

Sami Mustonen

WLAN-ANTENNI AJONEUVOKÄYTTÖÖN

Insinööriyö

Kajaanin ammattikorkeakoulu

Tekniikan ja liikenteen ala

Tietotekniikan koulutusohjelma

Kevät 2006



**Kajaanin  
ammattikorkeakoulu**

## OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Sami Mustonen	
Työn nimi WLAN-antenni ajoneuvokäyttöön	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Langaton tiedonsiirto	Ohjaaja(t) Jukka Heino
	Toimeksiantaja Sunit Oy
Aika Kevät 2006	Sivumäärä ja liitteet 32
<p>Insinööriyössä tutkittiin, mikä WLAN-antenni soveltuisi parhaiten käytettäväksi Sunit Oy:n valmistamissa ajoneuvotietokoneissa. WLAN-antennin täytyy olla tehokas ja helposti asennettava ajoneuvokäyttöön.</p> <p>Työssä tutkittiin myös, kuinka merkittävässä asemassa ovat suurtaajuuskäytössä käytettävät RF-liittimet ja kaapelit. Insinööriyön tutkimus perustuu suurimmalta osaltaan antenniteoriaan, sähkömagnetismiin ja mikroaaltomittaustekniikkaan. WLAN-antennimittaukset on tehty Kajaanin ammattikorkeakoulun RF-laboratoriossa.</p> <p>Tutkimisen kohteena oli kolme erilaista antennityyppiä. Näistä kaikki antennit ovat käyttökelpoisia ratkaisuja. Antennimittauksissa kävi kuitenkin ilmi, että J-antenni oli paras vaihtoehto tehokkuudeltaan. Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	WLAN-antenni, mikroaaltomittaustekniikka, antenniteoria
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Sami Mustonen	
Title A WLAN Mobile Antenna	
Optional Professional Studies Wireless Data Transmission	Instructor(s) Jukka Heino
	Commissioned by Sunit Oy
Date Spring 2006	Total Number of Pages and Appendices 32 pages
<p>This Bachelor's thesis was made for the Sunit company. Sunit's headquarters is located in Kajaani. The purpose of the thesis was to implement a WLAN mobile antenna research and development project in-vehicle computers. A WLAN mobile antenna must be comfortable and effective in vehicle use.</p> <p>The thesis also provides important information why RF-connectors and cables have such a significant role in high frequency design. The thesis is mostly based on antenna theory, electromagnetic theory and microwave measurement technology. WLAN-antenna measurements were made in the RF-laboratory of Kajaani University of Applied Sciences.</p> <p>The thesis researched three WLAN antenna types. All of them are useful solutions in vehicle use. The investigation showed that one antenna is the best alternative considering effectiveness.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	WLAN antenna, microwave measurement technology, antenna theory
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Kaktus Database at University of Applied Sciences Library <input checked="" type="checkbox"/> Library of University of Applied Sciences

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	7
2 RADIOLÄHIVERKOT .....	8
2.1 Radioaallot .....	9
2.2 Radioaaltojen vaimeneminen .....	10
2.3 Kohina .....	10
3 ANTENNIT .....	11
3.1 Antennien peruskäsitteitä .....	11
3.2 Antennien polarisaatio .....	12
3.3 Antennin impedanssi .....	12
3.4 Antennin sovitus .....	13
3.5 Dipoliantenni.....	13
3.6 Taittodipoliantenni .....	14
3.7 J-antenni.....	15
4 MIKROAALTOMITTAUSTEKNIikka .....	16
4.1 Mittaustuloksen epävarmuus ja virhe .....	16
4.2 Aaltojohdot .....	17
4.3 TEM-aaltomuodot aaltojohdoissa .....	18
5 ANTENNIEN MITTAAMINEN.....	19
5.1 Antennimittausten virhelähteitä .....	20
5.2 Koaksiaalikaapelit.....	20
5.3 Liittimet .....	21
5.4 Suuntakytkimet.....	22
6 TYÖN SUORITUS .....	24
6.1 Antennien mitoitus ja mittaustulokset .....	25
6.2 J-antennin mittaustuloksen analysointi .....	29
6.3 Saavutetut tulokset.....	30
7 YHTEENVETO.....	31
LÄHDELUETTELO .....	32

## LYHENNELUETTELO

AM	Amplitude Modulation. Amplitudimodulaatio.
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum. Suorasekvensihajaspektritekniikka.
DUT	Device Under Test. Mitattava laite.
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum. Taajuushyppelyhajaspektritekniikka.
FM	Frequency Modulation. Taajuusmodulaatio.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kansainvälinen sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö.
ISM	Industrial, Scientific and Medical. Laitteiden toiminta ISM-taajuuskaistalla on vapaa.
PCI	Peripheral Component Interconnect. Tietokoneväylä, jonka avulla liitetään lisälaitteita tietokoneeseen.
RF	Radio Frequency. Radiotaajuus.
RFID	Radio Frequency Identification. Etätunnistuslaite.
RLAN	Radio Local Area Network. Radiolähiverkko.
RMS	Tarkoittaa yleensä jatkuvan tehon tai jännitteen arvoa.
SMA	RF-sovelluksissa yleisimpiä koaksiaaliliittimiä.

SWR	Standing Wave Ratio. Seisovan aallon suhde.
TEM	Transverse Electromagnetic. Signaali, jossa on poikittainen sähkö- magneettinen kenttä.
UHF	Ultra High Frequency.
VHF	Very High Frequency.
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkko.

## 1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tavoite on kehittää tehokas WLAN-antenni ajoneuvo-käyttöön. Työn tilaaja Sunit Oy on perustettu vuonna 1996. Sunit Oy on kajaani-lainen ajoneuvotietokoneiden, -telematiikan ja paikannusteknologian suunnit-teluun, valmistukseen ja markkinointiin erikoistunut yritys.

Sunit Oy:n ajoneuvotietokoneissa on toteutettu kompaktisti asiakkaan tarpeet huomioon ottaen kestävyys, tehokkuus, pitkäikäisyys ja käyttöominaisuudet. Tuotteissa yhdistyvät kokemus vaativien olosuhteiden laitesuunnittelusta ja no-peasti kehittyvä tietotekniikan tuntemus.

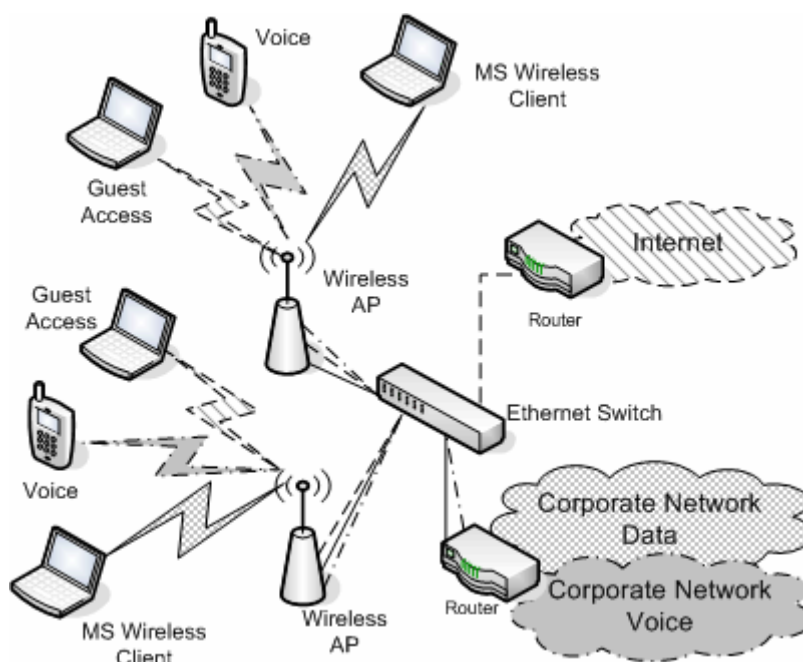
Sunit Oy kehittää ja valmistaa laadukkaita ja korkeatasoisia Windows-käyttöjärjestelmiin pohjautuvia ajoneuvotietokoneita eri asiakasryhmien käyt-töön liikkuvassa kalustossa, kuten kuorma-, henkilö-, paketti- ja linja-autoissa.

