

LANGATTOMAN VERKON LAADUNVALVONTAMITTAUS JA ANALYSOINTI 7SIGNAL-TYÖKALULLA

Joni Vasko

Opinnäytetyö
Joulukuu 2013

Tietotekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





| | | |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|
| Tekijä(t) VASKO, Joni | Julkaisun laji Opinnäytetyö | Päivämäärä 09.12.2013 |
| | Sivumäärä 72+3 | Julkaisun kieli Suomi |
| | | Verkojulkaisulupa myönnetty (x) |
| Työn nimi LANGATTOMAN VERKON LAADUNVALVONTAMITTAUS JA ANALYSOINTI 7SIGNAL-TYÖKALULLA | | |
| Koulutusohjelma Tietotekniikan koulutusohjelma | | |
| Työn ohjaaja(t) HÄKKINEN, Antti; KOTIKOSKI Sampo | | |
| Toimeksiantaja(t) Jyväskylän ammattikorkeakoulun tietohallinto | | |
| Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia langattoman lähiverkon laatua Rajakadun hallintosiivessä. Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Jyväskylän ammattikorkeakoulun tietohallinto.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosassa esitellään ajankohtaista tietoa langattoman lähiverkon standardeista, toimintaperiaatteista, palvelunlaadusta sekä 7signal-työkalusta.</p> <p>Työssä tutkittiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun lähiverkon laatua kahdella kampuksella, Rajakadun hallintosiivessä ja Dynamon auditoriossa. Kampusten lähiverkko koostui 802.11-tekniikoita hyödyntävistä tukiasemista. Dynamon auditoriossa mitattavia tukiasemia oli yksi kappale ja Rajakadun hallintosiivessä tukiasemia kahdessa eri kerroksessa useita kappaleita. Työn lähtökohtana oli mitata langattoman verkon toimintaa käyttäen 7signal-työkalua.</p> <p>Ennen varsinaista mittausta 7signal-työkalu päivitettiin viimeisimpään ohjelmistoversioonsa ja suoritettiin testimittaukset. Varsinainen mittaustyö toteutettiin yhden ja kahden viikon mittaisissa ajanjaksoissa. 7Signal-työkalulla saadut mittaustulokset analysoitiin ja niiden pohjalta esitettiin mahdolliset parannusehdotukset.</p> <p>Mittaukset onnistuivat pääsääntöisesti hyvin. Mittaustulosten perusteella pystyttiin analysoimaan Rajakadun hallintosiiven langattoman verkon toimintaa ja vertaamaan sitä Dynamon auditoriosta saatuihin mittaustuloksiin.</p> | | |
| Avainsanat (asiasanat) 7signal, langattomat lähiverkot, palvelunlaatu | | |
| Muut tiedot | | |



| | | |
|--|--|--|
| Author(s) VASKO, Joni | Type of publication Bachelor's Thesis | Date 09122013 |
| | Pages 72+3 | Language Finnish |
| | | Permission for web publication (x) |
| Title QUALITY OF SERVICE MEASUREMENT AND ANALYSIS OF WIRELESS NETWORK USING 7SIGNAL TOOL | | |
| Degree Programme Information Technology | | |
| Tutor(s) HÄKKINEN, Antti; KOTIKOSKI Sampo | | |
| Assigned by JAMK University of Applied Sciences / ICT | | |
| Abstract <p>The aim of this bachelor's thesis was to survey the quality of wireless local area network in the administrative wing of Rajakatu. The Bachelor's thesis was assigned by the IT administration at JAMK University of Applied Sciences.</p> <p>The theoretical part of the thesis presents the latest information of wireless network standards and their principles. The thesis also explains the basics of network quality of service and 7signal measuring equipment.</p> <p>In the thesis wireless quality of service of local area network at JAMK University of Applied Sciences was measured in two campus areas, in Rajakatu administrative wing and in Dynamo auditorium. The wireless network uses 802.11 standard access points. In Dynamo auditorium there was one measurable access point and in Rajakatu administrative wing there were multiple access points on two floors. The 7signal tool was used to carry out measurements.</p> <p>Before the actual measurement, the 7signal tool was updated to the latest software version and run with the test measurements. The actual measurement was carried out in one and two week time periods. The 7signal tool measurement results were analyzed and presented on the basis of any suggestions for improvement.</p> <p>The measurements succeeded for the most part. Based on the measurements it was possible to analyze the wireless network activity in Rajakatu administrative wing and to compare it to the measurement results in Dynamo auditorium.</p> | | |
| Keywords 7signal, wireless local area network, quality of service | | |
| Miscellaneous | | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | TYÖN LÄHTÖKOHDAT | 9 |
| 2 | IEEE STANDARDIT..... | 10 |
| 3 | 802.11-VERKKOJEN OMINAISUUDET JA TAAJUUDET..... | 11 |
| 3.1 | Ominaisuudet | 11 |
| 3.2 | 2,4 GHz ja 5 GHz -taajuusalueet..... | 13 |
| 3.3 | IEEE 802.11 ja IEEE 802.11a | 14 |
| 3.4 | IEEE 802.11b | 14 |
| 3.5 | IEEE 802.11g | 15 |
| 3.6 | IEEE 802.11n | 15 |
| 3.7 | IEEE 802.11ac..... | 15 |
| 4 | LANGATTOMAN VERKON TOIMINTA..... | 16 |
| 4.1 | Beacon-hallintasanomat | 16 |
| 4.2 | Verkkoon liittyminen | 16 |
| 5 | PALVELUNLAATU TIETOVERKOISSA..... | 17 |
| 5.1 | Palvelunlaatu | 17 |
| 5.1.1 | Yleistä | 17 |
| 5.1.2 | QoS-laatuparametrit..... | 18 |
| 5.2 | QoS-mallit..... | 19 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2.1 | Best Effort..... | 19 |
| 5.2.2 | Intergrated Services..... | 19 |
| 5.2.3 | Diffrentiated Services | 19 |
| 5.3 | Palvelun laadun toteutus alkuperäisessä 802.11-verkossa | 20 |
| 5.3.1 | Distributed Coordination Function, DCF | 21 |
| 5.3.2 | Point Coordination Function, PCF | 22 |
| 5.4 | IEEE 802.11e standardin tuomat uudistukset 802.11-verkkojen palvelunlaatuun | 23 |
| 5.4.1 | Yleistä | 23 |
| 5.4.2 | Enhanced Distributed Channel Access, EDCA..... | 23 |
| 5.4.3 | HCF Controlled Channel Access, HCCA..... | 25 |
| 5.4.4 | Muita 802.11e-standardin tuomia uudistuksia | 26 |
| 5.5 | Muita 802.11-verkkojen laatuun vaikuttavia tekijöitä..... | 27 |
| 6 | 7SIGNAL - SITE MINER..... | 28 |
| 6.1 | Yleistä | 28 |
| 6.2 | Laitteisto..... | 28 |
| 6.3 | Ohjelmisto | 30 |
| 6.4 | Suorituskykymittarit | 31 |
| 6.5 | Mittausten sisältö ja parametrit | 32 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7 | VALMISTELUT JA MITTAUSKSET | 33 |
| 7.1 | Dynamon Auditorio | 34 |
| 7.2 | Rajakadun hallintosiipi..... | 35 |
| 7.2.1 | Rajakadun hallintosiiven verkon rakenne | 35 |
| 7.2.2 | Verkon laadunvalvonta mittaus..... | 36 |
| 8 | TULOSTEN ANALYSOINTI..... | 38 |
| 8.1 | Dynamon auditorio..... | 38 |
| 8.1.1 | Kanavajako ja spektrianalyysi | 38 |
| 8.1.2 | Signaalinvoimakkuudet..... | 39 |
| 8.1.3 | Käyttäjämäärät tukiasemassa | 40 |
| 8.1.4 | Verkon käytettävyys ja saatavuus..... | 41 |
| 8.1.5 | Beacon saatavuus | 45 |
| 8.1.6 | Tiedonsiirtonopeudet | 45 |
| 8.1.7 | VoIP | 47 |
| 8.2 | Rajakadun hallintosiipi..... | 50 |
| 8.2.1 | Kanavajako | 50 |
| 8.2.2 | Signaalinvoimakkuudet..... | 51 |
| 8.2.3 | Käyttäjämäärät tukiasemissa | 52 |
| 8.2.4 | Verkon käytettävyys ja saatavuus..... | 53 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.2.5 | Beacon saatavuus | 57 |
| 8.2.6 | Tiedonsiirtonopeudet | 58 |
| 8.2.7 | VoIP | 59 |
| 9 | YHTEENVETO MITTAUKSISTA | 64 |
| 9.1 | Dynamon auditorio | 64 |
| 9.2 | Rajakadun hallintosiipi | 64 |
| 10 | POHDINTA | 65 |
| | LÄHTEET | 67 |
| | LIITTEET | 70 |
| | Liite1: Mittausjärjestys 7signal työkalulla | 70 |
| | Liite 2: Rajakadun hallintosiiven 2.krs | 71 |
| | Liite 3: Rajakadun hallintosiiven 3.krs | 72 |

KUVIOT

| | |
|--|----|
| KUVIO 1. Ad-hoc- ja Infrastruktuuriverkkotopologiat (Ad Hoc and Infrastructure Networks 2012.) | 11 |
| KUVIO 2. Suorasekvenssihajaspektrin toimintaperiaate (Aittoniemi & Nenonen. 2007, 11.) | 12 |
| KUVIO 3. Taajuushyppelyn toimintaperiaate (Aittoniemi & Nenonen. 2007, 12.) | 12 |
| KUVIO 4. OFDM kantoaaltojen taajuustasot (Toivonen. 2012, 17.) | 13 |
| KUVIO 5. DCF:n toimintaperiaate (von Nagy 2010.) | 21 |

| | |
|---|----|
| KUVIO 6. PCF:n kilpailutilanne ja Contention Free Period (Sannikka 2009, 36-38.) | 22 |
| KUVIO 7. Neljä Access Category jonoa (Prasad A.R & Prasad N.R 2005.) | 24 |
| KUVIO 8. User Priority arvojen perusteella tehtävä prioriteetti jako Access Category:ssä (Ma, Denko & Zhang 2009.) | 24 |
| KUVIO 9. EDCA toimintaperiaate (Sannikka 2009, 38.)..... | 25 |
| KUVIO 10. Testimittausympäristö..... | 33 |
| KUVIO 11. Dynamon auditorion mittausympäristö | 35 |
| KUVIO 12. Rajakadun hallintosiiven mittausympäristö | 37 |
| KUVIO 13. Auditorion tukiaseman käyttämät kanavat mittausajanjaksolla..... | 38 |
| KUVIO 14. Spektrianalyysi | 39 |
| KUVIO 15. Tukiaseman signaalivoimakkuudet mittausjaksolla | 40 |
| KUVIO 16. Käyttäjämäärät tukiasemassa mittausjaksolla | 41 |
| KUVIO 17. Tukiasemaan liittymisten ja todentamisten onnistuminen prosentteina .. | 42 |
| KUVIO 18. Tukiasemaan radioyhteyden muodostamiseen kulunut keskimääräinen aika | 43 |
| KUVIO 19. IP-osoitteen noutamiseen kulunut keskimääräinen aika | 44 |
| KUVIO 20. IP-osoitteen noutamisen onnistumisprosentti..... | 44 |
| KUVIO 21. Tukiaseman beacon saatavuus mittausjaksolla..... | 45 |
| KUVIO 22. Keskimääräiset latausnopeudet mittausajanjaksolla | 46 |
| KUVIO 23. Keskimääräiset lähetysnopeudet mittausajanjaksolla | 47 |
| KUVIO 24. Kuuluvuuden keskimääräiset MOS-arvot mittausjaksolla..... | 48 |
| KUVIO 25. Puheen keskimääräiset MOS-arvot mittausjaksolla | 48 |
| KUVIO 26. Keskimääräinen viiveen vaihtelu mittausjaksolla | 49 |
| KUVIO 27. Keskimääräinen paketti hävikki mittausjaksolla..... | 50 |
| KUVIO 28. Rajakadun tukiasemien kanavajako..... | 51 |

| | |
|---|----|
| KUVIO 29. Tukiasemien keskimääräiset signaalin voimakkuudet 7signal Eye1- ja Eye2- mittausyksikön näkökulmista tarkasteltuna | 52 |
| KUVIO 30. Tukiasemien käyttäjämäärät mittausjaksolla | 53 |
| KUVIO 31. Mittausjaksolla onnistuneet tukiasemalle onnistuneet liittymiset | 54 |
| KUVIO 32. Tukiasemaan liittymiseen kulunut aika mittausjaksolla | 55 |
| KUVIO 33. IP-osoitteen hakemiseen kulunut aika eri tukiasemilta | 56 |
| KUVIO 34. IP-osoitteen hakemisen onnistumisprosentti..... | 56 |
| KUVIO 35. Tukiasemien beacon-sanomien saatavuus mittausjaksolla | 57 |
| KUVIO 36. Tukiasemien keskimääräiset latausnopeudet mittausjaksolla | 58 |
| KUVIO 37. Tukiasemien lähetyksenopeudet mittausjaksolla | 59 |
| KUVIO 38. Tukiasemien kuuluvuuden MOS-arvot mittausjaksolla..... | 60 |
| KUVIO 39. Tukiasemien puheen MOS-arvot mittausjaksolla..... | 61 |
| KUVIO 40. Tukiasemien viiveen vaihtelu mittausjaksolla | 62 |
| KUVIO 41. Tukiasemien paketti hävikki mittausjaksolla | 63 |

TAULUKOT

| | |
|---|----|
| TAULUKKO 1. Signaalin voimakkuus suhteessa tiedonsiirtonopeuteen (Kauppinen 2005, 27)..... | 27 |
| TAULUKKO 2. Käytetyt mittaukset ja mittausten parametrit | 32 |

LYHENTEET

| | |
|----------|--|
| AC | Access Category |
| AF | Assured Forwarding |
| APSD | Automatic Power Save Delivery |
| AIFS | Arbitrary Interframe Space |
| CCK | Complementary Code Keying |
| CFP | Contention Free Period |
| CW | Contention Window |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance |
| DBPSK | Differential Binary Phase-Shift Keying |
| DCF | Distributed Coordination Function |
| DIFS | DCF Inter-Frame Space |
| DiffServ | Differentiated Services |
| DSSS | Direct-Sequence Spread Spectrum |
| DQPSK | Differential Quadrature Phase-Shift Keying |
| EDCA | Enhanced Distributed Channel Access |
| EF | Expedited Forwarding |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| FHSS | Frequency Hopping Spread Spectrum |
| FIFO | First In First Out |
| FTP | File Transfer Protocol |

| | |
|---------|--|
| HC | Hybrid Coordinator |
| HCCA | HCF Controlled Channel Access |
| IntServ | Integrated Services |
| ISM | Industrial, Scientific and Medical |
| KPI | Key Performance Indicator |
| MAC | Media Access Control |
| MIMO | Multiple-Input and Multiple-Output |
| MOS | Mean Opinion Score |
| MU-MIMO | Multi-User MIMO |
| OFDM | Orthogonal Frequency-Division Multiplexing |
| PC | Point Coordinator |
| PCF | Point Coordination Function |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QoE | Quality of Experience |
| QoS | Quality of Service |
| SSID | Service Set Identifier |
| TXOP | Transmit Opportunity Limit |
| UP | User Priority |
| VoIP | Voice over IP |
| VoWLAN | Voice over WLAN |
| WLAN | Wireless Local Area Network |

1 TYÖN LÄHTÖKOHDAT

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia Jyväskylän ammattikorkeakoulu Rajakadun hallintosiiven langattoman verkon laatua mittaamalla sitä ja analysoimalla 7signal-työkalulla. Toimeksiantajana toimi Jyväskylän ammattikorkeakoulun tietohallinto. Opinnäytetyön aihe tutkia Rajakadun hallintosiiven langattonta lähiverkkoa oli saatu käyttäjien palautteen pohjalta. Tutkimukseen otettiin mukaan myös Dynamon kampuksen auditorio vertailupohjaksi. Tutkimus toteutettiin mittaamalla langattoman lähiverkon toimintaa hyödyntäen 7signal-työkalua.

Työssä tutkittiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun lähiverkon laatua kahdella kampuksella, Rajakadun hallintosiivessä ja Dynamon auditoriossa. Kampusten lähiverkko koostui 802.11-tekniikoita hyödyntävistä tukiasemista. Dynamon auditoriossa mitattavia tukiasemia oli yksi kappale ja Rajakadun hallintosiivessä tukiasemia oli sijoiteltu useita kappeleita kahteen eri kerrokseen. 7signal-työkalulla saadut mittaustulokset analysoitiin. Mittausten tuloksilla oli tarkoitus todentaa langattoman lähiverkon laatua ja kartoittaa mahdolliset kehitystarpeet. 7signal-työkalu koostui neljästä eri komponentista, joilla pystyttiin toteuttamaan mittaukset ja analysoimaan saadut tulokset. Tulosten analysoinnissa käytettiin 7signal Sapphire Analyzer-työkalua ja itse mittauksissa Sapphire Eye-, Sapphire Carat- ja Sapphire Sonar-työkaluja.

Opinnäytetyön teoriaosassa esitettiin ajankohtaista tietoa langattoman lähiverkon standardeista, toimintaperiaatteista, palvelunlaadusta sekä 7signal-työkalusta. Teoriaosuuteen valittiin tietoperusta tukemaan mittauksen lähtökohtia, sekä selkeyttämään lukijalle varsinaista tutkimusosaa ja sen tulosten esittämistä.

Työssä pyritään esittämään mahdollisia parannusehdotuksia Jyväskylän ammattikorkeakoulun Rajakadun kampuksen ja Dynamon auditorion langattoman lähiverkon laadun parantamiseksi ja etsimään mahdollisia syitä poikkeamiin lähiverkon laadussa.

2 IEEE STANDARDIT

IEEE eli Institute of Electrical and Electronics Engineers on kansainvälinen yhdistys, jonka tavoitteena on edistää teknologiaa ja siihen liittyviä innovaatioita. Se toimii mukana lähes kaikessa sähkö-, elektroniikka- ja tietotekniikka-aloihin liittyvässä teknisten standardien määrittelyssä, konferenssien järjestämisessä ja teknisen materiaalin julkaisemisessa. (IEEE at a Glance n.d.)

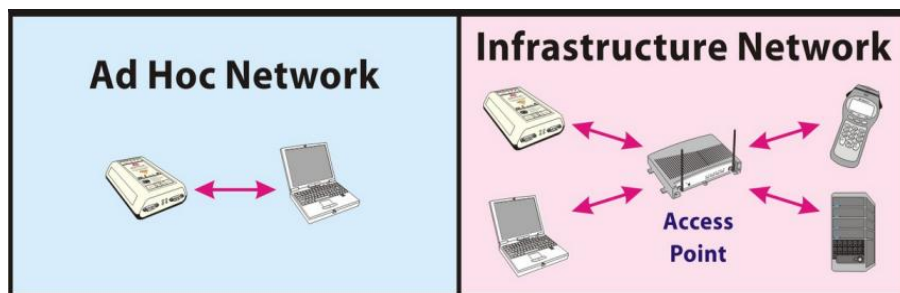
IEEE 802.xx -standardit käsittelevät pakettipohjaisia lähiverkon tekniikoita, muun muassa lähiverkkoa (Ethernet 802.3) ja langatonta lähiverkkoa (WLAN 802.11), joita ylläpitää IEEE:n LAN/MAN standarditoimikunta. 802.11 on IEEE:n kehittämä standardi langattomille lähiverkoille, ja se määrittelee tekniikkaan liittyvät suositukset ja langattoman lähiverkon toiminnan. (Koskela n.d. 5-15.)

IEEE:n standardien ja suositusten kanssa työskentelee läheisesti myös Wi-Fi Alliance -yhteisö, joka sertifioi IEEE 802.11-standardeihin ja suosituksiin perustuvia lähiverkon tuotteita. Koska IEEE ei itse valvo ja varmista, että eri laitevalmistajat noudattaisivat suosituksia, ei-kaupallinen Wi-Fi Alliance perustettiin valvomaan ja edistämään tekniikan käyttöä eri tuotteissa. (WI-FI, discover and learn n.d.)

3 802.11-VERKKOJEN OMINAISUUDET JA TAAJUUDET

3.1 Ominaisuudet

IEEE 802.11-standardi määrittelee kaksi verkkotopologiamallia, joilla langaton lähiverkko voidaan luoda. Ad-hoc -verkkotopologiassa laitteet ovat kytkeytyneenä suoraan toisiinsa, eikä verkolla ole keskitettyä liityntäpistettä, joka ohjaisi liikennettä verkossa. Infrastruktuuriverkkotopologiassa laitteet liikköivät toistensa kanssa keskitetyn liityntäpisteen kautta (Ks. kuvio 1), joka voi olla esimerkiksi langaton tukiasema. (Ad Hoc and Infrastructure Networks 2012.)

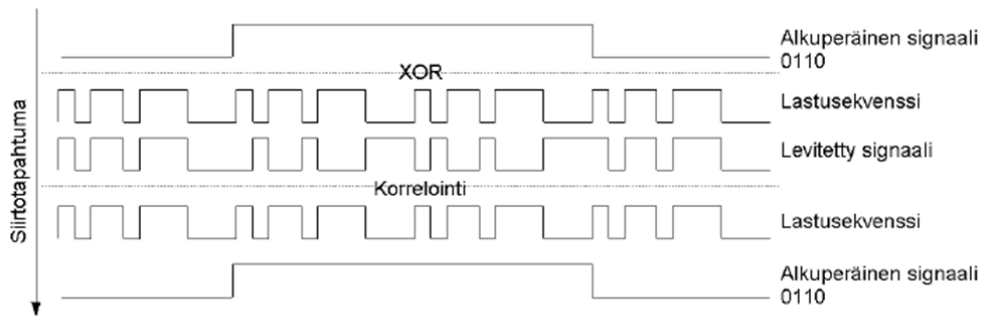


KUVIO 1. Ad-hoc- ja Infrastruktuuriverkkotopologiat (Ad Hoc and Infrastructure Networks 2012.)

Langattomassa lähiverkossa käytetään kolmea erilaista lähetystekniikkaa (Toivonen. 2012, 15). Kaksi lähetystekniikoista, DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ja FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) ovat hajaspektritekniikoita ja kolmas OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) on monikaistatekniikka. (Granlund 2007, 112, 298.)

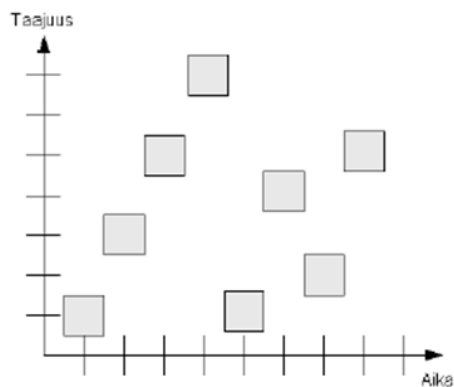
DSSS eli suorasekvenssihajaspektri lähetystekniikassa kapealle kaistalle tarkoitettu signaali kerrotaan hajautusavaimen kanssa, jonka avulla se saadaan levitettyä laajemmalle taajuuskaistalle (Ks. kuvio 2). Hajautusavaimen muoto riippuu käytettävästä tekniikasta ja esimerkiksi 802.11b käyttää 11-bittistä hajautusavainta. DSSS tekniik-

kan etuna on hyvä häiriönsietokyky, joka kuitenkin rajoittaa hieman siirtonopeutta. (Granlund 2007, 117-118.)



