
**Häiriöiden vaikutukset videosuoratoistoon
IEEE 802.11n -verkossa**



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Tietotekniikka

Riihimäki, syksy 2014

Harri Valkonen



RIIHIMÄKI
Tietotekniikka

Tekijä	Harri Valkonen	Vuosi 2014
Työn nimi	Häiriöiden vaikutukset videosuoratoistoon IEEE 802.11n-verkossa	

TIIVISTELMÄ

Työn tavoitteena oli selvittää koeverkon avulla häiriöiden vaikutuksia videosuoratoistoon IEEE 802.11n-verkossa. Ongelmaa lähestyttiin tutustumalla IEEE 802.11n-verkon fyysiseen kerrokseen ja siinä käytettäviin tekniikoihin. Mahdollisista häiriölähteistä valittiin kirjallisuuden perusteella kokeellisesti tutkittavaksi jatkuvaa kapeakaistaista kantaaltoa 2,4 GHz taajuusalueella lähettävä A/V-lähetin. Videosuoratoiston laadun mitoituksi valittiin kaistanleveys, viiveiden vaihtelut ja subjektiivinen kuvanlaatu.

A/V-lähtetimen lähetystehoksi mitattiin $(3,2 \pm 3,4)$ dBm keskimmaisella kantotaajuudella. A/V-lähtetimen aiheuttamien häiriöiden vaikutuksia IEEE 802.11n-verkkoon mitattiin rivitaloasunnossa Iperf-ohjelmistolla. Mittauksissa havaittiin että 27,7 m:n etäisyydelle asunnon ulkopuolelle sijoitettu A/V-lähetin aiheutti kaistanleveyttä laskevan häiriön verkkoon, mutta videosuoratoistossa häiriöitä ei havaittu. A/V-lähtetimen sijaitessa joko lähempänä asuntoa tai asunnon sisällä verkkoyhteys katkesi. A/V-lähtetimen aiheuttama häiriö katkaisi videosuoratoiston, kun SJR oli pienempi kuin 23 dB. Tulos vastaa kirjallisuudessa IEEE 802.11n-verkoille annettua signaalikohina-suhteen vähimmäistasoa.

Langattomien lähiverkkojen ja videosuoratoiston lisääntyessä on kasvava tarve nopealle ja luotettavalle videosuoratoiston laadun mittaukselle. Jatkossa mittausta voisi kehittää niin, että mittausjärjestelmä yhdistäisi elementtejä sekä verkon suorituskykymittauksista että objektiivisista ja subjektiivisista videon laatumitoista.

Avainsanat video, langattomat lähiverkot, häiriöt, kuvanlaatu, suoratoisto

Sivut 31 s.

Riihimäki
Degree Programme in Information Technology

Author	Harri Valkonen	Year 2014
Subject of Bachelor's thesis	Evaluating the Impact of Interference on Video Streaming over an IEEE 802.11n Network	

ABSTRACT

The aim of study was to evaluate the impact of RF interference on video streaming in a real-world IEEE 802.11n network. To understand video streaming in the wireless network, insights on physical layer technologies are presented. Potential sources of RF interference were evaluated based on information provided in literature. A/V transmitter sending continuous narrow band carrier-wave at 2.4 GHz ISM-band was chosen to be used in the test network. The video quality was evaluated by characterizing bandwidth, jitter and video subjective quality.

The A/V transmitter EIRP was measured to be (3.2 ± 3.4) dBm at the center carrier-wave frequency. Impact of the A/V transmitter interference on video streaming in the IEEE 802.11n network was characterized by Iperf software in a terraced house. It was observed that 27.7 m from the house A/V transmitter interference decreased the bandwidth of the network, but there was no impact on video subjective quality. When the A/V transmitter was brought closer to the house or inside the building, the network connection was interrupted. Interference from the A/V transmitter interrupted the network connection when SJR was less than 23 dB. The result agreed with the recommended minimum SNR figure for IEEE 802.11n network given in the literature.

The growing delivery of high-quality stream content to any device over wireless networks creates a growing need for quick and reliable video quality measurements. The ideal video quality metrics would combine the best elements from the network performance metrics as well as from the objective and subjective video quality metrics.

Keywords wireless networks, interference, video quality, streaming

Pages 31 p.

Termit ja lyhenteet

A/V	Audio/video
BPSK	Binary phase-shift keying, kaksivaihemodulaatiota
FFT	Fast Fourier Transformation
Datavirta	Spatial Stream
DSCQS	Double-stimulus continuous quality-scale,
Dekoodaus	Decoding, prosessi, joka purkaa koodatun videon esitystä varten
DSIS	Impairment scale, vääristymäasteikko
Enkoodaus	Encoding, prosessi, joka valmistaa videon sopivaan muotoon tallennusta ja esitystä varten
EIRP	Equivalent isotropically radiated power, keskimääräinen ekvivalentti isotrooppinen säteilyteho
H.264	H.264/MPEG-4 Part 10 tai AVC (Advanced Video Coding), videonpakkausstandardi
IP	TCP/IP-mallin protokolla, joka huolehtii IP-pakettien toimittamisesta perille pakettikytkentäisessä verkossa.
ISI	Inter Symbol Interference, symbolien välinen häiriö
ISM	Industrial, Scientific and Medical, radiotaajuuskaista, jonka käyttö ei vaadi erillistä lupaa ja on alun perin tarkoitettu teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön
kbits/s	kilo bits per second, 1000 bittiä sekunnissa
Laatuattribuutti	Laatuun vaikuttava tekijä
Mb/s	Tiedonsiirtonopeus 10^6 bittiä sekunnissa
MIMO	Multiple Input Multiple Output, moniantennitekniikka
MPEG-2, MPEG-4	Motion Picture Experts Groupin kehittämä videonpakkausstandardit
MSE	Mean squared error, pikseliero
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing, monikantoaaltomodulointi
QoE	Quality of Experience, koettu laatu

QoS	Quality of Service, palvelun laatu
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying,
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, amplitudi- ja vaihemodulaatiota
PHY	Fyysinen kerros (Physical layer), joka määrittelee tiedonsiirron fyysisen median yli
PSNR	Peak signal-to-noise ratio, huippusignaalikohina-suhde
Referenssivideo	Alkuperäinen vääristymätön video
RF	Radio frequency, radiotaajuus
SJR	Signal to Jammer Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio, signaalikohina-suhde
SSCQE	Single stimulus continuous quality evaluation
STBC	Space-Time Block Coding, tila-aika lohkokoodaus
Datavirta	Spatial stream
TxBF	Transmitter Beam Forming, antennin säteilykuvion hallinta
UDP	User Datagram Protocol
Videosekvenssi	Alkuperäisestä videosta leikattu määrätyn mittainen video
Videon laatu	Siirtojärjestelmän läpi menneen videon ominaispiirre, joka mittaa havaitun videon vääristyneisyyttä
Wi-Fi	Wi-Fi Alliancen tavaramerkki

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	AIHEEN RAJAAMINEN JA TAVOITTEET	1
3	IEEE802.11N -VERKON FYYSSINEN KERROS	2
3.1	Taajuusalueet ja kanavat	5
3.2	Monikantoaalto-modulointi (OFDM).....	6
3.3	Moniantennitekniikka (MIMO)	8
3.4	Antennin säteilykuvion hallinta (TxBF)	9
3.5	Tila-aika lohkokoodaus (STBC)	10
4	VIDEOSUORATOISTON LAADUN ARVIOINTI	11
4.1	Verkon suorituskyky	12
4.2	Objektiiviset laatumitat	13
4.3	Subjektiiiviset laatumitat.....	14
5	HÄIRIÖLÄHTEET	15
6	TUTKIMUSMENETELMÄT	16
6.1	A/V – lähettimen EIRP	18
6.2	Mittaukset rivitalossa	18
7	TULOKSET	21
7.1	A/V-lähettimen EIRP	21
7.2	Kaistanleveys ja viiveiden vaihtelu.....	22
7.3	Signaalin vaimennus ja SJR	23
7.4	Videosuoratoisto.....	25
8	YHTEENVETO	26
9	LÄHTEET	28

1 JOHDANTO

Langaton IP-liikenne ylittää kiinteiden siirtoyhteyksien dataliikenteen vuoteen 2018 mennessä. Vuonna 2018 kiinteät yhteydet edustavat 39 % ja langaton liikenne 61 % IP-liikenteestä (Cisco Visual Networking Index 2014). Mobiililaitteiden suorituskyky mahdollistaa videoiden ja televisio-ohjelmien katsomisen ilman paikkarajoituksia langattoman verkon kuuluvuusalueella. Viime vuosina video on kasvattanut voimakkaasti osuutta mobiilidataliikenteestä. Liikenteen kasvun takana on videopalveluiden, kuten Netflix, voimakas kasvu. Videokuvan siirto asettaa siirtotien laadulle ja kaistanleveydelle kovia vaatimuksia. Tästä syystä Wi-Fi-verkkojen, joihin myös IEEE 802.11n kuuluu, osuus langattomasta tiedonsiirrosta tulee kasvamaan. (Bauer, Grawert & Schink 2012, 62.)

Kodeissa yleistyvät erilaiset kodin automaatioon ja valvontaan liittyvät laitteet, jotka toimivat samoilla taajuusalueilla kuin Wi-Fi-verkot (Home Theater Network www-sivut 2014). Lähekkäin olevat Wi-Fi-verkot häiritsevät toisiaan erityisen 2,4 GHz taajuusalueella. Lisäksi kodin muu elektroniikka saattaa aiheuttaa häiriöitä Wi-Fi-verkoille. Videosuoratoisto on erityisen herkkä erilaisille siirtotien häiriöille. (PCWorld www-sivut 2014.)

2 AIHEEN RAJAAMINEN JA TAVOITTEET

Työn tavoitteena on selvittää kokeiden avulla häiriöiden vaikutuksia videosuoratoistoon IEEE 802.11n-verkossa kotiympäristössä. Koetta varten rakennetaan 2,4 GHz taajuusalueella toimiva IEEE 802.11n-verkko. Häiritsevän verkkona käytetään matalatehoista A/V-lähetintä, joka on suunniteltu käytettäväksi valvontakameroissa. Häiriöiden vaikutuksia arvioidaan sekä mittaamalla koeverkon siirtonopeutta ja viiveitä että videon laatua subjektiivisesti arvioimalla.

Koska häiriöt ovat tässä tarkastelussa radiotaajuisia, keskitytään teoreettisessa tarkastelussa IEEE 802.11n-verkon fyysisen kerroksen (PHY). Lisäksi käsitellään lyhyesti radiotaajuisia ilmiöitä niiltä osin kuin niiden ymmärtäminen on oleellista kokonaisuuden kannalta.

Internet -palvelun laadun (QoS) tarkastelu jätetään kokeellisessa osassa vähäiseksi. Lähdemateriaalin laatu ja kiinnostavuus vaikuttavat subjektiiviseen videon laatuarvioihin. Tästä syystä vertailumateriaalina käytetään videokokoelmaa, joka sisältää erilailla vääristyneitä videoita ja niiden subjektiivisia arvioita. Tarkastelussa keskitytään ainoastaan videokuvan laatuattribuutteihin. Sekä äänentoiston laatuun että kuvan ja äänen synkronointiin liittyvät kysymykset jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

3 IEEE802.11N -VERKON FYYSINEN KERROS

IEEE 802.11n -standardilaajennus julkaistiin vuonna 2009 (IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee www-sivut 2014). Merkittävin lisäys edellisiin laajennuksiin oli monikanta-aaltomodulointitekniikan (OFDM) yhdistäminen moniantennitekniikkaan (MIMO) (Perahia 2008, 51).

IEEE 802.11n-verkon fyysinen kerros perustuu radioaaltoihin, jotka ovat energiaa kuljettavaa sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettinen säteily on sähkömagneettisen kentän aaltoliikettä, jossa sähkömagneettiset aallot muodostuvat nopeasti värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Radioaalloilla on taajuus, joka kertoo sekunnissa tapahtuneiden värähdysten määrän. IEEE 802.11n -standardiin pohjautuvat lähiverkot toimivat 2,4 GHz ja 5 GHz taajuusalueilla. Radioaallon sisältämän energian määrää ilmaistaan värähtelyn amplitudilla. Radioaallot vaimenevat edetessään ilmassa ja erilaisten esteiden vaikutuksesta. Vapaassa tilassa vaimeneminen on suhteessa etäisyyteen ja taajuuteen. Jos lähetysantennin oletetaan olevan isotrooppinen eli säteilevän joka suuntaan yhtä paljon, pallomaisesti kasvavan etäisyyden ja antennin sieppauspinta-alan vaikutukset yhdistyvät laskettaessa vapaan tilan vaimennus Friisin yhtälöllä. (Semtech 2007.)

