 17) vasteen /19/.

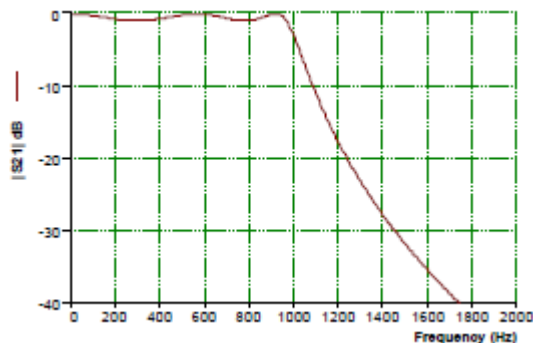


Kuva 17. RC alipäästösuodin /19/

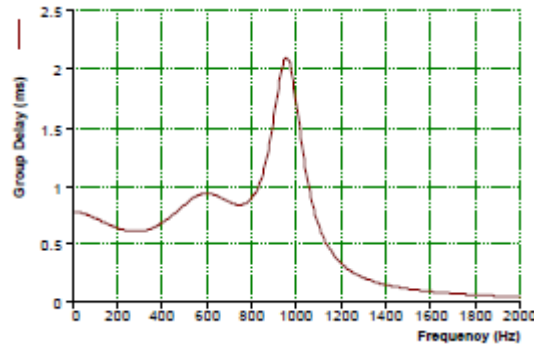


Kuva 18. RC-suodattimen ryhmäkulku-aika /19/

Kuvasta 18 voidaan huomata, kuinka viive pienenee taajuuden kasvaessa. Alipäästösuotimen amplitudivastekuvasta (kuva 19) voidaan nähdä, kuinka rajataajuudella -3 dB cut-off-pisteessä taajuudella 1 GHz viive on suurimmillaan kun vaimennusta verrataan kuvaan 20 /19/.



Kuva 19. Alipäästösuodattimen amplitudivastekuva /19/



Kuva 20. Alipäästösuodattimen ryhmäkulku-aika /19/

RF-suodattimissa viive tulee reaktiivisista komponenteista, joita piiri sisältää ja näitä komponentteja yleensä ovat kelat ja kondensaattorit. Näihin komponentteihin on varastoitunut energiaa, joka häviää piiristä lämpönä ja sähkömagneettisena säteilynä ympäristöön. Resonaattori- ja resonanssi-kaistat varastoivat energiaa, mistä aiheutuu häviöitä, jotka lisäävät viivettä. Resonaattoreiden sekä reaktiivisten komponenttien Q-arvoista voidaan laskea piirissä oleva Q-arvo. Tämä saadaan kaavalla 2 /19/.

$$\Delta L_A(\omega) = \text{Piirin häviö (dB)}$$

$$\omega_0 = \text{kaistanpäästösuodattimen keskitaajuus ja alipäästösuodattimen cut-off (Hz)}$$

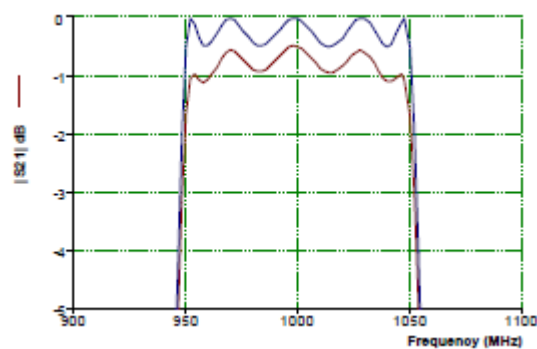
$$\tau(\omega) = \text{ryhmäkulku-aika (s)}$$

$$Q = \text{piirin hyvyysluku kun resonanssi-kaistat ovat keskitaajuudella } \omega_0$$

$$\Delta L_A(\omega) \approx 8.686 \frac{\omega_0}{Q} \tau(\omega) \text{ dB}$$

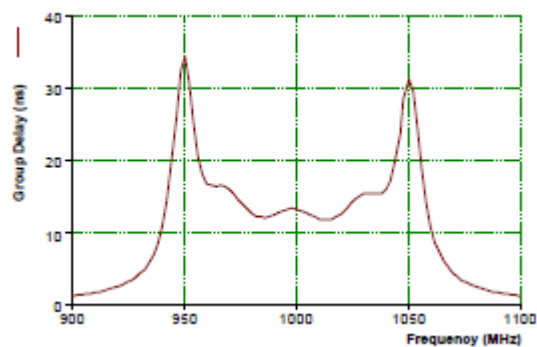
2.

