

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknistaloudellinen tiedekunta
Tietotekniikan koulutusohjelma

Juho Vartiainen

**LANGATTOMAN TIETOLIIKENNEVERKON
TOTEUTTAMINEN SATAMA-ALUEELLE**

Tarkastajat: Dosentti Jouni Ikonen

FM Jukka Soininen

Ohjaaja: FM Jukka Soininen

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology Management
Degree Program of Information Technology

Juho Vartiainen

Applying a wireless network to a harbour area

Thesis for the Degree of Master of Science in Technology

2009

58 pages, 19 figures, 13 tables

Examiners: Adjunct Professor Jouni Ikonen
M.Sc Jukka Soininen

Keywords: WiMAX, harbour, weather conditions, propagation models

A wireless WiMAX network based on IEEE 802.16-2004 standard is applied to a harbour area and suitability of propagation models for the area are studied. Other network solutions are also considered. Effects of different weather conditions and movement speed of user terminal are also studied. The harbour area includes steel containers that complicate propagation of wireless signals. Stacked containers maintain a certain maximum height because of machinery's limited ability to stack them.

Different propagation models have been developed to describe propagation of wireless signals in different environments. Propagation models can be used to predict signal strength at different distances from the base station. Propagation models include different variables that are used to describe fading caused by different environmental characteristics.

Wireless network was applied and implementation including problem situations was documented. Signal strength measurements were performed and a suitable propagation model was found. Variables for the propagation model were calculated using measured values. Fading caused by weather conditions and movement speed of user terminal was also studied. Attenuation caused by rain, snowfall and fog was found to be insignificant at the networks operational frequency, 3.5 GHz. The machinery's maximum speed is 20-30 kilometres per hour, and it was found not to affect the functionality of the network.

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknistaloudellinen tiedekunta
Tietotekniikan koulutusohjelma

Juho Vartiainen

Langattoman tietoliikenneverkon toteuttaminen satama-alueelle

Diplomityö

2009

58 sivua, 19 kuvaa, 13 taulukkoa

Tarkastajat: Dosentti Jouni Ikonen
FM Jukka Soininen

Hakusanat: WiMAX, satama, sääolosuhteet, etenemismallit
Keywords: WiMAX, harbour, weather conditions, propagation models

Tässä työssä toteutetaan IEEE 802.16-2004 standardiin perustuva langaton WiMAX tietoliikenneverkko, sekä tutkitaan etenemismallien soveltuvuutta satama-alueelle. Myös muiden verkkoratkaisujen soveltuvuutta pohditaan. Lisäksi tutkitaan sääolosuhteiden sekä päätelaitteen liikkumisnopeuden vaikutuksia yhteyteen. Satama-alueella on teräksistä valmistettuja merikontteja pinottuina päällekkäin, ja ne vaikeuttavat langattomien signaalien etenemistä. Merikonttien pinot säilyttävät tietyn maksimikorkeuden johtuen työkoneiden rajallisesta kyvystä pinota niitä.

Langattomien signaalien etenemiselle erilaisissa ympäristöissä on kehitetty etenemismalleja. Etenemismallien avulla voidaan pyrkiä ennustamaan signaalin vahvuutta eri etäisyyksillä tukiasemasta. Etenemismallit kuvaavat ympäristön aiheuttamaa signaalin vaimenemista erilaisten muuttujien avulla.

Langattoman tietoliikenneverkon toteutus ongelmatilanteineen dokumentoitiin ja alueella tehtiin kuuluvuusmittauksia. Löydettiin etenemismalli ja muuttujat, joiden avulla lasketut tulokset vastasivat mitattuja tuloksia hyvin. Myös sääolosuhteiden sekä päätelaitteen liikkumisnopeuden vaikutusta signaalin vahvuuteen tutkittiin. Vesi- ja lumisateen sekä sumun vaikutuksen todettiin olevan merkityksellisen verkon käyttämällä 3.5 GHz taajuusalueella. Myöskään päätelaitteen liikkumisnopeuden ei todettu vaikuttavan toiminnallisuuteen 20-30 kilometrin tuntinopeudella, jolla työkoneet alueella liikkuvat.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 TEKNIIKAT	10
2.1 VAIHTOEHTOISET TEKNIIKAT.....	10
2.2 WIMAX	12
2.2.1 IEEE 802.16-2001	12
2.2.2 IEEE 802.16-2004	13
2.2.3 IEEE 802.16e-2005	14
2.3 SIGNAALIEN ETENEMINEN.....	14
2.4 ANTENNIT	16
3 AIEMPI TUTKIMUS JA TEORIA.....	18
3.1 ETENEMISMALLIT.....	18
3.1.1 VAPAAN TILAN VAIMENEMINEN.....	18
3.1.2 HATA -MALLI.....	19
3.1.3 COST 231 HATA -MALLI.....	19
3.1.4 COST 231 WALFISCH-IKEGAMI -MALLI.....	20
3.1.5 MUITA ETENEMISMALLEJA JA TUTKIMUKSIA.....	22
3.2 SÄÄOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS SIGNAALIEN ETENEMISEEN....	25
3.3 PÄÄTELAITTEEN LIIKKUMISNOPEUDEN VAIKUTUS SIGNAALIN LAATUUN	27
4 ASENNUKSET JA MITTAUKSET	28

4.1 PÄÄTELAITE	31
4.2 KUULUVUUSMITTAUKSET	32
4.3 DATANSIIRTO MITTAUKSET	39
5 ETENEMISMALLIEN SOVELTUVUUS SATAMAYMPÄRISTÖÖN.....	43
5.1 VAPAAN TILAN VAIMENEMINEN	43
5.2 HATA -MALLI	44
5.3 COST 231 HATA -MALLI	45
5.4 COST 231 WALFISH-IKEGAMI -MALLI.....	46
5.5 MUUT ETENEMISMALLIT	47
5.6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	50
5.7 VERKON PEITTOALUE.....	53
6 YHTEENVETO	54
LÄHDELUETTELO	56

LYHENNELUETTELO

3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
AAS	Adaptive Antenna System
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
DL	Downlink
FSPL	Free-Space Path Loss
GPS	Global Positioning System
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IDU	Indoor Unit
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISI	Intersymbol Interference
ITU-R	International Telecommunication Union Radio Communication Sector
LED	Light Emitting Diode
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
NC	Network Controller

NLOS	Non-Line of Sight
ODU	Outdoor Unit
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PER	Packet Error Rate
PMP	Point-to-Multipoint
PoE	Power over Ethernet
PTP	Point-to-Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RFU	Radio Frequency Unit
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SAU	SU Alignment Unit
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SU	Subscriber Unit
TEU	Twenty foot Equivalent Unit
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web

1 JOHDANTO

Työ tehdään Steveco OY nimiselle satamaoperaattorille Kotkan Mussalon satamaan. Satamaan toteutetaan WiMAX tietoliikenneverkko, jonka avulla yrityksen sovelluksia käytetään työkoneissa. Satama on haastava ympäristö langattomille tekniikoille. Useaan kerrokseen päällekkäin pinotut teräksiset merikontit joiden sijoittelu muuttuu koko ajan sekä suuret työkoneet tuovat omat haasteensa langattomien signaalien etenemistä koskien. Työssä tehdään mittauksia, joilla selvitetään verkon kuuluvuutta sataman eri osissa. Langattomien signaalien etenemiselle erilaisissa ympäristöissä on esitetty useita eri malleja, joiden soveltuvuutta satamaympäristöön tutkitaan. Myös eri sääolosuhteiden vaikutuksia kuuluvuuteen tutkitaan. Tarkoituksena on löytää satamaympäristölle ominaisia vaikeuksia langattomien signaalien etenemistä koskien.

Työn osiossa 2 käydään läpi työn kannalta oleelliset tekniikat. Osio 3 käsittää aiempia tutkimuksia etenemismalleista sekä sään vaikutuksesta langattomien signaalien etenemiseen. Osiossa 4 käydään läpi asennukset ja mittaukset, sekä osiossa 5 tutkitaan etenemismallien soveltuvuutta satamaympäristöön. Osio 6 on yhteenveto työstä ja saavutetuista tuloksista.

Tässä työssä kyseessä oleva Kotkan Mussalon satama (kuva 1) koostuu suurimmilta osin teräksisistä merikonteista (kuva 2) ja varastorakennuksista. Alueella on osittain meren ympäröimä konttikenttä, joka jakautuu useihin kaistoihin, joissa on merikontteja pinottuna päällekkäin. Merikonttien pääasialliset pituudet ovat 6,10 m (20 jalkainen) ja 12,19 m (40 jalkainen) ja korkeudet 2,62 m ja 2,93 m.



Kuva 1: Mussalon satama

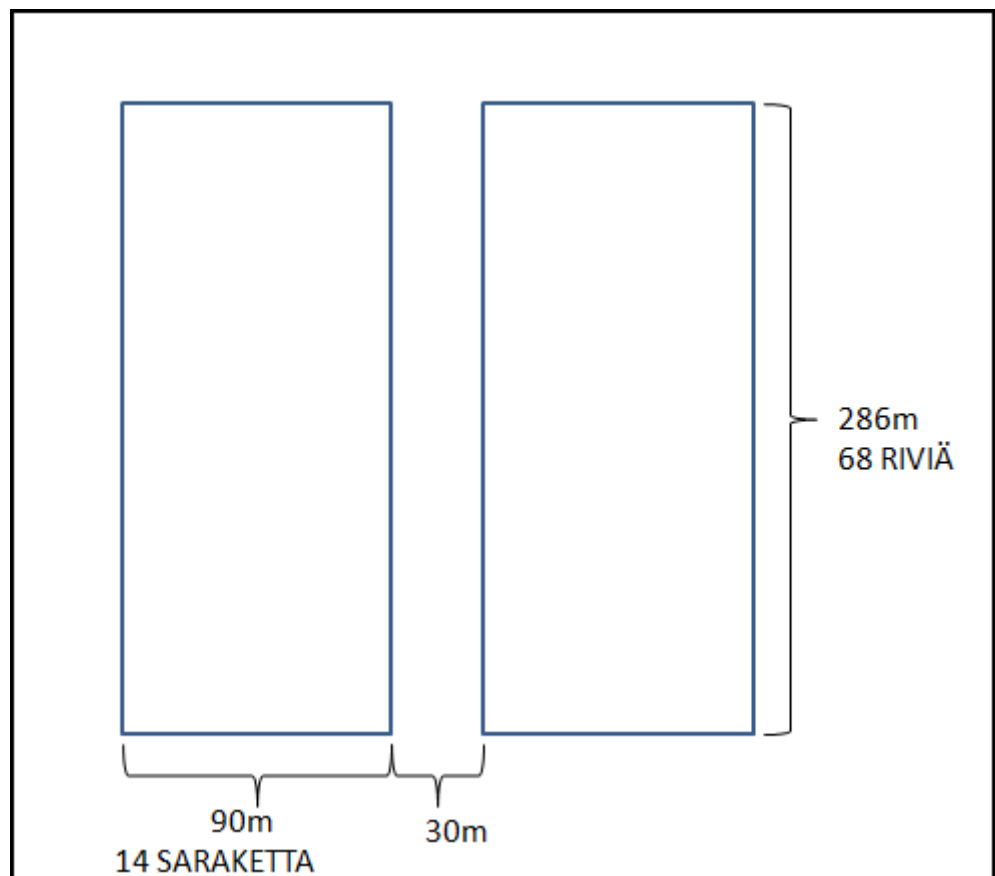


Kuva 2: Merikontteja

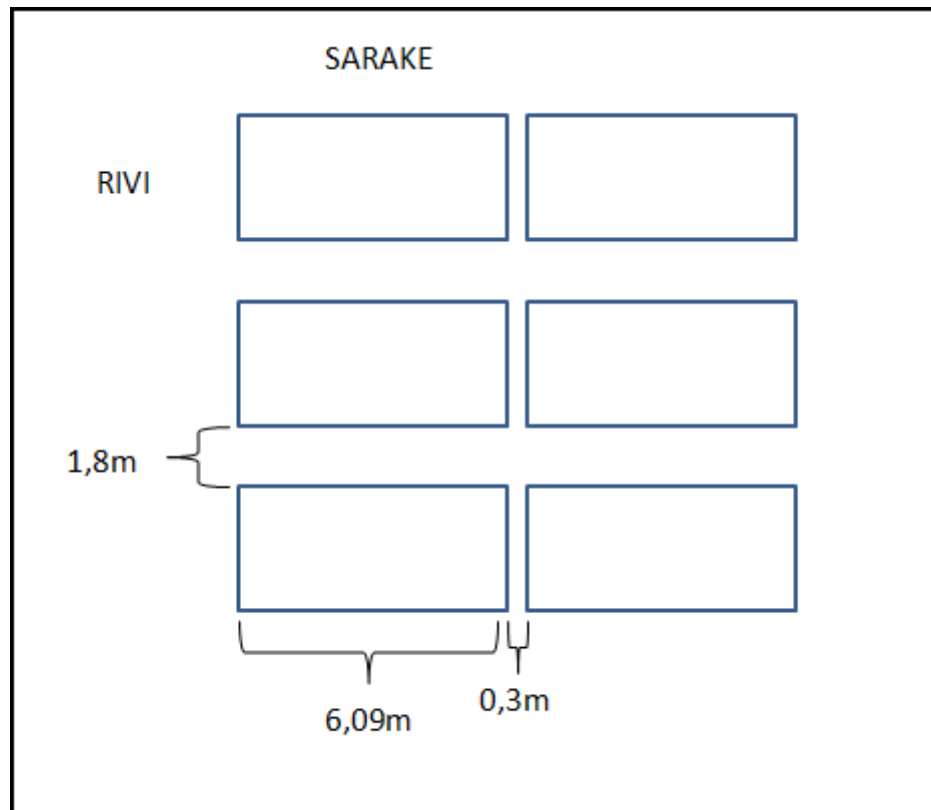
Ympäristöllä on hyvin dynaaminen luonne, sillä merikontit vaihtavat paikkaansa jatkuvasti. Alueella liikkuu myös suuria työkoneita, nostureita sekä laiturilla on laivoja. Täysin hallitsematon ympäristö ei kuitenkaan ole, sillä alueet joille merikontit varastoidaan säilyttävät tietyn maksimikorkeuden johtuen työkoneiden rajallisesta kyvystä pinota niitä. Suurimmalla osalla

alueesta merikontteja on kahdessa kerroksessa, mutta alueella on myös paikkoja joihin tyhjiä merikontteja on pinottu 5-7 kerrokseen.

