



KANDIDAATINTYÖ

Modeemikortin takaisinmallinnusprojekti

Samu Huhtamäki

Ohjaaja: Timo Rahkonen

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2020

Huhtamäki S.P. (2020) Modeemikortin takaisinmallinnusprojekti. Oulun yliopisto, Elektroniikan ja Tietoliikennetekniikan osasto. Kandidaatintyö,

TIIVISTELMÄ

Tässä kandidaatintyössä esitetään Motorola SURFboard SB5101E -modeemin takaisinmallinnusprosessi. Modeemin toimintaan perehdytään tutkimalla sen piirilevyn keskeisiä osia ja siinä käytettyjä kiinnostavia teknisiä ratkaisuja.

Työn ensimmäisessä osiossa perehdytään SB5101-modeemiin ja sen toimintaan. Toisessa osiossa tutkitaan modeemin piirilevyn keskeisiä komponentteja, ja sen toiminnan kannalta keskeisiä osia. Viimeisessä osiossa perehdytään modeemin suunnittelussa käytettyihin ratkaisuihin, joilla voidaan vähentää herkkien komponenttien kokemaa häiriötä.

Huhtamäki S.P. (2020) Modem Circuit Reverse Engineering Project. University of Oulu, Department of Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis,

ABSTRACT

In this bachelor's thesis the reverse engineering process of a Motorola SURFboard SB5101E cable modem is presented. This thesis analyses some of the central components of the modem circuit board and some of the interesting solutions used in the circuit design.

The first section of the thesis focuses on the basic information of the SB5101E cable modem. The second section analyzes the central components and parts of the cable modem circuit board. The last section of the thesis focuses on analyzing the design methods that are used to minimize the interference in sensitive components.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS	4
1. JOHDANTO	5
2. MOTOROLA SURFBOARD -KAAPELIMODEEMI	6
3. PIIRILEVYN KESKEISET TEKNISET OSAT	9
3.1. Keskeiset komponentit	9
3.2. Käyttöjännitteen hallinta	11
3.3. Diplex-suodatin	13
3.4. Balun	14
4. PIIRILEVYTEKNISET RATKAISUT	16
4.1. Koteloinnit	16
4.2. Signaaliteiden suojaus	16
5. POHDINTA	18
6. YHTEENVETO	19
7. LÄHTEET	20

1. JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön keskeinen tavoite on perehtyä Motorolan valmistaman SURFboard SB5101E -kaapelimodeemin toimintaan tutkimalla, miten sen piirilevyn keskeiset osat on toteutettu, ja millaisia piiritekniisiä ratkaisuja siinä on käytetty. Valitsin tämän aiheen tutkimukseni kohteeksi, koska haluan perehtyä takaisinmallinnuksen prosessiin, ja haluan oppia kuinka kaapelimodeemien piirilevyt toimivat.

Tässä työssä perehdyn modeemin toimintaan etsimällä siitä ensin tietoa netistä, jonka jälkeen tutkin sen piirilevyn rakennetta. Tässä kandidaatintyössä tutkittava kaapelimodeemi on jo iäkäs, mutta se valittiin tutkinnan kohteeksi sen piirilevyn suhteellisen yksinkertaisuuden ja helppolukuisuuden vuoksi.

Takaisinmallinnuksella tarkoitetaan prosessia, jossa takaisinmallinnukseen valittu kohde, joka voi olla esimerkiksi jokin sähköinen laite tai sen käyttämä softa, puretaan, ja tutkitaan, kuinka se toimii. Sen tavoitteena on useimmiten saada niin hyvä käsitys tutkittavan kohteen toiminnasta, että takaisinmallintaja voisi itse rakentaa oman samanlaisen laitteen tai sovelluksen. Modeemien takaisinmallinnuksessa halutaan ymmärtää niiden toimintaperiaatteet, jotta niiden toimintaa voitaisiin muokata halutulla tavalla.[1][2]

Kun laitevalmistajat, kuten kaapelimodeemien valmistajat, julkaisevat uuden tuotteen, he pyrkivät suojelemaan tuotettaan yleensä joko patentilla, tai salaamalla sen valmistus- ja toimintamenetelmät. Siinä tapauksessa, kun valmistajat eivät jaa tuotteensa teknisiä tietoja, takaisinmallinnus on kätevin tapa saada käsitys sen toiminnasta.[1][2]

Takaisinmallinnusta hyödynnetään teollisuudessa esimerkiksi kilpailevien yritysten laitteiden tutkinnassa ja patenttien valvonnassa. Nykyään on olemassa useita takaisinmallinnukseen erikoistuneita yrityksiä.

2. MOTOROLA SURFBOARD -KAAPELIMODEEMI

Työssä tutkinnan kohteeksi on valittu Motorolan valmistama SB101E SURFboard –kaapelimodeemi, joka on esitetty kuvissa 1 ja 2. Laitteen etupuolella on kuusi valodiodia, jotka kertovat käyttäjälle laitteen toiminnasta: virta päällä, vastaanottokanava kytketty, lähetyskanava kytketty, käynnistysprosessi suoritettu, tietokone kytketty, ja valmiustila käytössä. Modeemin päällä on laitteen valmiustilakytkin, jolla voidaan keskeyttää laitteen luoma internetyhteys. Takana on kaikki laitteen ulkoiset liitännät, joihin kuuluu Ethernet-portti, USB-portti (Universal Serial Bus), koaksiaalikaapelin liitin, sekä virtajohdon liitin.[3]

SB101E-modeemi käyttää DOCSIS 2.0 ja Euro-DOCSIS 2.0 –protokollia¹, ja modeemin datan maksimilähetysnopeus on noin 30 Mbps ja vastaanottonopeus² 38/51 Mbps. Modeemi vaatii toimiakseen +12 VDC ja 0,75 A.[4]

Tämä modeemi valittiin työn kohteeksi, koska sen piirilevy on suhteellisen yksinkertainen ja helppolukuinen.



Kuva 1: Tutkittava laite.

¹Data Over Cable Service Interface Specification.

²Datanopeus on riippuvainen käytetystä protokollasta, sekä tiedonsiirtojärjestelmän ruuhkasta.