Tähän esimerkkiin on valittu kaistanpäästösuodin, jonka keskitaajuudeksi on valittu 1 GHz 0,5 dB rippelillä ja 100 MHz:n kaistanleveydellä. Alkuehtona on käytetty olettaa, että keskikaistalla oleva häviö on oltava alle 0,5 dB ($\Delta L_A(\omega)$) ja piirin ryhmäkulku-aika on 13,3 ns. Laskennan tulokseksi on saatu 1452, tästä voidaan päätellä, että jos käytetään resonaattoria, jonka Q on noin 1500, ovat piirin häviöt mahdollisimman pienet. Kuvasta 21 voidaan nähdä piirin häviöt (punainen) verrattuna haluttuun tulokseen (ideaali suodatin) eli siirtolinjan häiriöt (insertion loss) /19/.



Kuva 21. Häviöt verrattuna haluttuun tulokseen /19/

Kuvasta 22 voidaan havaita, kuinka kaistanpäästösuodattimen ryhmäkulku-aika kasvaa rajataajuuksille mentäessä.



Kuva 22. Kaistanpäästösuodattimen ryhmäkulku-aika /19/

7 S-PARAMETRIT

S-parametrit eli sironta-parametrit tarkoittavat matemaattista teoriaa, jotka kuvastavat energian etenemistä moniporttisessa verkossa. Tämä mahdollistaa sen, että monimutkaisia verkkoja voidaan yksinkertaistaa. Tällöin ei tarvitse tietää verkon sisältöä, koska sen ominaisuuksia voidaan mitata porteista S-parametrien avulla. S-matriisi (vektoreita) koostuu N-määrästä portteja, jotka sisältävät N^2 muuttujia eli S-parametreja. Näistä jokainen esittää ulostulo-sisäänmenopolkua. Kuvasta 23 voidaan tarkastella, millaisilta näyttävät usean portin S-parametrit.

$$(S_{11}) \text{ (one - port)}$$

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \text{ (two - port)}$$

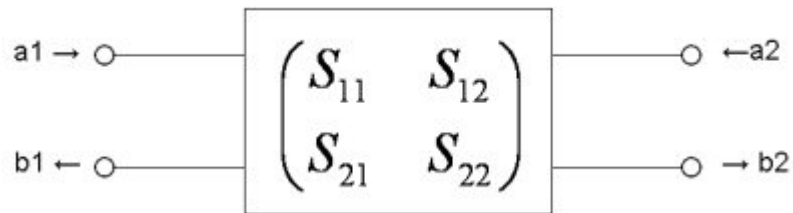
$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \text{ (three - port)}$$

Kuva 23. S-matriisi /20/

S-parametrien alaindeksit tarkoittavat ulostuloa ja sisäänmenoa siten, että S_{21} on portista yksi sisään ja portista kaksi ulos. Tämä kuvastaa piirin läpimenoa, jolloin voidaan tarkastella esimerkiksi vahvistusta, jonka piiri antaa. RF-tekniikassa voidaan tarkastella antennin heijastusta S_{11} , jolloin mitatetaan portista yksi heijastunutta signaalia. Mitä suurempi vaimennus, sitä

parempi sovitus, sillä epäsovitukselta johtuen antennista tuleva suuri heijastus voi rikkoa lähettimen (Tx).

Yksinkertainen malli tarkoittaa neliporttisen piirin tapauksessa mustaa laatikkoa, jonka sisältöä emme tiedä. Piirin sisäistä rakennetta ei tarvitse tietää toimintataajuudella, koska piirin läpäisemää tai heijastamaa aaltoa voidaan tutkia S-parametrien eli sirontaparametrien avulla. Voimme mitata sen ominaisuuksia neljästä portista ja tarkastella sen toimintaa. Kuva 24 kuvastaa tätä laatikkoa, jonka sisältöä emme tiedä. Porttien impedanssit voidaan määrittää seuraavilla yksinkertaisilla jakolaskuilla, jotka ovat nähtävissä kaavoista 3, 4, 5 ja 6 /20/, /5/.