Insinööriyössä on tarkoitus tutkia, mikä WLAN-antenni olisi tehokas, halpa ja helppo valmistaa Sunitin valmistamiin ajoneuvotietokoneisiin. On kuitenkin otet-tava huomioon, että antenni tullaan asentamaan ajoneuvoon. Näin sen tehok-kuus ei välttämättä ole parhain mahdollinen, koska antennin koko ja ulkoinen olemus täytyy olla miellyttävän pieni ja yksinkertainen.

Insinööriyössä myös havainnollistetaan, kuinka tärkeä merkitys on antennien kaapeleilla ja liittimillä käytettäessä suurtaajuuksia. WLAN-antenneja on nykyi-sin markkinoilla monenlaisia. Näistä ehkä yleisimpiä ovat tavalliset tukiasema-antennit, jotka tulevat WLAN-tukiasemapaketin mukana. WLAN toimii noin 2,4–2,48 GHz taajuusalueella riippuen siitä, missä päin maapalloa on.

## 2 RADIOLÄHIVERKOT

Langaton lähiverkko (WLAN = Wireless Local Area Network) on tietoliikenneverkko aivan kuten langallinen lähiverkko, mutta nykyisin hurjaa vauhtia yleistyvä ja tulevaisuudessa jopa langallisen lähiverkon korvaaja. Langaton lähiverkko on huomattavasti käyttäjäystävällisempi vaihtoehto, koska se mahdollistaa käyttäjän vapaan liikkumisen ja näin välttyään ylimääräisiltä johdoilta, joita esimerkiksi Ethernet-verkko vaatii. Myös muutosten tekeminen ja verkon asentaminen on helpompaa kuin langallisessa lähiverkossa. Langaton lähiverkko voi kattaa esimerkiksi rakennuksen, koulun tai yrityksen. Langattomien lähiverkkojen nopeus voi olla jopa 125 Mbit/s. Langattoman lähiverkon toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Langattoman lähiverkon toimintaperiaate. [1.]

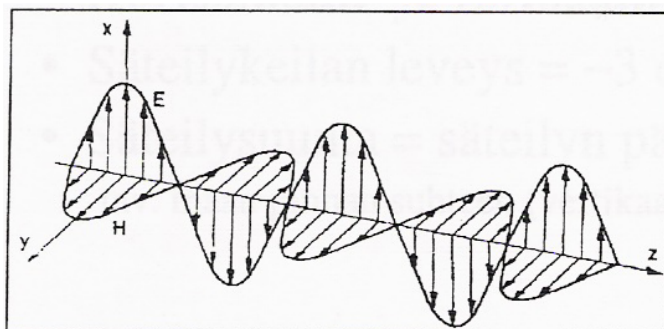
Nykyään voidaan liittää tietokoneet, tulostimet, robotit ym. laitteet langattomaan verkkoon käyttäen radioaaltoja. Useimmat verkot perustuvat radioaaltoihin, jolloin puhutaan radiolähiverkoista (RLAN = Radio Local Area Network). Radioaalto läpäisevät seiniä ja lattiaita melko hyvin. Korkeataajuiset radiosignaalit vaihtelevat huomattavasti herkemmin erilaisiin esteisiin.

Lähiverkkojen standardien kirjo on hyvin laaja. WLAN eli IEEE 802.11 ja matkapuhelimista tuttu Bluetooth toimivat ISM-taajuuskaistalla (ISM = Industrial, Scientific and Medical) 2400–2483,5 MHz, joihin ei tarvitse erillistä lupaa.

Radiolähiverkkojen lisäksi 2,45 GHz:n kaistalla toimivat mm. mikroaaltouunit ja eräät RFID-järjestelmät (RFID = Radio Frequency Identification). Häiriöiden välttämiseksi radiolähiverkoissa käytetään hajaspektritekniikkaa, joista käytetään nimityksiä DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ja FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Näillä tekniikoilla saadaan salattua radiolähettimen ja radiovastaanottimen välinen dataliikenne hajotuskoodilla tai taajuushyppelyn avulla.

## 2.1 Radioaallot

Kuvassa 2 on esitetty sähkömagneettisen aaltoliikkeen eteneminen. Radioaallot ovat sähkömagneettista värähtelyä, jossa energia etenee valon nopeudella (300 000 km/s). Informaatio liitetään radioaaltoon moduloimalla kanta-aallon taajuutta (FM-lähete) tai amplitudia (AM-lähete). Etenemistapa ja -matka vaihtelevat suuresti eri aalloilla. Signaalin kuuluvuuden laatu ja kantavuus riippuvat lukuisista tekijöistä. Yksi näistä on etäisyys. Kun ihminen puhuu, ääniaallot matkustavat ilman halki. Samalla tavalla radiolähetin ja radiovastaanotin joko lähettää tai vastaanottaa sähkömagneettisia aaltoja. [2.]



Kuva 2. Sähkömagneettinen aaltoliike. [3.]

## 2.2 Radioaaltojen vaimeneminen

Radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat monet tekijät, kuten esteet, rakennukset, pinnanmuodot ja seinät. Korkeataajuiset radiosignaalit, kuten langattoman lähiverkon käyttämä taajuus 2,4 GHz, vaimenevat voimakkaasti esimerkiksi paksuun betoniseinään toisin kuin matalataajuiset radiosignaalit. Radioaalto vaimenee sitä herkemmin, mitä suuremmalle taajuudelle mennään. Esteetön yhteys lähettimen ja vastaanottimen välillä takaa paremman toimivuuden ja kuuluvuuden, koska mikä tahansa satunnainen este voi aiheuttaa vakavia katkoja yhteyksissä.

## 2.3 Kohina

Radioyhteyttä suunniteltaessa ei riitä, että päästään tiettyyn signaalitasoon pyrittäessä kunnolliseen vastaanottoon. On vaadittava lisäksi, että signaali erottuu tarpeeksi hyvin kohinasta. Luonnossa esiintyvä häiriökenttä sekä vastaanottimessa syntyvä kohina aiheuttavat yhdessä kohinasignaalin, joka kilpailee vastaanotettavan signaalin kanssa. Kohina voidaan jakaa lähteensä perusteella seuraavasti: [4.]

- Vastaanottimessa syntyvä kohina
- Ilmakehästä ja maasta syntyvä lämpökohina
- Salamapurkausten aiheuttamat häiriöt
- Avaruudesta tuleva kohina
- Sähkölaitteiden aiheuttama kohina

Vastaanottimen oma kohina syntyy käytännössä sisäänmenopiirissä, sillä sitä vahvistetaan eniten yhtä paljon kuin vastaanotettua signaalia. Erittäin herkissä vastaanottimissa käytetään jäähdytettyä etuastetta lämpökohinan pienentämiseksi. Lähellä asutusalueita on kohinataso korkeampi sähkölaitteiden aiheuttamasta häiriösäteilystä johtuen. Kaupunkialueella tämä saattaa jopa voittaa muun kohinan UHF-alueen alapuolella. [4.]

### 3 ANTENNIT

Antenneilla lähetetään ja vastaanotetaan radioaaltoja. Langattomassa lähiverkossa antennin tehtävänä on siirtää dataa ilmateitse lähettimeltä vastaanottimelle mahdollisimman tehokkaasti.

Antenneja tarvitaan lähes kaikissa radiotekniikan sovelluksissa. Radiotaajuuksien käytön voimakas kasvu asettaa antenneille yhä tiukempia vaatimuksia. Antenneista tulee entistä pienempiä, ja niiden tulisi kattaa useampia käyttötarkoituksia. Monesti yhden antennin tulisi toimia useammalla eri taajuusalueella. Antennien rakenne vaihtelee suuresti riippuen taajuudesta ja käyttötarkoituksesta. Nyrkkisääntönä voidaan yleensä pitää sitä, että mitä suurempi taajuus on, niin sitä pienempi on antennin fyysinen koko.