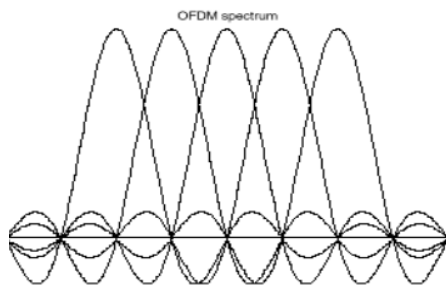
KUVIO 2. Suorasekvenssihajaspektrin toimintaperiaate (Aittoniemi & Nenonen. 2007, 11.)

FHSS eli taajuushyppely lähetystekniikassa käytettävä taajuus vaihtelee ennalta sovitun ajan välein (Ks. kuvio 3). Välttelemällä viereisiä taajuuksia hyppelyssä saavutetaan häiriönsietokykyä siirtotiellä, koska radiontien häiriöt ovat aikaan ja taajuuteen sidonnaisia. Maksimini siirtonopeus taajuushyppely tekniikkaan käytettäessä on 2 Mbit/s. (FHSS vs. DSSS n.d.)



KUVIO 3. Taajuushyppelyn toimintaperiaate (Aittoniemi & Nenonen. 2007, 12.)

OFDM-lähetystekniikassa taajuusalue jaetaan useisiin alikanaviin ja jokainen alikanavan kantaalto moduloidaan erikseen sovitulla modulointi menetelmällä (Ks. kuvio 4). OFDM mahdollistaa hajaspektritekniikoita suuremmat siirtonopeudet ja käyttää yleensä QAM-modulaatiota (Quadrature Amplitude Modulation) variantteja suurimpien tiedonsiirtonopeuksien saavuttamiseksi. (Toivonen 2012, 17-18.)



KUVIO 4. OFDM kantaaltojen taajuustasot (Toivonen. 2012, 17.)

3.2 2,4 GHz ja 5 GHz -taajuusalueet

Kaikki IEEE:n julkaisemat 802.11-standardit toimivat niin sanotuilla vapailta taajuuksilla, joista käytetään yleisnimitystä 2,4 GHz ISM- ja 5 GHz ISM-taajuudet (Industrial Scientific Medical). IEEE 802.11:1999 suosituksessa 2,4 GHz:n taajuusalue on jaettu 14 kanavaan, välille 2,412 - 2,484 GHz, jotka erotellaan 5 MHz:n välein. (Granlund 2007, 298-299.)

Euroopassa ETSI (European Telecommunications Standards Institute) suosituksen mukaisesti 2,4 GHz:n taajuusalueelta on käytössä kanavat 1-13. (Granlund. 2007, 4.)

5 GHz:n taajuusalueen käyttö vaihtelee maakohtaisesti, ja esimerkiksi Euroopassa ETSI:n toimesta käytettäväksi taajuusalueeksi on määritelty 5,180 - 5,700 GHz, joka on jaettu 19 kanavaan 20 MHz:n välein. (WiFi in the 5 GHz Band n.d.)

3.3 IEEE 802.11 ja IEEE 802.11a

Alkuperäinen 802.11-standardi on julkaistu vuonna 1997, ja se mahdollistaa 1 ja 2 megabittiä sekunnissa (Mbit/s) nopeuden 2,4 GHz:n taajuusalueella. Lähetystekniikoina alkuperäisessä 802.11-standardissa käytettiin FHSS- ja DSSS-tekniikoita riippuen nopeudesta. Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) -modulaatiomenetelmää käytettiin 1 Mbit/s nopeuden saavuttamiseksi ja Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) -modulaatiota vastaavasti 2 Mbit/s nopeuden saavuttamiseksi langattomassa verkossa. (Toivonen 2012, 25-26.)

IEEE 802.11a -laajennus on julkaistu vuonna 1999, ja se toimii 5 GHz:n taajuusalueella. 802.11a-laajennus käyttää tiedonsiirrossa lähetystekniikkana OFDM-tekniikkaa ja maksimi tiedonsiirtonopeus on 54 Mbit/s (Granlund.2007, 303-305). 5 GHz:n taajuusalueen etuna on ollut, että se ei ole ollut yhtä laajasti käytössä kuin 2,4 GHz:n taajuusalue. Heikkoutena 5 GHz:n taajuusalueella on ollut signaalin lyhyt kantama ja esteistä heikkeneminen.

3.4 IEEE 802.11b

IEEE 802.11b-standardi on julkaistu vuonna 1999 ja toimii 2,4 GHz:n taajuusalueella. 802.11b-standardi käyttää tiedonsiirrossa suurimmilla nopeuksilla CCK- modulointina (Complementary Code Keying) ja sen maksimi tiedonsiirtonopeus on 11 Mbit/s. Etuna 802.11b:n käyttämässä 2,4 GHz:n taajuusalueella on hyvä vaimennuksen sietokyky ja suhteellisen hyvä kantama. Suurimpana ongelmana varsinkin nykyään on 2,4 GHz:n kanavan ruuhkaisuus. Samoilla taajuuksilla toimii useita eri laitteita, jotka saattavat häiritä toisiaan. Eroina 802.11a- ja 802.11b-standardin laitteissa on, että ne eivät ole yhteensopivia keskenään. (Coleman, Mackenzie, Miller & Westcott 2010)

3.5 IEEE 802.11g

IEEE 802.11g-standardi julkaistiin vuonna 2003, ja se käyttää hyväkseen myös 2,4 GHz:n taajuusalueita. 802.11g käyttää 802.11a-standardin tavoin lähetystekniikkana OFDM-tekniikkaa ja on myös täysin taaksepäin yhteensopiva vanhemman 802.11b-standardin kanssa. 802.11g:n maksimi tiedonsiirtonopeus on 54 Mbit/s ja 11 Mbit/s, mikäli käytetään yhdessä 802.11b-laitteiden kanssa. Tiedonsiirrossa 802.11g:n hyvät ja huonot ominaisuudet ovat lähestulkoon samat 802.11b:n kanssa. (Granlund 2007, 305)

3.6 IEEE 802.11n

IEEE 802.11n-standardi julkaistiin vuonna 2009, ja sen tarkoituksena oli parantaa langattoman lähiverkon suorituskykyä entisestään. 802.11n käyttää lähetystekniikkana OFDM-tekniikkaa ja pystyy toimimaan 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueella yhtä aikaa. Se on yhteensopiva 802.11a/b/g-standardien kanssa ja sen teoreettinen maksiminopeus on 600 Mbit/s. Todellisuudessa siirtonopeudet vastaavat noin 100-200 Mbit/s nopeuksia. Uutena suorituskykyä parantavana ominaisuutena 802.11n tekniikka tukee MIMO-tekniikkaa (multiple-input, multiple-output), jossa käytetään useampaa antennia vastaanottamaan ja lähettämään dataa verkkoon. (IEEE 802.11n Standard n.d.)

3.7 IEEE 802.11ac

IEEE 802.11ac-standardia on kehitetty vuodesta 2011, ja se on tarkoitus hyväksyä lopullisesti ja julkaista vuoden 2014 aikana. 802.11ac-standardi toimii 5 GHz:n taajuusalueella ja sen uusiin ominaisuuksiin kuuluu laajempi radiotaajuuden kaistanleveys. MIMO-tekniikkaa on kehitetty eteenpäin tukemaan niin sanottua MU-MIMO-tekniikkaa (Multi-User MIMO), jossa useamman lähettäjän on mahdollista lähettää useita eri signaaleja yhtä aikaa ja vastaanottajien mahdollista vastaanottaa näitä eri signaaleja samanaikaisesti samalla taajuudella. Lisäksi standardi tulisi tukemaan ti-

heämpää 256-QAM-modulaatiota. Nämä mahdollistavat maksimissaan noin 500 Mbit/s siirtonopeuden kun käytetään yhtä lähetyskanavaa ja jopa 1 Gbit/s siirtonopeuden, kun käytetään useampaa lähetyskanavaa yhtäaikaisesti. Standardin olisi tarkoitus olla lisäksi yhteensopiva vanhempien standardien 802.11a/n kanssa. (Ward 2012.)

4 LANGATTOMAN VERKON TOIMINTA

4.1 Beacon-hallintasanomat

Yksi tärkeimmistä kehyksistä langattomassa verkossa on beacon-hallintasanoma, jonka tukiasema lähettää verkkoon oletusarvoisesti noin 10 sekunnin välein. Yleisesti beacon-sanomat sisältävät kaikki tarvittavat tiedot verkosta, jotta päätelaitteet voivat kytkeytyä verkkoon. Tarkemmin tarkasteltuna beacon-sanomat sisältävät tiedon tukiaseman aikaleimasta, käytettävästä hajaspektritekniikasta, kanavasta, verkon nopeudesta ja SSID-nimestä. Lisäksi beacon-sanoma voi välittää tiedon käytössä olevista tietoturva ja palvelunlaatu parametreista. (Coleman & Westcott 2012.)

4.2 Verkkoon liittyminen

Langattomaan verkkoon liittyminen tapahtuu kolmivaiheisesti, jossa liittyvä laite saa tietoja verkosta ja käytettävistä parametreista sekä lisäksi todentaa itsensä verkolle. Aina kun uusi laite halutaan liittää verkkoon tai verkossa jo oleva laite käynnistetään uudelleen, on laitteen myös käytävä kolmivaiheinen verkkoon liityntä läpi. Ensimmäiseksi laite liittyy verkkoon kuuntelemalla (Scanning) ympärillä olevia tukiasemia. Kuuntelu on mahdollista toteuttaa kahdella eri menettelytavalla, passiivisella kuuntelulla (passive scanning) tai aktiivisella kuuntelulla (active scanning). (Granlund 2007, 323-324.)

Passiivisessa kuuntelussa (passive scanning) verkkoon liittyvä laite etsii tukiaseman lähettämiä Beacon-sanomia. Sanomat sisältävät tiedon verkon parametreista, kuten esimerkiksi SSID-tunnuksesta, aikaleimasta, rakenteesta ja käytetystä moduloinnista. Aktiivisessa kuuntelussa (active scanning) verkkoon liittyvä laite etsii tukiasemaa lähettämällä Probe request -sanomia. Tukiasema vastaa Probe response -sanomilla, jotka sisältävä samoja parametreja verkosta kuin Beacon-sanomat. (Granlund 2007, 323-324.)

Kun verkkoon liittyvä laite on saanut tiedot verkon ominaisuuksista tukiasemalta, varmistetaan liittyvä laite vielä todentamalla (authentication) se, mikäli se on vaadittu verkon osalta. Todentamalla varmistetaan verkkoon liittyvästä laitteesta. Kun verkkoon liittyvä laite on todennettu ja se on valmis aloittamaan verkossa liikennöinnin, se vielä sidotaan (association) osaksi verkkoa. Sidonnassa verkon osapuolet vaihtavat tietonsa ja sijaintinsa verkossa. Tämän jälkeen verkkoon liittyvä laite on osa verkkoa ja voi liikennöidä verkossa. (Granlund 2007, 323-324.)

5 PALVELUNLAATU TIETOVERKOISSA

Palvelunlaatua tietoliikenteessä voidaan tarkastella useista eri näkökulmista. Tässä työssä tarkastellaan laatua eri mittareiden ja mallien kautta. Tietoliikenteen laatua voidaan mitata muun muassa viiveen, viiveen vaihtelun, pakettihävikin ja läpäisykyvyn avulla. Erilaisten mallien ja parametrien avulla priorisoidaan liikennettä verkossa ja näin mahdollistetaan kriittiselle liikenteelle tarvittavat resurssit.

5.1 Palvelunlaatu

5.1.1 Yleistä

Palvelunlaadulla (Quality of Service, QoS) tarkoitetaan tietoliikenteessä verkon kykyä priorisoida palveluja ja liikennettä käyttäjien kesken. Palvelunlaadulla on tarkoitus varmistaa riittävä kaistanleveys kohdennetulle verkonliikenteelle ja minimoida siihen

mahdollisesti kohdistuvat viiveet, jitter ja pakettihävikki. QoS ei kasvata varsinaista käytettävissä olevaa kaistaa, vaan se priorisoi liikenteen pakettien tärkeysjärjestyksen mukaan. (Taavila 2009, 4)

5.1.2 QoS-laatuparametrit

Palvelunlaatu voidaan kokea usealla eri tavalla riippuen näkökulmasta. Esimerkiksi käyttäjien näkökulmasta saadaan selville verkon käyttäjien kokema palvelunlaatu (Quality of Experience, QoE). Vastaavasti kun laatua tarkastellaan eri mekanismeilla ja parametreilla, joista tärkeimpiä ovat viive, pakettihävikki, viiveen vaihtelu eli jitter ja läpäisykyky, saadaan mittareilla tietoa palveluiden laadusta. (Sannikka. 2009, 8)

Viive (engl. latency) kuvaa aikaa ja on aika joka yhdeltä paketilla kuluu lähettäjältä vastaanottajalle. Palvelunlaadun kannalta viive on yksi olennaisimpia tutkittavia parametreja. (Sannikka 2009, 12)

Pakettihävikki (engl. packet loss) kuvaa lähetettyjen pakettien häviämistä matkalla vastaanottajalle. Mitattua arvoa kuvataan yleensä prosentteina jolla ilmoitetaan, kuinka monta prosenttia lähetetyistä paketeista on hävinnyt matkalla. (Sannikka 2009, 12)

Viiveen vaihtelu (engl. jitter) kuvaa epätavallisia viiveen muutoksia tarkasteltavana ajankohtana ja haittaa erityisesti VoIP (Voice over IP) -puheliikennettä (Sannikka. 2009, 12). Yleisimpiä syitä viiveen vaihtelun syntymiseen voivat olla verkon ruuhkautuminen tai reittimuutokset. (Rouse 2008)

Läpäisykyky (engl. throughput) kuvaa kuinka paljon dataa verkko pystyy annetulla ajanjaksolla siirtämään. Läpäisykykyä mitataan yleensä bitti tai paketti määrällä, eli esimerkiksi kuinka monta bittiä sekunnissa verkon solmukohta päästää läpi dataa. (Sannikka 2009, 12)

5.2 QoS-mallit

5.2.1 Best Effort

Best Effort-malli pyrkii toimittamaan paketit perille ilman minkäänlaisia takeita siirtonopeudesta tai ajasta. Best Effort-mallissa kaikki paketit käsitellään samanarvoisesti ja verkkoon voidaan lähettää paketteja ilman, että siihen tarvitaan erityinen lupa tai että siitä erikseen ilmoitetaan verkolle. Tämän tyyppinen liikenteen luokittelu ei ole optimaalinen viiveherkille palveluille, kuten VoIP tai videon suoratoistaminen. (Järvi 2013, 26.)

5.2.2 Intergrated Services

Intergrated Services-mallissa (suom. yhdistetyt palvelut) taataan korkea palvelutaso IP-paketeille. IntServ-mallissa verkon resurssit varataan ennalta ja paketteja ei välitetä, ennen kuin verkosta saadaan tietoa ja lupa välittää liikenne päämääränsä sovitulla palvelutasolla. Palvelu käyttää hyväkseen Resource Reservation (RSVP)-protokollaa, joka antaa tarvittaessa mahdollisuuden muokata yhteyden ominaisuuksia myös yhteyden aikana.

RSVP-protokolla varaa verkon resurssit aina sovelluksen tarvitsemaksi päästä päähän liikennöinnin ajaksi ja estää samalla muiden pakettien välittämisen verkossa. RSVP -protokolla varmistaa aina verkolta varatut resurssit ja mikäli tarvittavia resursseja, kuten siirtonopeus, viive ja pakettihäviö ei pystytä varaamaan, paketteja ei lähetetä. (Järvi 2013, 26-27.)

5.2.3 Diffrentiated Services

Diffrentiated Services-mallissa (suom. eriytetyt palvelut) verkossa liikkuvat IP-paketit luokitellaan palveluluokkatiedolla, jonka mukaan reitittimet käsittelevät paketteja. Palveluluokkatiedon avulla palveluille tarjotaan eri prioriteetit, joiden mukaan esimerkiksi VoIP-liikenteelle voidaan taata tarvittavan pieni viive ja viiveen vaihtelu verkossa. Vastaavasti vähempiarvoiselle liikenteelle kuten sähköpostille tarjotaan vain Best Effort-luokiteltu palveluluokka. (Järvi 2013, 27-31.)

Diffrentiated Services tekee pakettien priorisoinnin verkossa reitittimissä olevan Per-Hop Behavior-prosessin toimesta, jossa pakettien priorisointi tapahtuu laitekohtaisesti verkossa. Pakettien priorisoiminen tapahtuu merkitsemällä palveluluokkatiedot otsikkokenttään, ja samassa palveluluokassa olevat palveluluokkatiedot näin käsitellään samalla prioriteetilla. Yksinkertaisimmillaan DiffServ-toteutuksessa voi olla käytössä kaksi palveluluokkaa; Expedited Forwarding (EF) ja Assured Forwarding (AF). Expedited Forwarding on korkean prioriteetin liikennettä, jolle taataan pienet viiveet ja häviöt. Vastaavasti Assured Forwarding on muuta verkonliikennettä, ja se voidaan tarvittaessa jakaa vielä alaluokkiin verkon priorisointitarpeen mukaan. Esimerkiksi näiden kahden palveluluokan mukaan edellä mainittu VoIP-liikenne kuuluu korkean prioriteetin Expedited Forwarding-liikenteeseen ja sähköpostiliikenne Assured Forwarding-liikenteeseen verkossa. Diffrentiated Services-arkkitehtuurin etuna on, että verkkoa ei tarvitse varata erikseen liikenteelle, vaan liikennettä käsitellään jokaisessa verkon laitteessa palveluluokkatietojen perusteella. (Taavila 2009, 14-17.)

5.3 Palvelun laadun toteutus alkuperäisessä 802.11-verkossa

Langattoman lähiverkon häiriöherkkyys ja ilmatierajapinta aiheuttavat haasteita palvelunlaadun toteuttamiselle. Koska ilmatierajapinta on varattu vain yhdelle käyttäjälle kerrallaan dataa lähetettäessä, palvelunlaadun tarjoaminen tapahtuu priorisoimalla sen käyttöä. Priorisointi tapahtuu antamalla käyttöoikeus ilmatielle tietyille käyttäjille käytössä olevien parametrien mukaisesti. (Sannikka 2009, 32-43.)

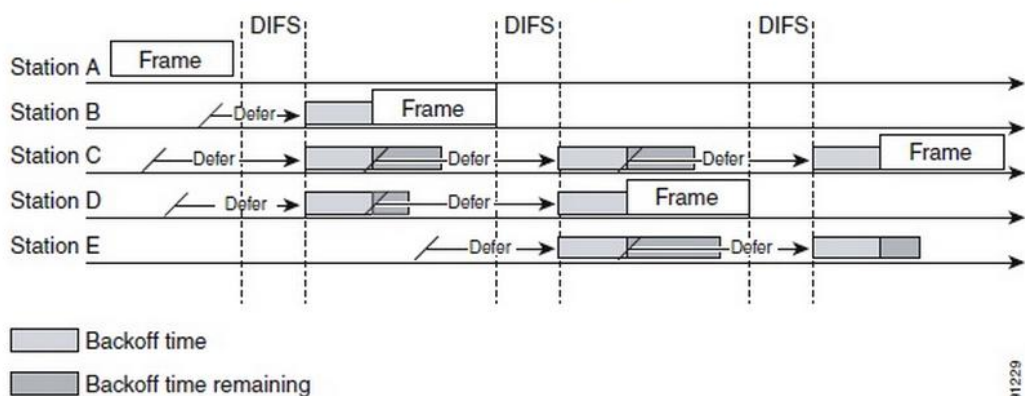
Alkuperäisessä 802.11-standardissa MAC-kerros (Media Access Control) hoitaa käyttäjän datan lähettämisen ja ohjaamisen, joten sillä on myös suuri vaikutus siihen, miten palvelunlaatu toteutuu verkossa. Datan kontrollointiin MAC-kerroksella on käytettävänä kaksi ohjausfunktioita, jotka ovat Distributed Coordination Function (DCF) ja Point Coordination Function (PCF). (Poole. n.d.)

5.3.1 Distributed Coordination Function, DCF

DCF perustuu CSMA/CA-tekniikkaan (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance), jossa asema kuuntelee kanavaa ja selvittää, onko se vapaa ennen lähettämistä. Kun kanava havaitaan vapaaksi, asema lähettää datan verkkoon. DCF tukee asynkronista lähetystä ja on suunniteltu lähinnä Best Effort-liikenteelle. Sen avulla pystytään hyödyntämään siirtotien rajallinen kapasiteetti (Sannikka 2009, 32-34.)

Kuvio 5 esittää DCF:n toimintaperiaatetta, jossa lähettävä asema tarkkailee kanavaa. Jos kanava näyttää olevan vapaa ennen lähettämistä, aseman pitää odottaa pakollinen DIFS-kehysväli (DCF Inter-Frame Space), ennen kuin se voi lähettää dataa verkkoon. Jos kanava on aktiivinen, aseman tulee odottaa DIFS-kehysväli ja sen lisäksi satunnainen määrä Backoff-aikavälejä, ennen kuin se voi lähettää dataa verkkoon. Satunnainen Backoff-aikaväli saa aika-arvonsa kokonaisluvusta ja CW (Contention Window), jossa arvot ovat väliltä CW_{min} ja CW_{max} . Backoff-aikavälin aika-arvo määräytyy siis väliltä 0 ja CW. Tällä tavoin varmistetaan, että kaksi vuoroaan odottavaa asemaa eivät lähetä verkkoon yhtä aikaa dataa ja aiheuta törmäyksiä. DCF ei sovellu kovinkaan hyvin käytettäväksi viiveherkälle liikenteelle, koska ruuhkatilanteessa pakettien lähetysajat pidentyvät asemien odottaessa kaistan vapautumista. (Poole n.d.)

Figure 2-4 Distributed Coordination Function Example



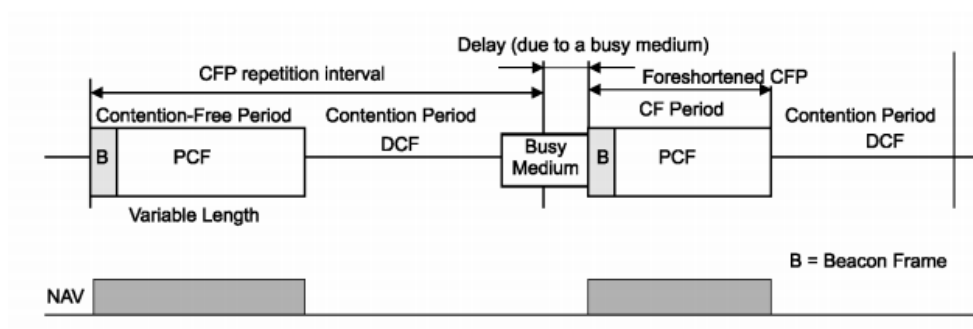
91229

KUVIO 5. DCF:n toimintaperiaate (von Nagy 2010.)

5.3.2 Point Coordination Function, PCF

Toinen ohjausfunktio PCF tukee DFC:tä paremmin viiveherkän datan lähettämistä, mutta sen käyttö on mahdollista vain infrastruktuuriverkossa, jossa laitteet liikennöivät liityntäpisteen kautta. PCF-ohjausfunktio toteutuksessa tukiasema toimii verkon koordinaattorina (Point Coordinator, PC), joka pitää listaa verkon prioriteeteista. PC hallitsee myös tukiasemien lähetysvuoroja ja näin pystyy estämään mahdolliset kilpailutilanteet verkossa (Ks. kuvio 6). PCF:n avulla verkonliikenne voidaan priorisoida karkeasti korkeaan ja matalaan tasoon. (Sannikka 2009, 36-38.)