Suurin osa konttikentästä on aluetta josta merikontteja ajetaan nosturille tai nosturilta konttikentälle lukeilla, riippuen siitä puretaanko laivaa vai lastataanko sitä. Lukit ovat yli 10m korkeita koneita, jotka pystyvät pinoamaan merikontteja maksimissaan kolmea päällekkäin. Alue koostuu kuvan 3 mukaisista alueista, joille merikontit varastoidaan kuvan 4 mukaisesti. Tiettyyn riviin varastoidaan joko 40 tai 20 jalkaisia merikontteja, mutta ei koskaan molempia. 40 jalkainen merikontti vie kaksi 20 jalkaisen merikontin paikkaa. 20 jalkainen merikontti on konttiliikenteen perusyksikkö jota kutsutaan nimellä TEU.



Kuva 3: Merikonttien varastointi alueet



Kuva 4: Merikonttien sijoittelu alueilla

Satama-alueelle toteutetaan IEEE 802.16-2004 standardin (IEEE Std.802.16-2004, 2004) mukainen WiMAX tietoliikenneverkko, joka avulla työkoneissa käytetään yrityksen sovelluksia. Kyseessä olevan standardin mukaiset laitteet eivät tue saumatonta siirtymistä tukiasemalta toiselle, minkä takia tutkitaan pystytäänkö koko satama-alue kattamaan yhdellä tukiasemalla. Tutkimuskohteena on myös tuottaako työkoneiden liikkuminen ongelmia yhteydelle. Työkoneet liikkuvat noin 20-30 kilometrin tuntinopeudella.

Verkon toimivuuden lisäksi selvitetään miten langattomille signaaleille esitetyt etenemismallit soveltuvat satamaympäristöön. Etenemismallien avulla voidaan pyrkiä ennustamaan kuuluvuutta eri välimatkoilla tukiasemasta päätelaiteeseen. Myös sääolosuhteiden, kuten lumi- ja vesisateen vaikutusta kuuluvuuteen tutkitaan.

Alueella on myös varastorakennuksia, joissa merikontteihin lastataan tavaraa. Näiden sisälle WiMAX tietoliikenneverkon ei tarvinnut kuulua, sillä ne katettiin WLAN tietoliikenneverkolla. Tämä lähinnä siitä syystä että kannettavia päätelaitteita joilla varastoissa työskennellään, ei ollut saatavilla WiMAX tuella.

2 TEKNIIKAT

Aiemmin yrityksellä oli käytössä 450 MHz taajuudella toimiva langaton tietoliikenneverkko. Verkko koostui LXE:n valmistamista LXE 6230 verkkokontrollereista (NC) sekä LXE 6210/6280 radiotukiasemista (RFU). Verkkokontrollerit mm. ohjaavat sanomia verkkoon liitetyille tukiasemille kuuluvuuden mukaan. 9600 Baudin liikennöintinopeudella toimiva verkko kuitenkin alkoi jäädä liian hitaaksi, sillä viivettä esiintyi runsaasti käytettäessä pelkästään merkkipohjaisia sovelluksia. Hyvä puoli verkossa oli että sen kanssa ei esiintynyt kuuluvuusongelmia juuri ollenkaan.

Tässä osiossa esitellään satama-alueelle toteutettavan tietoliikenneverkon käyttämä WiMAX tekniikka sekä vaihtoehtoisia tekniikoita. Lisäksi käydään läpi teoriaa signaalien etenemisestä sekä WiMAX tekniikkaan liittyvistä antenniratkaisuista.

2.1 VAIHTOEHTOISET TEKNIIKAT

Satama-alueelle on päätetty toteuttaa WiMAX tietoliikenneverkko, mutta muitakin vaihtoehtoja käytettäväksi tekniikaksi löytyy. Tässä osiossa esitellään vaihtoehtoisia tekniikoita ja pohditaan niiden soveltuvuutta sataman verkkoratkaisuksi.

Yksi vaihtoehto WiMAX tietoliikenneverkolle on WLAN tietoliikenneverkko. WLAN tukiasemien kantomatka on kuitenkin huomattavasti heikompi kuin WiMAX tukiasemien. Vertailun vuoksi mainittakoon että yhteen yrityksen varastorakennukseen jouduttiin asentamaan 16 WLAN tukiasemaa, kun koko satama-alue pyritään tässä työssä kattamaan yhdellä WiMAX tukiasemalla. Varastorakennuksiin jouduttiin kuitenkin toteuttamaan WLAN tietoliikenneverkko koska kannettavat päätelaitteet, joita siellä käytetään, eivät tue WiMAX -tekniikkaa.

Yrityksen Vuosaassa sijaitsevassa satamassa on käytössä Helsingin satamalta vuokrattu WLAN tietoliikenneverkko. Alue on hieman pienempi kuin Mussalon satama ja sen kattamiseksi on asennettuna yrityksen käyttämällä alueella 49 WLAN tukiasemaa. Tällaisen verkon rakentamiskustannukset ovat huomattavasti suuremmat kuin WiMAX tietoliikenneverkon. Tukiasemat on sijoitettu alueella kohtuullisen samoin välimatkoin sijaitseviin valotolppiin noin 15m korkeuteen, sekä joihinkin alueisiin alemmas kattamaan käsipäätteillä käyttöä, kuten nosturien läheisyyteen. Verkossa on esiintynyt ajoittain kuuluvuusongelmia johtuen korkeista merikonttipinoista.

3G -tekniikka olisi myös vartenotettava vaihtoehto. Hyvänä puolena 3G:ssä on valmis verkko ja hyvä kattavuus alueella. Palveluntarjoajien Internet-sivustoilta löytyvien kuuluvuuskarttojen mukaan 3G yhteys toimii alueella 5 Mbit/s nopeudella (DNA Oy, Elisa Oyj). Palveluntarjoajat tarjoavat yrityksille priorisoitua liikennettä, jolla varmistetaan kriittisen dataliikenteen jatkuva toimivuus. Ajan mittaa kuukausimaksuista johtuvat kustannukset nousisivat kuitenkin huomattavasti suuremmiksi WiMAX tietoliikenneverkon toteutukseen verrattuna. Esimerkkinä Elisa Oyj:n yrityksille tarjoama priorisoitu 5 Mbit/s datapalvelu tulisi 50 työkoneelle maksamaan vuodessa n. 33000€ (Elisa Oyj).

LTE (Long Term Evolution) on 3GPP:n (3GPP) työn alla oleva uusi standardi, joka perustuu samaan teknologiaan kuin WiMAX. LTE on ehdokkaana uuden sukupolven 4G matkapuhelinverkkoteknologiaksi. Teknologian on tarkoitus mm. tukea päätelaitteen liikkumista 350 kilometrin tuntinopeudella. LTE teknologia, tietoliikenneverkot sekä laitteet ovat tässä vaiheessa kuitenkin vasta kehittelyn alla.

2.2 WiMAX

WiMAX on sitä hallitsevan vuonna 2001 perustetun WiMAX Forumin rekisteröimä tavaramerkki IEEE:n 802.16 spesifikaatioihin perustuviin standardeihin (WiMAX Forum). WiMAX on langaton laajakaistatekniikka, joka suuren kantamansa vuoksi sopii hyvin alueille joille kuidun vieminen olisi vaikeaa tai kallista, esimerkiksi saaristoihin.

WiMAX -tekniikka on melko uusi, mutta sen käyttöön on tehty mittavia investointeja mm. yhdysvaltalaisen yrityksen Sprintin toimesta (Sprint). WiMAX -tekniikasta on kehitteillä myös toisen sukupolven versio WiMAX2. WiMAX2 pyrkii parantamaan tekniikkaa tarjoamalla suurempia datansiirtonopeuksia sekä parempaa liikkuvuutta (WiMACIG).

2.2.1 IEEE 802.16-2001

Ensimmäinen WiMAX standardeista oli IEEE 802.16-2001, joka määrittää kiinteän langattoman laajakaistajärjestelmän 10-66 GHz:n taajuusalueella. Standardia voidaan hyödyntää vain näköyhteydellisissä yhteyksissä, koska taajuusalue on liian korkea läpäisemään esteitä, kuten rakennuksia (Syed Ahson & Mohammad Ilyas, 2008). Standardi määrittelee kaksi eri verkkotopologiaa; Point-to-Point (PTP) ja Point-to-Multipoint (PMP). PTP yhteys koostuu pelkästään tukiasemasta ja päätelaitteesta. Sillä saavutetaan suuri kaistanleveys suurien kulujen kustannuksella. PMP on taas käyttäjää kohden edullisempi yhteys, jossa useita päätelaitteita on yhteydessä yhteen tukiasemaan.

2.2.2 IEEE 802.16-2004

IEEE 802.16-2004 on paranneltu versio 802.16-2001 standardista. Taajuuskaistaa on laajennettu kattamaan alempi 2-11 GHz:n alue. Tämä mahdollistaa osaltaan ei-näköyhteydellisen kommunikaation, sillä matalampitaajuiset radioaallot läpäisevät paremmin esteitä, taipuvat sekä heijastuvat. Muita tärkeitä standardin mukana tuomia parannuksia ovat mm. OFDM modulaatiotekniikka sekä adaptiivinen modulaatio. Adaptiivinen modulaatio mahdollistaa modulointitekniikan vaihtamisen dynaamisesti eri päätelaitteiden kanssa. Käytettävä modulointitekniikka päätetään signaalin laadun perusteella. Vain hyvälaatuisella signaalilla voidaan käyttää parempia modulointitekniikoita, koska ne ovat alttiimpia häiriöille kuin huonommat modulointitekniikat. Käytännössä tämä näkyy siinä, että kun päätelaitteen etäisyys tukiasemaan kasvaa, siirrytään huonompaan modulointitekniikkaan. Tuetut modulointitekniikat ovat paremmuusjärjestyksessä BPSK, QPSK, 16-QAM ja 64-QAM. Taulukko 1 esittää suotavia signaali-kohinasuhde raja-arvoja eri modulointitekniikoille (IEEE Std.802.16-2004, 2004).

Taulukko 1: Signaali-kohinasuhde raja-arvot modulointitekniikoille

Modulointitekniikka	SNR (dB)
BPSK $\frac{1}{2}$	6.4
QPSK $\frac{1}{2}$	9.4
QPSK $\frac{3}{4}$	11.2
16-QAM $\frac{1}{2}$	16.4
16-QAM $\frac{3}{4}$	18.2
64-QAM $\frac{2}{3}$	22.7
64-QAM $\frac{3}{4}$	24.4

SNR eli signaali-kohinasuhde tarkoittaa nimensä mukaisesti signaalin ja kohinan suhdetta. SNR lasketaan desibeleissä kaavalla 1.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{\text{signaalinvoimakkuus}}{\text{kohinanvoimakkuus}} \quad (1)$$

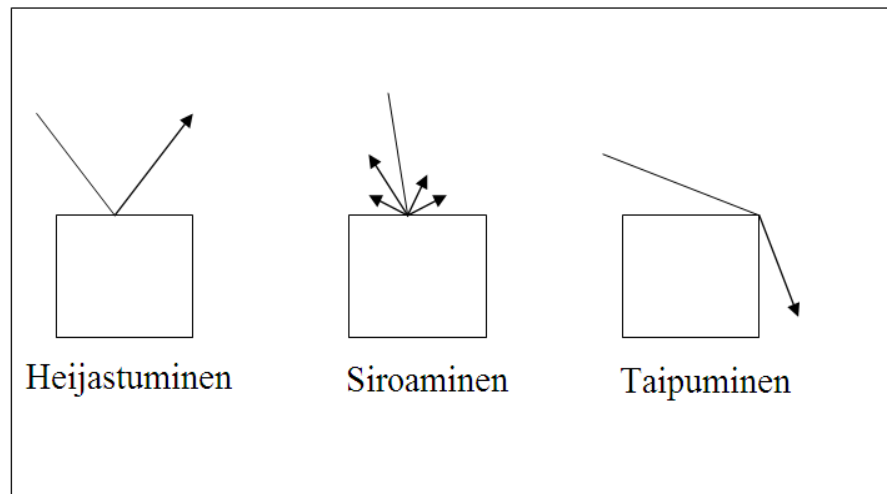
2.2.3 IEEE 802.16E-2005

IEEE 802.16e-2005 standardin (IEEE Std.802.16e-2005, 2006) ehkä merkittävin mukanaan tuoma uudistus on tuki saumattomalle siirtymiselle tukiasemien välillä eli mobiliteetille. Standardi myös parantaa aiempiin verrattuna verkon suorituskykyä OFDMA teknologian avulla.

Toukokuussa 2008 tehtiin Savonlinnassa Suomen ensimmäinen kenttätestaus kyseiseen standardiin perustuvilla laitteilla (Daimler, SPY & Omnitele, 2008). Testauksessa havaittiin sekä sektorien että tukiasemien välisten solunvaihtojen toimivat täysin saumattomasti päätelaitteen liikkeessä yli 80 kilometrin tuntinopeudella. Tässä vaiheessa standardin mukaisten laitteiden saatavuus sekä testaus ovat rajoittuneita.