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad (1)$$

, missä

λ = aallonpituus (m)

d = lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys (m)

f = taajuus (Hz)

c = valon nopeus (tyhjiössä 2.99792458×10^8 m/s)

Käytännön laskemisen helpottamiseksi vaimenemista käsitellään desibeleinä (dB).

$$\begin{aligned} L(\text{dB}) &= 10 \log_{10} \left[\left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \right] = \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} df \right) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Mikäli etäisyyden d yksiköksi valitaan metri (m) ja taajuuden f yksiköksi megahertsi (MHz) saadaan.

$$L(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 27,55 \quad (3)$$

Paras signaali saavutetaan, kun antennien välillä on mahdollisimman vähän esteitä. Esteiden ja seinien aiheuttamaa vaimennusta on hyvin vaikea määrittää matemaattisesti. Vaimenemista voidaan kuitenkin arvioida kokeisiin perustuvilla malleilla, joista esimerkkinä on kaava 4. (Lloret, López, Turró & Flores 2004, 408.)

$$L(\text{dB}) = L_0 + 20 \log_{10}(d) + \sum_{i=0}^i K_i F_i + \sum_{j=0}^j I_j W_j + L_{\text{ms}} \quad (4)$$

, missä

L_0 = tehohäviö (dB) 1 m etäisyydellä
(40,3 dB 2,468 GHz taajuudella)

d = lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys

K_i = signaalitiellä olevat lattiat

F_i = yhden lattian vaimennus

I_j = signaalitiellä olevat seinät

W_j = yhden seinän vaimennus

L_{ms} = monitie-etenemisestä aiheutuva vaimennus

Ikkunat ja puu vaimentavat signaalia melko vähän, tiili vaimentaa melko paljon ja betoni- ja kivivalmisteisilla rakennusmateriaaleilla vaimennukset ovat merkittäviä. Vaimennukset kasvavat käytännössä kaikilla materiaaleilla taajuuden kasvaessa. Radiosignaalit etenevät sisätiloissa heijastusten, läpäisyn, sironnan ja taittumisen avulla. Rakennusmateriaalien lisäksi vaimennus riippuu langattoman reitittimen sijainnista rakennuksessa. (Niemelä, Asp, & Sydorov 2012, 9.)

Sähkömagneettista säteilyä syntyy ihmiskunnan toiminnasta sekä tarkoituksellisesti että tahattomasti erilaisina haja- ja vuotosäteilynä. Planckin lain mukaan kaikki kappaleet, joiden lämpötila ylittää absoluuttisen nollapisteen lämpötilan, lähettävät ympäristöönsä säteilyenergiaa. Luonnon sähkömagneettinen säteily on useimmiten laajakaistaista tai satunnaisia esimerkiksi ukkosen aiheuttamia lyhytkestoisia piikkejä. Laajakaistaista sähkömagneettista säteilyä kutsutaan kohinaksi ja kapeakaistaista säteilyä häiriöiksi. Koska ympäristössä on jatkuvasti kohinaa, on signaalin amplitudin oltava riittävän voimakas kohinaan verrattuna. (Jessner 2013, 254.) Hyötysignaalin ja kohinan tehojen suhdetta ilmaistaan signaalikohinasuhteella (SNR) (Carpenter 2008, 74).

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signaali}}}{P_{\text{kohina}}} \right) \quad (5)$$

,missä

P_{signaali} = signaaliteho

P_{kohina} = kohinateho

Digitaalisessa tiedonsiirrossa SNR määrittelee ylärajan käytettävissä olevalle tiedonsiirtonopeudelle (Kosola & Solante 2013, 99).

Taulukossa 1 IEEE 802.11n -verkolle on määritelty yhteyden SNR:lle suositellut vähimmäistasot. SNR:n heikentyminen laskee saavutettavissa olevaa siirtonopeutta. (Cisco Wireless Mesh Access Points...2013, 58.)

Taulukko 1. Suositeltu SNR:n vähimmäistaso IEEE 802.11n – verkossa eri modulaatioilla. Symbolinopeusmerkinnän osoittaja on informaatiobittien määrä ja nimittäjä on informaatiobittien ja virheenkorjausbittien summa.

Modulaatio ja symbolinopeus	Minimi SNR (dB)
BPSK 1/2	9.3 dB
QPSK 1/2	11.3 dB
QPSK 3/4	13.3 dB
16QAM 1/2	17.3 dB
16QAM 3/4	21.3 dB
64QAM 2/3	24.3 dB
64QAM 3/4	26.3 dB
64QAM 5/6	27.3 dB

Signaalia voidaan tarkastella aika- ja taajuustasossa. Sinisignaali voidaan esittää seuraavassa muodossa.

$$\sin(x) = A \sin(\omega \pm \varphi) \quad (6)$$

,missä

A = amplitudi

ω = kulmataajuus

φ = vaihekulma.

Aikatason signaali mitataan oskilloskoopilla, jossa y-akselilla ilmaistaan signaalin amplitudi ja x-akselilla aika. Taajuustasossa signaalia tutkitaan spektrianalysointorilla, jossa y-akselilla muuttujana on signaalin amplitudi ja x-akselilla taajuus. Kaikki signaalit voidaan esittää edellä mainituissa tasoissa. Radiotaajuuksiin voidaan koodata tietoa joko amplitudin, taajuuden tai vaiheenmuutoksiin pohjautuvilla menetelmillä (Carpenter 2008, 117). IEEE 802.11n -verkoissa koodaus perustuu vaiheen ja amplitudin muutoksiin (Van Nee, Jones, Awater, Van Zelst, Gardner & Steele 2006, 446).

Radiosignaalit ovat alttiita häiriöiden ja kohinan lisäksi häipymiselle. Häipymisellä tarkoitetaan signaalin voimakkuuden voimakasta ja ajoittain hyvin nopeaa vaihtelua. Häipymisen aiheuttaa monitie-eteneminen. Vastaanottaja saa saman radiosignaalin sekä suoraan että rakenteiden kautta heijastuneena. Heijastuneet radiosignaalit ovat vaimentuneet sekä eri vaiheissa kuin suoraan perille tullut, mikä aiheuttaa sekoittumista peräkkäisten symboleiden välillä (ISI). Taajuusselektiivisessä häipymisessä vain osa signaalin spektrin taajuuskomponenteista häipyvät. Tasainen häipyminen tarkoittaa sitä, että signaalin kaikki taajuuskomponentit häipyvät yhtä paljon. (Carpenter 2008, 65.)

Häiriöiden ja häipymisen vaikutuksia voidaan vähentää lähettämällä signaali monistettuna useita eri reittejä. Signaalin monistamista kutsutaan diversiteetiksi. Monistettu signaali voidaan joko lähettää useaan kertaan samalla taajuudella tai jakaa signaalin kopiota usealle taajuudelle. Nämä tekniikat ovat kuitenkin ongelmallisia, koska ne hidastavat tiedonsiirtonopeutta. Ratkaisuna ongelmaan on kehitetty erilaisia tekniikoita kuten moniantennitekniikka (MIMO) ja tila-aika lohkokoodaus (STBC). (Carpenter 2008, 103.)

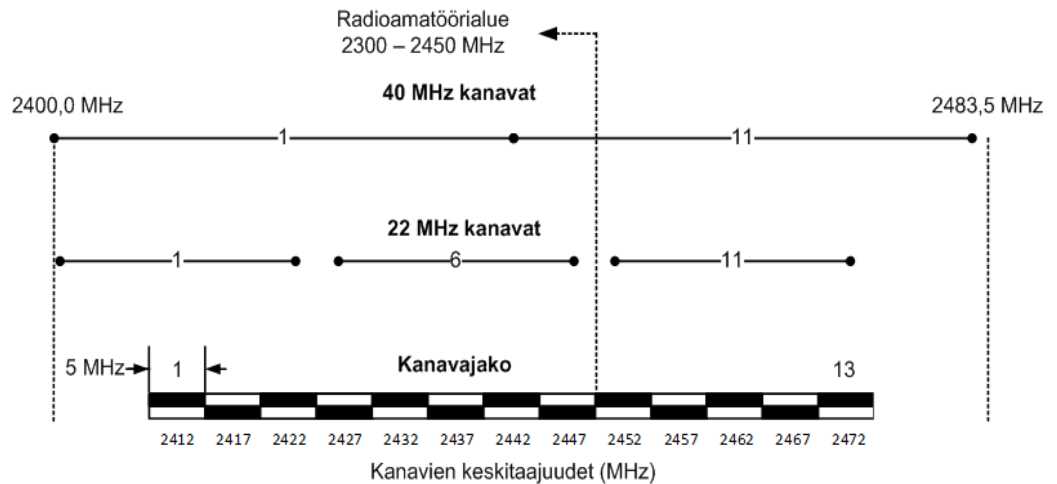
3.1 Taajuusalueet ja kanavat

Radiotaajuuksien käyttö on luvanvaraista. Suomessa toimintaa säätelee Viestintävirasto. Poikkeuksena ovat kolme niin sanottua ISM-taajuusaluetta, joilla toimivien lähettimien käyttäminen on sallittua ilman viranomaisten lupaa. Vapaasta käytöstä huolimatta lähettimien tehoille on asetettu 2,4 GHz taajuusalueella ylärajoja taulukon 2 mukaisesti. EIRP:llä tarkoitetaan efektiivistä säteilytehoa isotrooppiseen antenniin verrattuna. Isotrooppinen antenni lähettää signaalia jokaiseen suuntaan samalla voimakkuudella ja sen vahvistus on 0 dB. EIRP:n suuruus riippuu lähettimen lähtötehosta, antennikaapelin häviöistä ja antennin vahvistuksesta. (Viestintävirasto 15 AF/2013 M 2013, 11§.)

Taulukko 2. 2.4 GHz ISM-taajuusalueen sallitut lähetystehot.

Sovellus	Taajuusalue [MHz]	Lähetysteho
Yleiset lyhyen kantaman radiolähetimet (esim. puhe- ja muut lyhyen kantaman audiosovellukset sekä videosovellukset)	2400,0 – 2483,5	≤ 10 mW EIRP
Laajakaistaiset datasiirtolaitteet (esim. IEEE 802.11n)	2400,0 – 2483,5	≤ 100 mW EIRP
Ohjaus-, valvonta- ja hälytystutkat	2400,0 – 2483,5	≤ 25 mW EIRP ≤ 500 mW EIRP, ≤ 4 W EIRP ainoastaan sisätiloissa ja toimintasuhte oltava ≤ 15 %
Radioamatööri ja radioamatöörisatelliittiliikenne	2400,0 – 2450,0	Lähettimen teho ≤ 150 W Modulaatiohuipputeho ≤ 600 W

2,4 GHz:n taajuusalue on jaettu Suomessa ja suurimmassa osassa Eurooppaa 13 kanavaan, joista kukin on leveydeltään 5 MHz. Vierekkäisten kanavien keskikohdat ovat siten vain 5 MHz:n päässä toisistaan ja näin lähellä olevat verkot häiritsevät toisiaan kuvion 1 mukaisesti. Jos kantaman sisällä on useita tukiasemia, niiden on käytettävä omassa verkossaan tarpeeksi muista erottuvia kanavia. Muuten on vaarana yhteisen ilmatien ruuhkautuminen tai jopa lähetysten huomattava toistensa häiritseminen. Käytännössä 13 kanavasta voidaan käyttää videosuoratoistoon vain kolmea kanavaa, 1, 6 ja 11, ilman että ne menevät ollenkaan toistensa päälle. Toisten verkkojen aiheuttamia häiriöitä voidaan kuitenkin hallita verkon suunnittelulla. (Cisco www-sivut 2014.) Lisäksi radioamatööri liikenteelle on varattu taajuusalue, joka menee kanavien 1-8 kanssa päällekkäin. (Radioamatööriviestinnän taajuusalueet... 2014).

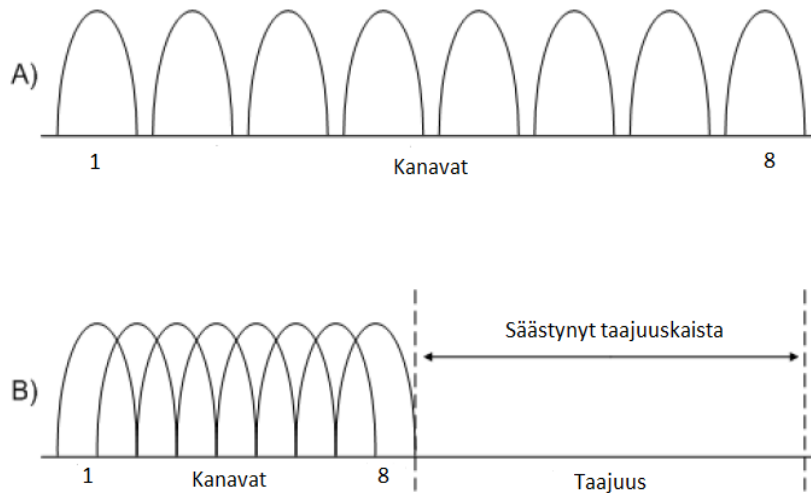


Kuvio 1. IEEE 802.11-verkkojen kanavajako 2,4 GHz taajuusalueella.

