Pekka Nykänen

Langattomat lähiverkot ja niiden kehitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Insinöörityö

xx.xx.2018

Metropolia

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Pekka Nykänen Langattomat lähiverkot ja niiden kehitys 36 sivua + 4 liitettä 8.10.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Tietotekniikka
Ammatillinen pääaine	
Ohjaaja	Lehtori Marko Uusitalo

Insinöörityössä tutustuttiin langattoman lähiverkon standardiin ja siihen vuosien varrella tehtyihin lisäyksiin. Työssä tutustuttiin myös jonkin verran langattoman verkon fyysisessä kerroksessa käytettyjen tekniikkojen toteutuksiin.

Työssä tutkittiin eri käyttökohteisiin soveltuvia tukiasemia, vertailtiin eri hintaluokan laitteiden ominaisuuksia ja käytiin läpi erilaisten langattomien laitteiden yleistymistä.

Mittauksissa kartoitettiin tukiaseman kuuluvuutta asuinhuoneiston eri kohdissa käyttäen Wifi Heat Map Android -sovellusta. Kartoitus tehtiin sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuusalueella. Siirtonopeudet mitattiin neljässä eri mittauspisteessä lähetys- ja vastanottosuunnassa. Siirtonopeusmittauksia varten tukiaseman asetuksia muutettiin taajuusalueen, kaistanleveyden ja käytetyn wlan-tekniikan suhteen. Mittaukset tehtiin iperf3-sovelluksella. Mittaustuloksia verrattiin testeihin käytettyjen laitteiden teoreettiseen maksimisiirtonopeuteen kulloinkin käytössä olleilla asetuksilla. Tuloksista nähtiin käytännössä, minkä suuruusluokan siirtonopeuksia on saavutettavissa erilaisissa tyypillisissä kodin käyttökohteissa.

Avainsanat	802.11, wlan, lähiverkko, langaton

Author Title Number of Pages Date	Pekka Nykänen Wireless LAN and the evolution of them 36 pages + 4 appendices 8 october 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information tehcnology
Professional Major	
Instructors	Marko Uusitalo, Senior Lecturer

This Thesis introduced the wireless LAN standard and the amendments added to it over the years. The Thesis also familiarized technics underlying in the physical layer of wireless LAN to some extent.

The Thesis studied the wireless access points designed for different applications, compared the features of the various price range devices and examined the generalization of various wireless devices.

The measurements mapped the coverage of the wireless access point at various points in the apartment using Wifi Heat Map Android application. Mapping was done both in the 2,4 GHz and in the 5 GHz frequency band. Throughput measurements was carried out in four different measuring points in the download and upload direction. The settings for frequency band, bandwidth and the wlan technology used were changed during the throughput measurements. Measurements were made with the iperf3 application. Measured data rates were compared against theoretical maximum data rates at different settings used. The results showed in practice what magnitude transfer rates are achievable in various typical places in a home.

Keywords	wlan, 802.11, wireless, network

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto 1

2 Langattomien lähiverkkojen tekniset tiedot 1

2.1 Langattoman lähiverkon standardi 2

2.1.1 802.11b 2

2.1.2 802.11a 3

2.1.3 802.11g 3

2.1.4 802.11n 3

2.1.5 802.11ac 4

2.1.6 802.11ad 4

2.1.7 802.11af 5

2.1.8 802.11ax 5

2.1.9 Yhteenveto lisäyksistä 6

2.2 Taajuusalueet ja kanavat 7

2.2.1 2,4 GHz:n verkko 8

2.2.2 5 GHz:n verkko 10

2.3 Modulaatio 12

2.4 Kaistanleveys 13

2.5 Salaustekniikat 15

2.5.1 Ei salausta 15

2.5.2 Piilotettu SSID ja MAC-suodatus 15

2.5.3 WEP 16

2.5.4 WPA 16

2.5.5 WPA2 17

2.5.6 WPA3 17

3 Tukiasemat eri käyttökohteisiin 17

3.1 Kuluttajamallit 18

3.2 Yrityskäytön ja julkisten tilojen laitteet 19

4 Yleistyminen 19

4.1 Päätelaitteet 20

4.2 Tukiasemat 23

4.3 Kotiautomaatio ja IoT-laitteet 25

5 Mittaukset 25

5.1 Kartoitus 26
5.2 Siirtonopeus 28
5.3 Pohdintaa 35

Lähteet 36

Liitteet
Liite 1. Mittauspisteiden sijainnit
Liite 2. Kanavien kartoitus
Liite 3. Mittauspöytäkirja
Liite 4. QAM konstellaatiot

Lyhenteet

AES	*Advanced Encryption Standard.* Salaustandardi.
ARC4	*Alleged Rivest Cipher 4.* Salaustekniikka.
BCC	*Binary Convolutional Coding*. Bittikoodaustekniikka.
BPSK	*Binary Phase Shift Keying.* Modulointitekniikka.
CCK	*Complementary Code Keying.* Bittikoodaustekniikka.
DBPSK	*Differential Bipolar Phase Shift Keying.* Modulointitekniikka.
DQPSK	*Differential Quadrature Phase Shift Keying.* Modulointitekniikka.
DSSS	*Direct Sequence Spread Spectrum.* Suorasekvenssihajaspektritekniikka.
FHSS	*Frequency-Hopping Spread Spectrum.* Taajuushyppely.
GI	*Guard Interval.* Suojaväli lähetettyjen merkkien välissä.
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Standardointijärjestö.
ISM	*Industrial, Scientific and Medical radio bands.* Lisenssivapaat radiotaajuudet.
LAN	*Local Area Network.* Lähiverkko.
LDPC	*Low-Density Parity Check.* Bittikoodaustekniikka.
MAC	*Media Access Control.* Verkkosovittimen yksilöivä osoite.
MIMO	*Multiple Input Multiple Output.* Monilähetintekniikka.
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing.* Monitaajuusmodulaatio.
OFDMA	*Orthogonal Frequency Division Multiple Access.* Monitaajuusmodulaatio.

PCMCIA	*Personal Computer Memory Card International Association.* Laitevalmistajaryhmittymä / liitännän nimi.
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation.* Modulointitekniikka.
QPSK	*Quadrature Phase Shift Keying.* Modulointitekniikka.
RSNA	*Robust Security Network Association.* Yleisnimi tietynlaisille salauksille.
TKIP	*Temporal Key Integrity Protocol.* Salaustekniikka.
TVWS	*Television White Space.* Televisiokanavien välinen käyttämätön taajuus.
WEP	*Wired equivalent privacy.* Langattoman verkon salaustekniikka.
WLAN	*Wireless Local Area Network.* Langaton lähiverkko.
WPA	*Wi-Fi Protected Access.* Lantattoman verkon salaustekniikka.
WPA2	*Wi-Fi Protected Access 2.* Langattoman verkon salaustekniikka.
WPA3	*Wi-Fi Protected Access 3.* Langattoman verkon salaustekniikka.

1 Johdanto

Työn alkuosassa tutustutaan langattoman lähiverkon standardiin ja siihen tehtyihin muutoksiin vuosien varrella. Avaan hieman standardista löytyviä määrityksiä ja verkoissa käytettyjä tekniikoita. Langattoman lähiverkon standardi on yli 3000 sivua pitkä, joten työn laajuutta ajatellen teknisiä toteutuksia käydään suhteellisen pintapuolisesti läpi. Osa määritelmistä riippuu maantieteellisestä sijainnista, ja tässä työssä yleisesti tarkastellaan asioita eurooppalaisesta näkökulmasta.

Työn toisessa vaiheessa esitellään erilaisiin käyttökohteisiin soveltuvia laitteita. Käydään myös hieman läpi vuosien varrella markkinoilla olleita laitteita ja pohditaan langatonta verkkoa käyttävien laitteiden yleistymistä.

Lopuksi työssä suoritetaan mittauksia reaalimaailman olosuhteissa.

2 Langattomien lähiverkkojen tekniset tiedot

Langaton lähiverkko tarkoittaa lähiverkkoa, LAN (*Local Area Network),* ja se on toteutettu langattomasti, WLAN-tekniikalla (*Wireless Local Area Network).* Verkoissa käytetään yleensä TCP/IP-protokollaa. Verkko on yksinkertaisimmillaan tukiasema, joka on kytketty internetiin. Langaton verkko voi myös olla usean toisiinsa kaapeloinnilla kytketyn tukiaseman kattava kokonaisuus. Internetyhteys ei tietenkään ole edellytys langattoman lähiverkon olemassaololle. Tukiasemaan määritellään mm. taajuuden sekä kanavan lisäksi myös verkon nimi, SSID (*Service Set Identifier)*. Tukiasema mainostaa itseään SSID-majakkaviestien muodossa, ja verkko näkyy kuuluvuusalueella olevien laitteiden verkkolistauksessa.

Tarkastellaan tarkemmin langattomissa verkoissa käytettyjä tekniikoita ja käydään hieman läpi standardin kehitystä.

2.1 Langattoman lähiverkon standardi

Langattoman lähiverkon standardi on osa IEEE:n (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) työryhmä 802:n standardeja. Tarkemmin sanottuna standardin nimi on IEEE 802.11.

Alkuperäinen 802.11-standardi julkistettiin vuonna 1997. Tämä versio tunnetaan nykyisin nimellä 802.11-1997. Alkuperäinen standardi määrittelee langattoman lähiverkon, joka toimii 2,4 GHz:n lisenssivapaalla IMS (*Industrial, Scientific and Medical*) -taajuusalueella, käyttää 22 MHz:n kaistanleveyttä, DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum)* -hajaspektritekniikkaa. Määritelmän mukaan järjestelmä tukee 1 Mb/s siirtonopeutta DBPSK (*Differential Bipolar Phase Shift Keying*) -modulaatiolla ja 2 Mb/s siirtonopeutta DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) -modulaatiolla. Bittikoodauksena käytetään 11-bittistä Barker-koodia (BC, Barker Code). Alkuperäisen WLAN-standardin mukaiset määrittelyt määritellään nykyisen standardiversion pykälässä 15 - *DSSS PHY specification for the 2.4 GHz band designed for ISM applications.* [1, s.2224.]

Standardiin on tehty vuosien varrella lisäyksiä uusia ominaisuuksia tuovia lisäyksiä. Lisäykset on nimetty lisäämällä kirjain standardin perään, esimerkiksi 802.11a. Tuotteiden markkinoinnissa käytetään yleisesti näitä lisäyksien nimiä ja monesti puhutaankin eri standardeista esimerkiksi tukiasemien ominaisuuksista puhuttaessa. Lisäykset ovat myöhemmin sulautettu varsinaiseen standardiin uuden standardiversion myötä. Standardia on tähän mennessä päivitetty vuosina 2007, 2012 ja 2016. Näiden standardiversioiden nimet ovat vastaavasti 802.11-2007, 802.11-2012 ja 802.11-2016 [1, s.10].

Seuraavissa luvuissa käydään pääpiirteittäin läpi standardiin tehtyjä lisäyksiä fyysisen kerroksen näkökulmasta.

2.1.1 802.11b

Vuonna 1999 valmistunut lisäys 802.11b on suora kehitysaskel alkuperäiseen langattoman lähiverkon standardiin. Merkittävimpänä erona on maksimibittinopeuden nouseminen 11 Mb/s:n johtuen bittikoodauksen vaihdosta CCK (*Complementary Code Keying*) -koodaukseen. Muut tuetut bittinopeudet ovat alkuperäiset 1 ja 2 Mb/s sekä 5,5 Mb/s. Sulautettu varsinaiseen standardiin vuonna 2007. Määritellään nykyisen standardin 16.

pykälässä *High rate direct sequence spread spectrum (HR/DSSS) PHY specification.* [1, s.2248.]

2.1.2 802.11a

Vuonna 1999 valmistunut lisäys 802.11a poikkeaa alkuperäisestä langattoman verkon määritelmästä huomattavasti. Määritelmän mukaan verkko toimii 5 GHz:n (5,180 – 5,825 GHz) taajuusalueella käyttäen OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing)* -hajaspekritekniikkaa. Taajuusalueelle on määritelty 20 MHz:n levyisiä kanavia, joiden käyttöä on rajoitettu eri maissa hieman eri tavalla. Kanava on jaettu 64 alikantoaaltoon, joista on käytössä 52. Alikantoaallot on koodattu käyttäen BPSK (*Binary Phase Shift Keying)*, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16- tai 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) -modulaatiota. Alikantoaalloista ja modulaatiosta myöhemmin enemmän. 802.11a tukee 6 – 54 Mb/s bittinopeuksia, käyttää bittikoodauksena virheenkorjaavaa konvoluutiokoodausta koodaussuhteella 1/2, 2/3 tai 3/4. Lisäys on sulautettu varsinaiseen standardiin vuonna 2007 ja se määritellään nykyisen standardin 17. pykälässä *Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) PHY specification.* [1, s.2277.]

2.1.3 802.11g

Vuonna 2003 valmistunut 802.11g käyttää lähes samaa määrittelyä kuin aiemmin julkaistu 5 GHz:n taajuusalueella toimiva 802.11a. Keskeisimpänä erona on taajuusalueena käytetty 2,4 GHz:n lisenssivapaa ISM-taajuusalue. 802.11g-määrityksen mukaiset laitteet ovat alaspäin yhteensopivia 802.11b:n sekä alkuperäisen DSSS- WLAN -määrittelyn kanssa ja näin ollen tukevat 1 - 54 Mb/s siirtonopeuksia. Sulautettu varsinaiseen standardiin vuonna 2007, ja se on nykyisen standardin 18. pykälä *Extended Rate PHY (ERP) specification.* [1, s.2322.]

2.1.4 802.11n

Vuonna 2009 valmistuneen 802.11n määrityksen mukaiset WLAN-verkot toimivat 2,4 GHz:n tai 5 GHz:n taajuusalueella. 802.11n tukee 20 MHz:n kaistanleveyden lisäksi myös 40 MHz kaistanleveyksiä. Käytössä on 802.11a:n ja 802.11g:n tapaan OFDM-hajaspektritekniikka. Uusina ominaisuuksina 802.11n:ssä on muun muassa mahdollisuus

käyttää MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) -monilähetintekniikkaa ja lyhyempää 400 ns:n suojaväliä (GI, *Guard Interval*) merkkien välissä normaalin 800 ns:n suojavälin sijaan. Tuettuna on 1 – 4 MIMO-kanavaa. OFDM-alikantoaallot ovat BPSK-, QPSK-, 16-QAM- tai 64-QAM -moduloituja. Bittikoodauksena käytetään virheenkorjaavaa konvoluutiokoodausta (BCC) tai valinnaisesti LDPC (*Low-Density Parity Check*) -koodusta koodisuhteilla 1/2, 2/3, 3/4, tai 5/6. Maksimi siirtonopeus 600 Mb/s saavutetaan neljällä MIMO-kanavalla ja 40 MHz:n kaistanleveydellä lyhyellä 400 ns:n suojavälillä. Yhteensopivuus alaspäin säilyy 2,4 GHz:n toiminnassa 802.11b:n 802.11g:n osalta ja 5 GHz:n toiminnassa 802.11a:n osalta, kun käytetään 20 MHz:n kaistanleveyttä. Lisätty varsinaiseen standardiin vuonna 2012, ja se on standardin 19. pykälä *High-throughput (HT) PHY specification.* [1, s.2334.]

2.1.5 802.11ac

Vuonna 2013 julkaistu 802.11ac on kehitetty aiempien 802.11n:n ja 802.11a:n päälle, ja se on alaspäin yhteensopiva näiden kanssa 5 GHz:n toiminnan osalta. MIMO-kanavien maksimimäärää on nostettu neljästä kahdeksaan. Tuettuja kaistanleveyksiä on 20 MHz:n ja 40 MHz:n lisäksi 80 MHz:n ja valinnaisena ominaisuutena 160 MHz:n kaistanleveydet. 160 MHz:n levyinen kaista voi olla yhtenäinen tai kahteen osaan jaettuna 80 + 80 MHz. Tuki lyhyemmälle 400 ns:n suojavälille pysyy valinnaisena. OFDM-alikantoaallot on moduloitu käyttäen BPSK-, QPSK-, 16-QAM-, 64-QAM- tai 256-QAM -modulaatiota. Tuki 256-QAM-modulaatiolle ei ole pakollinen. Bittikoodauksena on käytössä virheenkorjaava konvoluutiokoodaus (BCC) tai LDPC –koodaus koodisuhteilla 1/2, 2/3, 3/4 tai 5/6. Maksimi bittinopeus 160 MHz kaistanleveyttä ja kahdeksaa MIMO-kanavaa käyttäen lyhyellä merkkien suojavälillä 256-QAM:lla on 6933,3 Mb/s ja 64-QAM:lla 5200 Mb/s. Lisätty varsinaiseen standardiin vuoden 2016 päivityksessä ja on standardin 21. pykälä *Very high throughput (VHT) PHY specification.* [1, s.2497.]

2.1.6 802.11ad

Vuonna 2012 julkaistu 802.11ad poikkeaa aiemmista taajuusalueen osalta, sillä se toimii 60 GHz:n taajuusalueella ja kaistanleveys on huomattavasti laajempi, 2160 MHz. 802.11ad käyttää yhden kantoaallon hajaspektritekniikkaa (SC, *Single Carrier)*. Myös OFDM-hajaspektritekniikka on valinnaisesti tuettuna, mutta se on merkitty vanhentuneeksi ja se mahdollisesti poistetaan seuraavissa standardin päivityksissä [1, s.2456].

Bittikoodauksena käytetään LDPC-koodausta koodisuhteilla 1/2, 5/8, 3/4, 13/16 tai 7/8. Modulaatiovaihtoehtoina yhden kantoaallon tekniikalla on π/2-BPSK-, π/2-QPSK-, π/2-16-QAM- tai π/2-64-QAM -modulaatiot. Yhden kantoaallon tekniikalla saavutetaan maksimissaan 8085 Mb/s siirtonopeus. Lisäys on sulautettu standardiin vuoden 2016 päivityksessä ja se määritellään nykyisen standardin pykälässä 20 - *Directional multi-gigabit (DMG) PHY specification.* [1, s.2436.]