On olemassa myös lukemattomia eri antennityyppejä, joita käytetään mikroaaltoalueella. WLAN-antennit ovat yleensä pysty- tai vaakapolaroituja, ja käyttökohteesta riippuen antennien säteilykuviot ovat joko ympärisäteileviä tai suunnattuja. [5.]

Antennien suunnittelussa käytetään nykyään monenlaisia eri ohjelmistoja, jotka helpottavat monimutkaisempien antennien suunnittelua. Antennien suunnitteluohjelmistot laskevat muun muassa suuntakuviot ja monimutkaiset laskuyhtälöt valmiiksi. On kuitenkin hyvä perehtyä näihin laskutoimituksiin teoriassa ja käytännössä, jotta saa jonkinlaisen kuvan näistä menetelmistä.

#### 3.1 Antennien peruskäsitteitä

Antennien yhteydessä käytetään monia peruskäsitteitä, jotka pätevät tai voidaan määritellä kaikille antenneille riippumatta niiden rakenteesta. Antennit ovat resiprookkisia. Toisin sanoen antennin ominaisuudet ovat samat lähetyksessä ja vastaanotossa. Esimerkiksi jos antenni lähettää tehoa tiettyihin suuntiin, se ottaa tehoa myös vastaan samoista suunnista. Myös yhteysvälivaimennus kah-

den erilaisen antennin välillä on sama molempiin suuntiin. Resiprookkisuus ei päde, jos antenneissa on epäresiprookkisia komponentteja, kuten ferriittikomponentteja tai vahvistimia, tai jos antennien välisellä yhteydellä on plasmaa, jossa tapahtuu Faraday-kiertymistä. [5.]

### 3.2 Antennien polarisaatio

Antenni on tavallisesti tarkoitettu toimimaan jollain tietyllä polarisaatiolla eli pääpolarisaatiolla. Jos tulevan aallon polarisaatio on sama kuin antennin polarisaatio, aalto sovituu antennaan. Muussa tapauksessa syntyy epäsovitusta, jota kuvataan polarisaatiohyötysuhteella. [5.]

Yleensä antennin suunnasta voidaan havaita, että jos antenni on pystyantenni, niin se käyttää pystypolarisaatiota, ja vaakatasossa oleva antenni taas käyttää vaakapolarisaatiota.

### 3.3 Antennin impedanssi

Aaltojohdossa etenevä teho pyritään siirtämään kokonaan antennin välityksellä vapaaseen tilaan tai päinvastoin. Käytännössä antennin impedanssi

$$Z = R + jX \tag{1}$$

poikkeaa jonkin verran aaltojohdon impedanssista, jolloin osa tehosta heijastuu epäsovituksesta takaisin. Impedanssin reaktiivinen osa syntyy, kun antennin lähikenttään varastoituu energiaa. Resisttiivinen osa muodostuu häviöiden aiheuttamasta resistanssista ja säteilyresistanssista. Antennin sisäänmenoimpedanssiin vaikuttavat myös ympäristön kohteista tulevat heijastukset. Esimerkiksi lähellä toisiaan olevien antenniryhmien elementtien keskinäisvaikutus muuttaa elementtien impedanssia verrattuna tilanteeseen, jossa elementit ovat yksinään.

Antennin kaistanleveys voidaan määrittellä taajuuskaistaksi, jolla sovitus, vahvistus, keilanleveys, ristipolarisaatio tai jokin muu suure on sallittujen rajojen sisällä.

### 3.4 Antennin sovitus

Sovituksen tarkoitus on eliminoida kuormasta heijastunut aalto. Kuormaksi voidaan käsittää paitsi piiri, johon teho aaltojohdossa kytkeytyy, myös generaattori.

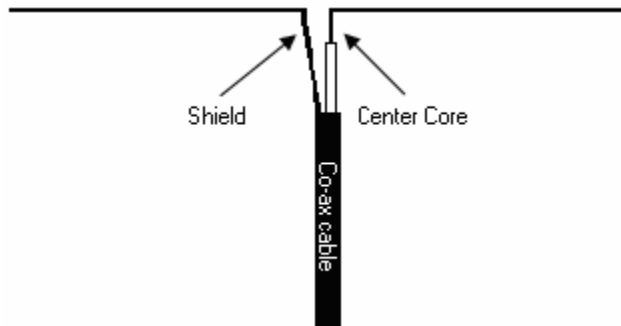
Tavallisesti kuorma sovitetaan aaltojohtoon kuorman edessä olevalla sovituspierillä, joka sisältää reaktiivisia elementtejä. Tällaisia elementtejä ovat matalilla taajuuksilla kelat ja kondensaattorit ja mikroaaltoalueella mm. oikosuljettu aaltojohdon pätkä ja aaltoputkessa oleva sovitusruuvi. Reaktiiviset elementit ovat epäjatkuvuuksia, joista syntyvät heijastukset kumoavat sovitettavan kuorman heijastukset niin, että kaikki teho siirtyy kuormaan. Neljännesaaltomuuntajalla toteutetussa sovituksessa epäjatkuvuuksia ovat äkilliset aaltojohdon muutokset. Johto voidaan sovittaa myös resistiivisesti, jolloin heijastunut aalto absorboituu. Näin kuitenkin heijastunut teho menetetään. Joskus kuorman impedanssia voidaan säätää aktiivisesti. Esimerkiksi diodi-ilmaisimen impedanssi riippuu diodin kautta kulkevasta virrasta. Valitsemalla sopiva virta voidaan sovitus optimoida.

### 3.5 Dipoliantenni

Kuvassa 3 on esitetty kaksinapainen puolen aallon dipoliantenni. Tätä antennityyppiä käytetään nykyäänkin paljon radiotekniikan eri sovelluksissa niin sanottuna yleisantennina.

Dipoliantenni koostuu kahdesta  $\frac{1}{4}\lambda$  pituisesta osasta. Osat on sijoitettu peräkkäin siten, että kun niiden väliin syötetään esimerkiksi suurtaajuustehoa, voidaan se tehdä jänniteminimin kohdalle pienimmällä systeemin hyväksymällä impedanssilla. Dipoliantennin syöttöpisteen teoreettinen impedanssi on  $73 \Omega$ ,

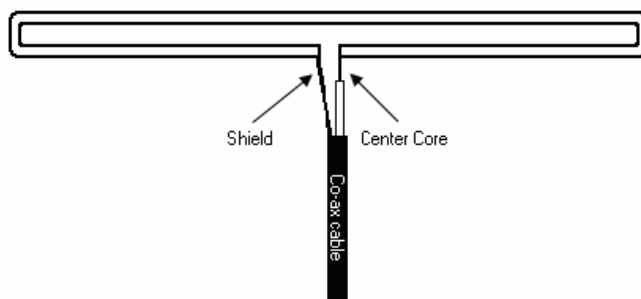
joten sitä voi syöttää suoraan  $50 \Omega$  koaksiaalikaapelilla. Dipoliantenni säteilee voimakkaimmin langan poikittaissuunnassa, ja päiden suuntaan säteilyä ei ole juuri lainkaan. Dipoliantennin vahvistus isotrooppiseen, eli joka suuntaan säteilevään säteilijään nähden on 2,14 dB. [6.]



*Kuva 3. Puolen aallon dipoliantenni.*

### 3.6 Taittodipoliantenni

Kuvassa 4 on esitetty taittodipoliantenni. Tässä antennityypissä on kaksi rinnakkaista johdinta. Se on ikään kuin lenkki, joka on litistetty. Antennin syöttöpisteen impedanssi on noin  $300 \Omega$ , joten sitä voi syöttää suoraan  $300 \Omega$  parijohdolla eli "lapamadolla" tai avolinjalla. [6.]