3.2 Monikantaaltomodulointi (OFDM)

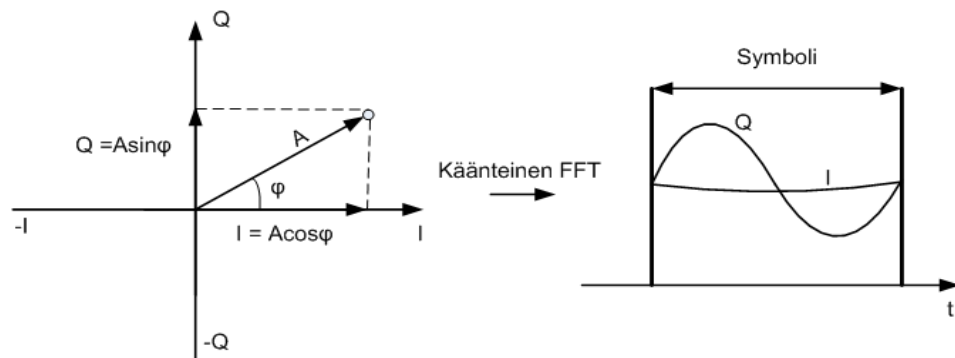
OFDM-tekniikkaa käytetään yleisesti laajakaistaisissa tiedonsiirtojärjestelmissä. OFDM-tekniikassa bittivirta jaetaan rinnakkaisiin bittivirtoihin, joista kukin siirretään omalla alikanavalla. Koska alikanavat on jaettu kapeisiin taajuuskaistoihin, voidaan yksittäisen alikanavan ajatella häipyvän tasaisesti. Siten amplitudi- ja vaihevääristymät saadaan korjattua korjauskertoimen avulla. (LaSorte, Barnes, & Refai 2008, 3593).

Ensimmäistä kertaa monikantaaltotekniikka käytettiin Kineplex-järjestelmässä vuonna 1957. OFDM-tekniikan kehittäjänä ja keksijänä pidetään kuitenkin Robert W. Changia, joka julkaisi artikkelin kapeakais- taisten ortogonaalisten signaalien lähettämisestä usealla taajuudella vuonna 1966. Keksinnössä keskeistä oli tekniikka, joka mahdollisti signaalien jakamisen ja lähettämisen kapeilla lähekkäin olevilla alikanavilla samanaikaisesti ilman signaalien keskinäisiä häiriöitä. Kanavien ortogonaalisuus toteutettiin Fourier-muunnoksilla laskemalla sini- ja kosinifunktioita yhteen. Koska vierekkäiset kanavat olivat ortogonaalisia, voitiin kanavat sijoittaa 50 % kapeammalle kaistalle kuvion 2 mukaisesti. (LaSorte, Barnes, & Refai 2008, 3593.)

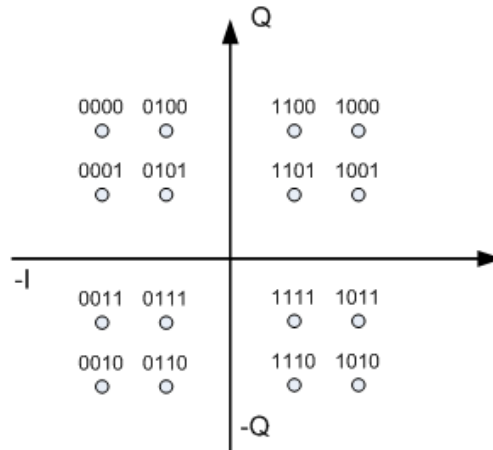


Kuvio 2. A) Kahdeksan alikanavan taajuusspektri monikanavaaaltotekniikalla.
 B) OFDM-taajuusspektri kun vierekkäiset kanavat ovat ortogonaalisia. Taajuuskaistan säästö on 50 %.

Signaali voidaan esittää sini- ja kosinikomponentin amplitudeina kuvion 3 mukaisesti. Modulaatio on helpointa esittää IQ-koordinaatistossa, jolloin puhutaan konstellaatiokuvaajasta. Signaali on jatkuvassa muutostilassa konstellaatiopisteestä toiseen, mutta kunkin symbolin keskellä IQ-ura osuu keskelle konstellaatiopistettä. BPSK perustuu vaihemodulaatioon, jossa vaiheella on kaksi vaihtoehtoa joko 0 astetta ja 180 astetta tai 90 astetta ja 270 astetta. Menetelmällä voidaan ilmaista kaksi tilaa, 0 ja 1, yhdellä merkkillä. QPSK lisää kaksi vaihtoehtoa: 0, 90, 180 ja 270 tai 45, 135, 225 ja 315 astetta. Täten QPSK:lla voidaan ilmaista neljä eri tilaa: 00, 01, 10 ja 11. Amplitudi- ja vaihemodulaatioissa yhtä merkkiä kohden voidaan ilmaista 4, 5, 6, 7 tai 8 bittiä eli merkkiä kohden 16, 32, 64, 128 tai 256 eri bittiyhdistelmää. Kuviossa 4 on esitetty esimerkkinä 16-QAM -signaalin konstellaatiokuvaaja ja sallitut konstellaatiopisteet. (Whiteboard Web www-sivut 2014.)



Kuvio 3. Vasemmanpuoleisessa kuviossa signaali on esitetty sini- ja kosinikomponentin amplitudeina IQ – koordinaatistossa. Käänteisellä FFT:llä taajuustason konstellaatiopisteet muunnetaan aikatazon symboleiksi.



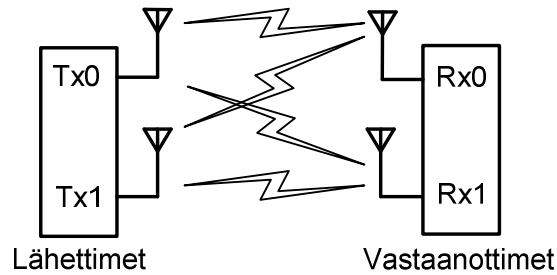
Kuvio 4. 16-QAM konstellaatiokuvaaja, jossa kukin piste vastaa neljäbittistä symbolia.

IEEE802.11n-verkossa 20 MHz:n kanava jaetaan 56:een alikanavaan, joista 52 kanavaa on varattu datalle ja neljä pilottikanaville. Pilottikanavia voidaan käyttää kanavaestimointiin, koska niillä on tunnettu vaihe ja amplitudi. Signaalitiellä tapahtuvat signaalin vääristymät voidaan korjata vertaamalla vastaanotettua pilottikanavan signaalia tunnettuun vaiheeseen ja amplitudiin. Alkanavilla voi olla käytössä BPSK, QPSK, 16-QAM ja 64-QAM. Mitä useampia bittiyhdistelmiä käytetään, sitä suurempi SNR vaaditaan taulukon 1 mukaisesti. (Van Nee, Jones, Awater, Van Zelst, Gardner & Steele 2006, 446.)

3.3 Moniantennitekniikka (MIMO)

MIMO-tekniikassa signaali jaetaan datavirtoihin useammalle toisistaan riippumattomalle rinnakkaiselle samalla taajuudella olevalle siirtotielle. Tekniikkaa kutsutaan tilalliseksi multipleksoinniksi, jossa siirtonopeus on suoraan verrannollinen datavirtojen lukumäärään nähden. Jos siirretään kahdella rinnakkaisella datavirralla dataa, siirtonopeus on kaksinkertainen. (Radio-electronics www-sivut 2014.)

Jokaiselle siirtotielle on varattu lähetin ja antenni kuviossa 5 esitetyllä tavalla. Antenni määritellään laitteeksi, joka säteilee lähettimeltä aaltojohtoa pitkin tulevan sähkömagneettisen energian halutulla tavalla avaruuteen ja vastaanottaa halutulla tavalla sähkömagneettista energiaa. Antenni on resiprookkinen eli antennin ominaisuudet pysyvät samoina sekä lähetettäessä että vastaanottaessa signaalia. Koska antennit ovat hiukan toisistaan erillään, signaali kulkee erillisiä reittejä pitkin vastaanottimelle. Antennien ja datavirtojen lukumäärä ilmaistaan yleensä lyhenteellä $A \times B : C$, missä A on lähettimien lukumäärä, B vastaanottimien lukumäärä ja C käytettävien datavirtojen määrä. IEEE 802.11n-verkot tukevat vähintään kahta antennia ja kahta datavirtaa eli lyhyesti $2 \times 2 : 2$. Maksimissaan sekä antennija että datavirtoja voi olla neljä eli $4 \times 4 : 4$. (Radio-electronics www-sivut 2014.)

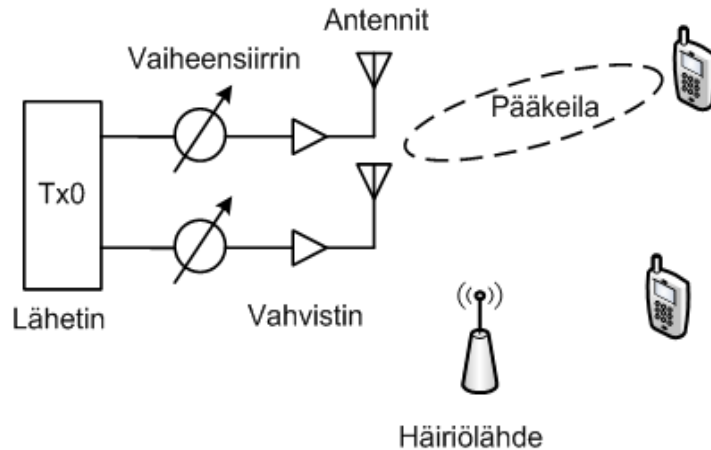


Kuvio 5. 2x2:2 MIMO-järjestelmän periaatekuva.

3.4 Antennin säteilykuvion hallinta (TxBF)

Signaalin kuuluvuutta voidaan parantaa lähettimen antennin säteilykuviota suuntaamalla tai muuttamalla. Säteilykuvio kertoo antennin tuottaman ja vastaanottaman säteilyn suuntariippuvuuden. Tyypillisesti säteilykuviot esitetään joko sähkö- tai magneettikentän tason suuntaisina napakoordinaattipiirroksina. Antenni sijaitsee kuvion origossa ja viivan etäisyys origosta kertoo säteilyn voimakkuuden kyseiseen suuntaan. Säteilymaksimin ympärillä on antennin säteilyn pääkeila. Antenniryhmässä useampi yhteen liitetty antenni toimii kokonaisuutena tuottaen suuntaavan säteilykuvion. Usean pienen antennin ryhmällä saadaan samanlainen kapea säteilykuvio kuin yhdellä isolla antennilla. Antenniryhmän pääkeilan ohjaus voidaan toteuttaa neljällä tavalla: vaiheohjauksella, viiveohjauksella, taajuusohjauksella tai järjestämällä keilan eri suunnille omat syötöt. Antennin pääkeilaa suuntaamalla voidaan parantaa signaalikohina-suhdetta ja vaimentaa häiritseviä signaaleita kuviossa 6 esitetyllä tavalla. (Cisco 2012.)

Koska TxBF on optio 802.11n-standardin laajennuksessa, on se johtanut useisiin yhteensopimattomiin toteutuksiin. Toteutukset voidaan jakaa kahteen päätyyppiin. Ensimmäisessä vastaanotin arvioi kanavan kuuluvuutta ja lähettää joko kuuluvuustiedon tai ohjausmatriisin lähettimelle. Lähetin laskee ohjausmatriisin perusteella lähettimien vaiheistuksen. Mikäli vastaanotin lähetti vain kuuluvuustiedon, lähetin muodostaa itse ohjausmatriisin. Tämä toteutus vaatii, että vastaanotin ja lähetin ymmärtävät samaa TxBF-protokollaa. Toisessa toteutuksessa lähetin kuuntelee vastaanottimen lähettämiä ohjauspaketteja ja luo niiden perusteella ohjausmatriisin. Lisäksi lähetin huomioi vastaanottimen antaman palautteen perusteella lähetys- ja vastaanottoketjujen eron. Toisen menetelmän etuna ensimmäiseen verrattuna on että toinen kuormittaa vähän vastaanotinta ja aiheuttaa vähän ylimääräistä dataliikennettä. Molemmat menetelmät voivat suunnata lähettimen pääkeilan vain yhtä vastaanotinta kohti kerralla kuten kuviossa 6 on havainnollistettu. (Cisco 2012.)

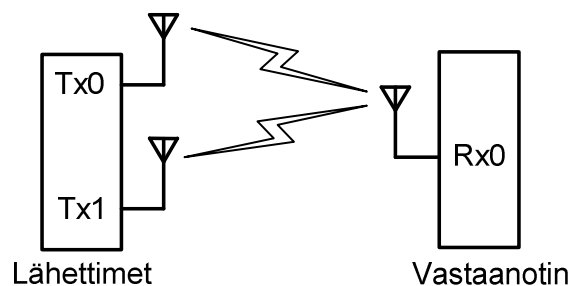


Kuvio 6. Kahden antennin pääkeilan paikka ja muotoa voidaan muuttaa antennielementtien välistä vaiheistusta muuttamalla. Menetelmällä voidaan vaimentaa häiriöitä ja parantaa signaalikohina-suhdetta.

3.5 Tila-aika lohkokoodaus (STBC)

Mobiilipäätelaitteisiin on vaikea toteuttaa useita vastaanottoantenneja. Eräänä ratkaisuna ongelmaan datavirta jaetaan lähetettäväksi eri lähetysantenneilla kuvion 7 mukaisesti. Tekniikkaa kutsutaan STBC-menetelmäksi, joka on optio 802.11n -standardin laajenuksessa. (Nutaq www-sivut 2014.)

