



TEKNIikka JA LIIKENNE

Tietotekniikka

Tietoverkot

INSINÖÖRITYÖ

ERILAISTEN 802.11n-REITITTIMIEN SUORITUSKYVYN VERTAILU

**Työn tekijä: Sami Mononen
Työn ohjaaja: Marko Uusitalo**

Työ hyväksytty: ____ . ____ . 2010

**Marko Uusitalo
Lehtori**

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Sami Mononen	
Työn nimi: Erilaisten 802.11n-reitittimien suorituskyvyn vertailu	
Päivämäärä: 26.5.2010	Sivumäärä: 75 s. + 1 liite
Koulutusohjelma: Tietotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tietoverkot
Työn ohjaaja: Lehtori Marko Uusitalo	
<p>Tässä insinööriyössä tutkitaan IEEE:n uusinta langattomien lähiverkkojen 802.11n-standardia ja vertaillaan muutamaa standardin mukaista kuluttajille suunnattua reititintä. Työssä käydään läpi standardin historiaa, sen suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä ja suurimpia muutoksia edelliseen standardiin nähden.</p> <p>Testiosiossa tutkitaan aluksi, millaisiin siirtonopeuksiin reitittimet pystyvät langallisella yhteydellä sekä millaisia siirtonopeuksia erilaisilla langattomilla asetuksilla saadaan. Seuraavaksi siirrytään tutkimaan, millaisia häiriövaikutuksia samalla alueella olevilla 802.11n- ja 802.11g-verkoilla on toisiinsa. Testeissä tutkitaan myös eri kanavien vaikutus häiriöihin.</p> <p>Seuraava testiosio keskittyy reitittimien suorituskykyyn eri etäisyyksillä. Testattavat etäisyydet ovat yksi metri, kolme metriä ja kuusi metriä. Lisäksi kuuden metrin etäisyydellä testataan esteiden vaikutus siirtonopeuksiin. Etäisyysmittauksissa testeihin saadaan mukaan myös USB-liitännäinen verkkokortti, jolloin saadaan vertailtua sisäisen ja ulkoisen kortin toimintaa.</p> <p>Testien mukaan 802.11n-verkon vaikutukset 802.11g-verkkoon ovat yllättävän suuret. Käytettäessä kanavaa 13 verkkojen päällekkäisyyttä ei pitäisi olla, mutta testien mukaan vaikutukset ovat selkeästi havaittavissa. Osassa testejä 802.11n-verkko ruuhkauttaa 802.11g-verkon toiminnan kokonaan.</p> <p>Etäisyysmittausten aikana saadaan hyviä tuloksia maksimisiirtonopeuksissa, vaikka tulokset ovat lupailusta 300 Mbps:n nopeudesta noin 44 %.</p> <p>802.11n tarjoaa paljon parannuksia vanhentuneeseen 802.11g-standardiin nähden. Hetkelliset siirtonopeudet ylittävät jopa 10/100 Ethernetin nopeudet.</p>	
Avainsanat: IEEE, 802.11, 802.11n, MIMO, WLAN	

ABSTRACT

Name: Sami Mononen	
Title: A Comparison of Different 802.11n Routers	
Date: 26.5.2010	Number of pages: 75 p. + 1 Appendix
Department: Information Technology	Study Programme: Information Networks
Instructor: Senior Lecturer Marko Uusitalo	
Supervisor: Senior Lecturer Marko Uusitalo	
<p>This thesis work studies IEEE's latest wireless networking standard, 802.11n, and compares a few different 802.11n consumer-class wireless routers. The thesis looks at the history of the standard, the technology behind its performance and the most significant changes made to the previous standard.</p> <p>The test section starts with looking at throughput speeds in wired connections and moves on to throughput speeds with different wireless settings. Possible interference with two adjacent 802.11n and 802.11g networks is tested next. The tests also cover the effect to the interference when using different channels.</p> <p>The next set of tests focuses to the performance of the routers at different distances. The tested distances are one meter, three meters and six meters. In addition, the six meter tests also measure the effect of obstacles. The distance measurements also have a USB connected wireless card in use, so that it is possible to compare the performance with the integrated wireless card used in the other tests.</p> <p>The results indicate that the effects of 802.11n networks to 802.11g networks are surprisingly great. There should be no overlapping in the adjacent networks when using channel 13, but the tests show significant effects. In part of the tests, the 802.11n network overrides the 802.11g network completely.</p> <p>The distance measurements show good maximum throughput speeds, although the best result is merely 44 % of the advertised 300 Mbps.</p> <p>The 802.11n standard brings many enhancements to the outdated 802.11g. Some of the measured throughput speeds exceed the speeds of 10/100 Ethernet.</p>	
Keywords: IEEE, 802.11, 802.11n, MIMO, WLAN	

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET

1	JOHDANTO	1
2	LANGATTOMAT LÄHIVERKOT (WLAN)	2
3	IEEE 802.11-STANDARDIN HISTORIAA	2
3.1	Fyysinen kerros	3
3.2	Modulointi	4
3.3	Carrier-Sense Multiple Access Collision Avoidance (CSMA/CA)	5
4	IEEE 802.11N:N MERKITTÄVIMMÄT UUDISTUKSET JA OMINAISUUDET	5
4.1	Multiple-input multiple-output (MIMO)	6
4.2	Spatial Multiplexing (SM)	7
4.3	Space Time Block Coding (STBC)	7
4.4	Kanavien yhdistäminen (20MHz x 2)	8
4.5	Parannuksia OFDM:ään	8
4.6	Lyhyempi suojavaäli	8
4.7	MAC-kerroksen muutokset	9
4.7.1	<i>Kehysten yhdistäminen</i>	9
4.7.2	<i>MSDU-yhdistäminen (A-MSDU)</i>	10
4.7.3	<i>MPDU-yhdistäminen (A-MPDU)</i>	10
4.7.4	<i>Block Acknowledgement (Block ACK)</i>	11
4.7.5	<i>Reduced Interframe Space (RIFS)</i>	12
4.8	Modulation and Coding Scheme	12
5	KÄYTÄNNÖN TESTIT	13
5.1	Testin tavoitteet	13
5.2	Testitila	13
5.3	Testiohjelmisto ja testattavat laitteet	14
6	TESTITULOKSET	20
6.1	Reitityskyky	20
6.2	Siirtonopeudet eri WLAN-asetuksilla	21
6.2.1	<i>WPA:n vaikutus siirtonopeuteen</i>	21
6.2.2	<i>40 MHz yhdistetyt kanavat</i>	22
6.2.3	<i>Suojavaälin vaikutus siirtonopeuteen</i>	23

6.3	Reitittimien siirtonopeuksien vertailu	24
6.4	802.11g -häiriöverkkomittaukset	26
6.4.1	<i>DIR-825</i>	28
6.4.2	<i>DIR-855</i>	33
6.4.3	<i>WNDR3700</i>	38
6.4.4	<i>WRT320N</i>	43
6.4.5	<i>Yhteenveto häiriöverkon mittauksista</i>	45
6.5	Etäisyysmittaukset	46
6.5.1	<i>DIR-855</i>	46
6.5.2	<i>WNDR3700</i>	52
6.5.3	<i>WRT320N</i>	58
6.5.4	<i>DIR-825</i>	64
6.5.5	<i>Yhteenveto etäisyysmittauksista</i>	69
7	YHTEENVETO	71
	VIITELUETTELO	74

LIITTEET

LIITE 1	Reitittimien vertailutaulukko
----------------	--------------------------------------

LYHENTEET

802.11	IEEE:n langattomien lähiverkkojen standardi.
802.11n	Langattomien lähiverkkojen uusin standardi, hyväksytty 11.9.2009.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , eurooppalainen standardointijärjestö.
GI	<i>Guard Interval</i> , suojaväli.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , kansainvälisesti määritellyt, vapaassa käytössä olevat taajuusalueet.
MAC	<i>Media Access Control</i> , OSI-mallin datasiirtokerroksen alikerros.
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i> , modulaatiotaulukko, jossa eri modulaatiovaihtoehdoille annetaan MCS-numero.
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> , 802.11n-standardissa käytössä oleva älykäs moniantennitekniikka.
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i> , MAC-kerroksen datakehys.
MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i> , OSI-mallissa ylemmältä kerrokselta MAC-kerrokseen saapuva kehys.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> , modulointitekniikka.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , seitsemään kerrokseen jaettu malli järjestelmän toiminnasta.
RIFS	<i>Reduced Inter-Frame Space</i> , tekniikka, jolla lyhennetään kehysten väliin jäävää aikaa.

SM	<i>Spatial Multiplexing</i> , siirtotekniikka, joka hyödyntää moniantennitekniikkaa jakamalla siirrettävää dataa useiden antennien kesken.
STBC	<i>Space Time Block Coding</i> , verkon toimintavarmuutta parantava tekniikka, lähettää samoja paketteja useilla antenneilla.
WAN	<i>Wide Area Network</i> , laajaverkko, reitittimessä; yhteys internetiin.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , langaton lähiverkko.

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) uusimman langattomien lähiverkkojen standardin (802.11n) mukaisten reitittimien toimintaa erilaisissa tilanteissa. Vertailussa on mukana neljä erilaista tukiasemaa.

IEEE 802.11n -standardin suurimmat hyödyt verrattuna aikaisempiin IEEE 802.11g (2,4 GHz) ja 802.11a (5 GHz) -standardeihin ovat siirtonopeuden paraneminen käyttäen MIMO-tekniikkaa (Multiple-Input and Multiple-Output) ja 40 MHz:n levyisiä kanavia, 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueiden hyödyntäminen sekä pidemmät verkon kantoalueet. 802.11n on yhteensopiva aikaisempien standardien mukaisten laitteiden kanssa, mutta täyden siirtonopeuden ja kantaman hyödyntäminen vaatii tietenkin uusimman standardin mukaiset laitteet.

Tässä insinööriyössä tutkitaan 802.11n-standardin parantuneita siirtonopeuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä sekä teoriatasolla että käytännössä. Testaukseen on valittu muutamia eri valmistajien 802.11n-reitittimiä. Kaikissa reitittimissä on mahdollisuus käyttää sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuusalueita. Langattoman verkon maksiminopeuksien selvittämiseksi testiin on valittu vain reitittimiä, joissa on gigabitin ethernetportit. Näin eliminoidaan 10/100-ethernetportin tiedonsiirtorajoitukset. Testauksissa tutkitaan myös vanhemman 802.11g-standardin verkon läsnäolon vaikutuksia siirtonopeuksiin.

Teoriassa tutkitaan, mitkä tekijät vaikuttavat siirtonopeuksiin ja minkälaisia nopeuksia teoriassa on saavutettavissa. Käytännössä tutkitaan, millaisiin nopeuksiin reitittimet pystyvät erilaisissa tilanteissa ja mitä vanhemman 802.11g-standardin läsnä olevat verkot vaikuttavat verkon siirtonopeuksiin.

2 LANGATTOMAT LÄHIVERKOT (WLAN)

Langattomien lähiverkkojen (WLAN, Wireless Local Area Network) käyttö on lisääntynyt viime aikoina erittäin nopeasti. Lähiverkkojen nopeusvaatimukset ovat kasvaneet rajusti internetliittymien nopeuksien kasvaessa ja verkkojen multimediakäytön yleistymisen vuoksi. Esimerkiksi IP-puhelut (VoIP, Voice over Internet Protocol) sekä videoiden tai musiikin streamaus vaativat toimiakseen paljon siirtonopeutta ja vakaata verkkoa.

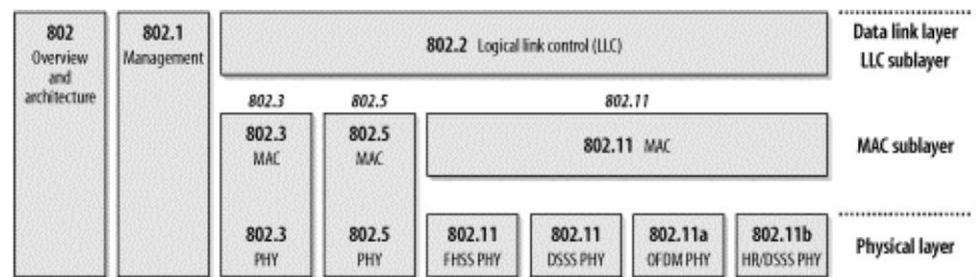
Langattomat lähiverkot toimivat nimensä mukaisesti ilman fyysistä kytkentää radiotaajuuksilla tai infrapunavalolla. Radiotaajuudet ovat yleisemmin käytössä niiden leveämmän kaistan, nopeamman tiedonsiirron ja paremman kantaman takia. Laitteiden välistä näköyhteyttä ei myöskään tarvita. Nykyään langattomissa lähiverkoissa käytetään 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n ISM-taajuusalueita (Industrial, Scientific and Medical). ISM-taajuusalueet ovat kansainvälisesti määritellyjä kaistoja, joiden käyttöön ei tarvita erillistä lupaa.

Langattomien lähiverkkojen standardeja on kaksi: IEEE:n 802.11 ja ETSI:n (European Telecommunications Standards Institute) HiperLAN (High Performance Radio LAN). Valmistajat ovat kuitenkin panostaneet lähes ainoastaan IEEE:n standardin tukemiseen. ETSI onkin sittemmin lopettanut HiperLANin kehittämisen ja keskittyy matkapuhelinverkkojen standardoimiseen. Lisäksi laitevalmistajien yhteisö Wi-Fi Alliance täydentää toimillaan IEEE:n 802.11-standardien yhteensopivuuksia eri laitevalmistajien välillä. Jos langaton laite on testattu ja todettu Wi-Fi -yhteensopivaksi, sen toiminta toisen Wi-Fi -laitteen kanssa taataan. [1; 2, s. 9.]

3 IEEE 802.11-STANDARDIN HISTORIAA

IEEE 802 on kansainvälinen työryhmä, joka kehittää lähi- ja kaupunkiverkostandardeja. Näistä yleisimmin käytössä olevat standardit ovat 802.3 (Ethernet), 802.5 (Token Ring), 802.11 (WLAN) ja 802.16 (WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access). Kaikilla 802-työryhmän standardeilla on yhteinen osa, LLC (Logical Link Control), OSI-mallin (Open Systems Interconnection Reference Model) siirtoyhteyserroksella, joka mahdollistaa eri standardien yhteensopivuuden kytkentätavasta riippumatta (kuva 1). LLC

määritellään IEEE:n 802.2 -standardissa. Työryhmän standardit sijoittuvat OSI-mallin fyysiselle (kerros 1, PHY) ja siirtoyhteyskerrokselle (kerros 2, Data Link Layer). [3; 4]



Kuva 1. IEEE 802 -standardit OSI-mallissa [4]

IEEE 802.11 -työryhmä alkoi kehittää OSI-mallin mukaista yleistä MAC-kerrosta (Media Access Control) fyysiselle kerrokselle (PHY) luodakseen yhtenäisen standardin langattomille lähiverkoille. Alkuperäinen 802.11-standardi julkaistiin vuonna 1997. Nopeudet olivat kuitenkin hyvin vaatimattomat, 1-2 Mbps (Megabits per second, Megabittiä sekunnissa), joten vuonna 1999 IEEE julkaisi kaksi standardia: 802.11b:n (2,4 GHz, 11 Mbps) ja 802.11a:n (5 GHz, 54 Mbps). Näistä suosittumaksi muodostui 802.11b sen pidemmän kantaman vuoksi, vaikka 802.11a olikin siirtonopeuksiltaan parempi. Vuonna 2003 julkaistiin 802.11g-standardi, jonka teoreettinen maksiminopeus oli 54 Mbps. Kehysten sisältämän hukkadatan vuoksi todelliset nopeudet olivat tosin vain noin 20-25 Mbps.

802.11g-standardi ja sen teoreettinen siirtonopeus 54 Mbps ovat kuitenkin jääneet kehityksen jalkoihin. 2003 perustettu työryhmä alkoi tutkia standardin suorituskyvyn parantamista. Vuonna 2007 julkistettiin 802.11n-draft 2.0, luonnos tulevasta standardista, joka mahdollistaisi jopa 600 Mbps langattomat siirtonopeudet. Laittevalmistajat alkoivat nopeasti tuoda markkinoille tähän esistandardiin perustuvia laitteita.

IEEE 802.11n -standardi ratifioitiin 11. syyskuuta 2009. Draft 2.0 -versioon perustuvat laitteet ovat lopullisen standardin kanssa yhteensopivia joko suoraan tai ohjelmistopäivitysten kautta. [4; 5, s. 3-4.]

3.1 Fyysinen kerros

OSI-mallin alin kerros on fyysinen kerros, jossa määritellään tiedonsiirtoon liittyvät lähetys- ja vastaanottotavat. Fyysisellä kerroksella siirretään ainoas-

taan raakadataa. Raakadatan kääntäminen laitteilla vastaanotettavaan ja lähetettävään muotoon tehdään siirtoyhteyserroksessa.

802.11-standardissa raakadatan muuntaminen on ratkaistu jakamalla PHY kahteen osaan; PLCP:hen (Physical Layer Convergence Procedure), jonka tehtävänä on järjestää MAC-kehukset siirtotielle, ja PMD:hen (Physical Medium Dependent) joka lähettää kehykset. PLCP on siis yhteydessä sekä fyysiseen että siirtoyhteyserrokseen ja toimii vain välittäjänä kahden kerroksen välillä. Varsinaisen fyysisen kerroksen siirtotyön tekee PMD. [4; 6, s. 72-73.]

3.2 Modulointi

Eri 802.11-standardeissa käytetyt modulointitekniikat ovat kuvattuna taulukossa 1.

Taulukko 1. 802.11-standardien fyysiset kerrokset [5, s. 5]

	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Modulaatio	DSSS	DSSS/CCK	OFDM	OFDM DSSS/CCK	SDM/OFDM
Nopeus	1, 2 Mbps	5,5, 11 Mbps	6-54 Mbps	1-54 Mbps	6-600 Mbps
Taajuusalue	2,4 GHz	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4 ja 5 GHz
Kanavaleveys	25 MHz	25 MHz	20 MHz	25 MHz	20 ja 40 MHz

Complementary Code Keying (CCK)

DSSS-tekniikassa (Direct Sequence Spread Spectrum) lähetettävä data pilkotaan pieniin osiin, jotka lähetetään rinnakkaisvuona eteenpäin. Alkuperäinen 802.11-standardi pilkkoi tuon virran 11-bittisiksi, ns. Barkerin sanoiksi ja pystyi lähettämään miljoona pakettia sekunnissa. Jokaisen sanan avulla saattoi pakata bitin tai kaksi. Vastaavasti nopeus oli tuolloin 1 tai 2 Mbps. 802.11b-standardissa esitelty Complementary Code Keying (CCK) pilkkoo saman datavirran 8 bitin koodisymboleiksi, joita siirretään 1,375 miljoonaa symbolia sekunnissa. Muutamien koodisymbolien avulla voidaan koodata jopa neljän tai kahdeksan bitin paketteja. Nopeus nousi näin 5,5 tai 11 Mbps:ään. [4.]

Nopeuden nosto johti 802.11b:n hurjaan suosioon, ja markkinoita aiempaan standardiin kuuluneille siirtoteille, infrapunalle tai FHSS:lle (Frequency Hop-

ped Spread Spectrum) ei käytännössä enää ollut. CCK:ta käytettiin ainoastaan 802.11b-standardissa. [5, s. 4.]

Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)

802.11a ja 802.11g-standardeissa käytettiin OFDM-tekniikkaa. Siinä siirtokanava jaetaan useisiin pienempiin taajuuskanaviin. OFDM käyttää 52 taajuuskanavaa, joista 48:aa käytetään datasiirtoon ja neljää synkronointiin. Taajuuskanavat ovat toisistaan riippumattomia. Datasiirron nopeus riippuu käytettävästä modulaatiosta. PSK:ta (Phase Shift Keying) käytettäessä maksiminopeus voi olla 18 Mbps ja QAM:ia (Quadrature Amplitude Modulation) käyttäen 54 Mbps. [6, s. 80-81.]

3.3 Carrier-Sense Multiple Access Collision Avoidance (CSMA/CA)

Koska langattomat lähiverkot toimivat vapailla taajuusalueilla, ne ovat erittäin alttiita pakettien törmäilyille. Tekniikka, jota 802.11:ssä käytetään, on nimeltään CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance). Tekniikka on hyvin samankaltainen Ethernetissä määriteltyyn CSMA/CD-tekniikkaan (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) nähden. CSMA/CD perustuu siirtotien tarkkailuun ja törmäyksien havaitsemiseen. Radiopohjaisessa lähiverkossa lähettävä laite ei voi kuunnella törmäyksiä lähettäessään dataa. Siksi CSMA/CA:ssa varataan siirtotie ennen datan lähetystä. Jos siirtotie on vapaa, lähetys tehdään. Jos siirtotie ei ole vapaa, tai laite ei saa kuittausta onnistuneesta pakettisiirrosta (ACK), se odottaa satunnaisen ajan ennen uudelleen yrittämistä. [6, s. 155; 2, s. 118-120.]