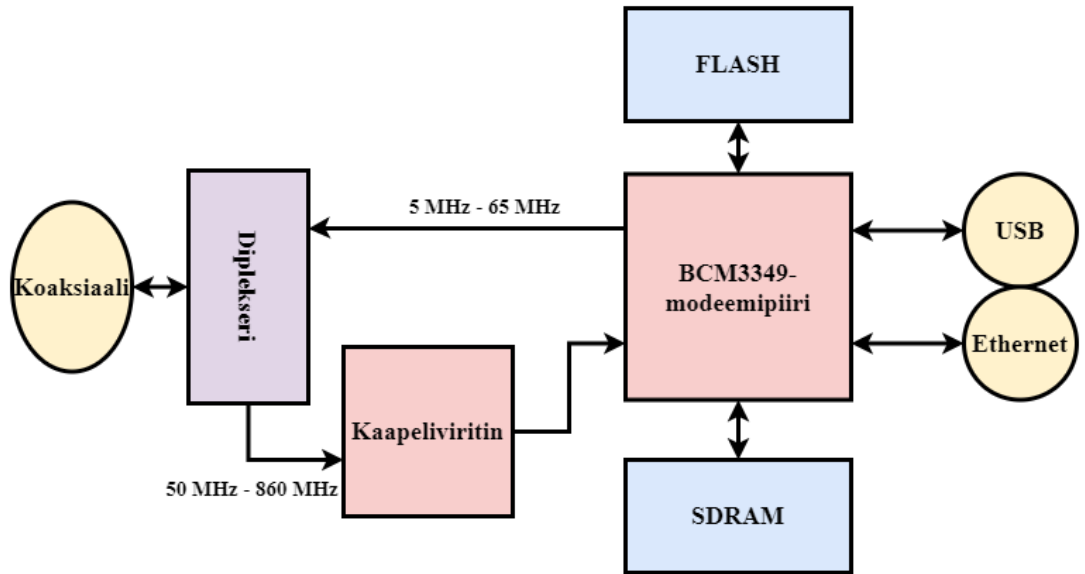


Kuva 2: Kaapelimodeemin takaosa ilman takasuojusta.

Kuvassa 3 on esitetty modeemin karkea lohkoakaavio.[5] Motorola SURFboard –kaapelimodeemissa varsinainen signaalinkäsittely suoritetaan suurelta osin Broadcom QAMLink BCM3349 –mikropiirillä. Se käsittelee kaapeliviritimeltä tulevan vastaanotetun signaalin, sekä ethernet- ja USB-portin syöttämän datan. Diplekseri, eli duplex-suodatin erottelee lähetettävän ja vastaanotetun signaalin toisistaan, ja ohjaa ne oikeisiin paikkoihin.

BCM3349-piirin tuottaman lähetettävän signaalin taajuus on vastaanotetun signaalin taajuutta pienempi, jolloin se voidaan kytkeä suoraan diplekseriin. Vastaanoton signaalitiellä on käytettävä kaapeliviritintä, jolla signaalin taajuusalue säädetään modeemipiirille sopivaksi.

Flash ja SDRAM (Syncronic Dynamic Random Access Memory) ovat muisteja, joista SDRAM on tyypiltään haihtuvaa, eli sen data katoaa, kun se on riittävän kauan varauksettomana. Sitä käytetään modeemin signaalinkäsittelyn työmuistina. Flash-muisti on tyypiltään haihtumatonta muistia, ja se sisältää modeemin ohjelmiston (firmware).



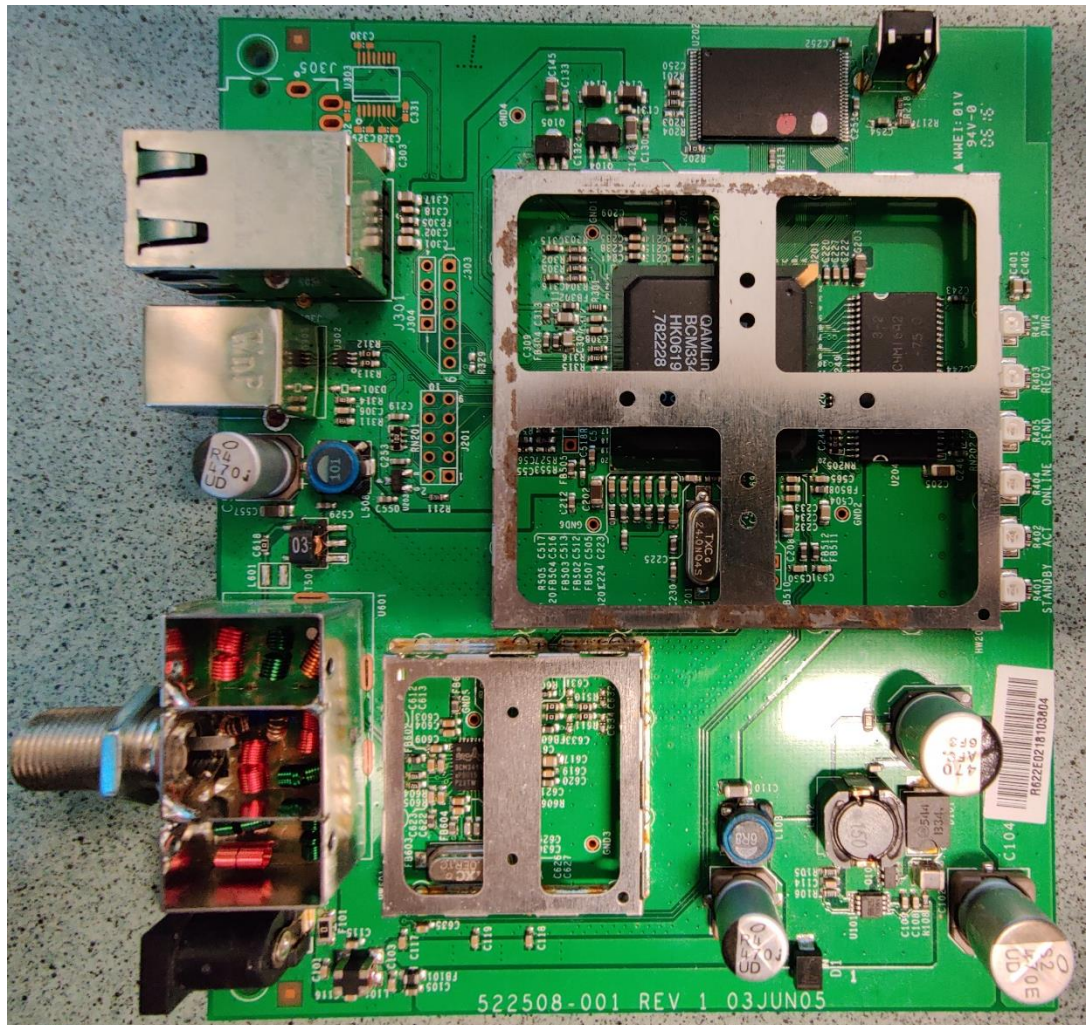
Kuva 3: Kaapelimodeemin karkea lohkokaavio.