PCF toteutuksessa osa verkon asemista toimii PCF-asemina ja osa edellä mainittuina DCF-asemina. Point Coordinator -tukiasema jakaa PCF-asetat korkeampaan prioriteettiin ja mahdollistaa näin kiireellisten pakettien lähettämisen ensiksi niin sanotun Contention Free Period (CFP)-ajanjakson aikana. Tämän jälkeen Point Coordinator-tukiasema antaa vuoron verkossa toimiville DCF-asemille, jotka toimivat DCF:n toimintaperiaatteen mukaisesti. PCF- ja DCF-toiminnot ovat peräkkäisiä ja seuraavat toisiaan tietyn väliajan välein. (Sannikka 2009, 36-38.)



KUVIO 6. PCF:n kilpailutilanne ja Contention Free Period (Sannikka 2009, 36-38.)

5.4 IEEE 802.11e standardin tuomat uudistukset 802.11- verkkojen palvelunlaatuun

5.4.1 Yleistä

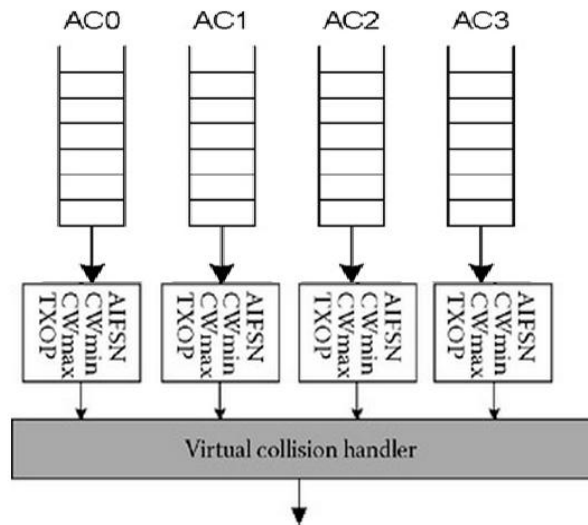
802.11e on pelkästään palvelunlaatuun keskittyvä standardi, joka kehitettiin langattomien lähiverkkojen viiveherkkien palveluiden liikenteen priorisoimista varten.

Standardin ominaisuudet korostuvat etenkin käytettäessä viiveherkkiä palveluita langattomassa lähiverkossa, kuten puhetta Voice over Wireless LAN ja multimedia suoratoistoa. (Rouse 2006.)

Standardi parantaa palvelunlaatua langattomissa lähiverkoissa muokkaamalla MAC -kehystä ja lisäämällä uuden ohjausfunktion Hybrid Coordination Function (HCF). HCF sisältää kaksi kanavan varaustekniikkaa, Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) ja HCF Controlled Channel Access (HCCA), jotka ovat käytännössä aiemmin mainittujen DCF- ja PCF-tekniikoiden laajennuksia. (Poole n.d.)

5.4.2 Enhanced Distributed Channel Access, EDCA

EDCA kanavan varaustekniikka tarjoaa uutena ominaisuutena eriytetyn kanavalle pääsyn mekanismin, jossa priorisoidaan liikenne määrittelemällä neljä Access Categories (AC) jonoa jokaisessa tukiasemassa (Ks. kuvio 7). Tukiasema voi näin ohjata liikennettä verkkoon riippuen MAC-kerrokselle merkitystä paketin prioriteetista. Access Category jonoja ovat; ääni (voice), video (video), best effort (BE) ja taustatehtävät (background). Access Category jono toimii First In, First Out -periaatteella (FIFO), jossa ensimmäiseksi saapunut paketti lähtee myös jonosta ensimmäiseksi. Ainoastaan kyseisen AC-jonon prioriteetti merkitsee, mikä jono on kulloinkin lähetysvuorossa. (Prasad A.R & Prasad N.R 2005.)



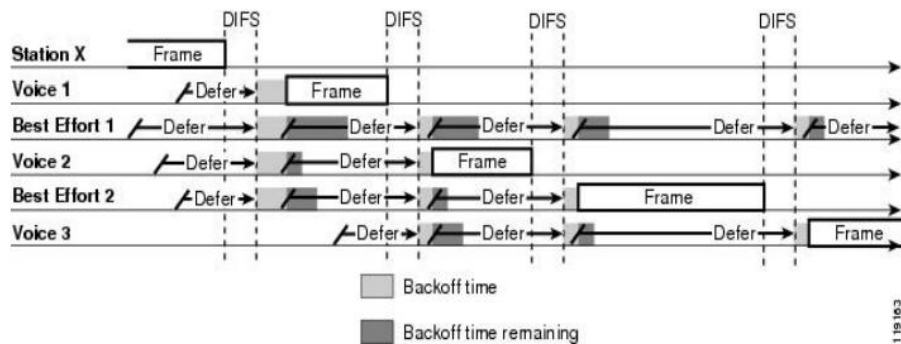
KUVIO 7. Neljä Access Category jonoa (Prasad A.R & Prasad N.R 2005.)

Jokainen Access Category-jono tukee User Priority-arvoja (UP), jotka on jaoteltu kahdeksaan kokonaislukuun välille nolla ja seitsemän. User Priority-arvojen avulla paketit ohjautuvat neljään Access Category jonoon prioriteettinsa mukaan (Ks. kuvio 8). (Ma, Denko & Zhang 2009.)

| | User Priority (Same as 802.1D Priority) | Access Category (AC) | Designation (Informative) |
|------------------------|--|-------------------------|------------------------------|
| Lowest ↓ Highest | 1 | 0 | Best Effort |
| | 2 | 0 | Best Effort |
| | 0 | 0 | Best Effort |
| | 3 | 1 | Video Probe |
| | 4 | 2 | Video |
| | 5 | 2 | Video |
| | 6 | 3 | Voice |
| | 7 | 3 | Voice |

KUVIO 8. User Priority arvojen perusteella tehtävä prioriteetti jako Access Category:ssä (Ma, Denko & Zhang 2009.)

Access Category jonojen välinen lähetyjärjestys verkkoon tapahtuu hyvin samalla periaatteella kuin DCF-funktiossa (Ks. Kuvio 9). Transmit Opportunity Limit (TXOP) ja Arbitrary Interframe Space (AIFS) parametrit hoitavat lopuksi jaon Access Category jonojen välillä, kun asema on lähettämässä paketteja verkkoon. Transmit Opportunity Limit määrittää ajan, jolloin asema voi lähettää paketteja kanavalle ja Arbitrary Interframe Space määrittelee puolestaan Access Category jonon mahdollisuuden päästä lähettämään verkkoon. Jokainen Access Category saa Backoff-aikavälin aikarvonsa myös Contention Window arvoista, jotka määräytyvät väliltä CWmin ja CWmax. (Ma, Denko & Zhang 2009.)



KUVIO 9. EDCA toimintaperiaate (Sannikka 2009, 38.)

5.4.3 HCF Controlled Channel Access, HCCA

HCCA toimii hyvin samalla periaatteella kuin PCF. Se käyttää hyväkseen keskitettyä koordinaattoria Hybrid Coordinator (HC), joka toimii tukiasemassa ja sille on määritetty suurin prioriteetti päästä lähettämään paketteja verkkoon. Käyttämällä hyväkseen määräysoikeutta, Hybrid Coordinator voi määrittää itselleen tai muille tukiasemille tietyn lähetyssajakohdan TXOP, jolloin tukiasema voi lähettää dataa verkkoon. (Quality of Service for wireless networks 2004, 12-13)

5.4.4 Muita 802.11e-standardin tuomia uudistuksia

MAC-kerroksen ohjausfunktion lisäksi 802.11e -standardi toi mukanaan tuen VoIP:n virransäästöominaisuuksille (Automatic Power Save Delivery, APSD), Direct Link Setup-ominaisuudelle, NoAck-ominaisuudelle ja Block Acknowledgement-ominaisuudelle. Alla on listattuna 802.11e uudistusten ominaisuudet. (Frederic n.d)

- Käytännössä Automatic Power Save Delivery mahdollistaa VoIP-puhelinten lähettää ja vastaanottaa dataa tukiasemalta samanaikaisesti ja siirtyä tämän jälkeen odottamaan valmiustilaan.
- Direct Link Setup ominaisuus mahdollistaa kahden samaan tukiasemaan liitetyneen laitteen keskustella suoraan toistensa kanssa.
- NoAck-ominaisuus estää tarvittaessa vastaanottajaa kuittaamasta lähetettyyn viestiin, joka nopeuttaa tietyissä tilanteissa hyvin viive herkän datan lähettämistä.
- Block Acknowledgement-ominaisuus parantaa MAC-kerroksen tehokkuutta, sallimalla TXOP kuittaukset kokonaan yhdessä kehyksessä.

5.5 Muita 802.11-verkkojen laatuun vaikuttavia tekijöitä

Langattoman lähiverkon suorituskykyyn ja toimintaa vaikuttavat paljon myös fyysinen ympäristö, signaalinvoimakkuudet, häiriöt taajuudella sekä käytettävät asetusmääritykset laitteistossa. Fyysinen ympäristö johon langaton lähiverkko on rakennettu vaikuttaa paljon radiosignaalien kuuluvuuteen ja häiriöihin. Esimerkiksi paksut teräsbetonirakenteet ja panssarilasi vaimentavat pahimmillaan signaalin kokonaan. (Kauppinen 2005, 24-27.)

Signaalin voimakkuudella on suuri merkitys langattoman lähiverkon tiedonsiirtonopeuteen. Pääsääntöisesti voidaan todeta, että mitä voimakkaampi signaali on, sitä parempi tiedonsiirtonopeus langattomassa lähiverkossa saadaan käyttöön. Taulukosta 10 nähdään signaalin voimakkuuden ja tiedonsiirtonopeuden välinen suhde. (Kauppinen 2005, 24-27.)

TAULUKKO 1. Signaalin voimakkuus suhteessa tiedonsiirtonopeuteen (Kauppinen 2005, 27)

| Tiedonsiirtonopeus (Mbps) | Signaalin voimakkuus (dBm) |
|---------------------------|----------------------------|
| 54 | -68 |
| 48 | -68 |
| 36 | -75 |
| 24 | -79 |
| 18 | -82 |
| 12 | -84 |
| 11 | -82 |
| 9 | -87 |
| 6 | -88 |
| 5,5 | -85 |
| 2 | -86 |
| 1 | -89 |

Monissa tapauksissa myös samaa 2,4 GHz taajuusaluetta käyttävät laitteet kuten mikroaaltouunit tai Bluetooth-laitteet saattavat aiheuttaa häiriöitä verkolle ja vaikuttaa sen suorituskykyyn (Kiuru 2011, 10-11.). Esimerkiksi Rajakadun hallintosiiven mittausvalmisteluissa 7signal Eye2-mittausyksikkö löysi 2,4 GHz taajuudella toimivia AV-laitteiden kaukosäätimiä, jotka käyttivät kanavaa 11. Kanavajaottelun ansiosta ne eivät kuitenkaan häirinneet hallintosiivessä mitattavia tukiasemia.

Tukiasemien ja päätelaitteiden asetusmäärittelyt vaikuttavat myös verkon suorituskykyyn. Tukiasemista voidaan määritellä esimerkiksi käytettävä tiedonsiirtonopeus, lähetystehotaso ja kanava, jotka vähentävät häiriöitä ja parantavat suorituskykyä. (Kiuru 2011, 12-13.)

6 7SIGNAL - SITE MINER

6.1 Yleistä

7Signal Solutions on vuonna 2006 perustettu suomalaislähtöinen yritys, jonka tavoitteena on liiketoimintakriittisten WLAN-verkkojen laadun varmistaminen automaattisella valvontajärjestelmällä. (7signal Oy, 2009)

7Signal Sapphire -valvontajärjestelmä on tarkoitettu sairaaloille, korkeakouluille ja suurempien yritysten käyttöön ja sen avulla voidaan tarjota vakautta ja optimointimahdollisuuksia verkolle. (7signal Company Overview, n.d.)

7Signal Sapphire valvontajärjestelmä kokonaisuus koostuu eri komponenteista, joita ovat Sapphire Eye-, Micro Eye- ja Soft Eye- mittausyksiköt ja ohjelmisto työkaluista Sapphire Carat, Sapphire Sonar ja Sapphire Analyzer. (7signal Sapphire Deployment Guide Release 4.0, 2013.)

6.2 Laitteisto

Sapphire Eye on langaton mittausyksikkö ja valvonta-asema, joka on suunniteltu asennettavaksi valvottavaan verkkoon. Sapphire Eye -mittausyksikköjä on kahta eri versiota, jotka eroavat toisistaan hieman ja suurimpana erona on tuki 802.11n -tekniikalle. Vanhempi versio tukee 802.11 a/b/g -tekniikoita, kun puolestaan uusi

versio tukee 802.11 a/b/g/n -tekniikoita. (7signal Sapphire Deployment Guide Release 4.0, 2013.)

Sapphire Eye-mittausyksikkö sisältää 6 + 1 kappaletta vahvistus antennia. Laitteen kuusi horisontaalisesti suunnattua antennia kattavat 360 asteen alueen ja yksi antenni on suunnattu kattamaan suoraan ylöspäin olevan alueen. (7signal Sapphire Deployment Guide Release 4.0 2013.)

Sapphire Eye-mittausyksikkö suorittaa passiivisia sekä aktiivisia testejä langattomassa lähiverkossa ja lähettää saadun datan Sapphire Carat-palvelimelle. Passiivi mittaus seuraa jatkuvasti 802.11 verkon dataliikenne virtaa ja viereisiä radio taajuuksia. Aktiivi mittauksessa Sapphire Eye-mittausyksikkö ottaa vuoronperään yhteyden jokaiseen hallinnan alla olevaan tukiasemaan ja testaa verkonpalveluita. (7signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0, 2013, 1-4)

Sapphire Eye-mittausyksikkö on suunniteltu kattamaan 4-8 tukiasemaa kerrallaan. Mittausyksikön komponentteja suojaa IP55 tai IP65 -luokitettut pöly ja vesitiiviit kotelot, joten laitetta on mahdollista käyttää myös ulkona. (7signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0, 2013.)

Sapphire Micro Eye on uusi pienempi toteutus kuin Sapphire Eye ja sisältää lähes kaikki samat ominaisuudet teknisesti ja ohjelmallisesti kuin edeltäjänsä. Merkittävimpänä erona Sapphire Eye verrattu on, että Sapphire Micro Eye tukee vain 1-2 tukiasemaa kerrallaan. (Sapphire Eye, 2013.)

Sapphire Soft Eye-mittausyksikkö on mittausohjelmisto, joka on tarkoitettu asennettavaksi tietokoneelle. Sapphire Soft Eye-mittausyksikkö tarjoaa verkon monitorointi mahdollisuuden paikoissa, joissa ei ole käytössä pysyvää valvontajärjestelmää. Se tukee 802.11a/b/g/n -verkkoja muiden mittausyksikköjen tavoin ja vain 1-2 tukiasemaa kerrallaan. (Sapphire Eye, 2013.)

Opinnäytetyön palvelunlaatumittauksissa käytössä oli kaksi kappaletta vanhempaa versiota olevia Sapphire Eye-mittausyksiköitä.

6.3 Ohjelmisto

Sapphire Carat on palvelimelle asennettava keskitetty hallintatyökalu, jolla seurataan ja hallitaan testiohjelmia, Sapphire Eye-mittausyksiköitä ja automaattisia mittauksia. Carat ohjelmistolla määritellään halutut mittausprofiilit mittausyksiköille ja saaduista mittauksista Carat tallentaa tulokset tietokantaan. (7signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0, 2013.)

Sapphire Analyzer on raportointityökalu, jolla voidaan tarkastella, tulostaa ja tehdä raportteja tietokantaan tallennetuista tuloksista. Sapphire Analyzer on selainpohjainen ja sillä on mahdollisuus tarkastella tuloksia myös verkon yli millä tahansa selaimella. Halutut tuloksen on mahdollista tulostaa CSV- tai suoraan PDF-tiedostoiksi. (7Signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0, 2013.)

Sapphire Sonar on palvelimelle asennettava testausohjelmisto, jonka tarkoituksena on kuvata asiakkaan laitetta mitattavassa verkossa. Mittauksessa Sapphire Eye yhdistetään Sonar-palvelimeen laadun valvontaa varten (QoS) ja mittauksia suoritetaan sekä lataus- että lähetysuunnasta (Downlink and Uplink). Yhteen Sonar-palvelimeen voi olla yhtä aikaa yhteydessä useampia Sapphire Eye-mittausyksiköitä. (7signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0, 2013.)

Opinnäytetyön mittauksessa Sapphire Carat- ja Analyzer-ohjelmistot olivat asennettuna samalle kannettavalle tietokoneelle, jolloin saatuja mittaustuloksia oli helppo tarkastellaan samalta laitteelta. Sapphire Sonar-ohjelmisto oli asennettuna omalle kannettavalle tietokoneelle, jolloin laitteen liikuttelu ja sijoittelu oli helpompaa.

6.4 Suorituskykymittarit

7signal hyödyntää mitattavan verkon laadun valvontaan ja tulkitsemiseen erinäisiä suorituskykymittareita (Key Performance Indicator, KPI). Valittavana on yli 200 erilaisista suorituskykymittaria riippuen mitattavasta verkosta ja sen palveluista. (Tiitinen 2010.)

Alla on listattuna yleisimpiä ja tässä työssä eniten käytettyjä suorituskykymittareita sekä avattu hieman niiden toimintaa.

- Availability (AV) eli saatavuus mittarit kertovat verkon saatavuudesta ja esimerkiksi beacon-sanomien saatavuudesta verkossa.
- Accessibility (AC, RE) eli käytettävyys mittarit kertovat verkkoon liittymiseen kuluvan ajan ja yritysten onnistumisprosentin. Esimerkiksi IP-osoitteen hakemiseen kuluvan ajan verkossa.
- Data Quality (QUAP, QUIP, QURS, QURT) eli tiedon laatua osoittavat mittarit kertovat siirrettävän liikenteen laadusta verkossa. Esimerkiksi tiedonsiirtonopeudesta, jitteristä VoIP:ssa, pakettihävikistä VoIP:ssa ja ping -testien onnistumisesta verkossa.
- Clients (CL, QURS, TR) eli päätelaitteiden toimintaa mittaavat mittarit kertovat niiden kokemista signaalitasoista ja datan lähetysmääristä verkossa.

Käytettyjen mittarien avulla saadaan tietoa verkon eri osa-alueista ja pystytään paikallistamaan mahdollisia ongelmakohtia. Tehtyjä mittauksia voidaan tarkastella 7signal Analyzerin kautta ja tulostaa erilaisiksi raporteiksi, kuten esimerkiksi PDF-tiedostoksi.

6.5 Mittausten sisältö ja parametrit

Mittauksissa Sapphire Eye-mittausyksikkö suorittaa valitut mittaukset jokaiselle monitoroitavalle tukiasemalle vuoron perään. Mitattuaan kaikki tukiasemat, mittausyksikkö aloittaa mittaukset ja tätä prosessia jatketaan, kunnes mittaus keskeytetään manuaalisesti ohjelmiston puolelta. Liitteen 1 vuokaavio esittää mittausyksikön tukiasemille tekemät mittaukset.

Dynamon Auditorion ja Rajakadun hallintosiiven mittauksissa käytetty mittausprofiili koostui alla olevan mukaisista mittauksista ja mittaus parametreista. Näin saadut tulokset ovat myös vertailukelpoisia keskenään.

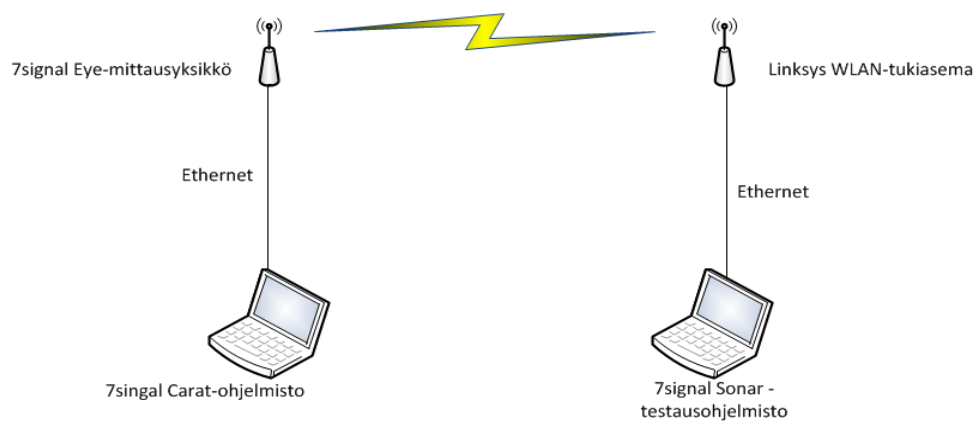
TAULUKKO 2. Käytetyt mittaukset ja mittausten parametrit

| Mittaus | Mittaus tyyppi | Mittaus parametri |
|----------------------|----------------|-------------------|
| Ping | Aktiivi testi | 32 B x 10 |
| FTP Download | Aktiivi testi | 2 MB x 2 |
| FTP Upload | Aktiivi testi | 2 MB x 2 |
| Managed AP scan | Passiivi testi | 350 ms per kanava |
| Access Point Traffic | Passiivi testi | 90000 ms |
| Noise Monitor | Passiivi testi | 350 ms per kanava |
| VoIP MOS (downlink) | Aktiivi testi | VoIP parametrit |
| VoIP MOS (uplink) | Aktiivi testi | VoIP parametrit |

7 VALMISTELUT JA MITTAUSKSET

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista, 7signal-laitteisto päivitettiin viimeisimpään ohjelmistoversioonsa. Samalla tutustuttiin laitteen ohjelmallisiin ominaisuuksiin, jotta pystyttiin suunnittelemaan tulevat mittaukset.

Haasteellisen päivitysprosessin ja yhden 7signal Eye-mittausyksikön laitevaihdon jälkeen, päästiin suorittamaan ensimmäiset testimittaukset erikseen luodussa testiverkossa. Testiverkko koostui Linksys WRT54G 802.11b/g -tekniikoita tukevasta tukiasemasta ja päivitetystä 7signal mittauslaitteistosta (Ks. kuvio 10). Ensimmäisten testimittausten tarkoituksena oli varmistaa päivitysten ja laitteiston toimivuus, sekä antaa osviittaa mittauslaitteistossa käytettäville konfiguraatiolle. Varsinaisia tuloksia testimittauksesta ei saatu.



KUVIO 10. Testimittausympäristö.

7.1 Dynamon Auditorio

Mittaus aloitettiin torstaina maaliskuun 21. päivä klo 10:20 ja päätettiin viikon kuluttua torstaina maaliskuun 28. päivä klo 10:20.