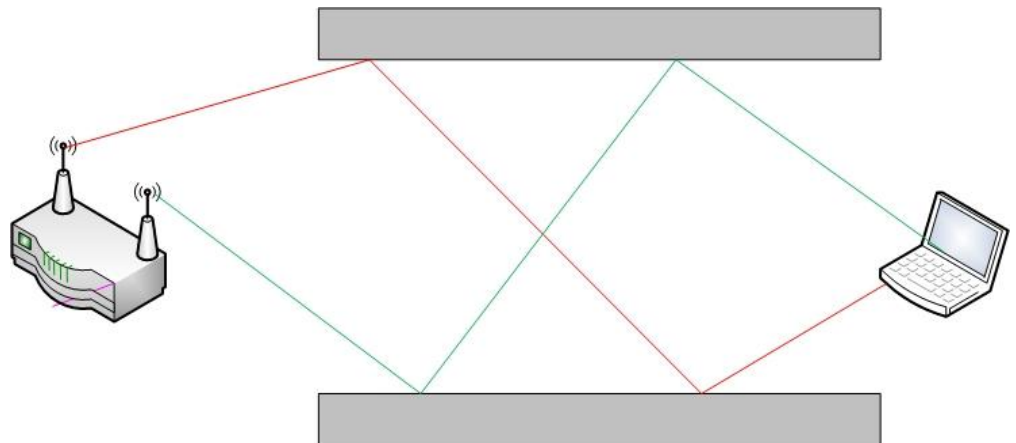
4 IEEE 802.11N:N MERKITTÄVIMMÄT UUDISTUKSET JA OMINAISUUDET

IEEE 802.11n parantaa aikaisempia 802.11-standardeja monella tavalla. Standardin päätarkoitus on nostaa kokonaissiirtonopeutta, mutta myös kantama ja virrankulutus ovat parantuneet. Koska standardimuutokset vaikuttavat useammalla tasolla, kokonaisvaikutukset suorituskykyyn ovat useimmiten jopa paremmat kuin pelkkä maksimisiirron nopeutumisen. Siirtyminen 802.11n:ään ei vain nosta maksiminopeutta 54 Mbps:stä 300 Mbps:ään, vaan se myös vähentää käytettyjen otsakekenttien ja virheenkorjauskenttien kokoa, jolloin kehukseen jää enemmän tilaa hyötydatalle. Tässä insinööri-

työssä keskitytään nimenomaan hyötydataan ja sen siirtonopeuksiin. [7, s. 2.]

4.1 Multiple-input multiple-output (MIMO)

Merkittävin uusi tekniikka 802.11n-standardissa on MIMO; useamman lähettimen ja vastaanottimen käyttö langattomassa laitteessa datan siirtämiseen. Vaikka se on ensimmäistä kertaa 802.11-standardissa mukana, MIMO ei ole varsinaisesti uutta tekniikkaa. Se on ollut jo käytössä joissain vanhemmissa 802.11g-laitteissa valmistajakohtaisesti. Koska MIMO ei ole aikaisemmin kuulunut standardiin, se ei ole ollut yhteensopiva eri valmistajien välillä. MIMO on älykäs antennijärjestelmä, joka käyttää useampia antenneita radio-signaalin parantamiseen ja tiedonsiirron nopeuttamiseen. (Kuva 2.)

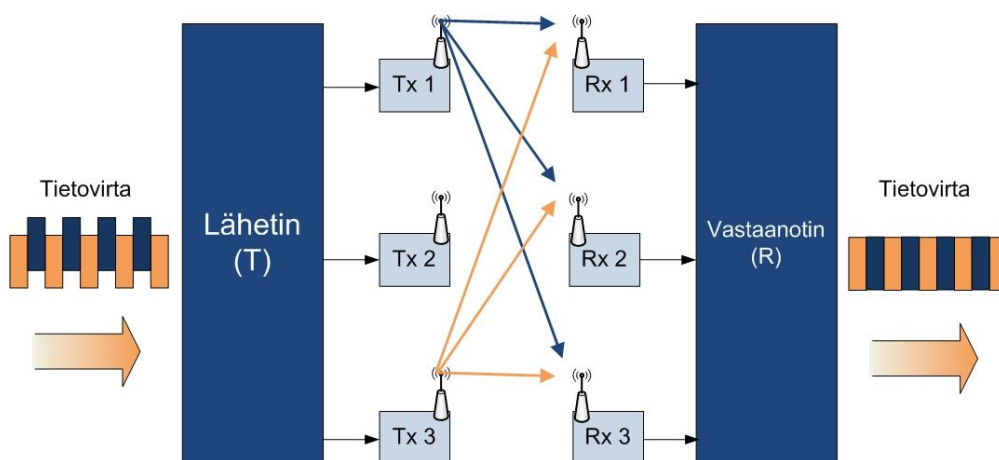


Kuva 2. Monitie-eteneminen (MIMO)

Lähetettävien ja vastaanottavien antennien määrä on määritelty standardissa tapaan $T \times R$, jossa T on lähetettävien antennien määrä ja R vastaavasti vastaanottavien antennien määrä. Antennimäärät voivat vaihdella 1×1 :stä aina 4×4 :ään. Siirtonopeus ei kuitenkaan riipu ainoastaan antennien määrästä, vaan yhtäaikaan käytettävien tietovirtojen (spatial stream) määrästä. N-standardissa tukiaseman pitää pystyä vähintään kahteen yhtäaikaiseen tietovirtaan. Standardin mukaan kolmen tai neljän tietovirran käyttö on mahdollista, joskaan ei pakollista. Neljän yhtäaikaisen tietovirran käyttö mahdollistaa standardin mukaisen teoreettisen maksiminopeuden, 600 Mbps. [5, s. 16; 7, s. 2; 8, s. 5.]

4.2 Spatial Multiplexing (SM)

Yksi MIMO:ssa käytettävä tekniikka on Spatial Multiplexing eli SM. SM jakaa lähetettävän datan useisiin osiin, ja jakaa ne lähetävien antennien kesken. Tietovirrat lähetetään eri antennilla, mutta samalla kanavalla. Kokonaisvirtojen määrä riippuu vastaanottimen ja lähettimen antennimäärästä. Jos esim. lähettimessä on kaksi antennia ja vastaanottimessa kolme, yhtäaikaisten tietovirtojen määrä voi olla kaksi. Sama pätee myös toiseen suuntaan. Vastaanotin kasaa erilliset tietovirrat jälleen alkuperäiseksi dataksi. Tämä toiminta on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Spatial Multiplexing kahdella tietovirralla [9]

Antennien määrä ei kuitenkaan välttämättä kerro, kuinka monta yhtäaikaista tietovirtaa voidaan hyödyntää. Monessa tukiasemassa on kolme antennia, vaikka ne tukevat vain kahta yhtäaikaista tietovirtaa. Ylimääräinen antenni lisää diversiteettiä ja parantaa verkon laajuutta. Asema voi kolmen antennin avulla kuunnella eri aikaan saapuvia lähetyksiä ja laskea saapuvien bittien oikean järjestyksen. [7, s. 2-3; 8, s. 4-5.]

4.3 Space Time Block Coding (STBC)

Toinen MIMO:n yhteydessä käytettävä tekniikka on Space Time Block Coding, STBC. STBC:n tarkoitus on parantaa langattoman yhteyden luotettavuutta. Tekniikan avulla samasta datasta voidaan lähettää useita kopioita eri antennien kautta. Koska eri lähetykset kulkevat eri reittejä ja saattavat altistua erilaisille häiriöille matkalla, toinen kopio vastaanotetusta tietovirrasta saattaa olla paremmin säilynyt kuin toinen. Näitä paketteja yhdistelemällä saadaan luotettavampi langaton yhteys, ja vähemmän tarvetta uudelleen lä-

hetyksille. STBC:tä on mahdollista käyttää SM:n kanssa, mutta ainoastaan kun lähetysantenneja on enemmän kuin vastaanottavia antenneja. [10.]

4.4 Kanavien yhdistäminen (20MHz x 2)

802.11a ja 802.11g käyttivät 20 MHz:n levyisiä kanavia. 802.11n-standardissa voidaan yhdistää kaksi rinnakkaista 20 MHz:n kanavaa yhdeksi 40 MHz:n levyiseksi kanavaksi. Näin kanavan siirtonopeus voidaan tuplata. Suurin mahdollinen teoreettinen tiedonsiirtonopeus kanavassa voidaan laskea signaali/kohina-suhteen avulla Shannon-Hartleyn lakia käyttäen (kaava 1).

$$Q = W \log_2(1 + S/N) \quad (1)$$

jossa Q on suurin mahdollinen teoreettinen tiedonsiirtonopeus (bit/s), W on kanavan leveys hertseinä, S on keskimääräinen signaalin teho watteina ja N on kohinan keskimääräinen teho watteina.

Shannon-Hartleyn laki osoittaa, että suurin mahdollinen teoreettinen tiedonsiirtonopeus on suoraan verrannollinen kaistan leveyteen jos signaali-kohinasuhde pysyy samana. Kanavan leveyden tuplaaminen onkin hyvin yksinkertainen tapa lisätä tiedonsiirtonopeutta. [11.]

4.5 Parannuksia OFDM:ään

Kappaleessa 3.2 kuvattua OFDM:ää on paranneltu entisestään 802.11n-standardissa. Aikaisemmin 802.11a:ssa ja 802.11g:ssä 20 MHz:n levyinen kanava oli jaettu 52 alikanavaan. Maksimisiirtonopeus tuolloin oli 54 Mbps, joten jokainen siirtokanava siirsi noin 1 Mbps. 802.11n:ssä samanlevyinen kanava jaetaan 56 osaan, mutta jokaisen alikanavan siirtonopeus pysyy samana. Näin saadaan noin 8 %:n parannus siirtonopeuteen. Tuplatussa, 40 MHz leveässä kanavassa alikanavia voi olla 114, jolloin siirtonopeus kasvaa huomattavasti. [7, s. 3.]

4.6 Lyhyempi suojaväli

Jotta useat peräkkäin lähetettävät tietovirrat eivät menisi sekaisin, 802.11-standardeissa määritellään niiden väliin lyhyt tauko. Tätä taukoa kutsutaan suojaväliksi (GI, Guard Interval). Aikaisemmissa standardeissa käytetty suojaväli 800 ns on 802.11n:ssä mahdollista puolittaa 400 ns:ään. Koska lähet-

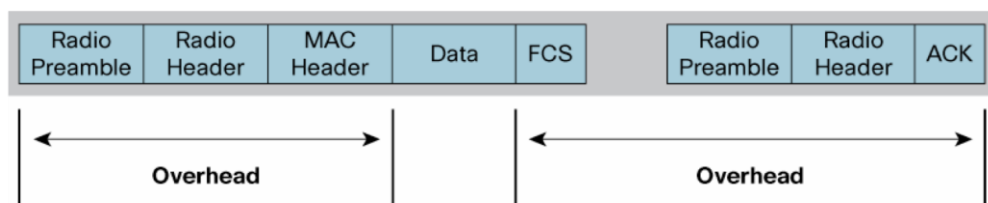
timen pitää odottaa vähemmän aikaa tietovirtojen välissä, datan siirtämiseen jää enemmän aikaa. [7, s. 4.]

4.7 MAC-kerroksen muutokset

Radiotien siirtonopeuden kasvattaminen ei kuitenkaan riitä kovin pitkälle. Siksi 802.11n:ssä on tehty muutoksia myös MAC-kerrokseen. Aiemmin MAC-kehyksessä on ollut merkittävä määrä otsaketietoa, joka toimii ns. hukkadatana, vieden kehyksestä tilaa varsinaiselta hyötydataalta. Korkeammissa nopeuksissa tämä hukkadata voi viedä tilaa jopa enemmän kuin itse hyötydata.

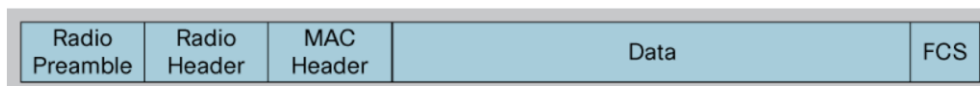
4.7.1 Kehysten yhdistäminen

Jokainen lähetetty kehys sisältää määrätyn määrän hukkadataa ohjausotakkeiden muodossa, jotka vähentävät mahdollisen hyötydatan määrää kehyksessä. (Kuva 4.)



Kuva 4. Hukkadata [12, s. 9]

802.11n sisältää tekniikan, joka pystyy yhdistämään kehyksiä (frame aggregation). Yhteen lähetykseen voidaan sisällyttää kaksi tai useampia kehyksiä. Kehyksien yhdistämistapoja on kaksi: Mac Service Data Unit (MSDU) -pakettien yhdistäminen ja Message Protocol Data Unit (MPDU) -pakettien yhdistäminen. Molemmissa tekniikoissa useampia paketteja voidaan lähettää vain yksillä otsaketiedoilla. Näin hukkadatan määrä putoaa huomattavasti. (Kuva 5.)



Kuva 5. Kehysten yhdistäminen [12, s. 9]

Koska useita paketteja lähetetään yhdessä lähetyksessä, mahdollisten törmäysten määrä putoaa merkittävästi. Myös pakettien lähetysten välinen odotusaika putoaa hyvin pieneksi.

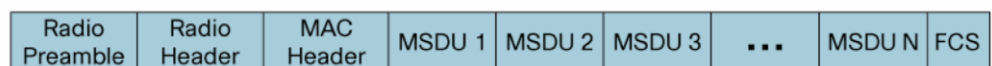
Pakettien yhdistämisen vuoksi 802.11n:ssä datakehysten maksimikokoa on täytynyt nostaa. Aikaisempi 4 kB:n kehyskoko on nostettu 64 kB:hen. Kehysten yhdistämisessä on kuitenkin pieniä rajoituksia. Jotta kehykset voitaisiin yhdistää, niiden on oltava menossa samaan paikkaan, samalle langattomalle asemalle tai tukiasemalle. Yhdistettyyn kehykseen liitettävien pakettien on myös oltava valmiina samanaikaista lähetystä varten. Tämä saattaa johtaa joidenkin pakettien odotteluun ennen kokonaisen yhdistelmäkehysten lähettämistä. Aikakriittisessä tiedonsiirrossa, esimerkiksi IP-puheluissa, pakettien yhdistämistä ei siis voida käyttää. Paketit on saatava vastaanottajalleen järjestyksessä ja mahdollisimman pienellä viiveellä.

Vaikka miltei kaikki 802.11n Draft 2.0 -luonnosversion mukaiset laitteet tukivatkin kehysten yhdistämistä, niin pakolliseksi osaksi standardia se tuli vasta lopullisessa versiossa.

4.7.2 MSDU-yhdistäminen (A-MSDU)

A-MSDU on kahdesta edellä mainitusta tekniikasta tehokkaampi. Siinä tukiasema yhdistää Ethernet-portistaan saamia kehyksiä, ja lähettää niitä yhdistettyinä 802.11-kehyksinä langattomasti eteenpäin. Koska yhdistämisen kohteena ovat Ethernet-kehykset, joissa on 802.11-paketteja lyhyempi otsakekenttä, A-MSDU on MPDU-yhdistämistä (A-MPDU) tehokkaampi. Ethernet-kehykset paketoidaan yhteen 802.11-kehykseen, joka lähetetään eteenpäin. (Kuva 6).

MSDU = Ethernet Frame



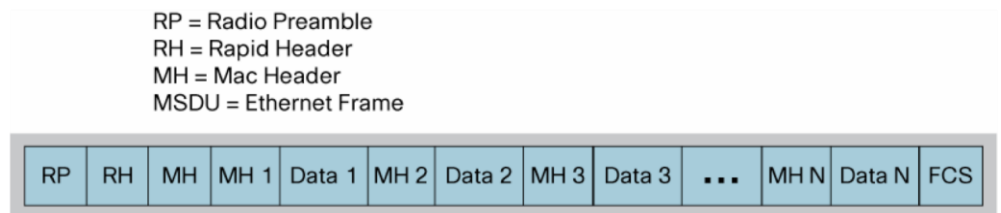
Kuva 6. MSDU-yhdistäminen [12, s. 10]

Toisin päin toimittaessa, yhdistetty kehys lähetetään tukiasemalle, josta yhdistetyt Ethernet-kehykset ohjataan oikeisiin osoitteisiin. A-MSDU toimiiikin paremmin tukiasemalle päin, koska kaikki asemilta lähetettävät kehykset ovat menossa sille. Kaikkien yhdistettyjen kehysten pitää kuitenkin olla samaa QoS-tasoa (Quality of Service).

4.7.3 MPDU-yhdistäminen (A-MPDU)

A-MPDU poikkeaa A-MSDU:sta niin, että se ei yhdistele Ethernet-pohjaisia kehyksiä, vaan muuttaa ne 802.11-kehyksiksi, ja kerää samaan paikkaan

meneviä kehyksiä. Kerättyjä kehyksiä ei enää tarvitse paketoita, koska ne sisältävät jo tarvittavan 802.11-otsakkeen. (Kuva 7.)



Kuva 7. MPDU-yhdistäminen [12, s. 11]

Kuten A-MSDU:ssakin, yhdistettyjen kehysten pitää olla menossa samaan paikkaan, ja olla samaa QoS-tasoa. A-MSDU:sta poiketen, A-MPDU mahdollistaa jokaisen yksittäisen yhdistetyn kehysten salauksen.

A-MPDU:n huonompi tehokkuus A-MSDU:hun nähden on jokaisen yhdistetyn 802.11-kehysten sisältämä otsake. Tämä tuo yhdistettyyn kehukseen lisää hukkatilaa. Myös yhdistettyjen kehysten salaustiedot vievät tilaa. A-MSDU:ssa salaus tehdään kerran koko yhdistetyille kehykselle.

4.7.4 Block Acknowledgement (Block ACK)

Jotta langaton tiedonsiirto sujuisi luotettavasti, jokainen lähetetty kehys kuittataan saapuneeksi vastaanottajan toimesta. Näin lähettänyt osapuoli tietää, että tieto on mennyt perille, eikä uudelleen lähetystä tarvita. A-MSDU:ssa kuittaukset toimivat kuten ennenkin. Lähetetyt kehykset on paketoitu yhteen 802.11-kehukseen, ja koko kehys kuittataan kerralla. A-MPDU:ssa jokainen yhdistetty kehys pitäisi kuittata erikseen. Tätä ongelmaa varten 802.11n sisältää Block ACK-tekniikan, lohkokuittauksen.

Kun vastaanottaja saa A-MPDU-kehysten, se tekee yhden kuittauskehysten, joka sisältää kaikkien yhdistetyssä kehysesä olleiden yksittäisten kehysten kuittaukset ja lähettää sen alkuperäiselle lähettäjälle. Jos lähettäjä huomaa kuittauskehysten saatuaan jonkin paketin puuttuvan, se voi lähettää vain puuttuvan paketin. A-MSDU:ssa virheen sattuessa koko yhdistetty paketti joudutaan lähettämään uudestaan. A-MPDU onkin erittäin käyttökelpoinen tekniikka häiriöherkällä alueella toimittaessa.

4.7.5 Reduced Interframe Space (RIFS)

Kun kehysten yhdistämistä ei voida tehdä, 802.11n käyttää lyhyempiä kehysvälejä. Tämä tekniikka on nimeltään RIFS. Kehysten välisiä taukoja on lyhennetty entisestään. RIFS on tosin vain 802.11n-yhteensopiva, eikä sitä voida käyttää lainkaan, jos verkossa on vanhemman standardin laitteita mukana. [5, s. 203-224; 10, s. 9-10; 12, s. 9-12.]

4.8 Modulation and Coding Scheme

802.11n-laitteiden välisen yhteyden takaamiseksi, niiden pitää pystyä sopimaan siirtoon käytettävistä asetuksista. 802.11n:ssä on suuri määrä muuttujia, jotka vaikuttavat siirron nopeuteen. Tällaisia ovat muiden muassa rinnakaisten siirtoteiden määrä, kanavaleveys, taajuusmodulointi, virhekoodin pakkaussuhde ja suojaväli. 802.11n:ssä eri vaihtoehtoja voi olla 77. Siksi tarvitaan yksinkertaistettu tapa sopia niistä. Jokainen eri asetusratkaisu on numeroitu, jolloin laitteet tietävät mistä asetuksesta on kyse. Nämä numeroinnit on kerätty Modulation and Coding Scheme (MCS) -taulukkoon (taulukko 2). [10, s. 7-8.]

Taulukko 2. Joitain MCS-arvoja. [10, s. 8.]