3. PIIRILEVYN KESKEISET TEKNISET OSAT

Tässä luvussa perehdytään SURFboard-kaapelimodeemin piirin keskeisten osioiden toteutukseen, sekä keskeisimpien komponenttien tutkimiseen.

3.1. Keskeiset komponentit

Suuri osa piirilevyn osista on suojattu koteloinneilla. Kotelointien kannet irrotettiin piirin rakenteen tutkiminnan helpottamiseksi. Kuvassa 4 nähdään modeemin purettu piirilevy.

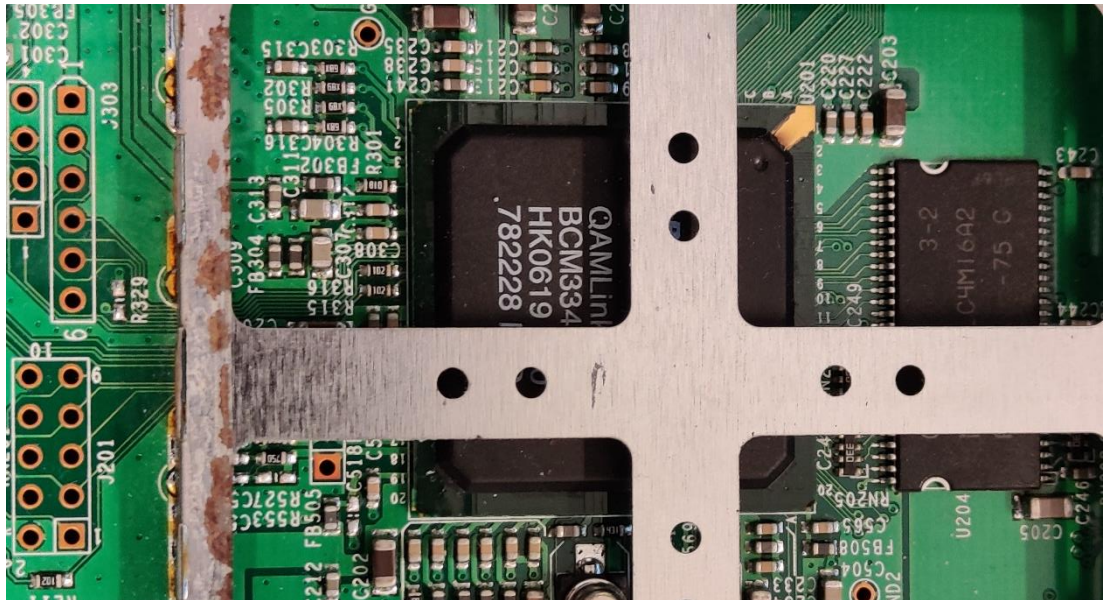


Kuva 4: Kaapelimodeemin piirilevy kotelointien kansien irrotuksen jälkeen.

Komponenttien datalehdistä saa karkean käsityksen kunkin komponentin tehtävästä laitteen toiminnassa. Datalehdet löydettiin kirjaamalla ylös komponenttien sarjanumerot, ja etsimällä niitä netistä eri datalehtikirjastoista.

Koteloinnin alta on nähtävissä edellisessä luvussa mainittu Broadcom QAMLink BCM3349 –mikropiiri. Kuten kuvan 3 lohkokaaviosta nähdään, se on päävastuussa modeemin läpi kulkevan datan käsittelystä.[5]

BCM3349-piirin vieressä on toinen suurehko komponentti, jonka sarjanumero on MT48LC4M16A2. Pienen etsinnän jälkeen sille löytyi datalehti, josta nähtiin, että se on 64 Mb:n suuruinen SDRAM-piiri.[6] Molemmat piirit on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: BCM3349 ja SDRAM

Pienemmän koteloinnin alta löytyi kolmas merkittävä vaikuttava mikropiiri. Sen sarjanumero oli helposti nähtävissä, ja sen avulla voitiin etsiä sitä vastaava datalehti. Datalehteä tutkimalla nähtiin, että se on Broadcomin valmistama BCM3419-kaapeliviritin. Se on nähtävissä kuvassa 6. Piiriä tutkimalla nähtiin, että kaapeliviritin toimii koaksiaaliliitännän ja BCM3349-piirin välikappaleena. Virittimen datalehden ja kuvan 3 lohkokaaavion perusteella voitiin todeta, että BCM3419-kaapeliviritin käsittelee duplex-suodattimelta tulevan signaalin BCM3349-piirille sopivaksi.[7]

Kuvassa 7 näkyy kotelointien ulkopuolinen piiri, joka on sijoitettu valmiustilakytkimen viereen. Tutkimalla sen datalehteä, nähtiin että se on 16 Mb:n kokoinen flash-muistipiiri. Kyseinen piiri on modeemin ainoa haihtumaton muistipiiri, eli voitiin päätellä, että se sisältää modeemin käyttöjärjestelmän ja säilytettävän datan.[8]



Kuva 6: BCM3419-kaapeliviritin.



Kuva 7: Flash-muisti.