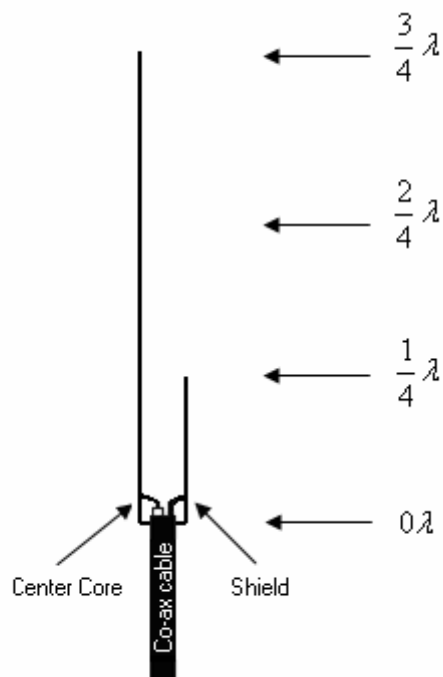
*Kuva 4. Puolen aallon taittodipoliantenni.*

### 3.7 J-antenni

J-antenni on yksinkertainen ympärisäteilevä vertikaaliantenni, jota käytetään enimmäkseen VHF- ja UHF-taajuuksilla. Se koostuu neljännesaallon mittaisesta sovitussosasta, joka ei säteile sekä puolenaallon säteilijästä.

Päästä syötetyn puolen aallon pituisen säteilijän impedanssi on suuri, tuhansia ohmeja. Sovitussosaa tarvitaan, että saadaan syöttöpisteelle haluttu impedanssi, yleensä 50 ohmia. Sen oikosuljetussa alapäässä impedanssi on nolla ohmia ja yläpäässä näkyy säteilijän impedanssi. Haluttu impedanssi löytyy näiden pisteiden välistä, käytännössä siirtelämällä syöttöpistettä ylös tai alas. [6.]

J-antenni asennetaan pystyasentoon, jolloin polarisaatio on pysty eli vertikaali ja antenni ympärisäteilevä. J-antenni on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. J-antenni.

## 4 MIKROAALTOMITTAUSTEKNIikka

Automaattisissa mittauksissa ajan ja vaivan säästö on valtava, mutta aivan ongelmattomia ne eivät kuitenkaan ole. Suunnitteluvaiheessa prototyypin mittauksessa yksinkertainen manuaalinen mittaus saattaa antaa paremman kuvan kuin automaattinen mittausmenetelmä. Automaattiset mittaukset on suunniteltava tarkoin jokaista mittausta varten. Oikean mittaustuloksen saamiseksi kalibroinnit on toistettava riittävän usein, ellei mittalaitteessa ole automaattista kalibrointi toimintoa. Tämä kaikki vaatii tekijäkseen mikroaaltomittaustekniikkaan perehtynyttä henkilöä, joka on alansa asiantuntija. [7.]

Mittauksen suunnittelu etukäteen säästää sekä aikaa että vaivaa. Seuraaviin seikkoihin kannattaa kiinnittää huomiota, ennen kuin aloittaa mittauksen. Mitä suureita tai parametreja halutaan mitata? Miten tutkittava laite tai piiri toimii, ja millainen tulos on odotettavissa? Mitä vaihtoehtoisia mittauslaitteita ja menetelmiä on käytettävissä? Mitä mittaustulos tarkoittaa, ja miten siitä lasketaan haluttu suure? Mikä on mittaustuloksen epävarmuus, ja onko tarkkuus riittävä? [7.]

### 4.1 Mittaustuloksen epävarmuus ja virhe

Mittaustulos on aina epätarkka. Näin ollen mittaustuloksen esittäminen on epätäydellistä, ellei tulokseen liitetä kvantitatiivista epävarmuutta. Ilman annettua epävarmuutta tulosten eron merkittävyyttä ei voida arvioida: ovatko tulokset todella erilaisia vai johtuuko ero vain satunnaisesta hajonnasta. [7.]

Virhe on mitatun arvon ja todellisen arvon erotus. Virhettä ei voida saada tarkasti selville. Likiarvo virheelle saadaan vertaamalla tulosta kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin kalibroitujen mittalaitteiden antamiin tuloksiin. [7.]

Mittausvirheet jaetaan satunnaisiin ja systemaattisiin virheisiin. Näiden lisäksi syntyy joskus karkeita virheitä (kuten asteikon tulkitseminen väärin), jotka on

helppo korjata. Satunnainen virhe ei pyri vaikuttamaan tiettyyn suuntaan. Se tekee tuloksen tilastollisen todennäköisyysjakaumansa puitteissa epävarmaksi. Systemaattinen virhe pyrkii aina vaikuttamaan samaan suuntaan, ja se voidaan usein osittain korjata. Esimerkiksi kun tulosta on verrattu mittanormaaliin, saadulla erotuksella voidaan korjata tuloksia jatkossa. Jako satunnaisiin ja systemaattisiin virheisiin ei ole selvä, vaan se voi riippua tilanteesta. Esimerkiksi kalibroitaessa laitetta tulokset vaihtelevat satunnaisen virheen takia. Näiden tulosten perusteella lasketaan korjauskerroin, jonka virhe on jatkossa systemaattinen, koska se vaikuttaa kaikkiin mittauksiin samalla tavalla. [7.]

## 4.2 Aaltojohdot

Mittauksissa käytetään eri komponenttien välillä aaltojohtoina yleensä koaksiaalikaapeleita aina 60 GHz:iin asti ja aaltoputkia noin 10 GHz:stä yli 1000 GHz:iin asti. [7.]

Koaksiaalikaapelit jaetaan taipuisiin ja puolijäykkiin kaapeleihin. Taipuisan kaapelin ulko- ja sisäjohtin muodostuvat punotusta kuparilangasta, joka on usein hopeoitu häviöiden pienentämiseksi. Johtimen välillä on vähähäviöistä eristettä, esimerkiksi polyeteeniä tai teflonia. Taipuisia kaapeleita käytetään tilanteissa, joissa vaaditaan toistuvaa taivuttamista, kuten laitteen testausvaiheessa. Puolijäykän kaapelin johtimet ovat kiinteitä. Kaapelia voidaan taivuttaa muutaman kerran, mutta ei kuitenkaan yli kymmentä kertaa, jotta ominaisuudet eivät heikkene. Taipuisaan kaapeliin verrattuna sillä on pienemmät häviöt ja parempi iso-laatio eli pienempi vuotosäteily. Mikäli mahdollista, tarkoissa mittauksissa tulee käyttää puolijäykkää kaapelia. [7.]

Koaksiaalikaapelin tärkeitä ominaisuuksia ovat ominaisimpedanssi, taajuusalue, häviöt ja tehonkesto. Mikroaaltomittalaitteissa käytetään lähes yksinomaan 50  $\Omega$  kaapelia. Yleisimpiä kaapelin ulkohalkaisijoita ovat 3,58 mm ja 6,35 mm. Kaapelin halkaisijan kasvaessa häviöt pienenevät ja tehonkesto kasvaa, mutta suurin käyttötaajuus pienenee. [7.]

### 4.3 TEM-aaltomuodot aaltojohdoissa

TEM-aaltomuodot (TEM = Transverse Electromagnetic) aaltojohdossa tarkoittaa sitä, että häviöttömissä ja hyvällä tarkkuudella myös vähähäviöisissä koaksiaalijohdoissa ja eräissä muissa aaltojohdoissa esiintyy aaltomuotoja, joissa sähkö- ja magneettikentillä ei ole etenemissuuntaista komponenttia. Tällaiset aaltomuodot ovat siis poikittaissähkömagneettisia aaltoja eli TEM-aaltoja. Aaltojohdoissa, joissa TEM-aalto on mahdollinen, aalto etenee valon nopeudella johdon eristeaineessa. Etenemisnopeus on taajuudesta riippumaton, eli johdossa ei synny dispersiota. [7.]