STBC-menetelmässä datavirran symbolit kootaan datalohkoiksi ja sijoitetaan matriisiin, jonka sarakkeet edustavat aikaa ja rivit antennia. Symbolit järjestetään niin, että kukin symboli tulee lähetetyksi kerran jokaisen antennin kautta. Kahden antennin tapauksessa jokainen symboli lähetetään siis kahteen kertaan. Vastaanotin vertailee vastaanotettuja datalohkoja tilastollisesti ja valitsee niistä sen, joka vastaa todennäköisimmin lähetettyä datalohkoa. (Nutaq www-sivut 2014.)



Kuvio 7. Kahden lähetysantennin STBC-järjestelmä.

4 VIDEOSUORATOISTON LAADUN ARVIOINTI

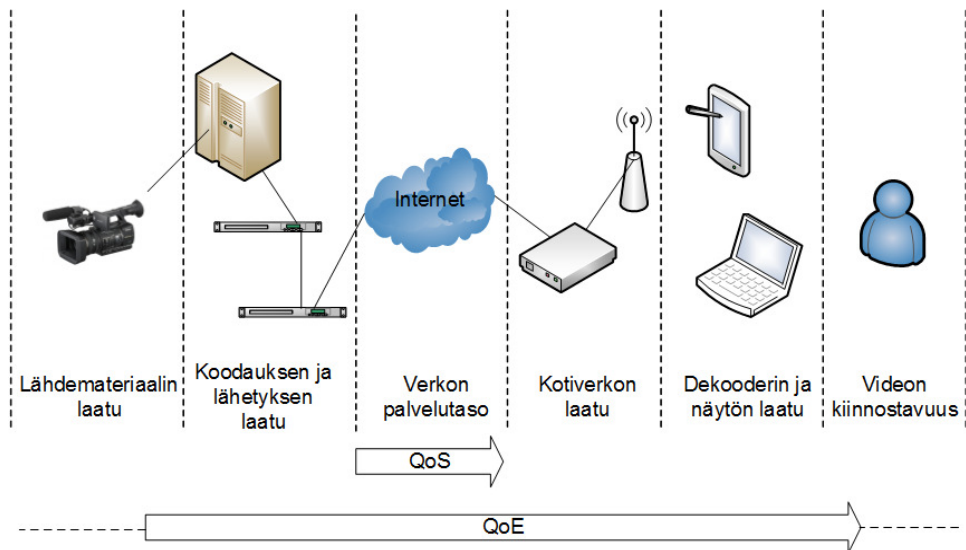
Videosuoratoisto on tiedonsiirtotapa, jossa videotiedosto esitetään katsojalle heti tiedonsiirron käynnistyttyä. Videosuoratoiston vastakohta on eräsiirto, jossa tiedosto ladataan kokonaan ennen katselua. Videosuoratoistossa tiedonsiirron keskeytyessä myös toistaminen keskeytyy. Suoratoistettava materiaali voi olla videotiedosto tai se voidaan luoda reaaliaikaisesti esimerkiksi videokameralla. (Carnegie Mellon University www-sivut 2014.)

Dynaaminen adaptiivinen videosuoratoisto on tekniikka, jossa videon laatua vaihdetaan käytettävissä olevan kaistanleveyden ja päätelaitteiden tehokkuuden mukaan. Videoista joko on muodostettu usean resoluution versioita tai enkooderi muuntaa videon erilaisiksi datavirroiksi. Dynaaminen adaptiivinen videosuoratoisto mahdollistaa perinteistä suoratoistoa lyhyemmät puskurointiajat, nopeamman toiston aloittamisen ja sujuvan katselun eritasoisilla laitteilla. (Carnegie Mellon University www-sivut 2014.)

Palvelun laadulla (QoS) tarkoitetaan kaikkien niiden palvelun laatuparametrien summaa, jotka vaikuttavat käyttäjän subjektiiviseen tyytyväisyyteen verkkopalvelua kohtaan (ITU-T E.800). Kuvanlaadulla käsitetään tässä yhteydessä kuvan ominaispiirrettä, joka mittaa kuvan vääristyneisyyttä (TheFreeDictionary www-sivut 2014).

Videokuvan käsittely ja lähettäminen heikentävät videokuvan laatua. Alkuperäisen materiaalin resoluution, kuvataajuuden ja lomituksen muutokset heikentävät videon laatua. Käytännössä kaikki siirrettävä videomateriaali pakataan häviöllisesti ennen tallentamista tai lähettämistä, jolloin videokuvaan syntyy pakkauksesta aiheutuvia virheitä kuten pikselöitymistä, epätarkkuutta, värivirheitä, sahalaitakuvioita ja välkkymistä. (Richardson 2004, 9.) Liian matalan siirtonopeuden lisäksi lähetysvirheet, kuten vahingoittuneet tai puuttuvat paketit, heikentävät kuvan laatua. Koettuun laatuun (QoE) vaikuttavat edellä mainittujen lisäksi myös katselulaitteen koko, resoluutio, kirkkaus, kontrastin toisto ja terävyys. Myös katselutäisyydellä ja videon sisällöllä on havaittu olevan vaikutusta. Kuvioon 8 on koottu videon koettuun laatuun vaikuttavia tekijöitä. (Takahashi, Hands & Barriac 2008, 81.)

Videokuvan koettua laatua voidaan arvioida objektiivisilla ja subjektiivisilla menetelmillä. Objektiiviset mittaukset perustuvat matemaattisiin malleihin ja niistä johdettuihin mittoihin. Subjektiivisessa mittauksessa koehenkilöt vertaavat testattavaa videota häiriöttömään videoon kontrolloiduissa olosuhteissa ja arvioivat kuvan laatua viisiportaisella asteikolla. Ihmisarvio on tarkin mitta kuvanlaadulle, mutta sen hankkiminen on kallista ja hankalaa eikä sitä voida toteuttaa reaaliaikaisiin tai automaattisiin sovelluksiin. (Nuutinen 2014.)



Kuvio 8. Videon koettuun laatuun vaikuttaa koko videon tuotanto- ja jakeluketjun lisäksi myös videon kiinnostavuus.

4.1 Verkon suorituskyky

Videon lähettäminen vaatii verkolta riittävää suorituskykyä. Teoriassa suurin tiedonsiirtonopeus 802.11n-verkossa on 600 Mb/s, kun käytetään 40 MHz:n kaistanleveyttä ja neljää datavirtaa (4x4:4). 20 MHz kaistanleveydellä ja yhdellä datavirralla päästään 6,5 Mb/s siirtonopeuteen. (2x2:1). (802.11n Primer 2008, 8.) Yle Areena tarvitsee toimiakseen vähintään 1 Mb/s yhteyden, mutta suositus on vähintään 2 Mb/s (YLE www-sivut 2014). Netflix suosittelee SD-laadulle 3 Mb/s ja HD-laadulle 5 MB/s siirtonopeutta (Netflix www-sivut, 2014). Adoben suosittelee 2,4 Mb/s tiedonsiirtonopeutta 1280×720 videolle, jossa on paljon liikettä (Adobe www-sivu 2014). Suomessa Internet-verkon keskimääräinen siirtonopeus on 3 Mb/s (Netflix www-sivut, 2014). QoS voidaan mitata erilaisilla yhteysnopeuspalveluilla. (Google Video Quality Report www-sivut 2014.)

Verkon suorituskyvyn mittaamiseen on kehitetty useita ohjelmistoja, joista Iperf on tunnetuin. Iperf on vapaan lähdekoodin ohjelmisto, jolla voidaan mitata yhteysnopeutta ja yhteyden laatutekijöitä. Iperf vaatii kaksi tietokoneita, joista toinen asetetaan palvelintilaan ja toinen asiakastilaan. Iperf-ohjelma mahdollistaa videosuoratoiston tutkimisen, koska sillä on helppo tehdä toistuvaa UDP-liikennettä ennalta määritellyllä siirtonopeudella. Yhteydetöntä UDP-protokollaa käytetään yleisesti suoratoistettavan videon lähettämiseen, koska yksittäisten pakettien häviäminen ei ole vaarallista. UDP-protokolla lisää IP-protokollan päälle vain porttitunnisteet, joten protokolla ei kuormita tiedonsiirtoa ylimääräisillä pakettien otsikkotiedoilla. UDP ei sisällä pakettien numerointia, joten vastaanottaja ei voi kuitata niitä vastaanotetuiksi. UDP-liikenteestä Iperf mittaa kaistanleveyden, viiveen vaihtelun ja hukattujen pakettien lukumäärää. (Iperf www-sivut 2014.)

4.2 Objektiiviset laatumitat

Objektiivisten laatumittojen kehityksen tarkoituksena on löytää mittaustapa, joka vastaa mahdollisimman lähelle videokuvan koettua laatua. Mittausmenetelmät perustuvat yleensä alkuperäisen referenssivideon ja siirtokanavan läpi välitetyn vääristyneen videon vertailuun kuvion 9 mukaisesti. Täyden referenssin mitat perustuvat useimmiten kuvan rakenteelliseen samankaltaisuuteen tai pikselieromittoihin. (Furht & Marqure 2003, 1041.) Yleisimmin käytetyissä täyden referenssin mitoissa alkuperäistä ja vääristynyttä videota verrataan joko laskemalla pikselieroa (MSE) tai huipusignaali-kohina-suhdetta (PSNR). MSE ja PSNR määritellään seuraavasti. (Furht & Marqure 2003, 1041.)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x_i - y_i)^2 \quad (7)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (8)$$

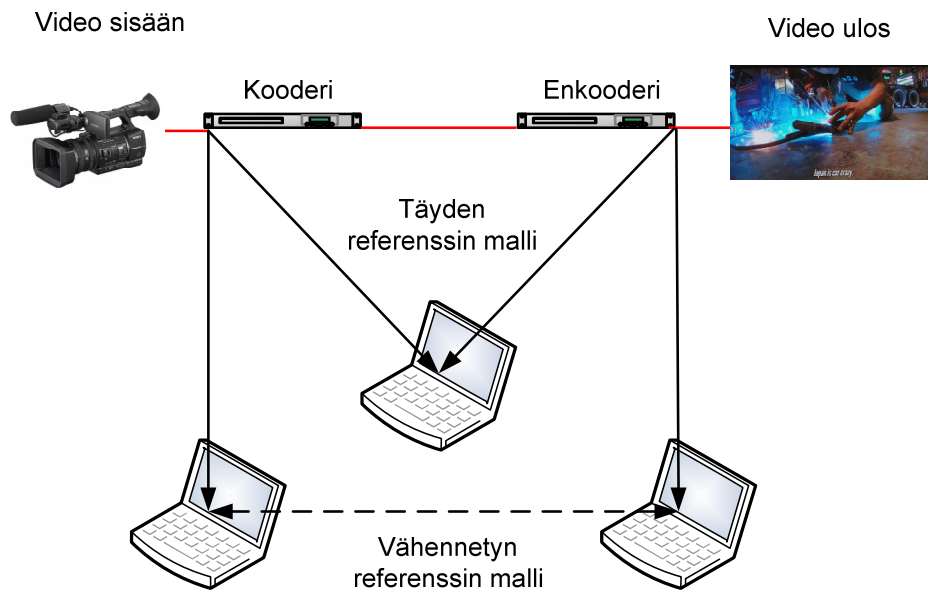
,missä

N = pikselien lukumäärä videossa

x_i = alkuperäisen videon pikseli

y_i = mitattavan videon pikseli

L = pikselien dynaaminen alue, esimerkiksi 8 bittiselle pikselille $2^8 - 1 = 255$.



Kuvio 9. Objektiviivisten laatumitat vertaavat alkuperäistä videota vääristyneeseen. Vähennetyn referenssin tapauksessa vertailussa käytetään vain osaa videosignaalista.

Vähennetyn referenssin mallissa käytetään vain osaa referenssivideon tiedosta. Videon laatua voidaan mitata myös ilman alkuperäistä kuvaa tai siitä laskettuja ominaisuuksia. Referenssittömät mitat ovat usein kehitetty yksittäisen vääristymän laskentaan, joten ne ovat herkkiä samanaikaisesti ilmeneville muille vääristymille. Lisäksi niillä saavat tulokset riippuvat kuvasisällöstä. (Furht & Marqure 2003, 1041.)

Keskeinen ongelma objektiivisissa laatumitoissa on että niillä saadut tulokset eivät vastaa katsojan kokemaa laatua. Häiriöiden vaikutus katselukokemukseen riippuu videon sisällöstä ja katseluolosuhteista. Objektiiviset mitat huomioivat vain pikselien välisiä eroavaisuuksia. (Winkler 1999, 232.)

4.3 Subjektiiiset laatumitat

Subjektiiisessa videon laadun arvioinnissa mitataan koehenkilöiden kokemaa videon laatua. Subjektiiivinen testaus vie enemmän aikaa ja on kallimpaa kuin objektiiviset mittaukset. Toisaalta subjektiiivisen mittauksen tulokset vastaavat, toisin kuin objektiiviset mitat, todellista ihmisten havaintoa.