Kuva 24. Kaksiporttinen mustalaatikko /20/

$$S_{11} = \frac{b1}{a1} \quad 3.$$

$$S_{12} = \frac{b1}{a2} \quad 4.$$

$$S_{21} = \frac{b2}{a1} \quad 5.$$

$$S_{22} = \frac{b2}{a2} \quad 6.$$

8 EPÄSOVITUS

Heijastusvaimennus (Return Loss) tarkoittaa signaalia, joka heijastuu siirtolinjan toisesta päästä lähteeseen siirtolinjan epäsovituksen (mismatch) vuoksi. Siirtolinjassa oleva impedanssin muutos esimerkiksi päätteessä heijastaa signaalin takaisin lähteeseen päin, jolloin siirtotiellä on kaksi vastakkaisiin suuntiin kulkevaa signaalia. Nämä eri suuntiin etenevät aallot muodostavat siirtotielle signaalien summia, jotka voivat joissakin kohdissa kumota toisensa /21/, /23/.

Heijastusvaimennusta muodostuu kaikkialla kaapelissa, jossa on impedanssin muutosta. Impedanssin muutosta voi aiheutua kaapelin epäpuhtauksista, liittimistä, päätteestä, eristeaineesta tai fyysisistä mitoista. Signaalin heijastumisesta aiheutuu viivettä ja tämä summattuna tai vähennettynä pääsignaalista aiheuttaa vastaanottimessa vääriä tuloksia. Kaavasta 7 voidaan nähdä, kuinka heijastusvaimennus koaksiaalikaapelissa voidaan laskea, kun tiedetään pääteimpedanssi ja kaapelin ominaisimpedanssi /21/, /23/.

Z_t = Pääteimpedanssi (Ω)

Z_0 = Kaapelin ominaisimpedanssi, joka on $\sqrt{\frac{L}{C}}$

L = Kaapelin induktanssi (H)

C = Kaapeli kapasitanssi (F)

$$RL = 20 \log_{10} \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad 7.$$

Ominaisimpedanssin likimääräinen arvo saadaan induktanssin ja kapasitanssin osamäärän neliöjuuresta. Tästä voidaan havaita, kuinka ominaisimpedanssi muuttuu, mikäli kaapelin fyysiset mitat muuttuvat, koska silloin muuttuvat myös L ja C . Kapasitanssin ja induktanssin muutoksista aiheutuvaa sisäisen vastuksen muutosta on käsitelty kappaleessa 3.

SWR (Standing Wave Ratio) on sama asia kuin heijastusvaimennus, mutta ilmaistuna eri tavalla. VSWR tarkoittaa jännitteen "Voltage" seisovan aallon suhdetta. VSWR ilmaistaan suhdelukuna. Tämä suhdeluku lasketaan siirtotien maksimi- ja minimikohdan osamääränä.

Otetaan signaalin alkuarvoksi 1 voltti (1 V). Heijastunut signaali muodostaa siirtotielle alkuperäisen signaalin kanssa summia ja vaimennuksia, joista aiheutuu johonkin kohtaan maksimisumma eli kahden voltin (2 V) amplitudi, ja siihen kohtaan, jossa heijastunut signaali kumoaa alkuperäisen, tulee jännitteeksi nolla voltia (0 V). Tästä tulee osamääräksi $2/0$, mikä tarkoittaa ääretöntä SWR:ää eli ääretöntä seisovan aallon suhdetta. Tämä on huonoin mahdollinen tilanne. Taulukosta 1 voidaan nähdä, kuinka ääretön seisovan aallon suhde tarkoittaa nollaa desibeliä heijastusvaimennuksena. Kun heijastusvaimennus on nolla, koko signaali on heijastunut takaisin /22/.

Antennin sovituksessa täytyy ottaa SWR huomioon, jotta signaali saadaan mahdollisimman hyvin vastaanottimelle. Suhdeluvun ollessa yksi (1) on siirtotie sovitettu parhaalla mahdollisella tavalla ja signaali ei heijastu takaisin lähettimeen. Taulukosta 1 nähdään SWR:n ja RL:n välinen korrelaatio /24/.

