Leinonen Pasi

RADIOVERKOT JA TESTAUS

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikka ja liikenne
Tietotekniikan koulutusohjelma
Helmikuu 2015

KAJAANIN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ
TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Leinonen Pasi	
Työn nimi Radioverkot ja testaus	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Ajoneuvojen tietojärjestelmät	Toimeksiantaja Elektrobit Wireless Oy/ Pekka Huttunen
Aika 15.4.2014 – 3.2.2015	Sivumäärä ja liitteet 42

Tämän insinöörityön tavoitteena oli toteuttaa tietopaketti langattoman tiedonsiirtojärjestelmän testaamisen tueksi. Työ tarjoaa perustietoa itse radioverkoista ja -signaaleista ja antaa lukijalle tietopohjaa ja ymmärrystä radioverkkojen testaamiseen. Työ sisältää kattavan osan itse langattomista signaaleista, niiden voimakkuuksista, etenemisestä vapaassa ilmanalassa sekä erilaisista modulaatioista.

Yksi langattomien tiedonsiirtojärjestelmien haasteista on niiden testaaminen kenttäolosuhteissa. Toisin kuin laboratoriotesteissä, kenttätestaamisessa ei saada ikinä ideaalista testiympäristöä tai samankaltaista toistettavuutta olosuhteisiin. Sää sekä muut ympäristötekijät voivat muuttua merkittävästi yhden päivän aikana. Työssä selitetyt asiat auttavat ottamaan tekijät huomioon sekä ehkäisemään muista syistä johtuvia, testeihin merkittävästi vaikuttavia asioita.

Elektrobit Wireless Oy suunnittelee ja tuottaa langattomia järjestelmiä. Yksi niistä on EB Tactical Wireless IP Network (TAC WIN) -järjestelmä. Sen testikokemuksia käytettiin pohjana työhön.

Työn lopputuloksena syntyi materiaali, joka antaa perustietoa langattomista järjestelmistä sekä auttaa ymmärtämään ja ennaltaehkäisemään mahdollisia testauksessa vastaan tulevia epäkohtia.

Kieli	Suomi
Asiasanat	Radioverkot, testaus, kenttätestaus, modulaatio, konstellaatio
Säilytyspaikka	☒ Verkkokirjasto Theseus ☐ Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

KAJAANIN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS ABSTRACT

School	Degree Programme
Engineering	Information Technology
Author(s) Leinonen Pasi	
Title Radio Networks and Testing	
Optional Professional Studies Vehicle Information Systems	Commissioned by Elektrobit Wireless Oy/ Pekka Huttunen
Date 15.4.2014 – 3.2.2015	Total Number of Pages and Appendices 42

The aim of this thesis was to compile an information package about wireless communication systems to support testing. This work contains basic information about radio networks and signals and it provides the reader with the knowledge and understanding for testing of wireless communication systems. The work covers a comprehensive foundation of wireless signals, their magnitudes, progression-free environments, as well as a variety of modulations.

One of the challenges of wireless communication systems is testing in field conditions. In contrast to laboratory tests, in field testing you will never get the ideal test environment or similar repeatability of conditions. Weather and other environmental factors can change substantially even during one day. The issues explained in this thesis will help one to take the factors into account, and to prevent other issues which may produce a significant influence concerning testing.

Elektrobit Wireless Communications Ltd. develops and produces a variety of wireless solutions, one of them is the EB Tactical Wireless IP Network (TAC WIN) -system. Test experiences concerning the system were used as a basis for this thesis.

The final result of this thesis is a material that provides basic information about the wireless systems, and it also helps the reader to understand and prevent potential threats against incorrect test results.

Language of Thesis	Finnish
Keywords	Radio networks, testing, field testing, modulation, constellation
Deposited at	☒ Electronic library Theseus ☐ Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Ammattikorkeakoulun opetussuunnitelmaan tekniikan alalla kuuluu opinnäytetyön eli insinöörityön tekeminen. Keväällä 2012 hain Elektrobit Wireless Oy:lle kesätöihin Kajaanin toimipisteelle. Jo haastattelussa tuli ilmi mahdollinen opinnäytetyön tekeminen työn kuvaani liittyen.

Töiden jatkuessa opinnäytetyön tulevaksi aiheeksi selkiytyi jokin testaamiseen syventyvä ja sitä tukeva työ. Myöhemmin, omista kokemuksista viisastuneena, tietopaketti radioverkoista ja testaamisesta sekä testaamisen suunnittelua helpottavasta ohjeistuksesta valikoituivat hyviksi työn aiheiksi.

Haluan kiittää Elektrobit Wireless Oy:stä Pekka Huttusta, joka tuki minua ohjeistamalla testauksien suorituksessa sekä työn rungon suunnittelussa. Suuri kiitos myös muille, jotka ovat työn kanssa auttaneet. Kiitokset erityisesti Elina Nisulalle joka kannusti tämän työn tekemisessä, sekä Tinja Paavosepälle, joka auttoi oikolukemisessa.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 1

2 RADIOTEKNIIKKAA 2

2.1 Historia 3

2.2 Radiotaajuudet 3

2.3 UHF – SHF 5

2.4 Radiosignaalien eteneminen 5

2.4.1 Fresnelin vyöhyke (Fresnel Zone) 8

2.4.2 RSSI & CINR 8

2.4.3 Sään sekä muiden ympäristötekijöiden vaikutus 9

3 EB TACTICAL WIRELESS IP NETWORK (TAC WIN) 10

3.1 Taktinen Reititin (TR) 10

3.2 Radioyksikkö RH- I 11

3.3 Radioyksikkö RH-III 11

3.4 Radioyksikkö RH-IV 11

4 VERKKOTOPOLOGIAT 12

4.1 Topologioiden käyttötavat 13

4.2 Linkki ja Mesh-verkot ja niiden erot 13

5 LANGATTOMAT VERKOT 14

5.1 Mobile ad hoc Network 14

5.2 Yleisimmät modulaatiot 15

5.3 Phase-shift keying (PSK) 15

5.3.1 Binary phase-shift keying (BPSK) 16

5.3.2 Quadrature phase-shift keying (QPSK) 16

5.4 Quadrature amplitude modulation (QAM) 17

5.4.1 16QAM ja 64QAM 17

5.5 Modulaation havainnollistaminen konstellaatiokuvaajalla 18

5.5.1 Kanavakoodaus 19

5.5.2 Bit Error Rate (BER) 20

5.6 Antennit VHF - SHF-verkoissa 21

5.7 Ympärisäteilevä (suuntaamaton) antenni 22

5.8 Paneeli- ja paraboliantennit 23

5.9 Masto- ja mobiilitukiasema-asennukset 23

6 RADIOVERKKOMITTAUKSET JA LAITTEISTO 25

6.1 Kenttätestit 25

6.2 Laitteisto 25

7 EPÄVARMUUSTEKIJÄT 26

7.1 Laitteiston kalibrointi 26

7.2 Kaapelointi 26

7.3 Tiedonsiirron kapasiteetti 28

7.4 Eri protokollien käyttö ja erot tiedonsiirrosta (TCP & UDP) 28

7.5 Paikkaepävarmuus 29

8 SUORITUSKYVYN MITTAAMINEN SEKÄ DOKUMENTOINTI. 30

8.1 Riittävät mittaukset suorituskyvyn todistamiseen 31

8.2 Mittausjärjestelyt 32

8.3 Mittauksien dokumentointi ja esittäminen 32

8.4 Tehokkaat esitystavat 32

8.4.1 Microsoft Excel 33

8.4.2 Matlab 33

8.5 Sääasemat ja säätiedon tallentaminen 34

9 TESTIEN TOISTETTAVUUS 36

9.1 Tulokset 36

9.2 Epätarkkuuksien estimointi 36

10 PARANNUSEHDOTUKSET 38

11 YHTEENVETO 39

LÄHTEET 40

KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

AM	Amplitude Modulation
BER	Bit Error Rate
CINR	Carrier-to-Interference-noise Ratio
dB	Desibeli
dBm	Teho suhteessa 1 mW (milliwatin) tehoon
DC	Direct Current
FM	Frequency Modulation
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
Hz	Hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MIMO	Multiple-Input and Multiple Output
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NMEA	National Marine Electronics Association
P2P	Point-to-point
P2MP	Point-to-multipoint
PC	Personal Computer
PSK	Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SHF	Super High Frequency
TAC WIN	Tactical Wireless IP Network

TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time-division duplexing
VANET	Vehicle Ad-hoc Network
VHF	Very High Frequency
UDP	User Datagram Protocol
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTC	Coordinated Univeral Time
WGS84	World Geodetic System 84
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	eXtensible Markup Language

1 JOHDANTO

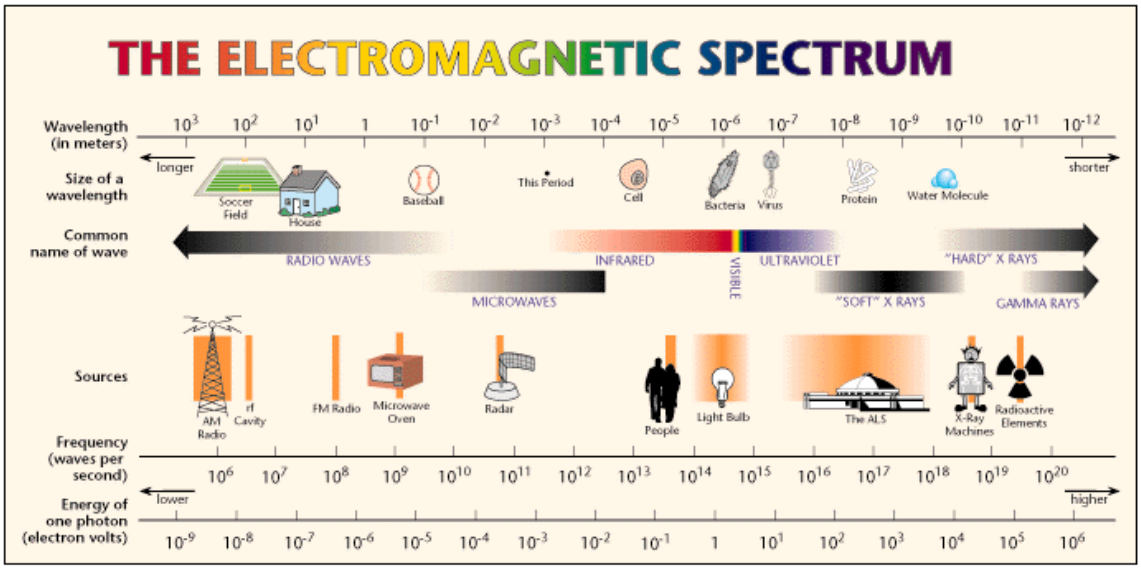
Elektrobit Oyj on oululainen yritys, joka on erikoistunut langattomiin järjestelmiin sekä ajoneuvosovelluksiin. Langattomien järjestelmien puolella se toimii nimellä Elektrobit Wireless Communications Oy.

Työskentelin Elektrobit Wireless Communications Oy:n Kajaanin toimistolla nuorempana testaajana ajalla toukokuu 2012 – maaliskuu 2014 monipuolisissa tehtävissä. Merkittävä osa työnkuvaani oli kenttätestauksien suunnittelu ja toteuttaminen. Testaamisien tueksi mietittiin yleistä testaustutkimusta joka nähtiin hyväksi insinöörityön aiheeksi. Testaussuunnitelma auttaa ottamaan huomioon sekä havaitsemaan mahdollisia ongelmia ja virheitä yleisissä asennuksissa. Työn yleinen osio auttaa tiedollaan ottamaan huomioon luonnollisista muuttujista aiheutuvia ongelmia sekä lopulta valmistelemaan toimiva ja luotettava testausympäristö.

2 RADIOTEKNIIKKAA

Radiotekniikalla eli radioverkoilla ja -aalloilla tarkoitetaan elektromagneettisilla aalloilla tapahtuvaa tehon tai informaation lähettämistä. Tehonlähetys perustuu kolmivaiheiseen prosessiin, jossa: 1) DC-teho muutetaan RF-tehoksi, 2) RF-teho lähetetään ilmateitse johonkin pisteeseen ja 3) teho kerätään ja muutetaan takaisin DC-tehoksi). Prosessi vaatii siihen tarkoitetun lähettimen sekä vastaanottimen, jotka ovat olleet kehityksen kohteena koko langattoman lähetyksen historian ajan. [1.]