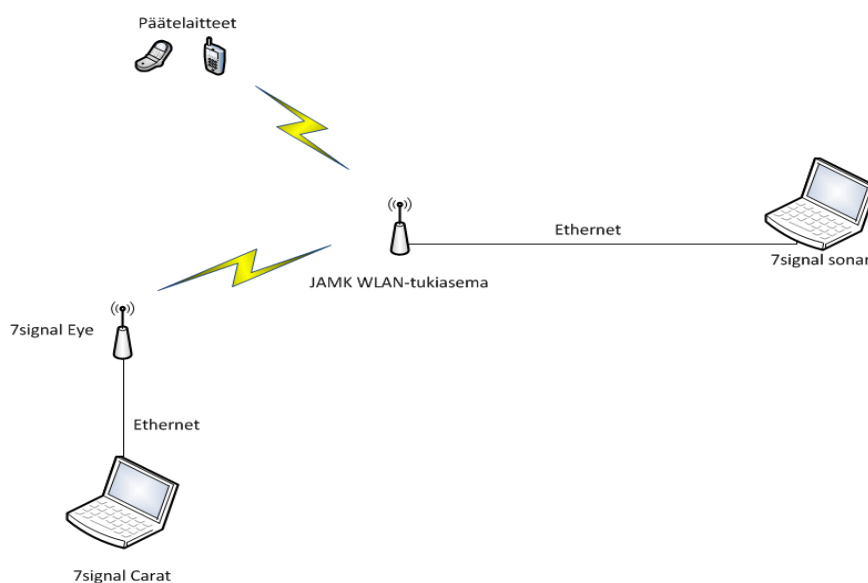
Mittausajanjaksolle sijoittui myös viikonloppu, joka voi näkyä mittaustuloksissa esimerkiksi alhaisempana langattoman verkon käyttöasteena. Viikonloppu sijoittuu aikavälille 23.3 - 24.3.

Testimittauksen jälkeen suoritettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun Dynamon auditoriossa tuotantoverkkoon kuuluvalla tukiasemalle palvelulaatumittaus. Mittausajan kohdaksi valittiin aika, jolloin Dynamon auditorio oli pääsääntöisesti käytössä ja silmämääräisesti tarkasteltaessa verkolla näytti olevan käyttäjiä. Mittaukset suoritettiin suuressa auditoriotilassa, jonka yhteydessä on erillinen AV-huone. Mitattava tukiasema oli sijoitettuna aivan auditorio tilan takaosaan.

Mittauslaitteistosta 7signal Carat ja Eye sijaitsivat Dynamon auditoriossa lukitussa AV-tilassa. 7signal Sonar-palvelin sijaitsi erillisessä lukitussa tilassa Dynamolla ja oli sieltä liitettynä tuotantoverkkoon.

Mittauksessa 7signal Eye-mittausyksikön tarkoituksena on toimia tavallisena verkon päätelaitteena ja tehdä aktiivimittauksia JAMK:n langattoman verkon kautta verkkoon liitetylle 7signal Sonar-palvelimelle (Ks. kuvio 11). Käytetty 7signal Eye-mittausyksikkö oli vanhempaa versiota ja tuki vain 802.11a/b/g-tekniikoita.

Ennen varsinaista mittausta, ohjelmistoon määritettiin käytettävät asetukset, kuten mittausprofiili, kirjautumisasetukset ja luotiin mittauksen organisaatorakenne. Ohjelmiston konfiguroinnin jälkeen suoritettiin tukiasemaskannaus ja liitettiin mitattava tukiasema ohjelmistoon. Liitetylle tukiasemalle suoritettiin manuaalisia yhteystestejä, jotta pystyttiin varmistamaan laitteiden välisestä yhteydestä. Kun kaikki mittauksiin liittyvät valmistelut oli tehty ja varmistettu toimivuus, pystyttiin aloittamaan varsinainen laadun valvontamittaus.



KUVIO 11. Dynamon auditorion mittausympäristö

7.2 Rajakadun hallintosiipi

7.2.1 Rajakadun hallintosiiven verkon rakenne

Jyväskylän ammattikorkeakoulun Rajakadun hallintosiivessä on käytössä 802.11a/b/g/n -tekniikoita tukevia tukiasemia, joista mittalaitteiston puutteista johtuen pystyttiin mittaamaan vain 802.11a/b/g-tekniikkaa tukevia tukiasemia. Mittaukset suoritettiin hallintosiiven toisessa ja kolmannessa kerroksessa, joista molemmat ovat hyvin suuria avokonttori- ja työhuonemallisia toimistotiloja. Molempiin kerroksiin oli mittauksen ajaksi sijoitettu oma 7signal Eye-mittausyksikkö. Liitteestä 2 nähdään Rajakadun hallintosiiven toisen ja liitteestä 3 kolmannen kerroksen pohjapiirustukset ja niihin merkityt 7signal Eye-mittausyksiköiden paikat.

Toisessa kerroksessa oli käytössä kuusi kappaletta tukiasemia, joista kolme toimi 802.11 a/b/g-tekniikoita hyödyntäen. Näistä kolmesta tukiasemista kaksi saatiin toimimaan 7signal Eye-mittausyksikön kanssa.

Kolmannessa kerroksessa oli käytössä neljä kappaletta tukiasemia, joista kaksi toimi 802.11a/b/g-tekniikoita hyödyntäen. Näistä molemmat tukiasemat saatiin toimimaan 7signal Eye-mittausyksikön kanssa.

7.2.2 Verkon laadunvalvonta mittaus

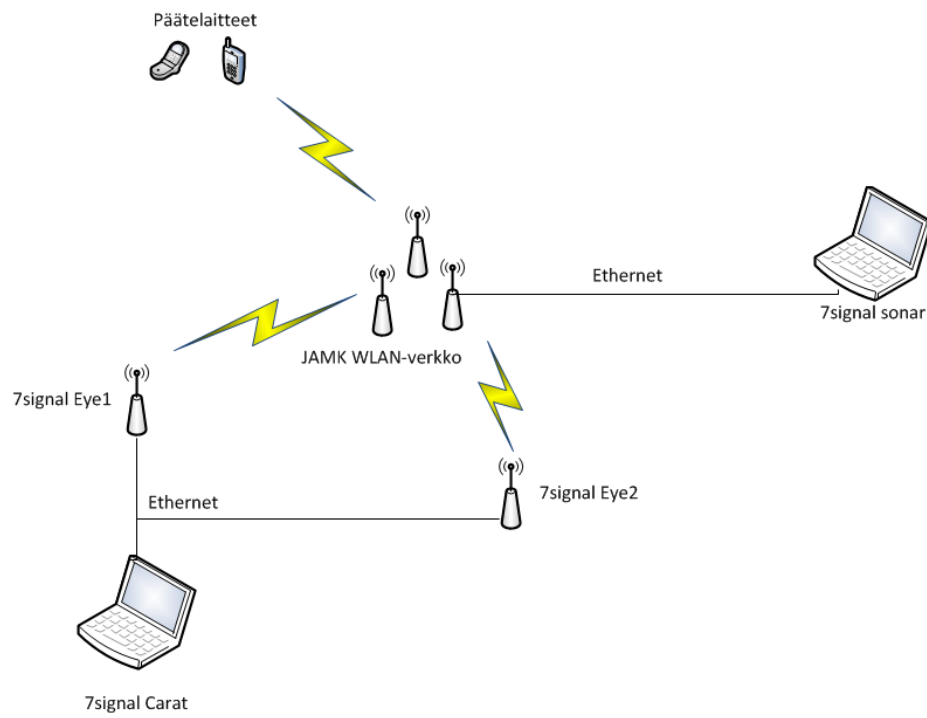
Mittaukset aloitettiin keskiviikkona huhtikuun 10. päivä klo 12:30 ja päätettiin kahden viikon kuluttua keskiviikkona huhtikuun 24. päivä klo 12:30.

Mittausajanjaksolle sijoittui kaksi viikonloppua, jotka saattavat vaikuttaa mittaustuloksiin esimerkiksi vähentyneen käytön osalta. Viikonloput sijoituivat aikaväleille 13.4 - 14.4 ja 20.4 - 21.4.

Mittausvalmistelut aloitettiin valitsemalla paikat 7signal Eye1- ja Eye2-mittausyksiköille toisessa ja kolmannessa kerroksessa ja konfiguroimalla laitteisto. Mittausyksiköille oli etukäteen valittuna pohjapiirustuksen perusteella paikat, joihin ne sijoitettaisiin mittauksissa. Paikat oli valittu sillä perusteella, että saataisiin yhdistettyä mahdollisimman monta tukiasemaa mittausyksikköön per kerros. Kuuluvuusongelman vuoksi kolmannen kerroksen Eye1-mittausyksikkö jouduttiin kertaalleen siirtämään ja tekemään sille uudelleen valmistelut.

7signal Sonar-palvelin oli sijoitettuna kolmanteen kerrokseen lukittuun atk-tilaan ja 7signal Carat-ohjelmisto Dynamolle lukittuun tilaan, jossa pystyttiin käydä seuraamassa mittausta.

Mittausvalmistelujen jälkeen saatiin käyntiin itse palvelunlaatu mittaus. Mittauksessa 7signal Eye-mittausyksikkö teki aktiivitestejä JAMK:n langattoman verkon kautta tuotantoverkkoon liitetyille 7signal Sonar-palvelimelle (Ks. kuvio 12).



KUVIO 12. Rajakadun hallintosiiven mittausympäristö

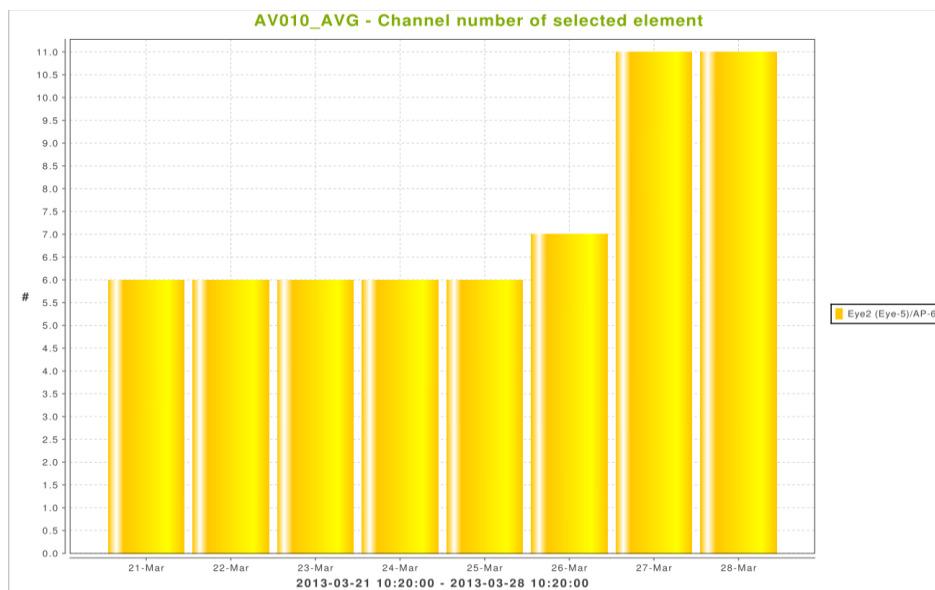
8 TULOSTEN ANALYSOINTI

8.1 Dynamon auditorio

Mittausajanjaksolta saatuja tuloksia analysoitiin aikaväliltä 21.3.2013 10:20 - 28.3.2013 10:20, eli viikon ajanjaksolta.

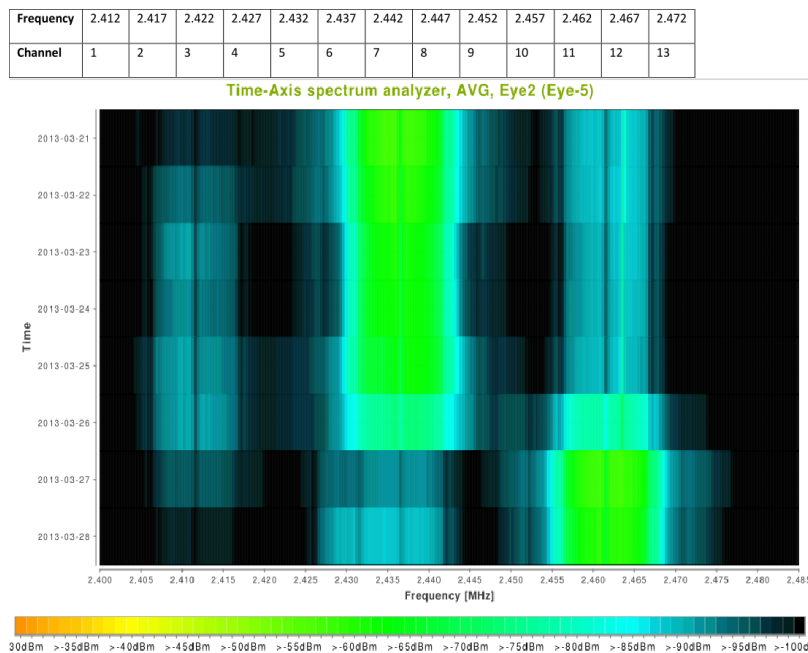
8.1.1 Kanavajako ja spektrianalyysi

Mitattujen tulosten perusteella auditorion tukiasema käytti mittausajanjaksolla kolme eri kanavaa. Kuvio 13 esittää tukiaseman käyttämät kanavat pylväsdiagrammina mitattavalla ajanjaksolla. Suurimman osan mittausajanjaksosta tukiasema AP-62 oli käyttänyt pääkanavaa 6, mutta vaihtanut jakson loppupuolella pääkanavalle 11. Kanavan vaihdos saattaa johtua kanavan 6 ruuhkautumisesta ja käyttäjämäärien lisääntymisestä. Tukiasemassa saattaa olla myös käytössä automaattinen kanavanvalitsin, joka kartoittaa taajuusalueen läpi ja valitsee vähiten käytössä olevan kanavan sillä hetkellä.



KUVIO 13. Auditorion tukiaseman käyttämät kanavat mittausajanjaksolla

Spektrianalyysi mittaus näyttää tietoa 2,4 GHz taajuusalueen käytöstä mittaushetkellä. Tarkastellessa kuviota 14 alla, huomataan vihreän palkin vaihtuneen mittauksen loppupuolella toiselle taajuudelle. Tämä kuvastaa kanavan vaihtumista kanavalta 6, kanavalle 11. Syytä kanavan vaihdolle spektrianalyysin mukaan oli signaalin heikentyminen kanavan 6 taajuudella.



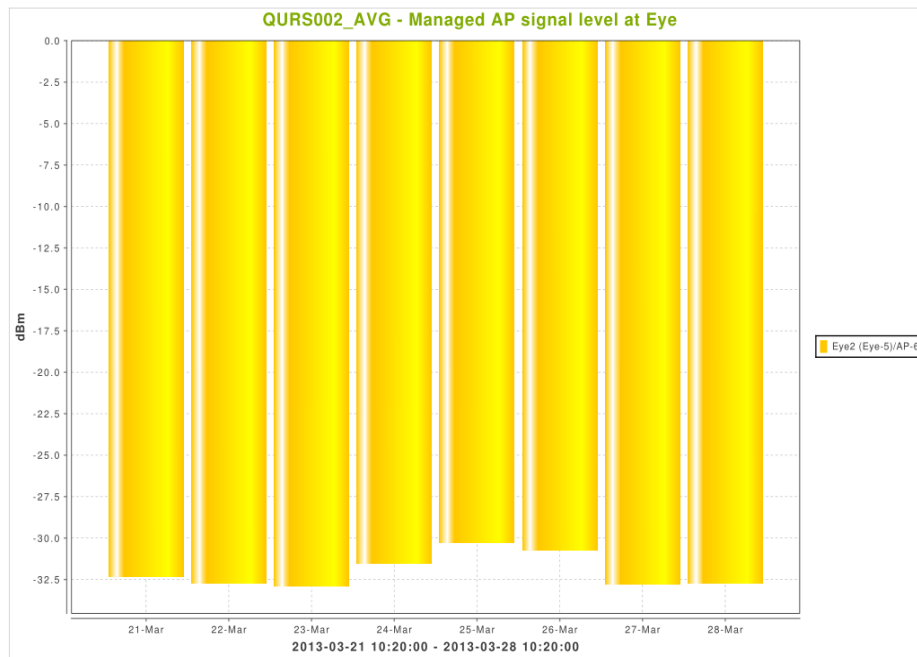
KUVIO 14. Spektrianalyysi

8.1.2 Signaalinvoimakkuudet

Mittauksissa 7signal Eye-mittausyksikkö tulisi sijoittaa paikkaan, jossa mitattavien tukiasemien keskimääräinen signaalinvoimakkuus on väliltä -30 dBm ja -65 dBm, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimman tarkkoja. Etäisyyden tukiasemiin tulisi olla alle 3 metriä. (7signal Sapphire Deployment Guide Release 4.0, s 11).

Auditorion mittauksissa 7signal Eye-mittausyksikkö pystyttiin sijoittamaan ohjeen mukaan alle kolmen metrin päähän mitattavasta tukiasemasta, mikä mahdollisti mahdollisimman tarkat tulokset. Kuviosta 15 nähdään tukiaseman lähettämät keski-

määräiset signaalin voimakkuudet 7signal Eye-mittausyksikön näkökulmasta tarkasteltuna. Kuvion mukaan signaalin voimakkuudet olivat pysyneet melko tasaisina koko mittausjakson ajan. Tästä voidaan päätellä, että 7signal Eye-mittausyksikön ja AP-62 tukiaseman yhteydessä ei ollut ongelmia.



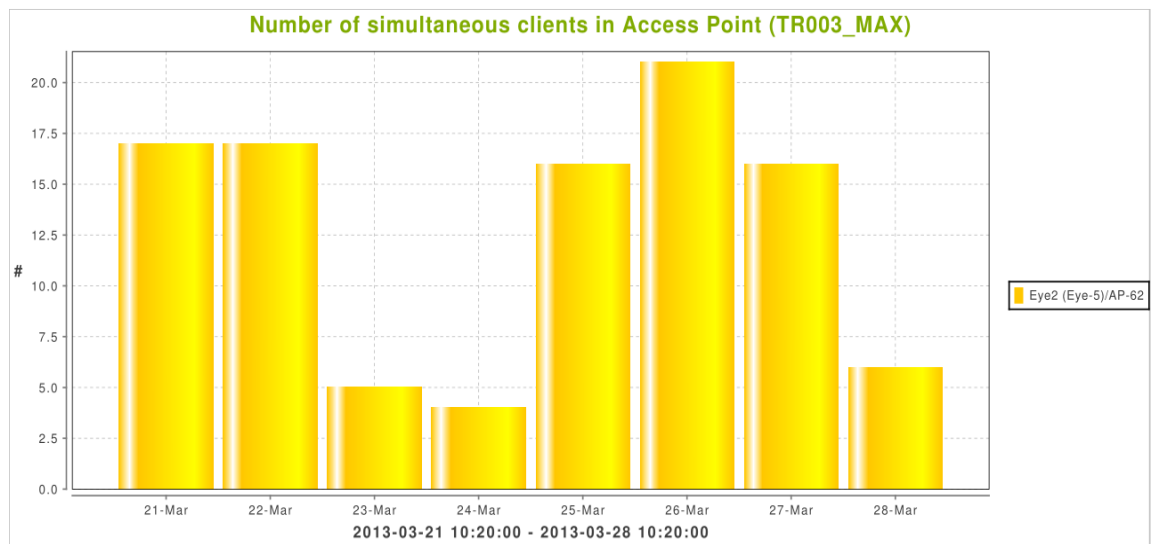
KUVIO 15. Tukiaseman signaalivoimakkuudet mittausjaksolla

8.1.3 Käyttäjämäärät tukiasemassa

Käyttäjämäärät tukiasemassa ilmoittaa enimmäismäärä tukiasemaan samanaikaisesti kytkettyneistä päätelaitteista tarkasteltavalla jaksolla. Päätelaitteiden määrä jonka yksittäinen tukiasema pystyy hoitamaan, riippuu välitettävästä liikenteestä ja sen määrästä, sekä käytettävästä standardista. Lisäksi itse tukiaseman tuki ja sen konfiguraatiot vaikuttavat määrään. Esimerkiksi 802.11a/g-standardia käyttävässä verkossa maksimi yhtäaikainen päätelaitteiden määrä on noin 10 - 15 kappaletta, joka samalla takaa riittävän laadun ja pienen viiveen verkkoliikenteelle. (7signal Sapphire Analyzer.)

Käyttäjämääristä nähdään onko kyseinen tukiasema ruuhkainen ja ylikuormittunut. Ruuhkainen tukiaseman voi joutua lähettämään paketteja uudelleen, joka hidastaa verkon toimintaa. Pahimmassa tapauksessa tukiasema tiputtaa osan paketeista pois kokonaan, jolloin päätelaitteet eivät saa yhteyttä verkkoon.

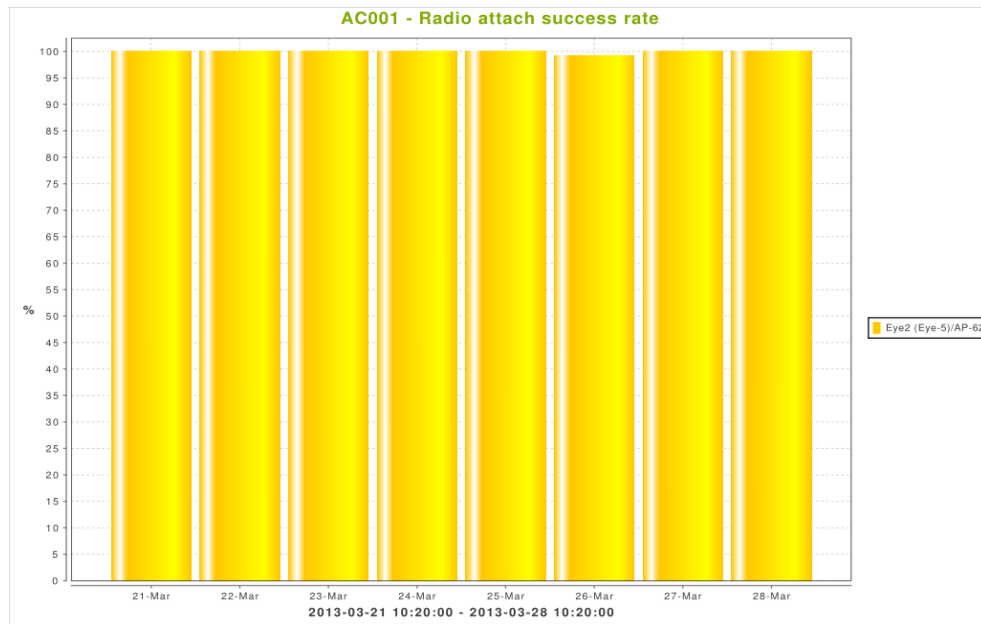
Kuviosta 16 nähdään Dynamon auditorion käyttäjämäärät mittausjaksolla. Kuviosta nähdään, että tukiasemalla oli ollut eniten käyttäjiä mittauksen alku päässä, eli 21.3 - 22.3 välisenä aikana ja varsinainen piikki käyttäjämäärissä oli ollut 26.3. Kuviosta voi myös hyvin todeta, että viikonloppu sijoittui päiville 23.3. ja 24.3.