Likimääräissääntö on, että johdon keskimääräistä sädettä vastaavan kehän pituuden on oltava pienempi kuin käyttöaallonpituus. Suurilla taajuuksilla on siis käytettävä ohuita koaksiaalijohtoja, jotta varmistettaisiin se, että johdossa etenee vain TEM-aaltomuoto. Yleisin käytettävä antennijohtotyyppi on koaksiaali, joka on TEM-tyyppinen aaltojohto. [7.]

## 5 ANTENNIEN MITTAAMINEN

Monien antennityyppien ominaisuudet, kuten suuntakuvio, vahvistus ja polarisaatio, ovat laskettavissa varsin tarkasti kohtuullisella vaivalla. Antennin toiminta on kuitenkin syytä tarkistaa mittaamalla mahdollisten suunnittelu- tai valmistusvirheiden löytämiseksi. Usein mittaaminen on ainoa käytännöllinen tapa selvittää antennin ominaisuudet. Mittaamista tarvitaan myös antennin kriittisten komponenttien asettelussa paikoilleen. [7.]

Erilaisten antennien ja niiden sovellusten kirjo on laaja. Niinpä myös antennimitaustekniikka on monimuotoista. Antennin sovelluksesta riippuu, mitä ominaisuuksia halutaan tietää, mikä on taajuuskaista ja mitkä ovat tarkkuusvaatimukset. Mittaus voi olla rutiiniluonteista tai osoittautua lähes mahdottomaksi. Tarjolla on erilaisia vaihtoehtoisia mittaustaikkoja ja menetelmiä, joiden paremmuus riippuu mm. antennin koosta ja taajuudesta. [7.]

Antennin säteilemällä kentällä on paikasta ja ajasta riippuva amplitudi, vaihe ja suunta. Antennin lähellä olevalla etäisyydellä on reaktiivisen lähikentän alue, jossa kentän reaktiivinen osa on hallitseva. Tämän jälkeen on säteilevän lähikentän alue, jossa reaktiivinen osa pienenee nopeasti merkityksettömäksi ja säteilevän osan ominaisuudet riippuvat etäisyydestä. Yleensä antennit on tarkoitettu toimimaan pitkällä etäisyyksillä ja siksi halutaan mitata säteilevän kentän ominaisuudet kaukokenttäalueella, jossa kenttä pienenee kääntäen verrannollisesti etäisyyteen ja muistuttaa vastaanottoantennin luona tasoaaltoa. Tällöin suuntakuvio, vahvistus ja polarisaatio eivät riipu etäisyydestä. [7.]

Antenneja mitattaessa käytetään usein hyväksi resiprookkisusteoreemaa, jonka mukaan antennin ominaisuudet lähetyksessä ja vastaanotossa ovat samat. Näin ollen antenna voidaan käyttää lähetykseen, vaikka sitä testauksessa käytetäänkin vastaanotossa, tai päinvastoin. [7.]

## 5.1 Antennimittausten virhelähteitä

Tavallisesti antennit on tarkoitettu toimimaan pitkällä etäisyyksillä ja esteettömässä tilassa, jolloin vastaanottoantennin kohdalla on puhdas tasoaalto. Käytännössä tällainen tilanne saavutetaan antennimittauksissa vain likimäärin lyhyen mittausetäisyyden ja ympäristön vaikutusten takia. Antennimittauksille ominaisia virhelähteitä ovat kentän vaiheen ja amplitudin vaihtelu mitattavan antennin alueella, lähetys- ja vastaanottoantennin välinen kytkentä, heijastukset ympäristöstä, suuntaepätarkkuus, ilmakehän vaikutus, mittauslaitteiston epäideaalisuus ja ulkopuoliset häiriösignaalit. [7.]

Jos mittausetäisyys on lyhyt, vastaanottoantenniin saapuva palloaalto poikkeaa merkittävästi tasoallostani eli syntyy vaihevirhettä. Antennin eri osien etäisyys lähetysantennista on siis erilainen. Vaihevirheen vaikutuksesta mitattu vahvistus pienenee, sivukeilat kasvavat ja suuntakuvion minimi täyttyvät. Vaihevirheen aiheuttamat muutokset vähenevät nopeasti etäännyttäessä pääkeilasta ja ne eivät juuri ulotu ensimmäistä sivukeilaa pidemmälle. [7.]

## 5.2 Koaksiaalikaapelit

Laadukas koaksiaalikaapeli on liittimien ohella radiotaajuisten järjestelmien tärkeimpiä elementtejä. Suurtaajuusenergia kulkee sähkömagneettisena aaltona kaapelin ulko- ja sisäjohtimen välissä aallonpituudella, johon vaikuttaa käytännössä vain eristeaineen dielektrisyysvakio. Koaksiaalikaapelin ominaisimpedanssiin vaikuttavat tämän lisäksi kaapelin mitat ja muoto. [8.]

Koaksiaalikaapeleita ostettaessa ja käytettäessä ei aina tulla ajatelleiksi, kuinka suuria eroja eri kaapelien välillä voi olla. Eri kaapelityyppien vaimennus kahden gigahertsin taajuudella saattaa vaihdella 0,1:n ja kahden desibelin välillä. Pahimmassa tapauksessa jo muutaman metrin pituinen kaapeli saattaa näin vaimentaa lähetetyn RF-tehon lähes kokonaan. Suuremmissa taajuuksissa vaimennusilmiö vielä korostuu entisestään. [8.]

### 5.3 Liittimet

Radiotaajuisten signaalien siirrossa koaksiaaliliittimet saattavat tuntua itsestään selvältä pikkuasialta, mutta taajuuksien kasvaessa myös vaatimukset kasvavat ja liitinongelmat korostuvat. Gigahertsialueelle siirryttäessä liittimistä voi tulla koko siirtoketjun heikoin lenkki. RF-liittimien valikoimaa kuitenkin on syytä tarkastella, sillä niiden laatu ja hinnat vaihtelevat suuresti. [9.]

Kuvassa 6 on esitetty SMA-liitin, joka on yksi kaikkein yleisimpiä RF-liitintyyppiä. Tätä liitintyyppiä käytetään monenlaisissa sovelluksissa erittäin usein myös WLAN-antenniliittiminä. Se on todella yleinen liitin varsinkin koaksiaalikaapelien päähän asennettuna. SMA-liittimen maksimikäyttötaajuus on 34 GHz. [9.]



*Kuva 6. Tyypillinen langattomassa lähiverkossa käytettävä SMA-liitin. [10.]*

Gigahertsien taajuudella energia ei enää siirry virtoina ja jännitteinä, vaan sähkö- ja magneettikenttinä. Monien tavallisten koaksiaalitiimien spesifikaatioissa ei liittimien toimintaa ole lainkaan määritelty gigahertsialueella, tai WLAN-sovelluksissa liikutaan aivan niiden toimintataajuuksien ylärajoilla. Samoin joidenkin koaksiaalikaapelityyppien hallittua toimintaa ei ole lainkaan määritelty ja joidenkin tyyppien kohdalla ollaan toimintataajuuksien ylärajoilla. [9.]

Monet pienillä taajuuksilla vähäpätöiset asiat alkavatkin gigahertsialueella vaikuttaa jopa hyvin voimakkaasti. Esimerkiksi sovitus selvästi heikkenee, jolloin kaikki RF-teho ei etenekään, vaan yhä suurempi osa heijastuu takaisin. Vaimennus puolestaan saattaa kasvaa jyrkästikin jopa useisiin desibeleihin (3 dB:n

vaimennus syö jo puolet tehosta!). Samoin vuototehot alkavat kasvaa ja häiriönsieto saattaa heiketä huomattavasti. [9.]