Elektromagneettisia aaltoja ilmenee käytännössä kaikkialla maailmankaikkeudessa, ja niitä käyttävät hyvin monet erilaiset laitteet sekä järjestelmät. Erilaiset ilmiöt ilmenevät aina tietyillä aallonpituuksilla, jotka sijoittuvat eri kohtiin elektromagneettista spektriä (kuva 1). Monien nykyajan laitteiden toimintaperiaate perustuu kyseisiin aaltoihin; radiot, mikroaaltouunit, kauko-ohjattavat laitteet, televisiolähetykset sekä lukemattomat muut laitteet ja järjestelmät. Radioaallot sijoittuvat spektrissä niin sanottujen pidempien aaltojen joukkoon. [2, 3.]



Kuva 1. Elektromagneettinen spektri [3.]

2.1 Historia

Alkukantaisissa järjestelmissä radioaalloilla lähetettiin lyhyillä yhteysväleillä yksinkertaista informaatiota, kuten esimerkiksi morsemerkkejä.

Nykyään radioverkot pystyvät monipuoliseen lähetykseen, musiikin, kuvien sekä laajakaistaiseen tiedonsiirtoon. Lisäksi samalla lähetysteholla tapahtuvan tiedonsiirron yhteysvälit ovat kasvaneet ja siirrettävän informaation määrä on kasvanut, eli järjestelmät ovat huomattavasti energiatehokkaampia kuin ennen.

Heinrich Hertz oli ensimmäinen, joka sai käytännössä toimimaan James Clerk Maxwellin jo 1860-luvulla tekemät tieteelliset teoriat elektromagneettisiin aaltoihin liittyen. Nykyaikainen tehonlähetys ilmateitse radioaalloilla perustuu Hertzin aikaisiin tutkimuksiin 1880-luvulla.. Tuolloin Hertz toteutti eräänlaisia kipinätestejä joilla hän mallinsi korkeataajuisien elektromagneettisten aaltojen etenemistä ja niiden havaitsemista vastaanottavassa päässä. Hän käytti molemmissa päissä parabolisia heijastimia, jotka ovat nykyään hyvin yleisiä elementtejä antennikäytössä. Hertz ei kuitenkaan nähnyt käyttöä keksinnöilleen ja jätti radion varsinaisen patentoinnin sikseen.

Uranuurtajina ja keksijöinä varsinaisessa langattomassa teknologiassa pidetään myöhäisempiä henkilöitä. Guglielmo Marconi oli italialainen fyysikko, joka sai kunnian ja patentin varsinaisesta radion keksimisestä. Samoihin aikoihin vastaavia tutkimuksia ja testejä teki myös Nikola Tesla, jota pidetään lahjakkaimpana edelläkävijänä langattoman tehonlähetyksen saralla. Hän myös teki vastaavia patenttihakemuksia kuin Marconi, muttei saanut itse langattoman radion patenttia haltuunsa. Myöhemmin vuonna 1943 USA:n korkein oikeus päätti asian Teslan eduksi ja antoi radiotekniikan patentit Teslalle postuumisti Marconin sijaan. [1,2.]

2.2 Radiotaajuudet

Radiotaajuusnimitykset on määritetty taajuusalueiden mukaan, ja niistä puhuttaessa käytetään yleisesti kirjainlyhenteitä (taulukko 1). Esimerkiksi VHF-alueella ovat FM-radio sekä maanpäälliset televisiolähetykset. TAC WIN -järjestelmän radiot käyttävät taajuuksia, jotka määrittyvät VHF-SHF-taajuuksille alueelta 225-5000 MHz.

Taulukko 1. Radiotaajuusalueet ja niiden määritteet [4.]

Lyhenne		Taajuusalue	Aallonpituus
ELF	Extremely Low Frequency	3-30 Hz	100 000-10 000 km
SLF	Superlow Frequency	30-300 Hz	10 000-1 000km
ULF	Ultralow Frequency	300-3000 Hz	1 000-100km
VLF	Very Low Frequency	3-30 kHz	100-10km
LF	Low Frequency	30-300 kHz	10-1km
MF	Medium Frequency	300-3000 kHz	1-100m
HF	High Frequency	3-30 MHz	100-10m
VHF	Very High Frequency	30-300 MHz	10-1m
UHF	Ultrahigh Frequency	300-3000 MHz	1-10cm
SHF	Superhigh Frequency	3-30 GHz	10-1cm
EHF	Extremely High Frequency	30-300 GHz	1-1mm

Lisäksi erilaiset liitot sekä yhteisöt ovat määritelleet omia nimityksiä tietyille taajuusalueille, esimerkkeinä ITU, IEEE sekä NATO. TAC WIN -järjestelmän radioiden taajuusalueet määrittyvät lähelle Naton taktisille radiolinkeille määritettyjä taajuusalueita radion nimen mukaan (taulukko 2). [4, 5, 6, s 63.]

Taulukko 2. Naton taktisten radiolinkkien taajuusalueet [6, s 63.]

NATO BAND	Radiotyyppi	Taajuusalue
I	**RH-I**	225-500 MHz
II	-	610-960 MHz
III	**RH-III**	1350-1850 MHz
IV	**RH-IV**	4400-5000 MHz

2.3 UHF – SHF

TAC WIN -järjestelmän taajuudet (225-5000 MHz) asettuvat Nato-SHF-taajuuksien alueelle. Taajuuksien radioaallot etenevät samankaltaisesti sekä maaston muotojen että vapaan ilmanalan osalta. Taajuusalueet ovat hyvin yleisiä kaupallisissa sekä sotilaskäyttöön suunnitelluissa järjestelmissä, kun halutaan kohtuullisella teholla saada kunnollisia etäisyyksiä [4, 5.]

2.4 Radiosignaalien eteneminen

Suuri osa olemassa olevista radiotaajuuksien etenemisanalyyseista on keskittynyt reilusti maanpinnan yläpuolella kulkeviin signaaleihin. Viime aikoina ovat kuitenkin yleistyneet verkot ja ratkaisut, joissa antennit saattavat sijaita jopa vain metrin korkeudella maanpinnasta. Noin matalalla ympäristössä on jo hyvin paljon signaalin etenemiseen vaikuttavia tekijöitä: puusto, rakennukset sekä maaston muodot.

Vertailuarvona kaikille yhteyksille ajatellaan, että signaali etenee tyhjässä ilmanalassa. Tällöin lähettävän ja vastaanottavan pään välinen alue on vapaana kaikista esteistä, jotka voisivat heijastaa tai jopa absorboida signaalia itseensä. Tämä edustaa ideaalia tilannetta, johon voidaan soveltaa kaavoilla laskemista, mutta reaalitilanteissa kaavoilla ei kuitenkaan päästä todellisiin tuloksiin. Kaavat itsessään ovat hyvin yksinkertaisia. [7, 8.]

Lähetyksellä on teho P_t, joka säteilee joka suuntaan samalla teholla. (Kyseessä olisi tällöin kaikkien suosikkiantenni, ideaalinen isotrooppinen antenni.) Etäisyydellä d säteilevä teho jakaantuu kauttaaltaan alueelle $4\pi d^2$ (pallon pinta-ala), joten tehon tiheys s on etäisyydellä d olevalla pallon pinnalla:

$$s = \frac{P_t}{4\pi d^2} \tag{1}$$

Jos vastaanottavan antennin tehokas vastaanottava pinta-ala on A_r, vastaanotetun tehon määrä on tuolloin:

$$P_r = sA_r \tag{2}$$

Voidaan osoittaa, että ideaalisen isotrooppisen antennin sieppauspinta-alalle pätee:

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{3}$$

Antennin sieppauspinta-ala Ar on siis verrannollinen aallonpituuden (λ) neliöön ja kääntäen verrannollinen taajuuteen.

Yhdistämällä em. kaavat, saadaan vastaanotettavaksi teho:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{4}$$

Vapaan ilmanalan häviö eli esteettömässä etenemisessä tapahtuva vapaan tilan vaimennus antennien välillä on siis P_t / P_r. Yleensä käsitellään kuitenkin taajuuksia eikä aallonpituuksia, jolloin sijoittamalla kaavaan (4) λ= c / f (jossa c = valonnopeus, f = taajuus) saadaan vapaan ilmanalan häviölle L_p kaavaksi:

$$L_p = \left(\frac{4\pi}{c}\right)^2 f^2 d^2 \tag{5}$$

Kaavoissa näkyy klassinen signaalin voimakkuus/etäisyys-suhde "käänteisen neliön lakina". Tämä tarkoittaa sitä, että etäisyyden d kaksinkertaistuessa, pinta-ala jolle energia levittäytyy, nelinkertaistuu, jolloin energian tehotiheys s pienenee neljännekseen. Kaavoista huomaa myös sen, että vapaan tilan tehohäviö kasvaa samalla tavoin suhteessa taajuuden neliöön. Tämä johtuu siitä, että myös antennin sieppauspinta-ala Ar pienenee neliöllisesti taajuuden kasvaessa. Tästä seuraa muun muassa se, että antennien koot muuttuvat taajuuksien mukaan. Taajuuden kaksinkertaistuessa antennin lineaariset ominaisuudet pienenevät lähettävässä päässä puolella, vastaanottavassa päässä neljänneksellä. Kaksinkertaisella taajuudella antenni pystyy täten vastaanottamaan vain neljäsosan tehon tiheydestä. Tämä johtaa 6 dB:n häviöön vastaanottavassa päässä verrattuna matalampaan taajuuteen.

Vapaan ilmanalan häviön kaava on käyttökelpoisempi ilmaistuna logaritmisesti:

$$L_p = 32{,}4 + 20\log f + 20\, logd\ dB \quad \text{(f = MHz, d = km)} \quad (6)$$

Logaritmisista kaavoista näkee selvemmin yhteyden tehohäviön ja etäisyyden välillä. Etäisyyden kymmenkertaistuessa häviötä tulee 20 dB, kaksinkertaistuessa 6 dB. Siis aina etäisyyden kaksinkertaistuessa tehosta häviää 6 dB vapaassa tilassa.

Kun ajatellaan reaalisysteemiä, täytyy laskea mukaan antennivahvistukset sekä kaapelihäviöt vastaanottavan pään P_r – arvoa laskiessa:

$$P_r = P_t - L_p + G_t + G_r - L_t - L_r \quad (7)$$

jossa,

P_t = lähettävän pään teho (dBm tai dBW, samoina arvoina kuten P_r)

L_p = vapaan ilmanalan häviö isotrooppisilla antenneilla (dB)

G_t = Lähettävän antennin vahvistus (dBi), isotrooppiselle antennille

G_r = Vastaanottavan antennin vahvistus (dBi), isotrooppiselle antennille

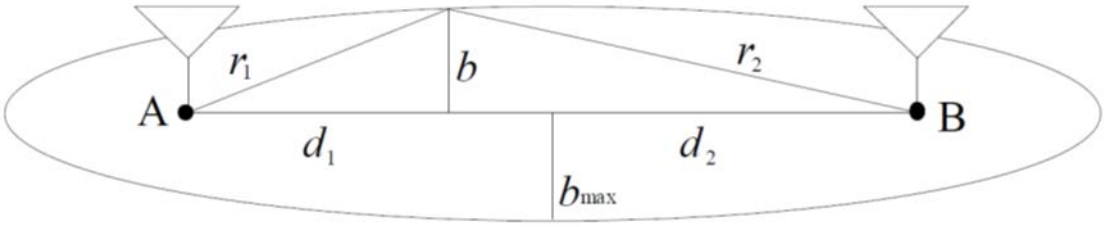
L_t = Kaapelihäviö lähettävän pään lähettimen ja antennin välillä (dB)

L_r = Kaapelihäviö lähettävän pään lähettimen ja antennin välillä (dB)

Maanläheisellä etenemisellä radioaaltoihin kohdistuu suuri määrä erilaisia heijastumisia ja diffraktioita. Lisäksi Nato-SHF-taajuusalueella esteet ovat aallon kokoon verrattuna huomattavan suuria. Seurauksena tästä on se, ettei ole varmaa tietoa, kuinka maanläheinen eteneminen sekä esteisiin törmääminen Fresnelin 1. vyöhykkeellä vaikuttaa radiotaajuuksien etenemiseen. MANET-verkoissa, joissa itse mastot ovat harvoin yli 50 metriä maan pinnasta vaikuttavat enemmän epävarmat tekijät, ja vapaan ilmanalan kaavoja päästään harvoin käyttämään. Merenpinnan tasolta ajateltuna saatetaan saada huomattavia korkeuseroja käyttämällä maastoa ja mäkiä hyödyksi. Näin voidaan osittain eliminoida maanläheisestä etenemisestä seuraavia ongelmia, ja täten päästään käyttämään mahdollisesti vapaan ilmanalan yhteyksiä. [7, 8.]