MCS-numero	Modulointi	Pakkaus suhde	Tietovirtojen määrä	Datanopeus (Mbps) 20 MHz		Datanopeus (Mbps) 40MHz	
				GI 800 ns	GI 400 ns	GI 800 ns	GI 400ns
0	BPSK	1/2	1	6,50	7,20	13,50	15,00
1	QPSK	1/2	1	13,00	14,40	27,00	30,00
2	QPSK	3/4	1	19,50	21,70	40,50	45,00
3	16-QAM	1/2	1	26,00	28,90	54,00	60,00
4	16-QAM	3/4	1	39,00	43,30	87,00	90,00
5	64-QAM	2/3	1	52,00	57,80	108,00	120,00
6	64-QAM	3/4	1	58,50	65,00	121,50	135,00
7	64-QAM	5/6	1	65,00	72,20	135,00	150,00
8	BPSK	1/2	2	13,00	14,40	27,00	30,00
9	QPSK	1/2	2	26,00	28,90	54,00	60,00
10	QPSK	3/4	2	39,00	43,30	81,00	90,00
11	16-QAM	1/2	2	52,00	57,80	108,00	120,00
12	16-QAM	3/4	2	78,00	86,70	162,00	180,00
13	64-QAM	2/3	2	104,00	115,60	216,00	240,00
14	64-QAM	3/4	2	117,00	130,00	243,00	270,00
15	64-QAM	5/6	2	130,00	144,40	270,00	300,00
16	BPSK	1/2	3	19,50	21,70	40,50	45,00
...
31	64-QAM	5/6	4	260,00	288,90	540,00	600,00

Taulukossa 2 näkyvät MCS-arvot 0-31 käyttävät samaa modulointitekniikkaa ja pakkaussuhdetta jokaiselle tietovirralle. Taulukon loput arvot 32-77 käyttävät muuttuvia arvoja tietovirroissa. Esimerkiksi MCS-numero 42 käyttää ensimmäisessä tietovirrassa 64-QAM:ia, toisessa 16-QAM:ia ja kolmannessa QPSK:ta. [5, s. 364.]

802.11n-tukiasemien ja laitteiden täytyy standardin mukaan tukea vähintään MCS-arvoja 0-15, joten 802.11n-standardin mukaisen laitteen, paitsi puhelimen, täytyy pystyä vähintään kahteen erilliseen tietovirtaan. Myös antennija täytyy näin ollen olla vähintään kaksi. Hankittaessa tukiasemaa kannattaakin selvittää tukiaseman tukemat MCS-arvot. Niiden perusteella on helppo päätellä, kuinka moneen tietovirtaan laite pystyy, ja millaisia tiedonsiirtonopeuksia laitteella on maksimissaan saavutettavissa. [10, s. 9; 7, s. 4-5.]

5 KÄYTÄNNÖN TESTIT

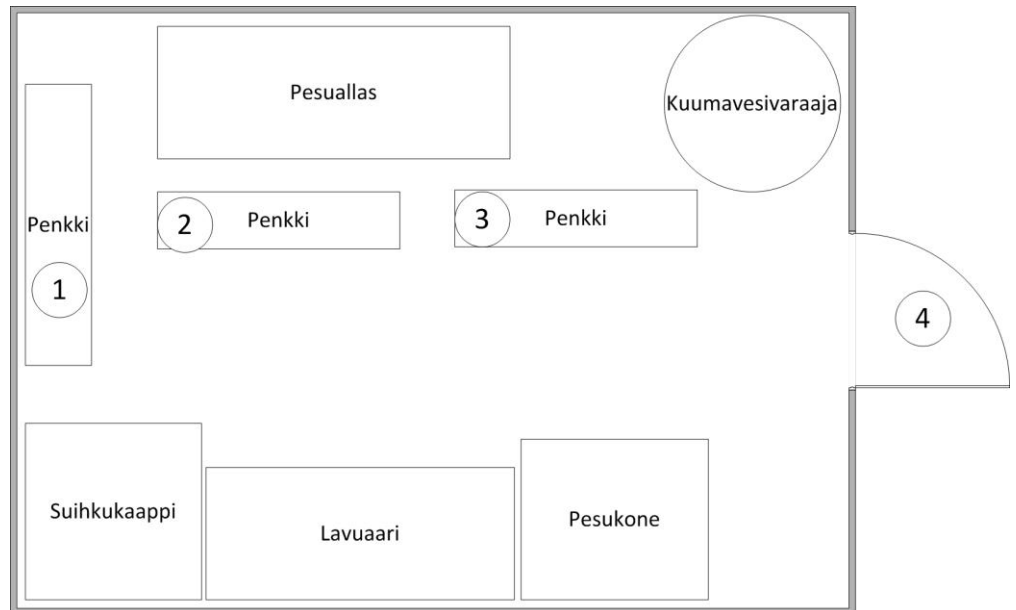
5.1 Testin tavoitteet

Tämän insinööriyön tarkoituksena on vertailla erilaisten, kuluttajille suunnattujen 802.11n-reitittimien suorituskykyä. Tarkoitus on selvittää, millaisia langattomia siirtonopeuksia laitteilla on mahdollista saada eri asetuksilla ja eri etäisyyksillä. Samalla verrataan kannettavan tietokoneen sisäisen ja USB-liitännäisen 802.11n-verkkokortin toimintaa. Työssä tutkitaan myös samaan aikaan alueella olevan 802.11g- ja 802.11n-verkon aiheuttamaa häiriötä toisiinsa. Lisäksi testattiin reitittimien suorituskyky langallisessa verkossa.

5.2 Testitila

Testit suoritettiin kerrostalon kellaritiloissa. Paikka valittiin siitä syystä, että alueella ei ollut yhtäkään häiritsevää verkkoa. Suurin osa testeistä suoritettiin kannettavan ollessa kolmen metrin päässä tukiasemasta. Jos testin yhteydessä ei erikseen mainita etäisyyttä, se on mainittu kolme metriä. Sekä tukiasema että langattoman verkkokortin omaava kannettava olivat aina ennalta määrätyillä paikoillaan. Sekä tukiasema että kannettava olivat sijoitet-

tuna noin 50 cm korkeudelle. Kuvassa 8 on havainnollistettuna testitila ja laitteiden sijainnit testeissä. Kuva ei ole mittakaavassa.



Kuva 8. Testitila

Kuvassa 8 nähtävät numerot kuvaavat testilaitteiden sijainteja testien aikana. Numero 1 on testattavien reitittimien sijainti, numero 2 on testikoneen sijainti yhden metrin testeissä, numero 3 testikoneen sijainti kolmen metrin testeissä ja numero 4 testikoneen sijainti kuuden metrin testeissä.

5.3 Testiohjelmisto ja testattavat laitteet

Testeissä on käytetty ohjelmistona Ixian IxChariot -testiohjelmistoa. Kyseinen ohjelmisto on saanut paljon palkintoja ja on erittäin arvostettu alan asiantuntijoiden keskuudessa. Tähän työhön käyttöön saatu lyhytaikainen koikeiluversio oli rajoitettu maksimissaan 10 yhtäaikaisen yhteyden luomiseen.

IxChariot valikoitui käytettäväksi tähän työhön, koska monet reitittimiä testaavat arvostetut internetsivustot [13; 14] käyttivät myös sitä testeissään. Näiltä sivuilta tulikin paljon vinkkejä ohjelmiston käyttöön ja asetusten valintaan.

Testattavat tukiasemat

Testeissä käytettiin seuraavia kuluttajatasen tukiasemia:

- D-Link DIR-825

- D-Link DIR-855
- Linksys WRT320N
- Netgear WNDR3700.

Tukiasemat oli valittu sillä perusteella, että kaikissa on gigabitin ethernetportit ja mahdollisuus sekä 2,4 GHz että 5 GHz taajuuksien käyttöön. Näin voidaan testata molemmat taajuusalueet eikä 10/100 Mbps -ethernetportti pääse rajoittamaan maksiminopeuksia.



Kuva 9. D-Link DIR-825 [15]

Kuvassa 9 nähtävän D-Link DIR-825:n ominaisuuksia ovat:

- 2 irroitettavaa ulkoista antennia
- samanaikainen 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueiden käyttö
- 5 Gigabitin ethernetporttia (1 WAN, 4 LAN)
- USB-portti esim. tulostimen kytkemistä varten
- mitat 117 x 193 x 30,5 mm
- hinta 117,90 €. [15; 16]



Kuva 10. D-Link DIR-855 [17]

Kuvassa 10 nähtävän D-Link DIR-855:n ominaisuuksia ovat:

- 3 irroitettavaa ulkoista antennia
- samanaikainen 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueen käyttö
- 5 Gigabitin ethernetporttia (1 WAN, 4 LAN)
- USB-portti esim. tulostimen kytkemistä varten
- OLED-näyttö
- mitat 120,5 x 198 x 40,9 mm
- hinta 165,90 €. [16; 17]



Kuva 11. Netgear WNDR3700 [18]

Kuvassa 11 nähtävän Netgear WNDR3700:n ominaisuuksia ovat:

- 8 sisäistä antennia
- samanaikainen 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueiden käyttö
- 5 Gigabitin ethernetporttia (1 WAN, 4 LAN)
- USB-portti ulkoisen kovalevyn tai muistitikun kytkeä varten
- virtakytkin
- mitat 223 x 153 x 31 mm
- hinta 131,90 €. [16; 18]



Kuva 12. Linksys WRT320N [19]

Kuvassa 12 nähtävän Linksys WRT320N:n ominaisuuksia ovat:

- 3 sisäistä antennia
- mahdollisuus valita joko 2,4 GHz:n tai 5 GHz:n taajuusalueen käyttö
- 5 Gigabitin ethernetporttia (1 WAN, 4 LAN)
- mitat 202 x 34 x 160 mm
- hinta 88,90 €. [16; 19]

Testissä käytetyt tietokoneet ja verkkokortit

Langattomana testikannettavana ja IxChariotin konsolina toimi Macbook Pro, jossa on integroitu Broadcomin 802.11n-verkkokortti. Macbook valittiin konsolikoneeksi, koska siinä oli testikäytössä olleista kannettavista eniten suorituskykyä. Näin koneen suorituskyvyn vaikutus testituloksiin oli minimaalinen. Etäisyysmittauksiin käyttöön saatu USB-verkkokortti oli D-Linkin DWA-160. Serverinä, reitittimien WAN-porttiin (Wide Area Network, laajaverkko) kytkettynä koneena toimi Acerin 5538G -kannettava, jossa on Gigabitin verkkokortti. Tähän koneeseen oli asennettu IxChariotin Performance Endpoint, eli konsolin ohjattavissa oleva ohjelmisto.

Häiriömittauksissa oli lisäksi käytössä kaksi Acerin kannettavaa, joista toinen oli ethernetportin kautta häiritsevän 802.11g-tilassa olevan reitittimen LAN-

portissa (Local Area Network, lähiverkko) kiinni, ja toinen langattomasti. Näiden koneiden välille luotiin liikennettä käyttäen jperf-ohjelmaa, joka on Iperf:in graafinen käyttöliittymä.

Macbook Prossa oli käyttöjärjestelmänä 32-bittinen Windows 7 Professional ja Acerin 5538G:ssä 64-bittinen Windows 7 Home Premium. Häiriömittauksissa mukana olleissa Acerin koneissa toisessa oli 64-bittinen Windows Vista Home Premium ja toisessa 64-bittinen Windows 7 Home Premium.

IxChariotin testiasetukset

IxChariotin testiasetuksina käytettiin throughput.scr -testiskriptiä, jonka tiedostokoko muutettiin oletusarvosta 100 000 tavua 10 000 000 tavuun. Testiohjelma mittaa jokaisen yksittäisen tiedoston siirtoon käytetyn ajan, ja laskee sen perusteella siirtonopeuden. Testiohjelmaa pyöritettiin minuutin ajan kutakin testiä kohden.

IxChariotin throughput-testiskripti mittaa ainoastaan hyötydatan siirtonopeutta, eikä laske mittaustuloksiin kehysotsakkeissa olevaa hukkadataa lainkaan. Iperfistä poiketen IxChariotin mittaukset pohjautuvat kokonaisuun tiedostoihin ja niiden siirtoon, eivätkä ainoastaan yksittäisiin TCP-ikkunoihin. Näin toimittaessa simulointi on mahdollisimman lähellä aitoa tilannetta. Samasta syystä serverikone on kytkettynä WAN-porttiin eikä LAN-porttiin. Testit siis simuloivat normaaleja kotiolosuhteita.

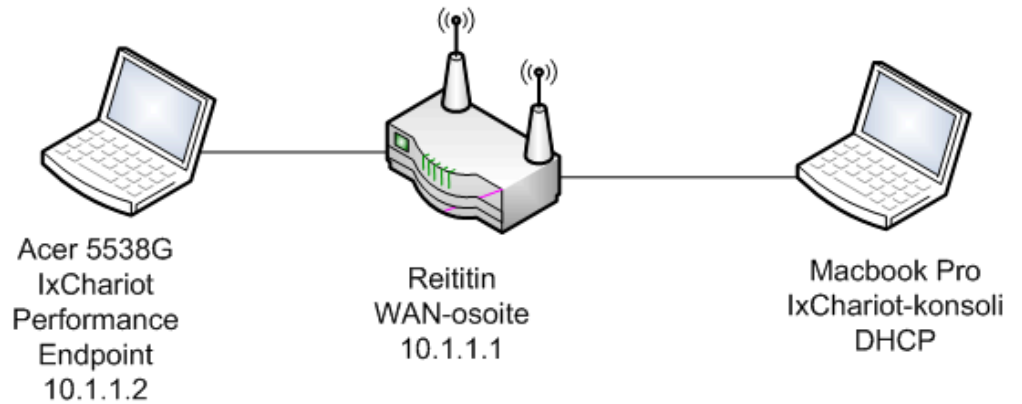
Testin ongelmat

Kaikki testit jouduttiin tekemään nopealla aikataululla testiohjelmiston lyhyen kokeiluversion vuoksi. Tästä johtuen testivaiheessa ei ollut aikaa analysoida saatuja tuloksia, vaan testit suoritettiin sellaisenaan. Tulosten analyysivaiheessa kävi kuitenkin ilmi, että Macbook Pro langattoman verkkokortin ajoissa oli selkeästi jotain vikaa.

Teoriassa siirtonopeuden pitäisi tuplaantua käytettäessä 40 MHz:n kanavia. Näin ei kuitenkaan tapahtunut. Saatujen tulosten perusteella 40 MHz:n kanavaleveys oli oletettavasti poissa käytöstä. Näin 40 MHz:n kanavien maksimisiirtonopeudet jäivät valitettavasti saavuttamatta ja saadut tulokset jäävät noin puoleen maksimista. Aikataulun vuoksi testejä ei ollut mahdollista toistaa.

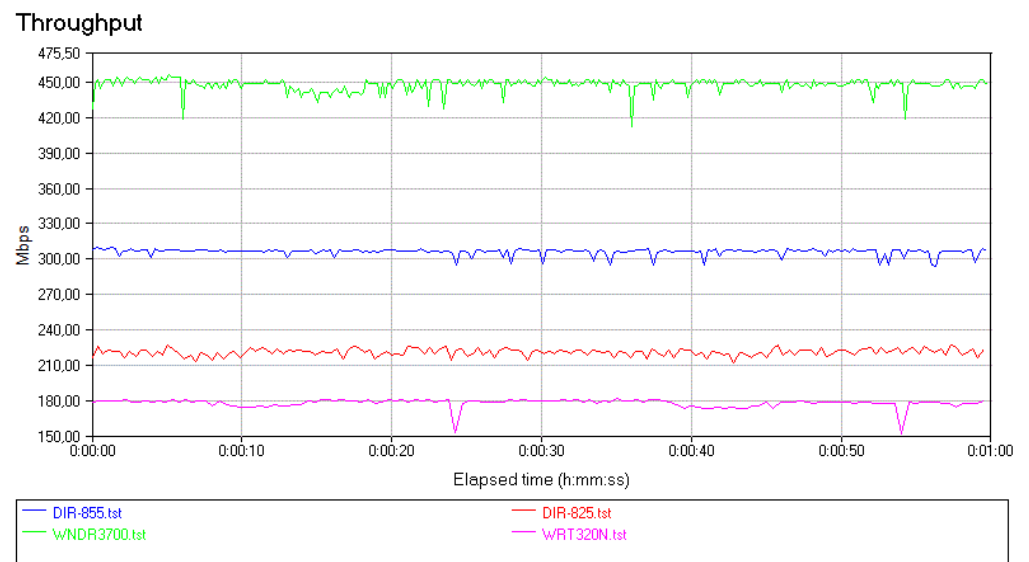
6 TESTITULOKSET

6.1 Reitityskyky



Kuva 13. Reitityskykytestin topologia

Ensimmäisenä testattavana oli reitittimien suorituskyky LAN-portista WAN-porttiin. Käytetty testitopologia on nähtävissä kuvassa 13. Nämä testit kertovat minkälaisiin nopeuksiin reititin pystyy parhaassa mahdollisessa tapauksessa. Kuten edellä on mainittu, kaikissa reitittimissä oli gigabitin ethernet-portit, joten teoreettinen siirtonopeus pitäisi olla 1000 Mbps. Kuvassa 14 nähdään testin eteneminen ja testissä saadut tiedonsiirtonopeudet.



Kuva 14. Ethernet-siirtonopeudet

Kuten kuvasta 14 voidaan nähdä, reitittimien siirtonopeuksissa on suuria eroja. Reitittimistä selkeästi parhaiten suoriutui WNDR3700, jonka keskimääräinen siirtonopeus oli miltei 450 Mbps WRT320N:n jäädessä alle 180

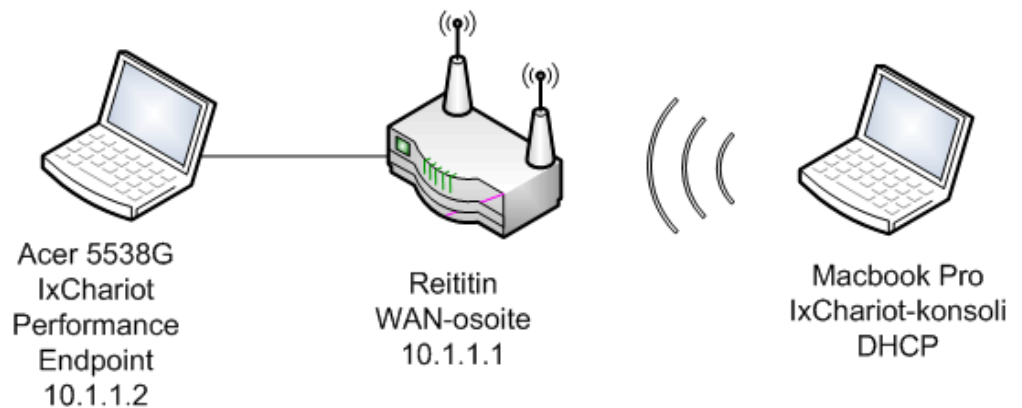
Mbps:iin. Omituinen piirre WRT320N:ssä on myös noin puolen minuutin välein tapahtuva pudotus siirtonopeudessa. Jokainen reititin jää kuitenkin huomattavasti alle teoreettisen maksimin, 1000 Mbps. Taulukossa 3 nähdään tarkemmin siirtonopeuksien keskiarvot, minimi ja maksimit sekä mitatun maksimin prosentuaalinen osuus teoreettisesta maksimista.

Taulukko 3. Ethernet-siirtonopeudet

Reititin	Keskiarvo (Mbps)	Minimi (Mbps)	Maksimi (Mbps)	% Teoreettisesta maksiminopeudesta
DIR-855	305,394	294,118	310,078	31,01
DIR-825	220,478	212,202	227,273	22,73
WNDR3700	446,696	412,371	457,143	45,71
WRT320N	177,469	152,091	181,818	18,18

6.2 Siirtonopeudet eri WLAN-asetuksilla

Standardin suorituskyvyn mittaamiseksi tarvittiin mahdollisimman kattavan asetusvalikoiman omaava reititin. Muutettavien WLAN-asetusten määrä vaihteli reitittimien välillä. DIR-855:ssä ja WRT320N:ssä oli testattavista reitittimistä tällä saralla eniten vaihtoehtoja, joten ne valittiin näihin testeihin. 802.11n-verkon testeissä käytetty topologia on esitelty kuvassa 15.



Kuva 15. 802.11n-mittausten topologia

6.2.1 WPA:n vaikutus siirtonopeuteen

Testillä haluttiin tarkistaa, mitä langattoman verkon suojaus WPA:lla (Wi-Fi Protected Access) vaikuttaa siirtonopeuteen. Testi tehtiin DIR-855:llä. Taulukon 4 mukaan vaikutusta ei käytännössä ole. WPA päällä keskisiirtonopeus oli jopa parempi kuin ilman. Tämän tuloksen perusteella loput testeistä

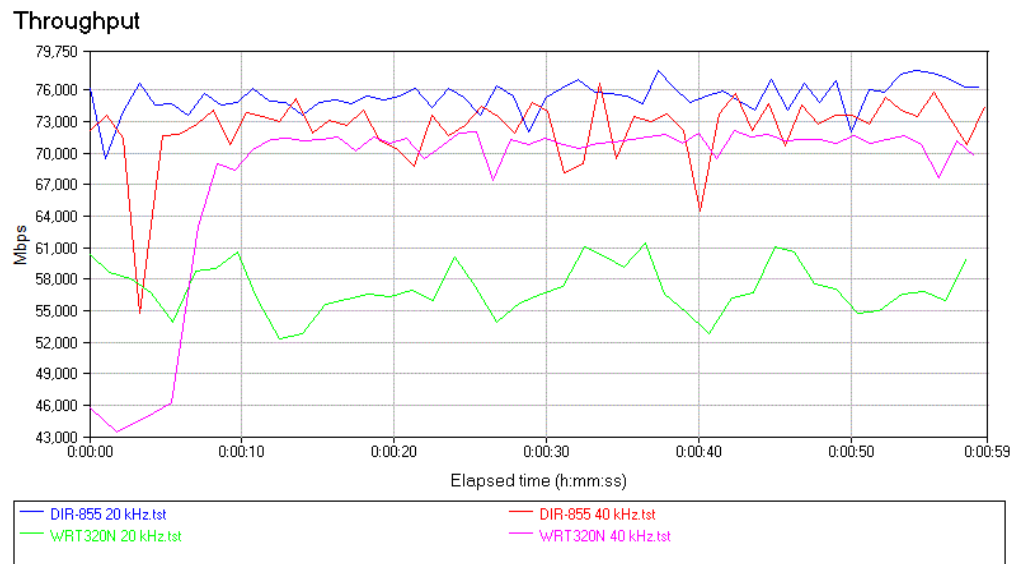
suoritettiin WPA päällä. Samalla estettiin mahdollisesti alueella olevien muiden langattomien laitteiden yhteydenotto testiverkkoon.