Taulukossa 1 on esitetty tärkeimpiä koaksiaalikaapelien ominaisuuksia kolmelle eri RF-kaapelityypille ja kahdelle mikroaaltokaapelille. Kaapelit on varustettu SMA-liittimin. Kaapelityypeiksi on valittu laajasti käytettävä yksivaippainen RG 58, kaksivaippainen RG 223, teflonpohjainen kaksivaippainen RG 400 ja mikroaaltokaapeleiksi Suhnerin Sucoflex 104 ja Utiflex UFA210A/B. Kuvassa vertailaan eri yhdistelmien seisovan aallon suhdetta (SWR = Standing Wave Ratio) eli siirtolinjassa etenevän tehon suuruutta heijastuvaan jäävään tehoon. [9.]

Kaapelien vaimennus voi olla GHz-alueella jopa noin 1 dB/m. Kolmen metrin antennikaapeli voi pudottaa tehon jo puoleen eli noin 3 dB. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kaapelin aiheuttama vaimennus kolmen metrin pätkällä pudottaa tehon puoleen.

*Taulukko 1. Eri kaapeleiden tärkeimmät ominaisuudet SMA-liittimin [9.]*

Ominaisuus	Kaapelityyppi				
	RG8C/U	RG223/U	RG400/U	Sucoflex 104	UFA210A/B
Maksimitaajuus	1 GHz	5 GHz	5 GHz	18 GHz	18 GHz
Vaimennus GHz-alueella	0,9 dB/m	0,8 dB/m	0,8 dB/m	0,35 dB/m	0,3-0,4 dB/m
Suojaus 300 MHz/1 GHz	35 dB/ei määritetty	35 dB/ei määritetty	Ei määritetty	Yli 90 dB/yli 90dB	Yli 100 dB/yli 100 dB
Vaihevakaas	Ei määritetty	Ei määritetty	Ei määritetty	Ei määritetty	3/2°/m
Lämpötila	-40...+70°C	-40...+70°C	-100...+200°C	-55...+165°C	-65...+165°C

Kaapeliin syötetyn 2,4 GHz:n taajuuden RF-tehon ja antennista saatava teho voi vaihdella jopa satoja prosentteja valitusta kaapelista ja siihen kytketyistä liittimistä riippuen. [9.]

#### 5.4 Suuntakytkimet

Tehonjakajat, suuntakytkimet ja hybridit ovat komponentteja, joilla yhteen porttiin tuleva teho voidaan jakaa kahteen tai useampaan porttiin. Vastaavasti niillä voidaan yhdistää tehot yhteen porttiin. Näiden käyttökohteita ovat myös näyteen tehon kytkeminen aaltojohdosta tehon mittaamista tai automaattista tasonsäätöä varten, kuormaa kohti etenevän ja siitä heijastuneen aallon erottaminen

impedanssin mittauksessa. Suuntakytkimellä pystyy erottamaan aaltojohdossa positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan etenevät aallot toisistaan. [7.]

Suuntakytkimellä voidaan ottaa tunnetun suuruinen näyte etenevästä tehosta. Suuntakytkimiä käytetään reflektometreissä ja piirianalysointilaitteissa heijastuskertoimen mittaukseen, etenevän tehon seurantaan ja säätöön sekä tehon mittaukseen, kun ei haluta häiritä johdossa etenevää tehoa tai on alennettava tehotaso mittalaitteelle sopivaksi. [7.]

## 6 TYÖN SUORITUS

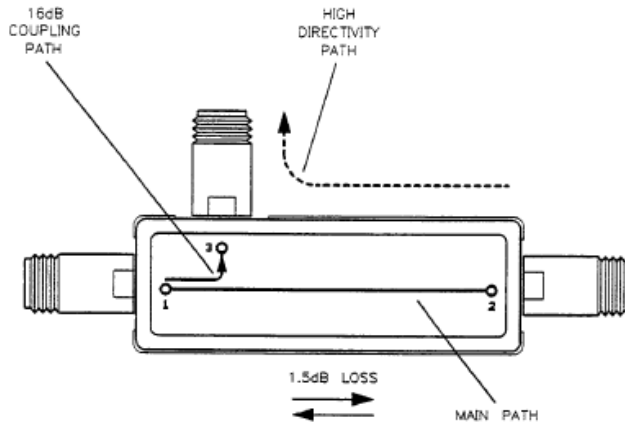
Sunit Oy:n valmistamiin ajoneuvotietokoneisiin saa asiakkaan toivomuksesta mini-PCI-korttipaikkaan liitettävän WLAN-kortin, joka on esitetty kuvassa 7. Tämä WLAN-kortti on Intelin valmistama ja käyttää 802.11 b/g -standardia ja toimii 54 Mbit/s nopeudella. Tässä insinööriyössä on tarkoitus tutkia, mikä on sopiva antenni näihin ajoneuvotietokoneisiin. Antennin olisi ehkä paras olla ikkuna-antenni, jotta ajoneuvoihin ei tarvitsisi porata ylimääräisiä reikiä esimerkiksi kattorakenteisiin, vaan se voitaisiin kiinnittää helposti ikkunaan tai johonkin muuhun sopivaan paikkaan tarran avulla.

Tähän Intelin valmistamaan WLAN-korttiin kytketään kaksi antennia, joista toinen on yhdellä kertaa käytössä. Kortissa oleva kytkin vaihtaa käyttöönsä sen antennin, jonka kuuluvuus on parempi. Tätä kutsutaan myös diversity-vastaanotoksi, joka takaa luotettavamman toiminnan.



*Kuva 7. Intel PRO/Wireless 2200BG mini-PCI WLAN-kortti. [11.]*

Antennimittaukset tehtiin Kajaanin ammattikorkeakoulun RF-laboratoriossa. Mittauksissa käytettiin koululle hankittua Agilentin suuntakytkintä, joka on esitetty kuvassa 8. Suuntakytkimen porttiin yksi kiinnitetään mitattava laite eli tässä tapauksessa WLAN-antenni. Porttiin kaksi kytketään antennille syötettävä signaali eli Agilent E4438C vektorisignaali-generaattori. Porttiin kolme kytketään mittalaitte, jolla antennin tehokkuutta tulkitaan, eli Agilent E4407B -spektrianalysaattori.



Kuva 8. Agilent 86205A -suuntakytkin. [12.]

### 6.1 Antennien mitoitus ja mittaustulokset

Tutkimisen kohteena ovat aikaisemmin esitetyt antennityypit, jotka ovat J-antenni, puolen aallon dipoliantenni ja taittodipoliantenni. Näiden antennien tehokkuuksia mitataan Kajaanin ammattikorkeakoulun RF-laboraation (Agilent) mittalaitteiden avulla.

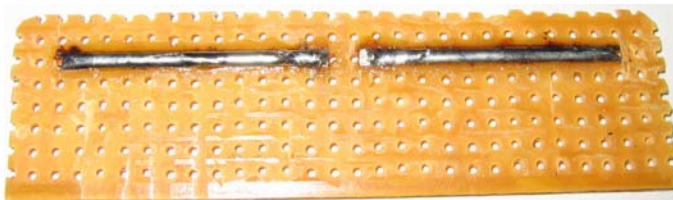
Antennien aallonpituudeksi saadaan 0,125 m, koska WLAN käyttää noin 2,4 GHz taajuutta. Puolen aallon dipoliantenni koostuu kahdesta neljännesaallon mittaisesta osasta. Näin saadaan antennin molemmanpuolen pituudeksi 3,13 cm kaavalla

$$\frac{1}{4} \lambda = 0,25 * 0,125m = 3,13cm . \quad (2)$$

Käytännössä tämän tulee olla hieman vähemmän, koska radioaalto kulkee metalleissa hitaammin kuin ilmassa. Tavanomaisen koaksiaalikaapelin nopeuskerroin on 0,66 eli mitä pienempi luku on, sitä hitaammin aalto siinä kulkee.

