



Jari Puurunen

RADIOLINKIN SUORITUSKYVYN MITTAUKSET

RADIOLINKIN SUORITUSKYVYN MITTAUKSET

Jari Puurunen
Opinnäytetyö
2012
Tietotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma, langaton tietoliikenne

Tekijä: Jari Puurunen

Opinnäytetyön nimi: Radiolinkin suorituskyvyn mittaukset

Työn ohjaaja: Pekka Rantala

Työn valmistumislukuvuosi: 2012 Sivumäärä: 33

Insinööriyö käsittelee radiolinkin eli ilmarajapinnan yli tapahtuvan tiedonsiirron mittaamista. Tavoitteena oli selvittää yhteyden muodostamiseen optimaalinen TCP (Transmission Control Protocol) -ikkunan koko liukuvan ikkunan protokollassa, verkonkuormituksen vaikutus radiotien vasteaikaan ja antennien välinen läpäisykyky eri modulaatioilla.

Työssä mitattiin testi- ja reaaliympäristössä TCP- ja UDP (User Datagram Protocol) -liikennettä. Mittauksia tehtiin erilaisilla modulaatioilla, TCP-ikkunan kokoa muuttaen ja verkkoa kuormittaen. Työssä käytettiin modulointimenetelminä BPSK:ta (Binary Phase Shift Keying), QPSK:ta (Quadrature Phase Shift Keying) ja QAM16:ta (Quadrature Amplitude Modulation). Verkon kuormitus tapahtui koko siirtotien yli iperf-ohjelmaa käyttäen. Siirtotien kuormituksen aikana radiotieltä mitattiin vasteaikaa radiosta radioon. Mittauksista selvisivät TCP-ikkunan koko, verkon läpäisykyky ja huojunta. Työssä tehdyt mittaukset ja kuormitukset suoritettiin molemmista suunnista.

TCP-ikkuna mittauksien perusteella optimaalinen aloitusikkunan koko sektori- ja asiakasantennin yhteydelle on 320 kilotavua. Verkon kuormitusmittauksissa selvitettiin, että 90 %:n kuorma suunnasta A ja 75 %:n kuorma suunnasta B ei aiheuta pakettihäviötä ja huomattavaa vasteajan kasvua. Näillä kuormituksilla vasteajan huojunta pysyi alle yhden millisekunnin.

Asiasanat: tiedonsiirto, radiolinkit, TCP-ikkuna

ALKULAUSE

Tämä insinööryö tehtiin Koillisnetworks Oy:lle osana laajempaa tutkimusta radiotiehen vaikuttavista asioista.

Kiitokset hyvästä tuesta, mittauksissa tarvittavasta laitteistosta ja mittausympäristöistä työn tilaajan edustajille Pasi Puuruselle ja Kai Laurille. Kiitokset avustuksesta työn ohjaajalle yliopettaja Pekka Rantalalle ja kielenhuollosta lehtori Tuula Hopeavuorelle.

Oulussa 10.10.2012

Jari Puurunen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 RADIOYHTEYS	7
2.1 Radiolinkin ominaisuudet	7
2.2 Aallonpituus	9
2.3 Modulaatiotavat	12
3 TCP-IKKUNA	13
4 MITTAUSYMPÄRISTÖT JA LAITTEISTOT	15
4.1 Ympäristöt	15
4.2 Laitteistot	16
4.3 Ohjelmisto	17
5 MITTAUSTULOKSET	20
5.1 TCP-ikkunan mittaukset testiympäristössä	20
5.2 UDP-mittaukset testiympäristössä	21
5.3 TCP-mittaukset reaaliympäristössä	22
5.4 UDP-mittaukset reaaliympäristössä	23
5.5 Vasteaika suhteessa verkon kuormitukseen	24
6 MITTAUSTEN LUOTETTAVUUS	27
7 MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU	29
8 POHDINTA	31
LÄHTEET	32

1 JOHDANTO

Langaton tietoliikenne on nykyisin yleinen tiedonsiirron tapa lyhyillä ja pitkillä yhteyksillä. Nykyisin kotona olevat lähiverkot on yleensä toteutettu langattomasti. Langattoman tiedonsiirron etuna on helppo asennus, koska laitteiden välille ei tarvitse asentaa johtimia.

Insinööriyössä mitattiin radiolinkin eli ilmarajapinnan yli tapahtuvaa tiedonsiirtoa. Tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää yhteyden muodostamiseen optimaalinen TCP (Transmission Control Protocol) -ikkunan koko sekä tutkia miten verkon kuormitus vaikuttaa radiotien vasteaikaan ja antennien väliseen läpäisykykyyn. Tässä työssä mittaukset tehtiin testi- ja reaaliympäristössä TCP- ja UDP (User Datagram Protocol) -liikenteellä. Mittauksia tehtiin eri modulaatioilla, ikkunan kokoa muuttaen ja verkon eri kuormituksilla.

Insinööriyössä mitattiin yhteydellistä TCP-liikennettä ja yhteydetöntä UDP-liikennettä. TCP-liikennöinti tarvitsee kuittauksen lähetettyihin paketteihin tiedon perille menon varmistamiseksi. Yhteydettömällä UDP-liikenteellä paketteja lähetetään siirtotielle ilman kuittauksia. UDP-liikennettä käyttävät yleensä videopelit ja suorat lähetykset verkossa.

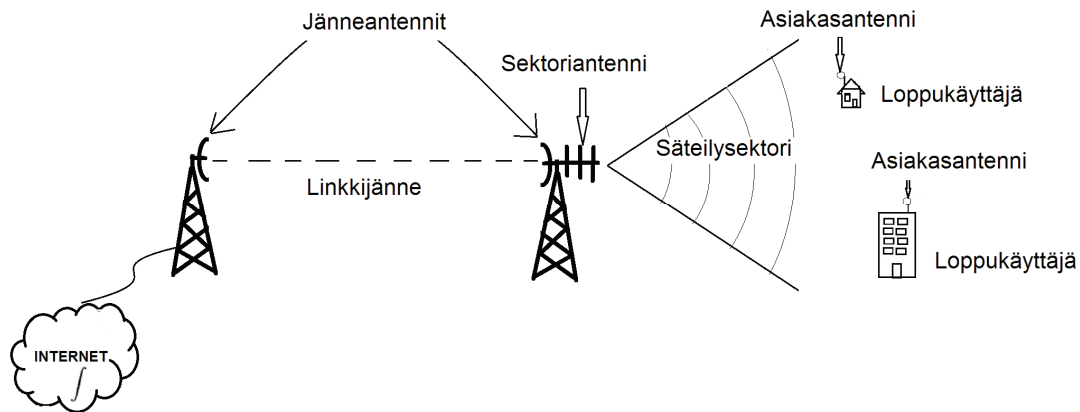
Työssä käytettiin modulaationa BPSK:ta (Binary Phase Shift Keying), QPSK:ta (Quadrature Phase Shift Keying) ja QAM16:ta (Quadrature Amplitude Modulation). Verkon kuormitus tapahtui koko siirtotien yli iperf-ohjelmaa käyttäen. Siirtotien kuormituksen aikana radiotieltä mitattiin vasteaikaa radiosta radioon. Työssä mittaukset ja kuormitukset suoritettiin molemmista suunnista. Mittaaminen tapahtui tietokoneilla iperf-ohjelmalla ja radioiden sisäisellä mittausohjelmalla. Mittauksissa esitetään TCP-ikkunan koko, radiolinkin läpäisykyky ja vasteajan huojunta.

Opinnäytetyön tilasi Koillisnetworks Oy. Koillisnetworks Oy on Koillismaalla toimiva tietoliikenneyritys, joka toimii operaattorina ja verkonrakentajana. Yrityksellä oli tullut tarve tällaiselle tutkimukselle, koska verkon joutokäyntiä oli tarkoitus minimoida ja kaistan käyttöä tehostaa.

2 RADIOYHTEYS

2.1 Radiolinkin ominaisuudet

Radiolinkillä tarkoitetaan ilmarajapinnan yli olevaa siirtotietä (kuva 1). Radiolinkkien toimintaan vaikuttaa olennaisesti, mitä taajuutta ja millaista modulaatiota radiotiellä käytetään. Taajuudella ja modulaatiolla on suora vaikutus verkon läpäisykykyyn. Tietyillä taajuuksilla on enemmän häiritseviä tekijöitä muun radioliikenteen vuoksi. Erilaiset taajuudet tarvitsevat aina eritehoiset lähetystehot ja antennien herkkyydet. Taajuus vaikuttaa olennaisesti myös monitieetenemiseen ja signaalin taipumiseen. (1.)



KUVA 1. Langaton yhteys

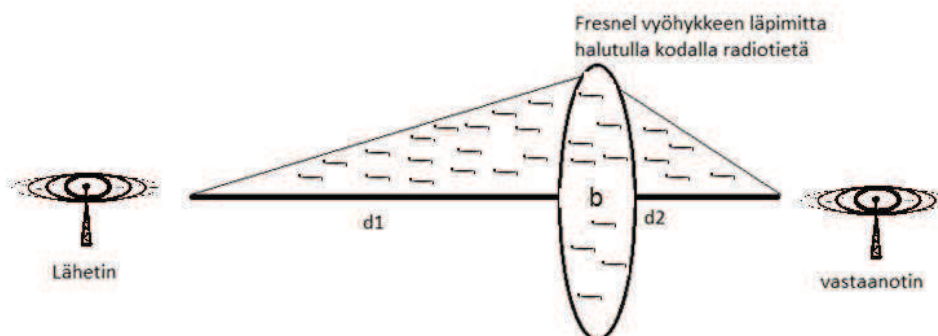
Radiolinkijärjestelmissä on käytössä erilaisia antennoja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Jänneantenneja käytetään linkkijänteiden muodostukseen. Jänneantennit ovat hyvin suuntaavia, koska ne kommunikoivat yleensä pitkillä etäisyyksillä keskenään. Jänneantenneilla on LOS-yhteys (line of sight) eli suora näköyhteys. Sektoriantenni säteilee kartionmallisen keilan, jonka suuntaavuus ja kantavuus ovat antennin ominaisuuksista kiinni. Asiakasantenni on loppukäyttäjän omassa kiinteistössä käytössä oleva antenni. Loppukäyttäjien asiakasantennit kommunikoivat sektoriantennin kanssa. Asiakasantennit ovat kapeakeilaisia ja lähetysteholtaan pienempiä kuin sektori- ja jänneantennit. (1.)