Taulukko 4. WPA:n vaikutus siirtonopeuteen (2,4 GHz, 20 MHz)

Reititin	Keskiarvo (Mbps)	Minimi (Mbps)	Maksimi (Mbps)
DIR-855	74,576	61,728	79,602
DIR-855 WPA	75,275	69,505	77,897

6.2.2 40 MHz yhdistetyt kanavat

Kaavan 1 mukaan siirtonopeuden pitäisi tuplaantua, kun kanavan leveys tuplataan 20 MHz:stä 40 MHz:iin. Kuvassa 16 nähdään testien kulku 2,4 GHz:n taajuudella.



Kuva 16. 20 ja 40 MHz kanavat 2,4 GHz taajuudella

Kuten kuvasta 16 ja taulukosta 5 voidaan todeta, 40 MHz:n kanavavalinta ei yllättäen vaikuttanut juurikaan siirtonopeuteen. WRT320N:ssä kanavan tuplaamisella oli pieni vaikutus, mutta siirtonopeuden tuplaamisesta ei siinäkään ollut kyse. WRT320N:ssä 2,4 GHz:n taajuudella nopeuden nosto oli noin 20 % ja 5 GHz taajuudella noin 10 %. DIR-855:ssä 20 MHz:n kanavalla saavutetut nopeudet olivat jopa parempia kuin 40 MHz:n kanavalla. Tästä voidaan päätellä, että kannettavan tietokoneen verkkokortissa oli jotain vikaa.

IxChariotin Mac OS X -yhteensopimattomuuden vuoksi Macbookiin piti asentaa käyttöjärjestelmäksi Windows 7. Oletettavasti Macin Windows-ajureissa

on ollut jotain vialla, ja 40 MHz:n kanavat ovat olleet poissa käytöstä. Tulokset tukevat tätä teoriaa. Siirtonopeudet sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuuksien osalta ovat taulukossa 5.

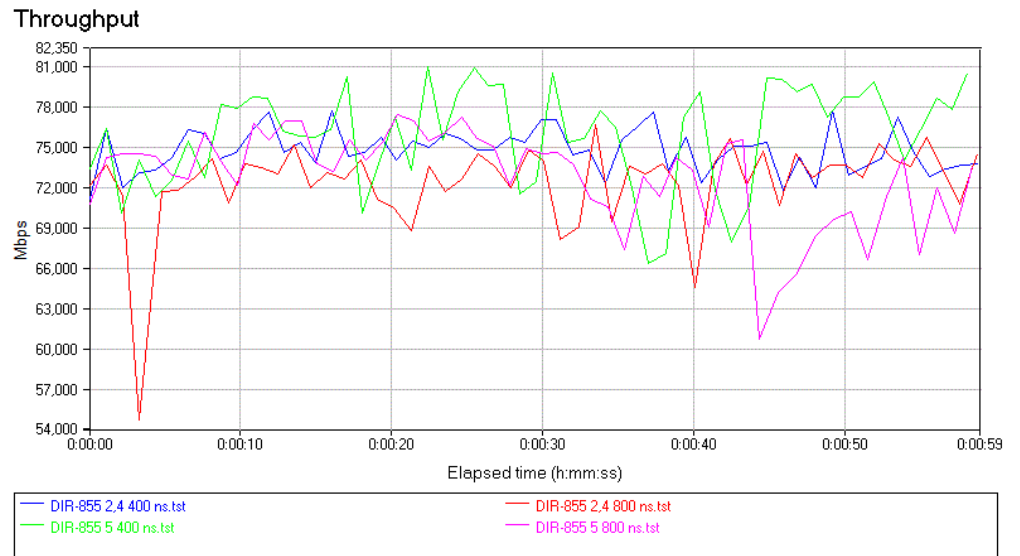
Taulukko 5. Siirtonopeudet 20 ja 40 MHz:n kanavilla

Reititin	Keskiarvo (Mbps)	Minimi (Mbps)	Maksimi (Mbps)
DIR-855 2,4 GHz 20 MHz	75,275	69,505	77,897
DIR-855 2,4 GHz 40MHz	72,182	54,720	76,628
DIR-855 5 GHz 20 MHz	75,468	58,565	81,054
DIR-855 5 GHz 40 MHz	72,575	60,744	77,444
WRT320N 2,4 GHz 20 MHz	57,019	52,288	61,444
WRT320N 2,4 GHz 40 MHz	67,532	43,455	72,137
WRT320N 5 GHz 20 MHz	66,446	59,391	73,801
WRT320N 5 GHz 40 MHz	74,775	67,114	76,263

Saatujen tulosten perusteella tämän insinööriyön testitulosten vertailukohtana joudutaan pitämään 20 MHz kanavaleveyden teoreettista maksiminopeutta, 144 Mbps.

6.2.3 Suojavälin vaikutus siirtonopeuteen

802.11n:ssä käytetty lyhennetty suojaväli on minimissään 400 ns. Seuraavassa testissä tutkittiin sen vaikutusta siirtonopeuteen. MCS-taulukon (taulukko 2) mukaan sen pitäisi vaikuttaa maksimissaan noin 10 %. Lyhyen suojavälin käyttö oli valittavissa DIR-855:ssä. Testin kulku on nähtävillä kuvassa 17.

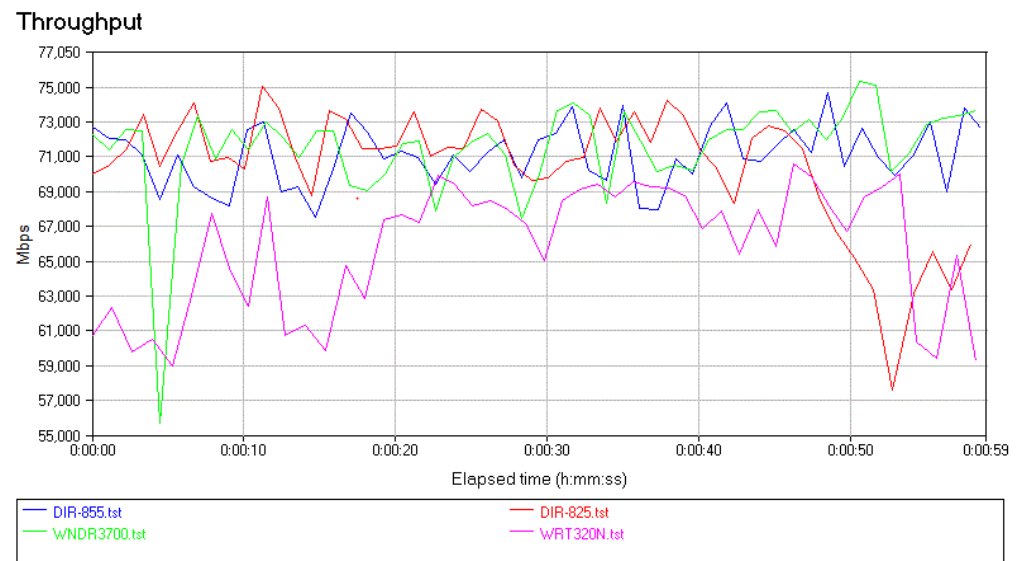


Kuva 17. Lyhyen suojavälin vaikutus siirtonopeuteen

Kuten kuvasta 17 nähdään, lyhyt suojaväli vaikuttaa hyvin vähän saatuihin siirtonopeuksiin. 800 ns:n suojavälillä kuitenkin tapahtuu 400 ns suojaväliin nähden rajumpia siirtonopeuden heilahteluita sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuuksilla.

6.3 Reitittimien siirtonopeuksien vertailu

Reitittimien siirtonopeudet testattiin sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuusalueilla. Reitittimissä valittiin asetukseksi 40 MHz:n kanavaleveys. Myös WPA oli käytössä. Kuvassa 18 nähdään eri reitittimien siirtonopeudet 2,4 GHz:n taajuudella.



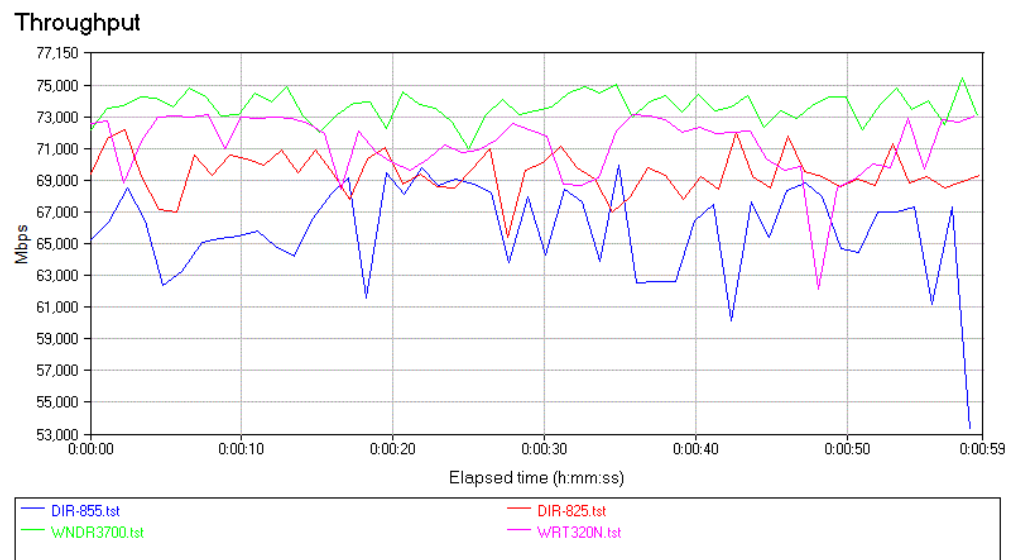
Kuva 18. Siirtonopeudet 2,4 GHz taajuudella ja 40 MHz:n kanavalla

Keskisiirtonopeudet reitittimissä olivat hyvin lähellä toisiaan. Ainoastaan WRT320N oli selkeästi muita hitaampi. Kuitenkin teoreettiseen maksimisiirtonopeuteen, 144 Mbps:ään verrattuna (taulukko 2, MCS-15, 20 MHz:n kanava), maksimista jäädään noin puoleen kaikissa reitittimissä. Tulokset ovat nähtävissä taulukossa 6. Sarake ”% Teoreettisesta maksiminopeudesta” on testeissä saadun maksimisiirtonopeuden prosentuaalinen osuus teoreettisesta maksimisiirtonopeudesta.

Taulukko 6. Siirtonopeudet 2,4 GHz:n taajuudella ja 40 MHz:n kanavalla

Reititin	Keskiarvo (Mbps)	Minimi (Mbps)	Maksimi (Mbps)	% Teoreettisesta maksiminopeudesta
DIR-825	70,314	57,595	75,047	51,97
DIR-855	71,032	67,511	74,697	51,73
WNDR3700	71,413	55,672	75,330	52,17
WRT320N	65,712	58,997	70,609	48,90

5 GHz:n taajuudella D-Linkin molemmat reitittimet toimivat keskisiirtonopeudeltaan huomattavasti huonommin kuin 2,4 GHz:n taajuudella. Edellisen testin selkeästi huonoin suorittaja, WRT320N, nousi testin kakkoseksi. 5 GHz:n testitulokset ovat kuvassa 19.



Kuva 19. WLAN-siirtonopeudet 5 GHz:n taajuudella ja 40 MHz:n kanavalla

WNDR3700 oli jälleen paras siirtonopeudeltaan. 5 GHz:n taajuudella testin suurin siirtonopeus oli hieman yli puolet teoreettisesta maksimista. Kaikkien reitittimien keskinopeudet olivat tällä taajuusalueella parempia kuin 2,4 GHz:n taajuudella. Hetkittäiset maksimisiirtonopeudet olivat kuitenkin sa-

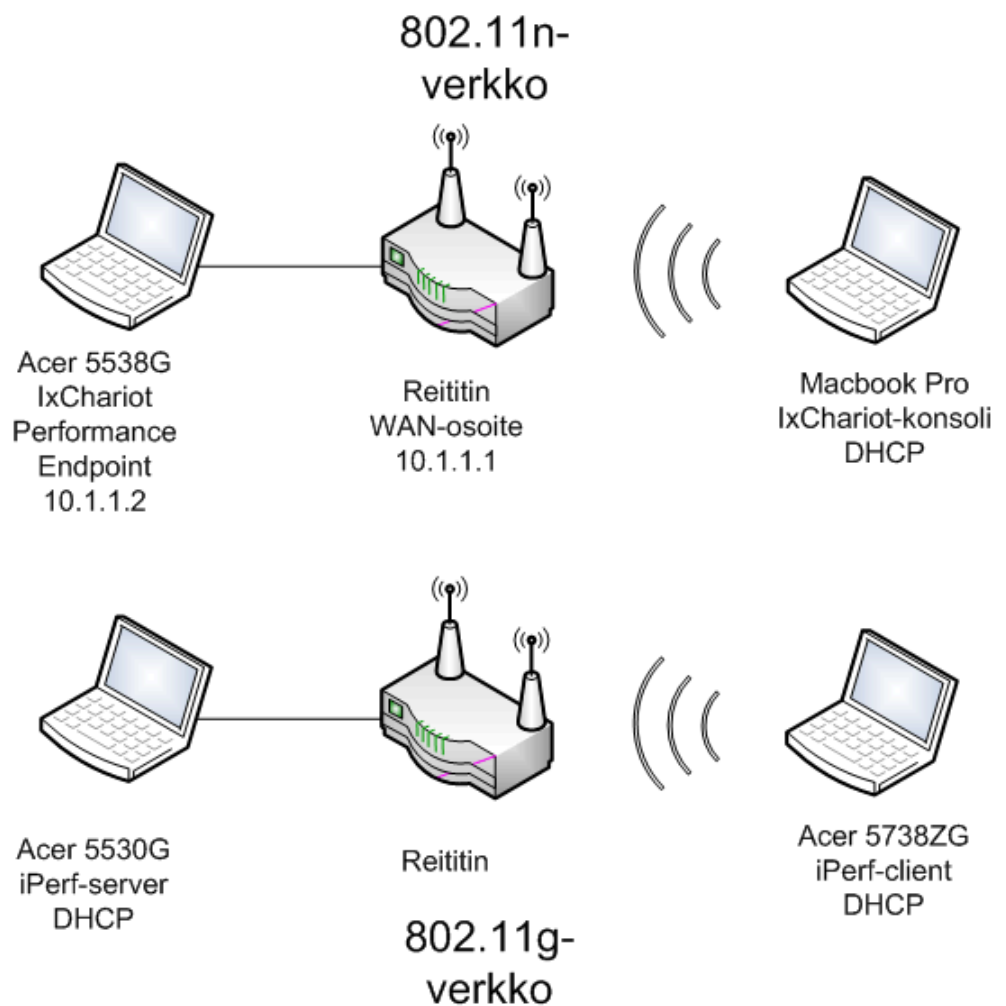
mankaltaisia kuin 2,4 GHz:n taajuudella. Testilaitteista kallein, DIR-855, sai heikoimman tuloksen. Nopeudet ovat nähtävissä taulukossa 7.

Taulukko 7. WLAN-siirtonopeudet 5 GHz:n taajuudella ja 40 MHz:n kanavalla

Reititin	Keskiarvo (Mbps)	Minimi (Mbps)	Maksimi (Mbps)	% Teoreettisesta maksiminopeudesta
DIR-825	69,418	65,413	72,267	50,05
DIR-855	65,743	53,262	69,991	48,47
WNDR3700	73,655	71,048	75,543	52,32
WRT320N	71,207	62,160	73,193	50,69

6.4 802.11g -häiriöverkkomittaukset

Häiriöverkkomittauksissa haluttiin selvittää, mitä vaikutuksia 802.11g-verkolla on 802.11n-verkkoon ja päinvastoin. Testeissä käytetty topologia on nähtävissä kuvassa 20.

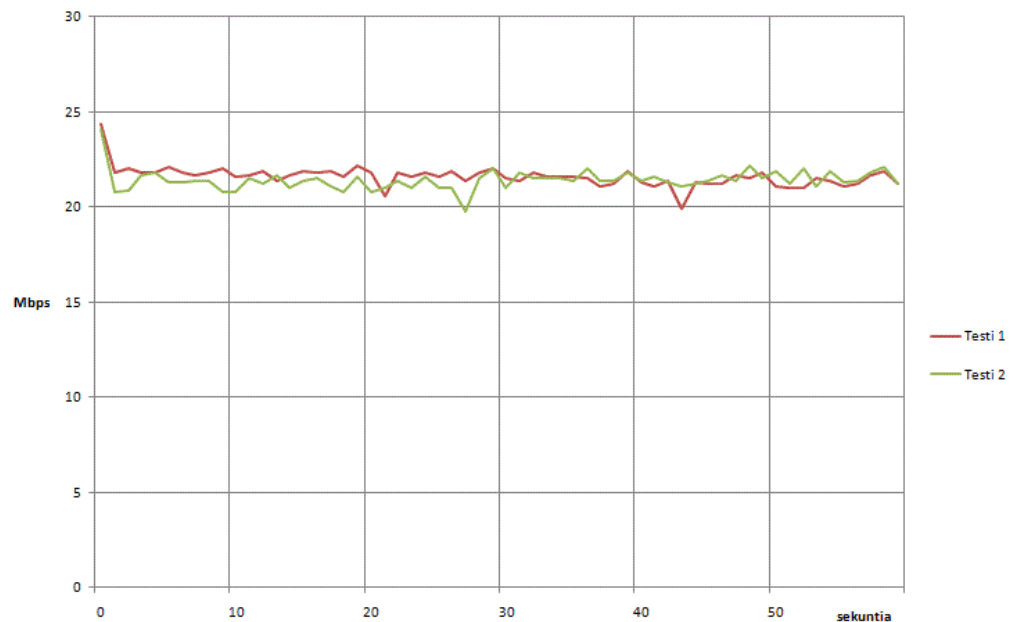


Kuva 20. Häiriöverkkomittausten topologia

Häiriötestit suoritettiin siten, että kullakin testikerralla 802.11n-verkon testi aloitettiin ensin, ja puolen minuutin kohdalla alettiin generoida liikennettä 802.11g-häiriöverkkoon. Näin saaduista kuvaajista nähdään häiriöverkon vaikutus molemmissa verkoissa. 802.11g-verkon testitulokset on saatu iPerf-ohjelman avulla.

802.11g-verkon referenssimittaus

Jotta tiedettäisiin, mitä vaikutusta 802.11n-verkolla on 802.11g-verkkoon, pitää tietää, minkälaisia siirtonopeuksia normaalitilanteessa 802.11g-verkossa on mahdollista saada. Testit suoritettiin iPerf-ohjelmalla. Reitittimenä käytettiin WRT320N:ää 802.11g-tilassa.



Kuva 21. 802.11g-verkon referenssimittaukset

Referenssimittausten kulku on esitettyä kuvassa 21. Testin 1 keskimääräinen siirtonopeus oli 21,6 Mbps ja testin 2 keskimääräinen siirtonopeus 21,4 Mbps. Molempien testien aikana siirtonopeus oli hyvin tasainen koko testin ajan. 802.11n-verkon osalta testien referenssiarvoina pidetään taulukon 6 mukaisia keskiarvotuloksia.

Testattavat muuttujat

Jokaisella reitittimellä tehtiin seuraavat testit ja tutkittiin 802.11g- ja 802.11n -verkkojen aiheuttamia häiriöitä toisiinsa. Testeissä käytettiin molempien verkkojen yhteistä 2,4 GHz:n taajuusaluetta. Testattavat muuttujat olivat:

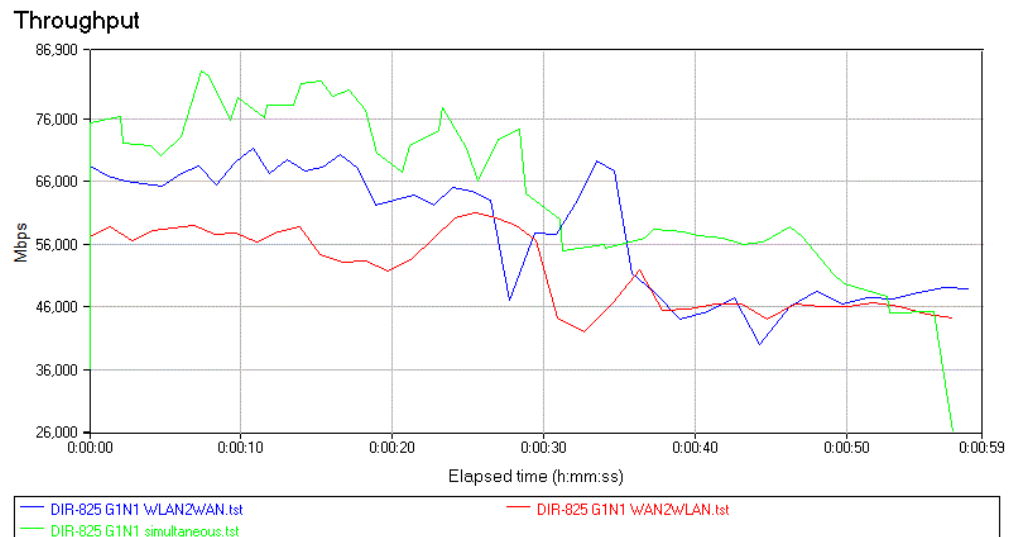
- siirtonopeus WANista WLANiin (download, liikenne sisäänpäin)
- siirtonopeus WLANista WANiin (upload, liikenne ulospäin)
- yhtaikainen siirtonopeus (upload ja download yhtaikaa).