2.4.1 Fresnelin vyöhyke (Fresnel Zone)

Radioaallot tarvitsevat siis vapaata tilaa edetäkseen vaimentumatta. Fresnelin vyöhykeperiaatteen mukaan vapaata ilmassa olevaa tilaa kutsutaan Fresnelin 1. vyöhykkeeksi, josta 60 % ilmatilasta pitäisi olla vapaana esteistä (kuva 2). Fresnelin vyöhyke on pyörähdysellipsoidi, jonka polttopisteet ovat yhteysvälin päätepisteet A ja B, joissa myös antennit sijaitsevat. Vapaan tilan etenemisyhtälöä voidaan käyttää, mikäli Fresnelin 1. vyöhyke on vapaa esteistä. [9, 10 11.]



Kuva 2. Fresnelin 1. vyöhyke [9.]

2.4.2 RSSI & CINR

Langattomassa teknologiassa tehot on yleensä ilmoitettu desibeleinä volttimäärän sijaan. Täten on tärkeä ymmärtää RSSI- ja CINR-määreiden ero. Desibeleinä ilmoitettu teho ja sen laatu tarjoaa asiaan perehtyneelle hyvin tietoa signaalista ja sen toimivuudesta.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) on laitteistosta riippuva indikaattori, joka kertoo laaduttomalla arvolla vastaanotetun tehon. Vaikka kyseessä on niin sanottu laaduton arvo, yleensä eri laitteissa RSSI ilmoitetaan dBm arvolla. RSSI voi olla laitteistokohtaisesti hyvin alhainen. Esimerkiksi GPS-vastaanottimet toimivat vain -120 dBm teholla.

CINR (Carrier-to-Interference-noise Ratio), (tunnettu myös SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio) puolestaan kertoo signaalin laadun dB-arvona. CINR saadaan kun mitataan erikseen kantoaallon teho sekä kohinateho ja häiriöt, ja siitä lasketaan niiden suhde dB-arvona.

Nämä arvot tulevat vastaan vaikkapa yleisimmissä television digitaalisissa virittimissä, joissa laitteisto voi näyttää kanavalle/kanavanipulle tietoja. Monesti mukana on myös tieto modulaatiosta, millä kanava siirretään. [12, 13.]

2.4.3 Sään sekä muiden ympäristötekijöiden vaikutus

Sää ja muut ympäristötekijät vaikuttavat osaltaan kaikkeen langattomaan viestintään. VHF- ja UHF-alueilla puusto ja muut kiinteät esteet vaikuttavat signaalin etenemiseen ja mittauksiin. Näitä suuremmilla SHF- ja EHF-taajuusalueilla myös sade ja ilmankosteus, sekä sitä kautta lämpötilan muutokset ovat merkittävin osa-alue otettaessa huomioon onnistuneita mittauksia. Lisäksi esimerkiksi talviaikaan puissa oleva lumi voi olla suoraan heijastumisten kautta suorituskykyyn vaikuttava ilmiö.

Maanläheinen radiotaajuuksien eteneminen on alttiina paikallisille ilmakehän, ja sitä kautta ympäristön vaikutuksille. Muuttuvat ja vaikuttavat tekijät ilmakehässä ovat tuulen nopeus, ilman lämpötila ja kosteus (tarkemmin vesihöyry) sekä ilmanpaine, joiden muutokset aiheuttavat vaikutusta suoraan taitekertoimeen ja tätä kautta radiosignaaleihin. [14.]

3 EB TACTICAL WIRELESS IP NETWORK (TAC WIN)

EB Tactical Wireless IP Network (TAC WIN) (kuva 3) on MANET -järjestelmä, joka mahdollistaa langattoman sekä langallisen laajakaistaisen verkon käyttämisen missä tahansa. Lujatekoiset, MIL- sekä IP65-suojaluokituksen omaavat laitteet mahdollistavat yhteyksien luomisen jopa 40 km etäisyyksille. Laitteet antavat korkean datanopeuden sekä täyden tuen tavalliselle IP-liikenteelle. Lisäksi laitteet antavat mobiliteetin 120 km/h asti. Verkkoja voidaan muodostaa P2P (point-to-point), kahden pisteen välillä linkkinä. Sekä P2MP (point-to-multipoint), useiden pisteiden yhteysvälien Mesh-tyyppisinä verkkoina. [5.]

Kuva 3. Taktinen reititin ja Radioyksikkö RH-I [5.]

3.1 Taktinen Reititin (TR)

Taktinen Reititin toimii monipuolisena rajapintana IP-liikenteen lisäksi. Tavallisena reitittimenä toimimisen lisäksi se antaa joustavuutta eri järjestelmien käyttöä ajatellen Se sisältää mahdollisuuden käyttää samanaikaisesti kolmea eri radioyksikköä, ja se mahdollistaa liitännöillään lukuisien eri rajapintojen käytön. Tällöin reitittimeen kytketyt eri laitteet ja käytössä olevat rajapinnat voivat käyttää runkoverkkona TR:ään kytkettyjen radioyksiköiden ilmarajapintoja. [5.]

3.2 Radioyksikkö RH- I

Radio Head I on MANET/VANET-verkkokäytön mahdollistava radiotyyppi, se sisältää 2x2 MIMO-ominaisuuden, eli kahden antennin käyttömahdollisuuden. Ympärisäteilevillä antenneilla se tarjoaa tehokkaan kuuluvuuden ja liitettävyyden muihin verkkoihin. Se käyttää 5 MHz:n kaistanleveydellä 225-400 MHz taajuusaluetta. [5.]

3.3 Radioyksikkö RH-III

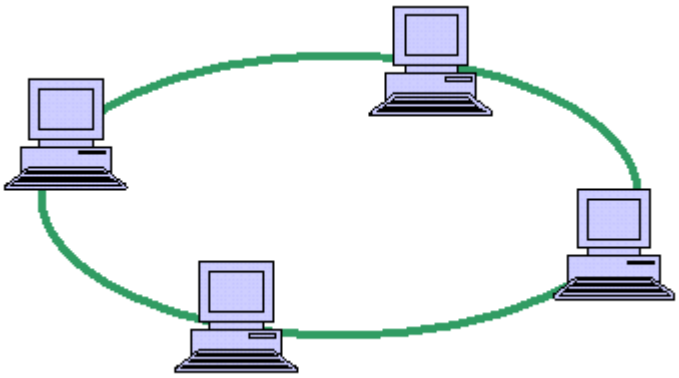
Radio Head III on yhdellä antennilla varustettu radiotyyppi, joka on suunniteltu P2P- (kahden pisteen välinen yhteys) sekä P2MP-käyttöön (yhdestä pisteestä yhteys moneen eri pisteeseen) suuntaavilla tai ympärisäteilevillä antenneilla, RH-III-radiotyyppi käyttää 10 MHz:n kaistanleveydellä 1350-2400 MHz taajuusaluetta. RH-I:stä poiketen tämä radio käyttää vain yhtä antennia. [5.]

3.4 Radioyksikkö RH-IV

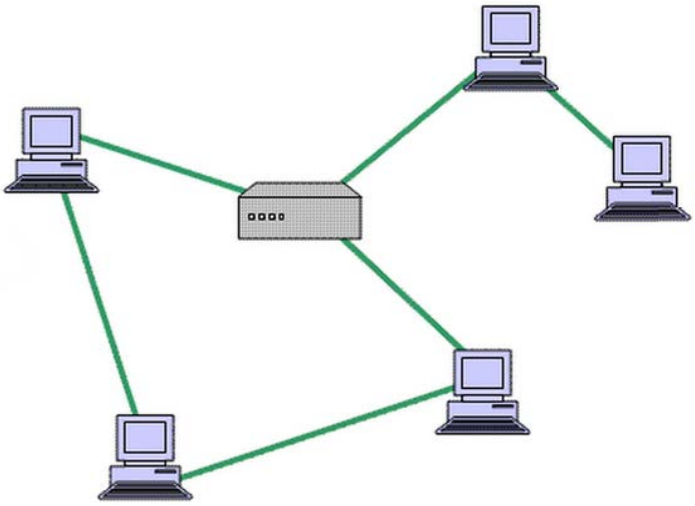
Radio Head IV on integroidulla antennielementillä varustettu radiotyyppi, joka on suunniteltu P2P (point-to-point)-käyttöön. Radion omalla antennielementillä on ominaisuutena automaattinen keilansäätö, joka tuo helppokäyttöisyyttä antennin suuntaamiseen. Lisäksi radiota voi käyttää ulkoisella antennilla. RH-IV-radiotyyppi käyttää 20 MHz:n kaistanleveydellä 4400-5000 MHz taajuusaluetta. [5.]

4 VERKKOTOPOLOGIAT

Verkkotopologioilla tarkoitetaan, kuinka esimerkiksi tietokoneet tai tukiasemat ovat yhteydessä toisiinsa, fyysisesti tai ilmateitse. Erilaisia topologioita on lukuisia, eikä kaikkia ole mahdollisia käyttää ilmarajapinnoissa fyysisien rajoituksien takia. Käytännössä ilmarajapinta rajoittaa topologioiden käytön radio-ominaisuuksien mukaan. Yleisissä kommunikaatiojärjestelmissä on käytössä mm. väylä-, rengas-(kuva 4), tähti-, mesh- (kuva 5) sekä puutopologioita. [15.]



Kuva 4. Rengastopologiaverkko [15.]



Kuva 5. Meshtopologiaverkko [15.]

4.1 Topologioiden käyttötavat

Eri topologiat tarjoavat monipuolisia vaihtoehtoja tiedon siirtämiseen verkossa sekä eri yhteysmahdollisuuksia isäntä-asiakas-liikenteessä. Langattomissa järjestelmissä, ja varsinkin tukiasemissa, käytössä on yleensä eräänlainen väylätopologia, jossa väylän selkärangan tarjoaa itse tukiasema. Tukiasema toimii tällöin point-to-point- tai point-to-multipoint-yhteyksissä. Usean tukiaseman verkossa taas mesh-topologia on yleinen, mahdollisesti yhdistettynä useisiin eri topologioihin. Esimerkiksi yksi tukiasema voi toimia yhdelle mesh-verkossa toimivalle tukiasemalle vastaparina P2P-yhteydellä.

TAC WIN -järjestelmässä käytetään linkkiyhteyksiä tai mesh-verkkoja eri tarpeisiin radiotyypin mukaan. Lisäksi yksi tukiasema voi sisältää kolme eri radiota ja täten yhdistyä useampiin eri rakenteen omaaviin verkkotopologioihin. [15.]

4.2 Linkki ja Mesh-verkot ja niiden erot

Linkkikäsitteellä tarkoitetaan yleensä vain kahden tukiaseman välistä kaksisuuntaista P2P-yhteyttä Tällöin rajapinta ja sen suorituskyky on omistettu pelkästään noille kahdelle asemalle. Mesh-verkolla/topologialla (silmukka tai verkkomuotoinen verkko) tarkoitetaan verkkoa, jossa on useita tukiasemia, jotka voivat kaikki olla yhteydessä toisiinsa. Suorituskyvyn kannalta tätä voidaan verrata tilanteeseen tavallisessa WLAN-verkossa. Yhdellä verkkoa käyttävällä laitteella on merkittävästi parempi suorituskyky verkkoon, kuin että samassa verkossa olisi useita kymmeniä, jopa satoja käyttäjiä.