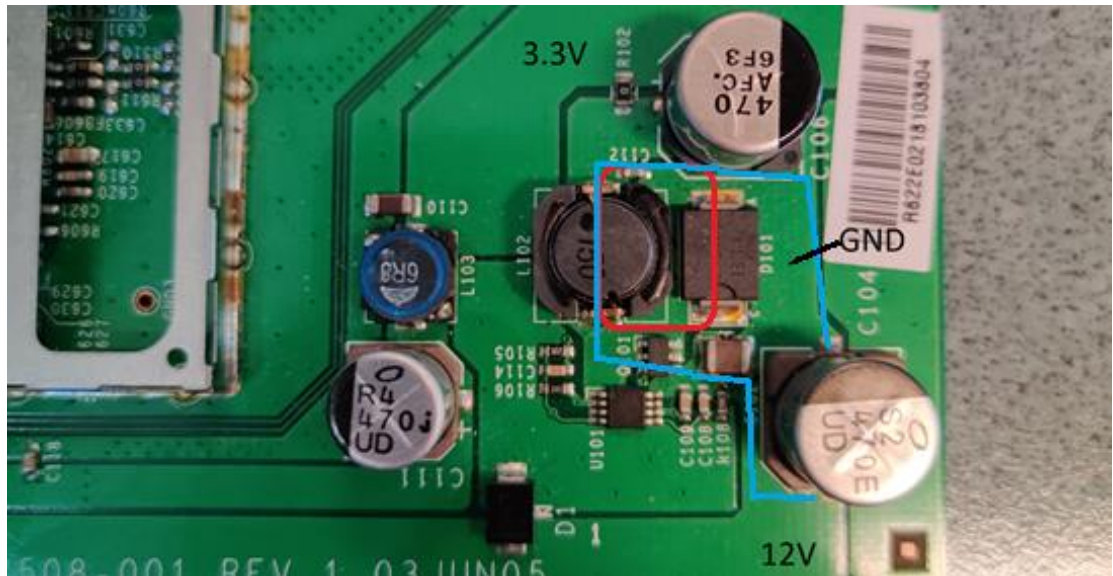
Vertaamalla äskeisiä löytöjä kuvan 3 lohkokaaevioon, kävi ilmi, että lohkokaaevion keskeiset komponentit löytyvät modeemin piirilevyltä.

3.2. Käyttöjännitteen hallinta

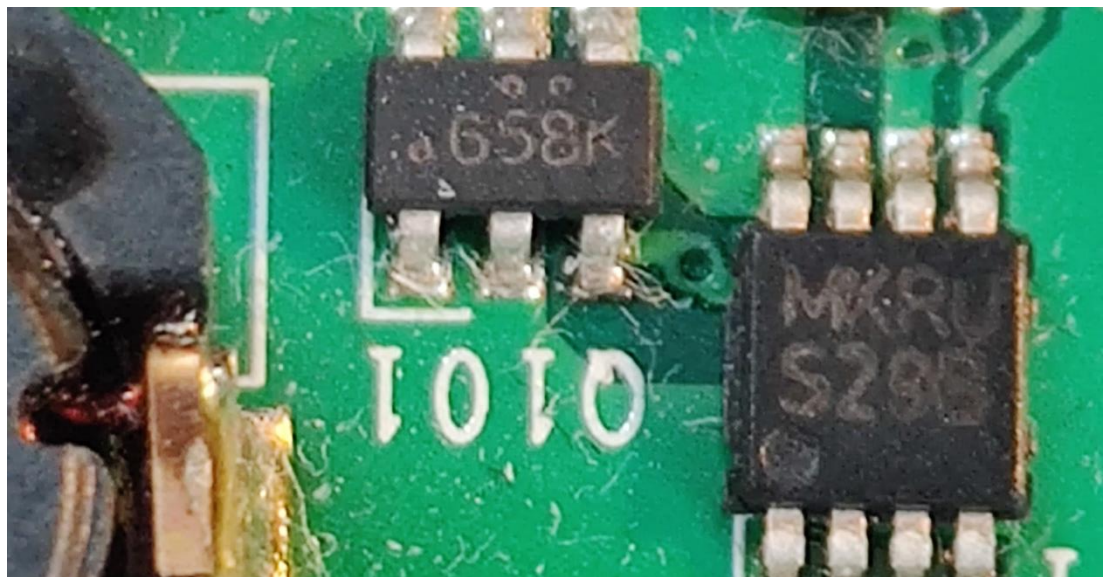
SURFboard-kaapelimodeemi ottaa virtaliittimeensä 12 V:n tasajännitteen. Liittimestä tuleva jännite syötetään suodattimen läpi, jolla vältetään käyttöjännitteen värähtelyn siirtyminen virtajohtoon. Modeemin komponentit, kuten BCM3419-kaapeliviritin ja SDRAM, vaativat toimiakseen 3,3 V:n käyttöjännitteen, jonka tuottamiseen

modeemissa käytetään kuvassa 8 esitettyä hakkurivirtalähdettä (switched mode power supply).

Hakkurin piirikaavion selvitystä helpotettiin tutkimalla siinä käytettyjä komponentteja. Kuvassa 9 on esitetty hakkurissa käytetty LM3485-mikrokontrolleri (buck controller), jolle löytyi netistä datalehti. Datalehdeltä löytyi kuviot mikrokontrollerin pinnijärjestyksestä ja tyypillisestä piiristä, jossa sitä voidaan hyödyntää. Kyseiset kuviot ovat nähtävissä kuvassa 10. Vertaamalla modeemin hakkuripiiriä datalehdeltä löytyneisiin kuvioihin nähtiin, että modeemin hakkuripiirin rakenne vastaa kuvassa 10 esitettyä piirikaaviota.[9]

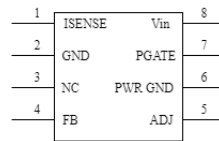


Kuva 8: Modeemin käyttöjännitteen käsittelevä hakkuri, eli Switched Mode Power Supply. Värilliset silmukat esittävät hakkurin toiminnan keskeisiä virtasilmuksia.

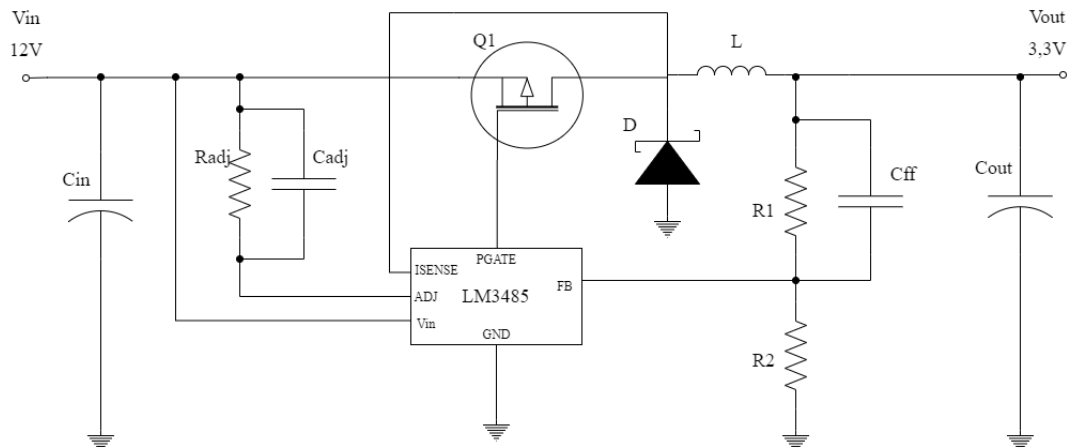


Kuva 9: Hakkurissa käytetty transistori ja LM3485-mikrokontrolleri (buck controller).