802.11g-verkko oli testin ajan yleisimmin käytetyllä kanavallaan, eli kanavalla 1. Reitittimestä riippuen 802.11n-verkon kanavista testattiin kanavat 1, 7, 13 sekä kanavan automaattivalinta. WRT320N:ssä kanavaa ei ollut mahdollista itse vaihtaa, joten WRT320N:n häiriötesti suoritettiin ainoastaan kanavan automaattivalinnalla. Eri kanavien käytöllä haluttiin testata, vaikuttaako 802.11n-verkko käyttämiensä kanavien ulkopuolella. Esimerkiksi kanavien 1 ja 13 ei pitäisi mennä päällekkäin, vaikka käytettäisiinkin 40 MHz:n levyisiä kanavia.

Häiriöverkko-osiossa molempien verkkojen kuvaajien värit on valittu vastaamaan samaa testiä. Sininen kuvaaja kuvaa WLAN-WAN-suuntaisen liikenteen testiä, punainen WAN-WLAN-suuntaisen liikenteen testiä ja vihreä yhtaikaisen liikenteen testiä.

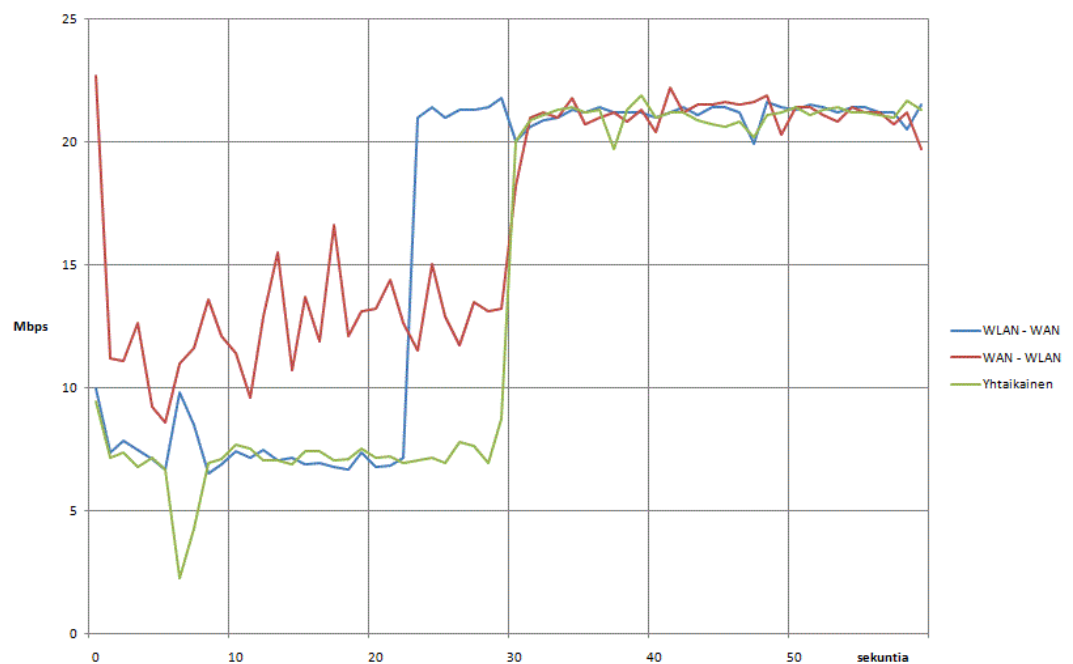
6.4.1 DIR-825

Kuvassa 22 nähdään 802.11g-verkon vaikutus 802.11n-verkkoon molempien verkkojen käyttäessä samaa kanavaa 1. Kuten kuvasta voidaan havaita, siirtonopeudet heikkenivät noin 30 sekunnin kohdalla, jolloin 802.11g-verkossa alkoi liikenne. Kuvaajien lukemisen helpottamiseksi samanaikaisen siirron upload- ja downloadsiirtonopeudet 802.11n-verkossa on yhdistetty samaan kuvaajaan.



Kuva 22. DIR-825, molemmat verkot kanavalla 1, 802.11n-verkon kuvaajat

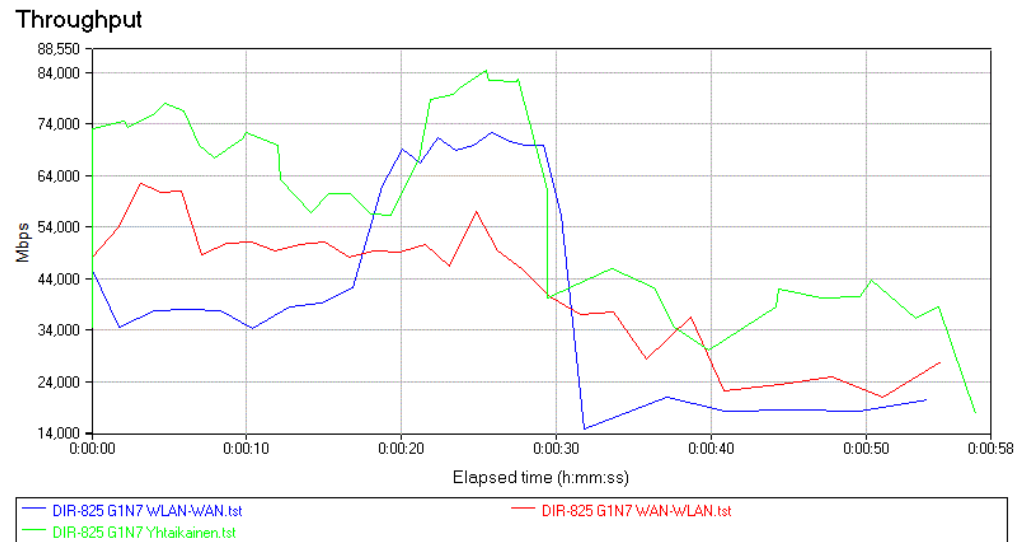
Kuvassa 23 nähdään samanaikaiset vaikutukset 802.11g-verkon osalta.



Kuva 23. DIR-825, molemmat verkot kanavalla 1, 802.11g-verkon kuvaajat

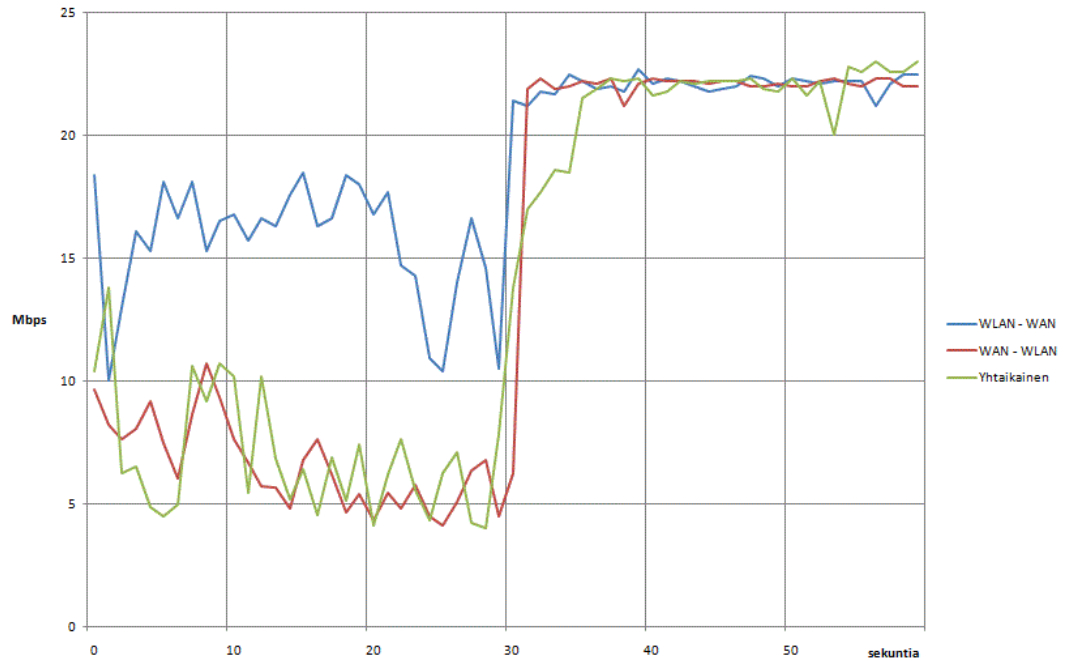
Ensimmäisten testien perusteella 802.11n-verkko häiritsee 802.11g-verkkoa huomattavasti enemmän kuin päinvastoin. WAN-WLAN ja yhtaikainen siirto pudottivat 802.11g-verkon siirtonopeuden noin 35 %:iin referenssinopeudesta. WAN-WLAN-mittauksessa siirtonopeus 802.11n-verkossa ei ollut niin korkea kuin WAN-WLAN- ja yhtaikaisessa mittauksessa. 802.11g-verkolle jäi enemmän kaistaa käytettäväksi ja siirtonopeus oli noin 60 % referenssiarvoista. 802.11n-verkon siirtonopeudet putosivat noin 30 %.

Kanavalla 7 802.11g-verkon vaikutus oli yllättäen suurempi kuin samaa kanavaa käytettäessä. 802.11n-verkkoon tuli enemmän siirtonopeuden pudotusta. Siirtonopeudet olivat vain noin 25-40 % referenssiarvosta. Kuvaajat ovat nähtävissä kuvassa 24.



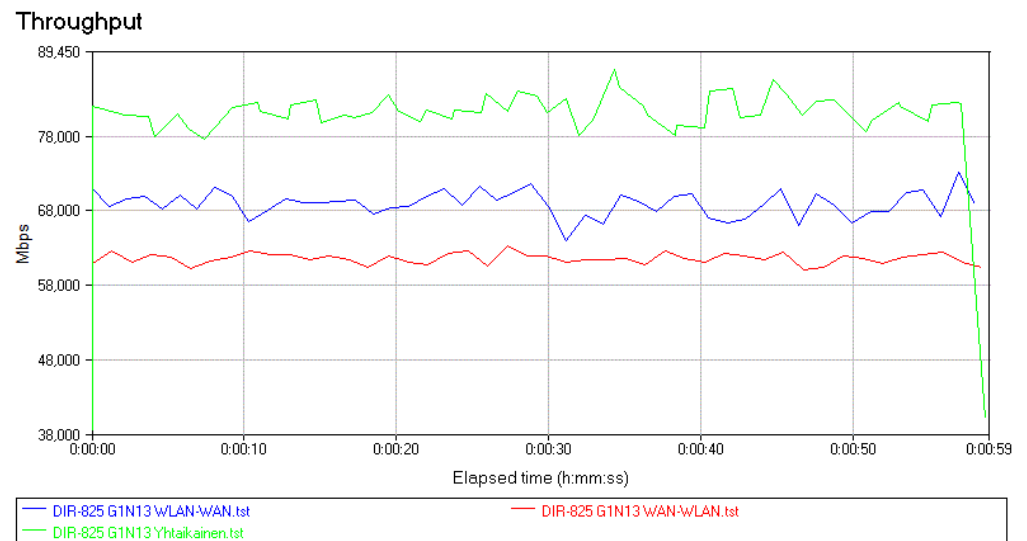
Kuva 24. DIR-825, 802.11n kanavalla 7, 802.11n-verkon kuvaajat

Häiriöt 802.11g-verkkoon olivat samankaltaisia kuin kanavalla 1. 802.11n-verkon WLAN-WAN-testisiirrossa oli tällä kertaa vähemmän liikennettä ja 802.11g-verkko suoriutui paremmin. 802.11g-verkon kuvaajat ovat kuvassa 25.



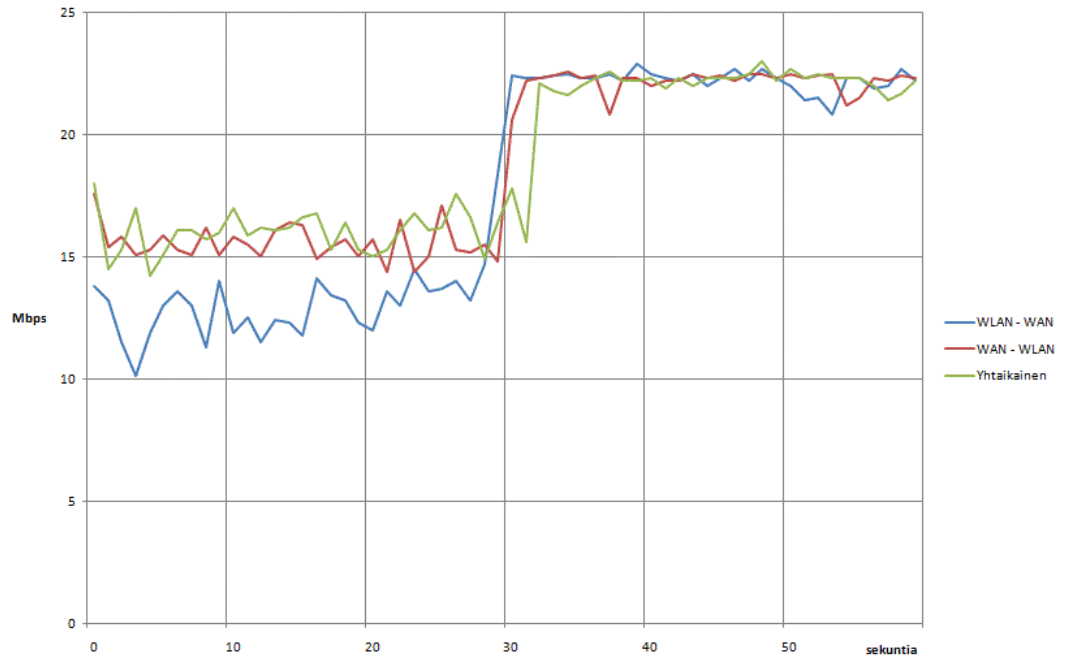
Kuva 25. DIR-825, 802.11n kanavalla 7, 802.11g-verkon kuvaajat

Kanavan 13 pitäisi olla riittävän kaukana kanavan 1 taajuuksista, ettei häiriötä pitäisi juuri ilmetä. Kuvaajat 802.11n-verkon osalta ovat kuvassa 26.



Kuva 26. DIR-825, 802.11n kanavalla 13, 802.11n-verkon kuvaajat

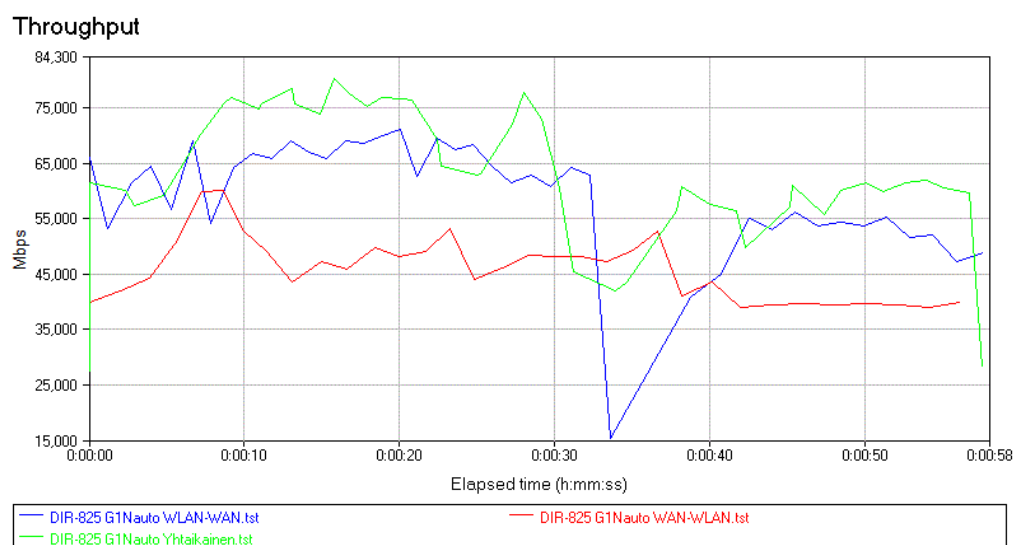
Kuten kuvasta 26 nähdään, siirtonopeudet pysyvät melko tasaisina. 802.11g-verkon vaikutusta ei ole nähtävissä. 802.11n-verkko kuitenkin vaikuttaa 802.11g-verkkoon jonkin verran. Kuvaajat 802.11g-verkon osalta ovat nähtävillä kuvassa 27.



Kuva 27. DIR-825, 802.11n kanavalla 13, 802.11g-verkon kuvaajat

Vaikka kanava 13 onkin kaukana kanavasta 1 taajuuksiltaan, vaikutuksia on silti nähtävissä 802.11g-verkossa. Keskimääräiset siirtonopeudet ovat noin 60-75 % referenssimittauksen tuloksista.

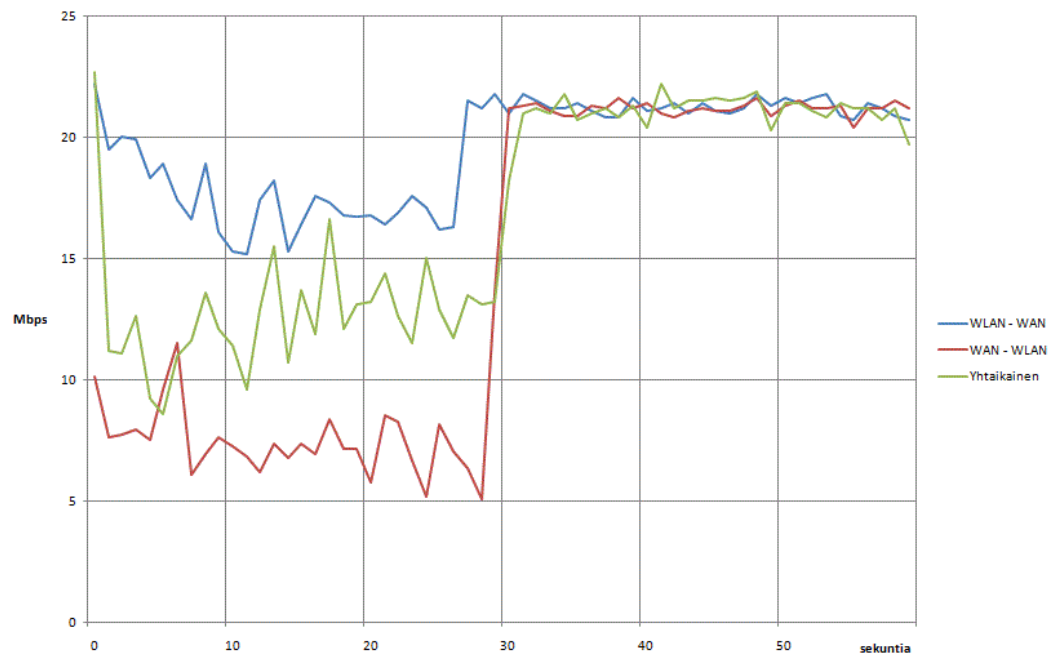
Reitittimien automaattisen kanavahaun pitäisi tutkia, millä kanavilla on liikennettä, ja valita sen mukaan optimaalinen kanava pienimmällä liikenteellä. Automaattisen kanavahaun testitulokset 802.11n-verkon osalta ovat kuvassa 28.



Kuva 28. DIR-825, 802.11n automaattinen kanava, 802.11n-verkon kuvaajat

Automaattinen kanavahaku ei pysty kuitenkaan mukautumaan muuttuviin tilanteisiin. Kanavat tutkitaan, kun radio laitetaan päälle, ja kanava valitaan sen hetkisen tilanteen mukaan. Kuten kuvasta 28 nähdään, kun 802.11g-verkkoon tulee liikennettä, WLAN-WAN-testissä siirtonopeudessa tapahtuu melko suuri pudotus. Siirtonopeus putoaa hetkellisesti noin 15 Mbps:iin.

Samaan aikaan 802.11g-verkossa siirtonopeus on noin 5 Mbps korkeammalla kuin muuten testin aikana. Nopeudet tasoittuvat pian pudotuksen jälkeen. 802.11g-verkon kuvaajat ovat kuvassa 29.