Jänne-, sektori- ja asiakasantennien tukiasemapaalvelimeen tulee olla määritettynä kaistanleveys, taajuus, lähetysteho, radiotien modulaatio, reititys- tai siltatila, reittitaulu, lähettimien ja vastaanottimien lukumäärät, identiteetit ja salaustmekanismit avaimineen. Antennien omalla ohjelmistolla nähdään signaalin tehotasot ja pystytään mittaamaan muun muassa vasteaikaa toisiin radioihin. (1.)

Suomessa Ficora eli Viestintävirasto ohjaa radiotaajuuksien käyttöä. Ficora pyrkii taajuuskäytön suunnittelulla varmistamaan niin nykyisille kuin uusille radiojärjestelmille mahdollisimman häiriöttömiä radiotaajuuksia. Ficoran taajuusjakotaulukosta löytyvät Suomessa käytössä olevien taajuusalueiden käyttötarkoitukset. Taajuusjakotaulukko löytyy Ficoran sivuilta osoitteesta <http://www.ficora.fi/index/palvelut/palvelutaiheittain/radiotaajuudet.html>. (2.)

Suomessa radiolinkeille tarkoitettuja taajuusalueita ovat muun muassa 1350–1400 MHz, 7080–8500 MHz ja 10 000–10 450 GHz. Alle 10 GHz:n taajuuksilla linkkijänteen pituus voi olla jopa 60 km, mutta 59 GHz:n taajuudella pituus on 500 metrin luokkaa. (2.) Pidempää yhteyksiä tarvittaessa linkkijänteitä voidaan kytkeä peräkkäin (1).

Radiolinkkejä suunnitellessa tulee huomioida useita muuttujia radiotiellä. Antennit on sijoitettava riittävän korkealle maasta ja on otettava huomioon siirtotiellä olevat pinnanmuodot sekä mahdolliset korkeat rakennukset. Muuttujat tulee ottaa huomioon, koska radiolinkkien väliin tulee Fresnelin vyöhyke (kuva 2) eli signaalin leveneminen siirtotiellä. (1.)



KUVA 2. Fresnelin vyöhyke

Siirtotietä voidaan tarkastella vapaan tilan laskukaavoilla, mikäli Fresnelin ensimmäinen vyöhyke on esteetön. Siirtotiellä Fresnelin ensimmäiselle vyöhykkeelle jäävät esteet on huomioitava kentän laskemisessa. Ensimmäisen Fresnelin vyöhykkeen voi laskea halutulta radiotien kohdalta (kaava 1). Fresnelin vyöhyke on läpimitaltaan suurimmillaan radiotien puolivälissä. (3.)

$$b = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

KAAVA 1.

b = Fresnelin vyöhykkeen halkaisija metreinä

λ = aallonpituus metreinä

d_1 = etäisyys lähettimestä metreinä

d_2 = etäisyys vastaanottimesta metreinä

Radioaallon etenemiseen vaikuttavia tekijöitä ovat taajuus, lähettimen etäisyys maanpinnasta, ympäristö jossa eteneminen tapahtuu, lähetysteho, antennien herkkyys ja ilmakehän sähköiset ominaisuudet. (3.)

2.2 Aallonpituus

Signaalin etenemisominaisuuksia mietittäessä on tärkeä tietää signaalin aallonpituus eri taajuuksilla. Taulukossa 1 on esitettyinä VHF- ja UHF-taajuuksien aallonpituuksia. Aallonpituus voidaan laskea tietylle taajuudelle kaavan 2 mukaisesti. (4.)

TAULUKKO 1. Taajuudesta aallonpituudeksi

Taajuus MHz	Aallonpituus (m)
3	100
30	10
100	3
300	1
500	0,6
1000	0,3
2000	0,15
3000	0,1

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

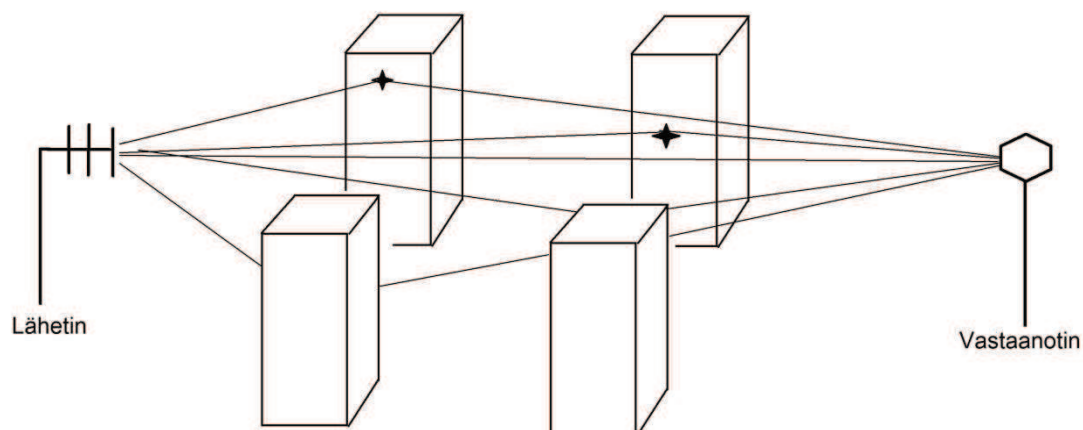
KAAVA 2.

λ = aallonpituus metreinä

c = valonnopeus $3 \cdot 10^8$ m/s

f = taajuus hertseinä

Aallonpituus vaikuttaa signaalin monitie-etenemiseen. Monitie-etenemisellä tarkoitetaan signaalin heijastumista ympäristön esteistä. Signaali voi heijastua seinistä, pinnanmuodoista ja muista kiinteistä elementeistä. Heijastumisella voi olla vastaanottimessa signaalin tehoa suurentava tai heikentävä vaikutus. Jos heijastuneet signaalit saapuvat riittävän samanaikaisesti vastaanottimeen, vastaanotin kykenee summaamaan saapuneet signaalit suuremmaksi tehoksi. Monitie-etenemisen haittoja tulee silloin, kun signaalit saapuvat eri aikana vastaanottimeen, jolloin vastaanotin joutuu tekemään enemmän laskutoimituksia oikean informaation selvittämiseksi. Suuntaavat antennit aiheuttavat vähemmän monitie-etenemistä kuin ympärisäteilevät antennit (kuva 3). Monitie-etenemiseen vaikuttaa antennin säteilykuvio. (1.)



KUVA 3. Monitie-eteneminen

Signaalin vaimeneminen ilmarajapinnan yli LOS-siirtotiellä riippuu käytetystä taajuudesta. LOS-yhteyden vaimeneminen ympärisäteilevällä antennilla voidaan laskea kaavan 3 mukaisesti. Vaimeneminen tapahtuu suhteessa etäisyyden neliöön (5, s. 13.). Vaimenemisen tapahtumaa havainnollistaa kuva 4.

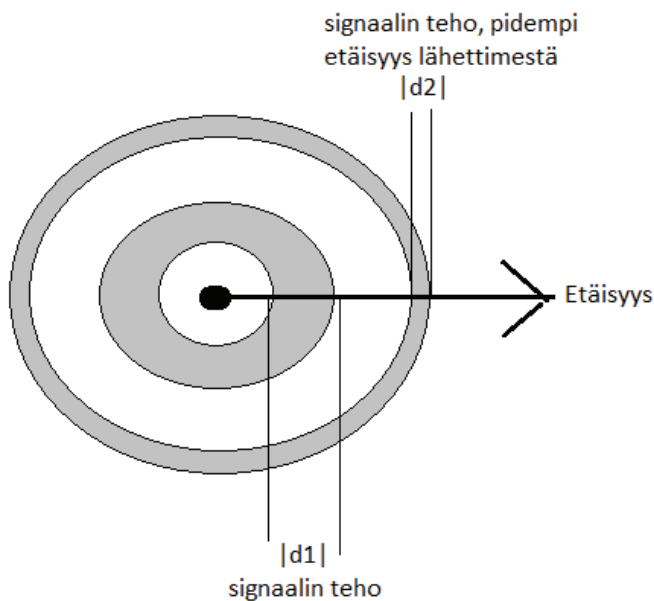
$$N = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi \times d}{\lambda} \right)^2$$

KAAVA 3

N = vaimennus desibeleinä

d = etäisyys metreinä

λ = aallonpituus metreinä



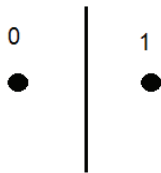
KUVA 4. Sähkömagneettisen aallon eteneminen (5, s. 14)

Kuvassa 4 keskellä oleva musta piste kuvaa lähetintä ja harmaat alueet kuvaavat signaalin tehoa. Renkaat kuvaavat sitä, että kun etäisyys lähettimestä kasvaa, lähettimen vaikutusalue suurenee ja signaalin teho pienenee. (5, s. 14.)