LM3485-piirin Pinnijärjestys:



Tyypillinen piiri, jossa LM3485:tä voidaan hyödyntää:



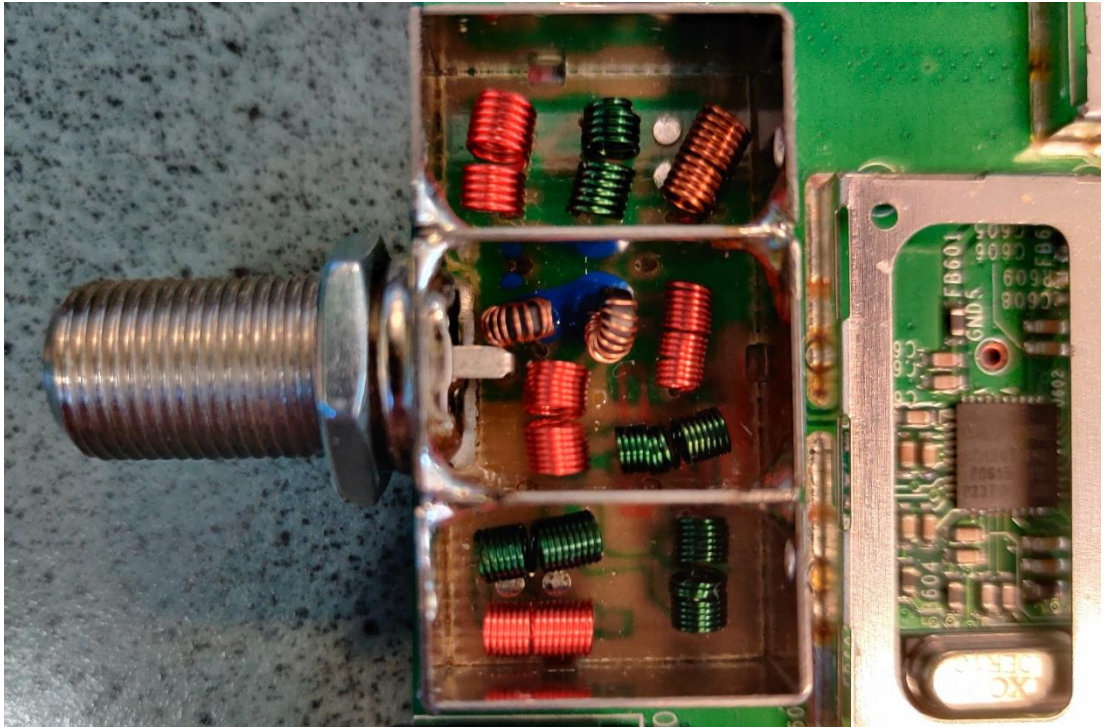
Kuva 10: LM3485-mikrokontrollerin pinnijärjestys ja tyypillinen piirikaavio.

Tämäntyyppisen hakkurirakenteen toiminta perustuu jännitteen pulssinleveysmodulaatioon. Kontrolleri kytkee transistoria toistuvasti päälle ja pois, jolloin lähdön jännitteestä tulee pulssitettu. Lähdön kondensaattori ja kela luovat lähtöjännitteeseen tasoittavan vaikutuksen. Lähdön jännitteen keskimääräinen arvo on siis riippuvainen värähtelyn pulssisuhteesta.[10]

Hakkuripiiriin transistorin värähtelyn seurauksena sen keskeiset virtasilmukat synnyttävät sähkömagneettisia häiriöitä, eli EMI:ä (electromagnetic interference). Jotta syntyvä EMI saataisiin mahdollisimman pieneksi, piirilevyä suunniteltaessa nämä virtasilmukat pyritään tekemään mahdollisimman lyhyiksi.[11] Kuvassa 8 on merkitty keskeiset virtasilmukat. Kun transistori on kytketty päälle, virta kulkee sinisen lenkin kautta, ja kun se on pois päältä, virta kulkee punaisen lenkin kautta. Kuvasta 8 nähdään, että virtasilmukoista on tehty hyvin kompakteja. Hakkurin lähtöön on myös lisätty pieni kondensaattori (C112), joka pienentää virtasilmukoita entisestään.

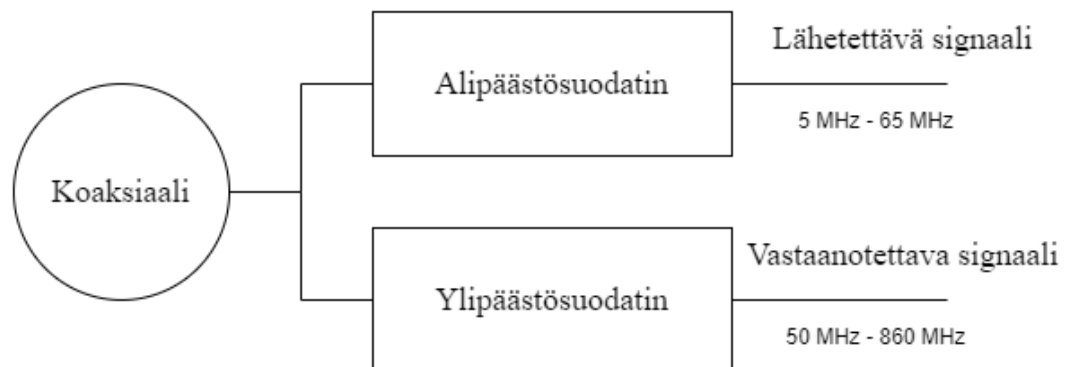
3.3. Diplex-suodatin

Tutkittavassa modeemissa dataa lähetetään ja vastaanotetaan saman koaksiaaliliitännän kautta. Liitännästä on siis kyettävä erottamaan lähetyksen ja vastaanoton signaalit toisistaan, ja ohjaamaan ne oikeisiin paikkoihin. Siksi siinä on käytettävä diplex-suodatinta, eli diplekseriä. Kuvassa 11 on esitetty modeemissa käytetty diplekseri, joka koostuu yhdeksästä avokelasta ja kahdesta muuntajasta. Se on merkitty myös kuvan 3 lohkokaaevioon.