2.3 SIGNAALIEN ETENEMINEN

Signaalien eteneminen luokitellaan kahteen eri päätyyppiin: Näköyhteydelliseen eli LOS tyyppiseen etenemiseen ja ei-näköyhteydelliseen eli NLOS tyyppiseen etenemiseen. NLOS tyyppisessä etenemisessä signaali voi saavuttaa päämääränsä joko heijastumien, siroamisten tai taipumisien kautta, ja yleensä vastaanotettu signaali sisältää komponentteja näistä kaikista (Eugene C., 2004). NLOS tyyppisen etenemisen komponentteja esittää kuva 5.



Kuva 5: NLOS tyyppisen etenemisen komponentit

Heijastuminen tapahtuu kun signaali osuu pintaan joka on suuri suhteessa signaalin aallonpituuteen. Signaalin tulokulma sekä heijastuskulma ovat yhtä suuret. Signaalin aallonpituus ja etenemisnopeus pysyvät ennallaan. Siroaminen tapahtuu kun signaali osuu kohteeseen joka on samankokoinen tai pienempi kuin signaalin aallonpituus. Tällainen voi olla esimerkiksi epätasainen pinta. Siroamisessa osa signaalin energiasta synnyttää uusia signaaleja eri suuntiin. Taipuminen tapahtuu kun signaali osuu aallonpituuttaan suuremman kohteen reunaan.

Doppler-siirtymällä tarkoitetaan aallonpituuden muuttumista, mikä johtuu lähettimen tai vastaanottimen liikkeestä. Tämän työn tapauksessa tukiasema pysyy paikallaan ja päätelaite liikkuu. Maksimaalista doppler-siirtymää voidaan arvioida kertomalla päätelaitteen liikkumisnopeus signaalin taajuudella ja jakamalla valonnopeudella (IEEE C802.16-SGM-02/03, 2002).

Artikkelissa (George Z. et.al., 2007) on tutkittu erilaisten antenniratkaisujen vaikutusta doppler-siirtymään IEEE 802.16-2004 standardin mukaisessa WiMAX verkossa tapahtuvassa tiedonsiirrossa. Pienin artikkelissa tutkittu nopeus 3.5GHz taajuudella ja ympärisäteilevällä antennilla on 70 km/h, jolla

doppler-siirtymä oli 229 Hz. Testien tuloksena todettiin myös että suunnattujen antennien avulla doppler-siirtymää voidaan pienentää huomattavasti.

2.4 ANTENNIT

Antennien tehtävä langattomassa tietoliikenteessä on lähettää ja vastaanottaa signaaleja. Antennityypit voidaan karkeasti jakaa suuntaaviin ja ympärisäteileviin. Ympärisäteilevät antennit säteilevät 360 asteen sektorissa ja suuntaava antenni pienemmässä, esimerkiksi 90 asteen sektorissa. Suuntavilla antennilla teho kohdistetaan pienemmälle alueelle, jolloin se vahvistuu. Vahvistusta mitataan vertaamalla tehon ulostuloa isotrooppisen antennin ulostuloon. Isotrooppinen antenni on teoreettinen piste joka säteilee samalla teholla jokaiseen suuntaan. Isotrooppista antennia ei käytännössä ole olemassa, sillä jokainen antenni on jollain tapaa suuntaava.

WiMAX tietoliikenneverkoille on olemassa useita antennia hyväksikäytettäviä teknologioita. MIMO (Multiple Input, Multiple Output) teknologia mahdollistaa usean signaalin lähettämisen samaan aikaan. Tämä lisää kapasiteettia sekä mahdollistaa monitie-etenemisen hyödyntämisen. Vastaanottopäässä useat signaalit erotellaan signaalin käsittelyn avulla. Toinen useaa antennia hyväksikäyttävä teknologia on AAS (Adaptive Antenna System). Sen avulla antennien säteilykeilaa kohdistetaan sen perusteella missä päätelaitteet sijaitsevat. Kenttätestien perusteella usean antennin teknologioiden on todettu parantavan WiMAX tietoliikenneverkon suorituskykyä (Vip D. et.al., 2008).

Antenniasennuksissa kulmaa säätämällä voidaan optimoida verkon toimintaa. Kääntämällä antennia alaspäin saadaan säteilykeila kohdistettua horisontaalisen tason alapuolelle. Tämä parantaa verkon suorituskykyä mm. vähentämällä vapaan tilan vaimenemista ja viivehajetta (Giannattasio G. et.al., 2009).

Tukiasemaa ja antennia sijoitettaessa voidaan joutua rakentamaan erillinen torni. Tornin paikkaa ja korkeutta suunniteltaessa kannattaa ottaa huomioon että haluttu peittoalue saavutetaan mahdollisimman hyvin. Tornin täytyy myös pystyä kannattelemaan asennetut laitteistot ja kestämään tuulen, veden, lumen ja jään tuomaa lisärasitetta. Merialueiden lähistöllä suolapitoinen sumu saattaa aiheuttaa korroosiota. Tornien ja laitteistojen täytyy kestää ympäristön aiheuttamia rasitteita usein monia kymmeniä vuosia.

3 AIEMPI TUTKIMUS JA TEORIA

Tässä osiossa käydään läpi aiempia tutkimuksia ja teoriaa liittyen etenemismalleihin, sääolosuhteiden vaikutukseen signaalien etenemiseen sekä päätelaitteen liikkumisnopeuden vaikutukseen signaalin laatuun. Etenemismalleista esitellään kaavat sekä muuttujat, joiden avulla signaalin voimakkuutta voidaan arvioida eri etäisyyksillä tukiasemasta.

3.1 ETENEMISMALLIT

Kuten aiemmin todettiin, NLOS tyyppisessä etenemisessä signaalit voivat saapua perille heijastumien, siroamisten tai taipumisien kautta. Nämä vaikuttavat signaalin vahvuuteen vastaanottopäässä. Etenemismalleja on kehitetty kuvaamaan signaalin vahvuutta vastaanottopäässä. Mallit kuvaavat etenemistä erilaisten tekijöiden, kuten välimatkan, antennien korkeuksien tai maastotyyppin avulla. Etenemismallien avulla voidaan yrittää ennustaa kuuluvuusaluetta erilaisilla asennuksilla. Etenemismallit ovat hyödyllisiä suunniteltaessa langatonta tietoliikenneverkkoa, koska niiden avulla voidaan arvioida tarvittavaa tukiasemien määrää ja sijaintia. Samalla saadaan arvio verkon rakentamiskustannuksista.

3.1.1 VAPAAN TILAN VAIMENEMINEN

Signaali vaimenee edetessään esteettömästäkin. Tätä kutsutaan vapaan tilan vaimenemiseksi, ja sen vaikutus desibeleinä lasketaan kaavalla 2, kun muuttuja d on etäisyys kilometreissä ja f on taajuus Megahertseinä.

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44 \quad (2)$$

3.1.2 HATA -MALLI

Hata -malli (Hata M., 1980) on makrokokoisille ympäristöille sopiva etenemismalli. Se pätee 500-1500 MHz taajuusalueella vastaanottimen ollessa yli 1km etäisyydellä ja tukiaseman yli 30m korkeudella. Malli ei kuitenkaan päde vuoristoisessa ja runsaasti puita sisältävässä ympäristössä. Mallin mukainen vaimeneminen lasketaan kaavojen 3,4 ja 5 avulla. Kaavan 4 avulla laskettava muuttuja $a(h_m)$ on korjaustermi päätelaitteen antennin korkeudelle ja se on riippuvainen kaupungin koosta. Kaavan 5 avulla laskettava muuttuja K on korjauskerroin avoimille tai esikaupunkimaisille alueille.

$$L_H (dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} R - K \quad (3)$$

$$a(h_m) = \begin{cases} (1.1 * \log_{10} f) * h_m - (1.56 * \log_{10} f - 0.8), & \text{pieni / keski-suuri} \\ 8.29 * (\log_{10} (1.54 * h_m))^2 - 1.10, & \text{suuri, } f \leq 200 \text{MHz} \\ 3.2 * (\log_{10} (11.75 * h_m))^2 - 4.97, & \text{suuri, } f \geq 400 \text{MHz} \end{cases} \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} 4.78 * (\log_{10} f)^2 - 18.33 \log_{10} f + 40.94, & \text{maaseutu} \\ 2 * (\log_{10} \frac{f}{28})^2 + 5.4, & \text{esikaupunki} \end{cases} \quad (5)$$

3.1.3 COST 231 HATA -MALLI

Cost 231 Hata -malli (European Cost Action 231, 1999) on tarkoitettu kaupunki alueilla ja se pätee 1500-2000 MHz taajuusalueella tukiaseman ollessa korkeudella 30-200m ja päätelaitteen antennin korkeudella 1-10m.

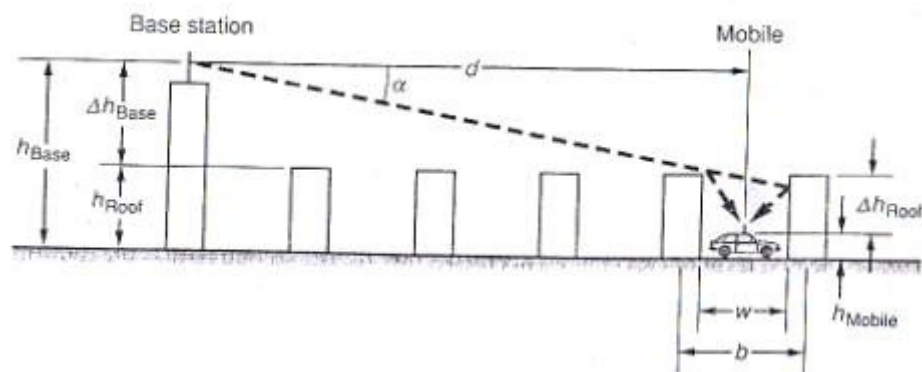
Vaimeneminen L_u lasketaan kaavoilla 6 ja 7. Muuttuja C_m on keskikokoisilla kaupungeilla 0 dB ja suurkaupungeilla 3 dB.

$$L_u (dB) = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d + C_m \quad (6)$$

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7) h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (7)$$

3.1.4 COST 231 WALFISCH-IKEGAMI -MALLI

Urbaaneja ympäristöjä varten on kehitetty Cost 231 Walfisch-Ikegami –malli (Walfisch J. & Bertoni H., 1988, Tapan K. et.al., 2003). Malli ottaa huomioon taajuuden ja antennikorkeuksien lisäksi kaupunkiympäristöön liittyviä piirteitä ja ominaisuuksia, kuten rakennusten korkeuksia ja katujen leveyksiä. Mallin on todettu toimivan hyvin ja sitä voidaan käyttää myös esikaupunkialueilla (IEEE 802.16.3c-01, 2001). Vaimeneminen L_b lasketaan NLOS olosuhteissa kaavojen 8,9,10,11,12,13,14 ja 15 avulla. Muuttujat on esitettyä kuvassa 6.



Kuva 6: Cost 231 Walfisch-Ikegami etenemismallin muuttujat

$$L_b = \begin{cases} L_{FS} + L_{rts} + L_{msd} \\ L_{FS}, L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$L_{rts} = \begin{cases} -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_{mobile} + L_{ori}, h_{roof} > h_{mobile} \\ 0, L_{rts} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \frac{\varphi}{\text{deg}}, 0 \leq \varphi < 35 \\ 2.5 + 0.075 \left(\frac{\varphi}{\text{deg}} - 35 \right), 35 \leq \varphi < 55 \\ 4 - 0.114 \left(\frac{\varphi}{\text{deg}} - 55 \right), 55 \leq \varphi \leq 90 \end{cases} \quad (10)$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log \frac{R}{\text{km}} + k_f \log \frac{f}{\text{MHz}} - 9 \log \frac{b}{m} \quad (11)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{base}), h_{base} > h_{roof} \\ 0, h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (12)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, h_{base} > h_{roof} \\ 18 - 15 \Delta h_{base} / h_{roof}, h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (13)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, h_{base} > h_{roof} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{base}, R \geq 0.5 \text{ km}, h_{base} \leq h_{roof} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{base} (R / 0.5), R < 0.5 \text{ km}, h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (14)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & \text{kaupunki} \\ 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & \text{suurkaupunki} \end{cases} \quad (15)$$

3.1.5 MUITA ETENEMISMALLEJA JA TUTKIMUKSIA

Vuoristoisen ja runsaspuisen ympäristön huomioon ottamiseksi löytyy malli (IEEE 802.16.3c-01, 2001), joka kattaa kolme eri kategoriaa matalasta ja vähäpuisesta maastosta vuoristoiseen runsaspuiseen maastoon. Malli sisältää myös korjauskertoimia joilla katetaan eri antennikorkeuksia ja taajuuksia. Vaimeneminen PL lasketaan kaavojen 16, 17 ja 18 avulla. Kaavan 18 muuttujat a, b ja c kuvaavat ympäristön tyyppiä ja ne on esitetty taulukossa 2. Maastotyyppi A on vuoristoinen ja runsaspuinen, C tasainen ja vähäpuinen ja B on A:n ja C:n välimaasto. Muuttuja s kuvaa katvevaikutusta. Korjauskertoimet huomioiva vaimeneminen PL_K lasketaan kaavojen 19, 20 ja 21 avulla.

$$PL = A + 10\gamma \log_{10}(d / d_0) + s \quad (16)$$

$$A = 20 \log_{10}(4\pi d_0 / \lambda) \quad (17)$$

$$\gamma = (a - bh_b + c / h_b) \quad (18)$$

$$PL_K = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (19)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log(f / 2000) \quad (20)$$

$$\Delta PL_h = \begin{cases} -10.8 \log(h_m / 2), \text{ maastotyyppi A ja B} \\ -20 \log(h_m / 2), \text{ maastotyyppi C} \end{cases} \quad (21)$$

Taulukko 2: Artikkelin (IEEE 802.16.3c-01, 2001) esittelemän mallin muuttujat A, B ja C

Mallin muuttuja	Maastotyyppi A	Maastotyyppi B	Maastotyyppi C
A	4.6	4	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20

3500 MHz alueella pätevä tilastoihin perustuva malli on esitelty artikkelissa (Marcus C. & Frank J., 2005). Malli perustuu Englannissa tehtyihin mittauksiin ja sitä suositellaan 100 – 2000 m antennietäisyyksille. Mallissa vaimeneminen PL lasketaan kaavalla 22, jossa A on vapaan tilan vaimeneminen, γ on vaimenemiseksponentti, χ on vaimenemisvirhe, d on päätelaitteen etäisyys tukiasemasta ja d_0 on etäisyys jolla vapaan tilan vaimeneminen on laskettu.