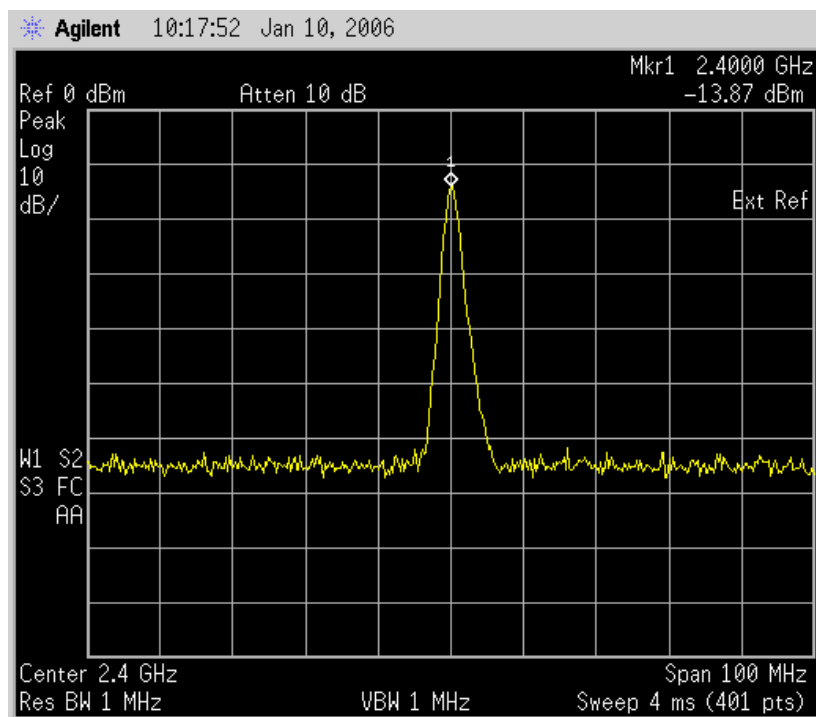
Puolen aallon dipoliantenni on yksi yleisimmistä antenneista, jota käytetään monissa sovelluksissa. Se on hyvä, helppo ja edullinen valmistaa. Suorituskyvyltään puolen aallon dipoliantenni on vähintään yhtä hyvä kuin tukiasema-antenneissa yleensä käytettävä pystysuora antenni. Dipoliantenni on hyvä vaa-

kapolarisaatiossa ja korkeammilla GHz-taajuuksilla myös pystypolarisaatiossa, koska antennin koko on silloin niin pieni. Antennin syöttökohta on keskellä, toiselle puolelle liitetään antennikaapelin syöttöjohdin ja toiselle puolelle maajohdin. Kuvassa 9 on esitetty mittauksessa käytetty puolen aallon dipoliantennin prototyyppi.



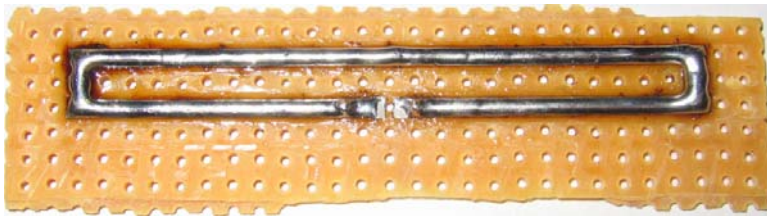
Kuva 9. Puolen aallon dipoliantenni.

Kajaanin ammattikorkeakoululla tehdyissä antennimittauksissa, käytettiin Agilentin suuntakytkintä. Suuntakytkimeen syötettiin Agilentin funktiogeneraattorilla 2,4 GHz taajuista signaalia. Suuntakytkimeen on liitetty myös mitattava anteni. Suuntakytkimeen syötetyn signaalin teho oli 14 dBm. Kuvasta 10 näkyy antennista mitattu heijastuva teho -13,9 dBm.



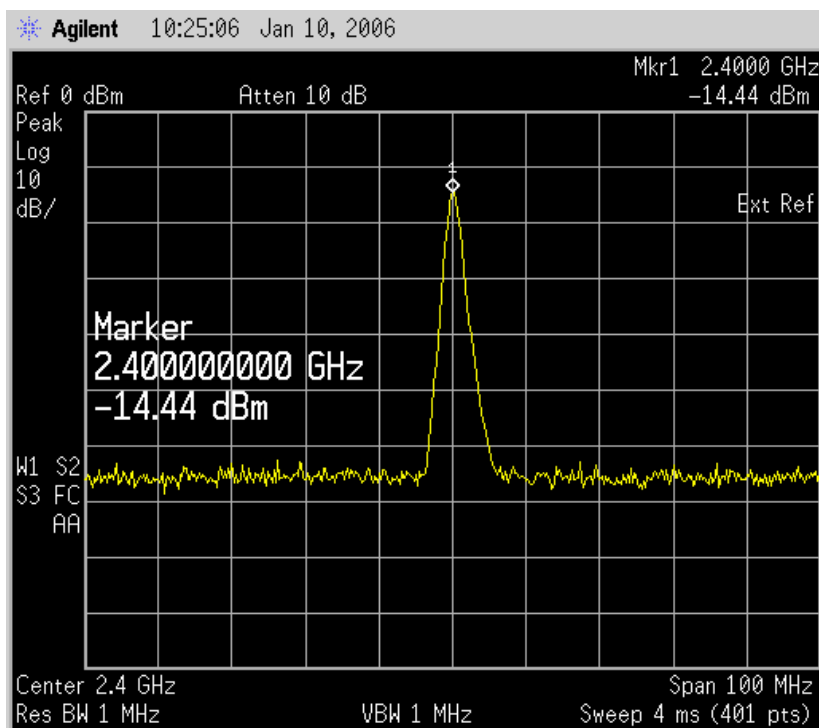
Kuva 10. Dipoliantennista mitattu teho.

Seuraavaksi mitattiin taittodipoliantennin tehokkuus 2,4 GHz taajuisella ja 14 dBm tehoisella signaalilla. Taittodipoliantennin sivujen pituus on noin 6,26 cm, koska antenni koostuu kahdesta puolen aallonpituuden osasta. Syöttökohta on antennin keskellä. Mittauksessa käytetty antenniprototyyppi on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Taittodipoliantenni.

Taittodipoliantennista heijastuvaksi tehoksi mitattiin -14,4 dBm, joten sen teho ei yllä samalle tasolle puolen aallon dipoliantennin kanssa. Tämä johtuu osittain myös siitä että antennin sovitus ei ole  $50 \Omega$ . Taittodipoliantennin mitattu teho on esitetty kuvassa 12.



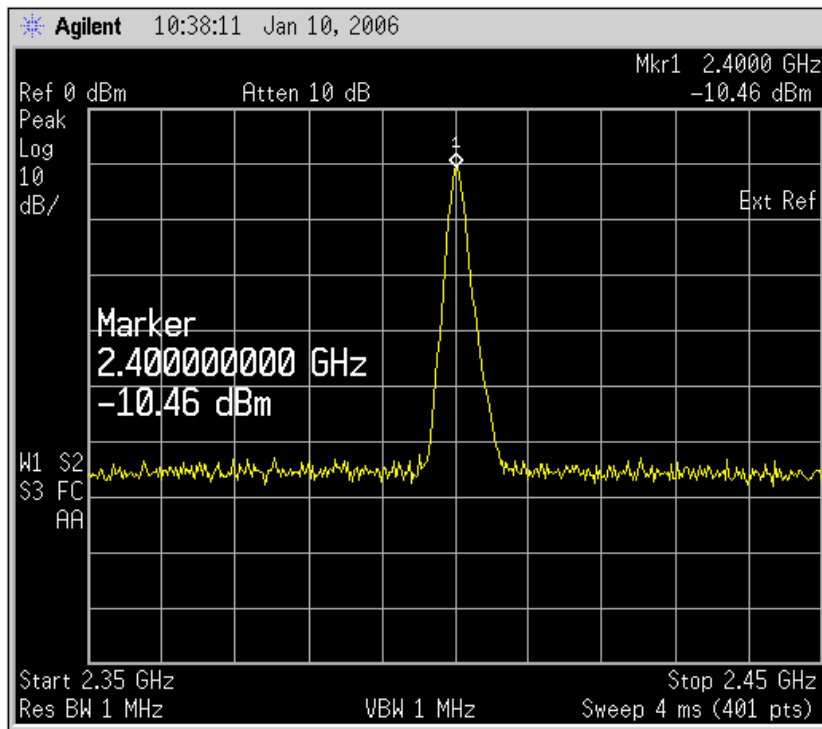
Kuva 12. Taittodipoliantennin mitattu teho.