Kuva 11: Diplex-suodatin, eli diplekseri.

Diplekserin toiminta perustuu kahden suodattimen käyttöön, joista toinen on alipäästävä ja toinen ylipäästävä. Sen luotettava toiminta vaatii, että vastaanotetun ja lähetettävän signaalin taajuudet ovat selvästi erisuuruiset.[12] Kuvassa 12 on selvennetty sen toimintaa.

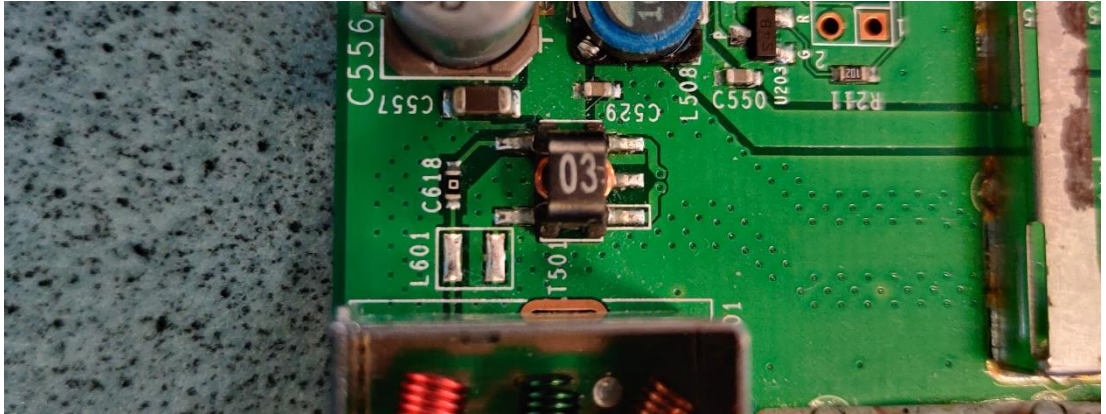


Kuva 12: Diplekserin toimintaperiaate.

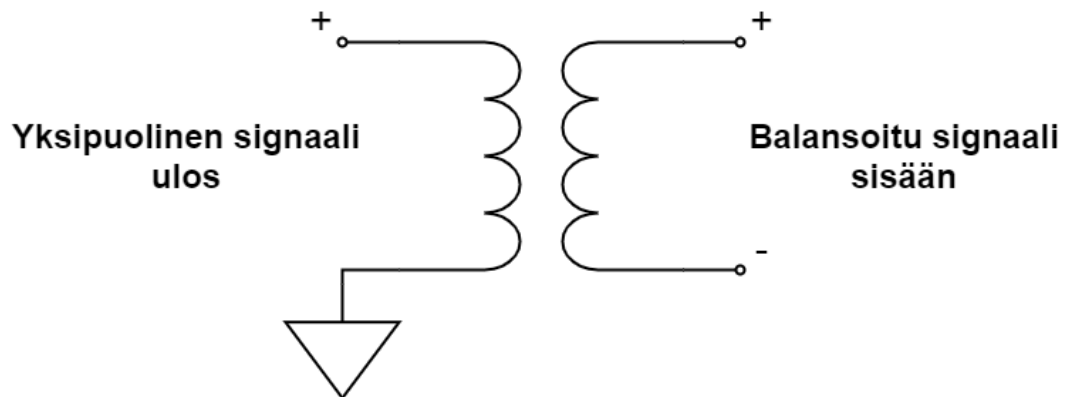
3.4. Balun

Modeemissa lähetettävä signaali lähtee BCM3349-piiriltä differentiaalisena. Ennen kuin se ohjataan diplex-suodattimen kautta koaksiaaliliittimeen, lähetettävä signaali muutetaan differentiaalisesta, eli balansoidusta, signaalista yksipuoleiseksi.

Muunnoksessa käytetään balun-muuntajaa (balanced to unbalanced). Balun on esitetty kuvassa 13, ja sen rakenne kuvassa 14.[13]



Kuva 13: Balun



Kuva 14: Balunin toimintaperiaate.

Balun on sijoitettu piirillä aivan diplexerin viereen, jolloin balansoimattoman signaalitien pituus on mahdollisimman lyhyt, ja se kestää paremmin häiriöitä. Modeemin piirin balansoituja signaaleja tutkitaan enemmän luvussa 4.2.

4. PIIRILEVYTEKNISET RATKAISUT

Tässä luvussa perehdytään Motorola SURFboard -kaapelimodeemin piirin mielenkiintoisiin rakenteellisiin ratkaisuihin. Tarkkailun kohteena on erityisesti herkkien komponenttien ja signaalien suojaus.

4.1. Koteloinnit

Kuten kuvasta 4 nähdään, suuri osa tutkittavan modeemipiirin komponenteista on aseteltu metallisten kotelointien alle. Piirilevyä tarkkailemalla nähdään, että signaalinkäsittelyn keskeiset komponentit, kuten BCM3349-kaapelimodeemipiiri ja BCM3419-kaapelivirittinpiiri, on sijoitettu suojauksen alle.

Kotelointien tavoitteena on suojata herkkiä kohteita, kuten RF-komponentteja, ulkopuolisilta sekä muiden piiriosien synnyttämiltä EMI-häiriöiltä (electromagnetic interference) ympäröimällä ne maadoitetulla metallisella suojuksella. Koteloinnilla voidaan myös eristää piirin osiot, jotka tuottavat paljon sähkömagneettista häirintää. Käytännössä ei voida tehdä kotelointia, joka eristäisi komponentit täysin, koska ne vaativat ulkopuolisia liitäntöjä, kuten maa- ja virtaliitännät.[14][15]

Kotelointia voidaan käyttää yksinään komponenttien eristyksessä, mutta taloudellisuuden kannalta on järkevämpää käyttää sitä yhdessä muiden suojausmenetelmien, kuten maadoituksen ja suodatuksen, kanssa. [14]

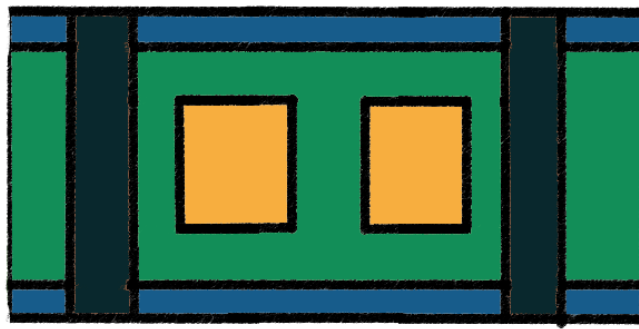
Aikaisemmin tutkittu diplekseri on herkkä ulkopuolisille häiriöille, koska se koostuu useista avokeloista. Kuvassa 11 näkyy, kuinka diplekserin eri osiot on myös eristetty toisistaan koteloinnilla.