2.3 Modulaatiotavat

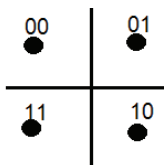
Moduloinnilla tarkoitetaan informaation lisäämistä signaalin kanta-aaltoon. Kanta-aalto on suuritaajuinen sinisignaali, jota moduloidaan pienitaajuisella sinisignaalinalla. Modulointi kanta-aaltoon tapahtuu signaalin amplitudissa, taajuudessa tai vaiheessa. (6, s. 98.) Tiedonsiirron tehostamiseksi on käytössä erilaisia modulaatiotapoja. Modulaation valintaan vaikuttavat signaalin tehot ja tiedonsiirron määrän tarve (7, s. 146).

BPSK-modulaatiosignaali (kuva 5) on kevyt, koska signaalilla on kaksi eri vaihetta. BPSK on vastakkaisvaiheinen eli vaiheiden ero on 180° . (6, s. 99.)



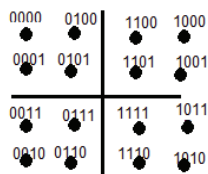
KUVA 5. Konstellatio BPSK (6, s. 99)

QPSK-modulaatiosignaalinassa (kuva 6) on neljä eri vaihetta. Vaiheiden ero on 90° . (6, s. 99.)



KUVA 6. Konstellatio QPSK (6, s. 99)

QAM16-modulaatiosignaalinassa (kuva 7) on 16 erilaista tilaa.



KUVA 7. Konstellatio QAM16 (6, s. 99)

3 TCP-IKKUNA

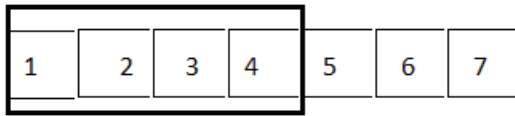
TCP-Ikkunan koko määrittää, kuinka suuri datamäärä voi olla lähetettynä ilman, että siihen on saatu vielä kuittausta ja on pakko jäädä odottamaan kuittauksen saapumista. Ikkunoita on yhteydellä aina neljä kappaletta, eli molemmilla yhteyden osapuolilla A:lla ja B:llä on omat lähetys- ja vastaanottoikkunansa. Laitteen A lähetysikkunan koko on yhtä suuri kuin laitteen B vastaanottoikkuna ja vastaavasti laitteen B lähetysikkunan koko on samankokoinen kuin laitteen A vastaanottoikkuna. Yhteyttä muodostettaessa ikkunan koko on ennalta määrätty. Ikkunakentässä on tieto siitä, kuinka monta tavua laite on valmis vastaanottamaan yhteyden toiselta osapuolelta. Jokaiseen kuittaukseen on liitetty tieto, montako oktetia vastapuoli on valmis ottamaan vastaan. (8, s. 138.)

Liukuvalla ikkunalla pystytään ikkunaa suurentamaan tai pienentämään ennalta määritellystä ikkunan koosta. Jos vapaata kapasiteettia on käytettävissä, niin vastaanottaja kertoo lähettäjälle uuden isomman halutun ikkunan, jolloin tiedonsiirto kasvaa. Vastaanottaja voi lähettää ikkunassa sanoman lähettäjälle nollan kokoisesta ikkunasta. Lähettäjällä ei ole tässä tilanteessa muuta vaihtoehtoa kuin kokeilla lähetystä lähettämällä edellinen paketti uudelleen ja odottaa sille kuittausta. Kuittauksen saavuttua lähettäjälle lähettäjä voi kasvattaa ikkunansa kokoa ja lähettää seuraavan jakson datasta. (9, s. 213.)

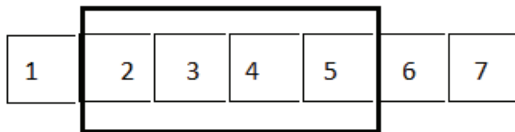
Ruuhkatilanne voi syntyä, jos vastaanottajalla on useampia yhtäaikaisia yhteyksiä käytössä. Tilanne korjaantuu, kun vastaanottaja siirtää ikkunan sisällä tiedon lähettäjälle uuden kokoisesta ikkunasta, jonka vastaanottaja pystyy käsittelemään. (8, s. 156.)

Kuvassa 8 on liukuva ikkuna, jossa on neljä pakettia. Paketit lähetetään siirtotielle ja kuittaus saadaan vain pakettiin yksi. Ikkuna siirtyy yhdellä eteenpäin, jolloin voidaan lähettää seuraava paketti, vaikka lähettäjä ei ole saanut kuittausta vielä muista paketeista. (9, s. 214.)

alkuperäinen ikkuna



ikkuna siirtyy →



KUVA 8. Liukuva ikkuna (9, s. 214)

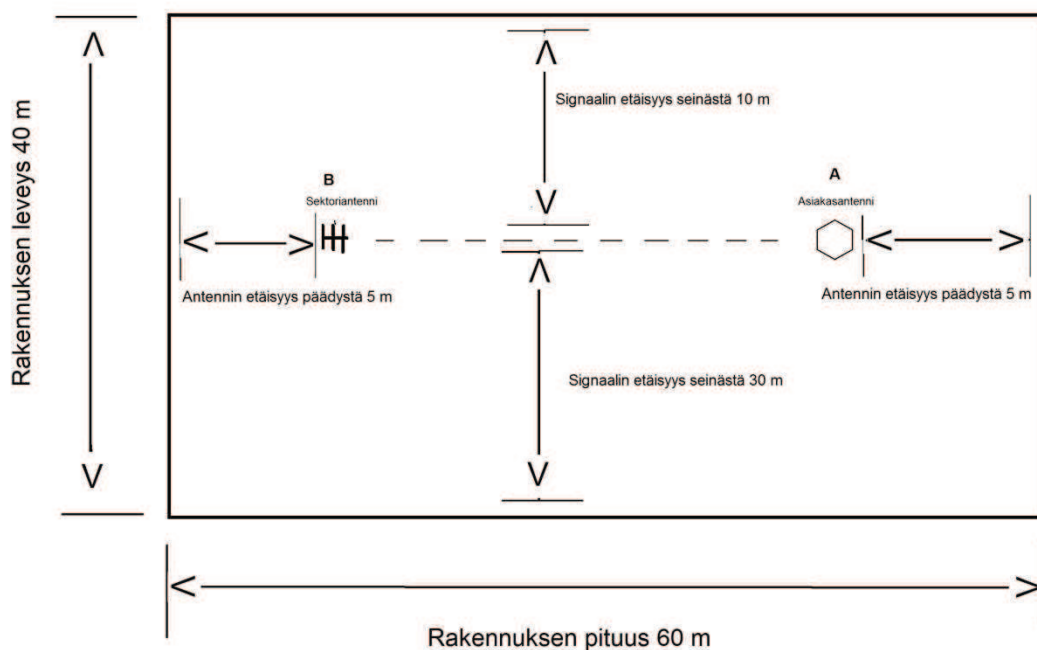
Liukuvassa ikkunassa ainoastaan paketit, joihin ei saavu kuittausta, lähetetään uudelleen, joten tiedonsiirto tehostuu. Liukuvan ikkunan protokolla pitää merkkitaulua kuittauksista ja ylläpitää erillistä ajastinta jokaista kuittaamatonta pakettia varten. Paketin kadotessa tapahtuu aikakatkaisu ja paketti lähetetään uudelleen. Kun lähettäjä siirtää ikkunaa, ikkuna siirretään kaikkien kuitattujen pakettien ohi. Vastaanottaja ylläpitää samanlaista merkkitaulua. (9, s. 214.)

Ikkunaa kasvatettaessa eli ajankohdalle ideaalista ikkunaa käytettäessä saadaan verkon tyhjäkäyntiaika eliminoitua. Liukuvan ikkunan ansiosta paketteja voidaan lähettää niin nopeasti kuin siirtotie pystyy niitä kuljettamaan. (9, s. 214.)

4 MITTAUSYMPÄRISTÖT JA LAITTEISTOT

4.1 Ympäristöt

Työssä rakennettiin 2 ympäristöä, joissa mittaukset suoritettiin. Testiympäristö rakennettiin peltiseen isoon halliin. Antennien etäisyys toisistaan oli 50 metriä. Hallissa antennit sijoitettiin lattiasta 3 metrin korkeuteen, päätyseinistä 5 metrin etäisyydelle, toisesta sivuseinästä 10 metriä ja toisesta 30 metriä (kuva 9). Hallin seinät ja katto olivat teräspeltiä, lattia betonia. Lämpötila hallissa oli mittauksia tehdessä noin +20 °C ja hallin ilman suhteellinen kosteus oli noin 54 %.

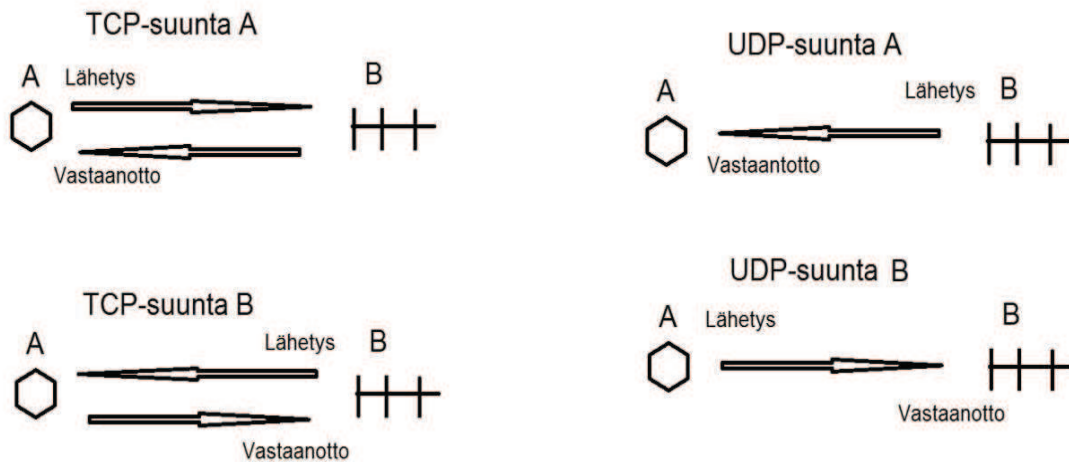


KUVA 9. Testiympäristö

Reaaliympäristö oli käytössä oleva sektori, jossa liikennöi loppukäyttäjiä. Reaaliympäristössä antennien välissä maastossa oli metsää, suota ja vesistöä. Maanpinnan muoto radiotiellä oli aika tasainen. Asiakasantennin ja sektoriantennin välinen etäisyys oli 18,4 km.