Taulukko 1. Heijastusvaimennuksen ja seisovan aallon suhteen välinen suhde /24/

RL (dB)	VSWR	RL (dB)	VSWR	RL (dB)	VSWR	RL (dB)	VSWR
46,1	1,01	25,7	1,11	18	1,29	8	2,32
40,1	1,02	24,9	1,12	17	1,33	7	2,61
36,6	1,03	24,3	1,13	16	1,38	6	3,01
34,1	1,04	23,7	1,14	15	1,43	5	3,57
32,3	1,05	23,1	1,15	14	1,5	4	4,42
30,7	1,06	22,6	1,16	13	1,58	3	5,85
29,4	1,07	21,7	1,18	12	1,67	2	8,72
28,3	1,08	20,8	1,2	11	1,78	1	17,4
27,3	1,09	20	1,22	10	1,92	0,5	34,8
26,4	1,1	19	1,25	9	2,1	0	infinity

9 RESONAATTORIT JA VIRITYS

LC-piirin resonanssia käsiteltiin kappaleessa 3. Mikroaaltoalueella käytetään onteloresonaattoreita, jotka ovat suljetun metalliontelon sisällä ja näiden sähkökenttä on äärellinen /5/.

Resonaattori varastoi sähkömagneettista energiaa, jolloin energian värähtely tapahtuu sähkö- ja magneettikentän välillä, tästä syntyy resonanssi-ilmiö /4/. Resonaattorilla on luonnollinen värähtelytaajuus, joka on riippuvainen sen mekaanisesta mitasta /5/.

Käsittelen opinnäytetyössäni suljettuja onteloresonaattoreita, mikä tarkoittaa sitä, että sähkö- ja magneettikentät ovat äärellisessä tilassa ontelon eli tässä tapauksessa suodattimen sisällä /4/. Työssäni käyttämät resonaattorit ovat metalliontelon sisällä, jolloin nämä värähtelevät tietyllä taajuudella ja muodostavat ontelon sisään kentät, joita ohjataan suodattimen kannessa olevilla viritysruuveilla.

Aallonpituus vaikuttaa resonaattorin suunnitteluun. Taajuuden kasvaessa pienenee aallonpituus, mistä seuraa resonaattorin lyhentyminen. Ontelosuodattimen toiminta voidaan kuvailla siten, että yksi resonaattori vastaa rinnakkaista kondensaattori-kela yhdistelmää. Kun kannessa olevaa viritysruuvia ruuvataan sisäänpäin, vastaa se kondensaattorin levyjen lähentymistä, jolloin kapasitanssi lisääntyy (kappale 3.1). Suodattimen virittäminen perustuu kyseiseen ilmiöön.

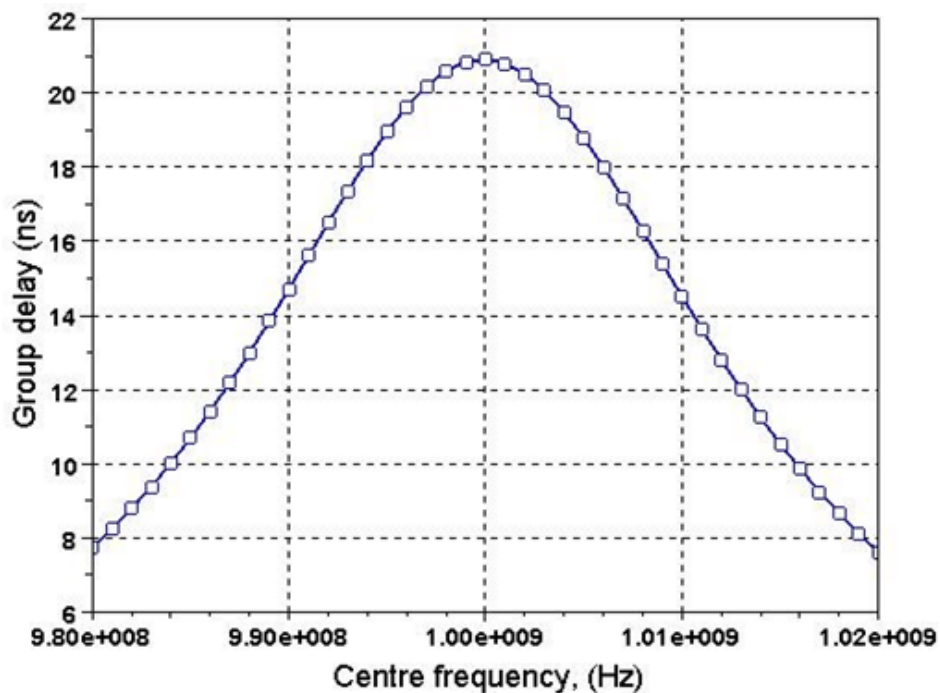
Kytkeäparametrit resonaattoreiden välillä määräävät sen, kuinka suodattimen päästökaistan muoto, kaistanleveys, rippeli ja heijastusvaimennus voidaan säätää. Koska resonaattorit kytketyvät toisiinsa onteloissa kapasitiivisesti ja induktiivisesti, vaikuttaa yhden resonaattorin virittäminen ontelossa oleviin muihinkin resonaattoreihin. Näiden välinen vaikutus riippuu siitä, miten suuri kytkentä näiden välillä on /27/.