KUVIO 16. Käyttäjämäärät tukiasemassa mittausjaksolla

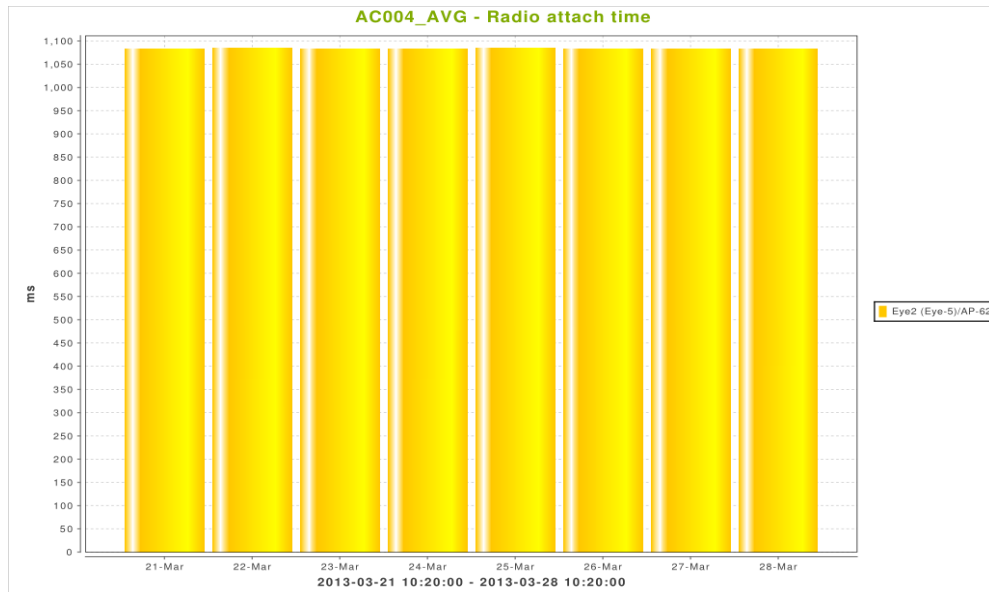
8.1.4 Verkon käytettävyys ja saatavuus

Verkon käytettävyys ja saatavuus kuvastavat päätelaitteille näkyvää palvelunlaatua. Radio attach success rate kertoo tukiasemaan liittymisten ja todentamisten onnistumisista prosentteina. Kuviosta 17 voidaan todeta, että mittausajanjakson aikana 7signal Eye-mittausyksikön tekemät yhteyden muodostamistestit tukiasemaan olivat onnistuneet keskimääräisesti yli 95 prosenttisesti. Tämän perusteella todella harva yhteyden muodostamisyritys oli epäonnistunut.



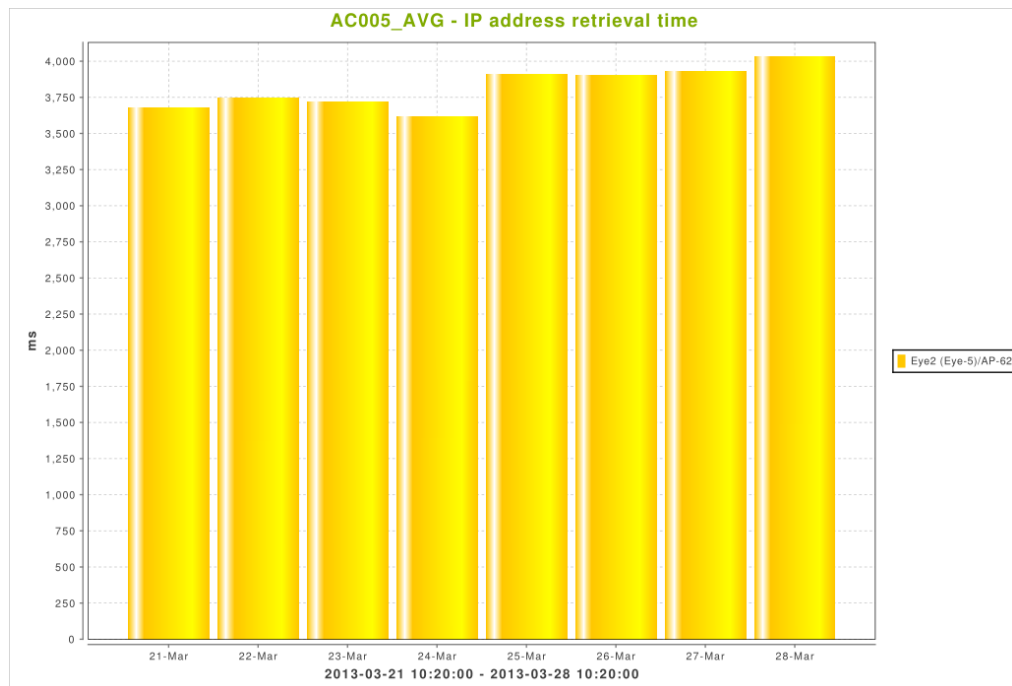
KUVIO 17. Tukiasemaan liittymisten ja todentamisten onnistuminen prosentteina

Radio attach time kertoo 7signal Eye-mittausyksikön radio yhteyden muodostamises-
ta kuluvan ajan siihen, kun yhteys on muodostettu tukiasemaan. Kuvio 18 esittää
mittaustulosta, jonka mukaan yhteyden muodostamisessa oli kulunut hieman yli se-
kunti mitattavalla ajanjaksolla. Yhteyden muodostaminen on siis toiminut erinomai-
sesti tukiaseman ja 7signal Eye-mittausyksikön välillä.

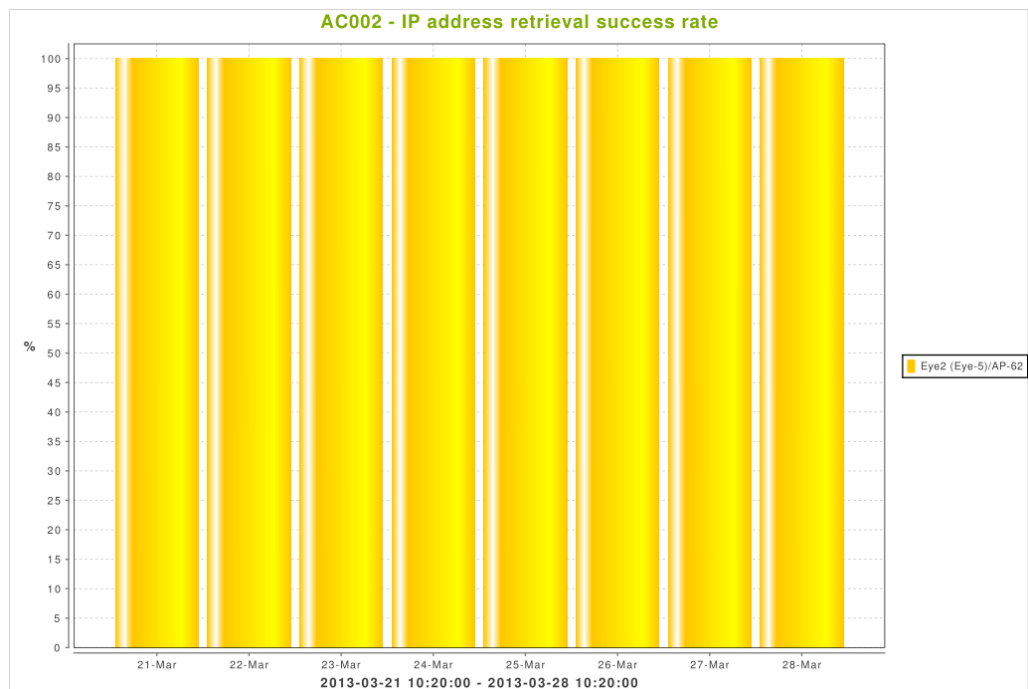


KUVIO 18. Tukiasemaan radioyhteyden muodostamiseen kulunut keskimääräinen aika

IP address retrieval time kertoo ajan, joka kului 7signal Eye-mittausyksiköltä pyytää ja saada IP-osoite tukiasemalta. Kuten kuviosta 19 voidaan todeta, mittausajanjaksolla IP-osoitteen saamiseen oli kulunut keskimäärin hieman yli kolme sekuntia. Lisäksi tarkasteltaessa kuviota 20 huomataan, että mittausajanjakson aikana IP address retrieval success rete eli IP-osoitteen noutaminen oli onnistunut jokaisella kerralla.



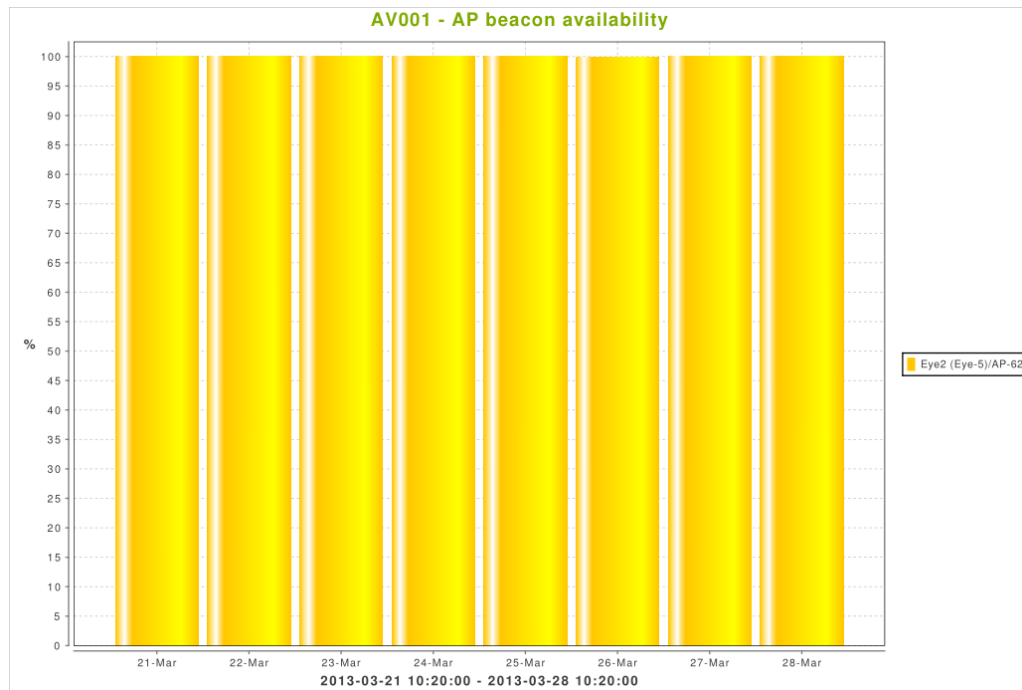
KUVIO 19. IP-osoitteen noutamiseen kulunut keskimääräinen aika



KUVIO 20. IP-osoitteen noutamisen onnistumisprosentti

8.1.5 Beacon saatavuus

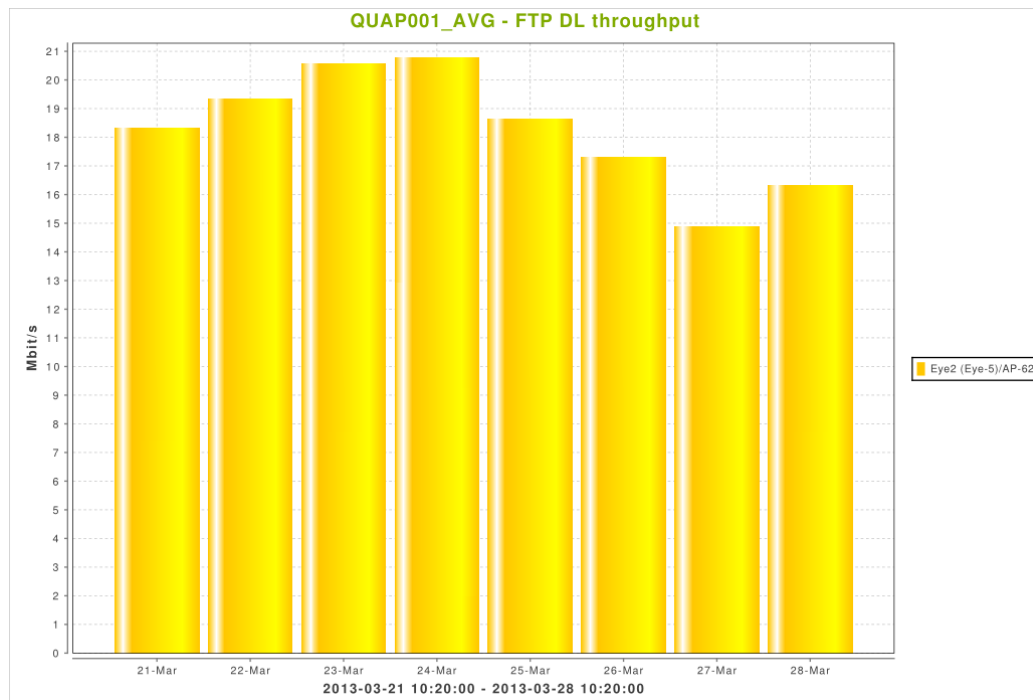
AP Beacon availability esittää onko tukiasema ollut aktiivinen ja saavutettavissa mitausjaksolla (7signal Sapphire Analyzer User Guide Release 4.0, 39). Kuvio 21 esittää tukiaseman beacon-sanomien saatavuudesta verkossa. Mittausjaksolla 7signal Eye-mittausyksikkö mittasi tukiaseman lähettämien beacon-sanomien saatavuutta, joka oli koko mittausjakson ajan lähes 100 prosenttia. Tämä tarkoittaa että 7signal Eye-mittausyksikkö sai beacon-sanomien mukana aina ajantasaisen tiedon verkosta ja sen ominaisuuksista.



KUVIO 21. Tukiaseman beacon saatavuus mittausjaksolla

8.1.6 Tiedonsiirtonopeudet

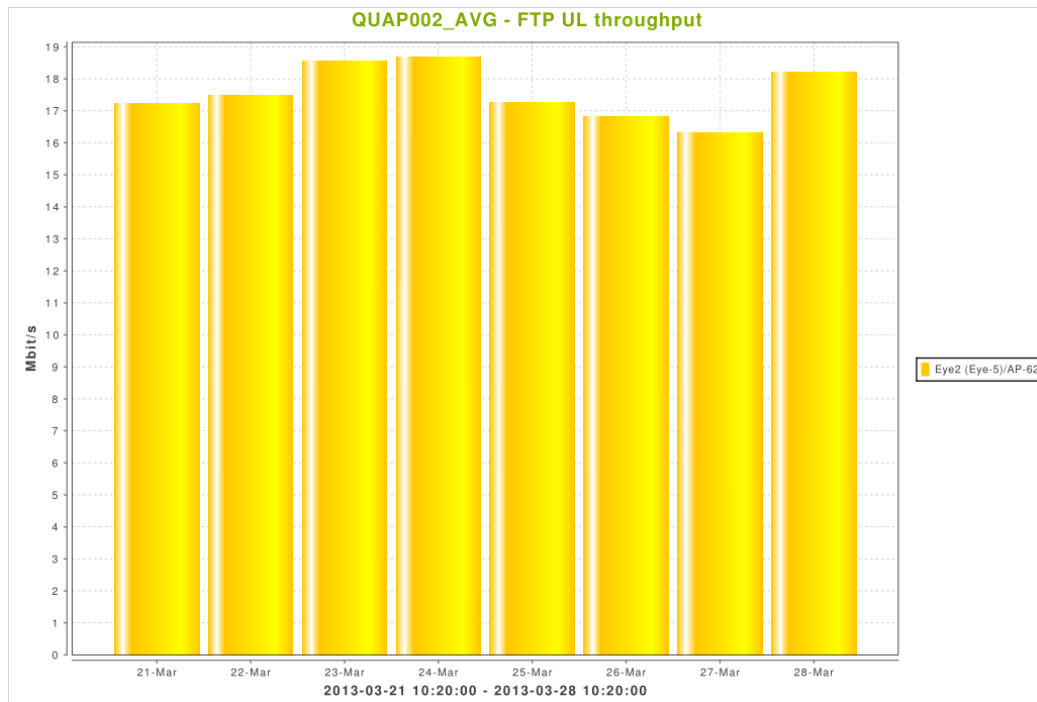
7signal Eye-mittausyksikkö mittasi tiedonsiirtonopeuksia tukiaseman kautta 7signal Sonar-palvelimelle, käyttäen FTP-protokollaa. FTP DL throughput-testi mittasi latausnopeutta mitattavassa verkossa. Kuvio 22 voidaan tarkastella mittausjaksolla saatuja keskimääräisiä latausnopeuksia.



KUVIO 22. Keskimääräiset latausnopeudet mittausajanjaksolla

Kuviosta voidaan päätellä, että 27.3 tukiasemalla oli ollut enemmän käyttäjiä ja verkolla kuormitusta kuin esimerkiksi 23.3. - 24.3. välisenä viikonloppuna. Suurimmillaan latausnopeus oli ollut keskimäärin vajaa 21 Mbit/s ja pienimmillään vajaa 15 Mbit/s.

FTP UL throughput-testi mittasi lähetysnopeutta tukiaseman kautta. Kuviosta 23 nähdään keskimääräiset lähetysnopeudet mittausajanjaksolla. Lähetysnopeuksissa ei näkynyt aivan yhtä suuria vaihteluita kuin latausnopeuksissa, mutta niistä pystytään tekemään samat johtopäätökset. Lähetysnopeus oli pienimmillään myös 27. päivänä ja suurimmillaan 24. päivänä.

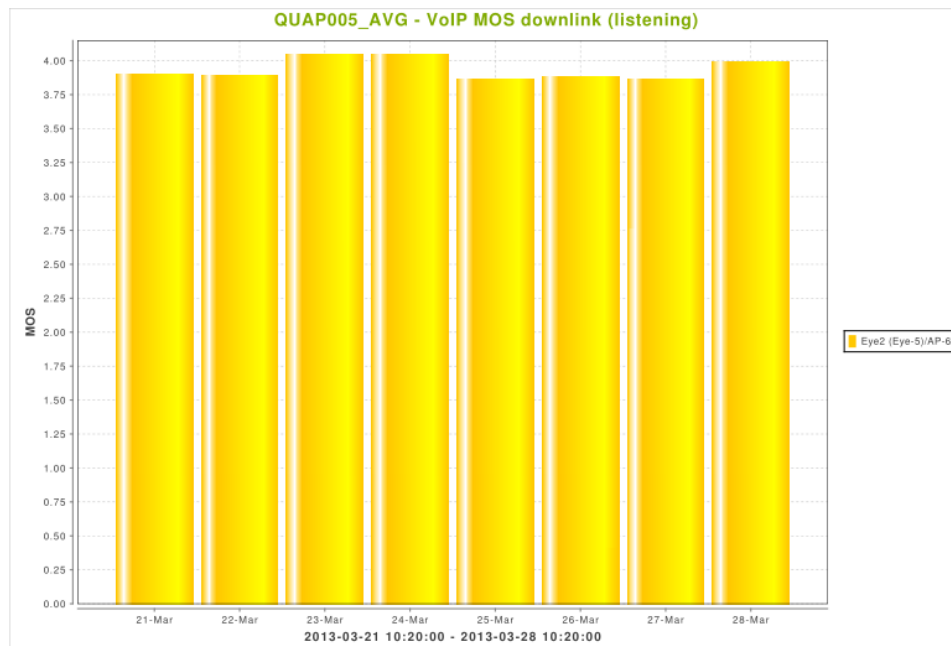


KUVIO 23. Keskimääräiset lähetysnopeudet mittausajanjaksolla

8.1.7 VoIP

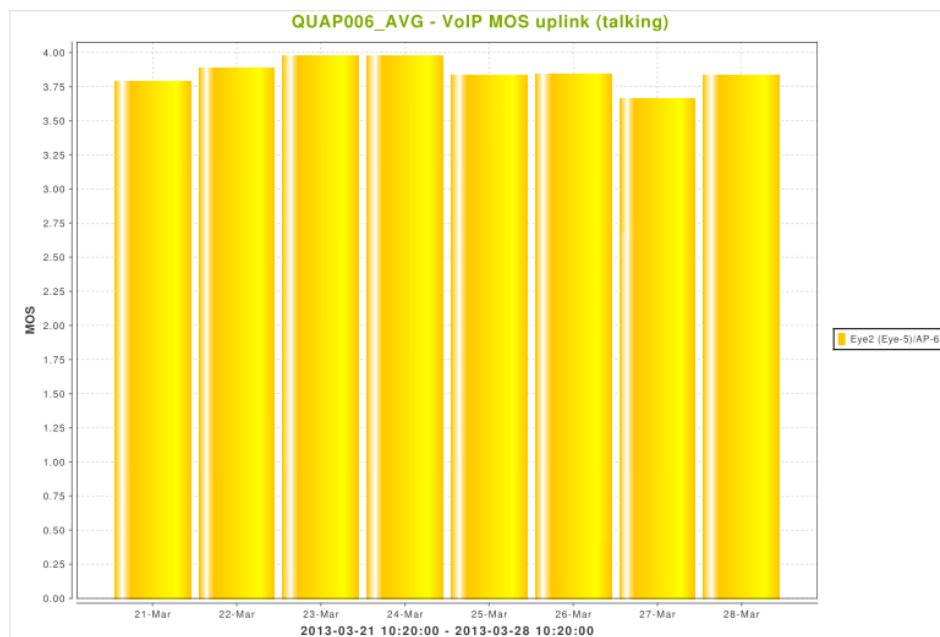
VoIP-testit mittaavat reaaliaikaisen äänen siirtämistä verkossa. 7signal Eye-mittausyksikkö muodostaa VoIP-testissä yhteyden 7signal Sonar-palvelimeen tukiaseman kautta ja mittaa puheen ja kuuluvuuden laatua. MOS eli Mean Opinion Score luokittelee mitatun yhteyden laadun asteikolla 1-5, jossa 1 on huonoin ja 5 paras arvo. (7signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0, 83-85)

Kuvio 24 esittää testin keskimääräiset MOS-arvot kuuluvuuden osalta. Testissä MOS-arvo oli yli 3.75 koko mittausjaksolla.



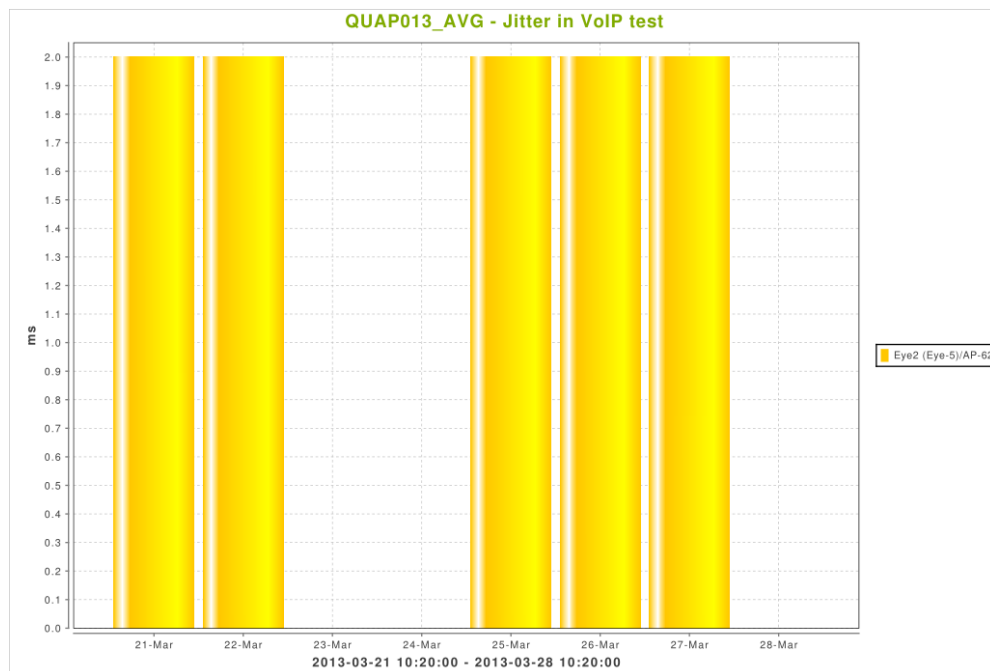
KUVIO 24. Kuuluvuuden keskimääräiset MOS-arvot mittausjaksolla

Kuviosta 25 voidaan huomata, että puheen osalta mitatut MOS-arvot olivat hieman heikommät kuin kuuluvuudessa. Siitä huolimatta MOS-arvo pysyi mittausjaksolla yli 3.5.