4.2 Laitteistot

Mittauksissa laitteistona oli kaksi tietokonetta ja kaksi antennia. Mittaaminen tapahtui mittaamalla radiotietä iperf-ohjelmalla tietokoneelta tietokoneelle ilma-rajapinnan ylitse. Radiotie mitattiin molemmista suunnista, vaihtaen käyttäjän ja palvelimen paikkaa keskenään. Molemmissa ympäristöissä käytettiin sektoriantennia ja asiakasantennia. Sektoriantennista mitatut tulokset ovat nimellä suunta B ja asiakasantennista mitatut tulokset ovat nimellä suunta A. Mittaaminen tapahtui signaalin vastaanotossa (kuva 10). Vasteaikaa suhteessa verkon kuormitukseen selvittävässä mittauksissa vasteajan mittaaminen suoritettiin antennien sisäisellä ohjelmistolla ja muut iperf-ohjelmalla.



KUVA 10. Mittauksien suorittaminen

Testiympäristössä EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) (8) eli isotrooppinen säteilyteho antennivahvistuksineen säädettiin minimiin, jotta mittaminen oli turvallista ja mittaja ei altistunut haitallisen voimakkaalle säteilylle. Testiympäristön säätiedot mitattiin Oregon WMR86-mallisella sääasemalla. Reaaliympäristön säätiedot haettiin Ilmatieteen laitoksen internetsivuilta (10).

4.3 Ohjelmisto

Mittaukset suoritettiin SourceForgen kehittämällä iperf-ohjelmistolla sekä radion sisäisellä ohjelmalla. Sourceforge on avoimen lähdekoodin kehittäjien yhteisö. Iperf-ohjelma oli ladattavissa vapaasti internetosoitteesta <http://sourceforge.net/directory/os:windows/freshness:recently-updated/?q=iperf>. (11.)

Mittaamisessa oli kaksi tietokonetta, joihin oli asennettu iperf-ohjelmistot. Tietokoneista toinen toimi käyttäjänä (client) ja toinen palvelimena (server). Kuvassa 11 on iperf-ohjelman graafinen käyttöliittymä ja kuvassa 12 on konsolikäyttöliittymä.

The screenshot shows the iperf GUI with the following settings:

- Type:** Client (selected), Server
- Protocol:** TCP (selected), UDP
- Server:** [Empty text box]
- Port:** [Empty text box]
- Buttons:** Run, Stop
- Settings:** Compatibility Mode (unchecked), Testing Mode: Dual (selected), Trade, Port: 5001
- TCP Window Size:** [Empty text box]
- Buffer Length:** 8K
- Max Segment Size:** [Empty text box]
- Parallel Streams:** 1
- UDP Bandwidth:** 1M
- Bind to Host:** [Empty text box]
- IPv6:** (unchecked)
- Representative File:** [Empty text box]
- Browse...** (button)
- Type of Service:** [Dropdown menu]
- TTL:** 1
- TCP No Delay:** (unchecked)
- Reporting Format:** Transmit: 12000, Time in Seconds (selected), Number of Bytes
- Output Format:** Kbits
- Report Interval:** 1
- Print MSS:** (unchecked)
- Clear Output for new Iperf Run:** (unchecked)
- Bandwidth Graph PopUp:** (checked)
- Jitter Graph PopUp:** (unchecked)

KUVA 11. Iperf-ohjelman graafinen käyttöliittymä

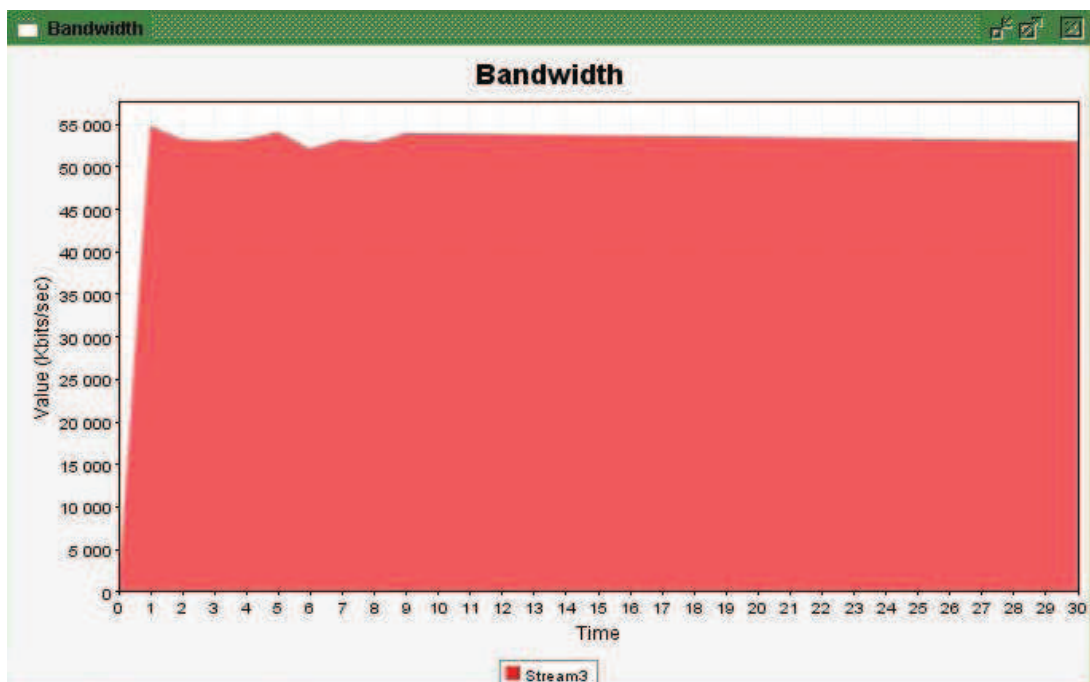
```
iperf -s -u -P 0 -i 1 -p -w 320K -l 1470 -f k -t 10
```

```
-----  
Server listening on UDP port  
Receiving 1470 byte datagrams  
UDP buffer size: 320 KByte  
-----
```

```
[ 3] local 10.0.1.10 port 5001 connected with 10.0.1.11 port 1524  
[ 3] 0.0- 1.0 sec 4080 KBytes 33422 Kbits/sec 0.764 ms 3413/ 6255 (55%)  
[ 3] 1.0- 2.0 sec 3923 KBytes 32140 Kbits/sec 0.439 ms 5410/ 8143 (66%)  
[ 3] 2.0- 3.0 sec 4143 KBytes 33939 Kbits/sec 0.543 ms 5256/ 8142 (65%)  
[ 3] 3.0- 4.0 sec 4121 KBytes 33763 Kbits/sec 0.511 ms 5353/ 8224 (65%)  
[ 3] 4.0- 5.0 sec 4203 KBytes 34433 Kbits/sec 0.564 ms 4969/ 7897 (63%)  
[ 3] 5.0- 6.0 sec 3899 KBytes 31940 Kbits/sec 0.512 ms 5566/ 8282 (67%)  
[ 3] 6.0- 7.0 sec 4109 KBytes 33657 Kbits/sec 0.767 ms 5310/ 8172 (65%)  
[ 3] 7.0- 8.0 sec 4193 KBytes 34351 Kbits/sec 0.401 ms 5276/ 8197 (64%)  
[ 3] 8.0- 9.0 sec 4143 KBytes 33939 Kbits/sec 0.560 ms 5191/ 8077 (64%)  
[ 3] 9.0-10.0 sec 3877 KBytes 31764 Kbits/sec 0.819 ms 5077/ 7778 (65%)  
[ 3] 0.0-10.2 sec 41721 KBytes 33403 Kbits/sec 0.489 ms 52308/81371 (64%)  
[ 3] 0.0-10.2 sec 1 datagrams received out-of-order  
read failed: Connection reset by peer  
Done.
```