Toisiinsa kytketyt resonaattorit mahdollistavat kapeamman kaistan, kun vaaditaan yhä tiukempia rajoja (isolaatio) käytössä olevien taajuuksien välillä. RF-alueella toimivien suodattimien virittäminen on tarkkaa työtä, jotta saavutetaan tarvittava päästökaista annetuilla vaatimuksilla. Oikean ja tarkan päästövasteen aikaan saaminen virittämällä

vaatii sen, että jokainen resonaattori on viritetty tarkasti omalle keskitaajuudelle ja, että resonaattoreiden väliset kytkennät (couplings) on säädetty tarkasti vastaamaan annettuja kaistanpäästöarvoja, heijastusvaimennusta ja pientä kaistanpäästörippeliä /27/.

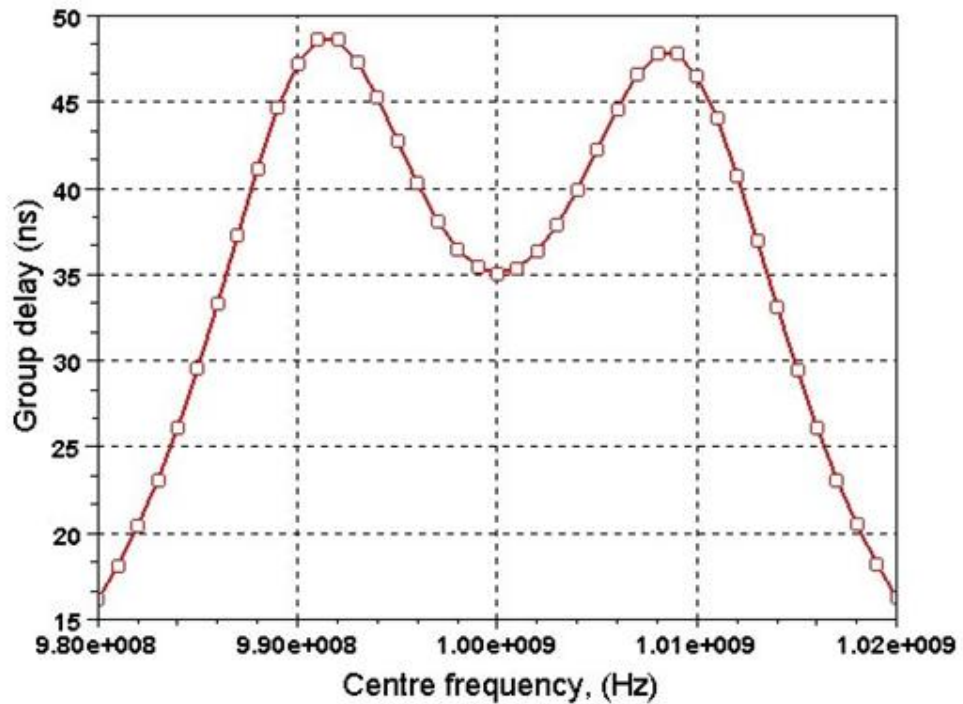
Suodattimen virittäminen taajuusvasteella on hidasta, koska yksittäisiä resonaattoreita ei nähdä selkeästi eikä resonaattoreiden välisiä kytkentöjä voida havaita selkeästi. Johtuen toisiinsa kytkettyjen resonaattoreiden luonteesta - ellei ole kokenut virittäjä - on vaikeaa tai mahdotonta nähdä sitä, miten resonaattoria tai kytkentää tarvitsee säätää, jos taajuusvastekuvassa on jotain väärin eikä vaste ole annettujen vaatimusten mukainen. Suodattimen virittäminen voi olla aluksi satunnaista säätämistä, kunnes tietyn ajan kuluttua sopiva yhdistelmä on löytyy. Suodatinvirittäjien kokemusten kautta sopivat yhdistelmät resonaattoreiden ja näiden välisten kytkentöjen välillä alkaa löytyä ja virittäminen nopeutuu. Uuden henkilöstön kouluttaminen on hidasta ja vie paljon aikaa. Viritysrobottien käyttäminen ei ole vielä yleistä johtuen algoritmien monimutkaisuudesta ja muuttujien määrästä viritettävien parametrien osalta /27/.