ITU-R BT-500 standardi määrittelee useita subjektiiivisiä mittausten menetelmiä (ITU-R BT.500-13 2012, 10). Käytetyimmät menetelmät ovat DSCQS, DSIS ja SSCQE (Winkler 1999, 236). DSCQS-menetelmässä lyhyt, tyypillisesti 10 sekunnin mittainen, vääristynyt testivideo ja referenssivideo esitetään koehenkilölle peräjälkeen satunnaisesti vuorotellen. Koehenkilölle ei kerrota onko kyseessä referenssi- vai testivideo. Molempien videoiden arviointi tapahtuu näyttökerran jälkeen jatkuvalla asteikolla. (Winkler 1999, 236.)

DSIS-menetelmässä, toisin DSCQS-menetelmässä, referenssivideo näytetään aina ennen testivideota. Kumpaakaan ei toisteta vaan katselukertojen jälkeen koehenkilö vertaa testivideota referenssivideoon ja arvioi laatua diskreetillä viisiportaisella asteikolla. Edellisistä poiketen, SSCQE-menetelmässä videon laatua arvioidaan jatkuvalla asteikolla reaaliaikaisesti 20-30 minuuttia kestävä videosekvenssin aikana. Testivideoon on ennakolta tehty erilaisia vääristymiä. (Winkler 1999, 236.)

DSCQS-menetelmä on herkkä testivideon pienille vääristymille kun taas DSIS-menetelmä soveltuu selkeästi näkyvien vääristymien arviointiin. Molempien menetelmien ongelmana on, että koehenkilö muistaa parhaiten viimeisten 10-20 sekunnin aikaiset virheet. Videon lopussa sijaitseva vääristymä koetaan häiritsevämpänä kuin vastaava vääristymä videon alussa. Tästä syystä testissä käytettävien videoiden kesto rajataan korkeintaan 10 sekuntiin. SSCQE-menetelmä välttää edellä mainittujen menetelmien haitat, mutta testivideon sisältö saattaa vaikuttaa voimakkaasti lopputulokseen. (Winkler 1999, 237.)

Videon laadun subjektiiivista arviointia varten on luotu videokokoelmia, jotka sisältävät useita erilailla vääristyneitä versioita samasta videosta. Esimerkiksi Laboratory of Image and Video Engineering (LIVE) on julkaissut tietokannan, joka sisältää kuvatiedostot ja niihin liitetyn subjektiiivisen laatu-arvion (The University of Texas at Austin www-sivut 2014). Kannassa on myös videokokoelma, johon on koottu langattoman tiedonsiirron aiheuttamia vääristymiä (Moorthy, Choi, Bovik & De Veciana 2012, 652).

The Consumer Digital Video Library on ilmainen digitaalinen videokirjasto, joka on tarkoitettu tutkijoille ja kehittäjille videoiden sekä objektiiviseen että subjektiiviseen arviointiin. Kuka tahansa voi ladata eri menetelmällä arvioituja videoleikkeitä videokirjastoon ja tuloksia voidaan sitten jakaa muiden videokirjaston käyttäjille. (The Consumer Digital Video Library www-sivut 2014.)

5 HÄIRIÖLÄHTEET

2,4 GHz alueella toimivat IEEE 802.11n-verkot ovat alttiita muiden verkkojen ja luonnollisten häiriöiden lisäksi saman taajuusalueen koordinoimattoman liikenteen aiheuttamille häiriöille. Vaikka IEEE 802.11-verkkojen 2,4 GHz taajuusalueen kanavat on standardisoitu, taajuuskais-talla saattavat toimia samanaikaisesti älykäs pölynimuri, langattomia kameroita, ohjaus-, valvonta- ja hälytystutkia ja viihde-elektronikan laitteita (Gollakota, Adib, Katabi & Seshan 2011, 170). IEEE 802.11-verkkojen lisäksi kodeissa yleistyvät erilaiset lyhyen kantaman tietoliikenneverkot kuten Zigbee ja Bluetooth (Zhang, Yu, Xie, Yao, Xiao, & Guizani 2011, 45).

ZigBee-verkko eli IEEE 802.15.4 on kehitetty pienitehoisten ja yksinker-taisten laitteiden verkottamiseen langattomasti. ZigBee-laite kytkeytyy nopeasti, alle 30 millisekunnissa, verkkoon. Tämä ominaisuus erottaa sen Bluetooth-verkoista, joissa kytkeytymisaika on pitkä ja takaamaton. Zig-Bee-verkko toimii 2,4 GHz alueella, jossa se käyttää 16 kanavaa 5 MHz välein. (ZigBee Alliance Interest Group www-sivut, 2014.) Bluetooth-verkko eli IEEE 802.15.1 on kehitetty helpottamaan pienten mobiililaitteiden välistä viestintää. Bluetooth-verkko toimii 79 kanavalla 2,4 GHz:n taajuusalueella ja vaihtelee lähetyskanavaa 625 mikrosekunnin välein (Bluetooth Special Interest Group www-sivut, 2014). Sekä Bluetooth- että ZigBee-verkot ovat matalatehoisia (Hithnawi, Shafagh, & Duquennoy 2014, 49). Bluetooth-verkko aiheuttaa vain vähäisiä häiriöitä IEEE 802.11n -verkolle matalan lähetystehon ja taajuushypellyn takia (van Bloem, Schiphorst, Kluwer, & Slump 2012, 5).

Suhteellisen vähäisetkin radiotaajuiset häiriöt lähteistä, jotka eivät ole IEEE 802.11 yhteensopivia, saattavat vähentää verkon suorituskykyä (Gummadi, Wetherall, Greenstein & Seshan 2007, 7). Erityisesti A/V-lähettimet saattavat häiritä IEEE 802.11-verkkoa (van Bloem, Schiphorst, Kluwer, & Slump 2012, 3).

Häiriösignaalit heikentävät, osuessaan verkon kanssa samalle taajuudelle, hyötysignaalin tehotason suhdetta häiriön tehotasoon (SJR). SJR-suhde määritellään seuraavasti. (Kosola & Solante 2013, 140.)

$$SJR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signaali}}}{P_{\text{häiriö}}} \right) \quad (9)$$

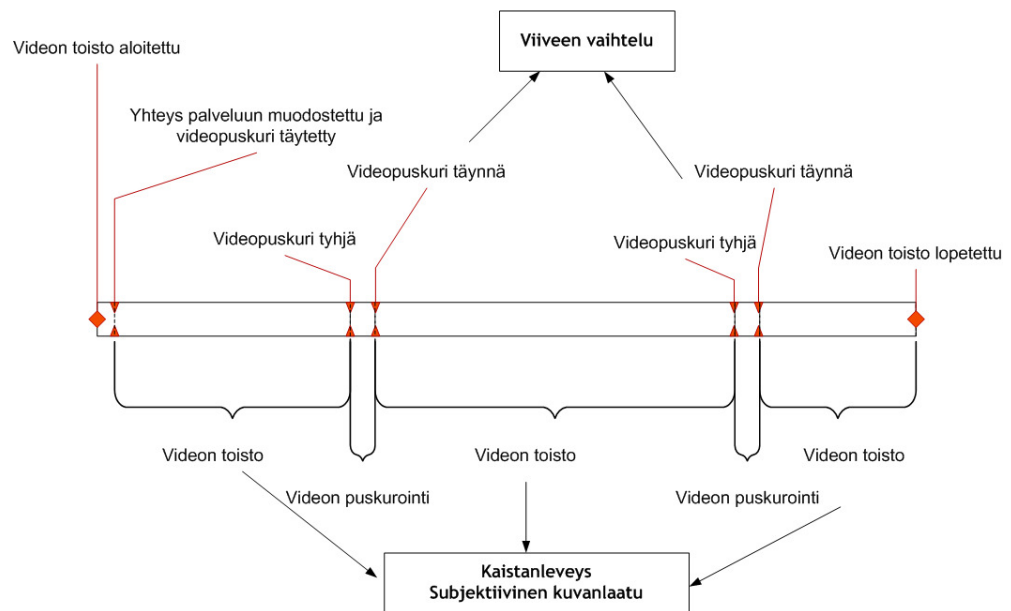
,missä

P_{signaali} = hyötysignaalin tehotaso

$P_{\text{häiriö}}$ = häiriösignaalin tehotaso

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

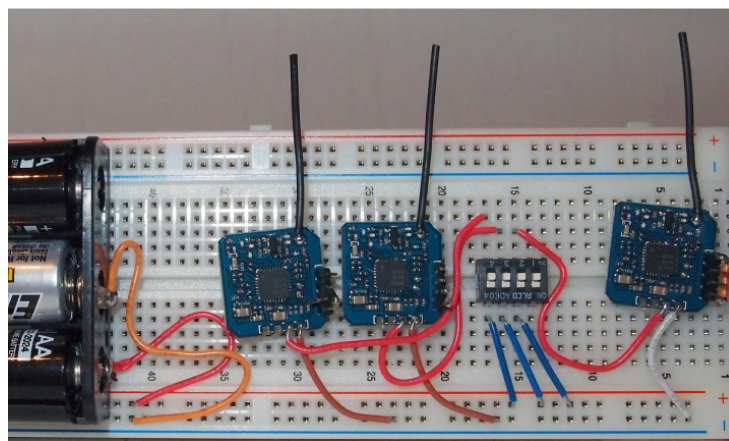
Videosuoratoiston laatuattribuutit on valittu kuvion 10 mukaisesti. Katsojan oletetaan kokevan häiritsevästä videosuoratoiston aloituksen viiveistä ja katkoksesta videon toistossa. Suoratoiston aikana kaistanleveydellä oletetaan olevan merkittävä vaikutus videon kuvanlaatuun.



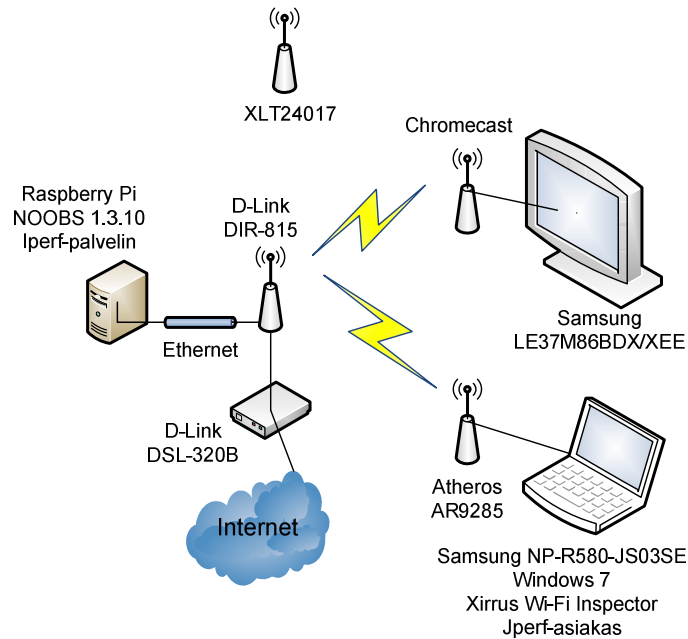
Kuvio 10. Videosuoratoiston laatuattribuuteiksi on valittu viiveen vaihtelu, kaistanleveys ja subjektiivinen kuvanlaatu.

A/V-lähettimen XLT24017 EIRP mitattiin Millog Oy:n Riihimäen toimipaikan mittaustalossa. Häiriöiden vaikutuksia videosuoratoistoon tutkittiin rakentamalla kuvion 11 mukainen koeverkko ja mittaamalla verkon ominaisuuksia rivitaloasunnossa.

Kolme XLT24017 A/V-lähetintä asennettiin koekytkentälevylle kuvassa 1 esitetyllä tavalla. Tehonsyöttö järjestettiin kolmesta sarjankytketystä 1,5 V AA-paristosta. Mittauksissa käytettiin kuitenkin vain yhtä lähetintä, joka oli asetettu toimimaan 2,468 GHz taajuudella.



Kuva 1. Kolme A/V-lähetintä XLT24017 asennettuna koekytkentälevylle.



Kuvio 11. Kuviossa esitetään rivitalossa käytetyn koeverkon rakenne. ADSL-modeemi D-Link DSL-320 oli yhteydessä Internet-palveluntarjoajan verkkoon. Langattomaan reitittimeen D-Link DR-815 oli kytketty Ethernet-verkolla Raspberry Pi-palvelin. Televisio Samsung LE37M86BDX/XEE oli kytketty IEEE 802.11n-verkkoon Chromecastilla. Mittaustietokone Samsung NP-R580-JS03SE oli kytketty langattomaan verkkoon Atheros AR9285-verkkokortilla. A/V-lähetin XLT24017 sijoitettiin eri mittauspisteisiin häiritsemään verkko-liikennettä.