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log_{10}(d / d_0) + \chi \quad (22)$$

Artikkelissa (Joseph W. et al., 2006) esitellään 3500 MHz taajuusalueella pätevä etenemismalli. Malli perustuu tilastoihin vaimenemisesta eri päätelaitteen antennikorkeuksilla, etäisyyksillä ja aallonpituuksilla. Artikkelissa tutkitut antennikorkeudet ovat 2.5m, 3m, 3.5m ja 4m. Vaimeneminen lasketaan samalla tavalla kuin kaavassa 22 on esitetty. Tutkimuksessa muuttujan γ arvoksi saatiin 4.6 päätelaitteen antennin ollessa korkeudella 3.5m.

Artikkelissa (Winton A. et.al., 2007) on esitelty metodeja etenemismallin muodostamiselle mitatun datan perusteella. Kaavan 23 mukaisen etenemismallin muuttuja γ saadaan kahden eri mittaustuloksen perusteella kaavan 24 mukaisesti. Kaavassa 23 muuttuja d_0 on etäisyys tukiasemasta mittauspisteeseen ja kaavassa 24 muuttujat P_{R2} ja P_{R1} ovat signaalin voimakkuudet mittauspisteissä ja d_1 ja d_2 etäisyydet tukiasemasta mittauspisteisiin. Jos mittauspisteitä on useampia, voidaan muuttujat γ ja a laskea selvittämällä ensimmäisen asteen polynomiyhtälö joka kuvaa parhaiten signaalin voimakkuuksia mitatuissa pisteissä ja laskemalla sen juuret.

$$PL(dB) = a + 10\gamma \log_{10}(d_0) \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{P_{r2}(dB) - P_{r1}(dB)}{10[\log(d_1 / d_2)]} \quad (24)$$

Maaliskuussa 2008 otettiin Singaporen etelärannikolle käyttöön IEEE 802.16e-2005 standardin mukainen WiMAX tietoliikenneverkko (WISEPORT). Verkon tarkoituksena on tarjota tietoliikenneyhteys rannikon merialueille, joilla liikkuu mm. Singaporen satamissa käyvät laivat.

Singaporen satamassa on tehty tutkimus (Joe J. et.al., 2007) liittyen WiMAX tietoliikenneverkon käyttöön laivoissa. Langattomien signaalien etenemiselle

merialueella löytyy kansainvälisen televiestintäliiton radiosektorin suositus (ITU-R P.1546-2, 2005). Suositus kuitenkin kattaa taajuudet vain 3 GHz asti. Artikkelissa signaalien etenemistä tutkittiin 5.8 GHz taajuudella. Tuloksena havaittiin että suurilla etäisyyksillä vaimeneminen on yli kaksi kertaa suurempaa verrattuna vapaan tilan vaimenemiseen. Antennien korkeuksilla havaittiin myös olevan merkittävä vaikutus vaimenemiseen.

Satama-alueille löytyy etenemismalli (IEEE C802.16j-06/003, 2006). Etenemismalli on kuitenkin tarkoitettu lähinnä merialueella liikkuville laivoille, eikä sataman maa-alueelle mitä tässä työssä tutkitaan. Etenemismallia on testattu 5.8 GHz taajuudella, mutta sen sovittamiselle muille taajuuksille löytyy korjausmuuttuja. Etenemismallin mukainen vaimeneminen lasketaan kaavalla 25, jossa muuttuja A on vapaan tilan vaimeneminen ja korjausmuuttuja ΔPL_f lasketaan kaavalla 26. Muuttuja s kuvaa katvevaikutusta. Malli on hyvin samankaltainen kuin artikkelissa (Marcus C. & Frank J. 2005) esitetty. Eroavaisuutena on että vaimenemisvirhe on kuvattu katvevaikutuksella ja taajuuteen liittyvällä korjausmuuttujalla.

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + s + \Delta PL_f \quad (25)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10}(f/5800) \quad (26)$$

3.2 SÄÄOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS SIGNAALIEN ETENEMISEEN

Tutkimuksia sääolosuhteiden vaikutuksesta WiMAX tietoliikenneverkkoon ei ole paljoa olemassa, mutta useimmat valmistajat vakuuttelevat etteivät vaikeat

sääolosuhteet heikennä signaalia merkittävästi. Ball State:n yliopiston tutkijat Brand McCoy ja Trent Boyd testasivat artikkelissaan (Brad M. & Trent B., 2007) WiMAXin kykyä siirtää videokuvaa vaikeissa olosuhteissa. Testeissä käytettiin Alvarionin BreezeMAX laitteistoa.

Testeissä signaali kulki tukiasemasta päätelaitteeseen heijastumisien kautta, eli kyseessä oli NLOS tyyppinen eteneminen. Testin aikana satoi lunta 1-1.5 tuumaa tuntia kohden. Tämän lisäksi päätelaitteen ympärillä käveli satunnaisesti ihmisiä. Testin tuloksena oli että 700Kb/s ja 2Mb/s siirtonopeuksilla ei esiintynyt häiriöitä lainkaan ja 4Mb/s siirtonopeudella ainoastaan minimaalisia häiriöitä. Tästä voidaan päätellä että lumisateella ei ole suurta vaikutusta signaalin etenemiseen.

Artikkeli sisälsi myös laajamittaisen testin ympäristön vaikutuksista signaaliin, jonka tulos oli että talven aikana signaali oli ulkotiloissa keskimäärin 4.1dB voimakkaampi kuin syksyn aikana. Suurin vaikuttaja tähän eroon oli puiden lehdistö, jota ei talvella juurikaan esiinny. Tässä työssä kyseessä olevalla satama-alueella ei kuitenkaan suurta kasvillisuutta tai puita ole, joten niiden aiheuttamaa signaalin vaimenemista ei tarvitse ottaa huomioon.

Vesisateen vaikutuksesta signaalien etenemiseen on olemassa kansainvälisen televiestintäliiton radiosektorin suositus (ITU-R P.838-1, 1992–1999) ja sumun vaikutuksesta suositus (ITU-R P.840-3, 1992–1994-1997–1999). Suositukset sisältävät malleja joiden avulla sateen ja sumun aiheuttamaa häviötä signaalissa voidaan arvioida. Suosituksista tulee kuitenkin ilmi, että vaikutukset 3.5 GHz taajuudella ovat käytännössä olemattomia.

Artikkelissa (Delannoy P. et.al., 2009) esitettyjen testien perusteella vesisade aiheuttaa signaaliin 1800m etäisyydellä tukiasemasta 6 dB:n vaimenemisen ja 3000m etäisyydellä 10dB:n vaimennuksen. Sataman työkoneissa käytettävillä sovelluksilla tällaisella vaimenemisella ei ole merkitystä, mutta jos verkossa jouduttaisiin siirtämään esimerkiksi jatkuvaa videokuvaa, voisi vaimeneminen olla haitaksi. Testeissä todettiin myös kuivan ja kylmän ilman olevan ideaalinen signaalien etenemiselle.

3.3 PÄÄTELAITTEEN LIIKKUMISNOPEUDEN VAIKUTUS SIGNAALIN LAATUUN

Tukea liikkuvuudelle käytettäessä IEEE 802.16-2004 standardin mukaista tietoliikenneverkkoa on tutkittu artikkelissa (Kin K. et.al., 2005). Artikkelissa pyritään täyttämään liikkuvuuden vaatimukset muuttamatta standardin määrittämiä spesifikaatioita. Yksi vaatimus liikkuvuudelle on toimiva vastaanotto liikkuvalla päätelaitteella. Artikkelissa todettiin yhteyden toimivan 16-QAM modulointitekniikalla 10 kilometrin tuntinopeudella ja QPSK modulointitekniikalla 40 kilometrin tuntinopeudella bittivirhesuhteen (BER) ollessa 0.002%.

Työkoneet liikkuvat maksimissaan 30 kilometrin tuntinopeudella. Tämän perusteella voidaan arvioida maksimi doppler-siirtymäksi noin 100 Hz. Artikkelissa (George Z. et.al., 2007) tehdyissä testeissä todettiin IEEE 802.16-2004 standardin mukaisen päätelaitteen maksiminopeudeksi 100 km/h käytettäessä 3.5GHz taajuutta ja ympärisäteilevää antennia. Suuremmilla nopeuksilla virheellisten pakettien määrä (PER) kasvoi liian suureksi. 100 km/h nopeudella maksimi doppler-siirtymä oli 325 Hz. Tämän perusteella satamassa käytettävien työkoneiden maksiminopeus on riittävän pieni ympärisäteilevää antennia käytettäessä.

4 ASENNUKSET JA MITTAUKSET

WiMAX tietoliikenneverkon riittävän suuren kantaman vuoksi satama-alue voidaan pyrkiä kattamaan yhdellä tukiasemalla. Läheisen voimalarakennuksen piippu on hyvä sijoituspaikka tukiasemalle seuraavien kriteerien perusteella:

- Piippu on korkealla, joten suurehko alue saadaan katettua eikä rakennukset tule esteeksi signaalien etenemiselle.
- Erillistä tornia ei tarvita korkeuden saavuttamiseksi.
- Sähkövirtaa on saatavilla.
- Voimalaitos on turvallinen paikka laitteille, koska se on suljettu ulkopuolisilta.

Aluksi WiMAX tukiasema asennettiin voimalarakennuksen katolle n. 60m korkeuteen (kuva 7). Käytetyt laitteet ovat Alvarionin BreezeMAX - sarjaa ja ne ovat valmistettu IEEE:n 802.16-2004 standardin pohjalta.

Tukiasema asennettiin seuraavin asetuksin:

- Antennisuunta 230 astetta
- Kulma (tilt) 5 astetta
- Antennivahvistus +16dBi
- Keila 90 astetta
- Lähetysteho +28dBm
- Taajuus 3.5 GHz



Kuva 7: WiMAX - tukiaseman ensimmäinen sijoitus

Päätelaitteeseen, jolla mittaukset suoritettiin, asennettiin ulkoinen ympärisäteilevä antenni. Päätelaite asennettiin kuvan 8 esittämään kurottajaan n. 3,5m korkeuteen. Päätelaitteen lähetysteho on +20 dBm ja antennivahvistus +6dBi. Antenni on ympäröity kuvassa katkoviivalla.



Kuva 8: Päätelaitteenasennus kurottajaan

WiMAX -yhteys päätelaitteeseen on toteutettu Alvarionin BreezeMAX PRO sarjan laitteilla. Laitteina toimii sisäyksikkö IDU ja ulkoyksikkö ODU. Kuvan 9 esittämä sisäyksikkö toimii siltana langallisen ja langattoman median välillä. Päätelaitte on yhdistetty sisäyksikköön Ethernet 10/100 BaseT kaapelilla. Kuvan 10 esittämä ulkoyksikkö sisältää WiMAX -yhteyteen liittyvät komponentit ja on liitetty sisäyksikköön PoE kaapelilla, jonka kautta se saa datayhteyden sekä virran. Ulkoyksikkö sisältää antennin, mutta siihen liitettiin ulkoinen antenni paremman kuuluvuuden takaamiseksi.



Kuva 9: Sisäyksikkö



Kuva 10: Ulkoyksikkö

4.1 PÄÄTELAITE

Satamassa käytettäviin työkoneisiin asennettavissa päätelaitteissa on tärkeää, että ne kestävät iskuja, vettä sekä kylmää. Tiiveydelle ja vedenkestävyydelle on olemassa IEC:n (IEC) standardoima IP - luokitusjärjestelmä. Standardin mukainen merkintä koostuu kirjaimista IP, sekä kahdesta numerosta. Ensimmäinen numeroista kuvaa kohteen pölytiivyyttä ja toinen kohteen vedenkestävyyttä.

Päätelaitteena työkoneissa käytetään LXE:n mallia VX3-12. Laitteen käyttölämpötila on ohjekirjan mukaan -30 – 50 celsiusastetta, mikä on riittävä sekä talvi- että kesäolosuhteissa. Laitteen IP -luokitus on IP-65, mikä tarkoittaa että laite on täydellisen pölytiivis sekä kestää vesiruiskun joka suunnasta.

Työntekijät käyttävät päätelaitetta valitakseen merikonttien siirtotehtäviä paikasta toiseen sekä kuitatakseen tehtäviä tehdyiksi. Päätelaitteen käytöllä on tukeva osa itse työlle ja sen käyttö on oltava mahdollisimman helppoa. Käytön helppouden varmistamiseksi tarvittavat sovellukset laitettiin käynnistymään automaattisesti käyttöjärjestelmän käynnistyessä, sekä kirjautumaan sisään jokaiselle koneelle tehdyllä yksilöllisellä käyttäjänimellä ja salasanalla. Tämä toteutettiin AutoIt nimisellä ohjelmalla. Ohjelman avulla tehtiin komentosarja joka poistaa näppäimistön käytöstä estäen turhat painallukset sovellusten käynnistymisen aikana, odottaa että tietoliikenneverkko alustuu, käynnistää ohjelmat ja kirjautuu niihin sekä lopuksi palauttaa näppäimistön käyttöön. Työntekijän ei tarvitse töiden alkaessa tehdä muuta kuin käynnistää päätelaite. Näppäimistöksi päätelaitteille asennettiin Tipro keyboardsin valmistama erikoisnäppäimistö jossa on 16 näppäintä. Näppäimille ohjelmoitiin tarvittavat komentosarjat joiden avulla sovelluksia voidaan käyttää.