2.1.7 802.11af

Vuonna 2014 valmistunut 802.11af perustuu aiempaan 802.11ac-määritykseen. Määrityksiä on muokattu mm. kaistanleveyden ja MIMO-kanavien määrän osalta. MIMO-kanavien määrä on maksimissaan 4 kpl ja käytössä olevat kanavat ovat 6, 7, tai 8 MHz levyisiä kanavia VHF- ja UHF -taajuusalueilla käytössä olevien (televisio)kanavien välissä (TVWS, *Television White Spaces)*. Käytettävä kaistanleveys määrittyy maantieteellisen sijainnin perusteella, esimerkiksi Euroopassa käytetään 8 MHz:n kaistanleveyttä. Edellä mainittuja kanavia kutsutaan peruskanaviksi (BCU, *Basic channel unit).* Standardin mukaisen laitteen tulee tukea toimintaa vähintään yhdellä peruskanavalla ja voi lisäksi tukea myös toimintaa kahdella tai neljällä peruskanavalla yhdistettynä. Sallitut kanavayhdistelmät voivat olla 2 tai 4 yhtenäistä peräkkäistä kanavaa, kaksi ei peräkkäistä kanavaa tai kaksi ei peräkkäistä kahden peräkkäisen kanaan osiota. 802.11af on standardin 22. pykälä – *Television very high throuhgput (TVHT) PHY specification. [1, s.2625.]*

2.1.8 802.11ax

802.11ax on vielä julkaisematon lisäys langattoman lähiverkon standardiin. IEEE:n työryhmä ax aloitti työnsä vuonna 2014 ja lisäyksen olisi tämänhetkisen aikataulun mukaan tarkoitus olla valmis vuoden 2019 aikana. 802.11ax rakentuu aikaisemman 802.11ac:n päälle säilyttäen alaspäin yhteensopivuuden sen kanssa. 802.11ax tukee 5 GHz:n taajuusalueen lisäksi myös alempaa 2,4 GHz:n taajuusaluetta ollen alaspäin yhteensopiva vanhempien 2,4 GHz:n laitteiden kanssa. Verkon suorituskyky paranee muun muassa OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access)* -hajaspektritekniikan käytöllä sekä 1024-QAM-modulaation mahdollistamisella. Käytössä on 802.11ac:sta tutut kaistanleveydet sekä koodaussuhteet. Eräs 802.11ax:n uusi ominaisuus mahdollistaa laitteiden määrittää ajan jolloin ne ovat aktiivisia ja lähettävät dataa. Tämä ominaisuus on

hyödyllinen muun muassa pienen virrankulutuksen laitteissa, joissa siirretty datamäärä on vähäistä ja suhteellisen harvakseltaan tapahtuvaa.

2.1.9 Yhteenveto lisäyksistä

Olen käyttänyt työssä eri määrityksistä alkuperäisen standardin lisäyksen nimen mukaisia nimityksiä, esimerkiksi 802.11n. Näitä nimityksiä käytetään yleisesti tuotteiden ominaisuuksista puhuttaessa, esimerkiksi tuotteiden esitteissä. Taulukossa 1 on listattuna lisäysten / markkinointinimi ja virallinen standardissa oleva määritelmän nimi.

Taulukko 1. Määritelmien viralliset nimet ja markkinointinimet

Markki-nointinimi / lisäys	**Virallinen nimi standardissa**	**Standardin pykälä**
802.11	DSSS PHY specification for the 2,4 GHz band designated for ISM applications	15
802.11a	Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) PHY specification	17
802.11b	High rate direct sequence spread spectrum (HR/DSSS) PHY specification	16
802.11g	Extended Rate PHY (ERP) specification	18
802.11n	High-throughput (HT) PHY specification	19
802.11ac	Very high throughput (VHT) PHY specification	21
802.11ad	Directional multi-gigabit (DMG) PHY specification	20
802.11af	Television very high throughput (TVHT) PHY specification	22

Taulukossa 2 on listattuna alkuperäisen määritelmän sekä lisäysten ominaisuuksia.

Taulukko 2. 802.11-standardin ja lisäysten ominaisuuksia.

Lisäys	**Julkaisuvuosi**	**Taajuusalue (GHz)**	**Kaistanleveys (MHz)**	**MIMO kanavat**	**Maks. bittinopeus (Mb/s)***	**Hajaspektritekniikka**	**Sulautettu**
802.11-1997	1997	2,4	22	1	2	DSSS	-
a	1999	5	20	1	54	OFDM	2007
b	1999	2,4	22	1	11	DSSS	2007
g	2003	2,4	20	1	54	OFDM	2007
n	2009	2,4 ja 5	20 ja 40	4	72 ja 150	MIMO-OFDM	2012
ac	2013	5	20,40,80,160	8	87,200,433,867	MIMO-OFDM	2016
ad	2012	60	2160	1	8085	SC	2016
af	2014	0.054, 0,79	8,16,32	4	36,71,142	MIMO-OFDM	2016
ax	-	2,4 ja 5	20,40,80,160	8	143,287,600,1201	MIMO-OFDMA	-

* maksimi bittinopeus yhdellä MIMO-kanavalla.

Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus kullekin tekniikalle eri kaistanleveyksillä saadaan kertomalla maksiminopeus MIMO-kanavien määrällä. Esimerkiksi 802.11n-määrityksen mukaisen laitteen maksiminopeus 40 MHz:n kaistanleveydellä on 600 Mb/s. Käytännössä saavutettavat nopeudet ovat yleensä noin 30…80 % teoreettisesta maksimista, riippuen muun muassa tukiaseman etäisyydestä ja siirtotiellä olevista muista häiriötekijöistä. Työn myöhemmässä vaiheessa tutkitaan käytännön tilanteessa mitattua siirtonopeutta teoreettiseen maksiminopeuteen.

2.2 Taajuusalueet ja kanavat

Langattomia verkkoja on kotikäytössä kahdella taajuusalueella, 2,4 GHz:n sekä 5 GHz:n alueella. Standardia läpi käydessä kävi ilmi, että langattomia verkkoja on myös VHF- ja UHF -taajuusalueilla (802.11af) sekä 60 GHz:n taajuusalueilla (802.11ad), mutta näitä taajuusalueita ei käsitellä tämän työn puitteissa vaan työssä keskitytään 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueisiin ja niitä käyttäviin laitteisiin.

2.2.1 2,4 GHz:n verkko

2,4 GHz taajuusalueella (2,400 GHz – 2,4835 GHz) toimiva langaton lähiverkko asettuu kokonaan lisenssivapaasti käytettävälle ISM –taajuuskaistalle [1, s. 2235]. Taajuuskaista on jaettu 14 kanavaan, joista kanavan 14 käyttö on sallittu vain Japanissa [1, s. 2235]. Kanavien 1-13 keskitaajuudet saadaan laskettua kaavalla (1) [1, s.2403].

$$kanavan\ keskitaajuus = 2407\ MHz + 5\ MHz * n \qquad (1)$$

jossa n = 1, 2, …, 13

Kanavan 14 keskitaajuus on poikkeuksellisesti 12 MHz:n päässä kanavasta 13.

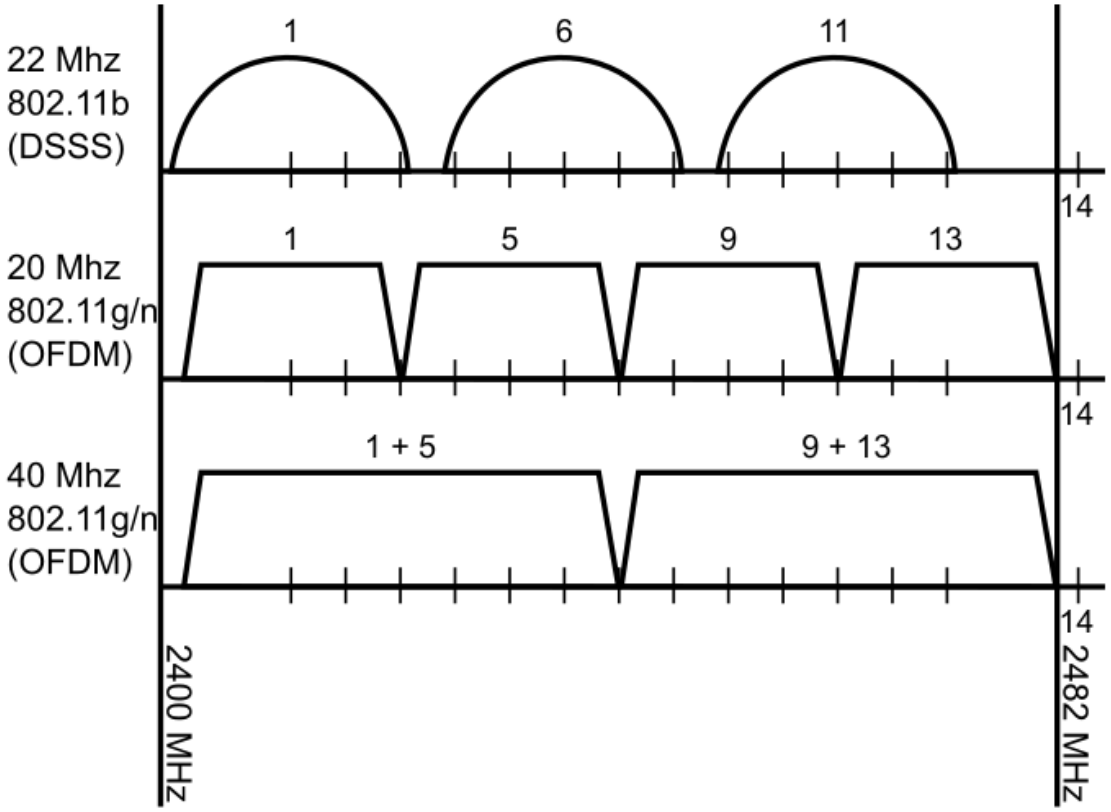
Taulukossa 3 esitetään kanavanumerot ja kanavien keskitaajuudet.

Taulukko 3. 2,4 GHz:n langattoman verkon kanavat.

Kanavanumero	**Keskitaajuus (GHz)**
1	2,412
2	2,417
3	2,422
4	2,427
5	2,432
6	2,437
7	2,442
8	2,447
9	2,452
10	2,457
11	2,462
12	2,467
13	2,472
14	2,484

Kanavien 1 – 13 keskitaajuudet ovat 5 MHz:n päässä toisista ja kukin kanava on 20 MHz leveä. Langaton verkko voidaan asettaa käyttämään 20 MHz:n (802.11b/g/n) tai 40 MHz:n kaistanleveyttä (802.11n). Vanhin 802.11b käyttää DSSS-hajaspektritekniikkaa, jonka kanssa eri kanavien välissä käytetään 2 MHz:n varokaistaa, jolloin kaistanleveys on käytännössä 22 MHz [2, s. 39]. Uudemmat 802.11g ja 802.11n käyttävät OFDM-hajaspektritekniikkaa, jolloin kanavien välissä ei käytetä varokaistaa [2, s.40].

Taajuusalueella on käytettävissä toisiaan häiritsemättömiä kanavapaikkoja 802.11b:n tapauksessa 3 kpl ja 802.11g:n sekä 802.11n:n tapauksessa 4 kpl. 802.11n-verkolla 40 MHz:n kaistanleveydellä toisistaan riippumattomia kanavapaikkoja on 2 kpl. Kuva 1 havainnollistaa toisistaan riippumattomia kanavapaikkoja eri tekniikoilla ja kaistanleveyksillä. Useiden tukiasemien asetuksissa valitaan 40 MHz:n kanavaa asettaessa ensin pääkanava (*Control Channel*) ja tämän jälkeen valitaan, onko lisäkanava (*Extension Channel)* tuon kanavan ylä- vai alapuolella. Valitaan esimerkiksi kanava 1 ja sen yläpuolinen kanava. Kanavan 1 yläpuolella oleva seuraava ei päällekkäinen kanava on 5, joten näin valittu 40 MHz:n kanava voidaan ilmoittaa kanavana 1 + 5.



Kuva 1. Toisistaan riippumattomat kanavat 2,4 GHz:n taajuusalueella.

2.2.2 5 GHz:n verkko

5 GHz:n verkon kanavapaikat ovat hieman monimutkaisempia, sillä taajuusalueella ei ole vastaavaa yksittäistä lisenssivapaata aluetta vaan taajuusalueen sisällä on erillisiä alueita eri aluekohtaisin rajoittein. Tässä työssä tarkastellaan rajoitteita Euroopan näkökulmasta. Taajuusalue on jaettu 5 MHz:n välein numeroituihin kanaviin, alkaen kanavasta 0 taajuudella 5,00 GHz. Kanavapaikkojen keskitaajuudet 5 GHz:n taajuusalueella voidaan laskea kaavalla (2) [1, 2403].

$$kanavan\ keskitaajuus = 5000\ MHz + 5\ MHz * n \qquad (2)$$

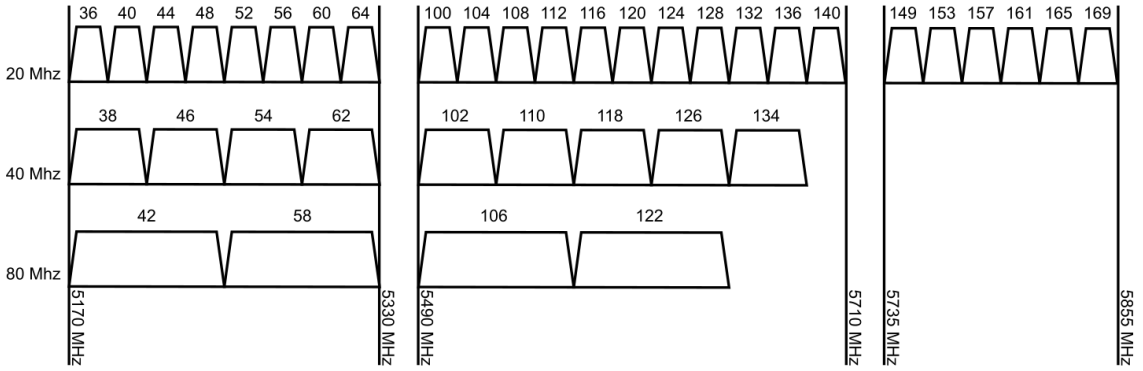
jossa n = 1, …, 200

Kaikki mahdolliset kaavalla saatavat taajuudet eivät ole käytettävissä langattomalla lähiverkolla. Sallitut kanavapaikat riippuvat myös käytetystä kaistanleveydestä. [1, s.3278]. Taulukossa 4 on estettynä sallitut kanavat taajuusalueella eri kaistanleveyksillä, sallittu kanava merkattu X:llä.

Taulukko 4. 5 GHz:n langattoman verkon kanavanumerot ja taajuudet.

<table>
<tr><th rowspan="2">Kanava-numero</th><th rowspan="2">Taajuus, GHz</th><th colspan="3">Kaistanleveys</th></tr>
<tr><th>20 MHz</th><th>40 MHz</th><th>80 MHz</th></tr>
<tr><td>36</td><td>5,180</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td><td rowspan="4">X</td></tr>
<tr><td>40</td><td>5,200</td><td>X</td></tr>
<tr><td>44</td><td>5,220</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td></tr>
<tr><td>48</td><td>5,240</td><td>X</td></tr>
<tr><td>52</td><td>5,260</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td><td rowspan="4">X</td></tr>
<tr><td>56</td><td>5,280</td><td>X</td></tr>
<tr><td>60</td><td>5,300</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td></tr>
<tr><td>64</td><td>5,320</td><td>X</td></tr>
<tr><td>100</td><td>5,500</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td><td rowspan="4">X</td></tr>
<tr><td>104</td><td>5,520</td><td>X</td></tr>
<tr><td>108</td><td>5,540</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td></tr>
<tr><td>112</td><td>5,560</td><td>X</td></tr>
<tr><td>116</td><td>5,580</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td><td rowspan="4">X</td></tr>
<tr><td>120</td><td>5,600</td><td>X</td></tr>
<tr><td>124</td><td>5,620</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td></tr>
<tr><td>128</td><td>5,640</td><td>X</td></tr>
<tr><td>132</td><td>5,660</td><td>X</td><td rowspan="2">X</td><td></td></tr>
<tr><td>136</td><td>5,680</td><td>X</td><td></td></tr>
<tr><td>140</td><td>5,700</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>149</td><td>5,745</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>153</td><td>5,765</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>157</td><td>5,785</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>161</td><td>5,805</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>165</td><td>5,825</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>169</td><td>5,845</td><td>X</td><td></td><td></td></tr>
</table>

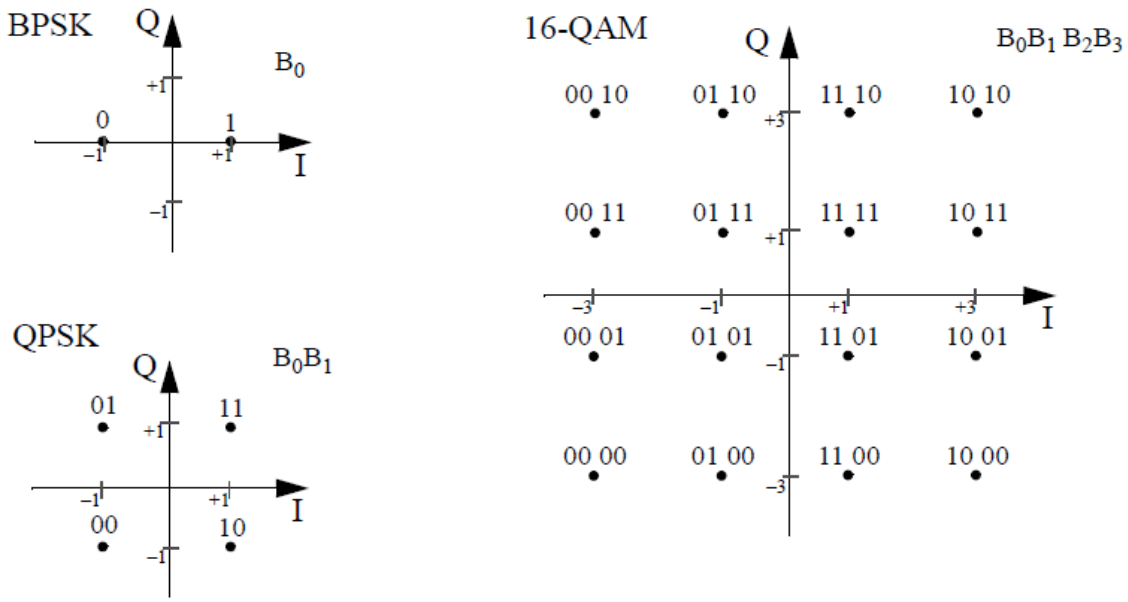
5 GHz:n alueella yli 20 MHz:n kaistaleveydellä toimivan verkon käytetyt kanavat voidaan ilmoittaa kuten 2,4 GHz:n taajuusalueella, eli esimerkiksi kanava 44 + 48. Yleensä 802.11n-verkon laitteissa käytössä oleva kanava ilmoitetaan näin. 802.11ac-laitteissa kanavat ilmoitetaan usein kuitenkin yhdistelmäkanavan keskikohdasta. Aikaisemmin esimerkkinä ollut 40 MHz:n levyinen yhdistelmäkanava 44 + 48 ilmoitetaan siis kanavana 46. Vastaavasti neljä 20 MHz:n kanavaa (36,40,44,48) kattava 80 MHz:n levyinen kanava ilmoitetaan kanavana 42. Kuva 2 havainnollistaa kanavanumeroita sekä sallittuja kanavapaikkoja eri taajuuksilla Euroopassa 5 GHz:n taajuusalueella.