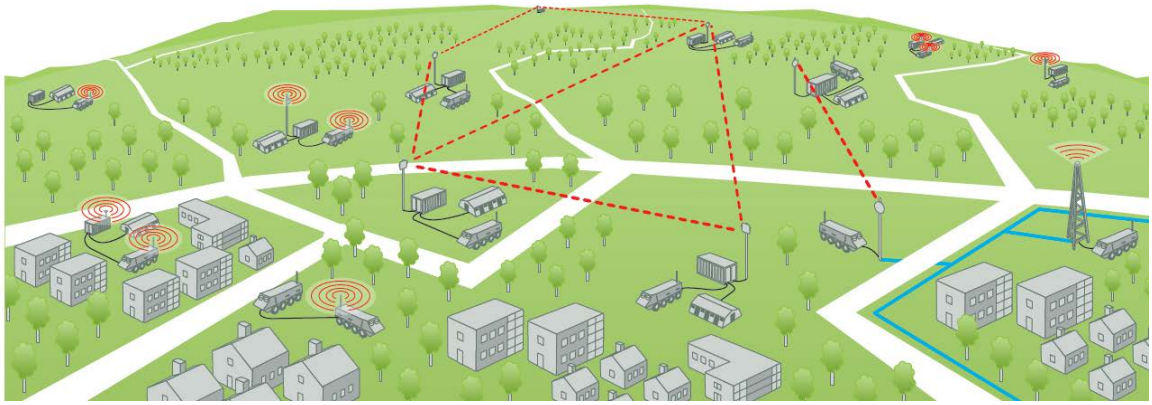
Erilaiset mesh-käyttöön kehitetyt verkot kykenevät yleensä määrittämään kaistantarpeen solmukohtaisesti liikenteen mukaan. Tällöin kaista pystytään tehokkaasti jakamaan niille osapuolille, jotka sitä tarvitsevat. Lisäksi joustavat järjestelmät tarjoavat myös ominaisuuden, jossa tukiasemien prioriteetti voidaan määrittää. Kaistanjako tapahtuu niin, että samanaikaisesti tiedonsiirtoa vaativat tukiasemat saavat kaistan käyttöönsä oman prioriteettitasonsa mukaan. [15, 16.]

5 LANGATTOMAT VERKOT

Erilaisia langattomia radioverkkoja on eri käyttötarkoituksiin perustuen hyvin monen tyyppisiä. Tutuimpia ovat GSM-, GPRS-, sekä UMTS-verkot ja kiinteän Internetin jakamiseen tarkoitetut langattomat WLAN-verkot. Myös lukemattomat muut eri tarpeisiin luodut ratkaisut ovat hyvin erilaisia aina rakenteeltaan, mutta kaikki verkot sisältävät samoja ominaisuuksia jotka perustuvat langattoman tehonlähetyksen periaatteisiin. [16, 17.]

5.1 Mobile ad hoc Network

MANET on verkko, joka on kykeneväinen määrittämään itsensä lennosta tilanteen mukaan turvautumatta kiinteän infrastruktuurin (kuva 6). Verkkorakenne mahdollistaa myös jokaisen tukiaseman itsenäisen liikkumisen vapaasti ja muuttaa verkkotopologian muotoa reaaliaikaisesti. VANET (Vehicle ad hoc Network) käsittää samat ominaisuudet kuin MANET, mutta sillä voidaan tarkoittaa myös liikkuvaa, täysin mobiilia verkkoa, jossa tukiasemat toimivat esimerkiksi erilaisissa ajoneuvoissa tukiasemavarustuksella. VANET on täten verkko joka pystyy säilyttämään toimintakykynsä liikkeessä. [17.]



Kuva 6. TAC WIN -verkkoja [5]

5.2 Yleisimmät modulaatiot

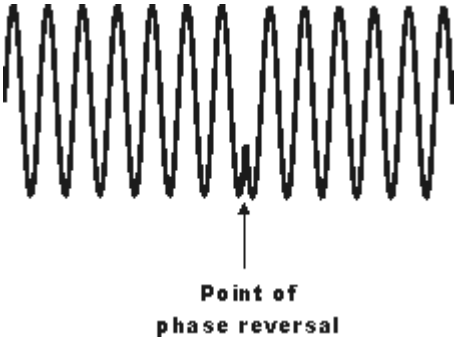
Nykyään erilaisissa analogisissa sekä digitaalisissa verkoissa liikkuu suuria määriä tietoa. Yksi perusaspekti lähetyksissä on se, miten itse tieto on signaalin kantoaallon päälle lisätty. Jotta kantoaalto voi tehonsa lisäksi siirtää myös tietoa paikasta toiseen, se pitää moduloida kantoaaltoon.

Modulaatiot ovat siis erilaisia tapoja ilmaista arvoja signaalissa. Jokapäiväisistä elävän maailman esimerkeistä yleisin lienee vielä tänäkin päivänä tavallinen FM-radio. FM-moduloinnissa signaali on taajuusmoduloitu, joka radion vastaanottavassa päässä sitten demoduloidaan ääneksi. AM-radiossa ja -moduloinnissa taas käytetään amplitudi-modulointia samalla tavoin.

Yleisesti digitaaliset järjestelmät käyttävät yhtä modulaatiota tiedonsiirron suorittamiseen, mutta on myös olemassa adaptiivisia järjestelmiä, joissa käytetään useita eri modulaatioita. Monimodulaatioita käyttäviä järjestelmiä on usein käytössä juuri langattomissa järjestelmissä. Tällöin modulaatiota ja mahdollisesti myös sen kanavakoodausta muutetaan dynaamisesti signaalin laadun mukaan. Erilaisia digitaalisia modulaatiotapoja on monenlaisia, ja esimerkiksi TAC WIN -järjestelmässä käytetään modulaatioita: QPSK, 16QAM, 64QAM. Lisäksi se käyttää kanavakoodausarvoja, jotka ovat 1/2, 2/3, 3/4, 5/6. [18.]

5.3 Phase-shift keying (PSK)

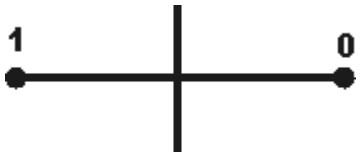
PSK (Vaiheavainnus) on modulointimenetelmä, jossa vaiheen muutoksia kantoaallossa käytetään ilmaisemaan eri arvoja (kuva 7). Siinä käytetään äärellistä määrää vaiheita binääribittien modulointiin. Demodulaattori, joka on nimenomaan suunniteltu modulaattorin symboleita ja vaiheenmuutoksia varten, päättelee vastaanotetun signaalin vaiheen ja osoittaa sen osoittamaan symboliin. [18, 19.]



Kuva 7. PSK:n vaihemuutos [18.]

5.3.1 Binary phase-shift keying (BPSK)

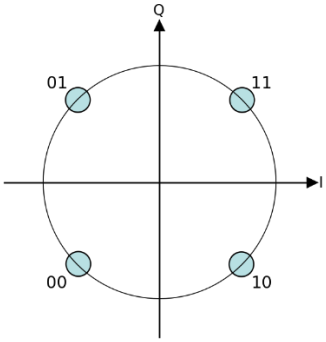
Binäärisessä vaiheavainnuksessa vaiheen muutos kertoo binäärisen tiedon 1 tai 0 (kuva 8). BPSK on siis yksinkertaisin muoto PSK:sta (joskus myös 2-PSK), joka tarjoaa vain kaksi eri tilaa. Tämän seurauksena ei ole niin tarkkaa, missä kohti konstellaatiokuvajaa pisteet esiintyvät, kunhan vaihe-ero on riittävä. Tämä takaa varman ja vähävirheisen toiminnan huonoillakin yhteyksillä. [19, 20, 21.]



Kuva 8. BPSK-konstellaatiokuva [18.]

5.3.2 Quadrature phase-shift keying (QPSK)

QPSK on BPSK:sta seuraava, kehittyneempi neljännesvaiheellinen modulaatio (joskus myös 4-PSK). QPSK:ssa voidaan ilmaista vaihe-erolla neljä eri symbolia eli bittilukua (00, 01, 10, 11). Modulaatio käyttää neljää konstellaatiopistettä, joissa vierekkäisillä symboleilla aina vain yksi bitti muuttuu kerrallaan, esimerkiksi 00 -> 01 -> 11 -> 10 (kuva 9). [18, 19, 21.]



Kuva 9. QPSK-konstellaatiokuvaaja [19.]

5.4 Quadrature amplitude modulation (QAM)

QAM on modulointitekniikka, jossa PSK:n vaihe-eron lisäksi symboleihin osoitetaan amplitudimoduloinnin (AM) avulla. Täten saadaan enemmän arvoja yhdelle konstellaatiokuvaajalle. Neljännesvaiheellisuuden takia QAM-modulaatiot ovat yleensä jokin kahden potenssi. QAM on laajasti käytössä monissa digitaalisissa radio- ja tiedonsiirtojärjestelmissä. PSK:hon verrattuna QAM tarjoaa suuremman etäisyyden vierekkäisten konstellaatiokuvaajan pisteiden suhteen, jakamalla pisteet tasaisemmin IQ-tasolle. Täten pisteet ovat selvemmin erotettavissa, ja tätä kautta virheiden määrä vähenee.

Yleisempiä QAM-tasoja ovat modulaatiot välillä 16QAM -> 256QAM, TAC WIN -järjestelmä käyttää 16QAM- ja 64QAM-tasoja. Seuraavassa kappaleessa kerrotaan hieman noista kahdesta, koska yleisesti QAM-tasot ovat hyvin samankaltaisia. Vain symboleiden tiheys konstellaatiokuvaajassa vaihtuu ja suorituskyky paranee. [18, 20.]

5.4.1 16QAM ja 64QAM

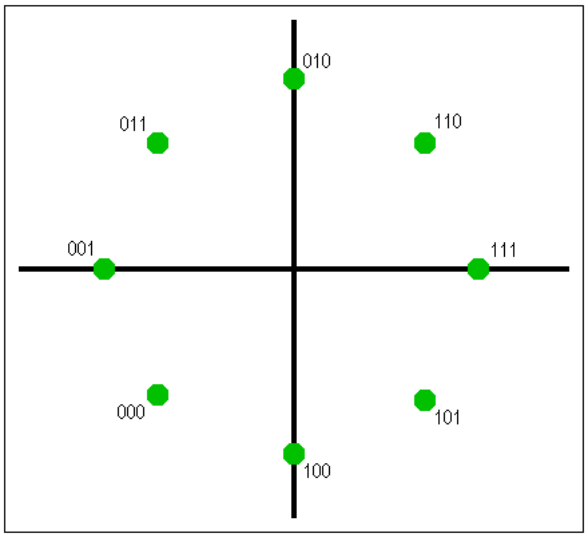
16QAM on niin sanottu 4-bittinen modulointi, jossa konstellaatiokuvaajassa on 16 (2^4) eri symbolia (0000 -1111). 16QAM on yleinen modulaatio esimerkiksi digitaalisissa antenniverkon tv-lähetyksissä.

64QAM on niin sanottu 6-bittinen modulointi, jossa konstellaatiokuvaajassa on 64 (2^6) eri symbolia (000000-111111). 64QAM on yleisesti käytössä digitaalisissa kaapeliverkon lähetyksissä, myös käytössä Suomessa antenniverkkojen tv-lähetyksissä. [18, 20, 21.]

5.5 Modulaation havainnollistaminen konstellaatiokuvaajalla

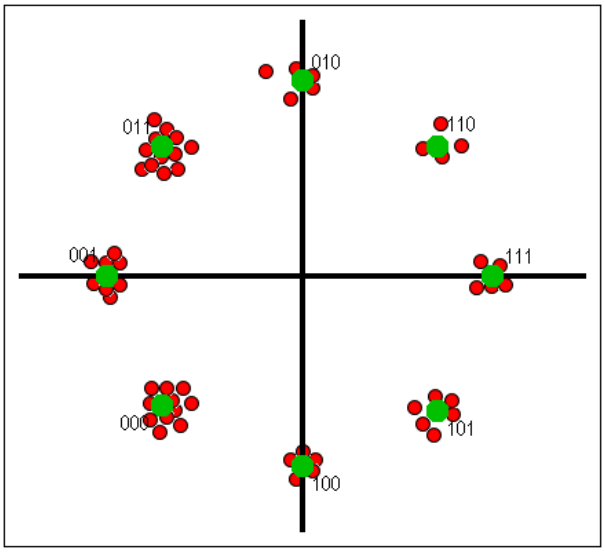
Modulaatioiden ohessa käytetään poikkeuksetta erilaisia konstellaatiokuvaajia joita eri modulaatiot käyttävät, joten pohjaksi on hyvä saada käsitys, mitä kuvilla tarkoitetaan ja miten niitä luetaan. Konstellaatiokuvaaja on graafinen esitys signaalista kompleksisessa koordinaattitasossa, IQ-tasossa, jossa I tarkoittaa signaalin kosinikomponentin amplitudia ja Q signaalin sinikomponentin amplitudia. Kuvaajia käytetään mm. modulaatioiden luokitteluun kompleksitasossa, valvontajärjestelmissä, kognitiivisissa radioissa sekä elektronisessa sodankäynnissä.