4.2. Signaaliteiden suojaus

Piirin kotelointien ulkopuoliset signaalitiet ovat myös herkkiä häiriöille. Modeemin toiminnan parantamiseksi signaaliteiden suojauksessa on käytetty signaalien balansointia ja läpivientiaitoja. Modeemin rakenteessa häiriöille herkimvät signaalitiet ovat vastaanotetun ja lähetettävän signaalin reiteillä, eli diplekserin ja virittimen välissä, virittimen ja modeemipiirin välissä, sekä modeemipiirin ja balunin välissä. Diplekserin ja virittimen välinen signaalitie on suojattu sijoittamalla ne mahdollisimman lähelle toisiaan.

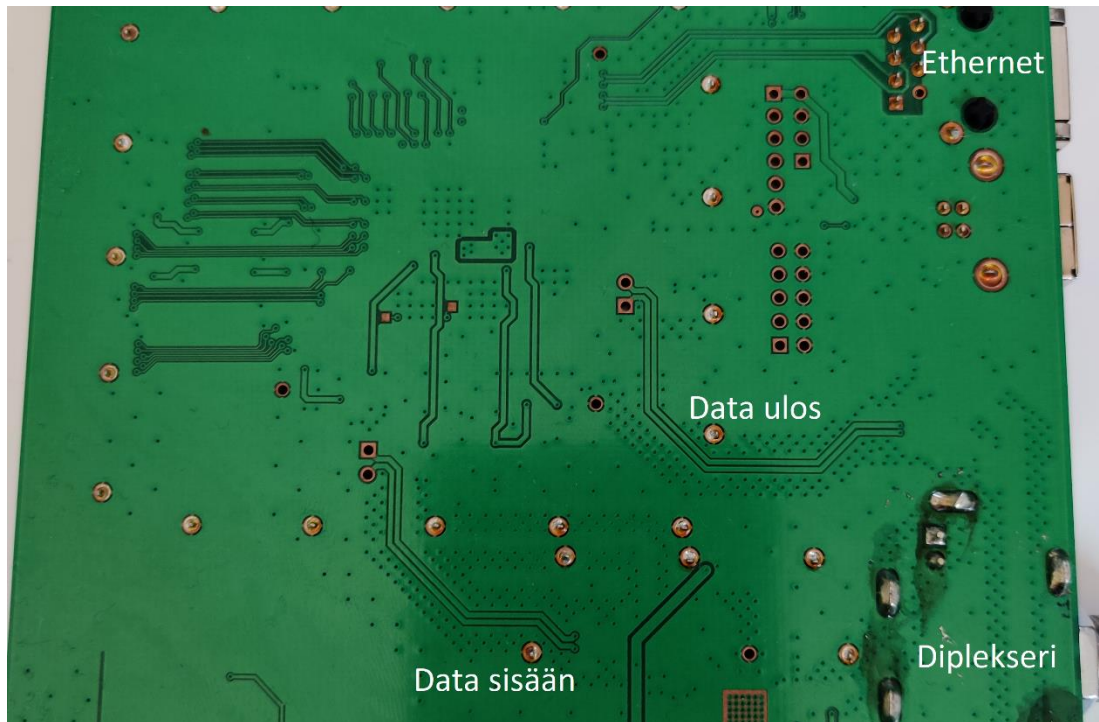
Herkkien signaaliteiden suojauksessa on käytetty balansoituja, eli differentiaalisia, signaaleja. Balansoidut signaalitiet koostuvat kahdesta vierekkäisestä johtimesta. Kun signaalitiehen kytkeytyy häiriöitä, ne kytkeytyvät samalla molempiin johtimiin, jolloin ne voidaan kumota kuormassa. Kuvassa 16 on esitetty modeemin piirilevyn takapuoli, josta on nähtävissä kaksi modeemin toiminnalle keskeistä balansoitua signaalitietä: kaapelivirittimestä modeemipiiriin ja modeemipiiristä balun-muuntajaan.

Kuvassa 16 johtimien ympärillä on nähtävissä paljon läpivientejä. Näitä läpivientien joukkoja kutsutaan läpivientiaidoiksi (via fence), ja niillä pyritään parantamaan signaaliteiden eristystä.



- | | |
|--|---|
|  Johtimet |  Maadoitetut tasot |
|  Eriste |  Läpivientiaidat |

Kuva 15: Poikkileikkauskuva balansoidusta signaalitiestä.



Kuva 16: Piirilevyn takapuoli.

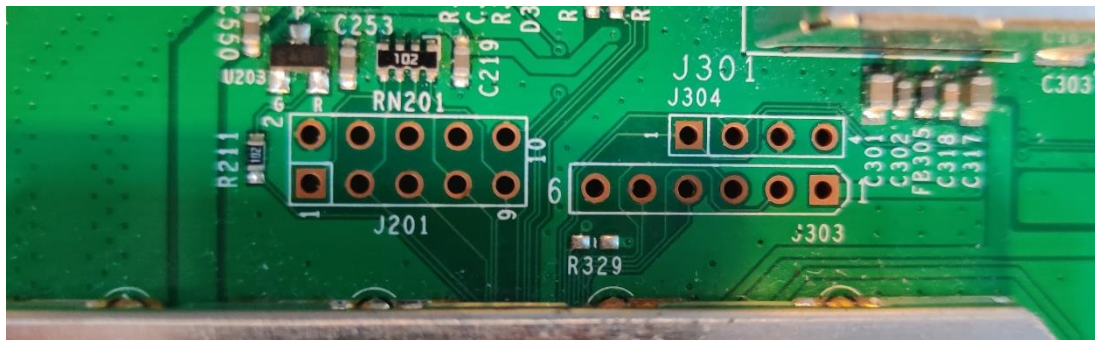
5. POHDINTA

Modeemin piirilevyn tutkimuksessa ei ollut lopulta suurempia vaikeuksia. Tässä työssä haasteellisimmaksi osuudeksi osoittautui käyttöjännitepiirin rakenteen tulkitseminen. Siinä, ja monessa muussakin kohdassa, piirin toiminta oli helpompi hahmottaa tutkimalla ensin jonkin sen rakenteen keskeisen komponentin datalehteä. Oikeiden datalehtien löytämisessä oli myös haasteita.