KUVIO 25. Puheen keskimääräiset MOS-arvot mittausjaksolla

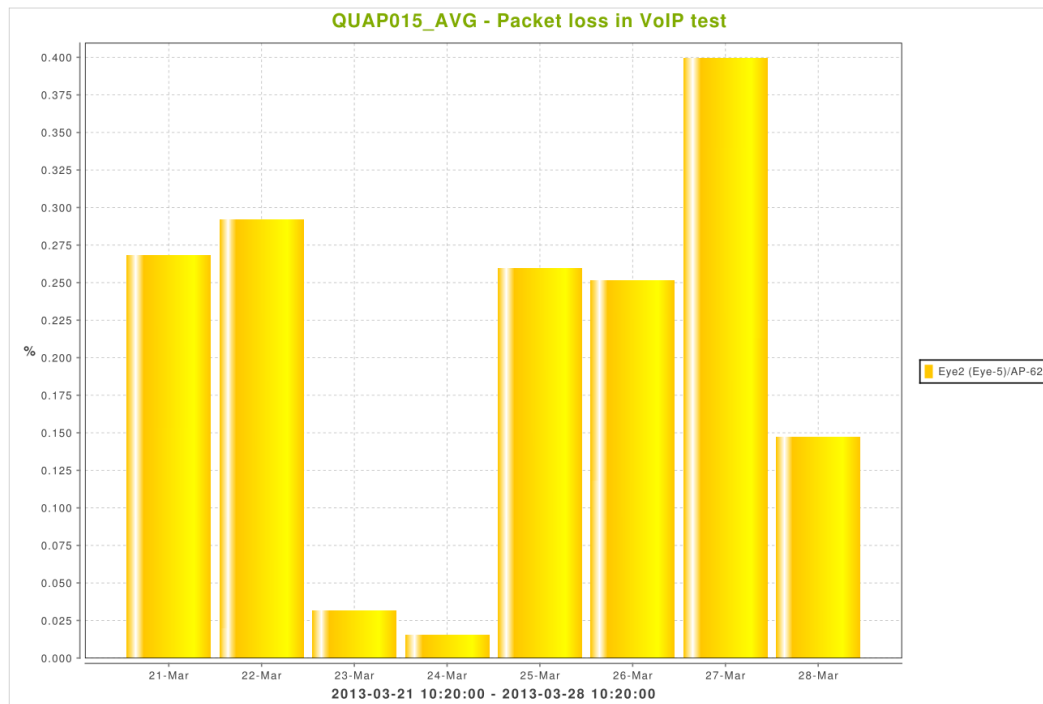
MOS-arvojen lisäksi 7signal Eye-mittausyksikkö mittasi keskimääräistä viiveen vaihtelua ja paketti hävikkiä VoIP-testeissä. Kuvio 26 esittää viiveen vaihtelua mittausjaksolla. Kuvion mukaan viiveen vaihtelu oli korkeimmillaan 2 millisekunnin luokkaa ja osaksi sitä ei esiintynyt mittauksissa ollenkaan.



KUVIO 26. Keskimääräinen viiveen vaihtelu mittausjaksolla

Kuvio 27 esittää keskimääräisen prosentuaalisen paketti hävikin määrän mittausjaksolla, joka oli alle 0,5 prosentin luokkaa eli käytännössä paketti hävikkiä ei esiintynyt.

Testit osoittavat, että mittauksen aikana sekä puhe että kuuluvuus olivat hyvällä tasolla. Tulosten perusteella yhteyden pitäisi riittää hyvin VoIP-puheluihin, eikä niissä pitäisi esiintyä suuria viiveitä tai paketti hävikkiä.



KUVIO 27. Keskimääräinen paketti hävikki mittausjaksolla

8.2 Rajakadun hallintosiipi

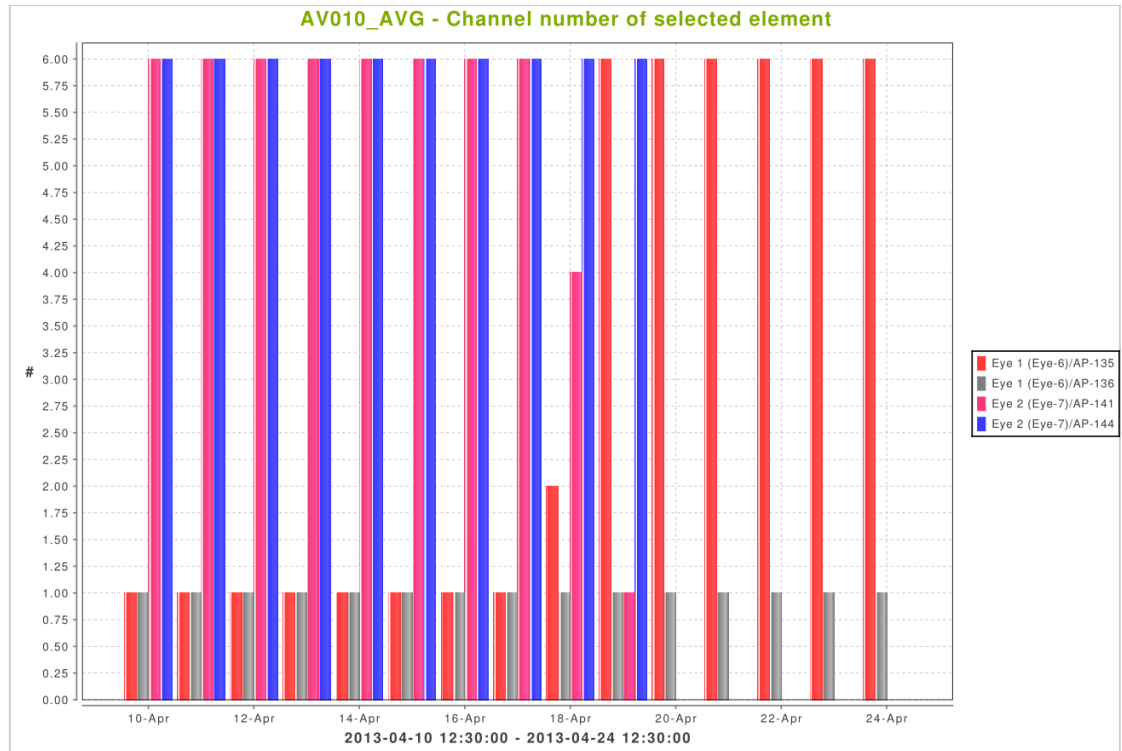
Mittausajanjaksolta saatuja tuloksia analysoitiin aikaväliltä 10.4.2013 12:30 - 24.4.2013 12:30, eli kahden viikon ajanjaksolta.

8.2.1 Kanavajako

Rajakadun hallintosiiven mittauksissa tukiasemat käyttivät pääsääntöisesti pääkanavia 1 ja 6. Kuviosta 28 nähdään, että kolmannessa kerroksessa sijainneet tukiasemat AP-135 ja AP-136 käyttivät 7signal Eye1-mittausyksikön tekemien mittauksen alussa molemmat kanavaa 1. Noin puolessa välissä mittausjaksoa AP-135 siirtyi käyttämään kanavaa 6.

Toisessa kerroksessa sijaitsevat tukiasemat AP-141 ja AP-144 käyttivät 7signal Eye2-mittausyksikön tekemien mittauksien alkuvaiheessa molemmat kanavaa 6. Kuviosta 28 nähdään myös, että noin puolessa välissä mittauksia AP-141 vaihtoi käyttämään kanavaa 1, jonka jälkeen 7signal Eye2-mittausyksikkö ei saanut enää tietoa sen tu-

kiasemien käyttämistä kanavista. 7signal Eye2-mittausyksikkö sai kerättyä tietoa 10 päivän ajalta AP-141 ja AP-144 tukiasemien käyttämistä kanavista.



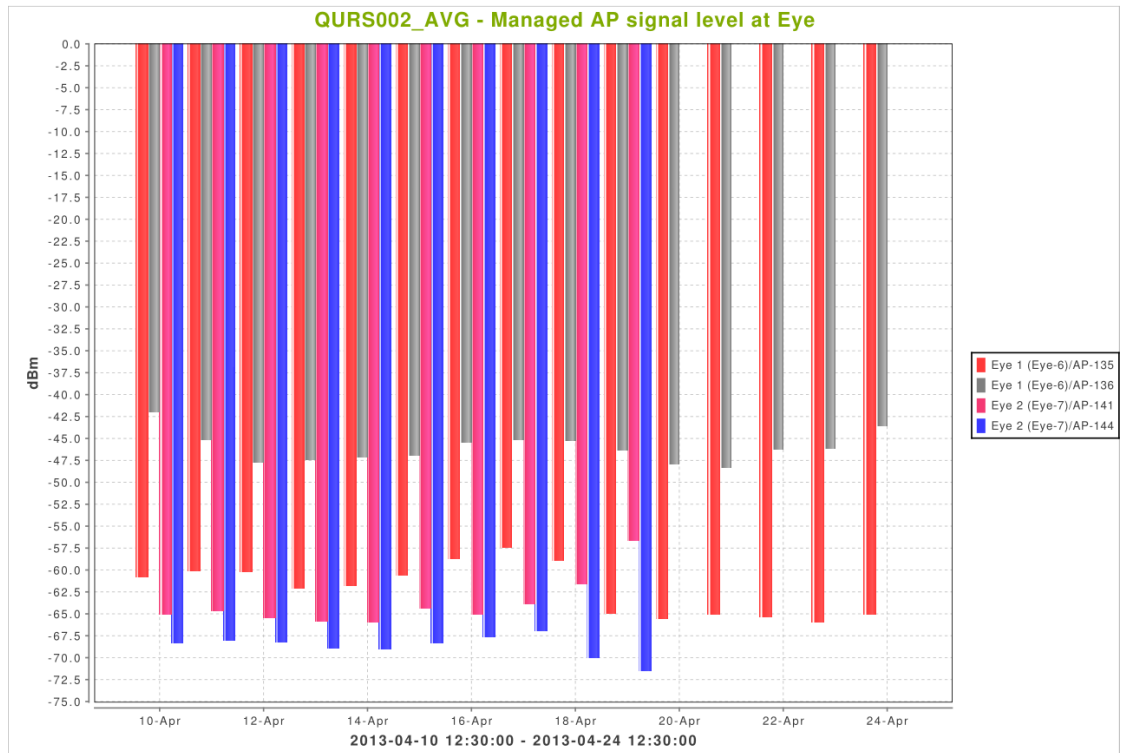
KUVIO 28. Rajakadun tukiasemien kanavajako

Sytä 7signal Eye2-mittausyksikön ja tukiasemien välisen yhteyden häviämislle saattoi olla monia, esimerkiksi huono kuuluvuus, ruuhkainen verkko tai mahdollinen laiterikko. Muita mittaustuloksia arvioimalla voidaan saada tarkempaa selvyyttä siitä, miksi Eye2 ja tukiaseman välinen yhteys oli katkennut.

8.2.2 Signaalivoimakkuudet

Tukiasemien signaalin voimakkuuksista voidaan tehdä samat johtopäätökset kuin edellä mainitun kanavan jaon perusteella. Kuviossa 29 nähdään, että 7signal Eye2-mittausyksikkö kadotti yhteyden tukiasemiin AP-141 ja AP-144 noin kymmenen päivän mittauksien jälkeen. Ennen yhteyden katkeamista tukiasemien signaalin voimakkuudet 7signal Eye2-mittausyksikön näkökulmasta tarkasteltuna olivat kohtalaiset.

Tarkasteltaessa 7signal Eye1-mittausyksikön tukiasemia kuviosta 29, voidaan huomata että signaalin voimakkuudet olivat hyvät ja pysyvät pääsääntöisesti annettujen raja-arvojen -30 dBm ja -65 dBm sisäpuolella.

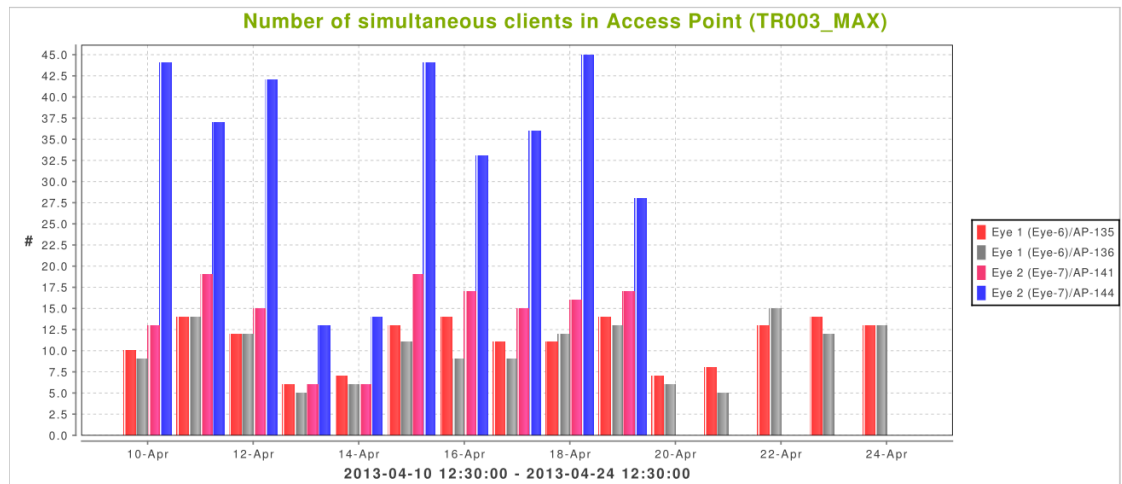


KUVIO 29. Tukiasemien keskimääräiset signaalin voimakkuudet 7signal Eye1- ja Eye2-mittausyksikön näkökulmista tarkasteltuna

8.2.3 Käyttäjämäärät tukiasemissa

Toisessa kerroksessa sijaitsevan tukiaseman AP-144 mitatut käyttäjämäärät olivat reilusti korkeammat kuin samassa kerroksessa sijaitsevalla AP-141 tukiasemalla. Korkeat käyttäjämäärät saattoivat aiheuttaa ongelmia verkon palvelun laadulle.

Kolmannessa kerroksessa sijaitsevien tukiasemien pienet käyttäjämäärät, eivät aiheuttaneet ongelmia verkon palvelun laadulle. Kuviosta 30 voidaan tarkastella tukiasemien käyttäjämääriä mittausjaksolla. Erityistä huomiota kuitenkin herätti mittausten katkeaminen 20. päivän kohdalla toisen kerroksen tukiasemien osalta.



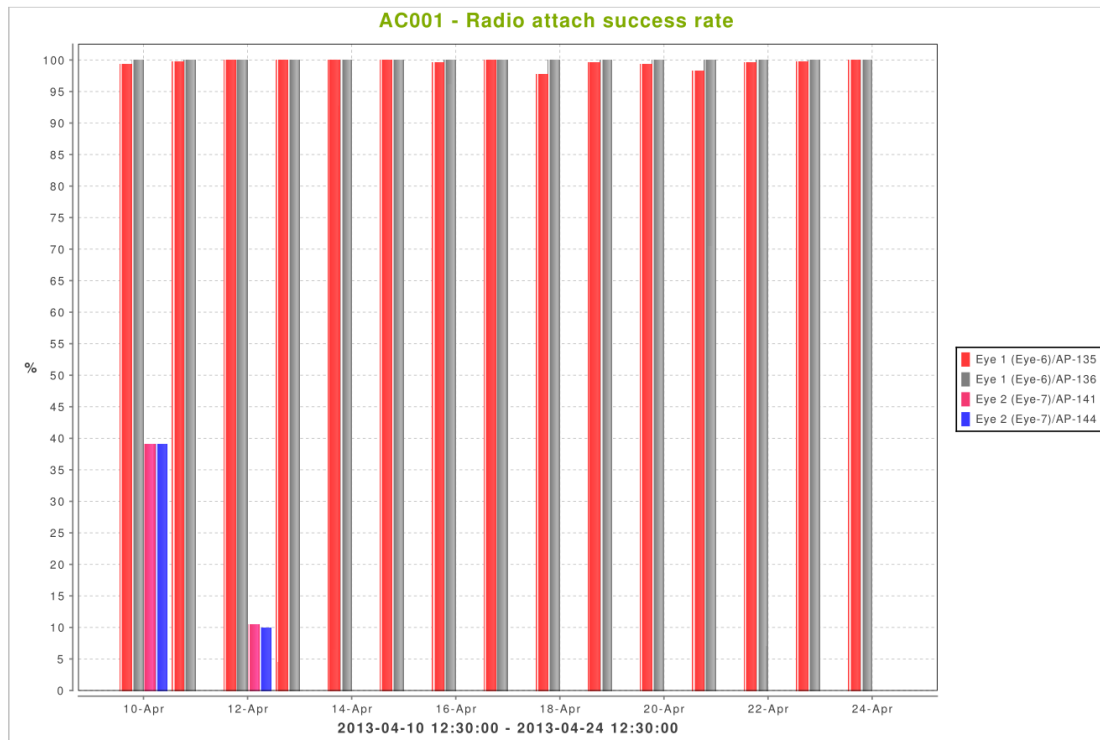
KUVIO 30. Tukiasemien käyttäjämäärät mittausjaksolla

8.2.4 Verkon käytettävyys ja saatavuus

7signal Eye1-mittausyksikön osalta tukiasemille liittymisessä ei ollut ongelmia. Kuvio 31 nähdään, että AP-135 ja AP-136 tukiasemille liittyminen oli onnistunut mittausjakson aikana yli 97 prosenttisesti.

7signal Eye2-mittausyksiköllä oli ongelmia tukiasemille liittymisen kanssa. Ensimmäisenä päivänä liittyminen oli 40 prosentin luokkaa, jonka jälkeen laski parin päivän aikana käytännössä nolnaan prosenttiin. Mittausjakson loppuajana 7signal Eye2-mittausyksikkö ei ollut saanut tukiasemalle liittymisiä onnistumaan yhtään kertaa (Ks. kuvio 31).

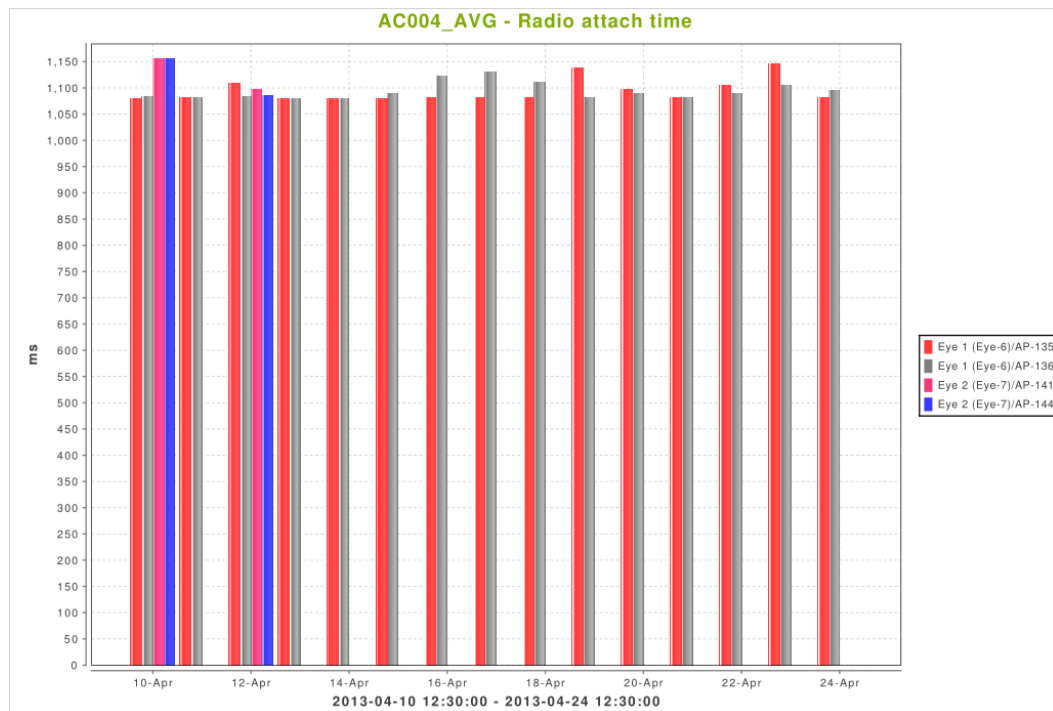
Syy liittymisongelmiin voi liittyä esimerkiksi korkeisiin käyttäjämääriin ainakin AP-144 osalta.



KUVIO 31. Mittausjaksolla onnistuneet tukiasemalle onnistuneet liittymiset

Huolimatta huonosta tukiasemalle liittymisprosentista, 7signal Eye2-mittausyksikön keskimääräinen tukiasemalle liittymiseen kulunut aika oli vain hieman yli sekunnin. Kuvio 32 kertoo myös, että kahtena ensimmäisenä päivänä liittyminen oli onnistunut normaalisti, jonka jälkeen tukiasemiin ei saatu enää yhteyttä.

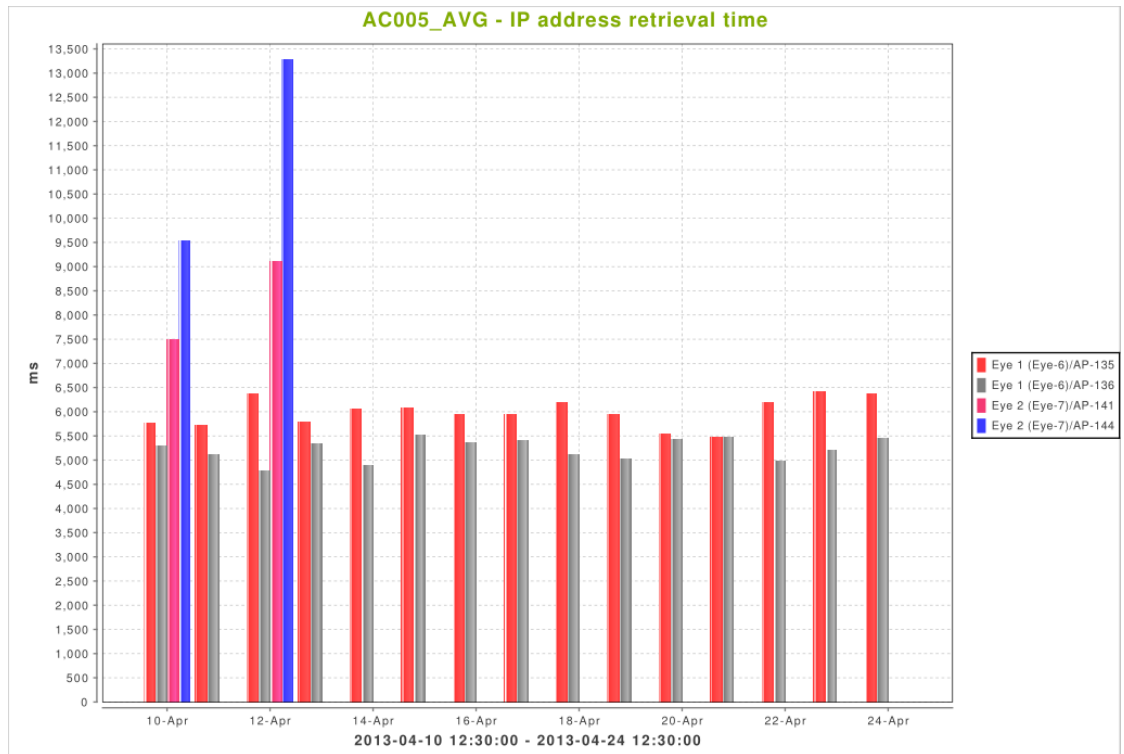
7signal Eye1-mittausyksikön osalta keskimääräinen liittymiseen kulunut aika oli molempien tukiasemien osalta noin yhden sekunnin luokkaa koko mittausjakson ajan (Ks. kuvio 32).