Modulaatioiden näkökulmasta konstellaatiokuvaajilla saadaan kuvattua lähetyksessä käytettävän modulaation symbolit, ja ne auttavat visuaalisesti ymmärtämään, miten kukin modulaatiotapa toimii. Alla on esimerkkinä kuva kolmebittisestä kahdeksansymbolisesta systeemistä (8-PSK) (kuva 10). Vihreät pisteet esittävät kunkin vaihe/amplitudi-hetken arvon. [21, 22.]



Kuva 10. Konstellaatiokuvaaja [18.]

Yllä mainittu tilanne on kuitenkin ideaalinen, koska reaalijärjestelmässä symboleiden signaalit eivät käytännössä täysin osu juuri kyseiselle kohdalle (kuva 11). Tämän takia yleensä modulaatiot vaativat tietynlaatuisen signaalin, ettei lähetyksessä synny virheitä. Järjestelmän joustavuudesta mukaan, signaalin laadun huonontuessa voidaan järjestelmän modulaatiota sekä kanavakoodausta yksinkertaistaa virheiden vähentämiseksi.



Kuva 11. Reaalijärjestelmän symboliosumat [18.]

Tällöin hyvällä signaalilla voidaan käyttää parempaa bitti/symboli-suhdetta, kun samalle kuvaajan alueelle saadaan useampia symboliosumia luotettavasti. Samalla virheosumat vähenevät.

5.5.1 Kanavakoodaus

Digitaalisissa kommunikaatiojärjestelmissä käytetään usein kanavakoodausta lähetyksen turvaamiseen ja virheiden minimointiin. Koodaus tapahtuu lisäämällä dekoodattuja bittejä lähetykseen, ja vastaanottopäässä tarkastamalla varmennetaan lähetyksen oikeellisuus. Siitä on kuitenkin suoraan suorituskykyyn vaikuttava tekijä, sillä kanavakoodauksen tason mukaan, joudutaan tietty määrä lähetyksen bittejä uhraamaan koodausta varten.

Yleinen langattomissa järjestelmissä käytetty kanavakoodaus on niin kutsuttu osakoodaus, esimerkiksi 3/4 tai 5/6. Osamäärä kertoo bittien määrän suhteessa symboleihin. Mitä suurempi luku, sitä suurempi suhde bittiä/symbolisuhde. Tällöin saadaan käytettyä eri modulaatiotapoja tehokkaammin. Esimerkiksi jos kaista ei kunnolla riitä puhtaaseen 64QAM-modulaatioon,

voidaan siitä käyttää kevennettyä versiota, joka on merkittävästi parempi kuin matalamman suorituskyvyn omaava 16QAM-modulaatio.

Kanavakoodausarvoilla tarkoitetaan sitä, montako symbolia per bitti lähetys käyttää toimiakseen verrattuna alkuperäiseen koodaamattomaan modulaatioon. Tämä onnistuu yksinkertaisella kaavalla, kun tiedetään modulaation sisältämä bittiä/symbolisuhde ja kerrotaan se kanavakoodausarvolla. Esimerkiksi jos QPSK-modulaatiolla bittiä/symbolisuhde on normaalisti 4 ja käytetään kanavakoodausta 1/2. Tällöin modulaatio on QPSK1/2 ja oikea symbolisuhde on: 4 x 1/2 = 2 bittiä per symboli.

Kanavakoodauksella saadaan siis varmempi lähetys suhteessa signaalin laatuun ja varmistetaan järjestelmän toimintavarmuutta. [23.]

5.5.2 Bit Error Rate (BER)

Aina kun dataa lähetetään, myös lähetys/vastaanottovirheiden mahdollisuus on olemassa. Tällöin järjestelmän eheys ja tiedonsiirron varmuus ei ole enää täysin kunnossa. Kuten nimi jo kertoo, BER määrittyy sillä suhteella, miten paljon virheitä lähetyksessä tulee. BER on myös usein järjestelmissä suoraan käytössä ja tarjotaan tietona käyttäjälle. Tällä tavoin saadaan reaaliaikaista tietoa ja varmuutta suorituskyvyn laadusta.

Lähtökohtaisesti voidaan ajatella, että jos lähetysväli on lyhyt sekä signaalin laatu on hyvä, tällöin BER on hyvin lähellä nollaa tai nolla.

$$Bit\ Error\ Rate, BER = \frac{Virhebitien\ m\ddot{a}\ddot{a}r\ddot{a}}{L\ddot{a}hetettyjen\ bittien\ kokonaism\ddot{a}\ddot{a}r\ddot{a}}$$

Järjestelmän testauksen kannalta eniten BER:iin ja sitä kautta puhtaaseen suorituskykyyn vaikuttavat tekijät ovat itse lähetysväli ja ympäristötekijät. Eniten merkitsevät asiat ja siltä kannalta huomioonotettavimmat ennen testejä ovat

- Häirintä: Samalla taajuusalueella esiintyvät häiritsevät signaalit.

- Lähetysteho: Mitä korkeampi lähetysteho, sitä pienempi on BER, mutta tähän ei aina pystytä välttämättä vaikuttamaan, vaan on pakko tyytyä ympäristön ja laitteiston tarjoamaan signaalitehoon.

- Modulaatio: Mitä heikompi modulaatio, sitä varmemmin symbolit osuvat kohdalleen.

- Kaistanleveys: Leveämmällä kaistalla saadaan korkeampi datansiirtoyhteys, mutta tällöin tulee häirintään ja kohinaan liittyvät haitat mukaan.

Onkin tarpeellista saada tasapainotettua järjestelmässä kyseiset muuttujat, ja tiedettävä ne testien näkökulmasta optimaalisen bittivirhemäärän saavuttamiseksi. [24.]

5.6 Antennit VHF - SHF-verkoissa

Kuten kaikissa langattomissa verkoissa, antennit ovat merkittävässä roolissa. Täten antennien valitseminen käyttötarpeen ja mukautuvuuden mukaan on tärkeää. Antenneja on hyvin monenlaisia eri käyttöön. MANET-verkoissa yleisimpiä ovat ympärisäteilevät sekä eri käyttöön tarkoitetut suunnattavat antennit, kuten sektori- sekä peiliantennit.

Kappaleessa 2.4 puhuttiin ei-reaalisesta, joka suuntaan samalla teholla säteilevästä isotrooppisesta antennista. Kyseistä antennia ei valitettavasti ole olemassa, joten radiokäytössä joudutaan turvautumaan muihin ratkaisuihin.

Antennit on käytännössä aina rajattu omalle taajuusalueelleen käyttötarkoituksensa mukaan. Huomioonotettavaa on se, että antennien taajuusalueet eivät välttämättä olekaan samat kuin laitteistolle määritetyt taajuusalueet, vaan saattavat esim. mennä jonkun taajuusrajan (VHF-UHF) yli.

Säteilykuviot kertovat antennin kyvyn lähettää tehoa ympärilleen. Ympärisäteilevillä sen odotetaan olevan tasaisen pallomainen, ja parabolisten antennien lähettävän tehoa vain yhteen suuntaan. Näin ei kuitenkaan reaalitilanteissa ole, vaan säteilykuviot voivat olla teholtaan hyvin logaritmisia asennuksien mukaan. [25.]

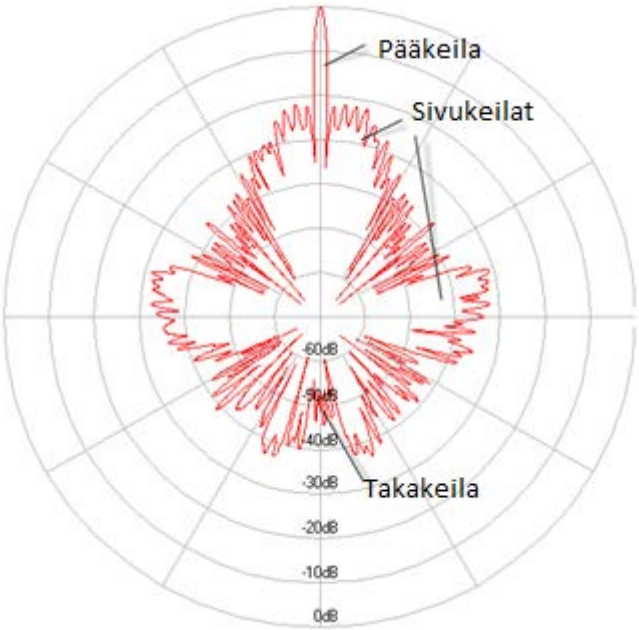
5.7 Ympärisäteilevä (suuntaamaton) antenni

Ympärisäteilevä, suuntaamaton antenni tarkoittaa antennia, jota ei erikseen suunnata. Antenni säteilee yhtä tehokkaasti joka suuntaan, ja sellaista käytetään yleensä silloin, kun mahdollisia verkkonaapureita on useampia tai käytössä on liikkuva tukiasema. Käytännössä antennit eivät kykene joka suuntaan aivan samanlaiseen säteilykykyyn, ja myös antennin käyttötaajuusalueen rajoissa toimivuudessa voi olla eroja eri taajuuksilla. Yleensä MANET-käytössä perinteisenä ympärisäteilevänä antennina toimii joko monopoliantenni, joka vaatii oman maatason, tai dipoliantenni (kuva 12). Suuntaamattomien antennien säteilykuvio on ilmaistu yleensä kahdella kaksiulotteisella kuviolla. Antennien kiinnityskohtaa ajatellaan 0-asteena, ja antennien säteilykuviot on ajateltu pystysuoran antenniasennuksen näkökulmasta. Tällöin toisella kuvaajalla kerrotaan antennin säteilykuvio antennin päältäpäin katsottuna 360 asteen alueelle, toisella kuvaajalla horisontaalisesti 0-asteen mukaan sitä miten antenni säteilee kiinnityspisteensä suhteen. [25, 26.]

Kuva 12. Telsa T01110616-dipoliajoneuvoantenni [25.]

5.8 Paneeli- ja paraboliantennit

Paneeliantenneista käytetään yleisimmin termiä sektoriantenni, paraboliantenneista taas peiliantenni. Sektori/paneeliantenneilla saadaan tehokas lähetys/vastaanotto määritetylle suunnalle tai kulma-alueelle, jossa voi sijaita useita vasta-asemia. Peiliantenneilla puolestaan saadaan suunnattua signaali mahdollisimman tehokkaasti haluttua vasta-asemaa vastaan, ja sitä käytetään yleensä linkkikäytössä. Molemmilla antennityypeillä on kuitenkin keiloja myös muihin suuntiin kuin pääkeila. Tuolloin tietynlaiset antennit ja asennukset voivat takakeilallaan lähettää signaalia huomattavia matkoja (kuva 13). Tämä on tärkeää huomioida silloin, kun lähialueella on samaa taajuutta käyttäviä järjestelmiä, joiden yhteyksiin ei haluta vaikuttaa.



Kuva 13. Paraboliantennin säteilykuvio [25.]

5.9 Masto- ja mobiilitukiasema-asennukset

Masto- ja mobiiliasennukset eivät varsinaisesti eroa toisistaan, sillä sekä mobiileissa tukiasemissa että mastoissa voidaan käyttää samanlaisia antenneja. Huomioonotettavaa mastoasennuksissa on se, että maston korkeus ja sen liitännät aiheuttavat jo pelkästään kaapeloinnilla sekä liitoskohdilla huomattavaa vaimennusta signaalilinjaan.