4.2 KUULUVUUSMITTAUKSET

Kuuluvuusmittaukset suoritettiin kuvan 11 esittämällä SAU – laitteella. SAU – laitteen tarkoituksena on auttaa antennien suuntauksessa niin, että päätelaitteella saavutetaan paras mahdollinen kuuluvuus.



Kuva 11: SAU – laite

SAU – laite ilmoittaa signaaliin liittyvää tietoa punaisten ja vihreiden LED valojen avulla taulukon 3 mukaisesti. RSSI tarkoittaa signaalin voimakkuutta vastaanottopäässä. RSSI:lle ei ole määriteltyä mittayksikköä ja esitetyt voimakkuustasot ovat valmistajakohtaisesti määriteltyjä.

Taulukko 3: SAU - laitteen LED valot

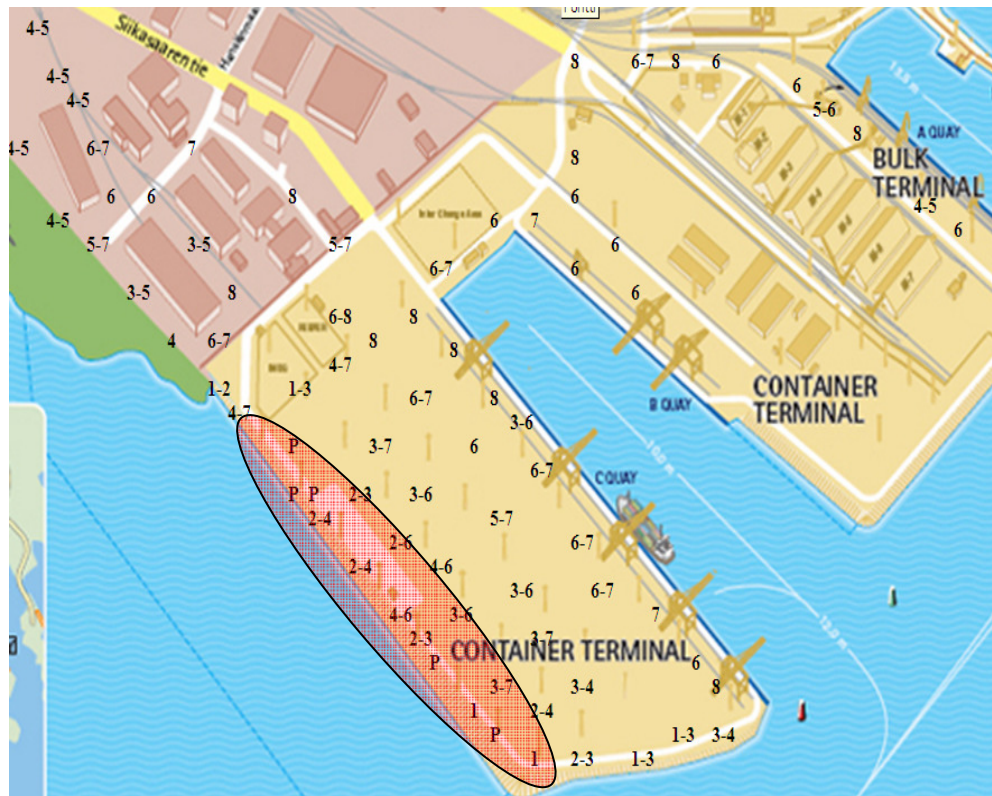
Päällä olevat LED valot	SNR
1 (punainen)	Päätelaite on yhteydessä SAU - laitteeseen
2 (vihreä)	$5\text{dB} \leq \text{SNR} < 10\text{dB}$
2-3 (vihreitä)	$10\text{dB} \leq \text{SNR} < 15\text{dB}$
2-4 (vihreitä)	$15\text{dB} \leq \text{SNR} < 20\text{dB}$
2-5 (vihreitä)	$20\text{dB} \leq \text{SNR} < 24\text{dB}$
2-6 (vihreitä)	$\text{SNR} \geq 24\text{dB}$ ja $\text{RSSI} < -75\text{dBm}$
2-7 (vihreitä)	$\text{SNR} \geq 24\text{dB}$ ja $\text{RSSI} \geq -75\text{dBm}$
2-8 (vihreitä)	$\text{SNR} \geq 24\text{dB}$ ja $\text{RSSI} \geq -70\text{dBm}$
2-9 (vihreitä)	$\text{SNR} \geq 24\text{dB}$ ja $\text{RSSI} \geq -60\text{dBm}$
2-9 (vihreitä) sekä 10 (punainen)	$\text{RSSI} \geq -20\text{dBm}$ (liian voimakas signaali)

Mittaukset suoritettiin ajamalla työkoneella läpi kaikki alueet, missä verkon tulee kuulua ja samalla kirjaten ylös SAU – laitteen antamat lukemat. Alustavat mittaukset osoittivat että sataman tukiasemasta katsoen uloimmalla

merenpuoleisella sivulla oli huono kuuluvuus. Joissakin kohdissa SAU – laite näytti pelkästään punaista LED valoa, eli kuuluvuus katosi käytännössä kokonaan. Kuuluvuutta yritettiin parantaa kiinnittämällä tukiaseman antenni voimalarakennuksen piippuun, n.20 metriä aikaisempaa ylemmäksi. Antennisuunta muutettiin 220 asteeseen, jolloin se keskittyi paremmin konttikenttään ja huonoon kuuluvuusalueeseen. Kuuluvuuskartoitus tehtiin uudestaan ja tuloksena oli että kuuluvuus ei parantunut. kuva 12 esittää tukiasemaa korotuksen jälkeen ja kuva 13 kuuluvuuskartoitusta.



Kuva 12: Tukiasema nostamisen jälkeen



Kuva 13: kuuluvuuskartoitus


Kuvan 13 numerot esittävät vihreiden LED valojen lukumäärää SAU – laitteessa. ”8” tarkoittaa parasta mahdollista kuuluvuutta ja ”P” tarkoittaa että yhteys katosi. Kuuluvuus vaihteli useita askelia vaikka päätelaite oli paikallaan, ja tästä syystä osa kuuluvuuksista on esitettyinä väleinä. Huono kuuluvuusalue on esitetty punertavalla ovaalilla. Mittausten tekohetkellä sää oli selkeä ja lämpötila oli +8 astetta celsiusta.

Konttikentällä on alueita, joihin ei ole näköyhteyttä tukiasemasta. Merikontit muodostavat yli 13m korkeita pinoja päätelaitteen ja tukiaseman välille. Tällaisilla alueilla oli kuitenkin verrattain hyvä kuuluvuus, kun taas kuvassa 13 punertavalla ovaalilla esitetyllä alueella kuuluvuus oli erittäin huono. Alueen sijainnin huomioiden voisi huonon kuuluvuuden päätellä johtuvan siitä, että konttikentän laidalla ei ole näköyhteyttä tukiasemaan eikä alueen takana ole mitään kiinteää mistä signaalit voisivat heijastua. Asian voisi yrittää korjata esimerkiksi lisäämällä alueen taakse heijastuspintoja, mutta tämä ei ole

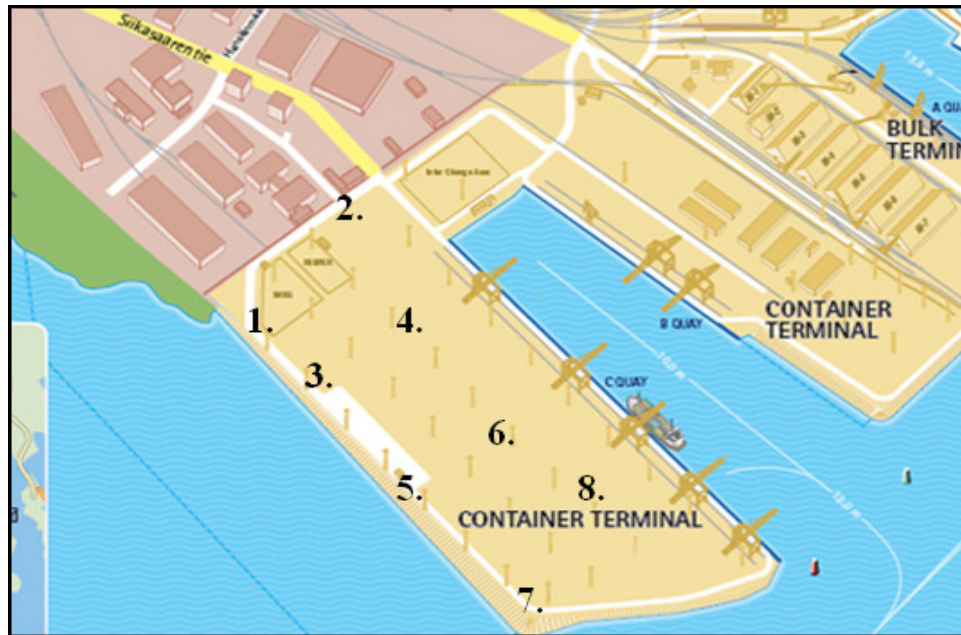
käytännön kannalta järkevä ratkaisu. Työkoneiden liikkumisella ei todettu olevan vaikutusta kuuluvuuteen.

Tarkemmat kuuluvuusmittaukset, joiden avulla etenemismallien soveltuvuutta alueeseen tutkitaan, tehtiin ottamalla kannettavalla tietokoneella yhteys päätelaitteen asetussovellukseen (kuva 14). Mittauksia varten määritettiin 8 mittauspistettä siten että ne ovat kaikki konttikentän alueella ja kattavat eri etäisyyksiä tukiasemasta. Tukiasema jää kuvan ulkopuolelle ja sijaitsee suurin piirtein kohtisuoraan ylöspäin mittauspisteestä 4. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 15.

Link Quality

DL SNR:	28 dB
DL RSSI:	-63 dBm
UP SNR:	30 dB
UP RSSI:	-74 dBm
	Registered
Optimal Rx Rate:	BPSK 3/4
Last Tx Rate:	QAM16 1/2
Last Tx Power:	20 dBm

Kuva 14: Signaalin laatu päätelaitteen asetussovelluksessa



Kuva 15: Mittauspisteet

Työkone, jonka päätelaitteesta mittaukset tehtiin, oli konttikurottaja. Päätelaitteen antenni oli 3,5m korkeudella. Mittausten suoritushetkellä sää oli selkeä ja lämpötila +15 astetta celsiusta. Mittausten tuloksia esittää taulukko 4.

Taulukko 4: Mittaustulokset

Mittauspiste	DL SNR (dB)	DL RSSI (dBm)	ETÄISYYS TUKIASEMASTA (m)
1.	11	-76	1550
2.	33	-59	1275
3.	24	-69	1587
4.	33	-59	1425
5.	13	-70	1700
6.	19	-71	1550
7.	6	-90	1975
8.	29	-72	1675

Mittaustuloksista nähdään että kuuluvuus heikkenee huomattavasti etäisyyden kasvaessa. Verkossa esiintyi myös satunnaisia katkoksia. Syy tähän löytyi siitä että taajuudet oli asetettu väärin. Taajuuksien kuului olla 3554.625 MHz ja 3561.625 MHz, jolloin sektorien välille jää 7 MHz eroa. Taajuudet olivat 3554.625 ja 3552.0, jolloin sektorien välille jäi ainoastaan 2.625 MHz kaistaa.

Asetukset korjattiin tukiasemaan ja päätelaitteisiin. Taulukko 5 esittää mittaustuloksia korjausten jälkeen.

Taulukko 5: Mittaustulokset korjausten jälkeen

Mittauspiste	DL SNR (dB)	DL RSSI (dBm)	ETÄISYYS TUKIASEMASTA (m)
1.	29	-63	1550
2.	32	-58	1275
3.	21	-79	1587
4.	33	-61	1425
5.	27	-63	1700
6.	29	-65	1550
7.	28	-63	1975
8.	13	-80	1675

Uusissa mittaustuloksissa on nähtävissä huomattavaa parannusta kuuluvuudessa. Nyt kuuluvuus oli siedettävissä rajoissa jopa aiemmin mainitulla konttikentän merenpuoleisella laidalla.

Suoritettiin mittaus sateen vaikutuksesta signaalin vahvuuteen. Signaalin voimakkuus mitattiin kun ilma oli selkeä ja uudelleen tarkalleen samassa paikassa kun vettä satoi. Selkeällä ilmalla SNR oli 20 dB ja RSSI -83 dBm. Kun vesisateen kertymä oli luokkaa 3.2 mm/h, olivat SNR 27 dB ja RSSI -75 dBm. Tulos on yllättävä, sillä signaali oli voimakkaampi vesisateen aikana kuin selkeällä ilmalla. Vesisateen vaikutukset voivat olla arvaamattomia, mutta tämä voi osaltaan selittyä sillä että ilma oli n. 5 celsiusastetta kylmempi. Artikkelissa (Delannoy P. et.al., 2009) tehtyjen tutkimusten mukaan kuiva ja kylmä ilma on optimaalisempi signaalien etenemiselle kuin lämmin. Kosteus vaikeuttaa signaalien etenemistä ja kylmällä ilmalla esiintyy vähemmän lämmöstä johtuvaa säteilyä.