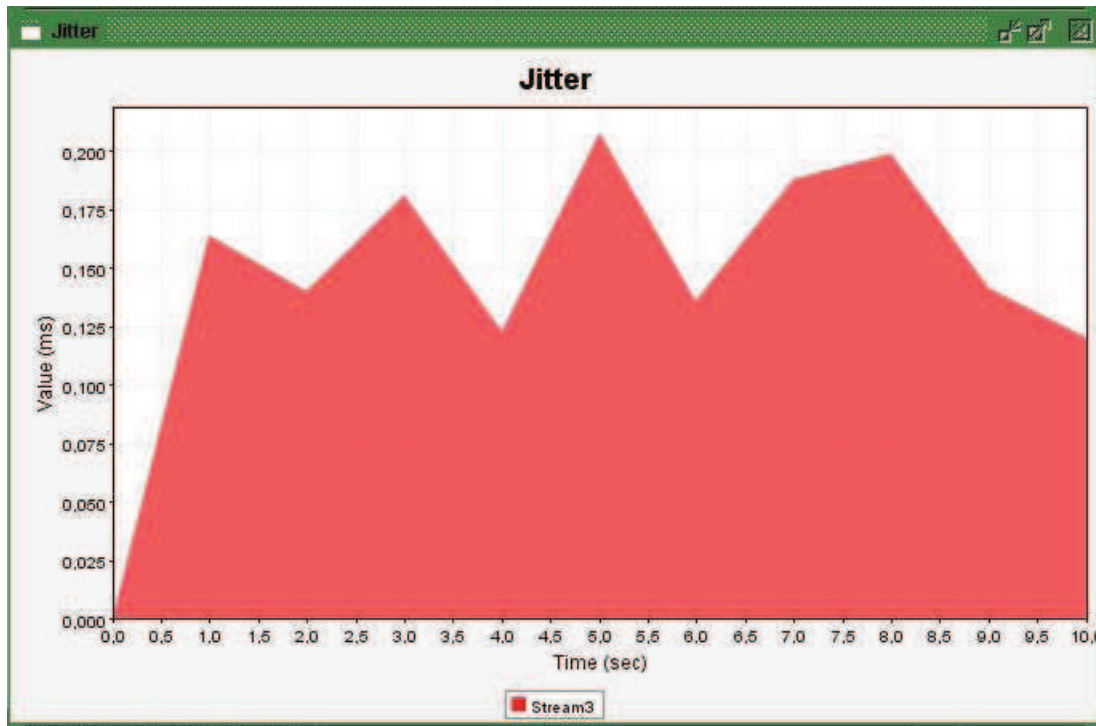
KUVA 12. Iperf-ohjelman konsolikäyttöliittymä

TCP:n mittaaminen tapahtui siten, että käyttäjä lähetti palvelimelle paketin, palvelin vastaanotti paketin ja lähetti vastauksen käyttäjälle paketin saapumisesta. TCP:tä mitattaessa tulokset luettiin käyttäjältä. TCP-mittaus tulosti kuvan kaistanleveydestä (kuva 13).



KUVA 13. Tyypillinen iperf-ohjelmalla otettu kuva kaistanleveyden mittaamisesta

UDP:n mittaamisessa oli myös kaksi tietokonetta, joista toinen oli käyttäjä ja toinen oli palvelin. Mittaaminen tapahtui siten, että käyttäjä lähetti palvelimelle paketteja, joihin palvelimen ei tarvinnut vastata. UDP:tä mitattaessa mittaukset luettiin palvelintietokoneelta. Ohjelma tulosti UDP:tä mitatessa kuvan huojunnasta (kuva 14) ja kaistanleveydestä.

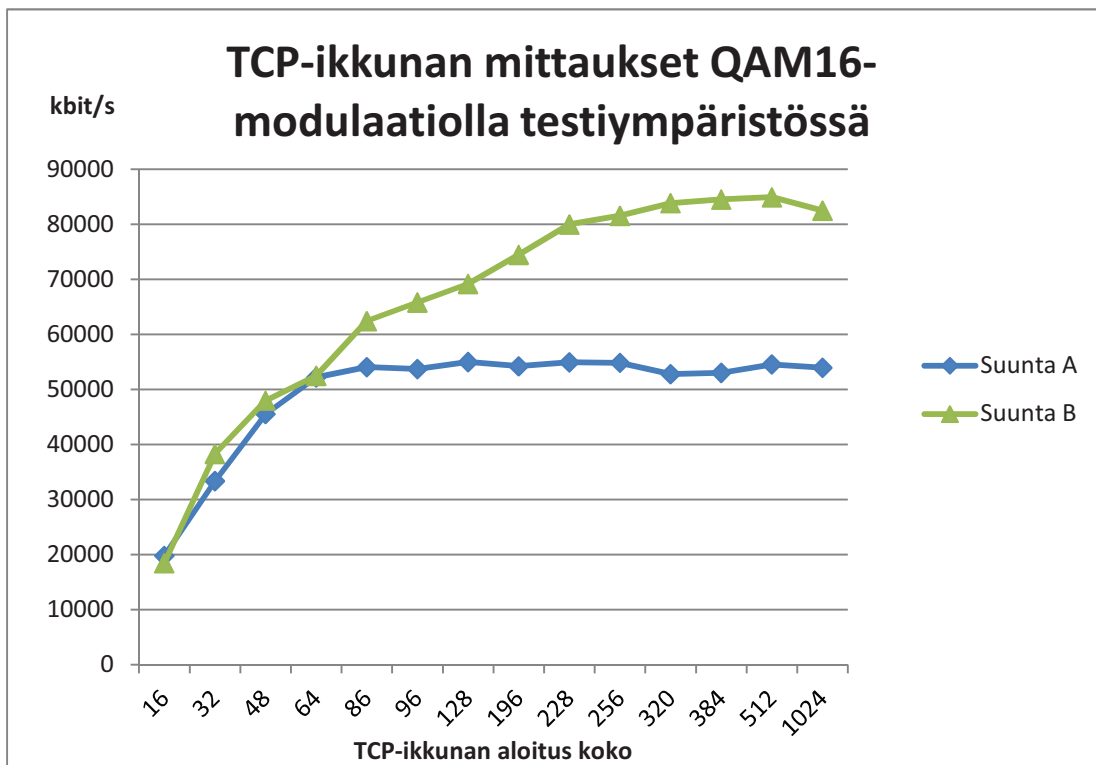


KUVA 14. Tyypillinen iperf-ohjelmalla otettu kuva vasteajan huojunnasta

5 MITTAUSTULOKSET

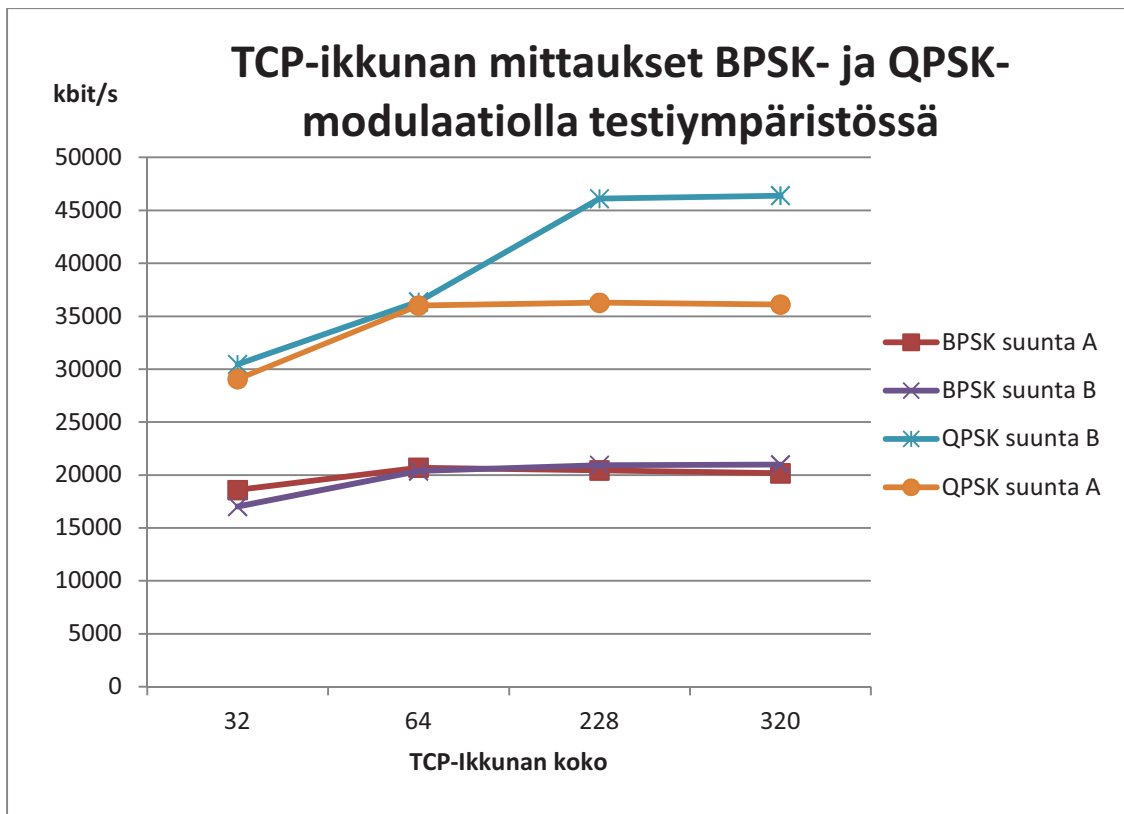
5.1 TCP-ikkunan mittaukset testiympäristössä

Mittaukset suoritettiin 30 sekunnin jaksoina ja paketin lähetysväli oli 1 sekunti. Mittauksissa käytettiin eri modulaatioita ja ikkunakokoja. Mittaukset suoritettiin modulaatiolla QAM16. QAM16-moduloidun signaalin hyväksi havaitut ikkunat mitattiin myös QPSK- ja BPSK-moduloituna. Mittauksia tehtiin todellisuudessa pienemmillä, tiheämmin ja myös suuremmilla ikkunoilla kuin kuvassa 15 on esitetty. QAM16:n suunnan A mittauksien keskihajonta on 10 320 kbit/s ja suunnan B keskihajonta on 20 303 kbit/s.



KUVA 15. QAM16-TCP-ikkunan mittaukset testiympäristössä

BPSK- ja QPSK-moduloidut signaalit erikokoisilla ikkunoilla on esitetty kuvassa 16. BPSK-suunnan A keskihajonta on 3436 kbit/s ja suunnan B 7803 kbit/s. QPSK-suunnan A keskihajonta on 950 kbit/s ja suunnan B 1888 kbit/s.