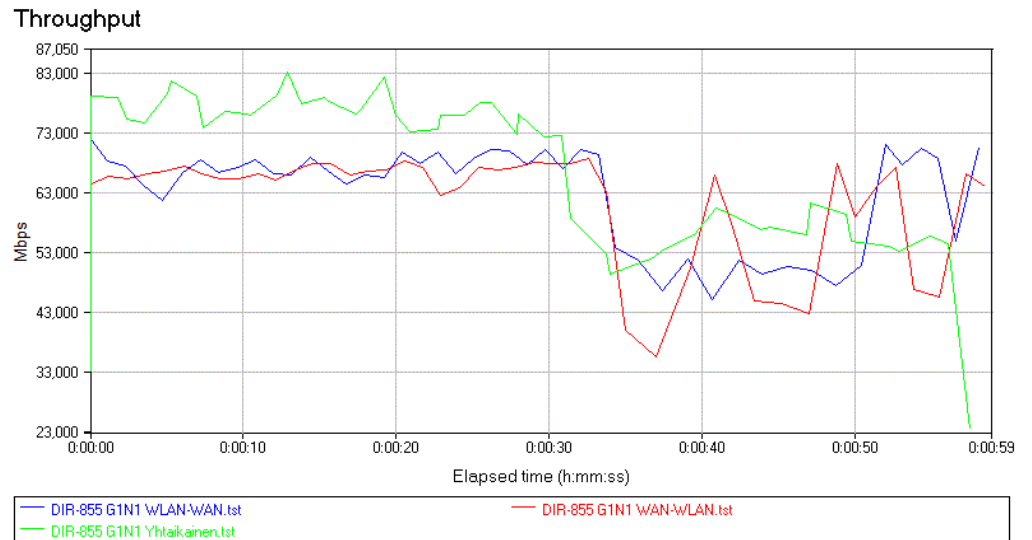


Kuva 29. DIR-825, 802.11n automaattinen kanava, 802.11g-verkon kuvaajat

802.11n-verkon vaikutukset 802.11g-verkkoon näkyvät selvästi. Siirtonopeudet ovat noin 35 %, 60 % ja 80 % referenssiarvosta.

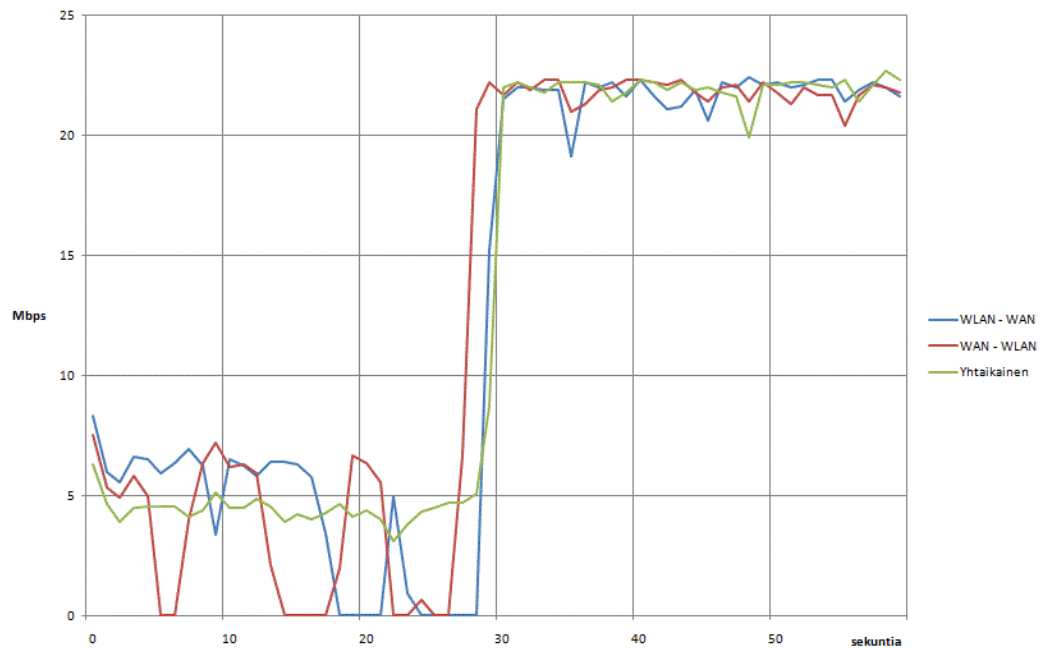
6.4.2 DIR-855

Kuvassa 30 nähdään 802.11n-verkon toiminta, kun molemmat verkot käyttivät samaa kanavaa 1. 802.11g-verkon vaikutukset näkyvät selvästi. Nopeuksien keskiarvo häiriöverkon ollessa päällä on noin 75 % referenssiarvosta taulukossa 6.



Kuva 30. DIR-855, molemmat verkot kanavalla 1, 802.11n-verkon kuvaajat

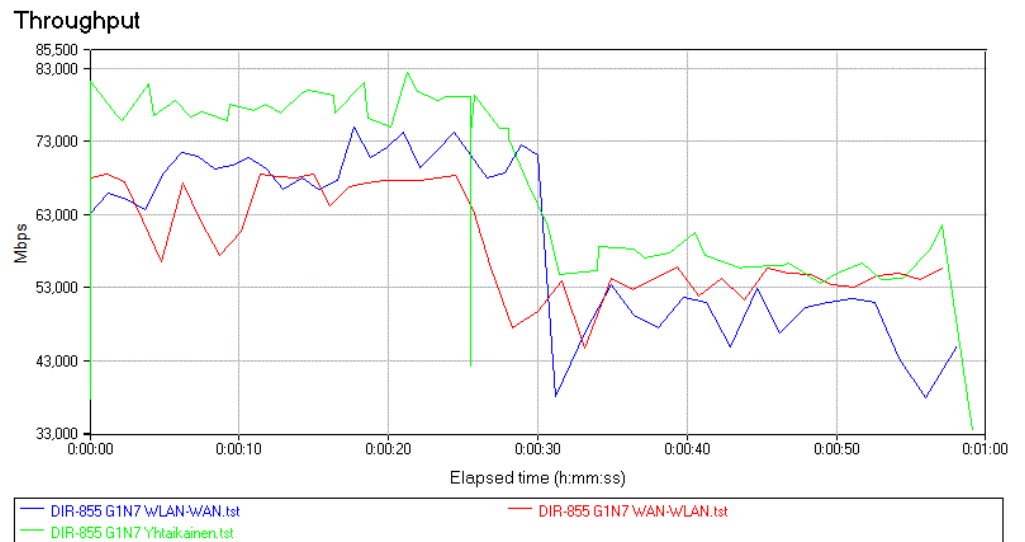
Kuvassa 31 nähdään samanaikaiset tapahtumat 802.11g-verkon osalta.



Kuva 31. DIR-855, molemmat verkot kanavalla 1, 802.11g-verkon kuvaajat

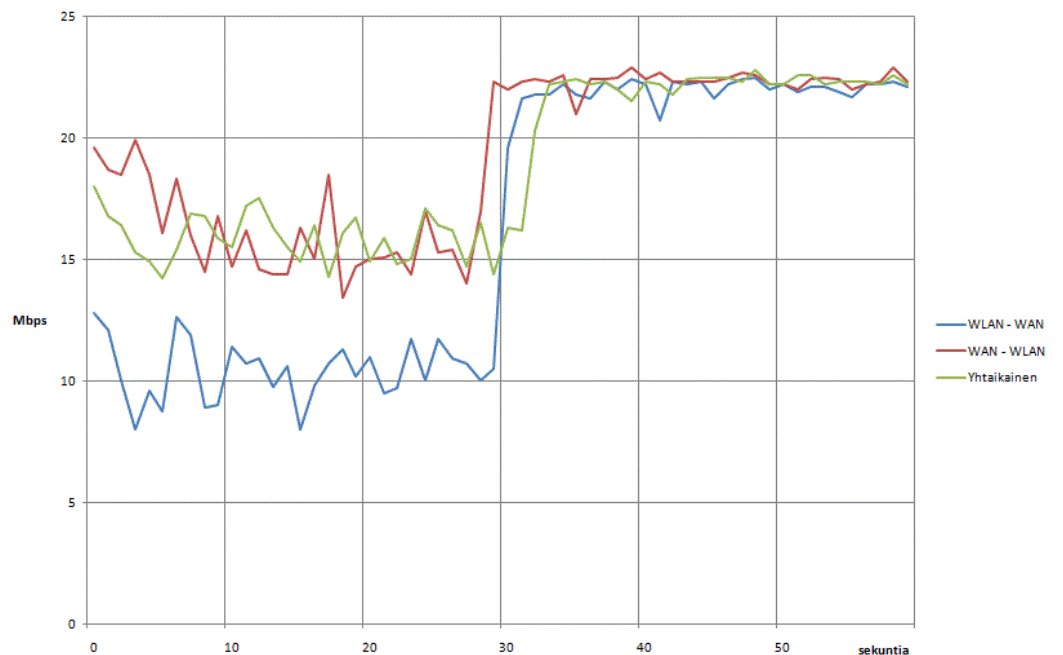
Kuten kuvaajista kuvassa 31 nähdään, 802.11n-verkon vaikutukset 802.11g-verkkoon ovat huomattavasti suuremmat kuin DIR-825:n testeissä. 802.11g-verkon suorituskyky putoaa lähes nolnaan. Referenssiarvoihin verrattuna keskimääräinen siirtonopeus on vain 15-20 %. Oletettavasti DIR-855:n kolmen antennin toiminta ruuhkauttaa kanavan lähes kokonaan.

Kanavan 7 802.11n-verkon tulokset ovat nähtävissä kuvassa 32.



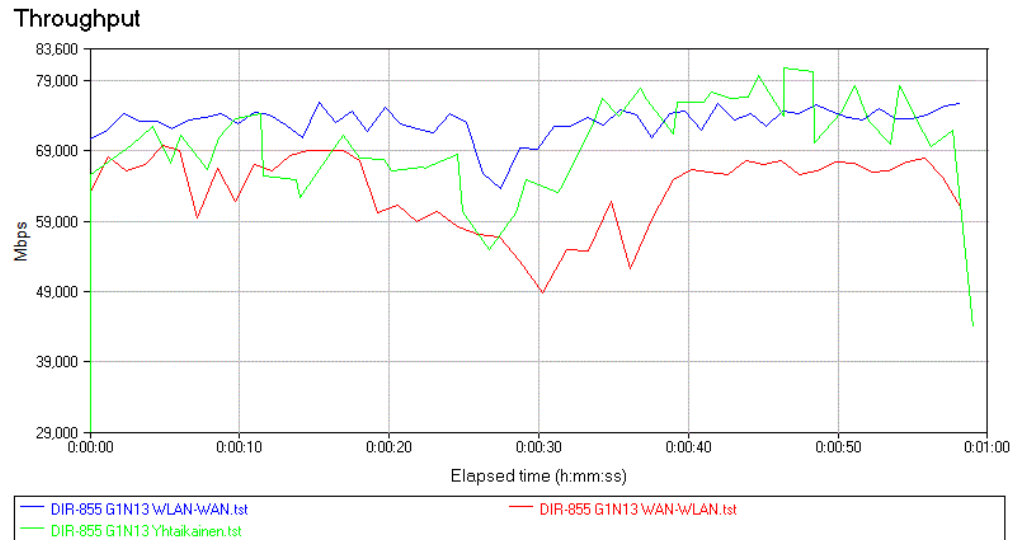
Kuva 32. DIR-855, 802.11n kanavalla 7, 802.11n-verkon kuvaajat

Vaikutukset 802.11n-verkkoon ovat samankaltaisia kuin kanavalla 1. Keskimääräiset siirtonopeudet ovat 65-75 % referenssiarvoista. 802.11g-verkossa tilanne paranee huomattavasti. Tulokset ovat kuvassa 33.



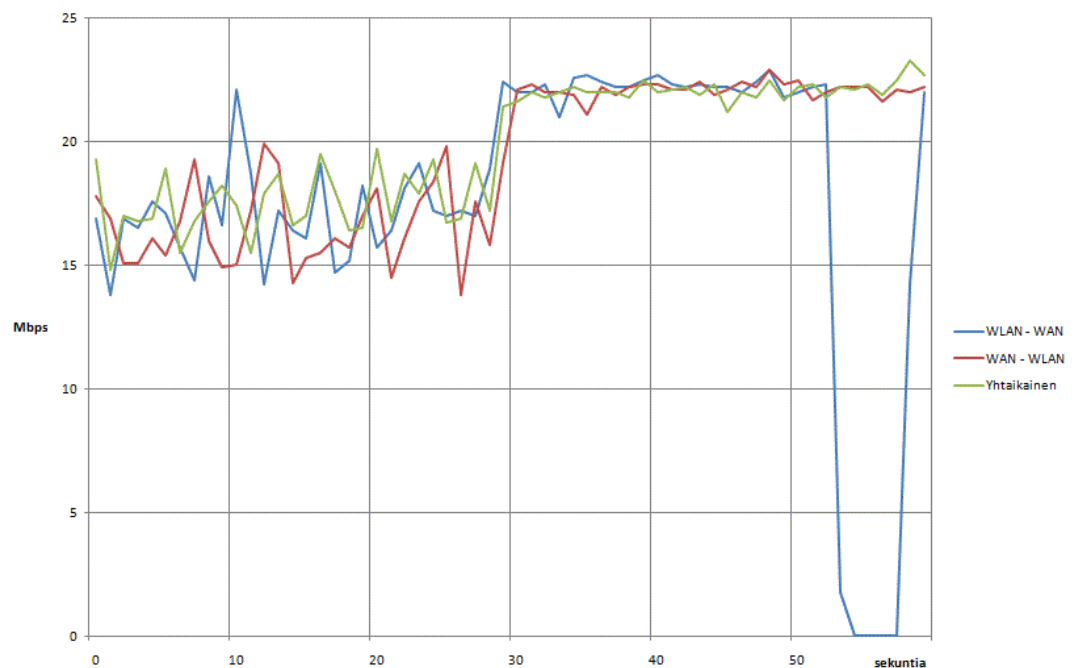
Kuva 33. DIR-855, 802.11n kanavalla 7, 802.11g-verkon kuvaajat

WAN-WLAN:in ja yhtaikaisen testin keskimääräiset siirtonopeudet ovat noin 75 % referenssiarvoista. WLAN-WAN-testissä siirtonopeus on huonompi, noin 50 %. Kuitenkin parannusta yhteisen kanavan 1 tuloksiin on huomattavasti.



Kuva 34. DIR-855, 802.11n kanavalla 13, 802.11n-verkon kuvaajat

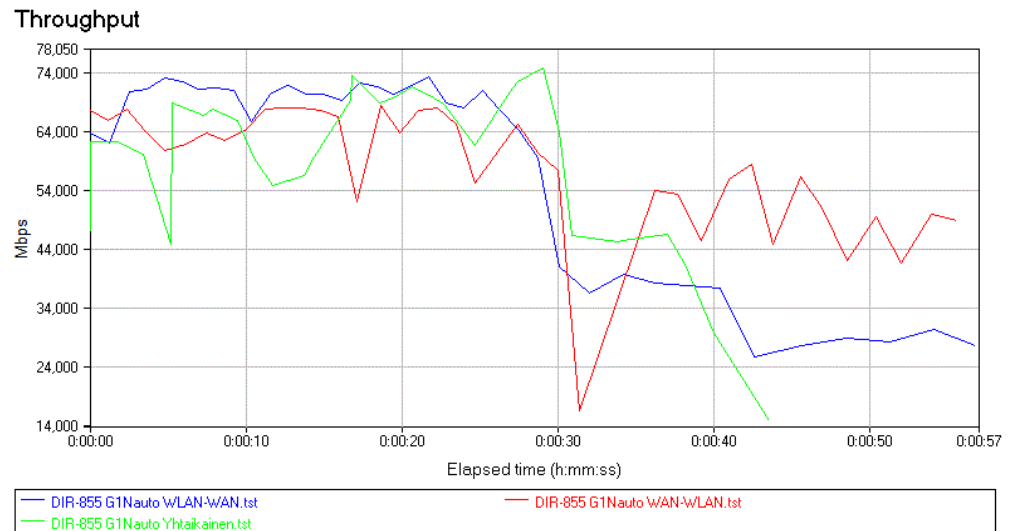
Kanavalla 13 häiriöverkon vaikutukset ovat minimaaliset. Kuvan 34 kuvaajissa ei ole nähtävissä juurikaan vaikutuksia 802.11n-verkkoon.



Kuva 35. DIR-855, 802.11n kanavalla 13, 802.11g-verkon kuvaajat

Myös 802.11g-verkon osalta tilanne näyttää hyvältä (kuva 35). Pientä häiriövaikutusta on havaittavissa, mutta referenssiarvoihin nähden pudotusta siirtonopeuksissa on vain noin 20 %. WLAN-WAN-kuvaajalla 53 sekunnin kohdalla nähtävä hetkellinen nopeuden nolautuminen johtuu jonkinlaisesta ongelmasta testiohjelmassa tai testikoneissa.

Automaattisen kanavavalinnan testien tulokset 802.11n-verkon osalta ovat kuvassa 36.



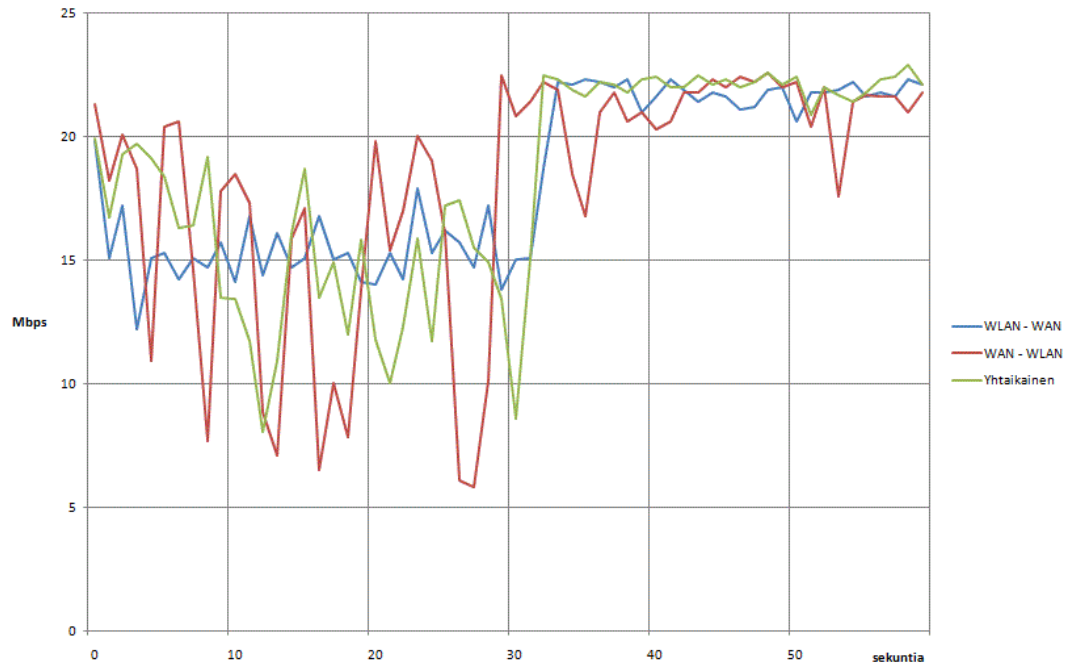
Kuva 36. DIR-855, 802.11n automaattinen kanava, 802.11n-verkon kuvaajat

Siirtonopeudet putoavat erittäin alas. Yhtaikaisen siirron testissä noin 45 sekunnin jälkeen tiedonsiirto loppuu kokonaan. Tiedostokoko oli 10 000 000 tavua. Viimeisen siirretyn tiedoston jälkeen minuutin testiajasta jäljellä ollut 15 sekuntia ei riittänyt seuraavan tiedoston siirtoon. Tästä voidaan laskea, että viimeisten 15 sekunnin aikana siirtonopeus oli vain alle 5 Mbps (kaava 2).

$$\frac{\text{tavua}}{\text{sekunti}} * 8 = \frac{\text{bittiä}}{\text{sekunti}} \quad (2)$$

Tarkemmin $10\,000\,000 \text{ tavua} / 15 \text{ sekuntia} * 8 = 5\,333\,333 \text{ bittiä} / \text{sekunti} = 5,333 \text{ Mbps}$.

Myös WLAN-WAN-testin siirtonopeudet olivat melko alhaisia. Referenssiarvoon nähden keskimääräinen siirtonopeus oli noin 47 %. WAN-WLAN-testissä siirtonopeus oli hieman parempi, noin 67 % referenssiarvosta. Vaihtokäytökset 802.11g-verkkoon ovat nähtävissä kuvassa 37.