Mittaustulokset ilmoitetaan otoksen keskiarvona

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (10)$$

,missä

n = lukemien määrä

q = yksittäisen mittaustuloksen lukema

Mittaustulosten oletetaan noudattavan normaalijakaumaa, joten mittaustuloksista lasketaan keskiarvon keskihajonta eli standardiepävarmuus seuraavasti

$$u(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

Spesifikaatorajojen sisällä arvojen oletetaan olevan yhtä todennäköisiä, joten standardiepävarmuus lasketaan kaavalla

$$u(q) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

,missä

a = vaihteluvälin puolikas

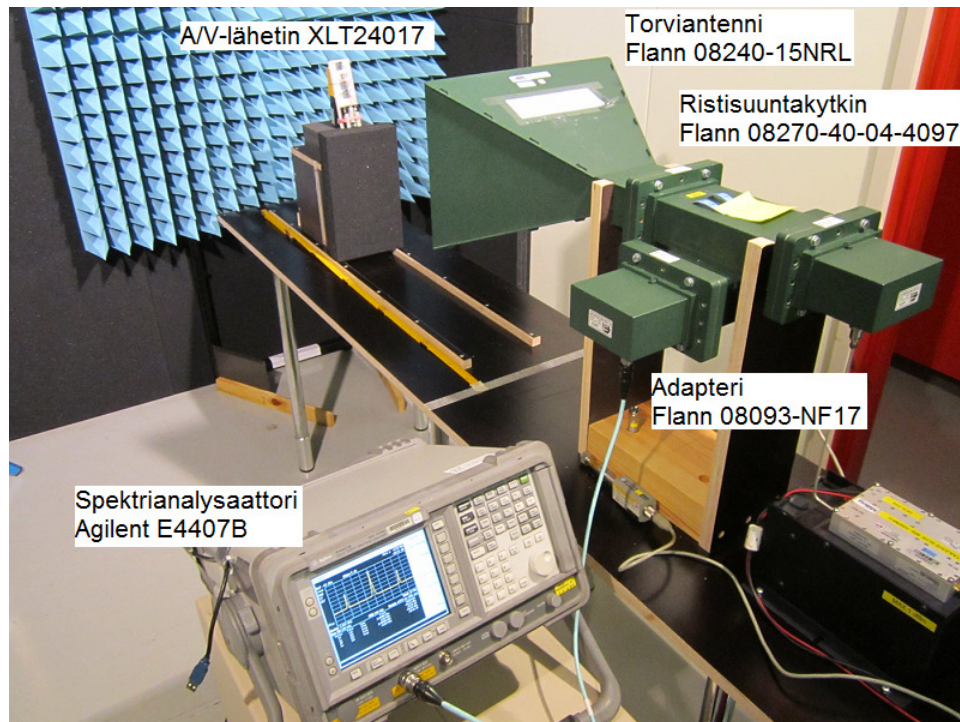
Koko mittauksen standardiepävarmuus saadaan korottamalla kunkin tekijän standardiepävarmuus toiseen potenssiin, laskemalla näin saadut lukemat yhteen ja laskemalla saadun summan neliöjuuri. Mittaustulosten epävarmuus ilmoitetaan laajennettuna epävarmuutena U , jolloin standardiepävarmuus on kerrottu kertoimella 1,96. Tällöin sadasta mittauksesta noin 95 on epävarmuusrajojen sisällä. (Esala, Lehto & Tikka 2003, 65.)

6.1 A/V – lähettimen EIRP

A/V-lähettimen XLT24017 teho- ja spektrimittaus toteutettiin kuvan 2 mukaisella mittausjärjestelyllä. Lähetin asetettiin 80 ± 1 cm:n etäisyydelle torviantennista, jonka vahvistus oli datalehden mukaan $16,8 \pm 0,3$ dBi 2,46 GHz taajuudella. Torviantenni kytkettiin ristisuuntakytkimeen, joka aiheuttaa signaaliin valmistajan datalehden mukaan 40 ± 2 dB vaimennuksen. Adapterin, liittimien ja koaksiaalikaapelin aiheuttamat vaimennukset arvioitiin merkityksettömiksi. Koska lähetin oli $d = 80$ cm päässä torviantennista ja antennin suurin mitta oli $D = 36,8$ cm, kyseessä oli lähikenttämittaus kaavan 12 perusteella (Keysight www-sivut 2014).

$$\frac{D^2}{4\lambda} < d < \frac{2D^2}{\lambda} \overset{siij.}{\rightarrow} 28 \text{ cm} < d < 223 \text{ cm} \quad (13)$$

Lähettimen aiheuttama kenttä kuitenkin vaimenee kaavan 1 mukaisesti (Keysight www-sivut 2014).



Kuva 2. A/V-lähetin XLT24017 EIRP-mittausjärjestely.

6.2 Mittaukset rivitalossa

Häiriömittaukset toteutettiin kuvion 12 mukaisena kaksikerroksisen rivitalon päätyasunnossa. 80-luvun alussa rakennetun rivitalon pääasiallisina rakennusmateriaaleina ovat betoni, tiili ja puu. Väliseinät ovat kevyitä puurakenteita.

Kaistanleveyttä, viiveiden vaihtelua ja videon subjektiivista laatua mitattaessa mitaustietokone, Samsung NP-R580-JS03SE, ja televisio, Samsung LE37M86BDX/XEE, oli sijoitettu mitauspisteeseen M. A/V-lähetin XLT24017 asetettiin vuorotellen mitauspisteisiin 1-5. Mittauspiste 1 si-

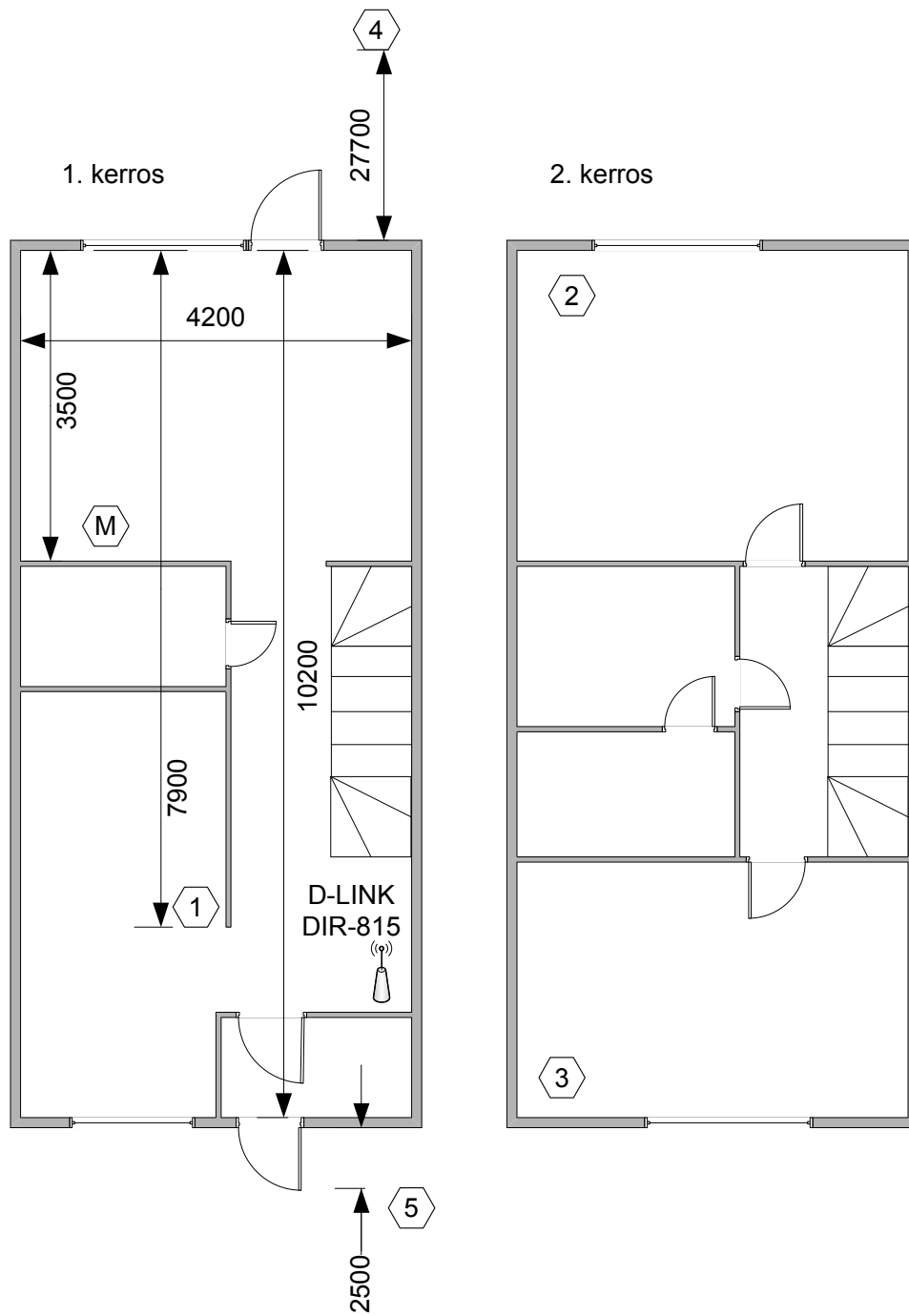
jaitsi kaksikerroksisen rivitalon alakerrassa, mittauspisteet 2-3 toisessa kerroksessa ja mittauspisteet 4-5 ulkona.

Signaalin vaimennusmittausta varten D-Link DIR-815-lähetin sijoitettiin mittauspisteeseen M. Mittaustietokoneeseen Samsung NP-R580-JS03SE asennetulla Xirrus Wi-Fi Inspectorilla mitattiin signaalin voimakkuus mittauspisteissä 1-5. DIR-815 lähetystehon asetus oli jatkuvasti 100 %, mikä vastaa valmistajan mukaan $15 \text{ dBm} \pm 2 \text{ dB}$ lähetystehoa (D-Link 2014). Mittauskanavaksi valittiin 11, koska sillä ei havaittu muita verkkoja.

Videosuoratoiston laatua arvioitiin katselemalla Youtube videota Google Chromecastilla (GoPro 2014). Chromecast on mediatoistolaite, joka yhdistetään television HDMI-porttiin. Chromecast hakee itsenäisesti katseltavat sisällöt netistä. Mobiililaite toimii kauko-ohjaimena, joten se ei käsittele Chromecastin näyttämää videota. Chromecastin tukemiin sovelluksiin kuuluvat Youtube, Google Playn elokuvavuokraamo, Netflix, Red Bull TV ja Realplayer Cloud. Chromecast-sovelluksen asentaminen lisää sovellusten valikkoon lähetä Chromecastiin-ikonin, jota painamalla kyseinen sisältö toistetaan televisioruudulla. Chromecast jätettiin tehtaan vakioasetuksiin.

Youtube videon suunniteltiin verrattavan Bulldozer With Fence-videosarjaan, johon on tehty pakettien häviämisestä johtuvia eritasoisia häiriöitä (The University of Texas at Austin [www-sivut](http://www.sivut)). Videokirjaston videot oli kuvattu RED ONE-kameralla 12-bittisiksi R3D-tiedostoiksi, joiden resoluutio oli 2048×1152 pikseliä. Videotiedostojen kuvaformaatti oli muunneltu MATLAB `imresize` (option:`bicubic`) funktiolla ja VirtualDub -ohjelmistolla `.yuv` -tiedostoiksi, joiden resoluutio oli 1280×720 pikseliä ja kuvanopeus 30 kuvaa sekunnissa. (The University of Texas at Austin www-sivut.)

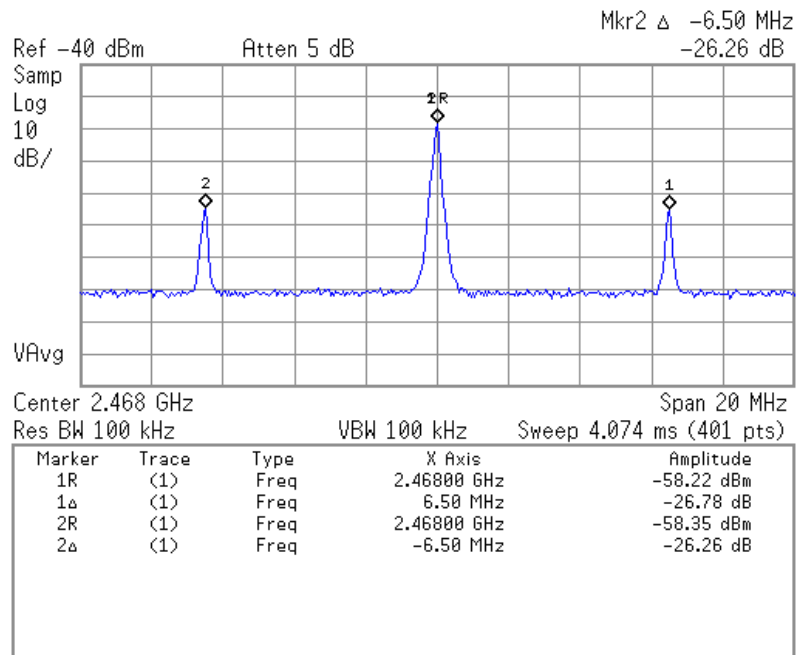
Internet-yhteyden nopeutta testattiin nopeustesti.com -sivuston tarjoamalla palvelulla. Nopeustesti-palvelun toteuttaa Ookla, jonka ratkaisuja käyttävät laajasti myös useat Internet-palveluntarjoajat. (Nopeustesti www-sivut 2014.)



Kuvio 12. Mittausjärjestely kaksikerroksisessa rivitaloaluoneistossa. Mittauspisteet 1-3 sijaitsevat asunnon sisällä ja 4-5 ulkona.

7 TULOKSET

7.1 A/V-lähettimen EIRP



Kuvio 13. A/V-lähettimen spektri- ja amplitudi.