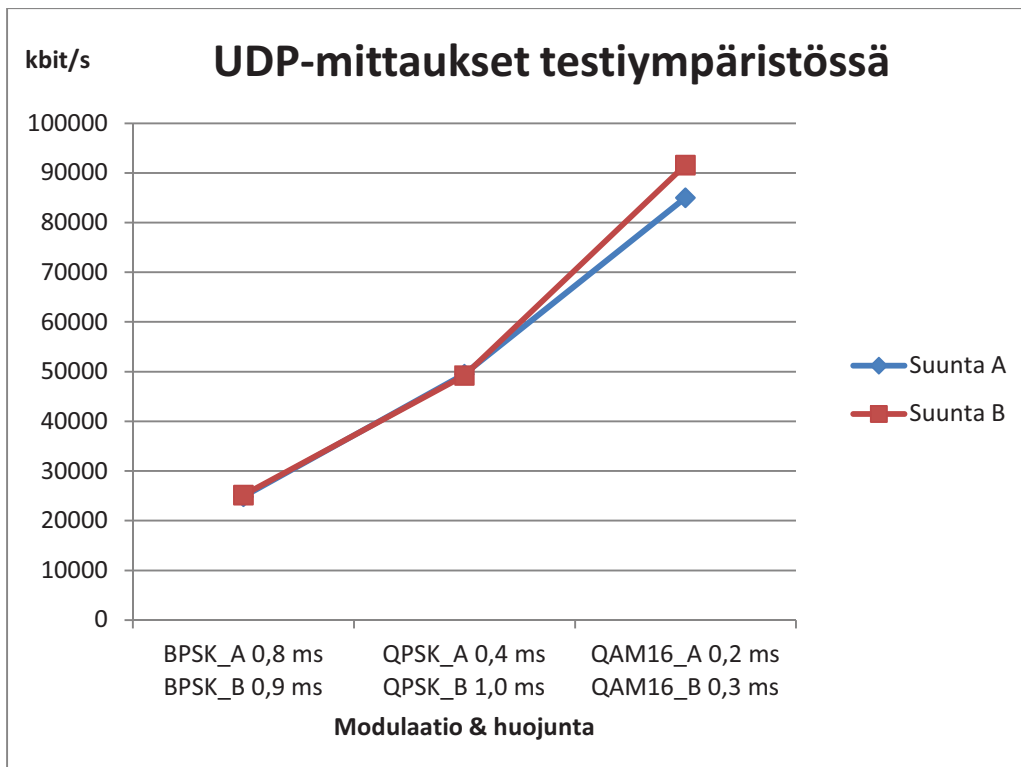


KUVA 16. TCP-ikkunan mittaukset testiympäristössä BPSK- ja QPSK-modulaatiolla

5.2 UDP-mittaukset testiympäristössä

Mittauksissa käytettiin puskurin kokona 320 kilotavua ja pakettikokona 1470 tavua. Mittausta suoritettiin 10 sekunnin ajanjaksona ja paketit lähetettiin 1 sekunnin välein. Mittauksissa käytettiin modulaationa BPSK:ta, QPSK:ta ja QAM16:ta. Jokainen mittaustapahtuma toistettiin kaksi kertaa. Saatujen otosten siirtonopeuden keskiarvo ja huojunnan keskiarvot millisekunteinä on esitetty kuvassa 17.

BPSK-moduloidun signaalin siirtonopeuden ja huojunnan keskihajonnat ovat suunnasta A 153 kbit/s ja 0,1 ms ja suunnasta B keskihajonnat ovat 60 kbit/s ja 0,1 ms. QPSK-moduloidun signaalin keskihajonnat ovat suunnasta A 88 kbit/s ja 0,8 ms ja suunnasta B keskihajonnat ovat 1 kbit/s ja 0,1 ms. QAM16-moduloidun signaalin keskihajonnat ovat suunnasta A 764 kbit/s ja 0,2 ms ja suunnasta B keskihajonnat ovat 599 kbit/s ja 0,1 ms.

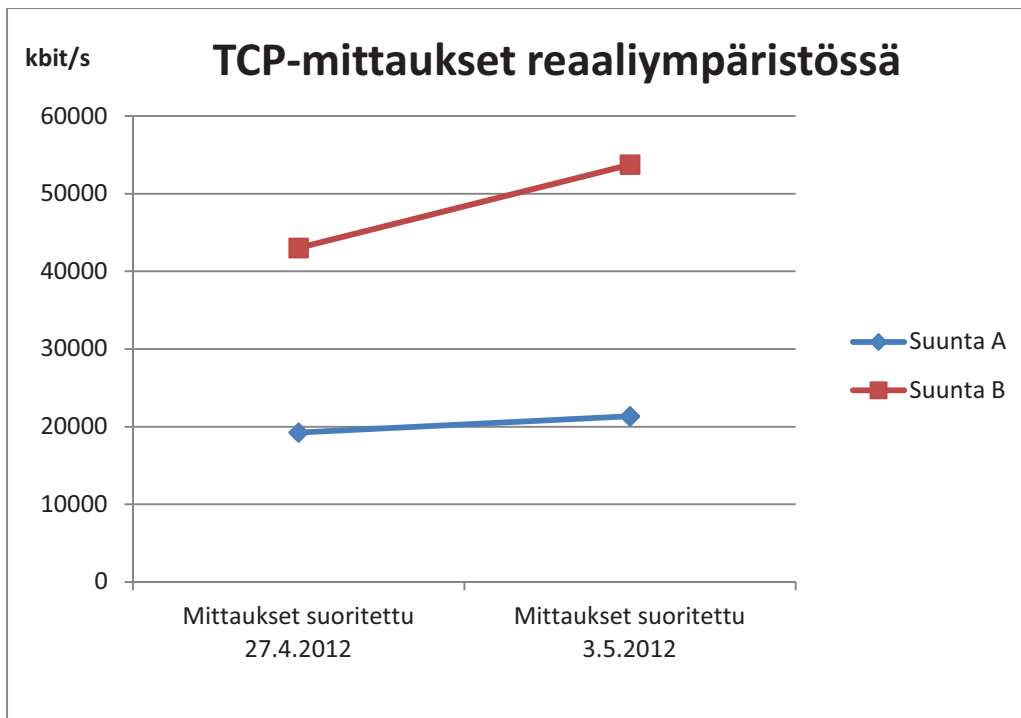


KUVA 17. BPSK-, QPSK- ja QAM16-UDP-mittaukset testiympäristössä

5.3 TCP-mittaukset reaaliympäristössä

Reaaliympäristössä mittaukset suoritettiin 27.4.2012 kello 15.00–23.30 ja 3.5.2012 kello 10.00–22.00 (kuva 18). 27.4.2012 sää oli sumuinen, ilman lämpötila oli +6 °C, ilmanpaine 1002,3 hPa ja suhteellinen kosteus 98 %. 3.5.2012 sää oli pilvinen, lämpötila +4 °C, ilmanpaine 1003,7 hPa ja ilman suhteellinen kosteus 84 %. (10.)

TCP-ikkunan koko oli 320 kilotavua. Mittausta suoritettiin 30 sekunnin ajan ja pakettien lähetysväli oli 1 sekunti. Reaaliympäristössä tehtyjen siirtonopeusmittauksien keskihajonnat ovat 27.4.2012 suunnasta A 354 kbit/s ja suunnasta B 5267 kbit/s. 3.5.2012 tehtyjen mittausten keskihajonnat ovat suunnasta A 283 kbit/s ja suunnasta B 1656 kbit/s.

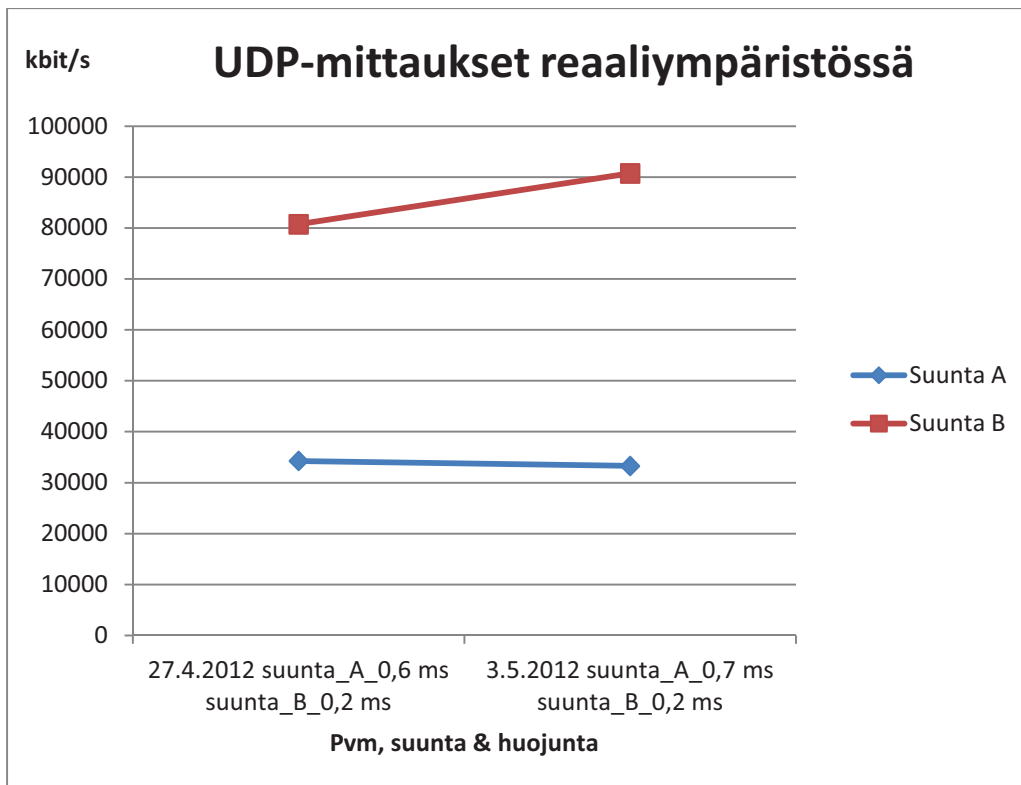


KUVA 18. TCP-mittaukset reaaliympäristössä

5.4 UDP-mittaukset reaaliympäristössä

Mittaukset suoritettiin 27.4.2012 ja 3.5.2012. Mittauksissa käytettiin 320 kilotavun puskuria. Siirtotieltä mitattiin kaistanleveys ja huojunta. Radiotien modulaatio oli QAM16. Kuvassa 19 on esitettyä tiedonsiirtonopeus ja huojunnan keskiarvot.