Jos kuuluvuus katoaa ja yhteys katkeaa hetkeksikään, joudutaan sovellukset käynnistämään uudestaan ja niihin täytyy kirjautua uudelleen. Tämä vie kallista työaikaa ja hankaloittaa työntekoa huomattavasti. Vaikka tietoliikenneverkon kuuluvuus satama-alueella on hyvä, on mahdollista että työkoneella joudutaan käymään laivan ruumassa, jossa kuuluvuus voi olla erittäin huono.

Yhteyden mahdollisten katkeamisten aiheuttamaa haittaa voidaan minimoida ajamalla sovelluksia terminaalipalvelimella, johon työkoneiden päätelaitteet ottavat yhteyden. Kun langaton yhteys katkeaa, pysyy sovellus käynnissä palvelimella. Kun yhteys taas palaa, etäyhteys palvelimelle palautuu ja työt voivat jatkua siitä mihin ne jäivät ennen katkoa.

4.3 DATANSIIRTO MITTAUKSET

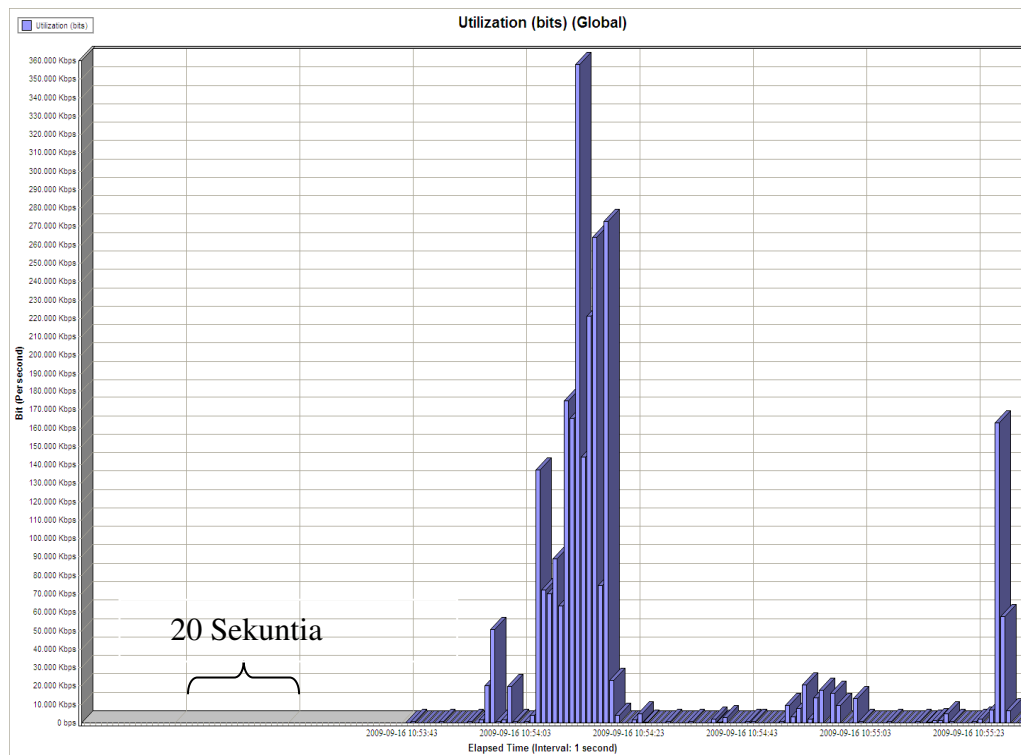
Suoritettiin mittauksia päätelaitteiden datansiirron määrästä. Mittausten avulla selvitettiin onko verkon kapasiteetti riittävä käytettäville sovelluksille, sekä paljonko siirtokykyä on jäljellä mahdollisille tulevaisuudessa käytettäville sovelluksille.

Työkoneiden päätelaitteissa on käytössä Windows XP käyttöjärjestelmä, jolla tarvittavia sovelluksia ajetaan. Käytettävät sovellukset ovat GPS paikkatietosovellus sekä kaksi pääte-emulaattoria. GPS paikkatietosovellus toimii WWW – selaimella ja se näyttää työkoneen sijainnin karttapohjalla. Toinen pääte-emulaattoreista on yhteydessä UNIX – palvelimeen ja toinen IBM AS/400 – palvelimeen. Tarpeen vaatiessa päätteisiin myös otetaan tukihenkilöiden toimesta graafinen etätyöpöytäyhteys. Tiedonsiirtoa lisäävät myös satunnaiset virusturvaohjelmiston päivitykset.

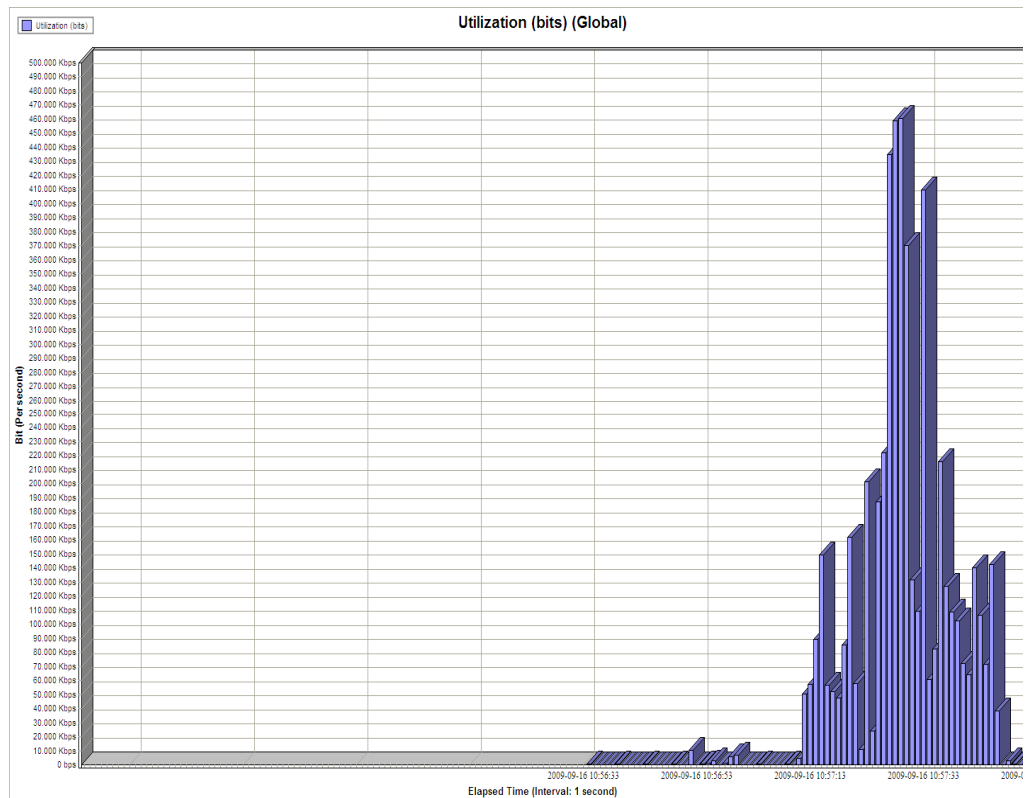
Mittaukset suoritettiin simuloimalla mahdolliset eri tilanteet päätelaitteella ja kaappaamalla liikenne. Mittaukset suoritettiin kesken työpäivän, jolloin työkoneet käyttivät verkkoa ja tilanne vastasi normaalia käyttötilannetta. Mittausten suorituspaikassa päätelaitteesta tukiasemaan päin SNR oli 12 dB, jolloin optimaalinen modulointitekniikka on taulukon 1 mukaan QPSK. Tukiasemasta päätelaitteeseen päin SNR oli 20 dB, jolloin optimaalinen modulointitekniikka on QAM-16. Aluksi mitattiin datansiirron määrää perustilanteessa, eli kun päätelaitteella käytetään työntekoon tarvittavia sovelluksia. Kuva 16 esittää kaapatun liikenteen määrää. Kuvassa on esitettyä datansiirron määrä suhteessa aikaan, ja yksi pylväs vastaa yhtä sekuntia.

Kuvasta 16 nähdään että dataliikenne määrä kohoaa hetkellisesti aina kun sovelluksilla tehdään jotakin ja muulloin dataliikenne on hyvin pientä. Maksimissaan dataa liikkui hetkellisesti noin 360 Kbps. Tämä oli kohta kun sovellukset käynnistyivät. Sovellusten normaalikäyttö sai dataliikenteen määrän nousemaan maksimissaan noin 170 Kbps kohdalle.

Seuraava mittaus tehtiin simuloiden tilannetta jossa tukihenkilö ottaa etätyöpöytäyhteyden päätelaitteeseen. Muut sovellukset olivat käynnissä koko ajan ja niitä käytettiin. Kuva 17 esittää kaapatun liikenteen määrää.



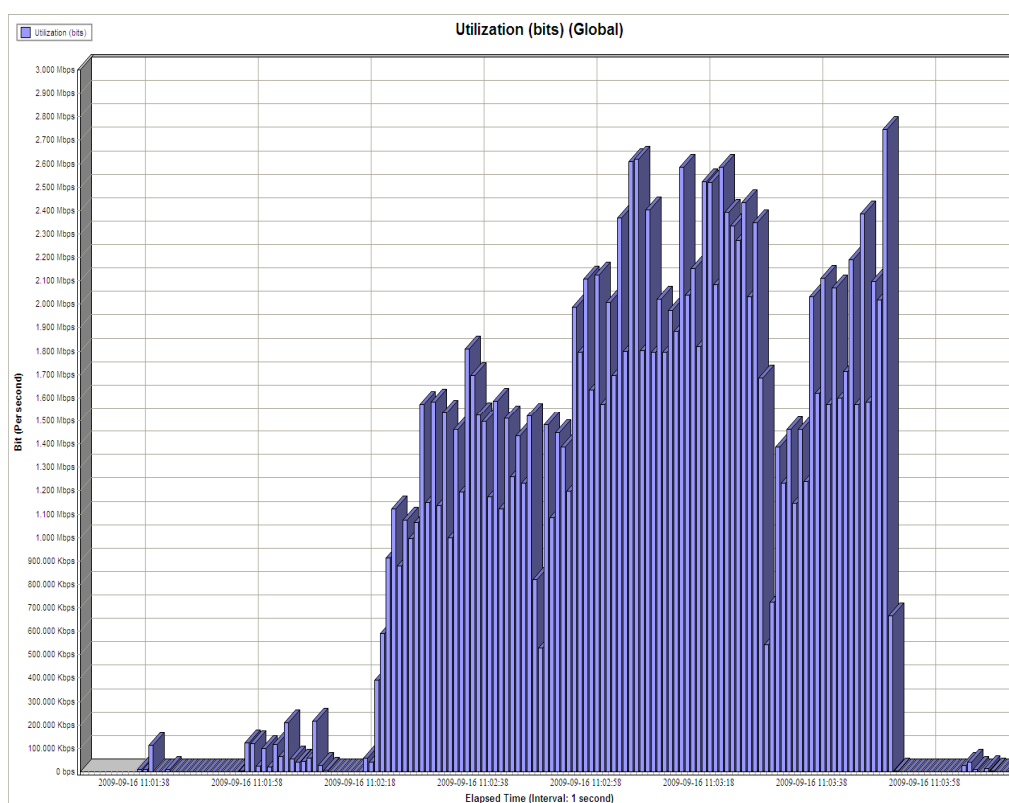
Kuva 16: Päätelaitteen datansiirto perustilanteessa



Kuva 17: Päätelaitteen datansiirto etätyöpöytäyhteyttä käytettäessä

Kuvasta 17 nähdään että etätyöpöytä yhteyden käyttäminen sai dataliikenteen määrän nousemaan maksimissaan määrään 460 Kbps. Jatkuvalle tasolle dataliikenteen määrä lisääntyi moninkertaiseksi verrattuna pelkästään sovellusten käyttämisen tuottamaan dataliikenteeseen.

Seuraavan mittauksen tarkoitus oli selvittää yhteyden maksimikapasiteetti. Testaus suoritettiin siirtämällä suurta tiedostoa päätteelle ja kaappaamalla dataliikenne. Kuva 18 esittää kaapatun liikenteen määrää.



Kuva 18: Päätelaitteen datansiirto suurta tiedostoa siirrettäessä

Kuvasta 18 nähdään että maksimissaan dataa siirtyi noin nopeudella 2,7 Mbps. Keskimääräinen datansiirto nopeus oli noin 1,5 Mbps. Kuvaajan alku- ja loppupäässä sijaitsevista pylväistä nähdään kuinka pientä sovellusten tuottama datansiirto on verrattuna maksimikapasiteettiin. Jos oletetaan että suurin mahdollisessa tilanteessa havaittu datansiirtomäärä on etätyöpöytäyhteyttä käytettäessä havaittu 460 Kbps, jää mittausten perusteella vapaata tiedonsiirtokapasiteettia noin 1 Mbps. Tämä riittäisi helposti esimerkiksi videokuvan siirtämiseen, mutta jos videokuvaa siirrettäisiin 50 päätelaitteelle, olisi tilanne toinen sillä tukiaseman tarjoama yhteys jaetaan kaikkien päätelaitteiden kesken. Käytössä ollut 16-QAM modulointitekniikka mahdollistaa suuremman nopeuden kuin esimerkiksi BPSK, jota yhteys saattaa joissakin kohdissa satama-aluetta käyttää. Yhteys on myös hitaampi päätelaitteelta tukiasemaan päin joka on otettava huomioon jos esimerkiksi suunnitellaan videokuvan siirtoa työkoneilta.