Jotkin antennityypit lähettävät myös heikonlaisesti signaalia oman kiinnityslinjansa alapuolelle. Tämä ominaisuus ei vaikuta tukiasemissa, joissa ollaan metrin tai parin korkeudessa, vaan asennuskorkeuden noustessa merkittävästi. Tällöin jos esimerkiksi yhteyden toinen pää käyttää korkeaa mastoasennusta, toinen matalaa mobiiliasennusta, saatetaan törmätä ongelmiin kuuluvuuden suhteen. Antennin asennus korkeammalle ei välttämättä tuokaan suorituskykyyn mitään hyötyä, päinvastoin, se saattaa heikentää sitä tehon ohjautuessa väärin.[25.]

6 RADIOVERKKOMITTAUKSET JA LAITTEISTO

Radioverkkomittauksien tarkoituksena on varmentaa linkin tai mesh-verkon suorituskyky ja toimivuus. Kuuluvuus määritetyllä alueella ja sen suorituskyky on kaupallisilla laitteilla tärkeä saada verifioitua hyvin. Tällöin voidaan taata toimivuus ennalta määritetyillä etäisyyksillä ja verkkorakenteilla.

6.1 Kenttätestit

Kenttätesteillä tarkoitetaan maastossa suoritettuja kuuluvuus- ja suorituskykymittauksia. Tämän kaltaisilla testeillä saadaan esimerkiksi laboratorio-olosuhteissa toimivaksi testattu järjestelmä tuotua sille tarkoitettuun ympäristöön. Testit suoritetaan ympäristössä ja olosuhteissa, joissa laitteisto on suunniteltu käytettäväksi.

Erityisesti aina testejä suoritettaessa ensimmäistä kertaa eli uusissa kohteissa ei voi ikinä tietää varmaksi etukäteen laitteiston toimivuutta/kuuluvuutta. Tähän voi vaikuttaa ympäristö; rakennukset, puut ja maaston muodot. Mahdollisuuksien mukaan varsinkin mobiilitukiasemilla olisi tärkeää kokeilla tukiasemien yhteys ensin lyhemmällä matkalla. Täten voidaan varmistaa, että yhteys syntyy, se on symmetrinen ja laitteiston toimivuuteen voidaan luottaa. Tästä voidaan edetä laitteiston määritetyn toiminta-alueen rajoissa laajempiin testauksiin.

6.2 Laitteisto

TAC WIN -laitteiston testaukseen linkki/P2P-asennuksissa käytetään kahta mobiilia tuki-asemaa, identtisillä varustelulla sekä testatuilla kaapeleilla. Tällöin voidaan luottaa todenmukaisiin mittauksiin kaluston osalta. Lisäksi tiedonsiirtoa ja tiedonkeräämistä varten tarvitaan molempiin päihin PC, joiden toiminto on hyvä varmistaa jo ennen kenttätestejä.

Tiedonsiirrosta myöhemmin kappaleessa 8, suorituskyvyn mittaaminen ja dokumentointi.

7 EPÄVARMUUSTEKIJÄT

Kaikissa ympäristöissä ja testijärjestelyissä esiintyy tekijöitä, jotka osaltaan voivat aiheuttaa epävarmuutta ja epätodenmukaisuutta radioverkossa. Ympäristötekijöitä lukuun ottamatta voidaan varmistaa lukuisien eri ominaisuuksien ja tekijöiden osalta niiden toimivuus ja epävarmuustekijät. Tällöin voidaan luottaa todenmukaisiin ja luotettaviin tuloksiin. Epävarmuustekijöihin lasketaan mukaan itse järjestelmän toimivuuden varmistaminen, kaapeloinnit sekä muut testien oheislaitteet.

7.1 Laitteiston kalibrointi

Kaikki radiolaitteet vaativat yleensä kalibroinnin, joka on huomioonotettavaa tehdessä radioverkoihin liittyviä testejä. Laitteen tehon heikentymisestä tai kalibroinnin puutteesta johtuva tehohäviö voi vaikuttaa mittaustuloksiin merkittävästi. Niiden huomaamatta jääminen aiheuttaa mahdollisen sekaannuksen, jossa suorituskyvyn puutos johdettaisiin jonkin toisen epävarmuustekijän piiriin. Kalibroinnin tukena käytetään spektrianalysaattoria, jolla saadaan mitattua radion tehotaso ja varmistettua sen olevan oikealla tasolla. Spektrianalysaattori näyttää lähetetyn tehon taajuus-amplituditasossa. Analysaattorilla saadaan myös selville mahdolliset epätarkkuudet taajuuden suhteen.

7.2 Kaapelointi

Kaapelointi ja sen laatu on ehkä kriittisin asennuksiin vaikuttava tekijä. Toimivuus voidaan helposti varmistaa, jotta saadaan luotettava testi. Kaapelointi sekä mahdollisesti kahden antennin isolaatio (vaimennus) voidaan mitata vektoripiirianalysaattorilla (kuva 14). Vektoripiirianalysaattori on laite, jolla voidaan mitata suurtaajuuspiirien taajuus- ja vaihekäyttäytymistä. Tällöin voidaan varmentaa piirin toimivuus ja vaimennus juuri käytössä olevalla taajuusalueella.

Kuva 14. Piirianalysaattori, Agilent E5061B [27.]

Piirianalysaattorilla saadaan lukema desibeleinä, joten sitä voidaan käyttää suoraan varmentamaan testejä ja käyttää arvoja kokonaisvaimennuksien laskemiseen. Huono liitos kaapelissa voi aiheuttaa huomattavaa vaimennusta ja täten vaikuttaa suoraan verkon suorituskykyyn. Yleensä RF-kaapeleiden päissä käytetään N-liittimiä, jotka ovat hyvin luotettavia ja tästä syystä myös todella yleisiä (kuva 15). [27, 28.]

Kuva 15. N-liitin, uros [28.]

7.3 Tiedonsiirron kapasiteetti

Nykyaikana tiedonsiirto (data) yleistyy radioverkoissa, ja kuten tavallinen tietokoneen käyttäjä, halutaan olla varmoja, että verkko kykenee mahdollisimman korkeaan nopeuteen. Moni tietokoneen kotikäyttäjä tukeutuu Internetissä tarjottaviin nopeustesteihin, muttei erillinen, offline-tilassa oleva järjestelmä niitä tarjoa. Verkon suorituskyvyn varmistaminen kapasiteetin osalta on täten haastavaa. TAC WIN -järjestelmä tarjoaa tiedonsiirtokyvyn käytössä olevan taajuuden kaistanleveyden mukaan (taulukko 3). Linkkikäytössä TDD (Time-division duplexing) mahdollistaa kaistanleveyden dynaamisen allokoinnin, jolloin voidaan kaista rajata käyttöön enemmän toiseen suuntaan, tai jaettuna tasapuolisesti asemien kesken tukiasemien lukumäärän mukaan. [5, 29.]

Taulukko 3. TAC WIN -järjestelmän tiedonsiirtonopeudet [5.]

Radiotyyppi	Tiedonsiirtonopeus	Kaistanleveys
RH-I	40 Mbps	20 MHz
RH-III	20 Mbps	10 MHz
RH-IV	10 Mbps	5 MHz

7.4 Eri protokollien käyttö ja erot tiedonsiirrosta (TCP & UDP)

TCP-protokolla (Transmission Control Protocol) on perusteknologia tietokoneverkkojen ja internetin kommunikoinnille, ja se on yleisin tiedonsiirrossa käytetty protokolla. TCP vaatii toimivan yhteyden koneiden välille, sillä se varmistaa asiakas-palvelinyhteyden ja samalla tavoin myös pakettien perillemenon. TCP käyttää rakenteetonta bittivirtaa kolmivaiheisesti, muodostamalla yhteyden, suorittamalla tiedonsiirron, sekä yhteyden katkaisun. Tämä mahdollistaa tiedon uudelleenlähetyksen, mikäli paketteja on hävinnyt matkalla. UDP (User Datagram Protocol) taas on puolestaan yhteydetön yhteys, sillä se ei varmista pakettien perillemenoa. UDP:tä käytetään usein esimerkiksi reaaliaikaisen kuvan lähetykseen, koska se on yleisrasitteeltaan pienempi kuin TCP.

Molemmilla on etunsa tietyissä tilanteissa. UDP:llä saadaan kaista tehokkaasti käyttöön, mutta tällöin pakettien perillemeno vastaanottavassa päässä jää varmistamatta. TCP:tä esimerkiksi FTP-tiedonsiirrolla (File Transfer Protocol) käytettäessä saadaan todellinen suorituskyky point-to-point-yhteydessä mitattua turvallisesti molempien päiden tahoilta, ja saadaan symmetrinen tulos. UDP:llä mittaustuloksissa voi asemien kohdalla olla suuria eroja, ja tämä luo

epävarmuutta tilanteen aiheuttajaa kohtaan. FTP on täten varmempi tapa varmistaa verkon todellinen suorituskyky [29, 30, 31.]

7.5 Paikkaepävarmuus

Vapaassa ympäristössä suoritettujen mittausten dokumentoinnissa ja testien toistettavuutta varten on tärkeä saada tukiasemien paikkatieto talteen. Itse järjestelmältä ei aina suoraa paikkatietoa saa, mutta on mahdollista käyttää mittauksissa käytettävässä PC:ssä esimerkiksi USB-GPS-moduulia, jotka ovat tänä päivänä luotettavia ja edullisia. GPS-moduulit tunnistetaan PC:ssä standardina COM-porttina, josta oikeilla asetuksilla kellonajan sekä paikkatiedon saa WGS84/NMEA-standardisoituna tietona ulos. Nykyaikaiset järjestelmät takaavat hyvin tarkan paikkatiedon (+-5 m), jolla saadaan hyvä tarkkuus suhteessa yhteysväleihin, jotka voivat olla jopa kymmeniä kilometrejä.

Järjestelmien ainoa heikkous on oikeastaan se, että ne eivät oikein ymmärrä todella hitaasti (alle 1 km/h) liikkuvan tukiaseman eroa paikoillaan olevaan. Tällöin esimerkiksi mittaustuloksia kartalle siirrettäessä liikkumatta ollut tukiasema voi näyttää tehneen jatkuvaa pientä liikettä. Tällöin paikallaan olevan tukiaseman tietoja kannattaa katsoa vain yhden, eniten esiintyneen paikkatiedon kannalta.

Liikkuvan pään paikkatiedon tallentamisessa voi esiintyä seuraavia ongelmia: suoralla linjalla paikkatiedon arvon vaihteleminen paikallaan pysyvän koordinaatin akselilla (vaikuttaa etäisyyteen), paikkatiedon jumittuminen liikkuessa ja tämänr seurauksena myös mutkien oikomista, kun paikkatieto jää hetkeksi paikoilleen ja liikkuvan tukiaseman pää tekee käännöksen. [32.]

8 SUORITUSKYVYN MITTAAMINEN SEKÄ DOKUMENTOINTI.

TAC WIN -järjestelmässä, kuten muissa järjestelmissä tehokkain tapa varmistaa verkon suorituskyky on radiolaitteesta riippumatta, suorittaa kuuluvuus- sekä tiedonsiirtomittaus määritetyllä etäisyydellä. Testaamisessa voidaan käyttää staattista tai dynaamista asennusta. Staattisella tarkoitetaan stabiilia verkkoa, jossa kaksi asemaa ovat paikallaan määritellyllä etäisyydellä, dynaamisella taas verkkoa, jossa toinen asema on paikallaan ja toinen liikkuu (mobiili).

Dynaaminen verkko mahdollistaa yhdellä testillä useita havainnoitavia määreitä monilla eri etäisyyksillä, katvealueilla sekä nopeuksilla. Staattisella, yleensä pidempiaikaisella testillä saadaan arvoja, joihin voidaan verrata mahdollisia ympäristömuuttujia.

Radioverkoissa, kuten kaikilla siirrettävillä digitaalisilla signaaleilla, on tiettyjä arvoja, joita mittauksissa pitää ottaa huomioon. Yleisimmät arvot ovat RSSI, kentän voimakkuus, sekä CINR, signaalin laatu.

Measurement Viewer (myöhemmin MV) on Elektrobitin kehittämä mittaustyökalu, jolla saadaan tarkkoja mittaustietoja järjestelmästä (taulukko 4), käyttäen tukena tarkkaa GPS-aikaa sekä GPS-paikkatietoa. Ohjelmisto on myös helposti muokattavissa erilaisia järjestelmiä varten. TAC WIN -järjestelmän mittauksissa tallennetaan tietoa seuraavista muuttujista tukiasemakohtaisesti, sekä myös toisen, määritetyn tukiaseman (Tx-suunta) näkemä tieto, mikäli ilmateitse kulkevat kontrolliviestit sen mahdollistavat.