Suodattimen voi virittää ryhmäkulkuaikaan liittyvällä viritys-tavalla /28/, jossa suodattimen sisällä olevat resonaattorit eristetään toisistaan maadoittamalla kaikki muut paitsi tietyllä hetkellä virityksessä oleva resonaattori.



Kuva 25. Yhden resonaattorin ryhmäkulkuaika /29/

Viritysprosessi alkaa oikosulkemalla kaikki muut paitsi se resonaattori, jota viritetään. Seuraavaksi säädetään viritettävän resonaattorin taajuus resonaattorin keskitaajuudelle ja ryhmäkulku-aika halutuksi tiettyyn arvoon. Kun haluttu arvo on saavutettu, viritetään toinen resonaattori ja kytkentä tämän ja edellisen resonaattorin välillä, jotta se vastaa symmetrisesti ryhmäkulku-aikaa (kuva 26).



Kuva 26. Resonaattoriparin ryhmäkulku-aika /29/

Tämä resonaattoriparin viive on laitettava keskitaajuuden suhteen symmetrisesti ja voi olla tarpeen säätää myös edellistä resonaattoria, mikäli haluttua tulosta ei saavuteta toisesta resonaattorista. Kuvasta 25 voidaan nähdä yhden resonaattorin aiheuttama ryhmäkulku-aika keskitaajuudella 1 GHz /28/.

Ryhmäkulkuajan mukaan tapahtuva RF- ja mikroaaltosuodattimen virittäminen on hyvin yleisesti ja laajasti käytössä oleva tekniikka. Tätä käytetään sekä suunnittelussa että suodattimien virittämisessä. Voidaan todeta myös, että symmetrisen vasteen saamiseen käytetään empiirisiä kokeita, eikä laskemalla voida saavuttaa haluttua tulosta resonaattoreiden väliselle symmetrisyydelle /29/.

LÄHTEET

1. PC Magazine, Sascha Segan, 27.6.2011. The Fastest Mobile Networks 2011. Luettu 5.8.2011.
<http://www.pcmag.com/Fastest-Mobile-Networks-2011>
2. Cisco Systems, Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update,2010-2015. 1.2.2011. Luettu 19.7.2011
http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html
3. CBS News. Number of Cell Phones Worldwide Hits 4.6B. 18.2.2010. Luettu 19.7.2011.
<http://www.cbsnews.com/stories/2010/02/15/business/main6209772.shtml>
4. Aaltojohtoteoria. Simo Lindell. Otatiето 1997. ISBN 951-672-259-8. Sivut (249)
5. Radiotekniikan perusteet. Antti Räisänen, Arto Lehto. Oy Yliopistokustannus/Otatiето 2003. ISBN 951-672-337-3. Sivut (9-15, 79, 111-113, 117)
6. RF- ja Mikroaaltotekniikka. Arto Lehto, Antti Räsänen. Otatiето Oy 1994. ISBN 951-672-222-9. Sivut (11-14)
7. PCWorld. Michael Kan. 25.4.2011. Luettu 27.9.2011.
http://www.pcworld.com/article/226159/china_approaches_900_million_mobile_phone_users.html
8. International Telecommunication Union. 2011. Luettu 27.9.2011.
<http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>
9. Electronics-Tutorials. Capacitive Reactance. Luettu 27.9.2011.
http://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html
10. Coilwinder. Les Beckwith. 18.2.2005. Basic Inductor Theory. Luettu 27.9.2011.
<http://www.coilwinder.com/Inductor%20Theory.htm>
11. Light and Matter. Benjamin Crowell. 2011. Chapter 25. Capacitance and inductance. Luettu 29.9.2011.
http://www.lightandmatter.com/html_books/lm/ch25/ch25.html#Section25.1
12. Davidson College of Engineering San Jose. Ray Kwok. Cavity Resonators. Luentokalvot: Feynman, Lectures on Physics, Vol 2. Luettu 29.9.2011
http://www.engr.sjsu.edu/rkwok/Engr297/Cavity_Resonator.pdf
13. Electronics-Tutorials. Passive Low Pass Filter. Luettu 06.10.2011.
http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html