Siirtonopeuden ja huojunnan keskihajonnat 27.4.2012 tehdyissä mittauksissa suunnasta A ovat 6713 kbit/s ja 0,1 ms ja suunnasta B 3506 kbit/s ja 0,1 ms. 3.5.2012 tehtyjen mittausten keskihajonnat suunnasta A ovat 189 kbit/s ja 0,2 ms ja suunnasta B 1023 kbit/s ja 0,1 ms.

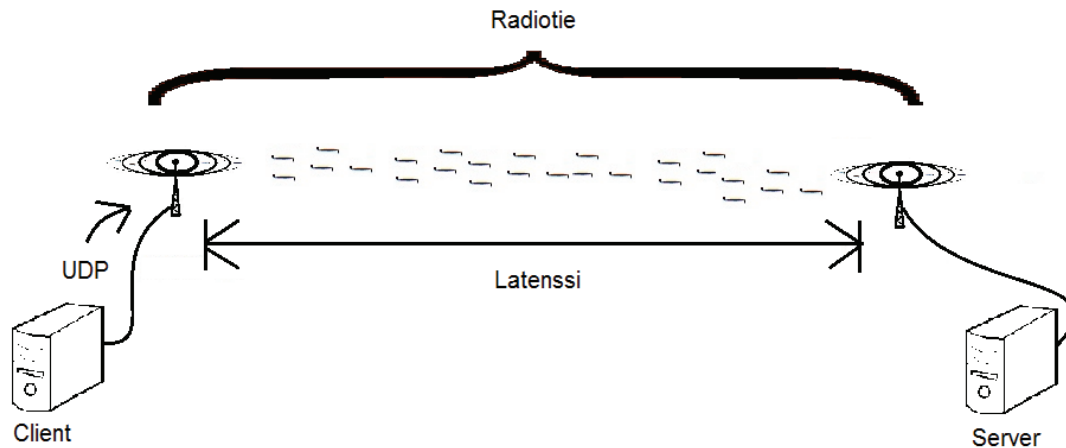


KUVA 19. UDP-mittaukset reaaliympäristössä, siirtonopeus ja huojunnan keskiarvo

5.5 Vasteaika suhteessa verkon kuormitukseen

Mittaukset tehtiin 7.5.2012–9.5.2012. Verkkoa kuormitettiin UDP-paketeilla 0 %:n, 25 %:n, 50 %:n, 75 %:n ja maksimikuormalla. Paketit lähetettiin koko siirtotien ylitse (lperf_client – lperf_server) ja vasteajan mittaaminen tapahtui radiolta radiolle (kuva 20), eli mitattu vasteaika on radiotien vasteaika.

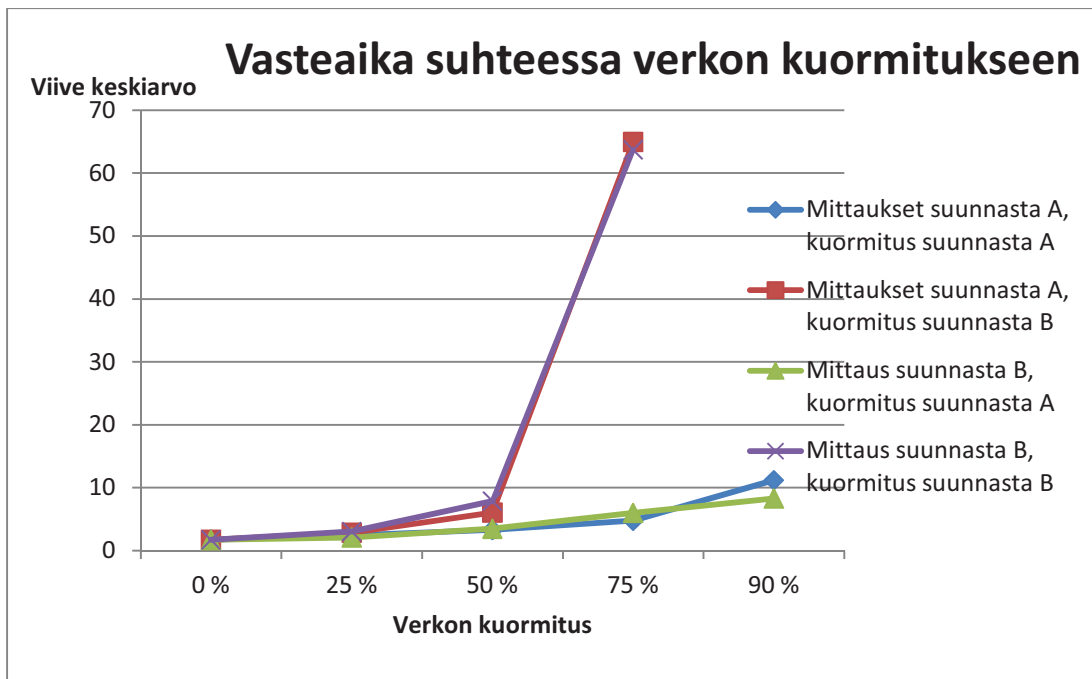
Sää 7.5.2012 oli pilvinen, lämpötila +4 °C, ilmanpaine 1004,7 hPa ja ilman suhteellinen kosteus 84 %. 7.5.2012 mittaukset suoritettiin kello 12:00–20:00. Sää oli 8.5.2012–9.5.2012 välisenä yönä puolipilvinen, lämpötila +4 °C, ilmanpaine 1004,6 hPa ja ilman suhteellinen kosteus 77 %. (10.) 8.5.2012–9.5.2012 mittaukset suoritettiin kello 19:30–04:00.



KUVA 20. Vasteajan mittaaminen

Vasteaika mitattiin lähettämällä sata kappaletta ICMP-paketteja (Internet Control Message Protocol). ICMP on kontrolliprotokolla, jolla lähetetään nopeasti viestejä koneesta toiseen (4). Paketin koko oli 56 kilotavua. Paketit lähetettiin yhden sekunnin välein. Vasteajan mittaaminen tapahtui siten, että radio lähetti toiselle radiolle ilmarajapinnan ylitse ICMP-echo-request-paketin (4) yhden sekunnin välein. Tätä ICMP-echo-request -pakettien lähetystä toistettiin sadan paketin verran. Lähetettyihin ICMP-echo-request-paketteihin lähettävä radio odotti ICMP-echo-reply-paketteja vastaukseksi toiselta radiolta (4).

Verkon kuormitus tapahtui sekunnin välein lähetettävillä UDP-paketeilla, joiden koko oli 320 kilotavua. Mitattavassa sektorissa oli muitakin käyttäjiä, joten kuormitus tapahtui vapaana olevaa kaistaa kuormittamalla. Suunnasta B mitattaessa sektorissa oleva vapaakaistan maksimisiirtonopeus oli noin 90 megabittiä sekunnissa ja suunnasta A vapaana olevan kaistan maksimisiirtonopeus oli noin 33 megabittiä sekunnissa. Mittaukset suoritettiin kuormittamalla verkkoa molemmista suunnista ja mittaamalla vasteaika molemmista suunnista. Kuormitusmittauksia suoritettiin yhteensä 15 600 kertaa. Kuvassa 21 on graafinen tuloste vasteajan muutoksesta suhteessa verkon kuormitukseen. Vasteaikka suhteessa verkon kuormitukseen selvittävien mittausten tuloksien keskiarvot ja keskihajonnat ovat esitettyinä taulukossa 2. Taulukossa KA tarkoittaa keskiarvoa ja KH keskihajontaa.



KUVA 21. Vasteaika suhteessa verkon kuormitukseen

TAULUKKO 2. Vasteaikaa suhteessa verkon kuormitukseen selvittävien mittauksien keskiarvot ja keskihajonnat

KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä A, kuormitus suunnasta B					
	0 %	25 %	50 %	75 %	
KA	1,8	2,9	6,1	65,0	
KH	0,1	1,0	2,1	25,4	
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä A, kuormitus suunnasta A					
	0 %	25 %	50 %	75 %	90 %
KA	1,8	2,4	3,3	4,8	11,2
KH	0,1	0,3	0,1	0,2	1,6
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä B, kuormitus suunnasta B					
	0 %	25 %	50 %	75 %	
KA	1,7	3,0	7,9	63,7	
KH	0,0	0,3	1,2	6,0	
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä B, kuormitus suunnasta A					
	0 %	25 %	50 %	75 %	90 %
KA	1,7	2,1	3,5	6,0	8,3
KH	0,0	0,0	1,1	0,8	1,9

6 MITTAUSTEN LUOTETTAVUUS

Testiympäristössä mitattujen tulosten luotettavuus on korkea, koska rakennuksen seinät ovat peltiset, joten ulkopuoliset häiriösignaalit ovat hyvin pienet. Testiympäristössä kaavan 1 mukaisesti laskettuna ensimmäinen Fresnelin vyöhyke oli vapaa radiotiellä, koska antennit olivat sijoitettuna 3 metrin korkeuteen lattiasta ja 10 ja 30 metrin päähän seinistä. Taajuuden ollessa 7080 MHz ja radiotien pituuden ollessa 0,050 km ensimmäinen Fresnelin vyöhyke on 0,015 m. Vapaalla ensimmäisellä Fresnelin vyöhykkeellä ei voi perustella, että monitie-etenemistä ei tulisi hallissa. Fresnelin vyöhyke vaikuttaa vain signaalin vaimenemiseen ja vaimenemisen laskukaavoihin. Aallonpituus voidaan laskea taajuudelle kaavan 2 mukaisesti, joten aallonpituus on 0,0424 m. Koska aallonpituus on näin lyhyt, monitie-eteneminen ei aiheuta hallissa havaittavissa määrin haittaavaa signaalin vääristymistä. Mittauksissa käytettyjen antennien säteilykuviot ovat kapeat eli antennit ovat suuntaavia, joten tämäkin minimoi monitie-etenemistä. Testiympäristössä signaalin vaimeneminen laskettuna kaavan 3 mukaisesti on 5,5 dB.