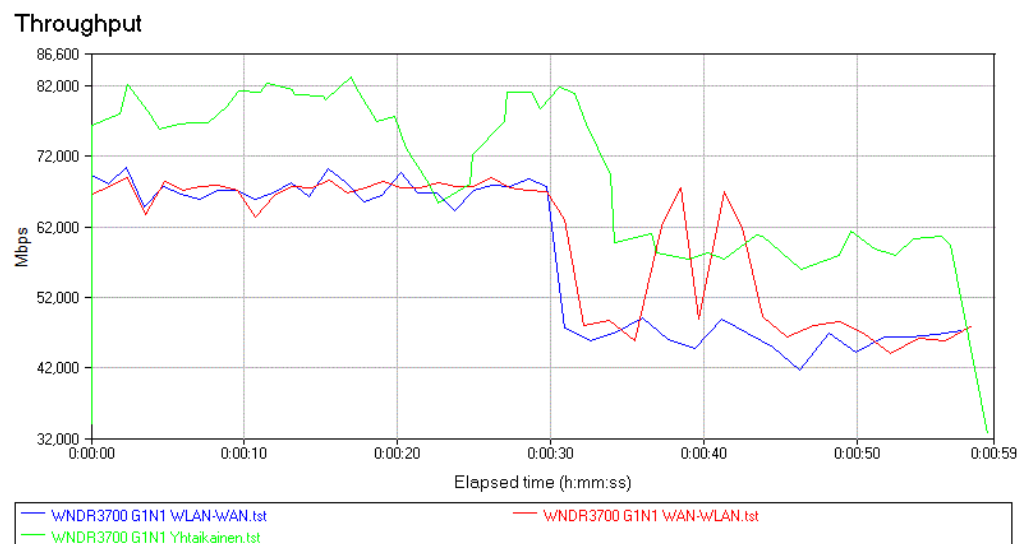


Kuva 37. DIR-855, 802.11n automaattinen kanava, 802.11g-verkon kuvaajat

802.11g-verkossa keskimääräinen siirtonopeus on 70 %:n luokkaa referenssiarvoista.

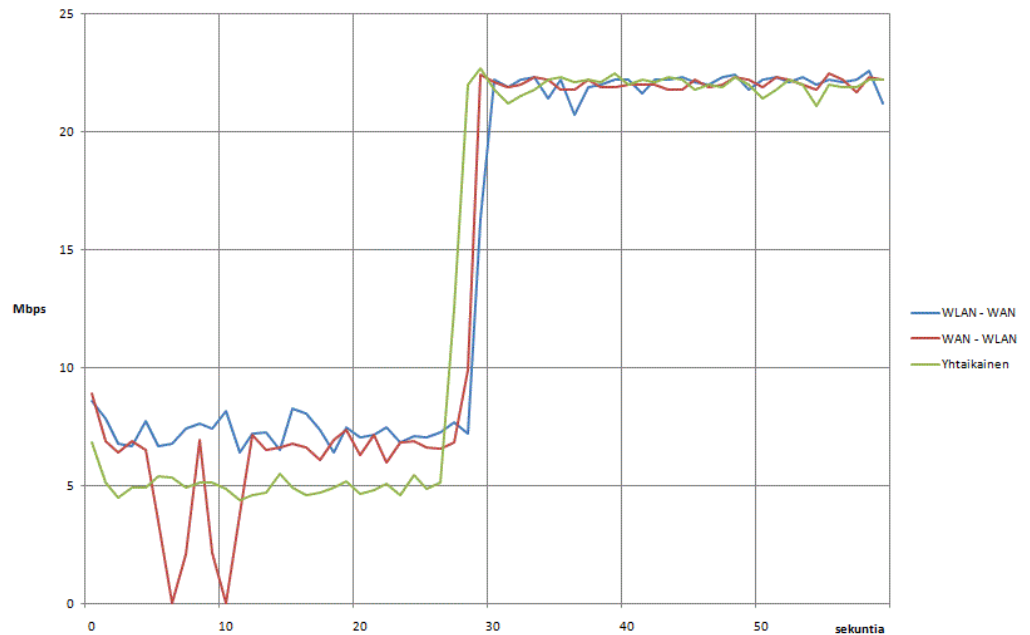
6.4.3 WNDR3700

Siirtonopeudet 802.11n-verkossa molempien verkkojen ollessa kanavalla 1 ovat nähtävissä kuvassa 38.



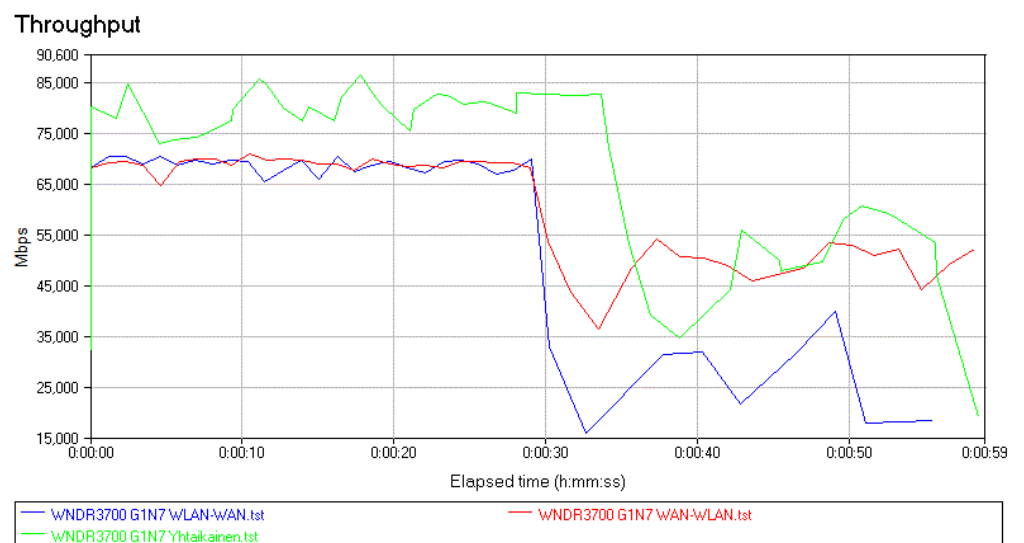
Kuva 38. WNDR3700, molemmat verkot kanavalla 1, 802.11n-verkon kuvaajat

Siirtonopeudet yksittäisten suuntien osalta ovat noin 65-70 % taulukon 6 mukaisesta referenssiarvosta. Yhtaikaisessa siirrossa nopeus on noin 85 % referenssistä.



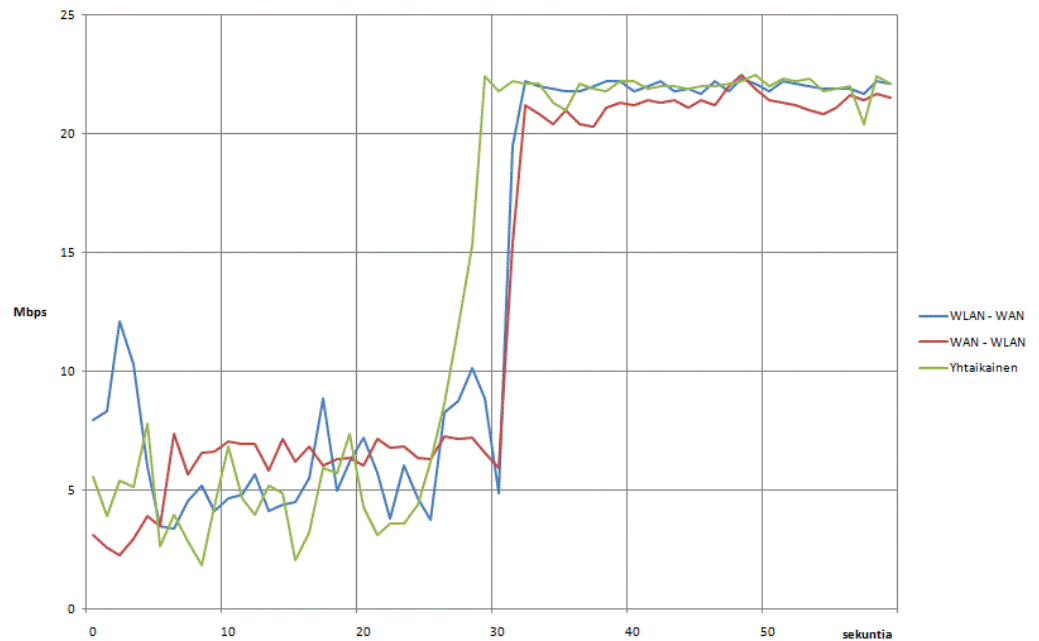
Kuva 39. WNDR3700, molemmat verkot kanavalla 1, 802.11g-verkon kuvaajat

Vaikutukset 802.11g-verkkoon ovat samankaltaiset kuin DIR-855:n testeissä. WAN-WLAN-siirrossa siirtonopeus käy kahdesti nollassa. Aivan yhtä alas kuin DIR-855:n testeissä siirtonopeudet eivät kuitenkaan laske. Referenssiarvoihin nähden nopeudet ovat 25-30 %.



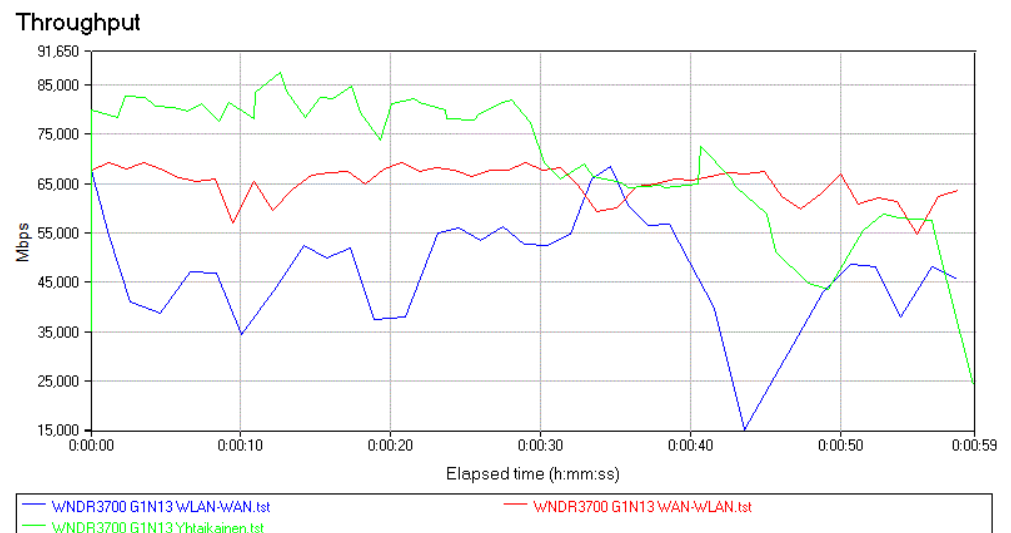
Kuva 40. WNDR3700, 802.11n kanavalla 7, 802.11n-verkon kuvaajat

Kanavalla 7 vaikutukset 802.11n-verkkoon ovat yllättävän suuret (kuva 40). Keskimääräinen siirtonopeus WLAN-WAN-testissä on vain noin 37 % referenssiarvosta. Muissa testeissä siirtonopeudet ovat noin 70 % referenssiarvosta.



Kuva 41. WNDR3700, 802.11n kanavalla 7, 802.11g-verkon kuvaajat

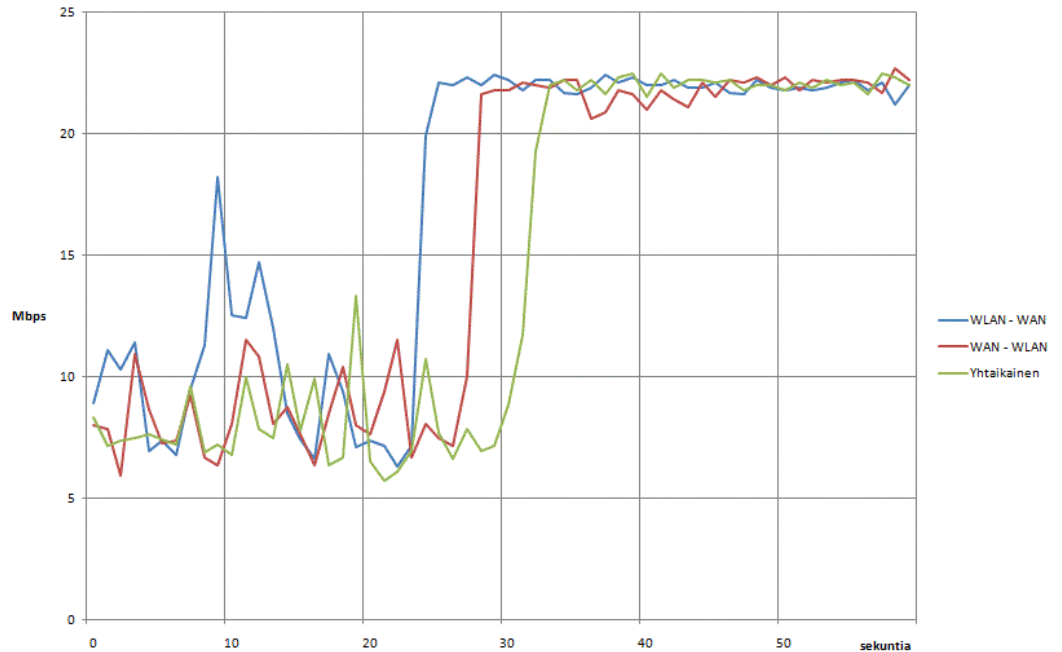
Myös kuvassa 41 nähtävässä 802.11g-verkon testissä vaikutukset ovat hyvin selviä. Referenssiarvoihin nähden nopeudet ovat 25-30 %.



Kuva 42. WNDR3700, 802.11n kanavalla 13, 802.11n-verkon kuvaajat

D-Linkin reitittimissä 802.11n-verkon ollessa kanavalla 13, 802.11g-verkon vaikutukset ovat olleet melko minimaalisia. WNDR3700 poikkeaa tästä. Tu-

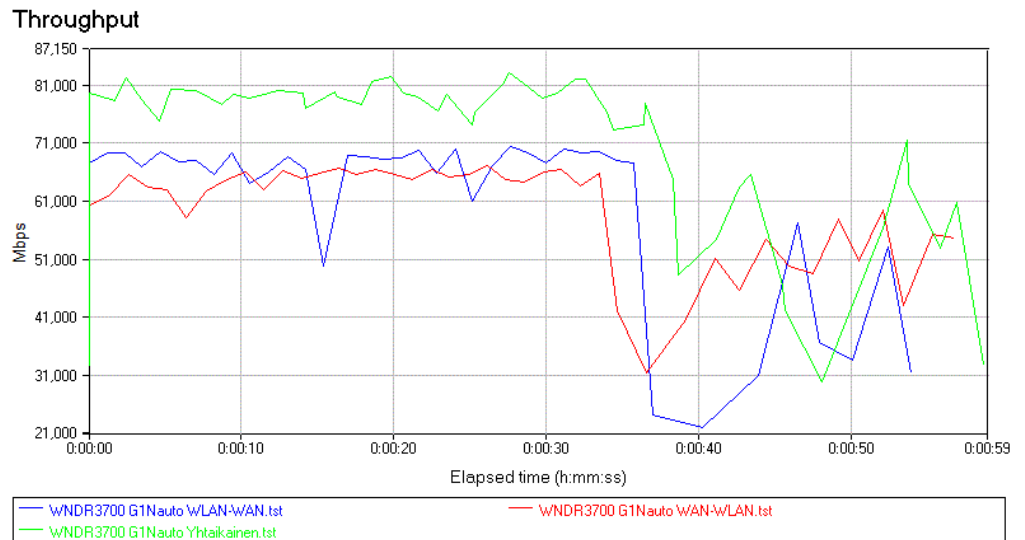
lokset ovat nähtävillä kuvassa 42. WLAN-WAN-testissä siirtonopeus putoaa hetkellisesti noin 15 Mbps:iin. Tosin pian sen jälkeen nopeus tasaantuu, joten on oletettavaa, että siirtonopeuden pudotus johtui testilaitteistosta eikä 802.11g-verkon vaikutuksesta. Pientä nopeuden pudotusta kuitenkin on havaittavissa. Referenssiarvoon nähden nopeus on noin 90 %.



Kuva 43. WNDR3700, 802.11n kanavalla 13, 802.11g-verkon kuvaajat

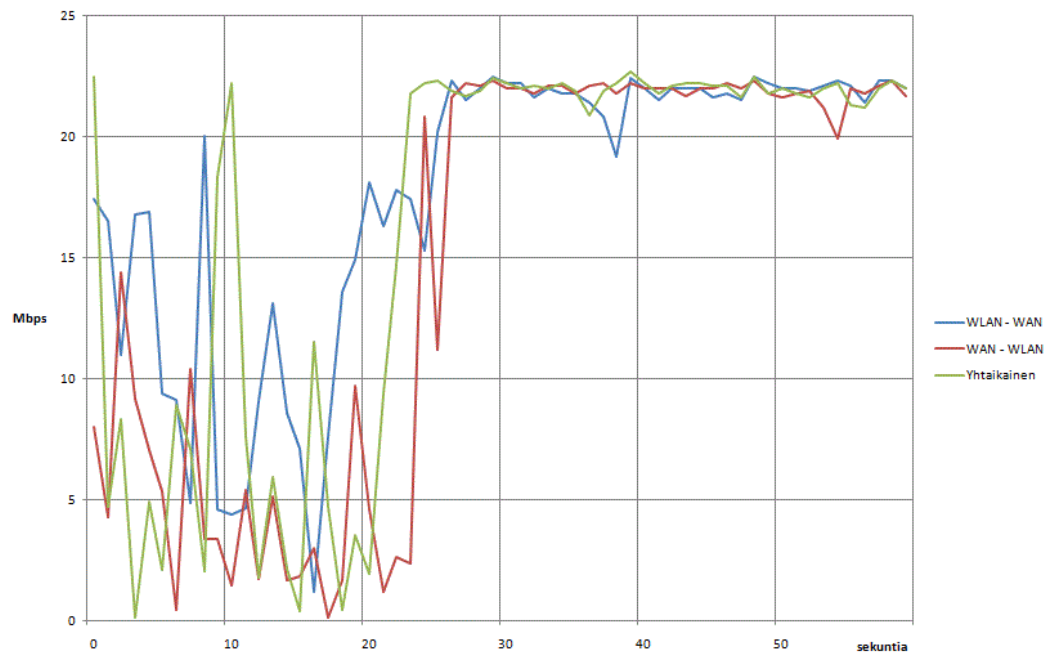
802.11g-verkossa kanavan 13 vaikutukset ovat selkeämmät kuin D-Linkin reitittimissä (kuva 43). Referenssiarvoihin nähden nopeudet ovat 40-45 %. Tämä oletettavasti johtuu siitä, että WNDR3700:ssa antennia on jopa 8 kappaletta. Näiden antennien luoma diversiteetti todennäköisesti tukkii kanavaa.

Kuten D-Linkin laitteissakin, WNDR3700:n automaattinen kanavavalinta ei toimi toivotulla tavalla. Ruuhkattoman kanavan löytäminen ei onnistu. Tulokset ovat nähtävissä kuvassa 44.



Kuva 44. WNDR3700, 802.11n automaattinen kanava, 802.11n-verkon kuvaajat

Automaattisen kanavavalinnan siirtonopeudet 802.11g-verkon ollessa päällä ovat jopa huonommat kuin molempien verkkojen ollessa samalla kanavalla 1. Referensseihin verraten nopeudet ovat WLAN-WAN-testissä noin 50 % ja muissa noin 70 %.

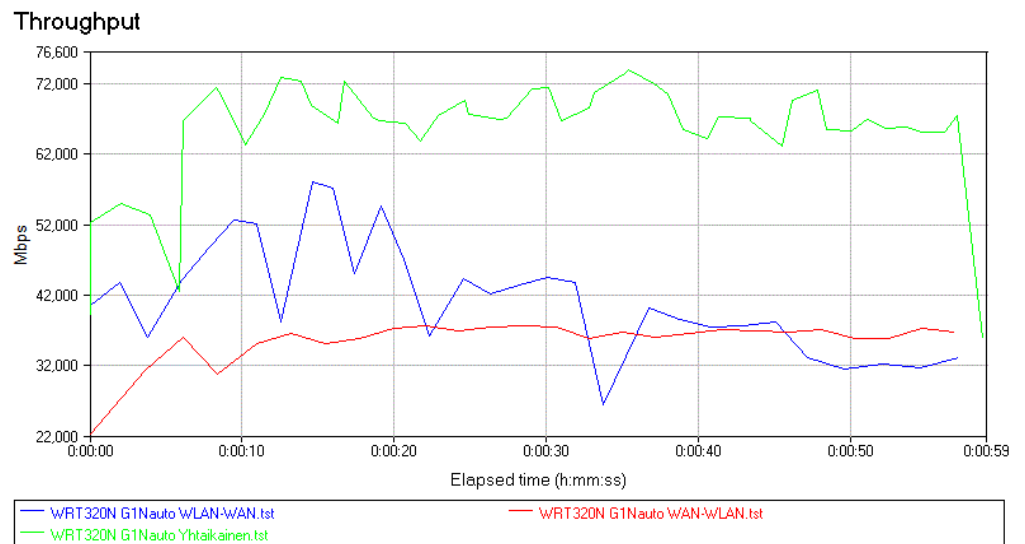


Kuva 45. WNDR3700, 802.11n automaattinen kanava, 802.11g-verkon kuvaajat

802.11g-verkon osalta vaikutukset olivat melko heilahtelevia. Osan ajasta reititin pystyi toimimaan miltei referenssitasolla, mutta välillä siirtonopeudet kävivät miltei nollassa. Testin kulku on nähtävissä kuvassa 45.