Kuva 2. Kanavanumerot eri kaistanleveyksillä 5 GHz:n alueella Euroopassa.

2.3 Modulaatio

Modulaatiolla tarkoitetaan alkuperäisen signaalin yhdistämistä toiseen signaaliin, kantoaaltoon, lähetystä varten. OFDM-hajaspektritekniikkaa käyttävissä langattomissa lähiverkoissa jokainen alikantoaalto moduloidaan käyttäen BPSK-, QPSK- tai eri QAM -tasoja. Lähetystä varten käsitelty bittivirta jaetaan 1, 2, 4, 6 tai 8 bitin lohkoihin riippuen käytetystä modulaatiosta. Bittilohkot muutetaan kompleksiluvuksi (I + Qj) käyttäen ennalta määritettyjä Gray-koodattuja konstellaatiokarttoja, BPSK-, QPSK- sekä 16-QAM -konstellaatiot ovat esitettynä kuvassa 3. 64-QAM- sekä 256-QAM -konstellaatiot ovat esitettynä liitteessä 4. [1, s.2298]. Saatua lukua kutsutaan datasymboliksi.



Kuva 3. BPSK-, QPSK- ja 16-QAM -konstellaatiot [1, s.2299].

Konstellaatiokartoista saatava datasymboli esittää amplitudia ja vaihekulmaa. Huomataan, että käytetty modulaatio vaikuttaa suoraa saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen. Taulukossa 5 esitetään datasymbolilla esitettävien bittien määrä eri modulaatioilla.

Taulukko 5. Datasymbolilla esitettävien bittien määrä eri modulaatioilla.

Modulaatio	**Bittejä / datasymboli**
BPSK	1
QPSK	2
16-QAM	4
64-QAM	6
256-QAM	8

Tukiasema tarkkailee siirtotien signaalikohinasuhdetta ja muuttaa käytettävää modulaatiota sen mukaan. Mitä suurempi signaalikohinasuhde, sitä suuremman bittivirran mahdollistava modulaatio otetaan käyttöön.

2.4 Kaistanleveys

Langattomat verkot voivat toimia eri levyisillä kaistanleveyksillä. Käytetty kaistanleveys määritellään tukiaseman asetuksissa. Tämän hetkisen standardin mukaiset tuetut kaistanleveydet ovat 20 MHz, 40 MHz ja 80 MHz 5 GHz:n taajuusalueella ja 20 MHz sekä

40 MHz kaistanleveydet 2,4 GHz:n taajuusalueella. 802.11ac-standardissa määritellään valinnaisena ominaisuutena tuki myös 160 MHz:n kaistanleveydelle. 160 MHz:n levyinen kaista voidaan toteuttaa yhtenäisenä tai kahden erillään olevan 80 MHz:n osan yhdistelmänä.

Kaikki muut langattoman lähiverkon tyypit, paitsi alkuperäinen 802.11 sekä 802.11b, käyttävät OFDM-hajaspektritekniikkaa. OFDM:ssä jokainen 20 MHz:n kanava on jaettu 64 alikantoaaltoon [1, s.2356]. Näistä 64 alikantoaallosta 802.11a/g:n tapauksessa käytetään 48 datalle, 4 toimi pilottikantoaaltoina ja 12 on käyttämättä. Vastaavat luvut 802.11n:n ja 802.11ac:n kohdalla on 52, 4 ja 8. Alikantoaaltoihin viitataan numeroilla -32 … 32, kanavan keskitaajuus on samalla alikantoaalto 0. Alikantoaallot -21, -7, 7 ja 21 ovat pilottikantoaaltoja eivätkä ne kuljeta hyötydataa [1, s.2301]. Alikantoaaltoa 0 ei myöskään käytetä datan siirtoon. Tämän ansiosta D/A- ja A/D -muuntimet voidaan rakentaa yksinkertaisemmiksi [1, s.2302]. 802.11n- ja 802.11ac -verkoilla voidaan käyttää myös leveämpiä kaistanleveyksiä ja tällöin pilottikanavien määrä ja paikat muuttuvat hieman. Taulukossa 6 ilmoitetaan eri alikantoaaltojen lukumäärät eri kaistanleveyksillä.

Taulukko 6. Alikantoaaltojen määrä eri kaistanleveyksillä

Kaistanleveys	**Alikantoaaltoja**	**Datakäytössä**	**Pilottikanavia**
20 MHz (802.11a/g)	64	48	4
20 MHz (802.11n/ac)	64	52	4
40 MHz (802.11n/ac)	128	108	6
80 MHz (802.11n/ac)	256	234	8
160 MHz (802.11n/ac)	512	468	16

Taulukosta 6 nähdään, että kaistanleveyden tuplaantuminen 20 MHz:stä 40 MHz:iin lisää myös hieman enemmän hyötydatalle jäävää kaistaa, 108 > 52 * 2. Sama ilmiö on havaittavissa myös 40 MHz:n ja 80 MHz:n kaistanleveyksien välisessä suhteessa, mutta ei enää siirryttäessä 80 MHz:n kaistanleveydestä 160 MHz:n kaistanleveyteen.

Jokainen datakäytössä oleva alikantoaalto ja pilottikanava siirtävät yhden datasymbolin. Pilottikanavilla lähetetään näennäissatunnaista bittijonoa BPSK-moduloituna [1, s.2301]. Datakäytössä olevilla alikantoaalloilla sekä pilottikanavilla lähetettävää dataa kutsutaan OFDM-symboliksi.

2.5 Salaustekniikat

Kotona oleva, kuten myös yrityksessä yrityksen sisäisessä käytössä oleva langaton lähiverkko on yleensä syytä salata. Salauksella varmistetaan, että verkkoa voi käyttää vain ne henkilöt, joilla on oikeus käyttää verkkoa. Joissakin tapauksissa on käytännöllisempää jättää verkko salaamattomaksi. Langattoman lähiverkon standardissa määritellään kaksi eri salausluokkaa, RSNA (*Robust Security Network Association*) ja Pre-RSNA, RSNA:ta edeltäneet tekniikat [1, s. 1923]. RSNA:ta edeltäneet salaustekniikat, pl. avoin verkko, on merkattu standardissa vanhentuneeksi ja tuki niille saatetaan poistaa seuraavissa standardiversioissa [1, s. 1927]. Seuraavaksi tutustutaan muutamiin käytettävissä oleviin salausvaihtoehtoihin.

2.5.1 Ei salausta

Joskus on tarkoituksenmukaista pitää verkkoa salaamattomana, esimerkiksi julkisessa tilassa tai yrityksessä, jossa halutaan tarjota asiakkaille pääsy internettiin langattoman verkon kautta. Yleensä tällaisessa tapauksessa rajoitetaan internetliikennettä muulla tavoin. Rajoituksia voi olla esimerkiksi palomuurilla rajoitetut portit (vain portti 80 auki), automaattisesti aloitussivuksi tuleva kirjautumis- ja käyttöoikeussivu, jonka hyväksymisen jälkeen yhteys avataan. Vaihtoehtoja toteutukselle on lukematon määrä. Pääsääntönä on, että tällaisesta verkosta ei ole pääsyä yrityksen sisäverkkoon. Avoimessa verkossa ei suositella myöskään käyttämään sivustoja tai palveluita, joiden liikenne ei ole salattua, sillä langattomassa verkossa kaikki verkkoon kytketyt laitteet näkevät halutessaan muiden laitteiden liikenteen sellaisenaan. Toki sama pätee myös salattuihin verkkoihin, mutta näissä yleensä on oletuksena, että verkossa olevat laitteet ovat vaarattomia.

2.5.2 Piilotettu SSID ja MAC-suodatus

Seuraavat keinot eivät ole varsinaisesti verkon salauksia eivätkä missään tapauksessa ole turvallisia salauskeinoja, mutta ovat joissain tapauksissa käytännöllisiä.

Verkon tunnisteen, SSID:n, voi asettaa piilotetuksi, jolloin tukiasema ei mainosta itseään majakkaviesteillä. Jotta verkkoon voi liittyä, tulee verkon nimi olla tiedossa ja se syöttää päätelaitteelle manuaalisesti. Piilotettu SSID voidaan kuitenkin saada selville helpohkosti

tätä varten suunnitelluilla ohjelmilla, sillä protokollasta johtuen SSID ilmoitetaan, silloin kun laite liittyy kyseiseen verkkoon.

Tukisemille voidaan asettaa lista MAC (*Media Access Control)* –osoitteista, jotka tukiasema hyväksyy asiakkaakseen. Tämän keinon heikkoutena on, että myös hyväksytyn MAC-osoitteen saa selville kuuntelemalla verkon ohjausliikennettä ja tämän jälkeen väärentää oma MAC-osoite vastaamaan sallittua osoitetta.

2.5.3 WEP

WEP (*Wired Equivalent Protection)* oli alkuperäisessä langattoman lähiverkon standardissa määritelty verkon salaustekniikka. Salauksen oli nimensä mukaisesti tarkoitus saavuttaa saman tasoinen vaikeusaste verkkovakoiluun kuin lähiverkkokaapeloinnilla. Salauksessa määritellään 64- tai 128-bittinen salausavain, jolla liikenne salataan käyttäen ARC4 (*Alleged Rivest Cipher 4)* -algoritmia. Nykyisin WEP-salausta ei suositella käytettäväksi missään tilanteissa sillä salauksen murtamiseen on saatavilla erittäin yksinkertaisia ja helppokäyttöisiä ohjelmia. WEP-salaus on luokassa Pre-RSNA.

2.5.4 WPA

WPA (*Wi-Fi Protected Access),* standardissa nimellä TKIP (*Temporal Key Integrity Protocol*), kehitettiin korvaamaan helpohkosti murrettavissa oleva WEP-salaus. WPA-salaus kehitettiin käytännössä vain väliaikaiseksi salaustekniikaksi vanhempiin laitteisiin, joihin tuki oli mahdollista päivittää ohjelmistopäivityksellä [1, s.1953]. Yksinkertaistettuna salaus perustuu WEP-salaukseen sillä erotuksella, että jokainen paketti salataan dynaamisesti generoidulla 128-bittisellä salausavaimella. Salausalgoritmina käytetään samaa ARC4-algoritmia, josta johtuen myös jotkut WEP-salauksen murtamiseen sopivat keinot toimivat myös WPA:n kanssa. Vaikka WPA/TKIP on RSNA-luokassa, 802.11n laitteet sekä niitä uudemmat laitteet eivät enää tue kyseistä salausta.

2.5.5 WPA2

Nykyisin suurimmassa osassa salatuissa langattomissa verkoissa on käytössä WPA2 (*Wi-Fi Protected Access II)* -salaus. WPA2 käyttää AES:n (*Advanced Encryption Standard)* perustuvia salausalgoritmeja. WPA2-salaus on ollut jo yli kymmenen vuotta käytetyin salaustekniikka ja sitä on pitkään pidetty murtamattomana.

WPA2-tekniikasta on vastikään löydetty haavoittuvaisuus, jolla väärinkäyttäjä voi teoriassa saada haltuun verkon salausavaimen ja tämän avulla vakoilla verkon liikennettä. Haavoittuvaisuus tunnetaan nimellä KRACK, *Key Reinstallation AttaCK*. Laite- ja ohjelmistovalmistajat ovat julkaisseet monille laitteilleen haavoittuvaisuuden korjaavan päivityksen. Joihinkin vanhempiin laitteisiin päivitystä ei ole kuitenkaan välttämättä tarjolla. [3.]

2.5.6 WPA3

Vuoden 2018 alussa julkaistu WPA3 on kehitetty korvaamaan aikaisempi WPA2-salaus. WPA3:n parannuksia WPA2:n nähden on mm. verkkoon liittymisessä käytetyssä kättelyprotokollassa ja se, että salaus on yhtä tehokas riippumatta käytetyn salausavaimen pituudesta. WPA3 on alaspäin yhteensopiva WPA2:n kanssa, joten WPA2-laite voi yhdistää verkkoon, joka käyttää salaustekniikkana WPA3: a. WPA3-salaus ei ole vielä uutuutensa johdosta kovin laajasti käytössä laitteistoissa. Se todennäköisesti yleistyy samaa tahtia 802.11ax-standardin laitteiden kanssa. Laitevalmistajat voivat myös julkaista WPA3-tuen vanhemmille laitteille ohjelmistopäivityksen muodossa.

3 Tukiasemat eri käyttökohteisiin

Langattoman verkon laitteita on erilaisia eri käyttökohteisiin mm. kuluttajille tarkoitetut laitteet, pieniin ja suurempiin yrityksiin sekä julkisiin tiloihin tarkoitetut laitteet sekä ulkoitiloin tarkoitetut laitteet. Käyn läpi yleisesti eri käyttökohteisiin soveltuvista laitteista, lähinnä langattoman verkon ominaisuuksia ajatellen.

3.1 Kuluttajamallit

Kuluttajamarkkinoille suunnattuja laitteita on monessa eri hintaluokassa. Suuri osa kuluttajamarkkinoiden tukiasemista on itseasiassa reitittimiä. Osa reitittimistä on ihan lähiverkon reitittimiä, osassa on ADSL/VDSL -modeemi, 4G LTE -modeemi, kaapelimodeemi tai jokin näiden yhdistelmä sisäänrakennettuna.

Edullisimman hintaluokan laitteiden langattoman verkon ominaisuuksina on yleensä 802.11n-verkko 2,4 GHz:n taajuudella. Jotkin edullisimman hintaluokan laitteet alkavat jo olla myös dual band -laitteita, eli ne tukevat 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n 802.11n- ja 802.11ac -verkkoja. Perustason laitteet ovat varustettu yleensä kahdella antennilla ja tukevat siten 2 MIMO-kanavaa. Edullisimmissa laitteissa on usein säästelty mm. laitteen prosessoritehossa ja tästä syystä siirtonopeus ei välttämättä yllä sille tasolle, kun teknisistä tiedoista katsomalla voisi päätellä.

Keskitason malleissa on yleensä tuki molemmille taajuusalueille ja vähintään 3 antennia mahdollistaen 3 MIMO-kanavan käytön. Tämän tason laitteissa pääsääntöisesti prosessori ei aiheuta pullonkaulaa.

Huipputason laitteista löytyy jo ominaisuuksia ja prosessoritehoa erittäin kovallekin rasitukselle. Laitteista löytyy antenneja yleensä 4, joissakin malleissa jopa 8. Jotkin mallit sisältävät kaksi erillistä 5 gigahertsin taajuusalueella toimivaa tukiasemaa 2,4GHz:n taajuusalueen lisäksi. Osassa huipputason malleista on ominaisuutena mm. valmistajan omia, standardin valinnaisiakin ominaisuuksia parempia, määrityksiä. Yksi esimerkki tällaisesta on joissakin Asus:n reitittimissä oleva *TurboQAM*-ominaisuus, joka tarkoittaa sitä että 802.11n:llä voidaan käyttää 256-QAM-modulaatiota. Tuki kyseiselle ominaisuudelle tulee tietenkin löytyä myös päätelaitteista ja totuus on, että tuki tällaisille ominaisuuksille on hyvin harvinainen.

Laitteiden mainoksissa ja myyntinimissä on yleistynyt tapa, jossa esimerkiksi langattoman verkon nopeudeksi ilmoitetaan yksi siirtonopeus, vaikkapa 2334 Mb/s. Luku tuntuu aluksi tietenkin kovin suurelta ja hieman tutkimalla saadaan selville, että luku koostuu eri taajuusalueilla toimivien langattomien verkkojen yhteenlasketusta maksimisarvoista, tässä tapauksessa 600 Mb/s 2,4 GHz:n alueella ja 1734 Mb/s 5 GHz:n alueella.

Markkinoille on tullut lähiaikoina myös kotiin tarkoitettuja usean tukiaseman järjestelmiä, jotka yhdistyvät toisiinsa langattomasti muodostaen Mesh-verkon. Verkkoon voi lisätä laitteita tarpeen mukaan ja näin parantaa langattoman verkon kuuluvuutta. Tällaisia järjestelmiä valmistaa mm. Asus, Google ja Zyxel.

3.2 Yrityskäytön ja julkisten tilojen laitteet

Pienet toimistoihin tarkoitetut yrityskäyttöön suunnatut laitteet poikkeavat kuluttajamalleista ominaisuuksien puolesta siten, että niissä on yleensä mm. monipuolisempi palomuuri, etähallintatuki, VPN-ominaisuudet ja muutenkin monipuolisemmat verkkomääritykset. Laitteet ovat yleensä monta kertaa kalliimpia kuin vastaavilla langattoman verkon ominaisuuksilla olevat kuluttajamallit, mutta laitteet ovat usein huomattavasti pitkäikäisempiä ja varmatoimisempia.

Useilla valmistajilla on oma yrityskäyttöön suunnattu langattomien tukiasemien mallisto. Esimerkiksi Hewlett Packardilla on oma Aruba-mallisto, johon kuuluu eri tasoisia tukiasemia, jotka kytketään toisiinsa ethernet kaapeloinnilla ja tukiasemat muodostavat laajan yhtenäisen langattoman verkon. Tällaisia verkkoja hallinnoidaan keskitetysti kontrollerin välityksellä. Kontrollerin avulla kaikki verkon asetukset tehdään yhdestä paikasta, eikä samoja asetuksia tarvitse tehdä jokaiselle verkon tukiasemalle erikseen. Kontrollerin kautta saadaan myös erinäistä statistiikkaa verkon käytöstä eri tukiasemissa. Statistiikan avulla nähdään esimerkiksi, mikäli jossakin kohtaa verkkoa tarvitaan lisäkapasiteettia suuren käyttäjämäärän johdosta.