Taulukko 4. Measurement Viewerin tallentamat solmukohtaiset arvot.

RSSI	RSSI-arvo desibeleinä
Tx RSSI	Tx-pään RSSI-arvo desibeleinä
CINR	RSSI-arvo desibeleinä
Tx CINR	Tx-pään RSSI-arvo desibeleinä
RxModulation	Lähetyksessä käytettävä modulaatio
TxModulation	Vastaanotossa käytettävä modulaatio
Rx data rate/kB	Vastaanotetun tiedonsiirron datanopeus
Tx data rate/kB	Lähetetyn tiedonsiirron datanopeus

MV hoitaa myös tiedonsiirron solmujen välillä. Tiedonsiirrossa käytetään FTP-protokollaa ja käyttötarkoituksen suhteen räätälöidyn kokoisia tiedostoja, joita voidaan solmukohtaisesti määritellä, halutaanko ladata (download) vai lähettää (upload) tiedostoja. MV tarvitsee tiedonsiirtoa varten FTP-palvelimen toiseen mittauspäähän. Palvelin määritetään sen IP-osoitteen perusteella, jotta FTP-tiedostoja voidaan siirtää. MV tallentaa mittauksen tiedot XML (eXtensible Markup Language)-tiedostoksi, jossa on selvästi jokainen arvo omalla nimellään varustetussa XML-headerissa.

XML:n ominaisuuksien käyttö varmistaa, että tiedot ovat selvästi luettavissa jälkikäteen ja tiedetään jokaisen arvon olevan oikeassa kohdassa. Tämä tuo luotettavuutta datan lukemiseen, verraten vaikkapa joissain sovelluksissa käytettäviin pisteellä tai välilyönneillä erotetun datan lukemiseen.

8.1 Riittävät mittaukset suorituskyvyn todistamiseen

Mittaustiedon lisäksi MV tallentaa globaaleja naapuritukiasemista riippumattomia arvoja lokiin. Noita arvoja ovat UTC-aika, WGS84-standardin malliset koordinaatit sekä oman tukiase-

man nopeus. Kellonaika sekä koordinaatit ovat tärkeitä, jotta saadaan mahdolliset samanaikaiset toisten tukiaseman lokit synkronoitua sekä määritettyä tukiaseman paikka kartalla, ja tätä kautta laskettua etäisyydet tukiasemien välillä.

8.2 Mittausjärjestelyt

Mittausjärjestelyissä on otettava huomioon testien täsmällisyys ja muuttujien minimointi. Käytännössähän P2P-mittausjärjestelyyn ei TAC WIN -järjestelmän IP-tuen myötä tarvita kuin kaksi mittauskäyttöön tarkoitettua PC:tä sekä niihin sopivat ohjelmistot. Mittausjärjestelyissä, kuten kaikessa langallisissa järjestelmissä, on tärkeää että kaikki liittimet, jatkojohdot sekä itse kaapelit ovat kunnossa Testitavan ja radiotyypin mukaan myös antennien suuntaus testin mukaan on tärkeää.

8.3 Mittauksien dokumentointi ja esittäminen

MV tallentaa muuttujia mittauksesta XML-tiedostoon ja sääasema puolestaan hoitaa säätiedon tallennuksen. Mittauksien aikaisella dokumentoinnilla taataan esimerkiksi säätietojen oikeellisuus, ja pystytään vertaamaan muuttujiin mitä säätiedot ei välttämättä kerro. Tietoa esimerkiksi lumen tai lehtien määrästä puustossa kun ei voida sääasematiedoilla saada kerättyä.

8.4 Tehokkaat esitystavat

Seuraavassa kuvataan, kuinka mittauksia pitäisi esittää ja millainen mittauslokin tehokas muoto täytyisi olla lopullista ja joustavaa esitystä varten. XML-tiedostoissa on omat puolensa tiedon säilytykseen, muttei se ole niin joustava siirrettäessä ja luettaessa tietoa eri ohjelmilla ilman XML-tiedon parsimista. Esitykseen on siis tehokkaampaa käyttää XML:n rinnalla CSV-tiedos-

toa (Comma Separated Value) tai vastaavaa yksinkertaista muotoa. Tuolloin tieto on tallennettuna tavalliseen tekstitiedostoon, eroteltuna pilkuilla, pisteillä, välilyönneillä tai rivinvaihdoilla. Myös eri ohjelmilla avaaminen käy helpommin ja kevyemmin, 30 riviä XML-arvoja voi mahtua yhteen riviin tekstiä.

8.4.1 Microsoft Excel

Excel on tuttu ohjelmisto kaikille tietokoneen peruskäytön hallitseville. Excel on taulukkolaskentaohjelma, jossa tekstiä ja arvoja voidaan sisällyttää yksittäisiin soluihin. Excelin ominaisuudet mahdollistavat esimerkiksi samalla sarakkeella sijaitsevien solujen siirtämisen suoraan kuvaajaan. Tällöin aikatasossa tallennetut lokin arvot saadaan suoraan piirrettyä aika-arvokuvaajaan. Lisäksi useita arvoja voidaan lisätä samaan kuvaajaan, sekä kuvaajan ja arvojen ominaisuuksia voidaan muotoilla monipuolisesti.

Lisäksi on olemassa ilmainen Windows-käyttöjärjestelmän OpenOfficen Calc, sekä Linux-käyttöjärjestelmissä hyvin yleinen LibreOfficen Calc-taulukkolaskentaohjelma. Ohjelmat sisältävät yhteensopivuuden ja käytännössä hyvin pitkälti samat ominaisuudet kuin Microsoft Excel.

8.4.2 Matlab

The Mathworks -yhtiön Matlab (Matrix Laboratory) on korkean tason ohjelmointikieli sekä interaktiivinen ympäristö numeraalista laskemista varten. Matlabissa voidaan tehokkailla sisäänrakennetuilla funktioilla visualisoida ja ohjelmoida monipuolisia eri järjestelmiä. Ohjelma on suosittu signaalinkäsittelyssä, videoprosessoinnissa sekä erilaisissa mittaus- sekä testijärjestelmissä. Matlabissa käytetään muun muassa M-funktioita, tiedostoja joilla ajetaan haluttua koodia. Funktiot sisältävät myös mahdollisuuden syöttää tiedostoja suoraan funktion avausvaiheessa, ja tämä ominaisuus tuo joustavuutta monien eri lokitiedostojen analysointiin.

Hieman samankaltaisesti kuin Excelissä, saa Matlabissa halutun tiedoston luettua omiin muuttujiinsa kuten soluarvot ja -akselit Excelissä. Tällöin eri solujen arvojen monipuolinen käyttäminen on helppoa. Lisäksi Matlabiin sisältyvillä erilaisilla kuvaajamalleilla voidaan tehdä huomattavasti Exceliä monipuolisempia kuvaajia. [33.]

Google Earth & GEPlot

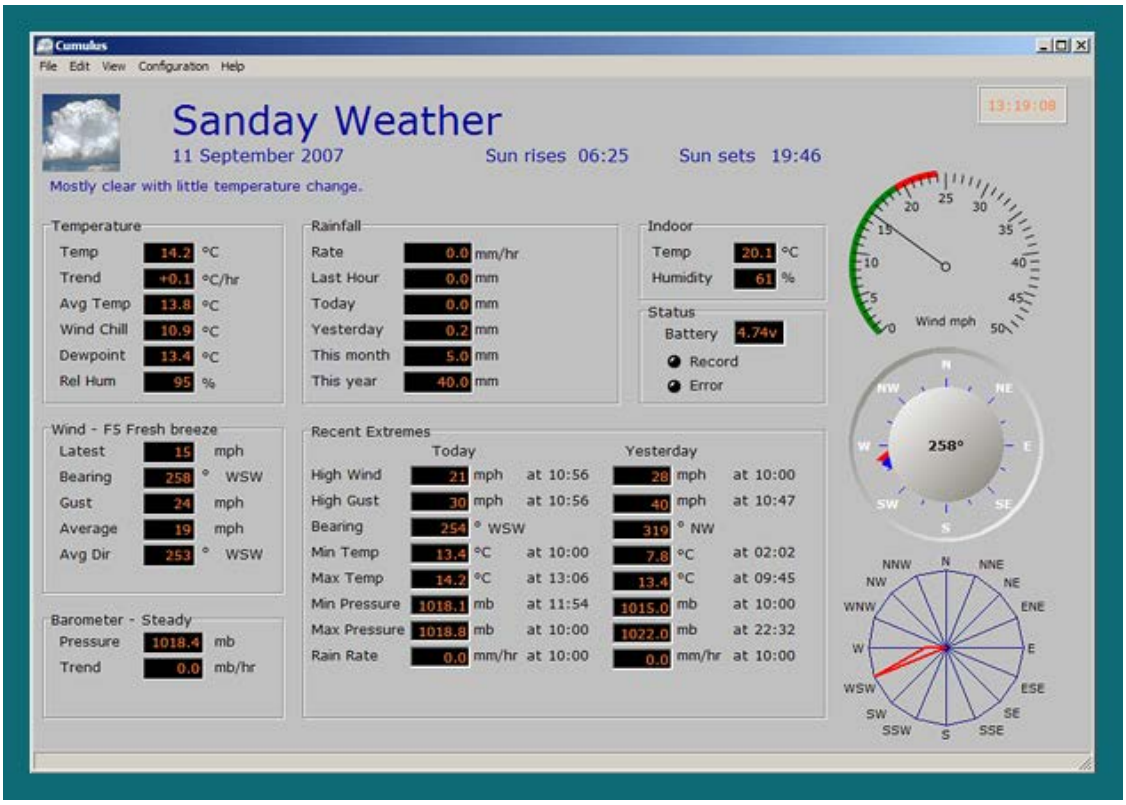
GePlot (Google Earth Plot) on yleisesti käytössä oleva ohjelma- ja kirjastonimike. Matlabiin löytyvä GEplot-kirjasto on yksi Matlabille tarjottavista ilmaisista kirjastoista. GEplot mahdollistaa mittauslokista löytyvän paikkatiedon kääntämisen suoraan KML-tiedostoksi. Tiedostotyyppi on yleinen Google Earthissa avattava koordinaattipistetiedosto. Tällöin ajoreitin ja mittauspaikat saadaan suoraan mittauslokista Google Earth -ohjelmaan ja sen karttaan sekä tallennettua itse karttakuva talteen. [34.]

8.5 Sääasemat ja säätiedon tallentaminen

Mittauksien tukena käytettiin säätietojen tarkkailuun ja tallentamiseen Davis Vantage Pro 2 -sääasemaa (myöhemmin sääasema) (kuva 16) sekä Cumulus-sääasemaohjelmistoa (kuva 17).

Kuva 16. Davis Vantage Pro 2 -sääasema. [35.]

Davis-sääasema mahdollistaa säätiedon reaaliaikaisen lukemisen ja tallentamisen olennaisimmilla ympäristötekijöillä, esim. lämpötila, kosteus, ilmanpaine, tuulen nopeus sekä suunta. Lokitietojen tallentamisintervalliksi voidaan valita 1, 5, 10, 15, 30, 60 tai 120 minuuttia. Sää ei kuitenkaan muuttujana ole kovin nopea Suomen olosuhteissa, joten intervallina voidaan käyttää viittä minuuttia. Sääaseman mallin mukaan tietojen tallennus tapahtuu suoraan verkkoon, sääasemaan itseensä, tai sääasemaan suoraan kytkettyyn PC:hen. [35, 36.]



Kuva 17. Cumulus-sääohjelmiston käyttöliittymä. [36.]

Cumulus mahdollistaa säätiedon tallentamisen suoraan PC:lle. Tällöin säätiedot ovat tallennettuna kuukausittaiseen tai vuotuiseen lokiin, josta ne on helposti jäsennettävissä halutun päivämäärän ja kellonajan mukaan. Lisäksi sen käyttöliittymä tarjoaa selkeän näkymän reaaliaikaiseen sään seurantaan, sekä kattavat kuvaajat jo tallennettujen säätietojen analysointiin.