5 ETENEMISMALLIEN SOVELTUVUUS SATAMAYMPÄRISTÖÖN

Etenemismallien soveltuvuutta satamaympäristöön tutkitaan laskemalla signaalin voimakkuudet etenemismallien kaavojen perusteella eri mittauspisteiden etäisyyksillä. Tämän jälkeen tulokset taulukoidaan ja niitä verrataan mitattuihin tuloksiin. Tarkoituksena on löytää etenemismalli ja muuttujien arvot, jotka kuvaavat parhaiten mitattuja tuloksia.

5.1 VAPAAN TILAN VAIMENEMINEN

Aluksi esitellään laskelmat miten saadut mittaustulokset korreloivat laskennallisten tulosten kanssa, jotka ottavat huomioon lähetystehon 28 dBm, antennivahvistukset +16 dBm ja +6 dBi, sekä vapaan tilan vaimenemisen (kaava 2). Nämä tulokset voivat antaa viitteitä siitä minkälainen vaikutus alueella olevilla merikonteilla on signaalin vahvuuteen. Mittaustulokset sekä laskennalliset tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6: Mittaustulokset ja vapaan tilan vaimenemisen mukaan lasketut arvot

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm)	Ero (dBm)
1.	-63	-57	6
2.	-58	-56	2
3.	-79	-57	22
4.	-61	-57	4
5.	-63	-58	5
6.	-65	-57	8
7.	-63	-59	4
8.	-80	-58	22

Tuloksista nähdään että mitattu ja laskennallinen tulos vastasivat toisiaan parhaiten mittauspisteessä 2. Tämä johtunee siitä että kyseinen mittauspiste on lähimpänä tukiasemaa ja siitä on esteetön näköyhteys tukiasemaan. Tulokset osuivat hyvin kohdilleen, sillä 2 dBm:n ero selittyy helposti antennikaapeleista johtuvista häviöistä. Mittauspisteessä 3 suurta eroavaisuutta mitatulla ja laskennallisella tuloksella selittää se, että mittauspisteessä ja tukiaseman välissä oli tyhjien merikonttien pinoja, jotka ovat huomattavasti korkeampia kuin täysien merikonttien pinot. Mittauspisteessä 8 ero oli yhtä suuri, mutta mittauspisteessä ja tukiaseman välissä ei ollut korkeita merikonttipinoja. Huono kuuluvuus kyseisessä mittauspisteessä voi selittyä esimerkiksi sillä että mittauspisteessä ja tukiaseman välillä on sattunut olemaan mittaushetkellä korkea nosturi, jonka avulla merikontteja lastataan laivoihin.

Mittauspisteiden 1,4,5,6 ja 7 tulokset näyttäisivät kuvaavan tässä tapauksessa parhaiten kuuluvuutta alueella jossa lukit purkavat ja lastaavat merikontteja laivoista kahteen kerrokseen. Näillä mittauspisteillä mitattujen ja laskennallisten arvojen erot liikkuvat välillä 4-8 dBm. Jos mittauspisteessä 2 mitatun ja laskennallisen tuloksen perusteella oletettaisiin, että antennikaapeleista johtuvat häviöt ovat noin 2 dBm, voitaisiin arvioida merikonttien aiheuttavan tällä alueella keskimäärin 3-4 dBm vaimennuksen. Vaimennus on melko merkityksetön, ja tämän perusteella voisikin sanoa, että kuuluvuutta arvioidessa kannattaa keskittyä pahempiin ongelmakohtiin, kuten korkeiden tyhjien merikonttipinojen taakse jääviin alueisiin. Lukeille kuuluvuus tällä alueella ei ole muutenkaan ongelma, sillä niiden antennit ovat aina korkeammalla kuin kahteen kerrokseen pinotut merikontit.

5.2 HATA -MALLI

Laskettaessa taulukon 7 esittämiä tuloksia, on Hata -mallin mukainen avoimille tai esikaupunkimaisille alueille tarkoitettu korjausmuuttuja K on laskettu esikaupunkimaisille alueille tarkoitettuna kaavan perusteella.

Laskettaessa korjausermiä $a(h_m)$ on oletettu ”kaupungin” kooksi pieni/keskisuuri. Selkeästi muista poikenneet mittauspisteet 3 ja 8 on jätetty pois laskuista.

Taulukko 7: Mittaustulokset ja Hata -mallin mukaan lasketut arvot

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm)	Ero (dBm)
1.	-63	-74	11
2.	-58	-71	13
4.	-61	-73	12
5.	-63	-75	12
6.	-65	-74	9
7.	-63	-77	14

Tuloksista nähdään että lasketut arvot antavat heikomman signaalin voimakkuuden kuin mitä todellisuudessa mitattiin. Ero johtunee etenemismallille määritetyistä rajoitteista, jotka eivät tässä tapauksessa täyttyneet.

5.3 COST 231 HATA -MALLI

Kaupunkialueille tarkoitetun Cost 231 Hata -mallin määrittelemistä rajoituksista ainoastaan taajuus ei päde tämän työn tapaukseen. Taulukko 8 esittää mallin mukaan laskettuja tuloksia sekä vertailun mitattuihin tuloksiin.

Taulukko 8: Mittaustulokset ja Cost 231 Hata -mallin mukaan lasketut arvot

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm)	Ero (dBm)
1.	-63	-90	27
2.	-58	-87	29
4.	-61	-89	28
5.	-63	-91	28
6.	-65	-90	25
7.	-63	-93	30

Taulukosta 8 nähdään että Cost 231 Hata –mallin mukaan lasketut tulokset antavat huomattavasti heikompia signaalin voimakkuuksia kuin mittaukset. Mahdollisia syitä tähän ovat ei-tuettu taajuus sekä ympäristö jolle malli on tarkoitettu. Merikonttipinot eivät vastaa kaupungeissa sijaitsevien rakennusten korkeuksia.

5.4 COST 231 WALFISH-IKEGAMI -MALLI

Cost 231 Walfisch-Ikegami -malli kattaa taajuudet ainoastaan 2 GHz asti. Malli ei myöskään kata antennikorkeuksia tarpeeksi korkealle. Jos taajuus olisi alhaisempi ja vaaditut antennikorkeudet suurempia, Cost 231 Walfisch-Ikegami -malli voisi toimia alueen luonteen vuoksi hyvin, sillä se ottaa huomioon kaupunkialueelle ominaisia piirteitä. Alueita, joille merikontteja on varastoitu, voisi ajatella kortteleina joiden välissä on katuja. Jos merikonttien varastointialueiden välisiä kaistoja ajatellaan katuina, saadaan COST 231 Walfisch-Ikegami -mallin muuttujille laskettua seuraavat arvot:

- $h_{base} = 80m$
- $h_{roof} = 5.24m$
- $\Delta h_{base} = 74.76m$
- $w = 30m$
- $b = 120m$
- $\Delta h_{roof} = 1.74m$
- $h_{mobile} = 3.5m$

Koska merikonttien paikat muuttuvat jatkuvasti, muuttujia laskettaessa on oletettu kuviteltu tilanne jossa konttikentän jokaisessa paikassa on kaksi 2,62 metriä korkeaa konttia päällekkäin. Tämä kuvaa todellista tilannetta hyvin, sillä vapaita paikkoja konttikentällä ei yleensä ole paljon. Taulukko 9 esittää mitattuja tuloksia sekä COST 231 Walfisch-Ikegami -mallin mukaan laskettuja tuloksia.

Taulukko 9: Mittaustulokset ja COST 231 Walfisch-Ikegami -mallin mukaan lasketut arvot

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm)	Ero (dBm)
1.	-63	-71	8
2.	-58	-70	12
4.	-61	-71	10
5.	-63	-72	9
6.	-65	-71	6
7.	-63	-73	10

Taulukosta 9 nähdään että COST 231 Walfisch-Ikegami -mallin mukaan lasketut signaalivoimakkuudet ovat liian heikkoja. Mallissa määritetyt rajoitteet, jotka eivät näissä mittauksissa päteeneet, olivat selkeästi merkityksellisiä.

5.5 MUUT ETENEMISMALLIT

Artikkelin (IEEE 802.16.3c-01, 2001) esittelemä malli on tarkoitettu lähinnä erilaisten maastotyyppien ja kasvillisuuden aiheuttaman vaimenemisen arvioimiseen. Lasketaan mallin avulla tulokset käyttäen kaikkia taulukon 2 esittämiä maastotyyppejä. Laskettujen ja mitattujen tulosten vertailu on esitettyä taulukossa 10.

Taulukko 10: Mittaustulokset ja artikkelissa (IEEE 802.16.3c-01, 2001) esitetyn mallin mukaan lasketut arvot

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm), maastotyyppi A	Laskettu DL RSSI (dBm), maastotyyppi B	Laskettu DL RSSI (dBm), maastotyyppi C
1.	-63	-58	-58	-55
2.	-58	-54	-54	-52
4.	-61	-56	-56	-54
5.	-63	-60	-59	-57
6.	-65	-58	-58	-55
7.	-63	-62	-61	-59

Taulukon 10 esittämistä tuloksista nähdään, että lähimpänä mitattuja tuloksia ovat maastotyyppin A mukaan lasketut tulokset. Kaikki lasketut tulokset ovat kuitenkin liian optimistisia, johtuen siitä että teräksiset merikontit vaimentavat signaaleja enemmän kuin kasvillisuus.

Rajoitusten puolesta työssä käytetylle kokoonpanolle sopiva malli on artikkelissa (Marcus C. & Frank J., 2005) esitetty tilastoihin perustuva malli. Malli pätee 3.5 GHz taajuusalueella sekä 100 – 2000m antennietäisyyksillä. Mallin muuttuja γ voidaan selvittää kaavan 24 avulla. Jos laskemiseen käytetään mittauspisteiden 2 ja 4 arvoja, saadaan muuttujan γ arvoksi 6.21. Arvo on suuri, sillä yleensä muuttujan γ arvo on yli 5 ainoastaan sisätiloihin tarkoitetuissa etenemismallifunktioissa (Winton A. et.al., 2007). Saadulla muuttujan γ arvolla saadaan artikkelissa (Marcus C. & Frank J., 2005) esitettyä mallia käyttäen taulukon 11 mukaiset tulokset. Muuttujan A eli vapaan tilan vaimenemisen arvona käytettiin mittauspisteen 2 arvoa, sillä siitä oli esteetön näkyvyys tukiasemaan.

Taulukko 11: Mittaustulokset ja artikkelissa (Marcus C. & Frank J., 2005) esitetyn mallin mukaan lasketut arvot

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm)	χ
1.	-63	-63	0
2.	-58	-58	0
4.	-61	-61	0
5.	-63	-66	3
6.	-65	-63	-2
7.	-63	-70	7

Taulukosta 11 nähdään että vaimenemisvirhe χ on nolla suurella osalla tuloksista. Eniten mitatusta arvosta poikkeaa mittauspisteen 7 tulos. Tämä malli sopii kuitenkin paremmin tuloksiin kuin aiemmin esitettyjen mallien mukaan lasketut tulokset.

IEEE:n suosituksessa (IEEE C802.16j-06/003, 2006) esitetyn mallin korjausmuuttujaksi saadaan -1.276. Taulukko 12 esittää mitattujen ja laskettujen tulosten erot, eli tässä etenemismallissa katvevaikutusmuuttujan s arvot.

Taulukko 12: Mittaustulokset ja IEEE:n suosituksessa (IEEE C802.16j-06/003, 2006) esitetyn mallin mukaan lasketut arvot

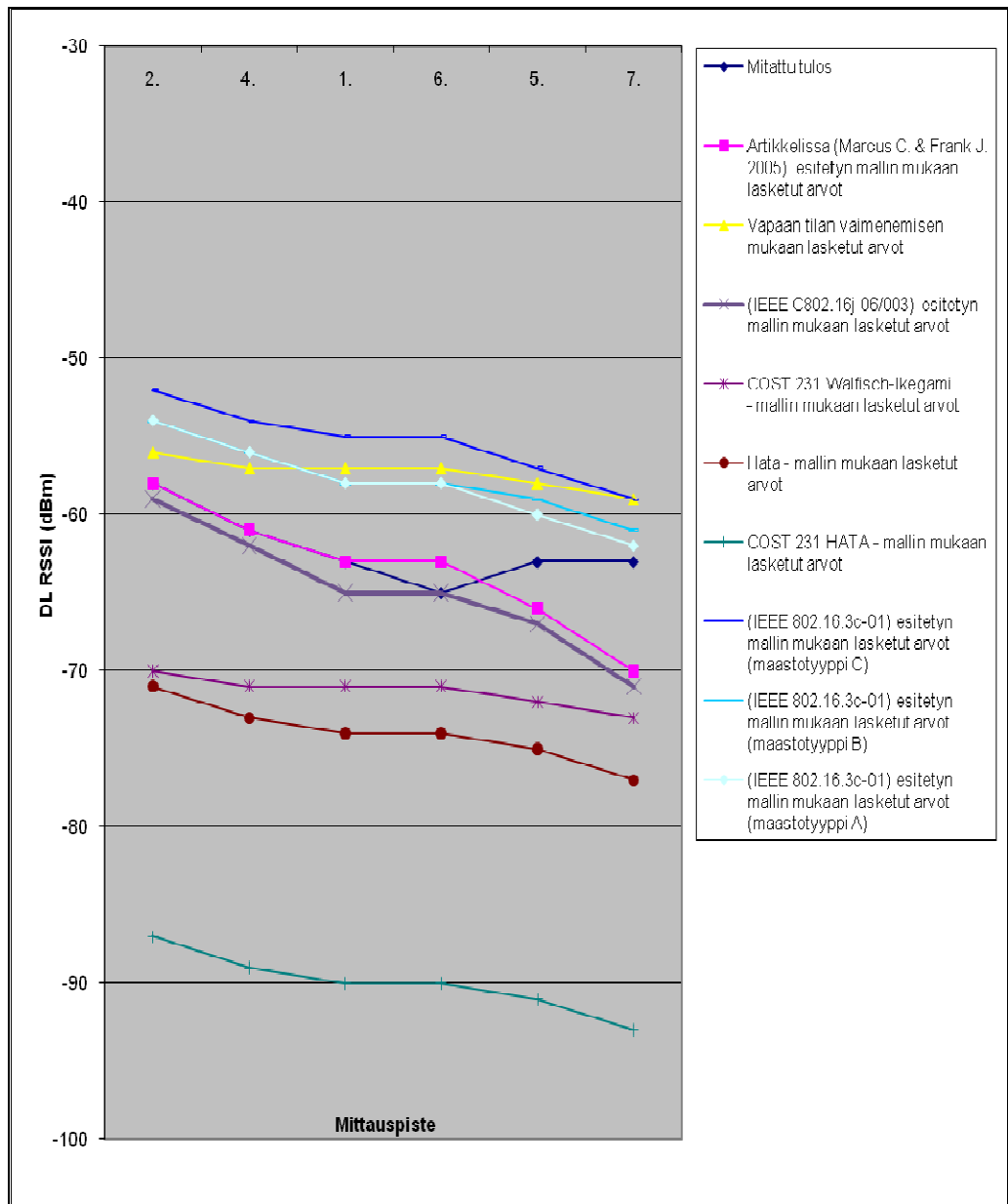
Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Laskettu DL RSSI (dBm)	s
1.	-63	-65	2
2.	-58	-59	1
4.	-61	-62	1
5.	-63	-67	4
6.	-65	-65	0
7.	-63	-70	7