4 Yleistyminen

Kuluttajapuolen langattoman lähiverkon laitteita on ollut saatavilla heti standardin julkistamisen jälkeen. Tässä luvussa käyn läpi hieman laitteiden kehityshistoriaa ja yleistymistä kuluttajanäkökulmasta Euroopassa.

Alkuperäisen 802.11-1997-standardin mukaisia laitteita ei juurikaan julkaistu kuluttajamarkkinoille. Ensimmäinen laajempaan kuluttajapuolen suosioon Euroopassa yltänyt versio oli vuonna 1999 julkaistu 802.11b, sillä 802.11a:n käyttämä 5 GHz:n taajuusalue ei ollut vielä tuohon aikaan käytettävissä samaan tapaan kuin se on nykyisin.

4.1 Päätelaitteet

Päätelaitteita ovat mm. matkapuhelimet, tabletit, kannettavat tietokoneet, langattomalla verkkosovittimella varustetut pöytäkoneet, televisiot, pelikonsolit jne. Langatonta verkkoa käyttävät päätelaitteet ovat yleistyneet huimaa vauhtia ja uudet standardiversiot on otettu käyttöön nopeasti julkaisun jälkeen.

Nykyisin lähes missä tahansa kannettavassa tietokoneessa on langattoman verkon sovitin sisäänrakennettuna, yleensä low end -malleissa on vähintään 802.11n sovitin 2,4 GHz:n taajuudella ja high end -malleista löytyy nopeampia 802.11ac-standardin mukaisia sovittimia.

Vanhemmissa koneissa, joissa langattoman verkon ominaisuuksia ei ollut tuli käyttää langattoman verkon sovitinta. Sovittimia oli saatavilla aluksi PCMCIA (*Personal Computer Memory Card International Association)* laajennuskorttipaikkaan (kuva 4) ja myöhemmin USB 2.0: n yleistyttyä myös USB-mallisina sillä vasta USB 2.0:n jälkeen liitännän nopeus oli riittävä.

Kuva 4. Netgear PCMCIA 802.11g -sovitin [4].

Nykyisinkin on saatavilla USB-liitännällä varustettuja langattoman verkon sovittimia. USB-liitännäisellä sovittimella voidaan muun muassa ottaa käyttöön parempia ominaisuuksia, esimerkiksi 5 GHz:n verkko koneessa jossa on vain 2,4 GHz:n alueella toimiva

sovitin. Monissa erikseen myytävissä pöytätietokoneen emolevyssä ei ole sisäänrakennettuna langatonta verkkokorttia, joten USB-verkkokortti on varteenotettava vaihtoehto, mikäli koneen kasaa itse komponenteista. USB –mallisia sovittimia on saatavilla useissa eri nopeusluokissa ja eri antennien lukumäärällä. Pienimmät sovittimet ovat vain sormenpään kokoisia (kuva 5).

Kuva 5. Pienikokoinen 802.11n-verkon sovitin [5].

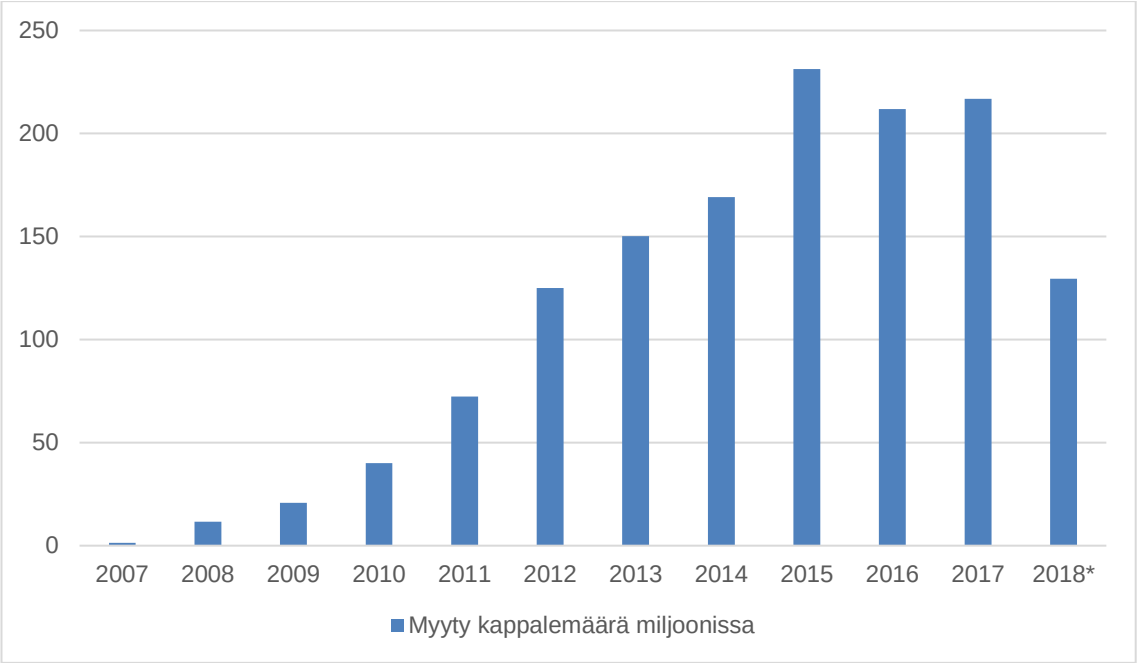
Pienimmät sovittimet ovat yleensä ominaisuuksiltaan suppeampia. Tällä hetkellä tämän tyyppinen perustason laite tukee 802.11n-verkkoa 2,4 GHz:n taajuudella yhdellä MIMO-kanavalla. Tällaisissa pienissä laitteissa on jonkin verran ongelmaa kuuluvuuden kanssa jo johtuen ihan siitä syystä, että pieneen tilaan ei saada rakennettua kovinkaan hyvää antennia.

Tarjolla on myös useammalla antennilla varustettuja malleja, jotka tukevat 2,4 GHz:n sekä 5 GHz:n taajuusalueita ja 802.11ac-määritelmän mukaista standardia. Kuvassa 6 on esimerkkilaite, joka kytketään laitteeseen USB-liitäntäkaapelilla.

Kuva 6. USB-sovitin neljällä antennilla [6].

Älypuhelimet ovat yleistyneet hurjaa vauhtia suurin piirtein vuodesta 2007 alkaen. Kaikissa älypuhelimissa on tuki langattomalle lähiverkolle. Otetaan esimerkiksi maailmanlaajuisesti tunnetut Applen iPhonet tarkasteluun. Ensimmäinen iPhone julkaistiin vuonna 2007 ja se tuki langattomia 802.11b- ja 802.11g -verkkoja. Tuki 802.11n-verkoille 2,4 GHz:n taajuusalueella tuli vuonna 2010 julkaistun iPhone 4:n myötä. Vuonna 2012 julkaistu iPhone 5 lisäsi tuen myös 5 GHz:n 802.11n-verkoille ja samalla tuetuksi tulivat myös 802.11a-verkot. Kaikki vuoden 2014 jälkeen julkaistut iPhonet tukevat 802.11a- ,802.11b- ,802.11g- ,802.11n- ja 802.11ac -verkkoja.

Kuvassa 7 esitetään iPhone-puhelinten myyntimääriä miljoonissa kappaleissa vuosittain jaoteltuna. Kuvasta huomataan, että langattomia verkkoja tukevien Apple-älypuhelinten määrä on kasvanut todella paljon viimeisen 10 vuoden aikana. Apple iPhonet ovat vuosien 2009 ja 2018 välillä edustaneet kaikkien älypuhelimien myynnistä noin 10 % – 20 % [7.] Jo tästä nähdään, että pelkästään älypuhelimia on nykyisin jo huima määrä käytössä.



Kuva 7. Apple iPhone myynnit vuosittain [8]. *vuoden 2018 määrässä mukana vain Q1 ja Q2.

4.2 Tukiasemat

Alkuperäisen 802.11-1997-standardin mukaiset tukiasemat eivät saavuttaneet suurta suosiota, syinä lienee ollut ainakin suhteellisen hidas siirtonopeus 2Mb/s ja eri valmistajien laitteiden yhteensopimattomuus. Muutamaa vuotta myöhemmin, vuonna 1999, julkaistun 802.11b:n mukaiset laitteet sen sijaan saavuttivat suuren suosion ja sitä pidetäänkin ensimmäisenä kunnolla läpi lyöneenä standardiversiona.

Yksi merkittävä syy suurelle suosiolle on myös vuonna 1999 toimintansa aloittanut voittoa tavoittelematon organisaatio, *Wi-Fi Alliance*, joka keskittyy testaamaan ja sertifioimaan eri valmistajien laitteita mm. yhteensopivuutta ja standardin mukaista toimintaa silmällä pitäen. Laite saa Wi-Fi-sertifikaatin, mikäli se läpäisee järjestön asettamat tavoitteet. Järjestön jäsenistöön kuuluu nykyisin yli 550 yritystä. Wi-Fi-sertifikaatti takaa, että sertifikaatin omaavat laitteet ovat yhteensopivia. Wi-Fi-allianssi tunnettiin nimellä WECA, *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*, vuoteen 2002 saakka. Wi-Fi-allianssin sekä Wi-fi-sertifikaatin logot esitettynä kuvassa 8.

Kuva 8. Wi-Fi-allianssin sekä Wi-Fi-sertifikaatin logot [9].

Wi-Fi-allianssi on aivan viimeaikana julkaissut uuden nimeämiskäytännön selkeyttämään kuluttajille eri langattomien verkkojen ominaisuuksia. Uudet nimet liittyvät seuraavan sukupolven, 802.11ax:n langattomien verkkojen julkaisuun. Langattomien nimet ovat Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 sekä Wi-Fi 6. Wi-Fi-allianssi on ehdottanut myös, että langattoman verkkoyhteyden ilmaiseva kuvake ilmoittaisi käytetyn Wi-Fi version. Taulukossa 7 esitellään eri Wi-Fi versioiden tukema standardi sekä ehdotettu kuvake.

Taulukko 7. Wi-Fi versionumerot sekä logot.

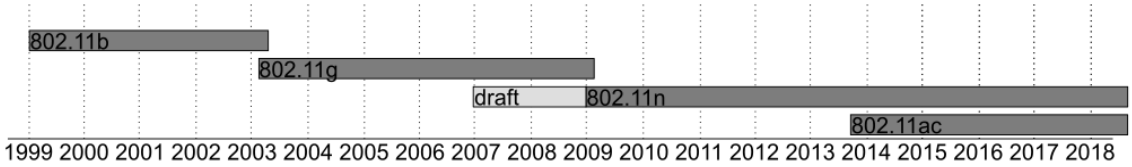
Wi-Fi versio	**Laitteen tukema standardi**	**Logo päätelaitteessa**
Wi-Fi 4	802.11n	
Wi-Fi 5	802.11ac	
Wi-Fi 6	802.11ax	

Vaikka 802.11b:n kanssa samoihin aikoihin julkaistu 802.11a tarjosikin nopeamman yhteyden, ei se saavuttanut varsinkaan Euroopassa kovin suurta suosiota. Tämä johtui siitä että 5 GHz:n taajuusalue vapautettiin langattoman verkon käyttöön vasta vuonna 2003, jolloin markkinoille oli jo ehtinyt tulla 802.11g-määrityksen mukaisia laitteita, jotka toimivat lisenssivapaalla 2,4GHz:n taajuudella ja olivat myös alaspäin yhteensopivia vanhempien 802.11b-laitteiden kanssa. 802.11b- ja 802.11g -laitteet olivat suhteellisen pitkään suosituimpia laitetyyppejä markkinoilla.

802.11n-standardi julkaistiin vuonna 2009, mutta jo muutamaa vuotta aiemmin markkinoille ilmestyi laitteita, jotka olivat standardin vedoksen (*draft)* mukaisia. 802.11n-laitteista tuli yleisimpiä markkinoilla olevia laitteita pikkuhiljaa vuosina 2008 - 2010.

Tämän hetkisen viimeisimmän standardiversion 802.11ac:n mukaiset laitteet tulivat markkinoille heti julkaisun jälkeen 2013 ja 2014 taitteessa, mutta vanhemmat 802.11n-

laitteet pysyivät markkinoilla vielä pitkään. Vielä tälläkin hetkellä markkinoilla on 802.11n-laitteita, lähinnä edullisimman pään laitteissa. Kuvassa 9 havainnollistetaan laitteiden elinkaria.



Kuva 9. Eri standardiversion laitteiden elinkaaret.

4.3 Kotiautomaatio ja IoT-laitteet

Viimeisimpien vuosien aikana erilaisten langattomaan verkkoon ja internettiin kytkettävien laitteiden määrä on kasvanut räjähdysmäisesti. Markkinoilla on suuri määrä erilaisia älylaitteita, muun muassa kodinkoneita, sääasemia, valvontakameroita jne. Älylaitteille on yhteistä se, että ne monesti yhdistetään kodin langattomaan verkkoon ja useimmille näistä on saatavilla älypuhelinsovellus, jolla laitetta voi hallita. Yleisin tuettu standardiversio laitteissa on 802.11n 2,4 GHz:n taajuudella, joka selittynee kyseisten tukiasemien suosiolla, vähäisellä kaistantarpeella ja valmistuksessa tarvittavien komponenttien edullisuudella. Joissakin suurempaa kaistanleveyttä vaativissa laitteissa, esimerkiksi valvontakameroissa, on tietenkin tuki myös nopeammille 802.11ac-verkoille. Nykyiset langattomat verkot käyttävät suhteellisen paljon virtaa, kun ajatellaan paristolla tai akulla toimivia laitteita. Tuleva 802.11ax-standardi tuo helpotusta tähän virrankulutusongelmaan mm. Target Wake Time -ominaisuuden myötä.

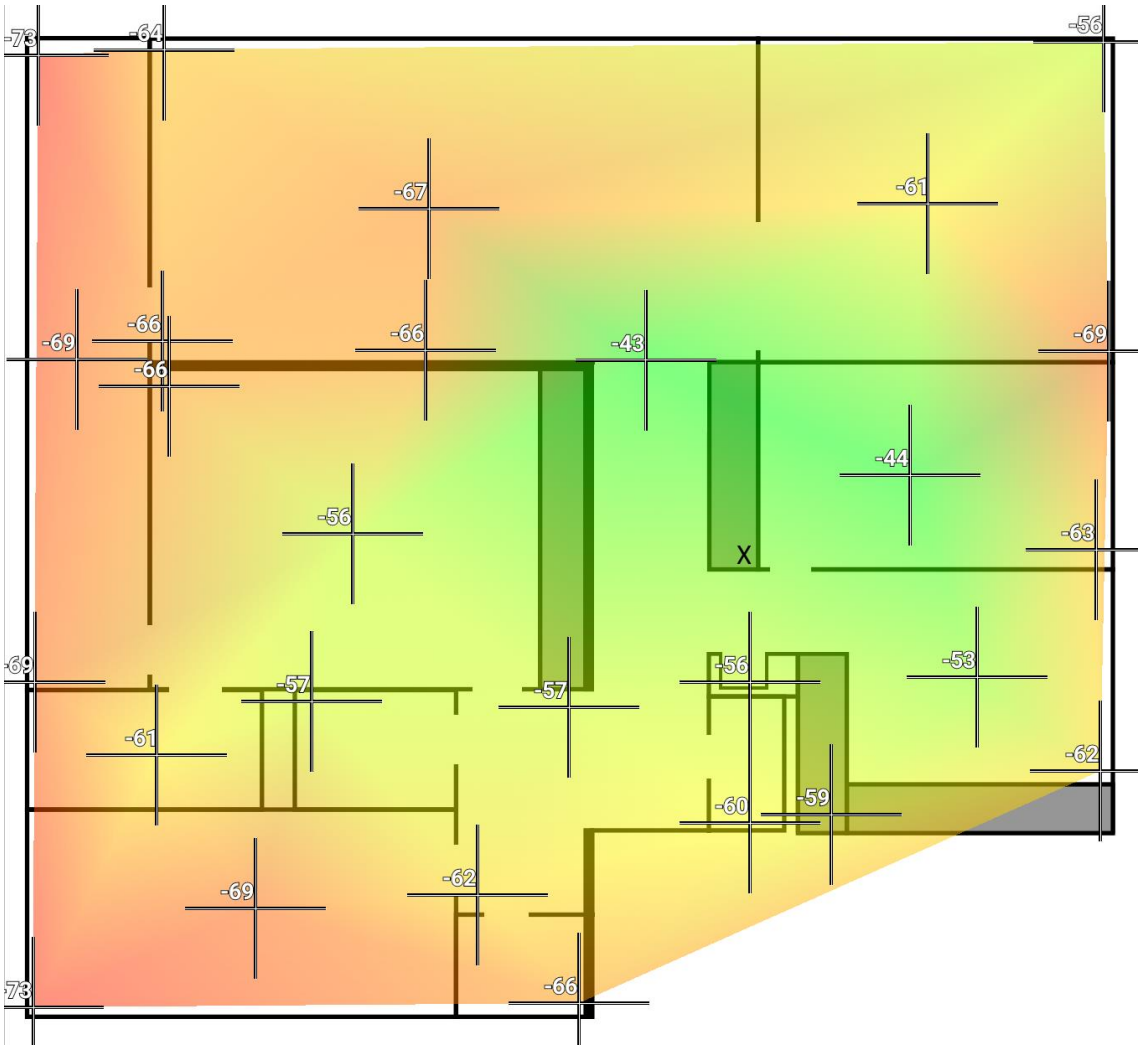
5 Mittaukset

Mittauksissa kartoitettiin langattoman verkon kuuluvuus asuinhuoneistossa 2,4 GHz:n sekä 5 GHz:n taajuusalueilla. Siirtonopeudet testattiin neljässä eri mittauspisteessä molemmilla taajuusalueilla eri kaistanleveyttä ja standardiversiota käyttäen.

Testeissä pyrittiin selvittämään muun muassa, kuinka paljon reaalimaailman olosuhteissa mitatut siirtonopeudet poikkeavat standardissa ilmoitetuista maksiminopeuksista.