A/V-lähetin XLT24017 asetettiin kanavalle, jonka keskitaajuus valmistajan datalehden mukaan on 2,468 GHz. Mitattu taajuus oli 2,46800 GHz. Taajuus vaihteli noin 10 kHz keskitaajuuden ympärillä. Kuviossa 13 on nähtävissä, keskitaajuuden lisäksi, 6,5 MHz:n etäisyydellä kantaaltaa kaksi vaimeampaa kantaaltoa. Keskimmäisen kantaallon amplitudin keskiarvoksi mitattiin spektrianalysointorilla noin -58,35 dBm ja sivukantaaltojen amplitudeiksi -84,6 dBm. Laskemalla kaavaan 3 avulla signaalin vaimennus ja ottamalla huomioon sekä torviantennin vahvistus että ristisuuntakytkimen vaimennus, saadaan EIRP seuraavasti.

$$\begin{aligned}
 EIRP (dBm) &= \\
 &= -58,35 \text{ dBm} + 20 \log_{10}(0,8 \text{ m}) + 20 \log_{10}(2468 \text{ MHz}) - 27,55 - \\
 &= 16,8 \text{ dBi} + 40 \text{ dB} = 3,20870 \dots \text{ dBm} \approx 3,2 \text{ dBm}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Vastaavasti sivukantaalloille

$$\begin{aligned}
 EIRP (dBm) &= \\
 &= -84,6 \text{ dBm} + 20 \log_{10}(0,8 \text{ m}) + 20 \log_{10}(2468 \text{ MHz}) - 27,55 - \\
 &= 16,8 \text{ dBi} + 40 \text{ dB} = -23,0413 \dots \text{ dBm} \approx -23,0 \text{ dBm}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Mittaasepävarmuusbudjetti on koottu taulukkoon 3. Standardiepävarmuudet arvioitiin kaavalla 12. Standardiepävarmuudet laskettiin yhteen ja otettiin neliöjuuri, jolloin saatiin yhdistetty standardiepävarmuus. Yhdistetty standardiepävarmuus kerrottiin 1,96:lla, jolloin saadaan mittaasepävarmuus. Kantaallon EIRP oli siis $(3,2 \pm 3,4) \text{ dBm}$ ja sivukantaaltojen $(-23,0 \pm 3,4) \text{ dBm}$. (Esala, Lehto & Tikka 2003, 65.)

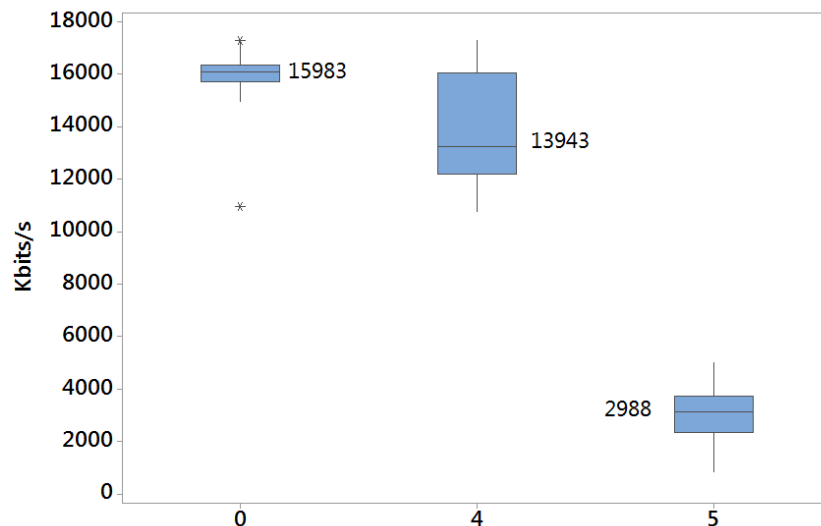
Taulukko 3. EIRP-mittausepävarmuusbudjetti.

	Vaihteluväli (± dB)	Standardiepävarmuus (dB)
Spektrianalysaattori	1	0,577350...
Etäisyys (± 1cm)	0,02	0,011547...
Torviantenni	0,3	0,173205...
Ristisuuntakytkin	2	1,154700...
Kytkenä	2	1,154700...
Yhdistetty standardiepävarmuus	u	1,740727...
Mittausepävarmuus	U	3,41182.. ≈ 3,4

7.2 Kaistanleveys ja viiveiden vaihtelu

Kaistanleveys ja viiveiden vaihtelu mitattiin iperf-ohjelmistolla (Shriram, Murray, Hyun, Brownlee, Broido, Fomenkov, Claffy 2005). Kuviossa 14 mittauspiste 0 tarkoittaa, että A/V-lähetin oli kytketty pois päältä. Mittauspisteissä 1-3 ei saatu tulosta ollenkaan A/V-lähetin aiheuttaman häiriön takia. Häiriö oli niin voimakas, että yhteyttä iperf-palvelimeen ei saatu syntymään.

Kaistanleveys mitattiin kussakin mittauspisteessä kolmekymmentä kertaa ($n = 30$). Kuviossa 14 esitetään kaistanleveysmittauksen tulokset laatikko-kaaviona. Laatikon alareuna vastaa alaneljännestä ja oikea yläreuna yläneljännestä. Laatikon sisään piirretty viiva vastaa mediaania. Alaneljänneksen ja mediaanin väliin jää 25 % havainnoista ja mediaanin ja yläneljänneksen väliin 25 % havainnoista.



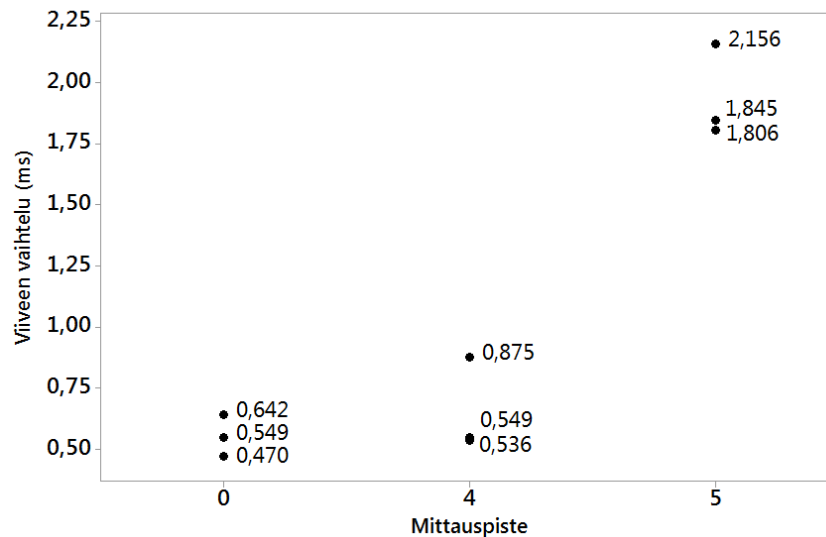
Kuvio 14. Kuviossa on Iperf-ohjelmistolla mitattu kaistanleveys esitettynä laatikkokaaviona. Mittauspiste 0 tarkoittaa, että A/V-lähetin oli kytketty pois päältä. Mittauspisteissä 1-3 tulosta ei saatu ollenkaan, koska yhteyttä palvelimeen ei syntynyt A/V-lähetin aiheuttaman häiriön takia.

Kaistanleveysmittausten keskiarvot laskettiin kaavalla 10 ja standardiepävarmuus kaavalla 11. Mittausepävarmuus arvioitiin laskemalla standardiepävarmuuksien toisten potenssien summan neliöjuuri ja kertomalla tulos kertoimella 1,96. Tulokset on koottu taulukkoon 4. (Esala, Lehto & Tikka 2003, 65.)

Taulukko 4. Kaistanleveys kun A/V-lähetin on pois päältä ja A/V-lähetin sijoitettuna mittauspisteisiin 4 ja 5

Mittauspiste	Kaistanleveys	Mittausepävarmuus
A/V-lähetin pois päältä	15980 kbits/s	± 400 kbits/s
4	13940 kbits/s	± 750 kbits/s
5	2990 kbits/s	± 390 kbits/s

Viiveen vaihtelu mitattiin kolme kertaa kussakin mittauspisteessä. Mittauksen tulokset on esitetty kuviossa 15. Viiveen vaihtelu on iperfohjelmiston raportoima lukema millisekunneissa.



Kuvio 15. Viiveen vaihtelu. Mittauspiste 0 tarkoittaa, että A/V-lähetin oli kytketty pois päältä.

7.3 Signaalin vaimennus ja SJR

D-Link DIR-815 sijoitettiin mittauspisteeseen M. Jokaisessa mittauspisteessä 1-5 mitattiin Xirrus Wi-Fi Inspectorilla verkon signaalinvoimakkuus kymmenen kertaa ($n = 10$). Signaalitasonmittausten keskiarvot laskettiin kaavalla 10 ja keskiarvon keskihajonta kaavalla 11. Mittauksen äärellinen resoluutio (1 dBm) huomioitiin kaavalla 12. Mittausepävarmuus arvioitiin laskemalla standardiepävarmuuksien toisten potenssien summan neliöjuuri ja kertomalla tulos kertoimella 1,96. Tulokset on esitetty taulukossa 5. (Esala, Lehto & Tikka 2003, 65.)

Taulukko 5. Signaalitasot ja niiden mittausepävarmuudet

Mittauspiste	Signaalitaso (dBm)	Mittausepävarmuus (dBm)
1	-63,8	$\pm 0,7$
2	-56,5	$\pm 0,7$
3	-70,7	$\pm 1,2$
4	-73,0	$\pm 0,8$
5	-72,3	$\pm 1,0$

Mittauspisteiden 1-5 ja M välinen vaimennus on laskettu taulukossa 6 vähentämällä lähetystehosta kunkin pisteen signaalivoimakkuus. D-Link DIR-815 lähetystehon vaihteluväli on ± 2 dBm, mikä on huomioitu kaavalla 12.

Taulukko 6. Mittauspisteiden 1-5 ja M välinen vaimennus

Mittauspiste	Vaimennus (dB)	Mittausepävarmuus (dB)
1	78,8	$\pm 1,4$
2	71,5	$\pm 1,3$
3	85,7	$\pm 1,6$
4	88,0	$\pm 1,4$
5	87,3	$\pm 1,5$

Verkon signaalivoimakkuus pisteessä M mitattiin kaksikymmentä kertaa ($n = 20$). Mittausepävarmuus laskettiin samoin kuin signaalitasomittauksessa. Verkon signaalivoimakkuudeksi pisteessä M saatiin ($-62,2 \pm 0,7$) dBm.

Ensiksi A/V-lähttimen signaalivoimakkuus on laskettu vähentämällä sen lähetystehosta (3,2 dBm) mittauspisteiden välinen vaimennus. A/V-lähttimen sivukantoaallot jätettiin huomioimatta laskuissa. Sitten SJR on laskettu vähentämällä verkon signaalivoimakkuudesta A/V-lähttimen signaalivoimakkuus kussakin mittauspisteessä. Mittausepävarmuus on laskettu summaamalla edellä mainittujen mittausten standardiepävarmuuksien toiset potenssit, ottamalla tuloksesta neliöjuuri ja kertomalla 1,96:lla. (Esala, Lehto & Tikka 2003, 65.)

Taulukko 7. SJR A/V-lähttimen sijaitessa mittauspisteissä 1-5.

Mittauspiste	SJR (dB)	Mittausepävarmuus (dB)
1	13	± 4
2	6	± 4
3	20	± 4
4	23	± 4
5	22	± 4

7.4 Videosuoratoisto

Videosuoratoiston laatua arvioitiin katselemalla *The Streets of Japan* in 4K-videoleikettä Google Chromecastilla televisioruudulta. A/V-lähetin oli päällä joka toisella katselukerralla. Katselukertoja toistettiin kolme kertaa A/V-lähettimen ollessa kussakin mittauspisteessä. Häiriöitä, mikäli niitä olisi havaittu, olisi verrattu kuvassa 4 esitettyyn videoleikkeeseen, johon on tehty pakettien häviämisestä johtuvia häiriöitä.

A/V-lähettimen sijaitessa mittauspisteissä 1-3 videosuoratoisto katkesi, joten vertailua ei voitu tehdä. A/V-lähettimen sijaitessa mittauspisteessä 4 kuvassa ei havaittu pakettien häviämisestä aiheutuneita häiriöitä kuten kuvassa 3 on havaittavissa. Kun A/V-lähetin tuotiin pisteeseen 5, videosuoratoisto katkesi muutamien sekuntien jälkeen. Internet yhteyden nopeutta testattiin nopeustesti.com -sivuston tarjoamalla palvelulla (Nopeustesti www-sivut 2014). Testi antoi tulokseksi latausnopeudelle 3,54 Mbits/s ja vasteajalle 11 ms.

Häiriöiden vaikutusta subjektiiviseen kuvanlaatuun ei voitu siis arvioida suunnitellulla tavalla, koska videossa joko ei havaittu virheitä ollenkaan tai sitten videosuoratoisto katkesi kokonaan.



Kuva 3. Kuvassa on television ruudulta otettu valokuva A/V-lähettimen ollessa mittauspisteessä 4. Kuvassa ei ole havaittavissa pakettien häviämisestä aiheutuvia häiriöitä.