Työssä tutkittu modeemipiiri sopi hyvin tämän työn kohteeksi. Se on rakenteeltaan helppolukuinen, ja siinä on käytetty tämän työn kannalta mielenkiintoisia ratkaisuja. SB5101E-kaapelimodeemi on jo yli kymmenen vuotta vanha, ja modeemit ovat parantuneet huomattavasti sen julkaisun jälkeen. Sitä tutkimalla voitiin kuitenkin saada peruskäsitys modeemipiirin suunnittelussa huomioon otettavista asioista.

Tässä työssä tutkittu modeemi oli hyvä valinta myös siinä käytettyjen suojausmenetelmien kannalta. Dataa käsittelevissä laitteissa, kuten modeemeissa, sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamien häiriöiden torjunta on hyvin tärkeää laitteen luotettavan toiminnan kannalta. SB5101E-modeemia tutkimalla voitiin helposti perehtyä suojausmenetelmiin, kuten koteloiteihin ja läpivientiaitoihin.

Kaapelimodeemin takaisimallinnuksen jälkeen, kun sen toiminnasta on saatu hyvä käsitys, sitä voidaan modifioida. SB5101E-kaapelimodeemin voi ohjelmoida uudelleen käyttäen piirillä olevaa JTAG-liitäntää, joka näkyy kuvassa 17. Modeemien modifioinnin harrastajat ovat onnistuneet tekemään laitteeseen omia ohjelmistoversioitaan, joilla voidaan kiertää joitain verkko-operaattorin asettamia rajoituksia.



Kuva 17: Modeemikortin JTAG-liitäntä.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä perehdyttiin Motorola SB5101E -kaapelimodeemin toimintaan takaisinmallinnuksen avulla. Työssä tutkittiin erityisesti kaapelimodeemin toiminnan kannalta keskeisimpiä komponentteja ja piirirakenteita, sekä herkkien komponenttien ja signaaliteiden suojauksessa käytettyjä ratkaisuja.

Modeemin keskeisimmät komponentit ovat BCM3349-modeemiipiiri, BCM3419-kaapeliviritin, 64 Mb:n kokoinen SDRAM-muistipiiri ja 16 Mb:n kokoinen flash-muistipiiri. Datalehdistä saatiin käsitys kyseisten komponenttien tehtävästä modeemin toiminnassa. Piirilevyttä löytyneitä komponentteja voitiin myös verrata BCM3349-modeemiipiirin datalehdeltä löydettyyn lohkokaavioon.

Työssä modeemin toiminnan kannalta mielenkiintoisia piirirakenteita olivat hakkuri, diplekseri ja balun. Hakkurin kontrollerin datalehti etsittiin sen rakenteen selvityksen helpottamiseksi. Datalehdeltä löytyi piirikaavio tyypillisestä piirirakenteesta, jossa kyseistä kontrolleria voidaan käyttää. Vertaamalla hakkurin rakennetta datalehden piirikaavioon nähtiin, että ne vastaavat hyvin toisiaan.

Tämän kandidaatintyön lopussa perehdyttiin kuinka SB5101E-kaapelimodeemin herkätkomponentit ja signaalitiet on suojattu ulkoisilta ja piirin muiden osien aiheuttamilta häiriöiltä. Häiriöiden torjunnassa on käytetty koteloiteja, balansoituja signaaliteitä ja läpivientiaitoja.

7. LÄHTEET

- [1] DerEngel. (2006) Hacking the cable modem: What cable companies don't want you to know (1st ed.) No Starch Press. s.73-74.
- [2] Eilam, E., & Chikofsky, E. J. (2005). Reversing : Secrets of reverse engineering. Indianapolis, IN: Wiley. s. 3-23.
- [3] Motorola. (luettu 12.2.2020) SB5100 Series Cable Modem User Guide. URL: <https://residential.wavebroadband.com/resources/internet/SB5101-Cable-Modem-User-Guide.pdf>
- [4] Motorola. (luettu 10.2.2020) SB5101 Series SURFboard Cable Modem Datasheet. URL: <http://gditechnology.com/manuals/Motorola-SB5101-series-datasheet.pdf>
- [5] Broadcom. (2006) BCM3349 Datasheet. URL: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=719cd3d00275d19c1f8a2d4a1c089480d97c62&type=M&term=BCM3349>
- [6] Micron. (2003) MT48LC4M16A2 Datasheet. URL: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=eb50e13e50c5ce25aa39e78dc1dbe243302bcd&type=M&term=MT48LC4M16A2>
- [7] Broadcom. (2006) BCM3419 Datasheet. URL: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=4dd8b317a52bbc350ce8d259b41c3afa727e84&type=M&term=BCM3419>
- [8] STMicroelectronics. (2003) M29W160EB Datasheet. URL: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=ebbf2a28cddf756df174a87e4fa211865d2c2d&type=M&term=M29W160ET>
- [9] National Semiconductor. (2009) LM3485 Datasheet. URL: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=65cebc08e622af7609a27f4e649fde1e4273b3&type=M&term=LM3485>
- [10] Texas Instruments. (luettu 25.3.2020) DC-DC fundamentals – switching regulator overview. URL: <https://training.ti.com/dc-dc-fundamentals-switching-regulator-overview?cu=38908>
- [11] Kueck, C. (2012) Power Supply Layout and EMI. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an139f.pdf>

- [12] Electronics Notes. (luettu 3.4.2020) Antenna RF Diplexer. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/antenna-diplexer/what-is-antenna-diplexer.php>

- [13] Schweber, B. (luettu 3.4.2020) Understanding the RF Balun and its Transformative Function. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/understanding-the-rf-balun-and-its-transformative-function>

- [14] Bursky, D. (luettu 2.3.2020) RF Shielding: The Art and Science of Eliminating Interference. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/rf-shielding-the-art-and-science-of-eliminating-interference>

- [15] Altium. (luettu 2.3.2020) EMI Reducing PCB Shielding Techniques to Incorporate in Your Designs. URL: <https://resources.altium.com/p/emi-reducing-pcb-shielding-techniques-to-incorporate-in-your-designs>