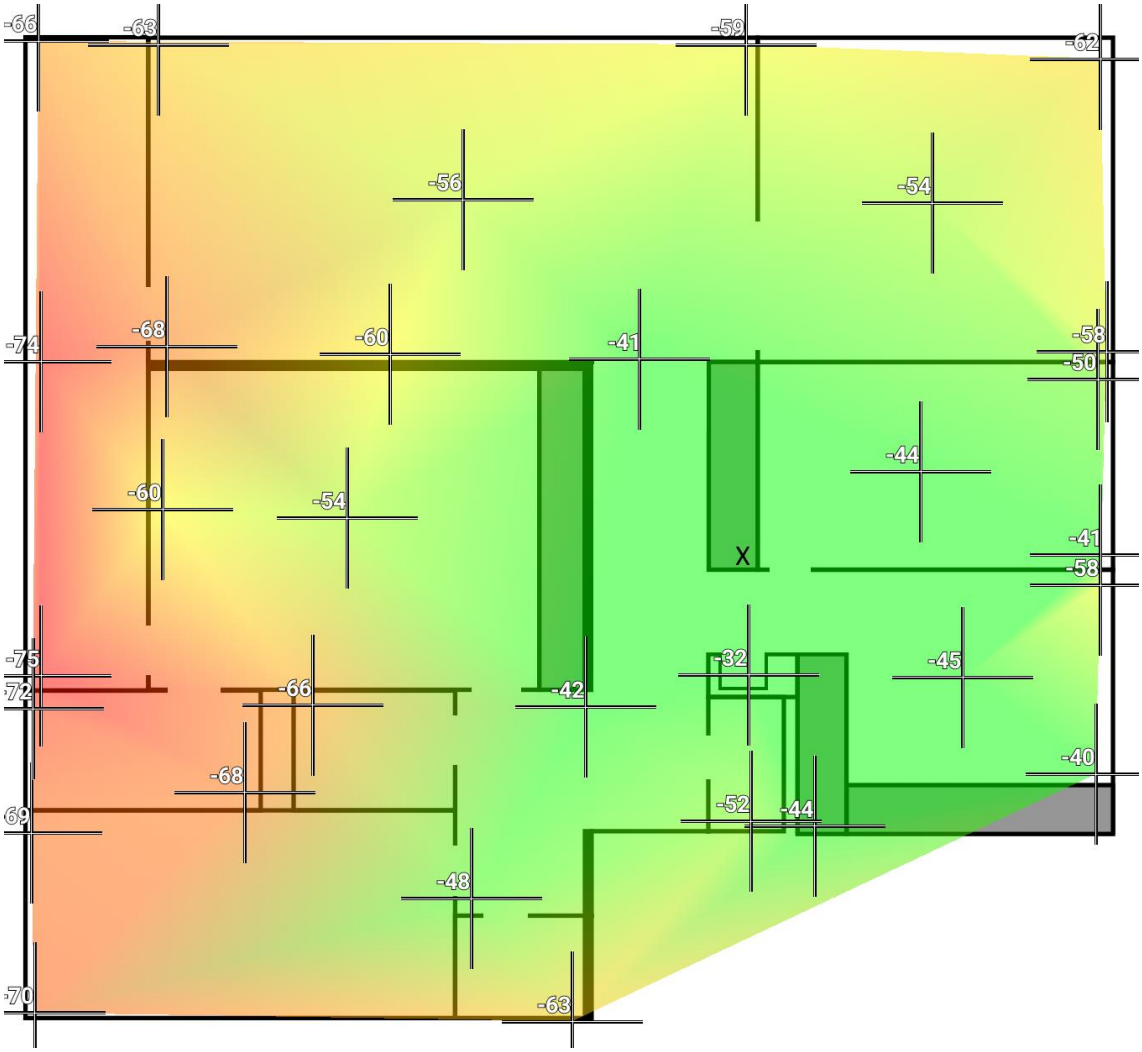
5.1 Kartoitus

Asuinhuoneiston kartoituksessa käytettiin Samsung Galaxy S2 -Android tablettia sekä Wi-Fi Heat Map -ohjelmaa (https://play.google.com/store/apps/details?id=info.wifianalyzer.heatmap). Ohjelmassa valittiin asunnon pohjapiirros ja tämän jälkeen liikutaan laitteen kanssa haluttuun kohtaan ja klikataan kartassa vastaavaa kohtaa. Ohjelma piirtää mittauspisteeseen ruksin ja sen viereen havaitun signaalitehon desibelimilliwatteina. Mittapisteiden välinen väritys saadaan laskennallisesti, eikä se tietenkään ole aivan absoluuttisen oikea, sillä se ei ota huomioon esimerkiksi eri materiaalien, esimerkiksi seinien, vaimentavaa vaikusta.



Kuva 10. Kuuluvuuskartoitus 2,4 GHz:n taajuusalueella.

Kuvasta 10 huomataan, että 2,4 GHz:n taajuudella kuuluvuus ei ole kovin hyvä muualla kuin tukiaseman, merkattuna X:llä, läheisyydessä. Asuinhuoneistossa 2,4 GHz:n taajuusalue on erittäin ruuhkainen ja useat naapureiden langattomat verkot kuuluvat asuntoon ja näin ollen häiritsevät liikennettä. Liitteen 2 kuvat 1 - 4 selventävät tilannetta. Oma verkko on nimeltään *Kalaverkko 2,4.* Kuvat on otettu liitteen 1 mukaisissa mittauspisteissä.



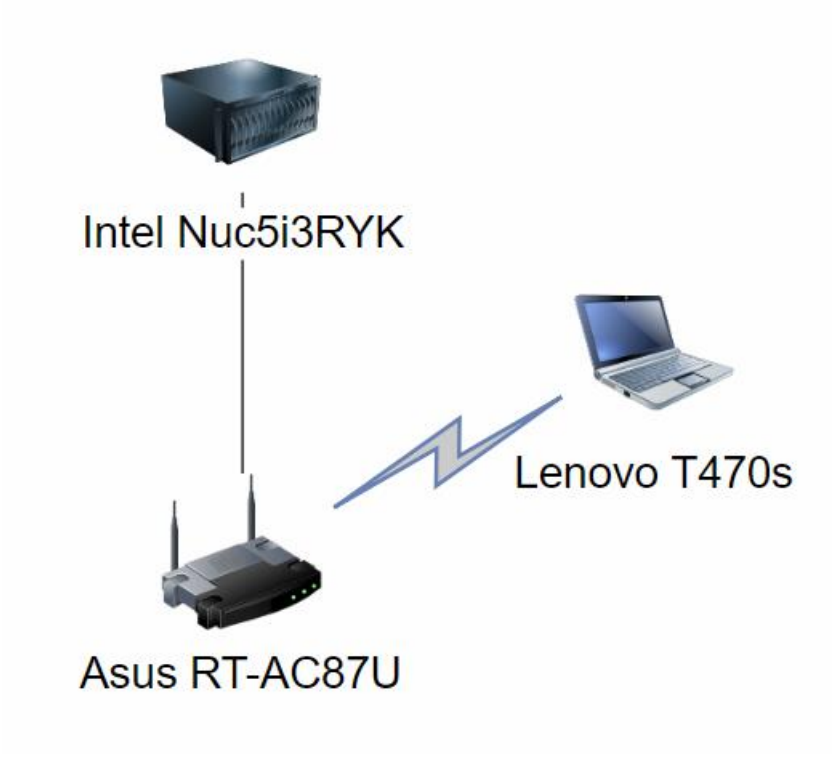
Kuva 11. Kuuluvuuskartoitus 5 GHz:n taajuusalueella.

Samanlainen kartoitus tehtiin 5 GHz:n taajuusalueella, kuva 11. Huomataan, että vaikka 2,4 GHz:n verkko sinänsä on kuuluvuudeltaan ja materiaalin läpisyltään parempi kuin lyhyemmällä aallonpituudella oleva 5 GHz:n verkko, on vihreä alue kartassa kuitenkin laajempi. Liitteen 2 kuvista 4 – 8 käy ilmi, että asuntoon ei kuulu kuin muutamia naapureiden langattomia verkkoja 5 GHz:n taajuusalueella. Oma verkko liitteen kuvissa on *Kalaverkko 5.0.* Voidaan todeta, että tähän verkkoon naapureiden verkot eivät vaikuta sillä

valitulla kanavalla ei ole muita verkkoja. Kuuluvuuden heikentymiseen vaikuttaa siis lähinnä etäisyys sekä materiaalit kuten seinät, kalusteet yms.

5.2 Siirtonopeus

Siirtonopeus mitattiin käyttäen kannettavalla tietokoneella iperf3 (https://iperf.fr) -testiohjelmaa. Iperf3 mittaa verkon siirtonopeutta käyttäjän haluamilla parametreilla. Testiä varten tarvitaan vastaanottava palvelin sekä palvelimeen yhteyttä ottava testikone. Ohjelma on saatavilla mm. Windowsille, OSX:lle, Androidille sekä Linuxille. Palvelimena toimi Asus RT-AC87U reitittimeen verkkokaapelilla kytketty Intel NUC5i3-tietokone. Reitittimen ja palvelimen välisen yhteyden nopeus on 1 Gbit/s. Kuva 12 havainnollistaa testilaitteistoa.



Kuva 12. Testiympäristön kaavakuva.

Laitteiston tekniset tiedot mittauksiin vaikuttavilta osin ovat seuraavat.

Palvelimena toimivassa tietokoneessa, Intel NUC5i3RYK:ssa, ei sikäli ole testin kannalta merkityksellisiä ominaisuuksia. Koneessa on verkkosovittimena gigabitin verkkokortti, joten siitä ei aiheudu pullonkaulaa testeihin. Koneen käyttöjärjestelmä oli Ubuntu 18.03 ja iperf3 -testiohjelman versio 3.1.3. Testiohjelma käynnistettiin seuraavalla komennolla

```
iperf3 –s
```

jossa valinta -s tarkoittaa, että ohjelma toimii palvelintilassa (*server*).

Testikoneena toimi Lenovo T470s -kannettava tietokone. Koneessa on langattoman verkon sovittimena Intel Dual Band Wireless-AC 8265 –sovitin, jossa on kaksi antennia sekä tuki kahdelle MIMO -kanavalle (2x2) [10]. Testikoneella suoritettiin komento

```
iperf3 –c 192.168.1.2 –n 1G
```

jossa valinta -c tarkoittaa asiakastilaa (*client)*, IP-osoite on palvelimen osoite ja valinta -n 1G tarkoittaa että siirrettävien tavujen määrä on 1 gigatavu. Yllä mainitulla komennolla mitattiin siirtonopeus testikoneelta palvelimelle päin. Mittauksissa suunta merkattu (UL) *Upload.* Komennolla

```
iperf3 –c 192.168.1.2 –n 1G –R
```

joka on muuten sama kuin aiempi, mutta valinta -R (*reverse)* meinaa, että palvelin lähettää dataa testikoneelle. Mittauksissa suunta merkattu (DL) *Download.* Ohjelmassa voi määritellä runsaasti muitakin asetuksia, mutta tässä testissä annettiin muiden asetusten olla ohjelman vakioasetuksilla.

Langattoman verkon tukiasemana ja reitittimenä toimii Asus RT-AC87U. Reitittimessä on neljä antennia, tuki kolmelle MIMO-kanavalle (3 x 3) 2,4 GHz:n toiminnassa ja neljälle MIMO-kanavalle (4 x 4) 5 GHz:n toiminnassa [11]. Tukiaseman asetuksia muutettiin kaistanleveyden, kanavan sekä käytetyn tekniikan osalta. Käytössä oli normaalin pituinen suojaväli (GI). Muut tukiaseman asetukset olivat oletusasetuksilla.

Mittaukset suoritettiin liitteen 1 mukaisissa mittauspisteissä erilaisilla liitteen 3 mukaisilla tukiaseman asetuksilla. Jokaisessa mittauspisteessä testiohjelmalla lähetettiin ja vastaanotettiin 1 gigatavun verran dataa ja otettiin ohjelman ilmoittama siirtonopeus ylös.

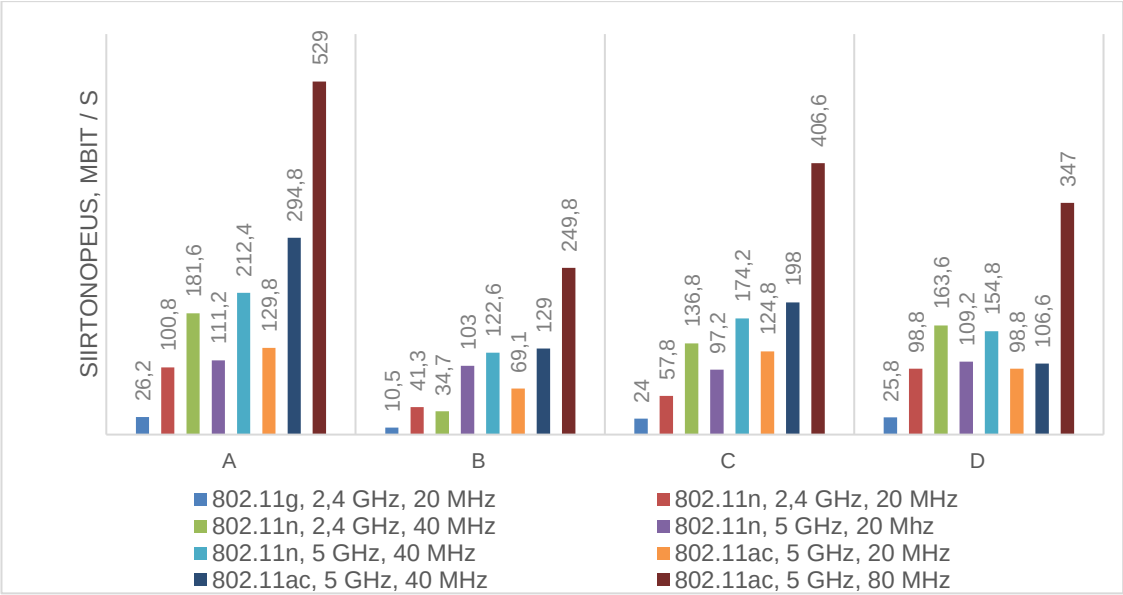
Mittaukset toistettiin viisi kertaa molempiin suuntiin. Tuloksista lasketaan mittausten keskiarvo jokaiselle mittauspisteelle eri asetuksilla. Saadaan taulukon 8 mukaiset siirtonopeudet Mbit/s.

Tukiasema, merkattu X:llä, sijaitsee lastulevystä valmistetussa kaapissa. Kaappi on merkattu liitteen 1 kuvaan harmaalla alueella. Mittauspiste A sijaitsi tukiaseman välittömässä läheisyydessä, etäsyys tukiasemaan noin 1,5 m ja välissä tuo edellä mainittu lastulevy sekä kevytbetoninen väliseinä. Mittauspiste B:n ja tukiaseman välissä oli välimatkaa noin 10 m ja väliin mahtui useampia väliseiniä sekä mm. kylpyhuone. Välimatkaa mittauspisteeseen C oli noin 7 m. Tukiaseman ja mittauspisteen välissä oli paksumpi kantava seinä, liitteen 1 kuvassa paksummalla viivalla merkitty, joka hieman varjosti mittauspistettä. Mittauspisteen D ja tukiaseman välissä oli yksi kevyt väliseinä sekä jonkin verran huonekaluja.

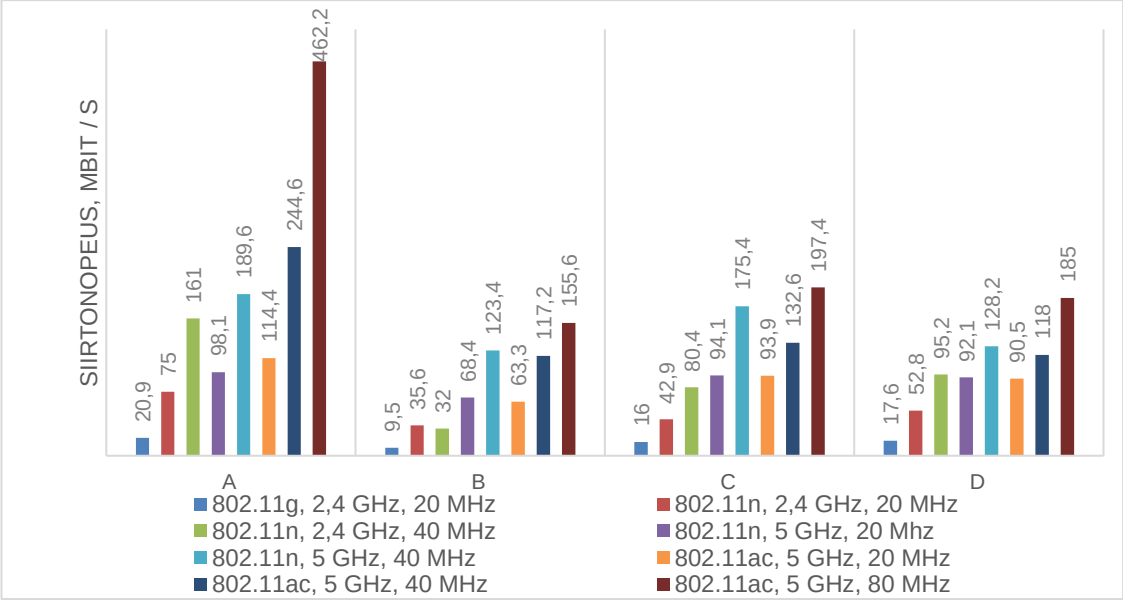
Taulukko 8. Siirtonopeudet mittauspisteissä, Mbit/s.

Mittauspiste **Asetukset**	**A** **DL**	**A** **UL**	**B** **DL**	**B** **UL**	**C** **DL**	**C** **UL**	**D** **DL**	**D** **UL**
802.11g, 2,4 GHz, 20 MHz	26,2	20,3	10,5	9,5	24,0	16,0	25,8	17,6
802.11n, 2,4 GHz, 20 MHz	100,8	75,0	41,3	35,6	57,8	42,9	98,8	71,9
802.11n, 2,4 GHz, 40 MHz	181,6	161,0	34,7	32,0	136,8	80,4	163,6	95,1
802.11n, 5 GHz, 20 MHz	111,2	98,1	103,0	68,4	97,2	94,1	109,2	92,1
802.11n, 5 GHz, 40 MHz	212,4	189,6	122,6	123,4	174,2	175,4	154,8	128,2
802.11ac, 5 GHz, 20 MHz	129,8	114,4	69,1	63,3	124,8	93,9	98,8	90,5
802.11ac, 5 GHz, 40 MHz	294,8	244,6	129,0	117,2	198,0	132,6	106,6	118,0
802.11ac, 5 GHz, 80 MHz	529,0	462,2	249,8	155,6	406,6	197,4	347	185,0

Taulukon 8 siirtonopeudet esitettynä pylväsdiagrammeina kuvissa 13 ja 14.