14. All About Circuits. Low Pass Filters. Luettu 10.10.2011.
http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_8/2.html
15. TechLib.com. Q-Factor. Luettu 10.10.2011.
<http://www.techlib.com/reference/q.htm>
16. Rfcurrent.com. D. Pelz. 2011. The concept of coupling. Luettu 10.10.2011
http://www.rfcurrent.com/coupling_concept
17. Novak Petrovic. 5.8.2011. Capacitive and inductive coupling in filters. Luettu 12.10.2011. Novakin lähteenä: J. Brian Thomas, "Cross-Coupling in Coaxial Cavity Filters -- A Tutorial Overview," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 51, no. 4, pp. 1368-1376, April 2003
<http://knol.google.com/k/novak-petrovic/capacitive-and-inductive-coupling-in/1j9pv1wo3nq4h/25#>
18. Microwaves101.com. 4.7.2011. Group Delay in filters. Luettu 12.10.2011
<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/groupdelayfilters.cfm>
19. Applied Radio Labs. Peter White. 15.11.1999. Group Delay Explanations and Applications. Luettu 12.10.2011.
<http://www.radiolab.com.au/DesignFile/DN004.pdf>
20. Microwaves101.com. 4.12.2011. S-parameters. Luettu 13.10.2011
<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/sparameters.cfm>
21. F M Systems Inc. Frank McClatchie. What is return loss, and why should I measure it?. Luettu 13.10.2011.
<http://www.fmsystems-inc.com/manuals/RETURN%20LOSSart.pdf>
22. Wenzel.com. SWR, Return Loss, and Reflection Coefficient. Luettu 13.10.2011.
<http://www.wenzel.com/documents/swr.html>
23. All About Circuits. Standing waves and resonance. Luettu 13.10.2011.
http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_14/6.html
24. rfcafe.com. VSWR - Return Loss - Γ Conversions. Luettu 13.10.2011.
<http://www.rfcafe.com/references/electrical/vswr.htm>
25. Complextoreal.com. Charan Langton. 2006. All about modulation. Luettu 15.11.2011
<http://www.complextoreal.com/chapters/mod1.pdf>
26. Atrium Technical Inc. 1997. Chapter 5 - Data Communications Technology. Luettu 15.11.2011
<http://www.netguru.net/ntc/NTCC5.htm>

27. Agilent Technologies. 2000. Simplified Filter Tuning Using Time Domain. Luettu 15.11.2011
<http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-5328E.pdf>
28. CST Computer Simulation Technology AG. 2007. Design and Tuning Coupled-Resonator Filters with group delay approach. Luettu 15.11.2011
<http://www.cst.com/Content/Documents/Events/UGM2007/p-Denti.pdf>
29. Novak Petrovic. 23.3.2010. Group delay tuning target for RF/microwave filters. Luettu 15.11.2011.
<http://knol.google.com/k/novak-petrovic/group-delay-tuning-target-for-rf/1j9pv1wo3nq4h/15#>
30. Nokia Siemens Networks. 2009. Flexi Multiradio BTS. Luettu 15.11.2011
http://www.nokiasiemensnetworks.com/system/files/document/Flexi_multiradio_BTS_100714_print.pdf
31. Nokia Corporation. 2007. Nokia Flexi EDGE BTS Feature Description. Sivu 30. Luettu 15.11.2011
<http://wenku.baidu.com/view/25d1bdd6c1c708a1284a44bc.html>
32. Electronics-Tutorials. Passive Low Pass Filter. Luettu 06.10.2011.
http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_3.html
33. Mathworks. Filter Specifications - Response Types. Luettu 6.10.2011.
<http://www.mathworks.se/help/toolbox/dsp/ref/fdesign.arbgrpdelay.html>