Kuva 4. Kuvassa on kuvaruutukaappaus vertailussa käytetystä Bulldozer With Fence -videosta, jossa näkyy pakettien häviämisestä johtuvia häiriöitä.

8 YHTEENVETO

IEEE 802.11n-verkon fyysinen kerros ja siinä käytettävät tekniikat ovat keskeisessä osassa ja mahdollistavat korkealaatuisen videosuoratoiston. OFDM-tekniikalla saavutetaan riittävä kaistanleveys. MIMO-tekniikalla voidaan vähentää monitie-etenemisestä aiheutuvia häipymisongelmia. Antennin säteilykuvion hallinnalla ja tila-aika lohkokoodauksella pyritään signaali-kohinasuhteen parantamiseen.

Videosuoratoiston laatua voidaan mitata useilla eri tavoilla. Tässä työssä IEEE 802.11n-verkon suorituskykyä arvioitiin kaistanleveyttä ja viiveiden vaihtelua mittaamalla. Videokuvan koettu laatu ei aina vastaa verkon suorituskykymittausten tuloksia. Tästä syystä häiriöiden vaikutuksia videosuoratoistoon suunniteltiin arvioitavan myös subjektiivisesti.

Kirjallisuuden perusteella suurimmiksi häiriölähteiksi ovat osoittautuneet erilaiset IEEE 802.11n-verkon yhteen sopimattomat lähettimet kuten valvontakameroissa käytettävät A/V-lähettimet. Sen sijaan esimerkiksi Bluetooth- tai Zigbee-verkot eivät aiheuta normaalisti häiriöitä IEEE 802.11n-verkolle.

Häiriöiden vaikutusta videon siirtoon tutkittiin rivitaloon rakennetussa IEEE 802.11n-verkossa. Häiriölähteenä käytettiin A/V-lähetintä, jonka EIRP mitattiin Millog Oy Riihimäen toimipaikan mittaustalossa. Mittaustietokone, televisio ja langaton reititin pidettiin samoissa pisteissä koko mittauksen ajan. A/V-lähetin sijoitettiin viiteen mittauspisteeseen, joista kolme oli huoneiston sisällä ja kaksi ulkona. Iperf-ohjelmistolla mitattiin kaistanleveyttä ja viiveiden vaihtelua.

A/V-lähettimen keskimmäisen kantaallon EIRP oli $(3,2 \pm 3,4)$ dBm ja sivukantaaltojen $(-23,0 \pm 3,4)$ dBm. Valmistajan ilmoittaman keskitaajuuden havaittiin pitävän hyvin paikkansa.

A/V-lähettimen aiheuttama häiriö laski langattoman verkon kaistanleveyttä lähettimen ollessaan ulkona 27,7 m:n etäisyydellä asunnosta. Sen sijaan viiveiden vaihteluun vaikutus oli vähäinen. Subjektiivisessa arvioissa ei

havaittu virheitä Chromecastilla suoratoistetussa videoleikkeissä. Tämä johtui siitä, että IEEE 802.11n-verkon kaistanleveys oli pienestä pudotuksesta huolimatta selkeästi suurempi kuin Internet-yhteyden. Kun A/V-lähetin tuotiin 2,5 m:n etäisyydelle asunnosta, verkon kaistanleveys putosi huomattavasti ja viiveiden vaihtelut kasvoivat selvästi. Lisäksi videosuoratoisto Chromecastilla katkesi muutaman sekunnin A/V-lähettimen päälle kytkemisen jälkeen. Kun A/V-lähetin oli missä tahansa asunnon sisätiloissa, kaistanleveyttä tai viiveiden vaihtelua ei pystytty mittaamaan, koska yhteyttä palvelimelle ei syntynyt. Myöskään videosuoratoisto Chromecastilla ei onnistunut.

SJR-mittauksilla pyrittiin arvioimaan A/V-lähettimen signaalitaso, joka sai langattoman verkon yhteyden katkeamaan. Kun SJR on suurempi kuin 23 dB, A/V-lähettimen aiheuttamalla häiriöllä ei ollut merkittävää vaikutusta videosuoratoistoon Chromecastilla. Tulos vastaa kirjallisuudessa IEEE 802.11n-verkoille annettua signaalikohina-suhteen vähimmäistasoa. Videosuoratoisto Chromecastilla katkesi kokonaan kun SJR laski alle 23 dB. Ennakolta oli oletettu, että Chromecastilla suoratoistetuissa videoleikkeissä olisi näkynyt pakettien häviämisestä johtuvia häiriöitä ennen suoratoiston katkeamista kokonaan. Videosuoratoiston äkkinäiselle katkeamiselle ei löytynyt selitystä.

9 LÄHTEET

Adobe www-sivu 2014. Viitattu 30.10. 2014. <http://www.adobe.com/>.

All Beamforming Solutions Are Not Equal. 2012. Cisco. Viitattu 18.11.2014.
http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-722622.pdf.

Bauer, H., Grawert, F. & Schink, S. 2012. Semiconductors for wireless communications: Growth engine of the industry. McKinsey & Company. Viitattu 30.10.2014. <http://www.mckinsey.com>.

Bluetooth Special Interest Group www-sivut, 2014. Viitattu 18.11.2014. <https://www.bluetooth.org/>.

Carnegie Mellon University www-sivut. Viitattu 30.10.2014. <http://www.cs.cmu.edu/~internet-video/>.

Carpenter, T. 2008. CWNA® Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide (EXAM PW0-100) Fourth Edition. McGraw-Hill. Viitattu 31.10.2014.
<http://vocongminh.files.wordpress.com/2012/03/mcgraw-hill-cwna-certified-wireless-network.pdf>.

Chikkerur, S., Sundaram, V., Reisslein, M., & Karam, L. J. 2011. Objective video quality assessment methods: A classification, review, and performance comparison. *IEEE Transactions on Broadcasting* 57(2), 165-182.

Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide, Release 7.5, 2013, Cisco Systems: San Jose.

Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2013–2018, White paper. Viitattu 2.9.2014.
http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html

Cisco www-sivut 2014. Viitattu 18.11.2014.
<http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/routers/access/3200/software/wireless/3200WirelessConfigGuide/RadioChannelFrequencies.pdf>

D-Link. 2014. D-Link DIR-815 User Manual. Saatavilla http://www.dlink.com/-/media/Consumer_Products/DIR/DIR%20815/Manual/DIR815A1ManualUK.pdf.

Esala, V-P., Lehto, H. & Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Helsinki: Teknologiatieto Teknova.

Furht, B., & Marqure, O. 2003. *The Handbook of Video Databases: design and applications*. CRC Press.

Gollakota, S., Adib, F., Katabi, D. & Seshan, S. 2011. Clearing the RF smog: making 802.11 n robust to cross-technology interference. ACM SIGCOMM Computer Communication Review 41(4), 170-181.

Google Video Quality Report www-sivut 2014. Viitattu 12.11.2014.
<https://www.google.com/get/videoqualityreport/>.

GoPro 2014. The Streets of Japan in 4K. Viitattu 28.11.2014.
<http://youtu.be/s0MDY9fl-IA>.

Gummadi, R., Wetherall, D., Greenstein, B., & Seshan, S. 2007. Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 37(4), 385-396.

Hithnawi, A., Shafagh, H., & Duquennoy, S. 2014. Understanding the impact of cross technology interference on IEEE 802.15. 4. In Proceedings of the 9th ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization (pp. 49-56).

Home Theater Network www-sivut. Viitattu 10.11.2014.
<http://www.hometheaternetwork.com/>.

IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee www-sivut. Viitattu 30.10.2014.
http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm#tgma

Iperf www-sivut 2014. Viitattu 17.11.2014. <https://iperf.fr/>.

ITU-R BT.500-13. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. Recommendation. 2012. International Telecommunication Union Radiocommunication Sector ITU-R. Geneva: ITU. Viitattu 30.10.2014. <http://www.itu.int/>.

ITU-T E.800. Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Terms and definitions related to the quality of telecommunication services, Definitions of terms related to quality of service. Recommendation. 2008. International Telecommunication Union Radiocommunication Sector ITU-R. Geneva: ITU. Viitattu 30.10.2014. <http://www.itu.int/>.

Jessner, A. 2013. Advances in Radio Science, 11, Copernicus Publications s. 251-258.

Keysight www-sivut 2014. Viitattu 21.11.2014.
<http://www.keysight.com/>.

Kosola, J. & Solante, T. 2013. Digitaalinen taistelukenttä: informaatioajan sotakoneen tekniikka. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos.

LaSorte, N. J., Barnes, W. J., & Refai, H. H. 2008. The History of Orthogonal Frequency Division Multiplexing. IEEE GLOBECOM, s. 3592-3596.

Lloret, J., López, J. J., Turró, C., & Flores, S. 2004. A fast design model for indoor radio coverage in the 2.4 GHz wireless LAN. In *Wireless Communication Systems, 2004, 1st International Symposium on*. s. 408-412.

Moorthy, A. K., Choi, L. K., Bovik, A. C., & De Veciana, G. 2012. Video quality assessment on mobile devices: Subjective, behavioral and objective studies. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 6(6), s. 652-671.

Netflix www-sivut, 2014. Viitattu 30.10. 2014.
<http://ispspeedindex.netflix.com/finland>.

Niemelä, J., Asp, A., & Sydorov, Y. 2012. Radiosignaalin vaimennusmitauksia nykyaikaisissa asuintaloissa. Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

Nopeustesti www-sivut 2014. Viitattu 28.11.2014. <http://www.nopeustesti.com>

Nutaq www-sivut 2014. Viitattu 18.11.2014. <http://nutaq.com/>.

Nuutinen, M. 2014 Kuvanlaadunlaskenta. Saatavilla
https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/t-75.4100/luennot/T-75_4100_kuvanlaadunlaskenta.pdf

PCWorld www-sivut. Viitattu 10.11.2014. <http://www.pcworld.com/>.

Perahia, E. 2008. IEEE 802.11n development: history, process, and technology. *Communications Magazine, IEEE*, 46(7), s. 48-55.

Radioamatööriviestinnän taajuusalueet ja suurimmat sallitut lähetystehot. 26.3.2013. Viitattu 31.11.2014. <https://www.viestintavirasto.fi/>

Radio-electronics www-sivut 2014. Viitattu 18.11.2014. <http://www.radio-electronics.com/>.

Richardson, I. E. 2004. H. 264 and MPEG-4 video compression: video coding for next-generation multimedia. Englanti: John Wiley & Sons.

Semtech 2007. Calculating Radiated Power and Field Strength for Conducted Power Measurements. Saatavilla
http://www.semtech.com/images/promo/Semtech_ACS_Rad_Pwr_Field_Strength.pdf.

Shriram, A., Murray, M., Hyun, Y., Brownlee, N., Broido, A., Fomenkov, M., Claffy, K. 2005. Comparison of Public End-to-End Bandwidth Estimation Tools on High-Speed Links. Saatavilla
<http://www.caida.org/publications/papers/2005/pam-bwest/pam-bwest.pdf>.

Takahashi, A., Hands, D., & Barriac, O. V., 2008. Standardization activities in the ITU for a QoE assessment of IPTV. *IEEE Communications Magazine*, 79.

The Consumer Digital Video Library www-sivut 2014. Viitattu 1.12.2014.
<http://www.cdvl.org/>

TheFreeDictionary www-sivut 2014, viitattu 31.11.2014
<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/video+quality>

The University of Texas at Austin www-sivut. Viitattu 30.10.2014.
<http://live.ece.utexas.edu/>

Van Bloem, J.-W., Schiphorst, R., Kluwer, T. & Slump, C.H. 2012. Interference Measurements in IEEE 802.11 Communication Links Due to Different Types of Interference Sources

Van Nee, R., Jones, V. K., Awater, G., Van Zelst, A., Gardner, J., & Steele, G. 2006. The 802.11 n MIMO-OFDM standard for wireless LAN and beyond. *Wireless Personal Communications*, 37(3-4), s. 445-453.

Viestintävirasto 15 AF/2013 M. 2013. Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistajuuksista ja käytöstä. Helsinki. Viestintävirasto. 31.12.2013. <http://www.viestintavirasto.fi>.

Whiteboard Web www-sivut Viitattu 30.10.2014.
<http://whiteboard.ping.se/>

Winkler, S. 1999. Issues in vision modeling for perceptual video quality assessment. *Signal Processing* 78(2), s. 231-252.

YLE www-sivut 2014. Viitattu 30.10. 2014. <http://yle.fi/>

Zhang, Y., Yu, R., Xie, S., Yao, W., Xiao, Y., & Guizani, M. 2011. Home M2M networks: architectures, standards, and QoS improvement. *Communications Magazine, IEEE*, 49(4), s. 44-52.

ZigBee Alliance Interest Group www-sivut, 2014. Viitattu 18.11.2014.
<http://www.zigbee.org/>

802.11n Primer. 2008. AirMagnet. Saatavilla
<http://airmagnet.flukenetworks.com/assets/whitepaper/WP-802.11nPrimer.pdf>

8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Shanghai. Viitattu 30.10.2014.
<http://eprints.eemcs.utwente.nl/23213/01/06478551.pdf>