Kolmas mitattava antennityyppi oli J-antenni. J-antenni koostuu  $\frac{3}{4}\lambda = 9,38\text{cm}$  pituisesta osasta ja  $\frac{1}{4}\lambda = 3,13\text{cm}$  pituisesta osasta. J-antenni on erittäin hyvä antennityyppi. J-antenniin kiinnitetään 50 ohmisen kaapelin kuumakarva  $\frac{3}{4}\lambda$  pituiseen osaan ja maadoitus karva  $\frac{1}{4}\lambda$  pituiseen osaan. Antennin sovitusta saadaan suunnilleen 50 ohmiseksi kiinnittämällä antennin syöttöjohto muutama millimetri antennin alatasosta ylöspäin. Tämä voidaan todeta, kun mitataan antennista heijastuvaa tehoa ja siirretään syöttökohta hieman eri kohtiin. Sitä paremman tuloksen saa, mitä alemmaksi syöttöjohto on kiinnitetty antenniin ei kuitenkaan liian alas. J-antennin prototyyppi on esitetty kuvassa 13.



*Kuva 13. J-antenni.*

J-antennista heijastuvaksi tehoksi mitattiin -10,5 dBm. Tämä johtuu osittain myös siitä, että antennin sovitusta ei ole mahdollista saada tarkkaan juuri 50 ohmiseksi. J-antennin mitattu teho on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. J-antennin tehon kuvaaja.

## 6.2 J-antennin mittaustuloksen analysointi

J-antenni on näistä kolmesta antennityypistä paras ominaisuuksiltaan, joten tarkastelun kohteena käytetään ainoastaan J-antennia. J-antenni on ympärisäteilevä ja helppo myös valmistaa. Myös antennin koko on 2,4 GHz taajuusalueella pieni ja se on helppo asentaa hankaliinkin paikkoihin.

Seuraavana esiintyvät kaavat perustuvat 50 ohmiseen järjestelmään [13]. Näin antennista heijastuvaksi tehoksi saadaan -10,5 dBm eli 90  $\mu$ W, joka on laskettu kaavalla

$$dBm = 10 \cdot \text{Log}_{10} \left( \frac{P}{0,001W} \right) = 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{90 \mu W}{1mW} \right) = -10,5 dBm . \quad (3)$$

Jatkuvan jännitteen tulokseksi saadaan 67,1 mV, joka on laskettu kaavalla

$$V_{RMS} = \sqrt{P \cdot 50\Omega} = \sqrt{90\mu W \cdot 50\Omega} = 67,1mV . \quad (4)$$

Huipusta huippuun jännitteen arvoksi saadaan laskettua 0,19 V kaavan

$$V_{P-P} = V_{RMS} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 67,1mV \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 0,19V \quad (5)$$

avulla.

Antennista heijastuvan jännitteen arvoksi saadaan desibeleissä 16,5 dBmV, joka on laskettu kaavalla

$$dBmV = 20 \cdot \text{Log}\left(\frac{V_{RMS}}{10mV}\right) = 20 \cdot \text{Log}\left(\frac{67,1mV}{10mV}\right) = 16,5dBmV . \quad (6)$$

### 6.3 Saavutetut tulokset

J-antenni on tehokkuudeltaan parhain mahdollinen mitatuista antennityypeistä. Antenni on myös ympärisäteilevä, joten sen peittoalue voi kattaa esimerkiksi suuren teollisuushallin hyvin. Huonona puolena siinä voidaan pitää kuitenkin antennin impedanssia, joka on tuhansia ohmeja. J-antennin sovitusta saadaan lähes 50-ohmiseksi asentamalla syöttöjohdin tai liitin mahdollisimman alas antenniin. Sovituksen kannalta puolen aallon dipoliantenni on taas erinomainen, koska sen teoreettinen impedanssi on 73 ohmia. Näin antennin syöttö onnistuu helposti tavanomaisella 50 ohmin kaapelilla ja antennin sovitusta ei tarvitse miettiä sen enempää.

Työn tarkoitus oli löytää tehokkuudeltaan paras antenni, eikä J-antennin sovitukseen ole ongelma.

## 7 YHTEENVETO

Insinööriyössä oli tarkoitus tutkia, mikä olisi tehokkain WLAN-antenni Sunit Oy:n valmistamiin ajoneuvotietokoneisiin. Tässä työssä oli tarkoitus kerätä tietoja vaihtoehtoisista antennityypeistä ja tutkia niitä. Lopulta päädyttiin tarkastelemaan kolmea eri antennityyppiä, ja näistä valittiin tehokkuudeltaan paras antenni. Mitatuista antenneista J-antenni osoitti olevansa ominaisuuksiltaan huomattavasti parempi muihin verrattuna.

Työssä onnistuttiin löytämään käyttökelpoinen ratkaisu Sunitin ajoneuvotietokoneisiin. Jatkokehittelyä varten antennin valmistusmateriaaleja olisi syytä miettiä. Huolellisella antennin sovituksella antennin tehokkuutta voidaan vielä hiukan parantaa. On myös syytä miettiä, miten toteuttaa antennin liitin, koska sillä on suuri merkitys antennin tehokkuutta ajatellen.

Työssä joutui perehtymään antenniteoriaan ja radiotekniikkaan sekä teorian että käytännön pohjalta. Työ oli erittäin mielekäs ja mielenkiintoinen toteuttaa, sekä työlle asetetut tavoitteet saavutettiin.

## LÄHDELUETTELO

- 1 Microsoft, luettu 25.2.2006 [WWW-dokumentti]  
<http://www.microsoft.com/technet/itsolutions/msit/deploy/wirelesslantcs.aspx>
- 2 Datasiiro, syksy 2000, luettu 12.11.2005 [WWW-dokumentti]  
<http://www.cc.jyu.fi/~sajuutin/datasiiro/>
- 3 Heino, J. Siirtojohto- ja antenniteoria luentokalvoja versio 2, 2003
- 4 Lindell, I. Radioaaltojen eteneminen. Helsinki: Otatieto, 1985. ISBN 951-672-227-X
- 5 Lehto, A. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto, 2003. ISBN 951-672-337-3
- 6 Wikipedia, luettu 15.11.2005 [WWW-dokumentti]  
<http://wiki.ham.fi/Luokka:Antennit>
- 7 Lehto, A. Mikroaaltomittaustekniikka. Helsinki: Otatieto, 1991. ISBN 951-672-318-7
- 8 Saarinen, P. Radioverkkojen valtimot: Prosessori: 5/2005.
- 9 Saarinen, P. Koaksiaaliliittimien tärkeys korostuu: Prosessori: 3/2005.
- 10 Suomen radioamatööritarvike, luettu 11.2.2006 [WWW-dokumentti]  
<http://www.srat.fi/hinnasto/s/sma-58.shtml>
- 11 Intel, luettu 19.11.2005 [WWW-dokumentti]  
<http://support.intel.com/support/wireless/wlan/pro2200bg/>
- 12 Agilent 86205A Directional Bridge Operating and Service Manual. Malaysia: Agilent Technologies, 1992.
- 13 The ARRL Handbook For Radio Communications 2004. ARRL—the national association for Amateur Radio Newington, CT 06111 USA. ISBN 0-87259-196-4