5.6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuva 19 esittää kaikkia laskettuja sekä mitattuja tuloksia. Mittauspisteet on järjestetty niiden tukiasemaan olevan etäisyyden mukaan suuruusjärjestykseen. Mittauspisteiden sijainnit löytyvät kuvasta 15. Kauimmas mitatuista tuloksista sijoittuivat COST 231 HATA -mallin mukaan lasketut tulokset. Tämä on yllättävää, sillä kaikki mallin määrittelemät rajoitteet täyttyivät taajuutta lukuun ottamatta.

Lähimpänä mitattuja tuloksia ovat artikkeleissa (Marcus C. & Frank J., 2005) ja (IEEE C802.16j-06/003, 2006) esitettyjen mallien perusteella lasketut tulokset. Molemmissa malleissa on vaimenemisvirhettä kuvaava muuttuja. Jos vaimenemisvirhettä kuvaaville muuttujille lasketaan arvot mitattujen ja laskettujen tulosten erojen keskiarvojen perusteella, saadaan etenemismalleille taulukon 13 mukaiset uudet tulokset.

Mitattujen ja laskettujen tulosten vertailujen perusteella satama-alueelle soveltuvien etenemismallien on artikkelissa (Marcus C. & Frank J., 2005) esitetty malli. Jos konttikenttä olisi laajempi, saataisiin tuloksia vertailtua suuremmilla etäisyyseroilla. Suuremmissa satamissa tällainen tutkimus olisi mahdollinen ja voisi antaa tarkempaa tietoa minkälainen etenemismalli satama-alueelle soveltuu parhaiten.



Kuva 19: Mitattujen ja laskettujen tulosten vertailu

Taulukko 13: Artikkelien (Marcus C. & Frank J., 2005) ja (IEEE C802.16j-06/003, 2006) esittelemien mallien mukaan laskettujen tulosten vertailu tulosten perusteella lasketuilla vaimenemisvirhemuuttujilla

Mittauspiste	Mitattu DL RSSI (dBm)	Artikkelissa (Marcus C. & Frank J., 2005) esitetyn mallin mukaan lasketut arvot, $\chi = 4/3$	(IEEE C802.16j-06/003,2006) esitetyn mallin mukaan lasketut arvot, $s = 5/2$
1.	-63	-62	-62
2.	-58	-57	-57
4.	-61	-60	-60
5.	-63	-64	-65
6.	-65	-62	-62
7.	-63	-68	-69

Tukiaseman sijoituspaikka on paras mahdollinen. Erillisen tornin rakentamiselle ei ole perusteita. Voimalaitoksen piippu tarjosi korkean ja turvallisen sijoituspaikan, ja virtaa oli saatavilla. Antenni on noin. 80 m korkeudella ja se on asennettu 5 asteen kulmassa alaspäin, joka kohdistaa keilan horisontaalisen tason alapuolelle ja vähentää vaimenemista. Tarpeen vaatiessa kuuluvuutta olisi voitu pyrkiä parantamaan adaptiivisilla antenniratkaisuilla, mutta koska tällaiselle ei ole tarvetta, vaaditaan päätelaitteen päässä vähemmän prosessointitehoa.

Jos verkkoa on tarvetta tulevaisuudessa laajentaa tai parantaa, on suositeltavaa siirtyä IEEE 802.16e-2005 standardiin perustuviin laitteisiin. Tämä mahdollistaisi useamman tukiaseman käytön sekä nopeammat päätelaitteiden liikkumisnopeudet. Siirtyminen ei ole tällä hetkellä kuitenkaan kannattavaa, sillä tietoliikenneverkko toimii vaaditulla tavalla. Siirtyminen vaatisi tukiaseman lisäksi uudet laitteet vastaanottopäähän, ja satamassa on suuri määrä yhteyttä käyttäviä työkoneita.

Tietoliikenneverkko toimii kaikilla alueilla missä sitä käytetään, mutta mahdollinen laajennusehdotus olisi tarjota yhteys satamassa asioiville laivoille. Tällainen toteutus löytyy tällä hetkellä mm. Singaporen satamasta. Datansiirtomittausten perusteella ylimääräistä kaistaa löytyisi yhteydelle.

5.7 VERKON PEITTOALUE

Tutkitaan verkon peittoaluetta artikkelin (Marcus C. & Frank J., 2005) esittämän etenemismallin mukaan mittaustulosten perusteella saatujen muuttujien arvoja käyttäen. Tämä ei kuvasta tässä tapauksessa oikeaa tilannetta, sillä olettamuksena on että koko alue olisi konttikenttää jossa merikontteja on pinottuna maksimissaan kahta päällekkäin. Suuremmissa satamissa konttikenttä saattaa kuitenkin olla useita kilometrejä pitkä.

Määritetään RRSI:lle raja-arvoksi -80 dBm, jonka jälkeen kuuluvuus oletetaan liian huonoksi. Todellinen raja riippuu taustakohinan määrästä, eli onko SNR tarpeeksi suuri. Määritetyn raja-arvon perusteella saadaan laskettua verkon kantamaksi 2750 metriä. Tukiasemasta nähden etäisin paikka, jossa verkon täytyy kuulua, on tämän työn tapauksessa n. 2 km etäisyyden päässä. Mittauspiste 7 on 1975 m etäisyydellä tukiasemasta ja tällä kohtaa SNR oli 28 dB ja RRSI -63 dBm. Tämän perusteella verkon kantama on riittävä.

6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli dokumentoida WiMAX tietoliikenneverkon asennus Mussalon satamaan Steveco Oy nimiselle satamaoperaattorille, sekä tutkia sääolosuhteiden vaikutuksia signaalien vahvuuteen. Lisäksi pyrkimyksenä oli tutkia olemassa olevia etenemismalleja ja niiden soveltuvuutta ennustamaan signaalien vaimenemista satamaympäristössä. Tavoitteet täyttyivät ja tuloksena saatiin tietoa langattoman tietoliikenneverkon toteuttamisesta satama-alueelle.

WiMAX tukiaseman asennuksessa esiintyi alun alkaen kuuluvuusongelma, joka keskittyi alueen uloimpaan merenpuoleiseen laitaan. Ongelmaa pyrittiin korjaamaan kääntämällä tukiasemaa sekä nostamalla antennia tuloksetta. Ratkaisu ongelmaan löytyi. Ongelma oli johtunut virheellisistä asetuksista.

Yhdellä tukiasemalla saavutettiin riittävä kuuluvuus koko satama-alueelle. Tukiasemien lisääminen olisi ollut mahdotonta IEEE 802.16-2004 standardiin perustuvilla laitteilla, koska ne eivät tue saumatonta siirtymistä tukiasemalta toiselle, ja päätelaitteissa käytettävät ohjelmat eivät siedä katkoksia.

Sääolosuhteiden vaikutuksesta löydettiin tutkimuksia, joiden perusteella lumisateella ei ole merkittävää vaikutusta signaalien etenemiseen. Kansainvälisen televiestintäliiton radiosektorin suositusten mukaan 3.5 GHz taajuusalueella myös vesisateen ja sumun vaikutukset ovat merkityksettömiä. Tätä tuki myös suoritettu testi.

Etenemismalleja, joiden avulla WiMAX tietoliikenneverkon kuuluvuutta voidaan ennustaa, löytyy useita. Niissä on kuitenkin vajaavaisuuksia, minkä takia useimmat niistä eivät sopineet tämän työn tapaukseen. Suurimmassa osassa ongelmaksi nousi taajuusalue joilla etenemismallit pätivät. Löydettiin etenemismalli, joka kuvasi hyvin mitattuja tuloksia. Mallille laskettiin muuttujat mitattujen tulosten perusteella.

Satama-alueella olevien merikonttien aiheuttamaa vaimenemista signaaleissa pyrittiin ennustamaan laskennallisilla tuloksilla jotka ottavat huomioon vapaan tilan vaimenemisen, lähetystehon sekä antennivahvistukset. Tuloksista kävi ilmi että suurimmalla osalla aluetta vaimeneminen oli luokkaa 3-4 dB, joka on melko merkityksetön. Suositeltavaa onkin keskittyä erillisiin ongelma-alueisiin joissa tyhjiä merikontteja on pinottuna tavallista korkeampiin kasoihin.

Tulevaisuudessa jos verkkoa halutaan parantaa, kannattaa siirtyä IEEE 802.16e-2005 standardiin perustuviin laitteisiin. Standardi määrittelee saumattoman siirtymisen tukiasemalta toiselle, sekä paremman suorituskyvyn. Suomen ensimmäisen kenttätestin perusteella standardin mukaiset laitteet toimivat myös päätelaitteen liikkua suurilla nopeuksilla. Mahdollinen laajennus verkkoon olisi tarjota satamassa asioiville laivoille tietoliikenneyhteys.

LÄHDELUETTELO

3GPP yhteisön Internet-sivusto. Saatavissa www.3gpp.org/.

Afric W. et.al. 2007. Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Results. Systems, signals and image processing, vol. 27.

Brad M. & Trent B. 2007. WiMAX Technology Evaluation. Ball State University.

Daimler, SPY ja Omnitele. 2008. Lehdistöiedote Suomen ensimmäisestä mobiili-WiMAX kenttätestauksesta .Saatavissa: <http://www.daimler.fi/>.

Delannoy P. et.al. 2009. Wimax Quality-of-Services Estimations and Measurements. Wireless Vitae'09.

DNA Oy yrityksen Internet-sivusto. Saatavissa <http://www.dnainland.fi>.

Elisa Oyj yrityksen Internet-sivusto. Saatavissa <http://www.elisa.fi>.

Erceg V. et.al. 1999. An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. IEEE JSAC vol. 17.

Eugene C. 2004. WiMAX's Technology for LOS and NLOS Environments. WiMAX forum.

European Cost Action 231. 1999. Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems. ISBN 92-828-5416-7.

George Z. et.al. 2007. WiMAX System Performance in Highly Mobile Scenarios with Directional Antennas. The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07).

Giannattasio G. et.al. 2009. A Guide to the Wireless Engineering Body of Knowledge. ISBN 978-0470-43366-9.

Hata M. 1980. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.VT-29, NO.3.

IEC standardointiorganisaation Internet-sivusto. Saatavissa <http://www.iec.ch>.

IEEE 802.16.3c-01. 2001. Channel Models for Fixed Wireless Applications.

IEEE C802.16j-06/003. 2006. Seaport Path Loss Model for Fixed Wireless Applications.

IEEE C802.16-SGM-02/03. 2002. 802.16a OFDMA PHY suitability for mobile applications.

IEEE Std. 802.16-2004. 2004. IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks, "Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems".

IEEE Std. 802.16e-2005. 2006. IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks, "Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands.

ITU-R P.1546-2. 2005. Method for Point-to-Area predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz.

ITU-R P.838-1. 1992-1999. Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods.

ITU-R P.840-3. 1992-1994-1997-1999. Attenuation Due to Clouds and Fog.

Jeffrey G. et.al. 2007. Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking. ISBN 0-13-222552-2.

Joe J. et.al. 2007. Path Loss Measurements in Sea Port for WiMAX. Wireless Communications and Networking Conference, 2007. IEEE Volume 11, Issue 15.

Joseph W. et.al. 2006. Path Loss Model for Wireless Applications at 3500 MHz. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006.

Kin K. et.al. 2005. Mobility Support for IEEE 802.16d Wireless Networks. IEEE Communications Society / WCNC 2005.

Marcus C. & Frank J. 2005. Urban Propagation Measurements and Statistical Path Loss Model at 3.5 GHz. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2005.

Sprint yrityksen Internet-sivusto. Saatavissa <http://www.sprint.com>.

Syed Ahson & Mohammad Ilyas. 2008. WiMAX Applications. ISBN 1-4200-4547-4.

Tapan K. et.al. 2003. A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 45.

Walfisch J. & Bertoni H. 1988. A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 36, NO. 12.

WiMACIG projektin Internet-sivusto. Saatavissa <http://www.wimacig.eu>.

Vip. D. et.al. 2008. Field Data Showing the Downlink Adaptive Beamforming Gains in an Experimental IEEE 802.16e-2005 OFDMA System. Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE.

WISEPORT Fact Sheet. Saatavissa <http://www.ida.gov.sg>.