Kuva 13. Siirtonopeudet palvelimelta testikoneelle mittauspisteissä.



Kuva 14. Siirtonopeudet testikoneelta palvelimelle mittauspisteissä.

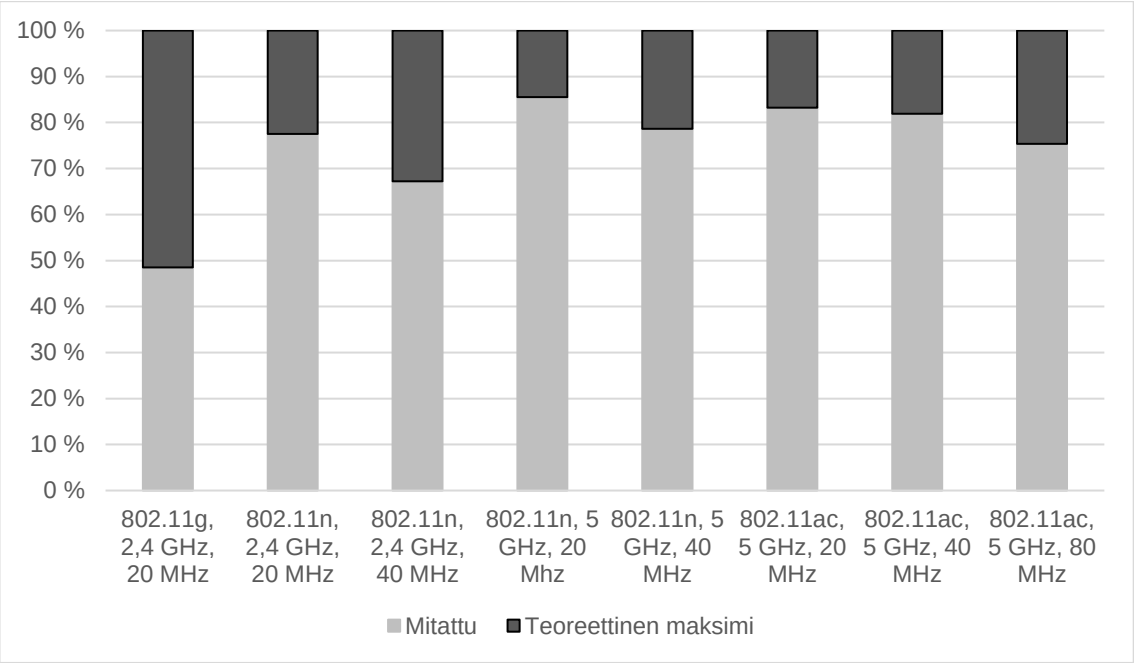
Mittauspisteen A arvoja vaikuttavat järkeenkäyviltä suhteutettuna siihen, kuinka lähellä tukiasemaa mittauspiste sijaitsee. Arvot ovat oletettuja suhteessa toisiinsa ja esimerkiksi 802.11n-verkossa siirtonopeus samalla kaistanleveydellä on samaa suuruusluokkaa molemmilla taajuusalueilla. Pienet erot 5 GHz:n taajuusalueella toimivan verkon hyväksi johtunee 2,4 GHz:n alueella kuuluvista muista verkoista.

Käytetyssä testikannettavassa on tuki kahdelle MIMO-kanavalle, joten voidaan ilmoittaa testissä olleiden laitteiden teoreettinen maksimibittinopeus yhteydelle. Maksiminopeudet testissä olleille asetuksille on esitetty taulukossa 9.

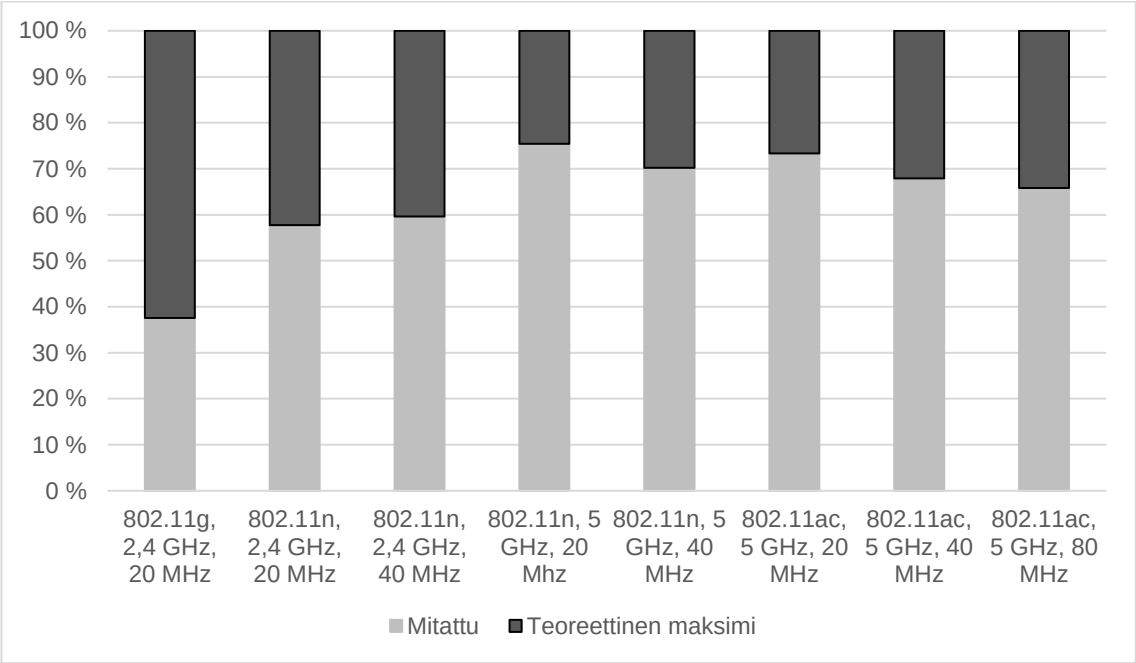
Taulukko 9. Teoreettiset maksiminopeudet käytetyllä laitteistolla.

Tukiaseman asetukset	Siirtonopeus, Mbit/s
802.11g, 2,4 GHz, 20 MHz	54
802.11n, 2,4 GHz, 20 MHz	130
802.11n, 2,4 GHz, 40 MHz	270
802.11n, 5 GHz, 20 MHz	130
802.11n, 5 GHz, 40 MHz	270
802.11ac, 5 GHz, 20 MHz	156
802.11ac, 5 GHz, 40 MHz	360
802.11ac, 5 GHz, 80 MHz	702

Verrataan teoreettisia maksimiarvoja mittauspiste A:n arvoihin laskemalla, kuinka monta prosenttia maksimiarvosta saavutettiin. Vertailu esitetty pylväsdiagrammina kuvissa 15 ja 16. Testiohjelmalla ei koskaan voida saavuttaa maksimi bittinopeutta, sillä hyötydatan (mitattu nopeus) lisäksi siirtokanavaa pitkin pitää siirtää mm. ethernet-verkon kehysdataa, IP-verkon kehysdataa, virheenkorjausdataa jne.



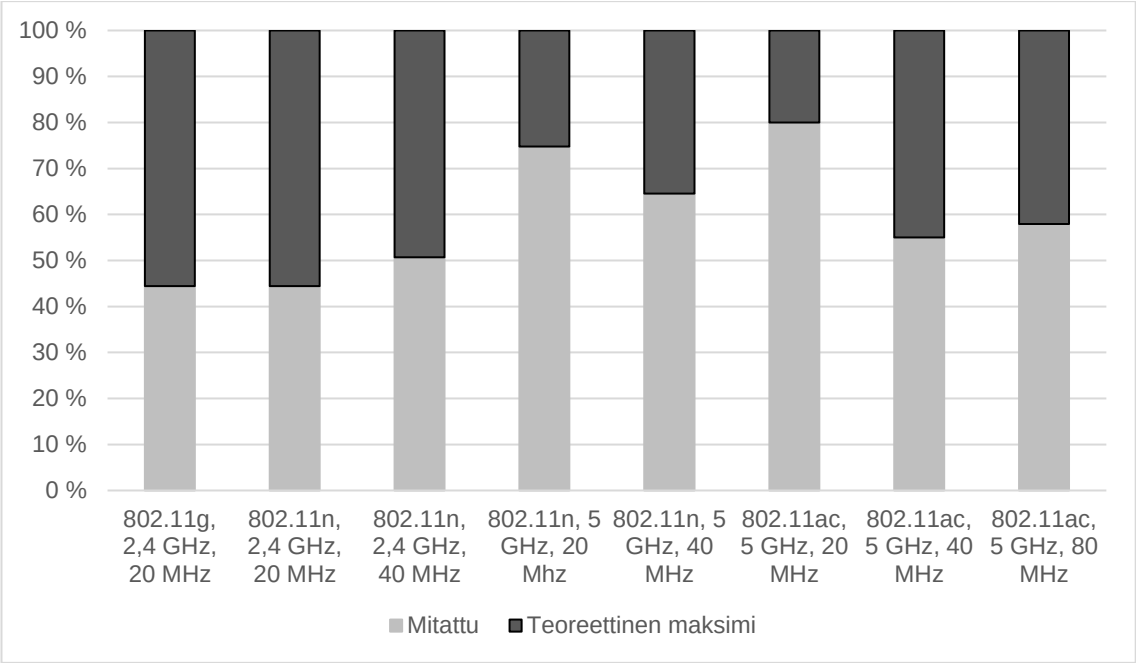
Kuva 15. Mittauspisteessä A saavutettu siirtonopeus lataussuunnassa suhteessa teoreettiseen maksimiin.



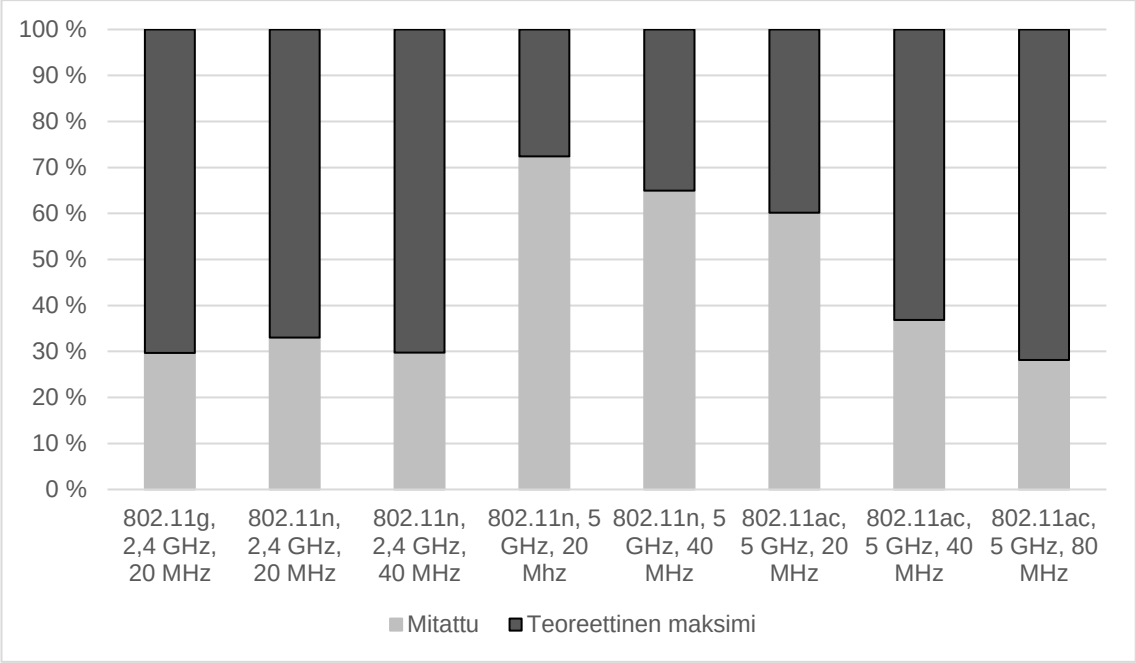
Kuva 16. Mittauspisteessä A saavutettu siirtonopeus lähetyssuunnassa suhteessa teoreettiseen maksimiin.

Siirtonopeudessa saavutetaan noin 65…80 % hyötysuhde 5 GHz:n taajuudella toimivissa verkoissa, yhteys toimii hieman paremmin lataussuunnassa. 2,4 GHz:n taajuudella jäädään hieman alemmas, lataussuunnassa 65…75 % hyötysuhteeseen ja lähetyssuunnassa noin 60 % hyötysuhteeseen. 802.11g-verkon hyötysuhde jää molemmissa suunnissa noin 40…50 % luokkaan.

Mittauspiste C kuvastaa parhaiten keskimääräistä käyttöpistettä asuinhuoneistossa. Se ei ole aivan kiinni tukiasemassa, mutta ei myöskään ihan perimmäisessä nurkassa. Kuvat 17 ja 18 esittävät samanlaisen vertailun maksimiarvoihin mittauspisteessä C.



Kuva 17. Mittauspisteessä C saavutettu siirtonopeus lataussuunnassa suhteessa teoreettiseen maksimiin.



Kuva 18. Mittauspisteessä C saavutettu siirtonopeus lähetyssunnassa suhteessa teoreettiseen maksimiin.

Huomataan että etäisyyden ja häiriötekijöiden kasvaessa 5 GHz:n taajuusalueella toimivien verkkojen hyötysuhde laskee lähetyssuunnassa sitä mukaa, kun kaistanleveys kasvaa. 802.11n-verkko 5 GHz:n taajuusalueella toimii vain hieman heikommalla hyötysuhteella verrattuna mittauspisteeseen A. 2,4 GHz:n taajuusalueella toimivat verkot häiriintyvät huomattavasti muista samalla taajuusalueella olevista verkoista ja hyötysuhde on noin 30 % luokkaa lähetyssuunnassa ja noin 45 % lataussuunnassa.

5.3 Pohdintaa

Mittauksista käy ilmi varsin selvästi, että markkinoinnissa mainituista tukiaseman maksimisiirtonopeuksista jäädään reaalimaailman käytössä huomattavasti. Siirtonopeustestien aikana huomasin myös, että hyvinkin pienet laitteiden asentojen muutokset vaikuttivat useamman prosentin verran siirtonopeuteen. Testeissä tuli ilmi 2,4 GHz:n taajuusalueen ruuhkaisuus ja toisiaan häiritsemättömien kanavien vähyys. Edellä mainitusta syystä 5 GHz verkon käyttöönotto on erittäin suositeltavaa, mikäli käytetty laitteisto sitä tukee.

Testissä käytetyt laitteet edustavat tällä hetkellä ehkä hieman keskimääräistä laitetta tehokkaampia laitteita. Toki markkinoilla on esimerkiksi useammalla antennilla varustettuja päätelaitteita ja tukiasemia, mutta ne ovat vielä suhteellisen harvinaisia. Varsinkin päätelaitteiden kohdalla tuo tässäkin laitteessa ollut 2x2-antennikonfiguraatio on todella yleinen. Esimerkiksi tässä työssä mitattu tukiasema tukisi 5 GHz:n 802.11n- ja 802.11ac -laitteilla 4x4-konfiguraatiota, joten kapasiteettia vielä olisi.

Lähteet

1 IEEE. 2016. IEEE Standard 802.11-2016.

2 Puska, Matti. 2005. Langattomat lähiverkot. Helsinki: Talentum.

3 KRACK –haavoittuvaisuus. Verkkoaineisto. < https://en.wikipedia.org/wiki/KRACK > Luettu 11.9.2018.

4 Wikipedia PCMCIA. Verkkoaineisto. < https://fi.wikipedia.org/wiki/PCMCIA >Luettu 30.9.2018.

5 Dlink DWA-121. Verkkoaineisto. < https://eu.dlink.com/uk/en/products/dwa-121-wireless-n-150-pico-usb-adapter >Luettu 30.9.2018.

6 Edup EP-AC1621. Verkkoaineisto. < http://www.szedup.com/product-item/802-11ac-dual-band-wifi-usb-3-0-adapter/ >Luettu 30.9.2018.

7 Global market share held by leading smartphone vendors from 4th quarter 2009 to 1st quarter 2018. Verkkoainesto. < https://www.statista.com/statistics/271496/global-market-share-held-by-smartphone-vendors-since-4th-quarter-2009/ > Luettu 20.6.2018.

8 Global Apple iPhone sales from 3rd quarter 2007 to 2nd quarter 2018. Verkkoaineisto < https://www.statista.com/statistics/263401/global-apple-iphone-sales-since-3rd-quarter-2007/ > Luettu 20.6.2018.