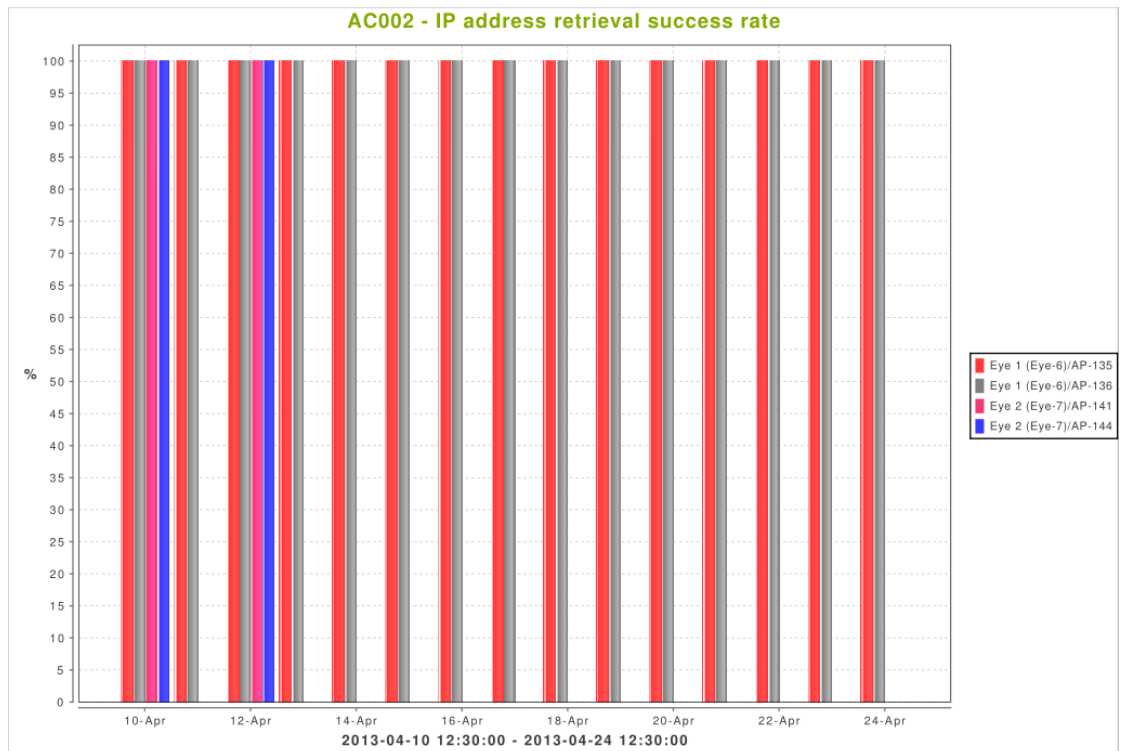
KUVIO 32. Tukiasemaan liittymiseen kulunut aika mittausjaksolla

Kuviosta 33 on esitetty keskimääräinen IP-osoitteen hakemiseen kulunut aika. 7signal Eye1- ja Eye2-mittausyksiköt saivat haettua IP-osoitteen keskimäärin alle 7 sekunnissa koko mittausjakson ajan. 7signal Eye2-mittausyksiköllä kului IP-osoitteen hakemiseen 7-14 sekuntia, riippuen tukiasemasta. Huomioitavaa on myös että 7signal Eye2-mittausyksikkö sai haettua osoitteen vain parina ensimmäisenä mittauspäivänä, jonka jälkeen se ei enää onnistunut.

Kuten kuviosta 34 näemme, 7signal Eye1-mittausyksikön IP-osoitteiden hakeminen oli onnistunut jokaisella kerralla mittausjaksolla. 7signal Eye2-mittausyksiköllä se oli onnistunut myös 100 prosenttisesti parin ensimmäisen mittauspäivän aikana, mutta loppu mittausjaksolla se ei enää ollut onnistunut.



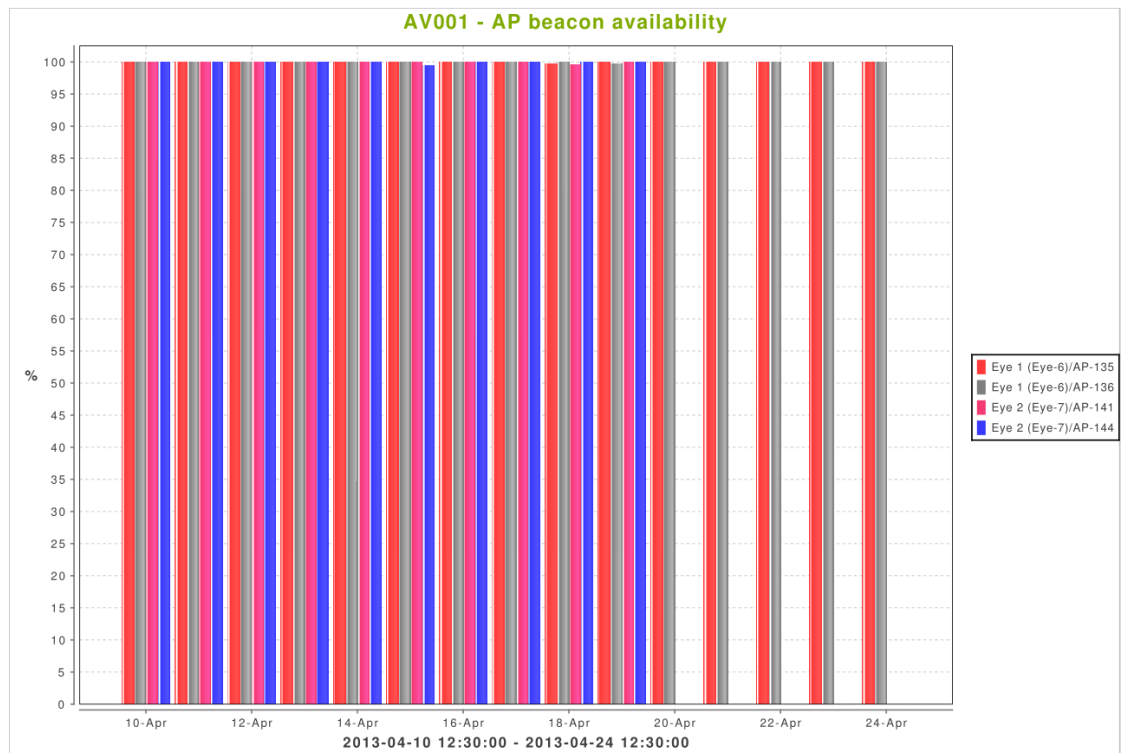
KUVIO 33. IP-osoitteen hakemiseen kulunut aika eri tukiasemilta



KUVIO 34. IP-osoitteen hakemisen onnistumisprosentti

8.2.5 Beacon saatavuus

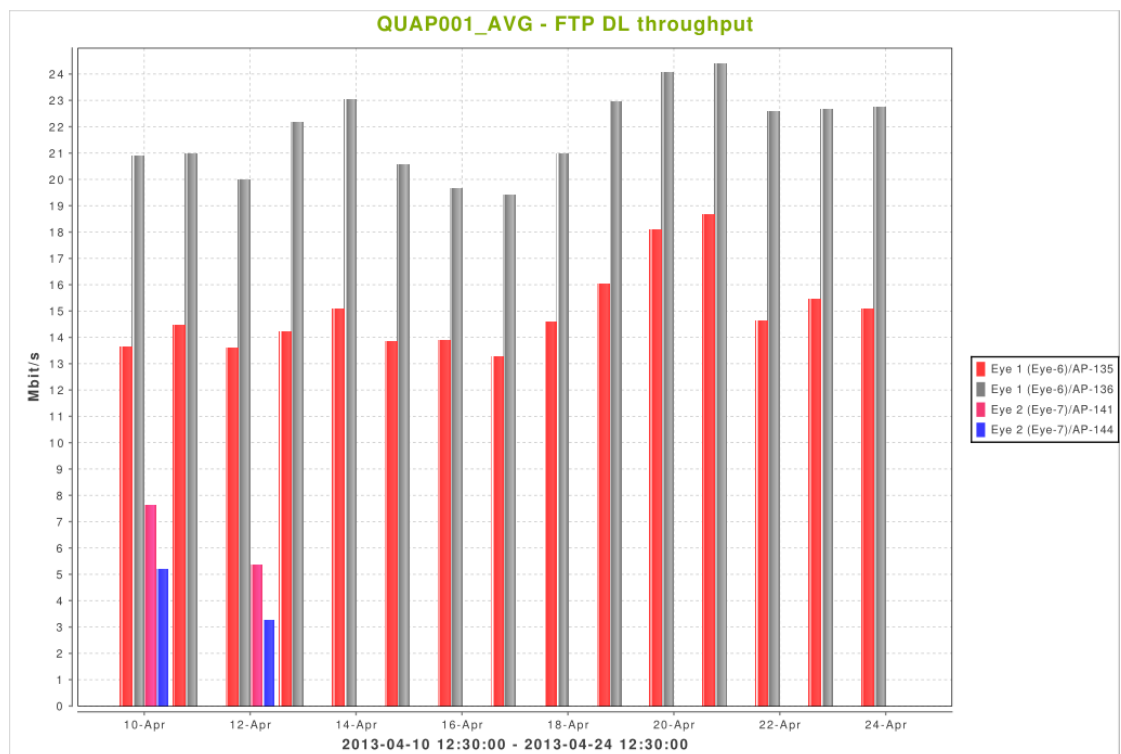
7signal Eye1-mittausyksiköllä ei mittaus jakson aikana ollut ongelmia tukiasemien beacon-sanomien saatavuuden kanssa. Koko mittausjakson ajan saatavuus oli lähes 100 prosenttia. Vastaavasti 7signal Eye2-mittausyksikkö oli saanut tietoa tukiasemien beacon-sanomien saatavuudesta vain 10 päivän ajalta, jolloin saatavuus oli yli 98 prosenttia. Loppu mittausjaksolta 7signal Eye2-mittausyksikkö ei ollut saanut kerättyä tietoa saatavuudesta. Kuviosta 35 nähdään beacon-sanomien saatavuudet mittausjaksolla.



KUVIO 35. Tukiasemien beacon-sanomien saatavuus mittausjaksolla

8.2.6 Tiedonsiirtonopeudet

FTP-protokollaa käyttäen mitatut keskimääräiset latausnopeudet olivat 7signal Eye1-mittausyksiköllä mitattavien tukiasemien osalta väliltä 13 - 24 Mbit/s mittausjaksolla. 7signal Eye2-mittausyksiköllä mitattavista tukiasemista oli saatu mittaustuloksia vain parin ensimmäisen päivän osalta ja tuolloin nopeudet pyörivät 2 - 6 Mbit/s välillä. Kuviosta 36 nähdään tukiasemien latausnopeudet mittausjaksolla.

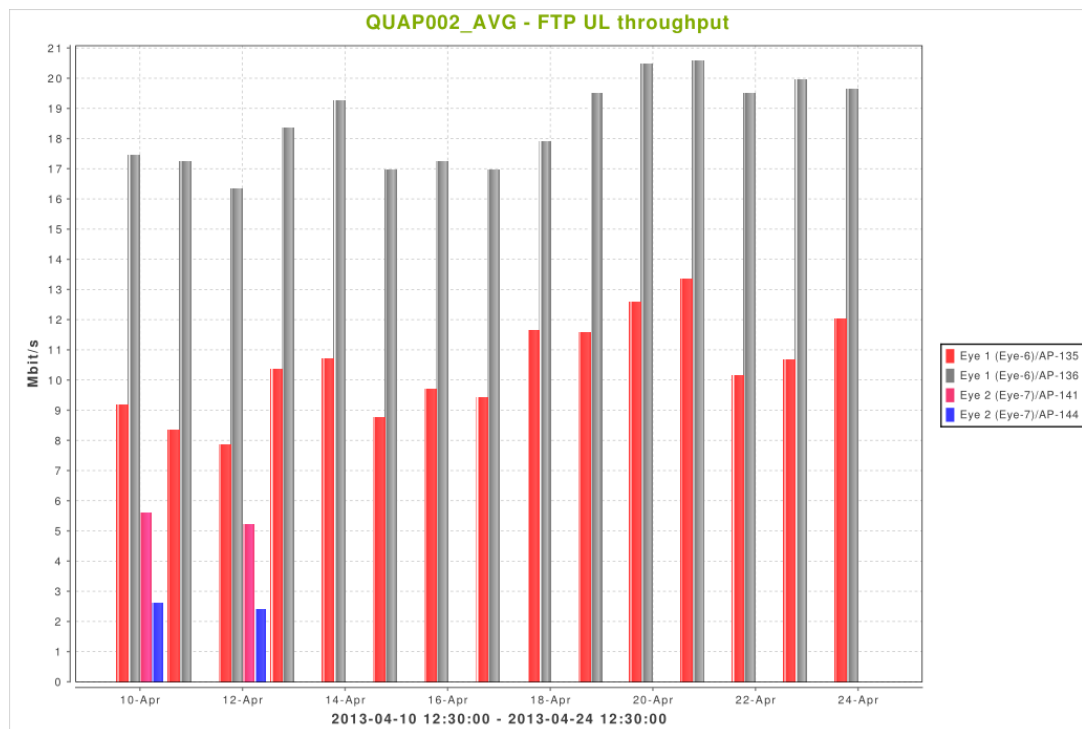


KUVIO 36. Tukiasemien keskimääräiset latausnopeudet mittausjaksolla

Matalat latausnopeudet voidaan selittää esimerkiksi radioverkon häiriöillä, heikolla signaalin voimakkuudella tai vanhempia standardeja käyttävien päätelaitteiden käytöllä verkossa. Yhteyden lopullista katkeamista 12. päivän kohdalla ei näiden argumenttien avulla voida selittää.

Keskimääräiset lähetysnopeudet 7signal Eye1-mittausyksiköllä tukiasemiensa osalta olivat väliltä 8 - 20 Mbit/s koko mittausjakson ajan. 7signal Eye2-mittausyksikön tu-

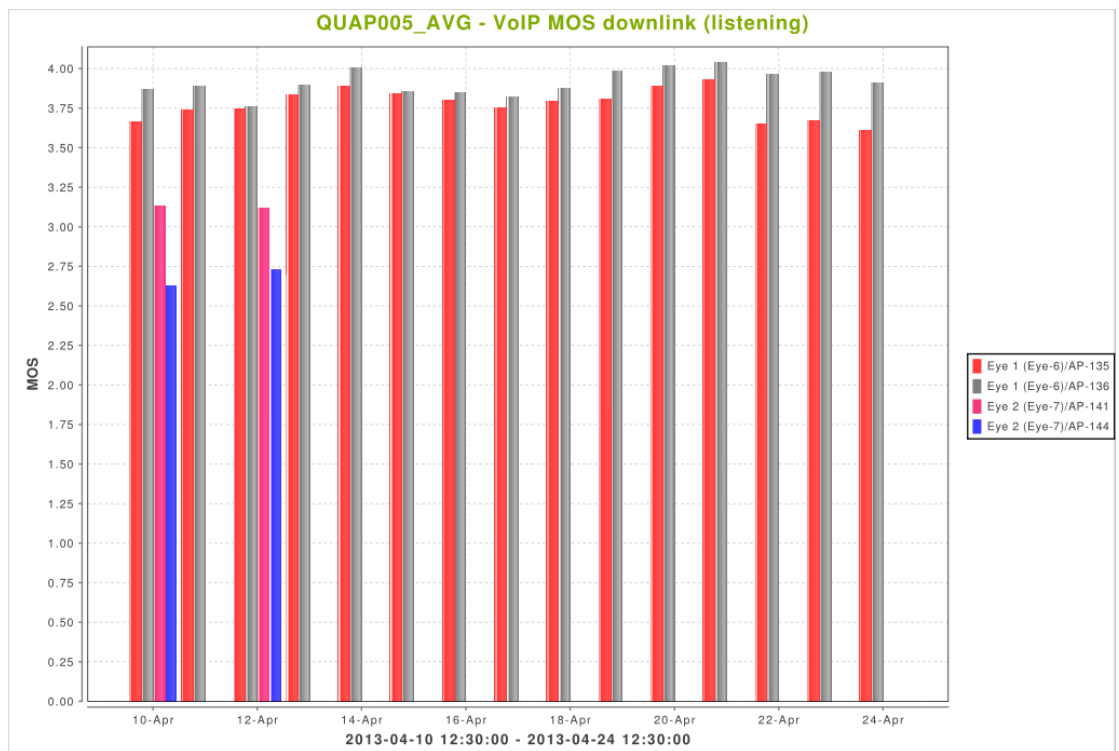
kiasemien osalta tuloksia oli saatu vain parin ensimmäisen mittauspäivän osalta, jonka jälkeen lähetysnopeutta ei saatu mitattua. Eye2:n tukiasemien alhaiset lähetysnopeudet voidaan selittää samoilla syillä kuin latausnopeudet, mutta yhteyden katkeamista niillä ei voida selittää. Kuvio 37 nähdään tukiasemien lähetysnopeudet mittauksella.



KUVIO 37. Tukiasemien lähetysnopeudet mittauksella

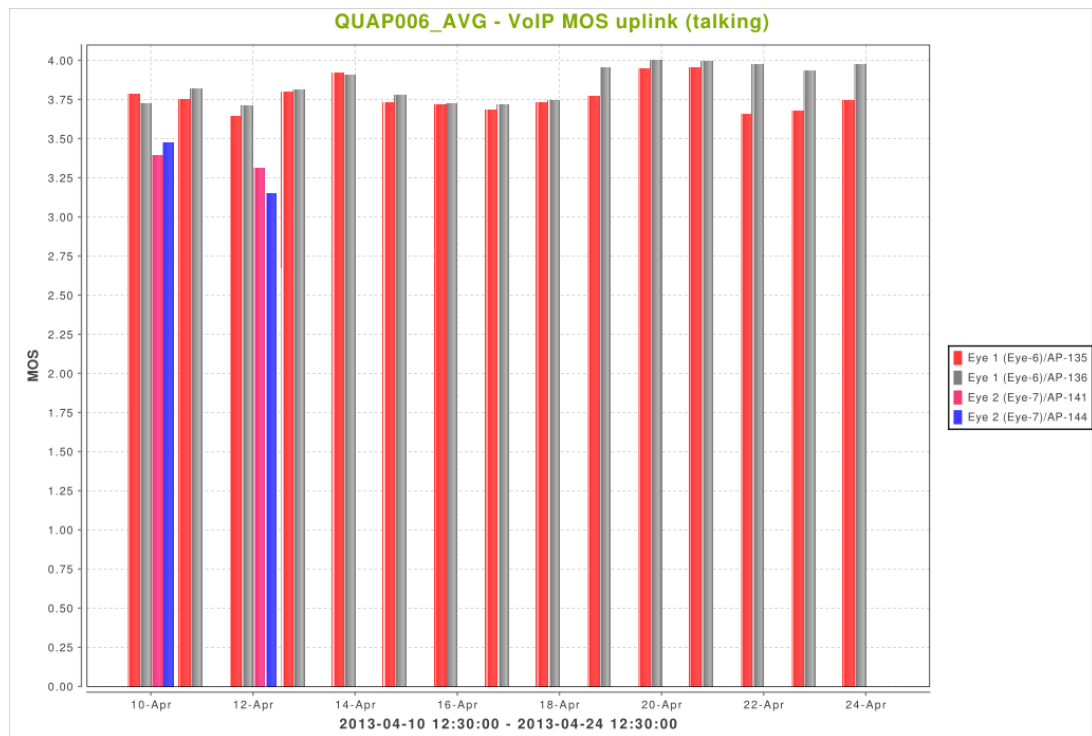
8.2.7 VoIP

VoIP-testissä 7signal Eye1-mittausyksikön keskimääräinen kuuluvuuden MOS-arvo oli mittauksella yli 3.5 molemmilla tukiasemilla. 7signal Eye2-mittausyksikön tukiasemien keskimääräinen MOS-arvo oli mittauksella alle 3.25 parin ensimmäisen päivän osalta. Kuten muissakin edellä esitellyissä mittauksissa loppu mittaukselta ei tuloksia saatu. Kuvio 38 esittää tukiasemien MOS-arvot mittauksella.



KUVIO 38. Tukiasemien kuuluvuuden MOS-arvot mittausjaksolla

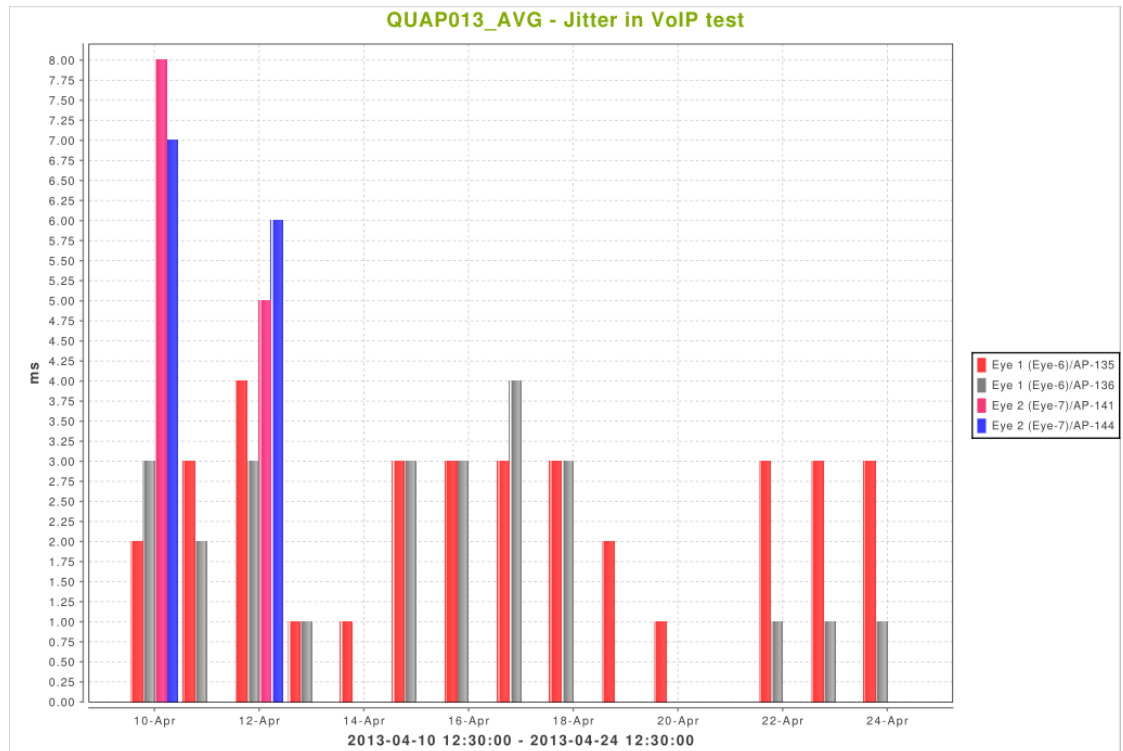
Kuvio 39 esittää tukiasemien keskimääräiset MOS-arvot puheen osalta VoIP testissä. Testissä 7signal Eye1-mittausyksikön tukiasemien MOS-arvot olivat yli 3.5 mittausjaksolla. 7signal Eye2-mittausyksikön tukiasemien mittausarvoja oli saatu parin ensimmäisen päivän osalta, kuten aiemmissakin testeissä ja saadut MOS-arvot olivat keskimäärin yli 3 mitattuna aikana.