Reaaliympäristössä 19 km:n matkalla laskettuna vaimennus on 135 dB. Reaaliympäristön mittauksissa on jonkin verran vaihtelua, mikä ilmeisesti johtui siitä, että sektorissa oli yhtä aikaa muitakin käyttäjiä.

Verkon kuormituksen vasteajan mittaamisen suhteelliset virheprosentit näkyvät taulukossa 3. Laskuissa todellisena arvona käytettiin mittauksien keskiarvoja. Suhteellinen virhe on mitatun ja todellisen arvon erotus verrattuna todelliseen arvoon.

TAULUKKO 3. Vasteaikaa suhteessa verkon kuormitukseen selvittävien mittauksen suhteelliset virheprosentit

Virheen arvioinnissa todellisena arvona on käytetty mittausten keskiarvoja					
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu suunnasta A, kuormitus suunnasta B					
	0 %	25 %	50 %	75 %	
suhteellinen virhe %	1	-39	-37	29	
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä A, kuormitus suunnasta A					
	0 %	25 %	50 %	75 %	90 %
suhteellinen virhe %		5	0	5	-16
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä B, kuormitus suunnasta B					
	0 %	25 %	50 %	75 %	
suhteellinen virhe %	-1	11	8	0	
KUORMITUSMITTAUKSET, mitattu pisteestä B, kuormitus suunnasta A					
	0 %	25 %	50 %	75 %	90 %
suhteellinen virhe %		-2	20	7	11

7 MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU

TCP-ikkuna mittauksien perusteella optimaalinen yhteyden muodostukseen käytettävä ikkunan koko on 320 kilotavua. 320 kilotavua on sen vuoksi sopivin yhteyden muodostusikkuna, koska molemmista suunnista mitaten tiedonsiirtonopeus on suuri ja voi vielä kasvaa. Liukuvan ikkunan protokolla pystyy tämän kokoista ikkunaa vielä suurentamaan ilman haittavaikutuksia. Lisäksi vasteaika on pieni ja verkkoa kestää kuormittaa ilman pakettihäviötä.

TCP ikkunan ollessa yli 1024 kilotavun kokoinen, mittauksissa alkaa ilmaantua mittausohjelmistosta johtuvaa vääristymää. Ikkunan kasvaessa suurenee tiedonsiirtonopeuden ero suuntien kesken. Tämä ero johtuu mahdollisesti siitä, että A-antenni on asiakasantenni ja B-antenni on sektoriantenni. Erilaisilla antenneilla on erilaiset ominaisuudet. Antennien eroavaisuudet nähdään kuvista 15-19 siten, että sektoriantennin (suunta B) suunnasta mitaten tiedonsiirtonopeus on parempi. TCP- ja UPD-mittauksissa vasteajan huojunta pysyy kaikissa mittauksissa alle yhdessä millisekunnissa.

Kuvissa 16 ja 17 on nähtävissä, kuinka vaihtamalla ikkunan kokoa ja modulaatiota tiedonsiirtonopeus muuttuu. Raskaammalla modulaatiolla saadaan siirrettyä suurempi tiedonsiirtonopeus ja suurempi määrä dataa laitteiden välillä.

Vasteaikaa suhteessa verkon kuormitukseen selvittävässä mittauksissa selvisi, että 90 %:n kuormalla suunnasta B kuormitettaessa verkko ei ole toimiva, koska pakettihäviö kasvaa liian suureksi. 80 %:n kuormalla suunnasta B kuormitettaessa pakettihäviö on 5 %. 75 %:n kuormalla suunnasta B kuormitettaessa kuorma ei aiheuta pakettihäviötä, mutta vasteaika kasvaa suhteessa 50 %:n kuormaan paljon. Kuitenkin 75 %:n kuormalla suunnasta B kuormitettaessa ei vasteaika ole vielä haittaavan suuri, joten verkkoa ei kannata sektoriantennista kuormittaa yli 75 %:n kuormalla.

90 %:n kuormalla suunnasta A kuormitettaessa kuorma ei aiheuta pakettihäviötä eikä haittaavan suurta vasteajan kasvua. Asiakasantennin suunnasta voi-

daan kuormittaa verkkoa enemmän, koska verkossa on enemmän kapasiteettiä vapaana niin sanottuun lähetyssuuntaan.

Vasteaikaa suhteessa verkon kuormitukseen selvittävässä mittauksissa radiotien vasteajan mittaaminen kummastakaan suunnasta 100 %:n kuormalla ei onnistunut, koska käytössä oli etätyöpöytähallinta. Kuorman ollessa 100 % etätyöpöytä lopettaa toimimasta verkon tukkeutuessa.

8 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä selvittäviä mittauksia verkon käytön tehostamiseksi. Testiympäristössä toteutettujen mittausten ja reaaliympäristössä tehtyjen mittausten perusteella saatiin selvitettyä sektoriantennin ja asiakasantennin välille optimaalinen TCP-ikkunan koko yhteyden muodostamiseen. Valittu ikkunan koko on optimaalinen, koska kaistan käyttö on tehokasta 320 kilotavun kokoisella ikkunalla ja tiedonsiirtonopeus voi vielä kasvaa ikkunan kasvaessa molemmista suunnista. Suoritettujen UDP-mittausten perusteella testi- ja reaaliympäristössä tapahtuva vasteajan huojunta pysyy alle millisekunnissa käytetystä modulaatiosta riippumatta.

Vasteaikaa suhteessa verkon kuormitukseen selvittävässä mittauksissa saatiin tällä tutkimuksella hyvä käsitys siitä, miten liian suurella kuormituksella vasteaika alkaa kasvaan erittäin nopeasti aiheuttamatta ongelmallisen suurta huojuntaa vasteaikaan eli jitteriä. Mahdollisesti verkon muun liikenteen takia vasteajan huojunnan mittaustulokset vaihtelevat jonkin verran.

Seuraavat tutkimukset aiheesta voisivat selvittää erityyppisten radioiden välistä liikennettä, kuten jänneradioiden välistä liikennöintiä. Radiotietä voisi kuormittaa ja mitata samalla lailla kuin tässäkin työssä. Lisäksi adaptiivisella signaalin moduloinnilla pidemmällä siirtotiellä olisi hyvä saada tietoon tiedonsiirron käyttäytymistä pidemmillä yhtäjaksoisilla mittausjaksoilla. Tällä tarkoitan sitä, että olisi mielenkiintoista nähdä verkkoa kuormitettaessa, muuttavatko antennien ohjelmistot modulaatiotaan vai pysyykö modulaatio samana eri kuormituksilla. Tutkia voisi myös, millainen vaikutus säällä on adaptiivisuuteen. Kuormitusmittauksia olisi hyvä tehdä myös vapaaseen verkkoon, eli sellaiseen, jossa ei ole muuta liikennettä. Raskaampiakin modulaatioita olisi hyvä tutkia.

Insinöörityön tulosten perusteella tilaaja kykenee tehostamaan verkon käyttöä. Kaikkia mittauksia tehdessä sää oli pilvinen ja kostea, joten mittausten perusteella ei voida sanoa, onko säällä vaikutusta signaalin etenemiseen radiotiellä.

LÄHTEET

1. Puurunen, Pasi 2012. Toimitusjohtaja, Koillisnetworks Oy. Keskustelu 15.4.2012.
2. Radiotaajuudet. 2010. Viestintävirasto, Ficora. Saatavissa: <http://www.ficora.fi/index/palvelut/palvelutaiheittain/radiotaajuudet.html>. Hakupäivä 22.8.2012.
3. Särkimäki, Ville 2004. . Lyhyen kantaman radiolähettimien soveltuvuus sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tiedonsiirtotarpeisiin. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto. Diplomityö. Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/34573/nbnfi-fe20051369.pdf?sequence=1>. Hakupäivä 4.4.2012.
4. Graham, A. – Kirkman, N. – Paul, P. 2007. Mobile radio network design in the VHF and UHF bands. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
5. Granlund, Kaj 2001. Langaton tiedonsiirto. Jyväskylä: WSOY.
6. Granlund, Kaj 2007. Tietoliikenne. Jyväskylä: WSOY.
7. Lyons, Richard G 2001. Understanding Digital Signal Processing. New Jersey: Prentice Hall PTR.
8. Anttila, Aki 2000. TCP / IP tekniikka. Helsinki: WSOY.
9. Comer, Douglas E 2002. TCP / IP. Helsinki: IT Press.
10. Paikallissää Pudasjärvi. Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/saa/Pudasj%C3%A4rvi>. Hakupäivä 27.4.2012.

11. Iperf. Geeknet, inc. SourceForge.Net. Saatavissa:
<http://sourceforge.net/directory/os:windows/freshness:recently-updated/?q=iperf>. Hakupäivä: 10.4.2012