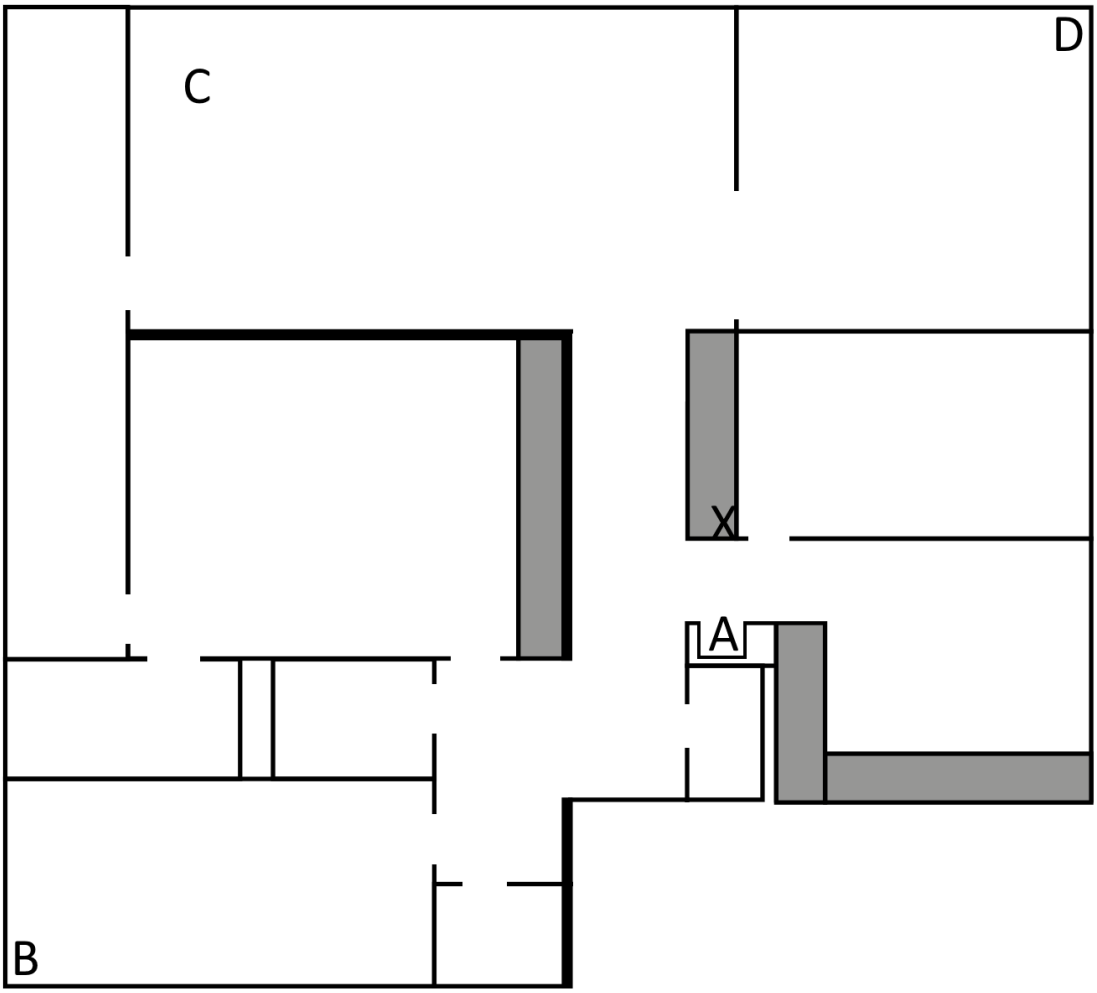
9 Wi-Fi-allianssi. Verkkoaineisto. < https://www.wi-fi.org >

10 Intel® Dual Band Wireless-AC 8265 Specification. Verkkoaineisto. < https://ark.intel.com/products/94150/Intel-Dual-Band-Wireless-AC-8265 > Luettu 24.6.2018.

11 RT-AC87U Specification. Verkkolähde. < https://www.asus.com/us/Networking/RTAC87U/specifications/ > Luettu 24.6.2018.

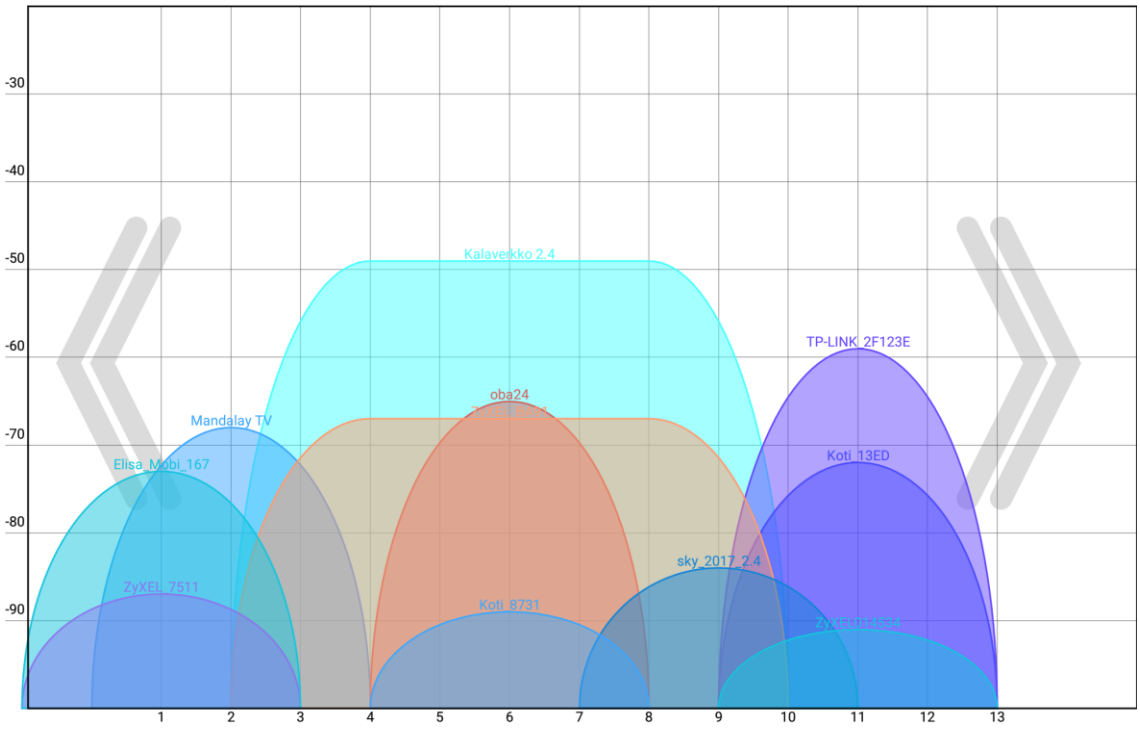
Mittauspisteiden sijainnit

Kirjaimet A, B, C ja D merkkaavat mittauspisteitä joissa langattoman verkon siirtonopeudet ovat mitattu. Tukiaseman sijainti on merkattu X:llä.

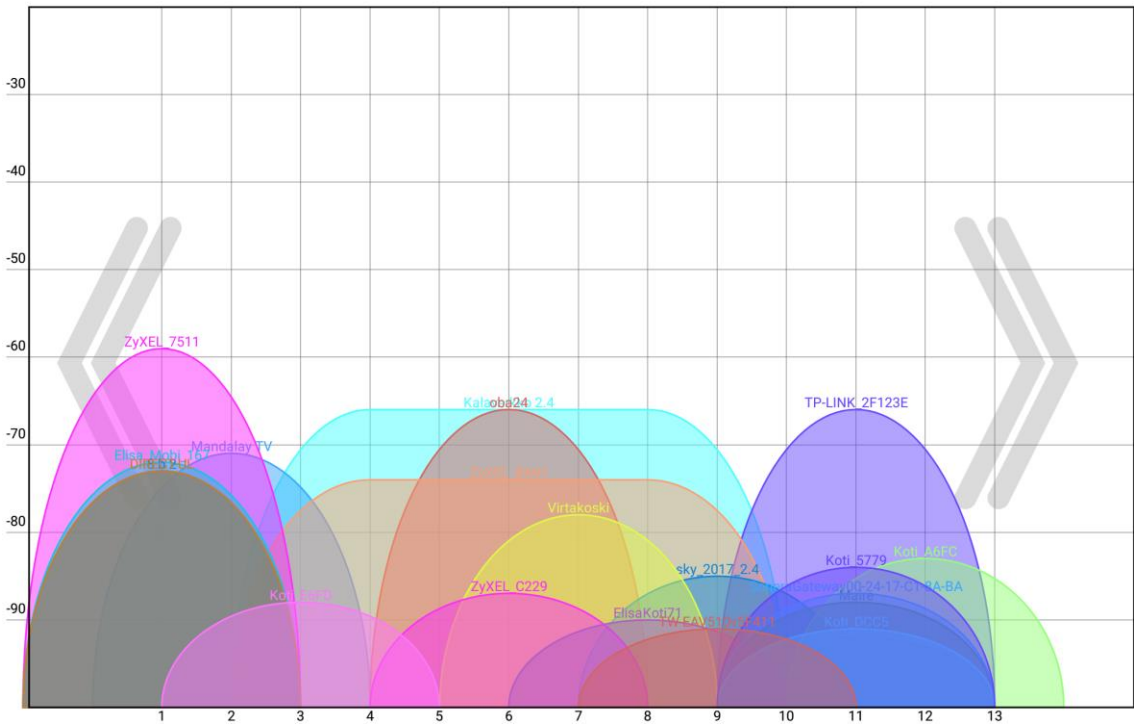


Kanavakartoitus mittauspisteissä

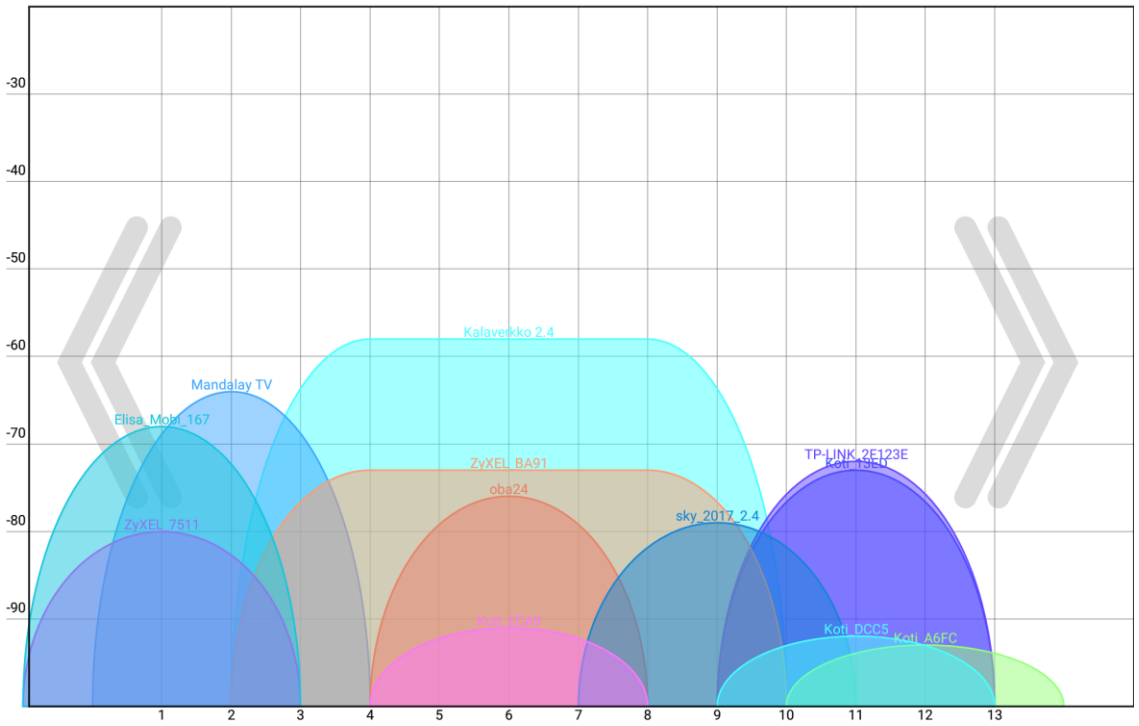
Kuvaruutukaappaukset Wifi Analyzer –ohjelmasta, kuvat 1-8. Mittauspisteet Liitteen 1 mukaisesti.



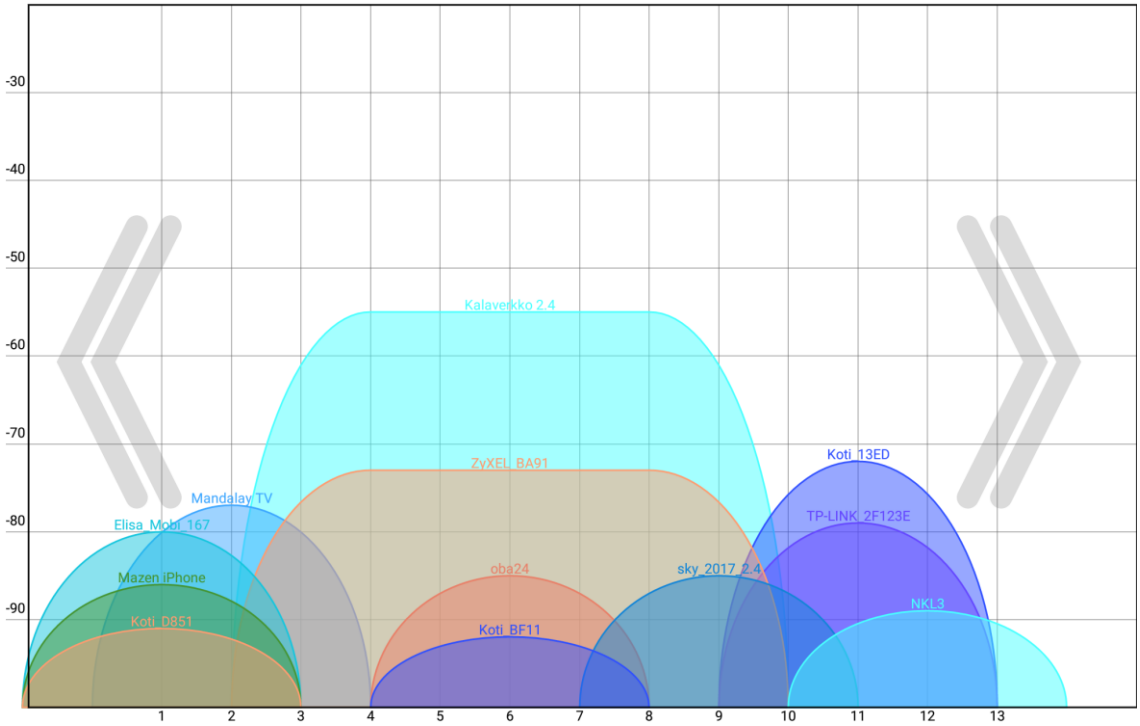
Kuva 1. Mittauspiste A, 2,4 GHz taajuusalue



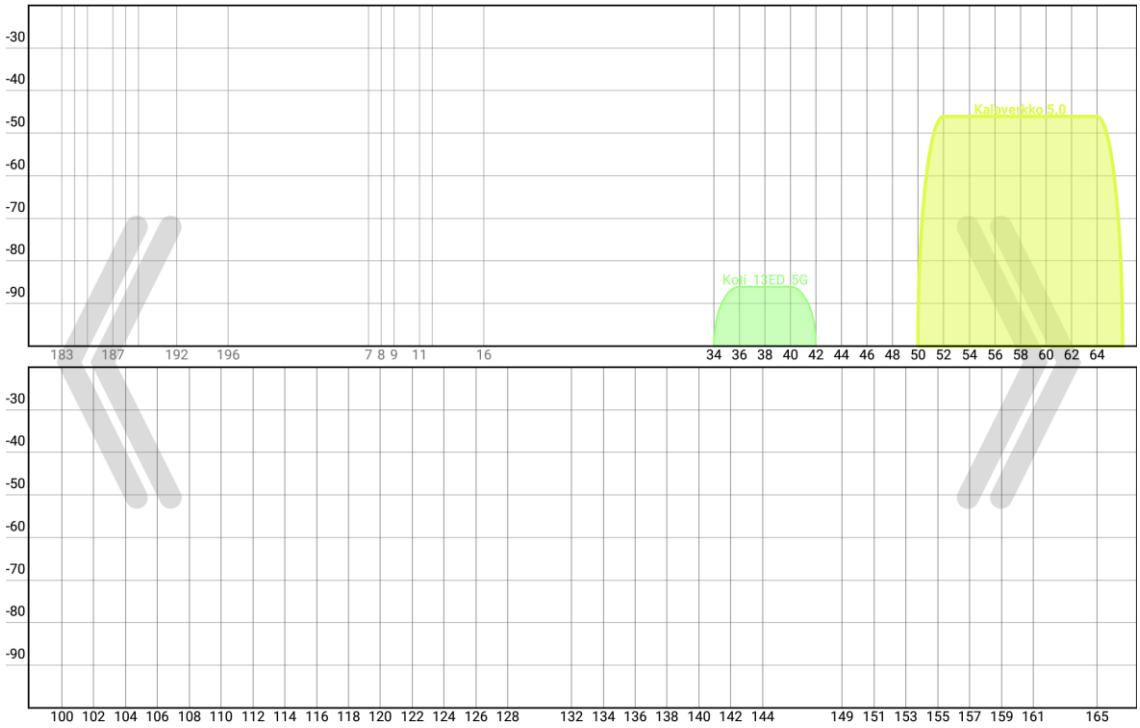
Kuva 2. Mittauspiste B, 2,4 GHz taajuusalue



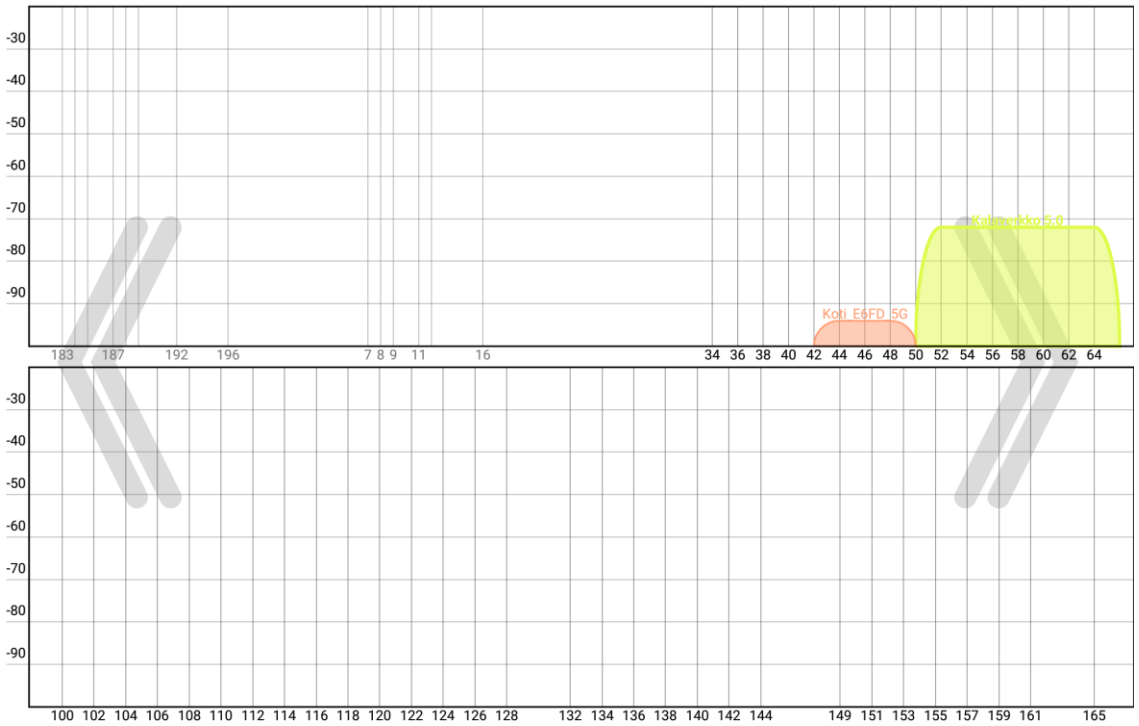
Kuva 3. Mittauspiste C, 2,4 GHz taajuusalue