KUVIO 39. Tukiasemien puheen MOS-arvot mittausjaksolla

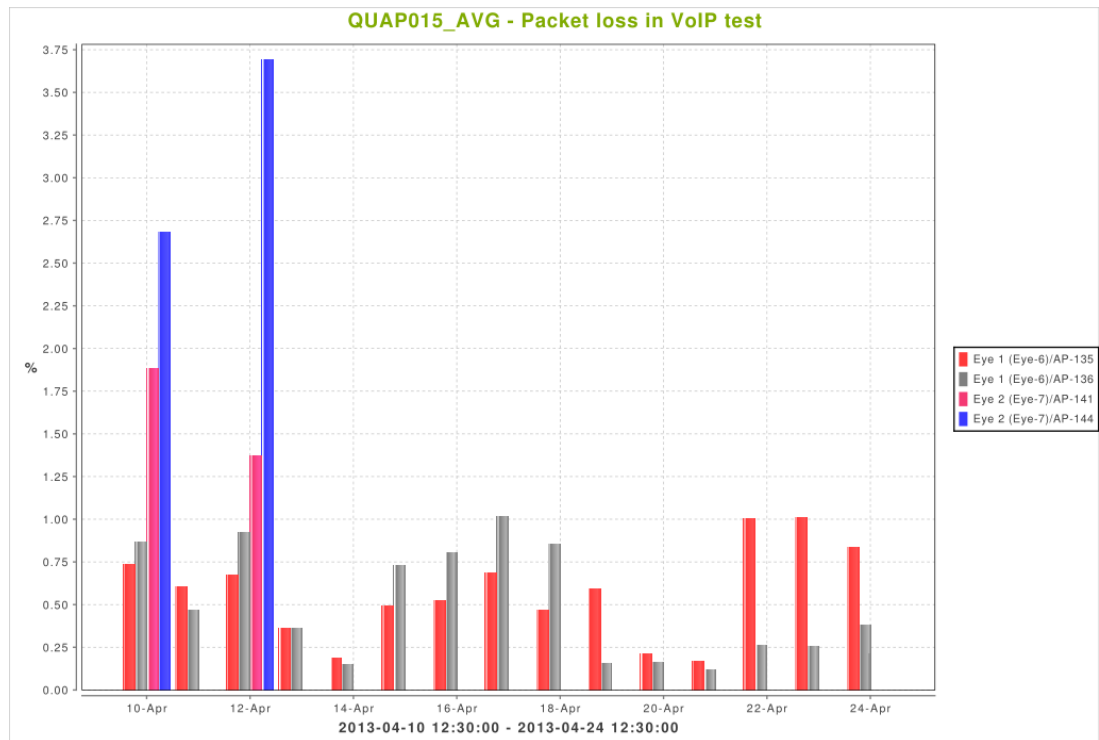
Keskimääräinen viiveen vaihtelu VoIP-testeissä oli 7signal Eye1-mittausyksikön tukiasemilla alle 3 millisekunnin luokkaa yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Osassa mittausjaksoa viivettä ei ollut esiintynyt ollenkaan tai mittausta ei ollut tuolloin saatu suoritettua.

7signal Eye2-mittausyksikön tukiasemilta oli saatu mittaustuloksia vain parin päivän osalta ja viiveen vaihtelu tuloksissa saatujen tulosten osalta liikkui 5 - 8 millisekunnin välillä. Kuvioista 40 nähdään kaikkien tukiasemien viiveen vaihtelu mittausjaksolla.



KUVIO 40. Tukiasemien viiveen vaihtelu mittausjaksolla

Kuvio 41 kuvaa keskimääräistä paketti hävikkiä VoIP-testeissä. 7signal Eye1-mittausyksikön tukiasemilla paketti hävikki oli vähäistä, alle 1 prosentin luokkaa mittausjaksolla. 7signal Eye2-mittausyksikön tukiasemien paketti hävikki oli 1 - 3.5 prosentin välillä saatujen mittaustulosten osalta.



KUVIO 41. Tukiasemien paketti hävikki mittausjaksolla

9 YHTEENVETO MITTAUKSISTA

9.1 Dynamon auditorio

Dynamon auditorion verkko toimi mittausten aikana moitteettomasti. Mittausajan-
kohdaksi valittiin viikon ajanjakso ja ajankohta, jolloin arveltiin verkolla olevat nor-
maalia enemmän käyttäjiä. Saatujen tulosten perusteella verkon käytettävyydessä ja
palvelunlaadussa ei esiintynyt suurempia poikkeamia, jotka olisivat näkyneet käyttä-
jille. Vaikka verkon käyttäjiltä ei kerätty suoraa palautetta verkon toimivuudesta mit-
tausjaksolla, voidaan tulosten perusteella todeta sen toimineen ilman loppukäyttäjäl-
le näkyviä ongelmia.

Dynamon auditorion mittaustulokset toimivat hyvänä vertailupohjana kun tarkastel-
laan Rajakadun hallintosiiven mittaustuloksia.

9.2 Rajakadun hallintosiipi

Rajakadun hallintosiiven langaton verkko osoittautui haasteelliseksi ympäristöksi
suorittaa mittaukset.

Mittaustulokset osoittivat, että langattomassa verkossa ongelmia esiintyi vain toisen
kerroksen tukiasemien osalta. Käyttäjämäärissä ja signaalinvoimakkuuksissa oli ha-
vaittavissa tukiaseman AP-144 osalta suuria eroja muihin tukiasemiin verrattuna.
Toisen kerroksen yhteyksien katkeamista 7signal Eye2-mittausyksiköstä kymmenen
päivän mittausten jälkeen ei pystytä mittaustulosten perusteella suoraan selittä-
mään. Liittymisongelmien syytä voidaan selittää signaalin voimakkuuden heikkene-
misellä, ainakin AP-144 osalta, mutta varmuutta ei ole miksi yhteys tukiasemiin kat-
kesi. Syytä voi olla useita, esimerkiksi jo aiemmin mainitsemani huono kuuluvuus,
ruuhkainen verkko tai mahdollinen laiterikko tai jokin muu mittausten ulkopuolinen
syy.

Rajakadun hallintosiiven kolmannen kerroksen osalta mittaukset onnistuivat ilman ongelmia. Kolmannen kerroksen tulosten perusteella langattomassa verkossa ei ilmennyt ongelmia käytettävyydessä eikä palvelunlaadussa. Verkon loppukäyttäjille ei pitäisi ilmetä minkäänlaisia ongelmia langattoman verkon käytössä.

10 POHDINTA

Työn lähtökohtana ja tavoitteena oli mitata Rajakadun hallintosiiven langattoman verkon toimintaa. Jyväskylän ammattikorkeakoulun langattoman verkon asetukset olivat ennalta määritetyt, eikä niihin mittauksissa pystytty vaikuttamaan. Suoritetut mittaukset ja saadut mittaustulokset 7signal-työkalulla kuvaavat verkkoa ja sen laatua käyttäjien näkökulmasta. Vertailukohtana Rajakadun hallintosiiven mittauksille käytettiin Dynamon auditoriossa tehtyjä mittauksia. Auditorion osalta mittaukset onnistuivat moitteettomasti. Niistä saatiin Rajakadun mittauksia varten lähtökohdat ja käytettävät asetusmäärittelyt laitteistoon ja ohjelmistoihin.

Rajakadulla kolmannen kerroksen mittaukset onnistuivat moitteettomasti. Kolmannen kerroksen verkon käytettävyydessä ei ollut ongelmaa ja sen laadun pitäisi olla tasaista, ilman suuria poikkeamia. Toisen kerroksen mittauksissa ilmeni ongelmia. Yhteys 7signal Eye2-mittausyksikön ja tukiasemien välillä katkesi mittausjakson aikana. Syitä yhteyden katkeamiselle saattoi olla useita, kuten tuloksissa esitettiin. Mielestäni yksi syy saattoi olla myös 7signal Eye2-mittausyksikön sijainti toisessa kerroksessa.

Tarkempia tuloksia verkosta olisi voitu saada jos käytössä olisi ollut useampia 7signal Eye-mittausyksiköitä, esimerkiksi neljä kappaletta, jotka olisivat tukeneet myös 802.11n-tekniikkaa. Useammalla tukiasemalla olisi pystytty paremmin kattamaan mitattava alue, sekä saatu tietoa myös 802.11n-tukiasemien palvelun laadusta.

Tässä opinnäytetyössä saatuja mittaustuloksia voidaan käyttää pohjana samankaltaisissa mittauksissa, esimerkiksi päivitetyillä 7signal Eye-mittausyksiköillä tehtävissä uusinta mittauksissa Rajakadulla. Tulevissa mittauksissa voisi lisäksi käyttää hyväksien etäyhteyttä 7signal Carat-ohjelmistoon ja lisätä mittauksiin SLA-hälytykset. Niiden avulla mittauksien ja mahdollisten ongelmatilanteiden seuraaminen olisi helppoa, esimerkiksi suojatun yhteyden yli kotoa käsin.

Itse opinnäytetyön tekeminen oli hyvin aikaa vievä prosessi, jossa aikaa kului esimerkiksi laitteiston päivittämiseen ja opetteluun. Lisäksi mittausten suunnittelu ja mittauspaikalla tehtävät toimenpiteet veivät oman aikansa työssä. Tulosten analysoinnissa ja teoria osiossa eniten aikaa veivät palvelunlaatu ja tuloskuvioiden tulkitseminen, joista itselläni ei ollut aikaisempaa kokemusta. Opinnäytetyö prosessin aikana opin kuitenkin paljon palvelulaadusta ja tiedon etsimisestä tulevaisuutta varten.

LÄHTEET

7Signal Sapphire Carat User Guide Release 4.0. 2013. 7Signal. Käyttöohje.

7Signal Company Overview. Yleistietoa 7Signal yrityksestä. Viitattu 22.10.2013.
<http://www.7signal.com/company/index.php>

7Signal Oy 2009. Artikkelin Spinno.fi sivustolla. Viitattu 22.10.2013.
<http://spinno.fi/2009/11/%E2%80%8E7signal-oy-on-vuoden-hautomoyritys-2009/>

7Signal Sapphire Deployment Guide Release 4.0. 2013. 7Signal. Käyttöohje.
 Viitattu 22.10.2013.

7Signal Sapphire Eye. 2013. Tietoa yrityksen tuotteista. Viitattu 22.10.2013.
<http://www.7signal.com/products/eye.php>

Aittoniemi, P & Nenonen, V. 2007. Langattomat lähiverkot. Erikoistyökurssi. Lappeenranta University Of Technology. Viitattu 29.11.2013.
http://www2.it.lut.fi/kurssit/06-07/Ti5316800/tyot/langattomat_lahiverkot_Pasi_Aittoniemi_Ville_Nenonen_kalvot.ppt

Ad Hoc and Infrastructure Networks. 2012. Artikkelin Lavalink.com sivustolla. Viitattu 13.11.2013. <http://lavalink.com/2012/09/ad-hoc-and-infrastructure-networks/>

Coleman, D & Westcott, D. CWNA: Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide. 3.p. 2012. Sähköinen kirja Books24x7 palvelulla. Viitattu 29.11.2013.

Coleman, D. Mackenzie, P, Miller, B & Westcott, D. CWAP: Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide, 2011. Sähköinen kirja Books24x7 palvelussa. Viitattu 10.10.2013. ISBN:9780470769034

Frederic, M. n.d. WLAN QoS: 802.11e. PDF-dokumentti. Viitattu 2.12.2013.
<http://www.cs.tut.fi/kurssit/TLT-6556/Slides/1-802.11e.pdf>

FHSS vs. DSSS n.d. PDF -dokumentti Sorin-Schwartz.com sivustolla. Viitattu 14.11.2013. http://sorin-schwartz.com/white_papers/fhvsds.pdf

Granlund, K. 2007. Tietoliikenne. Porvoo: WSOYpro.

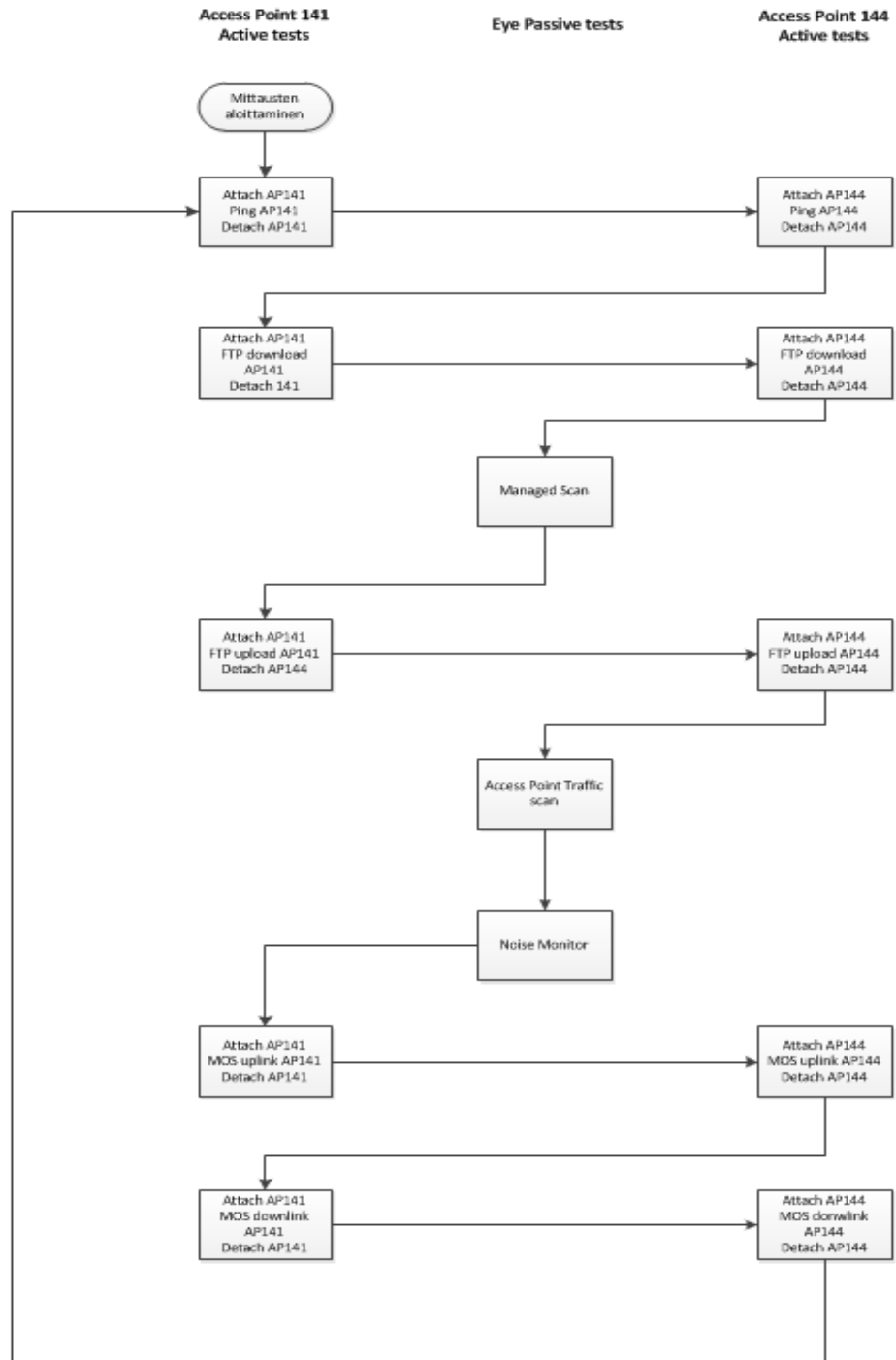
Hos, E. & Visser, N. 2004. Quality of Service for wireless networks. Analytical Network Project. University of Amsterdam. Master education in System and Network Engineering. Viitattu 22.11.2013. https://www.os3.nl/media/2003-2004/anp/reports/eh_nv-q0s-for-wireless.pdf

- IEEE at a Glance n.d. Yleistietoa IEEE organisaatiosta. Viitattu 8.10.2013.
http://www.ieee.org/about/today/at_a_glance.html
- IEEE 802.11n Standard. n.d. Artikkelin Radio-Electronics.com sivustolla. Viitattu 11.11.2013. <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11n.php>
- Järvi, T. 2013. Hierarkkisen QoS:n implementointi yrityksen MPLS VPN -ympäristöön. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Tietotekniikka. Viitattu 6.11.2013.
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63386/jarvituukka_QoS.pdf?sequence=1
- Kauppinen, M. 2005. Langattoman lähiverkon suunnittelu poliisikoulun opiskelija-asuntolaan. Tampereen ammattikorkeakoulu, Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma. Viitattu 4.12.2013.
<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/10097/TMP.objres.285.pdf?sequence=2>
- Kiuru, A. 2011. Langattoman 802.11-verkon palvelulaatumittaus. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tietotekniikan koulutusohjelma. Viitattu 7.12.2013.
- Koskela, E. 802 Standardit. Erikoiskurssityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tietoliikennetekniikan laitos. Viitattu 8.10.2013. http://www2.it.lut.fi/kurssit/04-05/010626000/seminarit/802_standardit_Elina_Koskela_seminaari.pdf
- Ma, M. Denko, M.K. & Zhang, Y. Wireless Quality of Service: Techniques, Standards and Applications, 2009. Sähköinen kirja Books24x7 palvelussa. Viitattu 1.11.2013. ISBN:9781420051308
- Poole, I. n.d. 802.11e for QoS. Artikkelin Radio-Electronics.com sivustolla. Viitattu 28.10.2013. <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11e.php>
- Prasad, A.R & Prasad, N.R. 802.11 WLANs and IP Networking: Security, QoS, and Mobility, 2005. Sähköinen kirja Books24x7 palvelussa. Viitattu 8.11.2013. ISBN:9781580537896
- Rouse, M. 802.11e 2006. Artikkelin SearchUnifiedCommunications sivustolla. Viitattu 28.10.2013. <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/80211e>
- Rouse, M. 2008. Jitter. Artikkelin SearchUnifiedCommunications sivustolla. Viitattu 28.10.2013. <http://searchunifiedcommunications.techtarget.com/definition/jitter>
- Sannikka, M. 2009. Palveluidenlaatu langattomissa lähiverkoissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Tietoliikennetekniikan koulutusohjelma. Viitattu 23.10.2013.
<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3082/urn100046.pdf?sequence=1%3E>

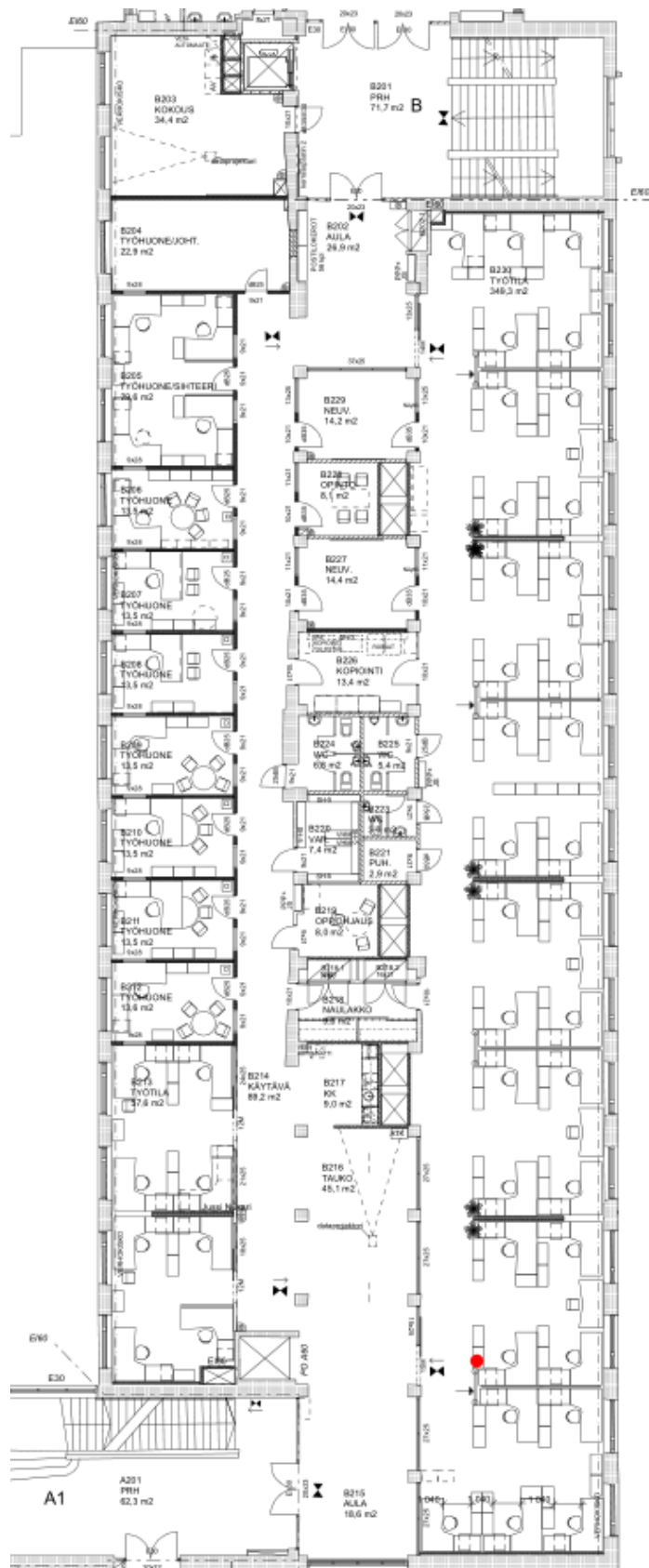
- Taavila, T. 2009. Quality of Service -arkkitehtuurit. Opinnäytetyö. Lahden Ammattikorkeakoulu, Tietotekniikan koulutusohjelma. Viitattu 23.10.2013. http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/3518/Taavila_Timo.pdf?sequence=1
- Toivonen, J. 2012. Langattoman lähiverkon laadunvalvonta. Opinnäytetyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu, Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot. Viitattu 13.11.2013. http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/52294/Toivonen_Juho.pdf?sequence=1
- Tiitinen, J. 2010. Jamk Raportti. 7Signal esimerkkiraportti. Viitattu 11.11.2013.
- von Nagy, A. Wireless QoS Part 1 2010. Artikkelin Revolution Wi-Fi sivustolla. Viitattu 31.10.2013. http://www.revolutionwifi.net/2010/07/wireless-qos-part-1-background_7048.html
- Ward, L. 802.11ac Technology Introduction, White Paper 2012. PDF-dokumentti Rohde & Schwarz sivustolla. Viitattu 14.10.2013. http://cdn.rohde-schwarz.com/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma192/1MA192_7e_80211ac_technology.pdf
- WI-FI, Discover and Learn n.d. Yleistietoa WI-FI organisaatiosta. Viitattu 16.10.2013. <https://www.wi-fi.org/discover-and-learn>
- WiFi in the 5 GHz Band n.d. PDF-dokumentti Schneider-Electric sivustolla. Viitattu 16.10.2013. <http://www.schneider-electric.co.uk/documents/solutions/process-automation/open-connectivity/WiFi%20in%20the%205%20GHz%20Band.pdf>

LIITTEET

Liite1: Mittausjärjestys 7signal työkalulla



Liite 2: Rajakadun hallintosiiven 2.krs



Liite 3: Rajakadun hallintosiiven 3.krs