9 TESTIEN TOISTETTAVUUS

Aina kun suoritetaan suorituskyky- tai muita tärkeitä mittauksia, on tärkeää varmistaa testien toistettavuus. Toistettavuudella tarkoitetaan sitä, että testaus pystytään luotettavasti järjestämään uudestaan samalla tavoin minimoimalla muuttujat. Tällöin laitteiston ja laiteasennuksien täytyy olla testattuja sekä ja kentällä tehtävien mittauksien paikkatiedon täytyy olla sama kuin aiemmin. Yleensä kenttätestitulokset säilytetään referenssinä tallessa, joten ne pystytään varmuudella suorittamaan samankaltaisesti. Toistettavuuden takia on hyvä tehdä aina niin sanottu referenssimittaus testauksien alussa. Aivan kuten mittalaitteet yleensä kalibroidaan ennen tärkeitä testejä, testaamisen alussa käytettäisiin aina jo toimivaksi tiedettyä laitteistoa ja ohjelmistoversiota. Täten voidaan jo suoraan huomata mahdolliset selkeät virheet mittauksissa.

9.1 Tulokset

Tuloksille on hyvä tehdä yhteneväinen, sekä helposti vertailuun taipuva esitysmuoto. Tällöin voidaan samassa testiympäristössä tai -kohteessa suoritettujen testien tuloksia vertailla luotettavasti. Selkeä dokumentointi jo reaaliaikaisesti testien aikana sekä muutoksien merkitseminen heti niitä tehtäessä antavat luotettavuutta tuloksien arviointiin.

9.2 Epätarkkuuksien estimointi

Epätarkkuuksia esiintyy käytännössä kaikissa tietoteknisissä järjestelmissä. Niiden estimoinnissa on tärkeää selvittää eri osa-alueet, missä mittausvirheitä voi mittausepävarmuuden takia syntyä. Langattoman järjestelmän testaamisessa virheisiin sisältyvät sekä systemaattiset (laitteistosta johtuvat kiinteät virheet) että satunnaisvirheet (ympäristöstä johtuvat ei-toistuvat virheet). Käsitteenä mittausepävarmuus kattaa kaikki mittauksen virheet (kasautumislaki), pois lukien systemaattiset virheet.

Epätarkkuuksia syntyy useista virhelähteistä. Vaikuttavana tekijänä voivat olla kaapeloinnit, paikkaepävarmuus sekä itse laitteisto. Niiden estimointi suoranaisesti on vaikeaa, mutta testeistä saatavalla kokemuksella voidaan käsittää mahdollisesti syntyvät ja toistuvat virheet ja siten poissulkea niiden vaikutuksia. Mittausvirheen koostuessa useista eri lähteistä on syytä miettiä, mikä tai mitkä kyseisistä virheistä ovat eniten merkitseviä mittausepävarmuuden kannalta. [37.]

10 PARANNUSEHDOTUKSET

Yllä mainitut testimenetelmät ovat oikein dokumentoituna ja käytettynä hyvin tehokkaita. TAC WIN -järjestelmän joustavuus mittaustiedon kannalta mahdollistaisi Measurement Viewer -ohjelmiston laajemman käytön ohjelmistoa hieman muuttamalla. Tällöin laitteelta saataisiin suoraan tallennettua useampia eri muuttujia ja käyttäjästä riippuvat vaiheet vähenisivät sekä luotettavuus paranisi.

Kenttätestauksia voidaan joutua suorittamaan vaihtuvien sääolosuhteiden takia hyvin nopealla aikataululla. Tällöin jo hyvissä ajoin on syytä tehdä aluksi kattava testaussuunnitelma. Mahdollisien eri variaatioiden ja yksilöllisien testien riittävä erittely antaa valmiudet itse testaamisen sujuvaan suorittamiseen tiiviillä aikataululla. Kenttätesteissä on myös syytä aina suorittaa testauksen pohjaksi ensimmäinen testi jo hyväksi havaituilla laitteistoilla ja ohjelmistoilla.

11 YHTEENVETO

Langattomien järjestelmien kehittyminen on ollut huimaa edellisen vuosisadan aikana. Erityisesti tiedonsiirto ja suurien verkkojen mahdollistaminen laitteilla on tullut merkittäväksi tekijäksi. Langattomien järjestelmien yleistyessä myös niiden testaaminen on noussut tärkeäksi toiminnollisuuden kannalta. Laboratorio-olosuhteissa hyväksi havaittu laite ei välttämättä aina toimikaan luonnossa, ympäristön eri vaikutusten alaisena.

Testausohjelmat ja -laitteet ovat yleistyneet itse järjestelmien rinnalla, mutta ovat yleensä laitekohtaisia tai tietyiltä ominaisuuksilta rajoitettuja. Vaikka erilaisilla kaupallisilla analysaattoreilla saadaan tehokkaasti langattomien järjestelmien teho ja muut ominaisuudet testattua, ei välttämättä itse laitteiston toimivuutta voida testata kuin laitteistoa itse käyttämällä.

Työ antaa perusvalmiudet tehokkaaseen testaamiseen oikeassa ympäristössä, ja ottaa huomioon asioita, joita ei välttämättä heti testaamiseen ryhtyessä osaa arvioida. Työn pääpaino on ollut asioiden tarkastelu kenttätestien näkökulmasta ja itse perustoiminnallisuuksiin perehtymisessä. Työn lopputulos täyttää sille asetetut tavoitteet ja vaatimukset

LÄHTEET

1. Brown William C, 9.9.1984 The History of Power Transmission by Radio Waves, [PDF-dokumentti]

2. About.com, The Invention of Radio, [WWW-dokumentti] <http://inventors.about.com/od/rstartinventions/a/radio.htm>(Luettu 15.4.2014)

3. Berkeley Lab. Electromagnetic Spectrum , [WWW-dokumentti] <http://www.lbl.gov/MicroWorlds/ALSTool/EMSpec/EMSpec2.html> (Luettu 14.4.2014)

4. Wikipedia.org, Radio Spectrum, [WWW-dokumentti] <http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum> (Luettu 20.5.2014)

5. Elektrobit 2013, EB Tactical Wireless IP Network (TAC WIN) , [WWW/PDF-dokumentti] <www.elektrobit.com/download/3886/brochure_eb_tactical_wireless_ip_network> (Luettu 20.5.2014)

6. Kosola Jyri, Solante Tero, Digitaalinen Taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka, 3. painos ISBN 978-951-25-2503-4. [WWW-dokumentti] <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94298/DigTstK%203.%20painos%20verkkoversio.pdf?sequence=2> (Luettu 20.1.2015)

7. McLarnon, Barry, 1997, VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters, [WWW-dokumentti] <http://www.tapr.org/ve3jf.dcc97.html> (Luettu 20.4.2014)

8. Zytrax Inc. 22.9.2013, Fresnel Zones and their Effect, [WWW-dokumentti] <http://www.zytrax.com/tech/wireless/fresnel.htm> (Luettu 20.4.2014

9. Inverse Square Law, HyperPhysics, Georgia State University, [WWW-dokumentti] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/isq.html> (Luettu 15.1.2015)

10. Thomasson M. Ray, Nation Larry, AAPG, 1996. Understanding the Fresnel Zone, [WWW-dokumentti] <http://www.searchanddiscovery.com/documents/geophysical/sheriff/index.htm> (Luettu 20.4.2014)

11. Digi International Inc, Fresnel zone details, [WWW-dokumentti] <http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2090> (Luettu 20.4.2014)

12. Wikipedia.org, RSSI, [WWW-dokumentti] <http://en.wikipedia.org/wiki/Received_signal_strength_indication> (Luettu 15.4.2014)

13. Wikipedia.org, CINR/SINR, [WWW-dokumentti] <http://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-interference-plus-noise_ratio> (Luettu 15.4.2014)

14. Larsson Ashley, Piotrowski Andrew, Giles Timothy, Smart Darryn, Department of Defence, Near-Earth RF Propagation – Path Loss and Variation with Weather [PDF-dokumentti]

15. Mitchell Bradley, About.com, Network Topologies, [WWW-dokumentti] <http://compnetworking.about.com/od/networkdesign/ig/Computer-Network-Topologies/> (Luettu 17.4.2014)

16. Tallinn University, Verkkojen maailma, [WWW-dokumentti] <http://www.tlu.ee/~matsak/telecom/lasse/telecom_network/index.html> (Luettu 19.4.2014)

17. TechTerms.com, MANET, , [WWW-dokumentti] <http://www.techterms.com/definition/manet> (Luettu 20.4.2014)

18. Radio-Electronics.com. Radio Frequency, RF, Technology and Design, [WWW-dokumentti] <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/> (Luettu 20.4.2014)

19. Princeton University, Phase Shift Keying , [WWW-dokumentti] <http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Phase-shift_keying.html> (Luettu 20.4.2014)

20. Zafar Adnan, Farooq S. Zaineb, 29.11.2008 Implementation and analysis of QPSK & 16QAM modulator & demodulator , [PDF-dokumentti]

21. InetDaemon Enterprises, Signal Constellations 6.4.2014, , [WWW-dokumentti] <http://www.inetdaemon.com/tutorials/basic_concepts/communication/signals/constellation.shtml> (Luettu 20.4.2014)

22. Wikipedia.org, Constellation diagram 11.6.2013, [WWW-dokumentti] <http://en.wikipedia.org/wiki/Constellation_diagram> (Luettu 20.4.2014)

23. Wisegeek, What Is Channel Coding?, [WWW-dokumentti] <http://www.wisegeek.com/what-is-channel-coding.htm> (Luettu 20.4.2014)

24. Radio-Electronics.com. BER Bit Error Rate Tutorial and Definition, [WWW-dokumentti] <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ber/bit-error-rate-tutorial-definition.php> (Luettu 20.4.2014)

25. Wolff Christian, Radartutorial [WWW-dokumentti] <http://www.radartutorial.eu/06.antennas/_an01.en.html> (Luettu 21.4.2014)

26. Telsaspa.it Vehicular UHF Antenna T01110616 2014 [WWW/PDF-dokumentti] <http://telsasrl.sfera.net/wp-content/uploads/2013/11/T01110616-DS-00.pdf> (Luettu 25.4.2014)

27. Agilent E5061B ENA Series Network Analyzer 26.8.2013 [WWW-dokumentti] <http://www.keysight.com/en/pd-1668980-pn-E5061B/ena-series-network-analyzer>(Luettu 21.4.2014)

28. Wikipedia.org, N-connector [WWW-dokumentti] <http://en.wikipedia.org/wiki/N_connector> (Luettu 20.4.2014)

29. Cisco, TCP/IP overview, 10.8.2005 [WWW-dokumentti] <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/routing-information-protocol-rip/13769-5.html> (Luettu 22.4.2014)

30. Takahashi Shogo, Arai Masayuki Graduate School of Science & Engineering Teikyo University 27.9.2012. Development and Evaluation of Visualization Tools for Understanding the Control Method of TCP Packet Arrival Order and the Difference between TCP and UDP [PDF-dokumentti]

31. Chang Zhijiang, Gaydadjiev Georgi Computer Engineering Laboratory, Delft University of Technology 25.8.2012. On improved MANET network utilization [PDF-dokumentti]

32. Paz-Soldan Valerie A., Strengths and Weaknesses of Global Positioning System (GPS) 12.6.2014 [WWW-dokumentti] <http://journals.plos.org/plosntds/article?id=10.1371/journal.pntd.0002888> (Luettu 20.8.2014)

33. Mathworks, Matlab 2014 [WWW-dokumentti] <http://www.mathworks.se/products/matlab/> (Luettu 22.4.2014)

34. Palacios Rafael, GePlot 21.2.2008, [WWW-dokumentti] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12948-geplot> (Luettu 23.4.2014)

35. Davis Instruments, Vantage Pro 2, [WWW-dokumentti] <http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-234_IM_06312.pdf> (Luettu 24.4.2014)

36. Sandaysoft, Cumulus Weather Station Software 20.7.2014, [WWW-dokumentti] <http://sandaysoft.com/products/cumulus> (Luettu 24.4.2014)

37. Jyväskylän Yliopisto, Mittausvirheistä, [WWW-dokumentti] <https://www.jyu.fi/fysiikka/opiskelu/tyoosasto/mittausvirhe.html> (Luettu 10.12.2014)