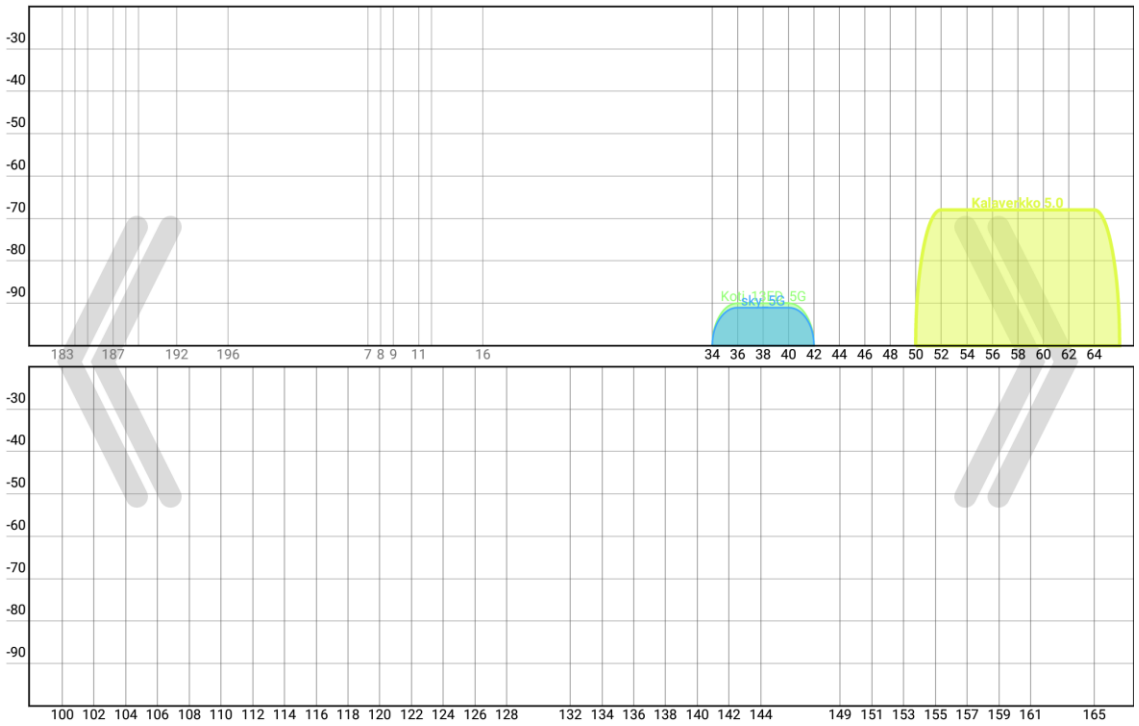
Kuva 4. Mittauspiste D, 2,4 GHz taajuusalue



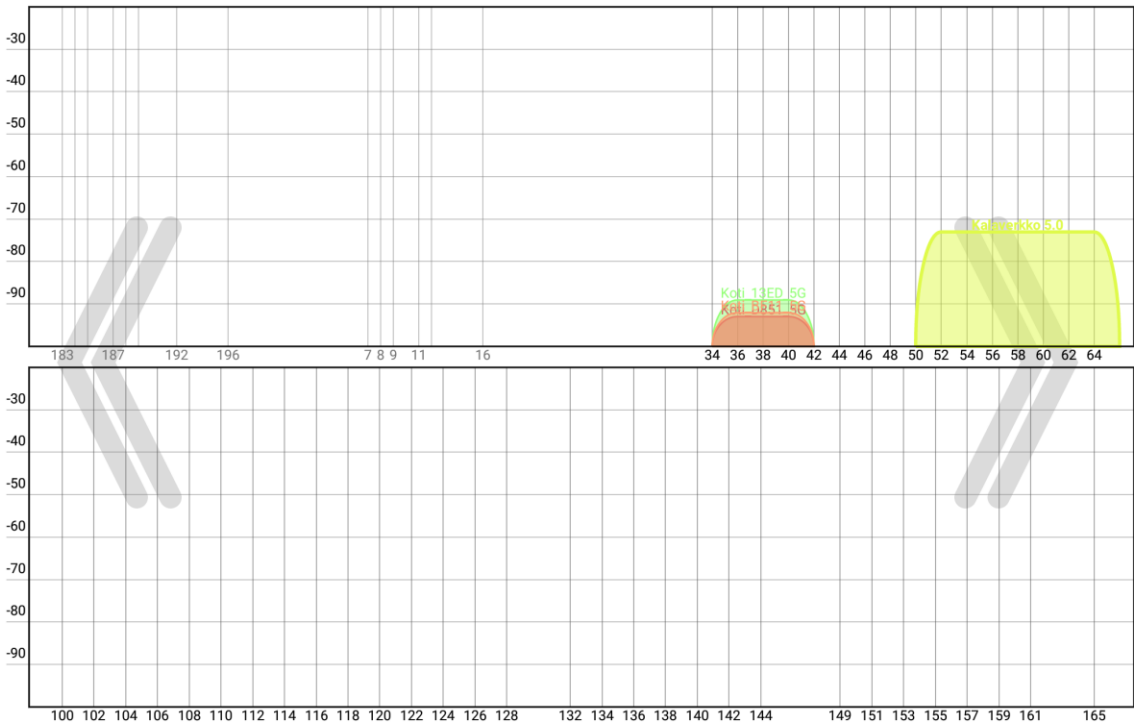
Kuva 5. Mittauspiste A, 5 GHz taajuusalue



Kuva 6. Mittauspiste B, 5 GHz taajuusalue



Kuva 7. Mittauspiste C, 5 GHz taajuusalue



Kuva 8. Mittauspiste D, 5 GHz taajuusalue

Mittauspöytäkirja

WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	2,4 GHz		Kaistanleveys	20 MHz	
Kanava	4		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11b/g / legacy		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G –R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	26,5	20,6	C	24,8	16,6
A	26,0	20,6	C	26,3	15,3
A	25,8	20,5	C	24,4	15,7
A	26,4	20,0	C	24,2	16,1
A	26,3	19,7	C	20,1	16,4
B	9,55	9,94	D	25,6	17,8
B	9,28	12,5	D	26,1	17,6
B	8,31	8,35	D	26,4	17,4
B	9,03	8,31	D	26,7	17,4
B	16,20	8,13	D	24,2	17,6

WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	2,4 GHz		Kaistanleveys	20 MHz	
Kanava	4		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n / N only		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	103	74,1	C	62,2	31,7
A	105	75,0	C	67,5	35,2
A	99,5	74,3	C	45,3	41,4
A	96,6	74,7	C	48,3	36,5
A	99,8	77,1	C	65,5	33,4
B	42,4	35,7	D	102	75,1
B	43,6	34,4	D	98,0	76,1
B	41,6	35,6	D	96,1	75,5
B	38,4	35,9	D	97,7	71,2
B	40,3	36,6	D	100	61,6

WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	2,4 GHz		Kaistanleveys	40 MHz	
Kanava	4+8		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n / N only		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	184	162	C	146	85,4
A	173	160	C	141	75,4
A	183	162	C	142	77,6
A	185	159	C	126	87,8
A	183	162	C	129	75,6
B	35,9	36,1	D	173	99,0
B	38,8	30,6	D	165	96,8
B	36,6	30,9	D	166	97,9
B	29,1	32,4	D	151	96,4
B	33,1	30,0	D	163	85,7

WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	5 GHz		Kaistanleveys	20 MHz	
Kanava	48		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n / N only		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 –n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	113	98,7	C	94,0	92,4
A	110	98,2	C	98,8	93,8
A	112	97,6	C	100	94,0
A	111	98,0	C	92,3	96,2
A	110	97,9	C	101	94,2
B	92,4	75,4	D	106	92,2
B	94,5	78,9	D	109	93,2
B	109	68,5	D	110	91,8
B	109	58,4	D	111	91,1
B	110	60,8	D	110	92,0

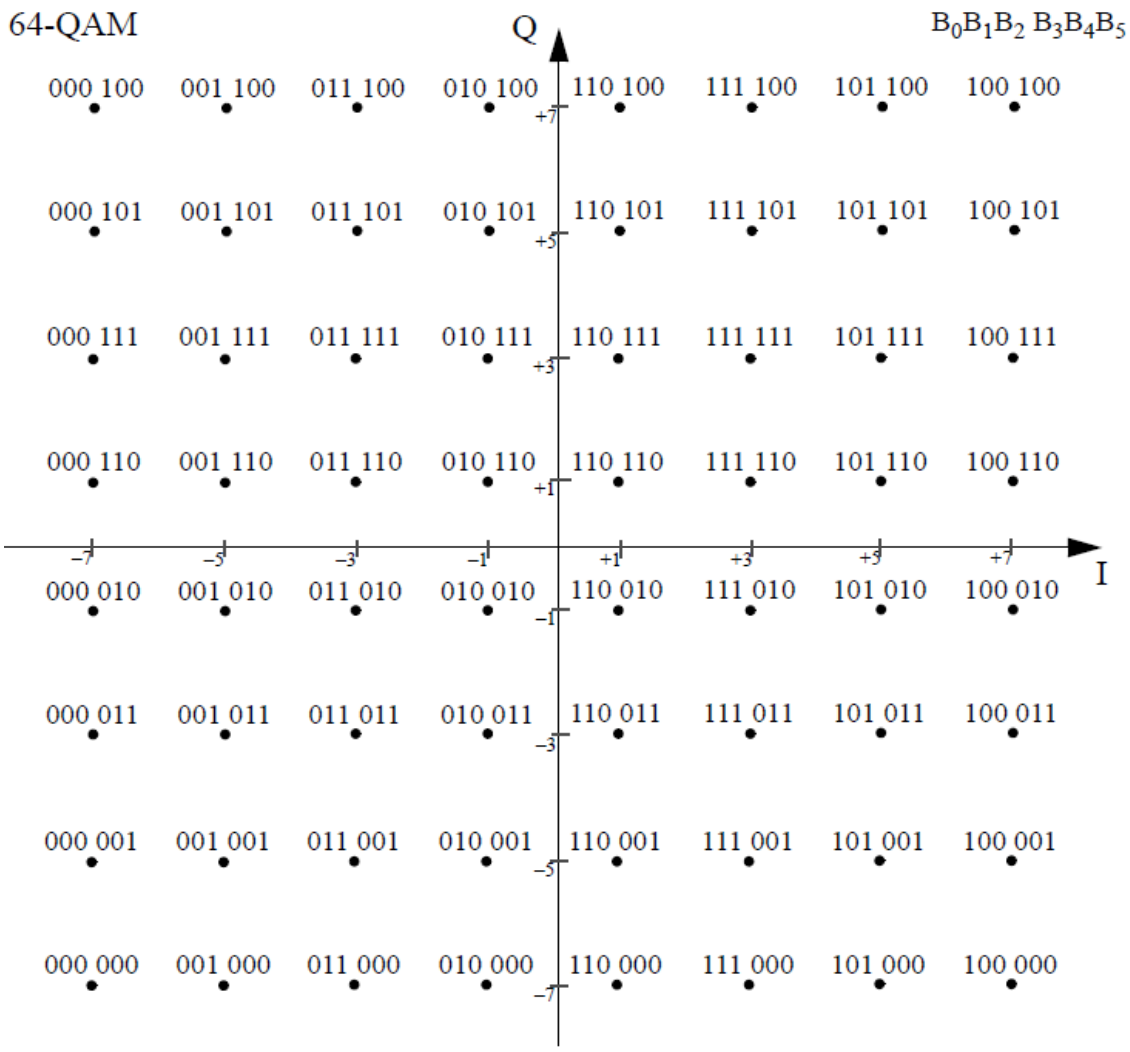
WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	5 GHz		Kaistanleveys	40 MHz	
Kanava	44+48		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n / N only		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 –n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	210	189	C	173	175
A	217	189	C	168	162
A	207	189	C	163	181
A	215	189	C	177	176
A	213	192	C	190	183
B	126	121	D	132	132
B	124	119	D	137	119
B	120	120	D	134	130
B	125	121	D	165	119
B	118	136	D	206	141

WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	5 GHz		Kaistanleveys	20 MHz	
Kanava	48		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n/ac / Auto		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	129	117	C	120	92,4
A	129	115	C	127	94,8
A	131	113	C	127	94,9
A	129	112	C	126	93,9
A	131	115	C	124	93,3
B	70,5	65,3	D	97,9	89,1
B	69,8	63,4	D	99,2	89,2
B	69,9	62,9	D	99,2	91,9
B	65,8	64,7	D	98,9	90,6
B	68,7	60,1	D	98,7	91,6

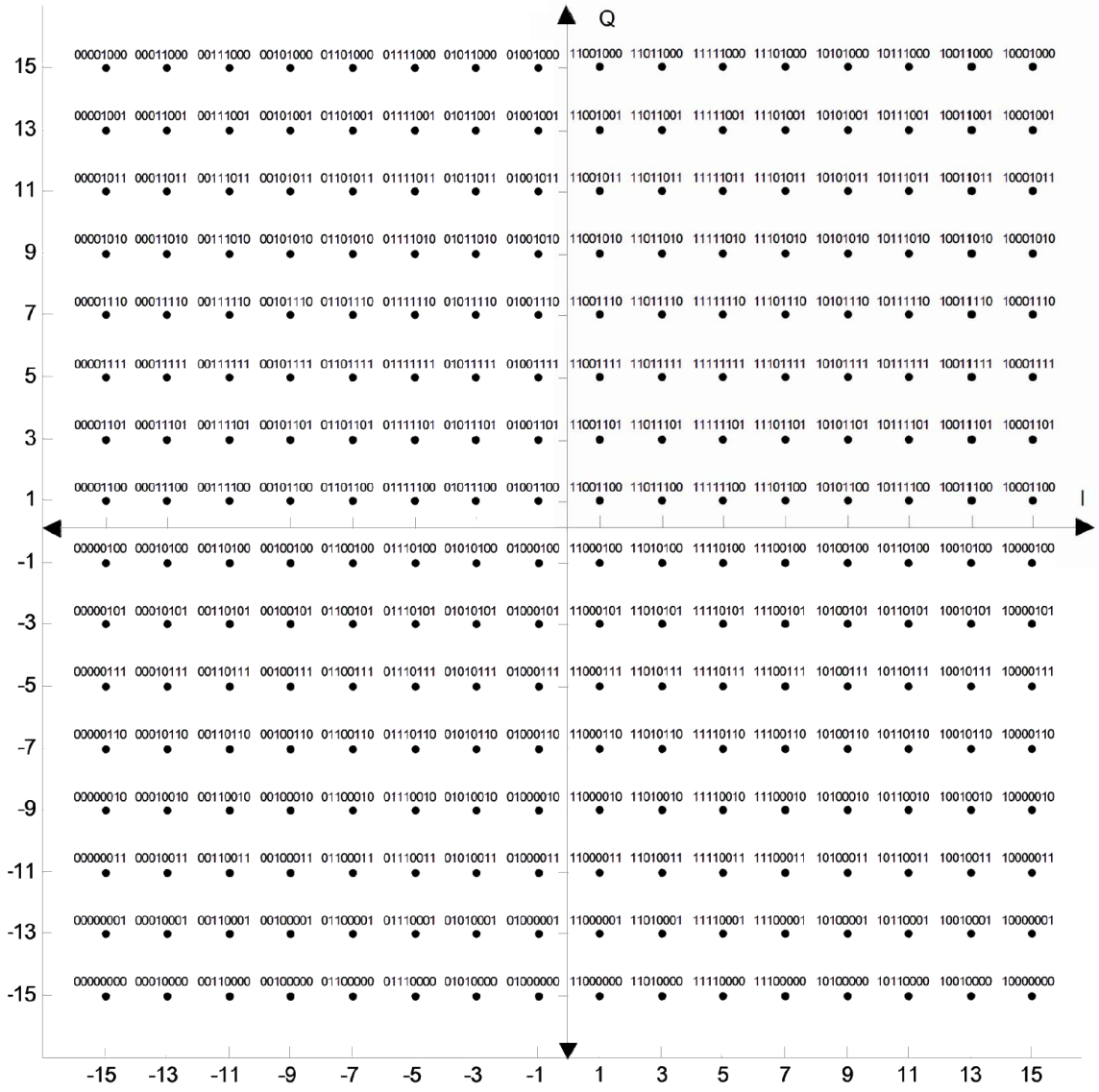
WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	5 GHz		Kaistanleveys	40 MHz	
Kanava	44+48 (46)		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n/ac / Auto		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	296	244	C	196	123
A	298	248	C	197	131
A	293	244	C	202	133
A	287	245	C	198	128
A	300	242	C	197	148
B	116	113	D	156	120
B	132	119	D	164	119
B	134	118	D	166	112
B	132	119	D	156	120
B	131	117	D	161	119

WLAN siirtonopeus					
Päivämäärä	21.6.2018				
Tukiaseman tiedot ja käytetyt asetukset					
Malli	Asus RT-AC87U		Firmware	3.0.0.4.382_50010	
Taajuusalue	5 GHz		Kaistanleveys	80 MHz	
Kanava	100+104+108+112 (106)		Salaus	WPA2	
Wlan tyyppi / asetus	802.11n/ac / Auto		Antennit	2,4 GHz 3x3 5 GHz 4 x 4	
Laitteen tiedot					
Malli	Lenovo T470s		Wlan ominaisuudet	802.11ac	
Verkkosovitin	Intel Dual Band Wireless-AC 8265		Antennit	2x2	
Käyttöjärjestelmä	Ubuntu 18.04				
Testiohjelmien asetukset					
Mittausohjelma	iperf3		Versio	3.1.3	
Komento	UL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G		DL: iperf3 -c 192.168.1.2 -n 1G -R		
Palvelin	Intel NUC i3, Ubuntu 18.04, Gigabit ethernet				
	Siirtonopeus Mbit/s			**Siirtonopeus Mbit/s**	
Mittauspiste	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**	**Mittauspiste**	**Lataus (DL)**	**Lähetys (UL)**
A	538	464	C	394	195
A	524	461	C	408	185
A	536	458	C	412	201
A	527	458	C	408	202
A	520	470	C	411	204
B	249	158	D	351	192
B	266	149	D	361	191
B	255	160	D	349	188
B	237	154	D	338	178
B	242	157	D	336	176

QAM konstelaatiot



Kuva 1. 64-QAM konstellaatio [1, s.2299].



Kuva 2. 256-QAM konstellaatio [1, s.2567].