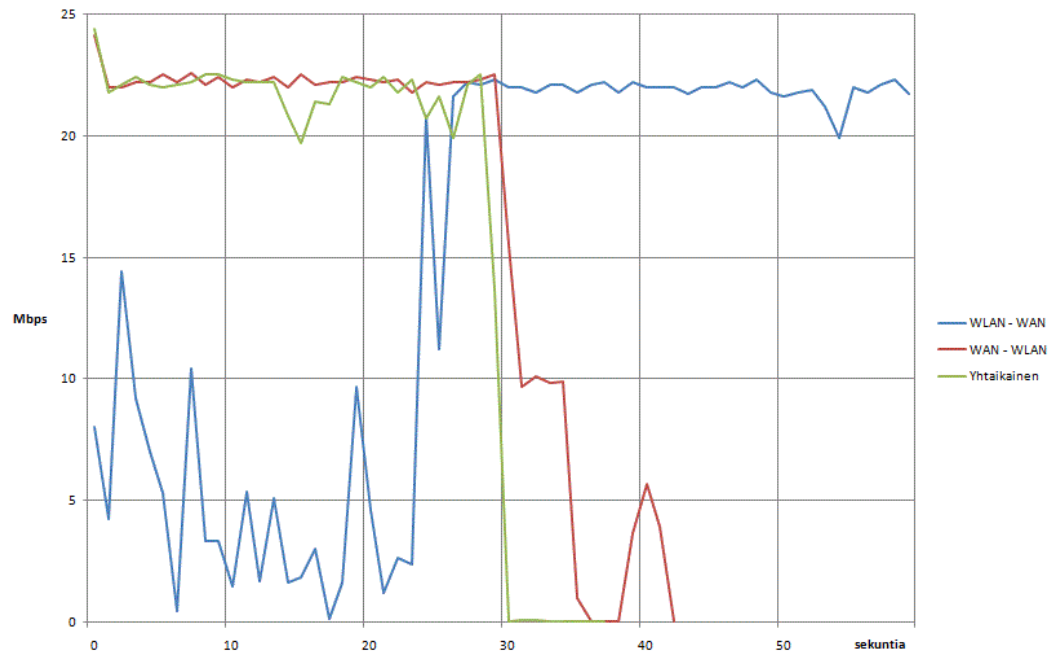
6.4.4 WRT320N

Toisin kuin muissa testatuissa reitittimissä, WRT320N:ssä ei ollut mahdollista valita käytettävää kanavaa. Tästä johtuen testit suoritettiin ainoastaan reitittimen ollessa kanavan automaattivalinnalla. WRT320N:n testeissä 802.11g-häiriöverkon reitittimenä toimi WNDR3700. Testin kulku on 802.11n-verkon osalta kuvassa 46.



Kuva 46. WRT320N, 802.11n automaattinen kanava, 802.11n-verkon kuvaajat

802.11n-verkon osalta reititin toimi samalla tasolla kaikkien testien aikana. Tosin yksittäisten siirtojen testissä siirtonopeus oli koko ajan referenssitasoa alempana. Yhtaikainen siirto toimi korkeammalla nopeustasolla koko testin ajan. WLAN-WAN-testin keskimääräinen siirtonopeus koko testin osalta oli 61 %, WAN-WLAN-testin 53 % ja yhtaikaisen 100,6 % referenssiarvoista.



Kuva 47. WRT320N, 802.11n automaattinen kanava, 802.11g-verkon kuvaajat

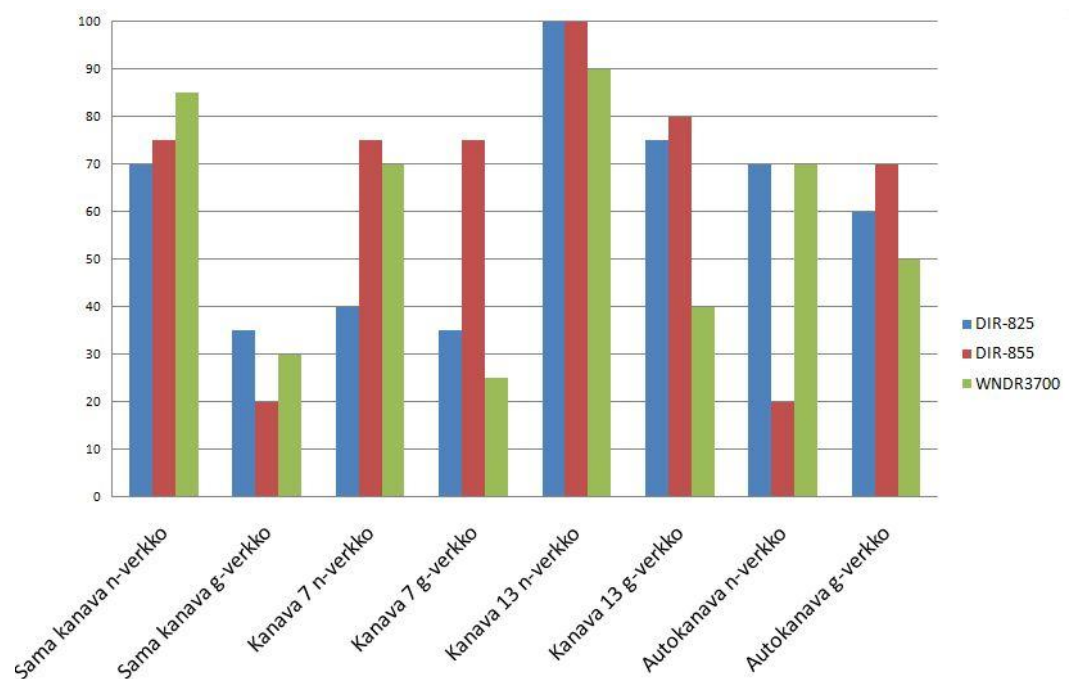
WRT320N:ää testattaessa WLAN-WAN-suuntainen testi oli ainoa testi, joka saatiin suoritettua normaalisti loppuun 802.11g-verkon osalta. Muiden testien kohdalla tuli ongelmia. 802.11n-verkon ollessa päällä, 802.11g-verkon Iperf-testi ei käynnistynyt lainkaan, vaan antoi virheilmoituksen yhteyden epäonnistumisesta.

Ensimmäinen oletus tilanteessa oli, että Iperf-testiohjelmaan oli tullut jokin vika, joka esti sen toiminnan kokonaisuudessaan. Kun asiaa tutkittiin tarkemmin, näin ei kuitenkaan ollut, vaan 802.11n-verkko teki 802.11g-verkkoon niin paljon häiriötä, että 802.11g-verkko lopetti käytännössä toimintansa kokonaan. Tästä johtuen viimeisen kahden testin osalta testausjärjestystä jouduttiin muuttamaan. Näiden testien tulokset ovat punainen ja vihreä kuvaaja kuvassa 47.

Ensin aloitettiin 802.11g-verkon testi, jonka jälkeen noin 30 sekunnin kohdalla aloitettiin 802.11n-verkon testi. Molemmissa testeissä vaikutukset olivat erittäin suuret. Miltei heti, kun 802.11n-verkossa alkoi tapahtua liikennettä, 802.11g-verkon testiohjelma ei pystynyt siirtämään enää mitään, ja keskeytti testin. Ilmiö on nähtävissä varsinkin yhtäaikaisen siirron kuvaajassa (kuva 47, vihreä kuvaaja). Myös WLAN-WAN-testissä siirtonopeus kävi useaan otteeseen lähes nollassa.

6.4.5 Yhteenveto häiriöverkon mittauksista

Kuvassa 48 nähdään yhteenveto häiriömittausten tuloksista verrattuna kunkin reitittimen referenssiarvoihin taulukossa 6. Verratut tulokset ovat yhtäkaisten siirtomittausten keskinopeuksia. Kanavalla 13 vaikutukset 802.11n-verkkoon ovat minimaaliset, mutta häiriöiden vaikutus 802.11g-verkkoon on selkeästi havaittavissa. Vaikka kanavan 13 pitäisi olla riittävän kaukana kanavan 1 taajuusalueista häiriöiden välttämiseksi, 802.11g-verkossa vaikutukset näkyvät selkeästi. Kaavioon ei merkitty WRT320N:n tuloksia, koska sen tuloksissa 802.11n-verkossa ei nähty vaikutuksia ja 802.11g-verkossa vaikutukset katkaisivat liikenteen kokonaan.



Kuva 48. Häiriömittausten suhteutettu vertailukaavio

802.11n-verkko on melko häiriösuojattu vanhemman 802.11g-verkon vaikutuksilta. 802.11n-laitteiden useamman antennin luoma diversiteetti auttaa häiriöiden torjumisessa. 802.11g-verkko taasen näyttäisi olevan erittäin altis 802.11n-verkon häiriöille. Näiden testien perusteella 802.11n-laitteiden yleistyessä vanhojen 802.11g-laitteiden omistajat ovat miltei pakotettuja vaihtamaan vanhentuneet laitteensa uusiin.

Varsinkin DIR-855:n ja WRT320N:n vaikutukset 802.11g-verkkoon ovat erittäin suuret. Tiedonsiirto 802.11g-verkossa loppuu miltei kokonaan. Suositeltavaa onkin, että uusia 802.11n-laitteita ei käytettäisi 2,4 GHz:n taajuusalu-

een kanavalla 1, vaan hankittaisiin laitteita, jotka pystyvät toimimaan myös ruuhkattomammalla 5 GHz:n taajuusalueella.

6.5 Etäisyysmittaukset

Etäisyystesteissä haluttiin selvittää pienten etäisyysvaihteluiden vaikutus siirtonopeuteen. Testattavat etäisyydet olivat yksi metri, kolme metriä ja kuusi metriä. Lisäksi kuudessa metrissä testattiin esteiden vaikutus siirtonopeuteen laittamalla kannettavan ja tukiaseman välissä oleva ovi kiinni.

Tähän testiin saatiin käyttöön myös D-Linkin DWA-160 -USB-liitännäinen langaton verkkokortti. Macbook Pro sisäisestä verkkokortista poiketen DWA-160:n ajureissa ei D-Linkin oman ohjelmiston mukaan ollut vikaa, vaan linkki toimi 300 Mbps:n nopeudella. Näin saadaan edes joitain testituloksia myös 40 kHz:n kanavaleveyden nopeuksista. Jokaisella etäisyydellä testit tehtiin sekä sisäisellä että USB-verkkokortilla molemmilla taajuusalueilla.

Jokaisella etäisyydellä tehtiin samat testit, joita käytettiin edellisissä häiriötesteissäkin, eli

- siirtonopeus WANista WLANiin (download, liikenne sisäänpäin)
- siirtonopeus WLANista WANiin (upload, liikenne ulospäin)
- yhtaikainen siirtonopeus (upload ja download yhtäaikaa).

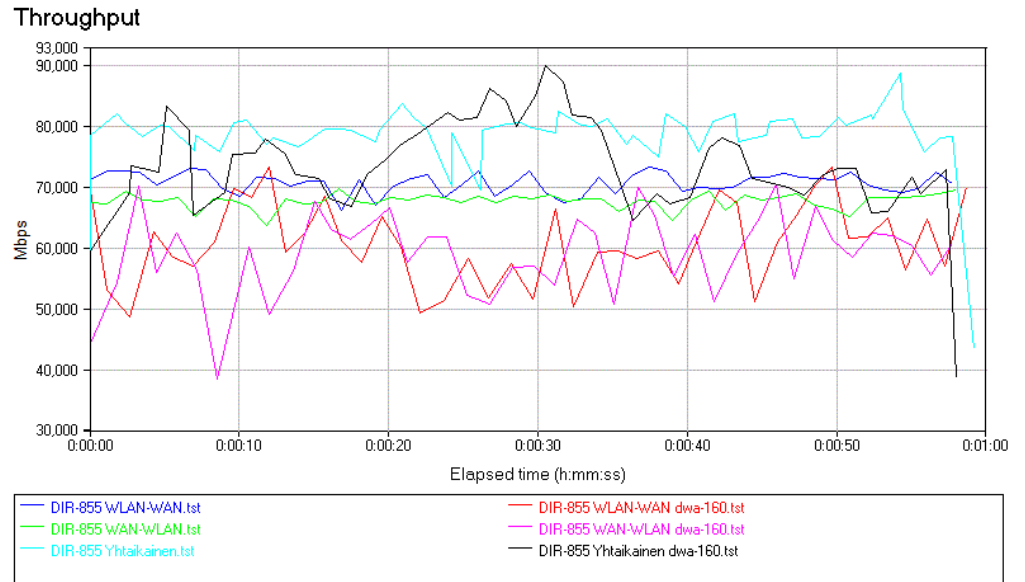
Kuten edellisessäkin testissä, yhtaikaisten siirtojen kuvaajat on yhdistetty tulosten lukemisen helpottamiseksi.

6.5.1 DIR-855

2,4 GHz:n taajuusalueella yhden metrin etäisyydellä, DWA-160 saavutti miltei 90 Mbps:n nopeuden yhtaikaisessa siirrossa. Tilanne on nähtävillä kuvassa 49. Tulos on tähän mennessä korkein saavutettu maksiminopeus, joten on syytä olettaa, että 40 MHz:n kanavat olivat käytössä DWA-160:tä käytettäessä. Tosin suurempiakin nopeuksia olisi todennäköisesti mahdollista saada. Hetkellinen maksimi yhtaikaisessa siirrossa sisäisellä kortilla, noin 54 sekunnin kohdalla, on hyvin lähellä samaa tulosta, noin 87,5 Mbps. Yksittäisen suunnan siirroissa USB-liitännäinen DWA-160 kuitenkin suoriutuu testistä huomattavasti nopeammin kuin Macbookin sisäinen kortti.

DWA-160:n saavuttamat keskiarvonopeudet ovat WLAN-WAN-testissä 60,171 Mbps, WAN-WLAN-testissä 58,221 Mbps ja yhtaikaisessa testissä

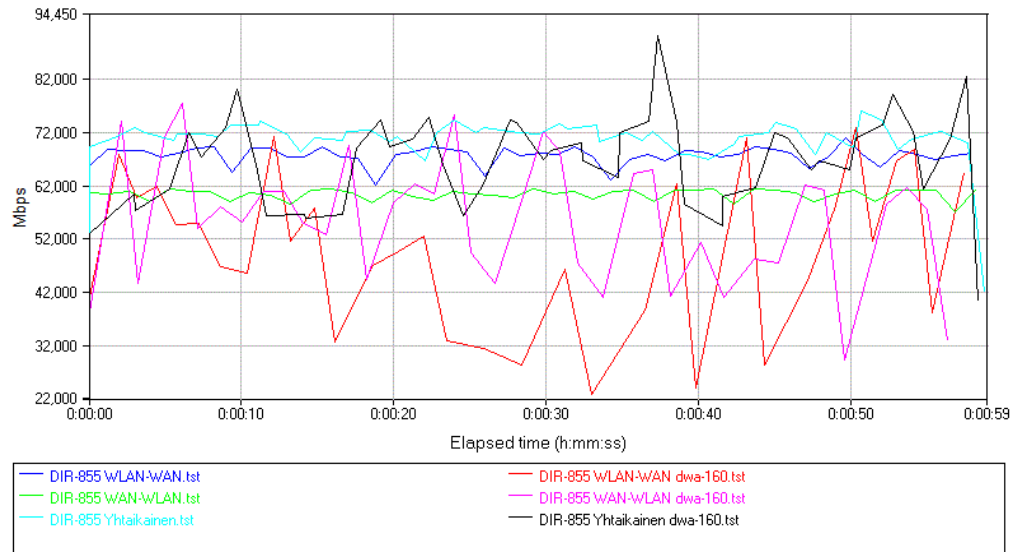
72,686 Mbps. Vastaavat arvot sisäisellä kortilla ovat 70,645 Mbps, 67,660 Mbps ja 79,244 Mbps. Kuten kuvasta 49 voidaan havaita, sisäinen kortti toimi huomattavasti tasaisemmin. Ilmiö todennäköisesti johtuu siitä, että USB-verkkokortin antennit on jouduttu asentamaan hyvin pieneen tilaan, jolloin MIMO ei pääse toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla.



Kuva 49. DIR-855, 2,4 GHz, 1 metri

5GHz:n taajuusalueella testitulokset ovat hyvin samankaltaisia. DWA-160 suoriutuu keskinopeuksiltaan sisäistä korttia heikommin yksittäisissä siirroissa, mutta tekee parhaan maksimituloksen yhtäaikaisessa. Nopeus nousee maksimissaan hieman yli 90 Mbps. Tulokset ovat nähtävillä kuvassa 50.

Throughput

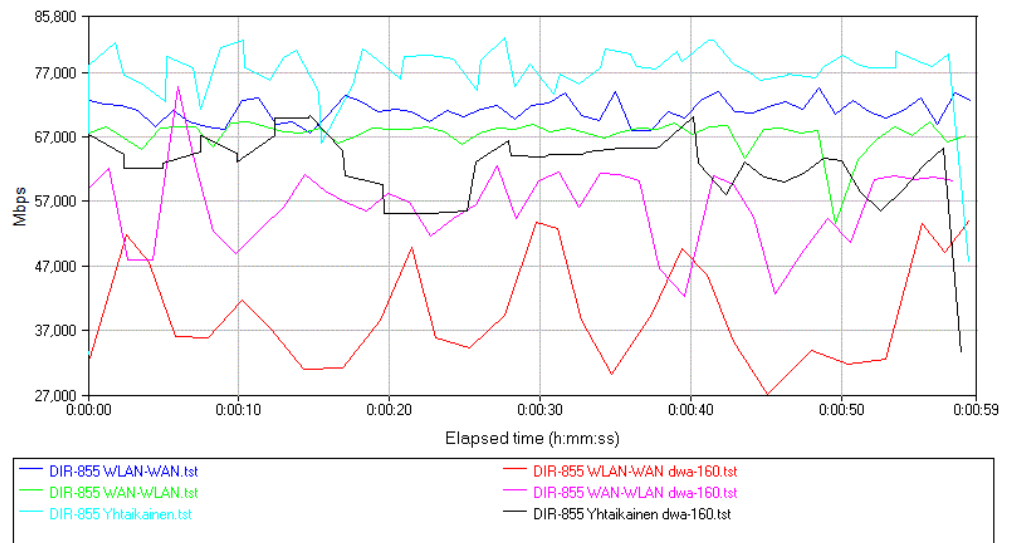


Kuva 50. DIR-855, 5 GHz, 1 metri

5GHz:n taajuudella DWA-160:n keskinopeudet ovat WLAN-WAN-testissä 44,971 Mbps, WAN-WLAN-testissä 53,051 Mbps ja yhtäaikaisessa 65,764 Mbps. Vastaavat nopeudet sisäisellä kortilla ovat 67,676 Mbps, 60,405 Mbps ja 71,155 Mbps.

Kolmen metrin etäisyydellä 2,4 GHz:n taajuusalueella DWA-160 toimii huommin kuin edellisessä testissä. Testin tulokset ovat nähtävissä kuvassa 51.

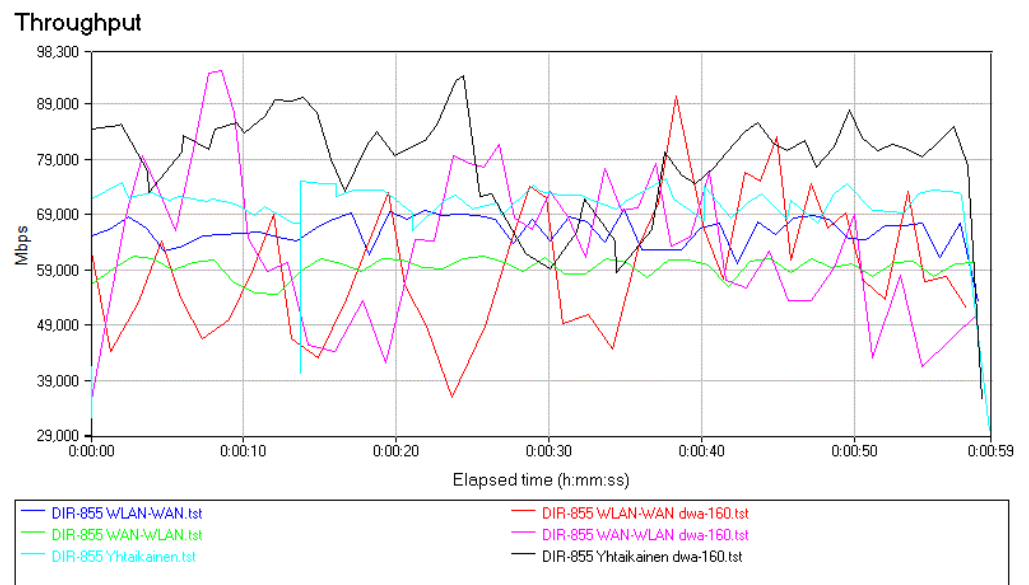
Throughput



Kuva 51. DIR-855, 2,4 GHz, 3 metriä

DWA-160:n keskisiirtonopeudet 2,4 GHz:n alueella ovat WLAN-WAN-testissä 38,679 Mbps, WAN-WLAN-testissä 55,779 Mbps ja yhtäaikaisessa 62,155 Mbps. Sisäisen kortin tulokset ovat 71,065 Mbps, 67,270 Mbps ja 77,562 Mbps.

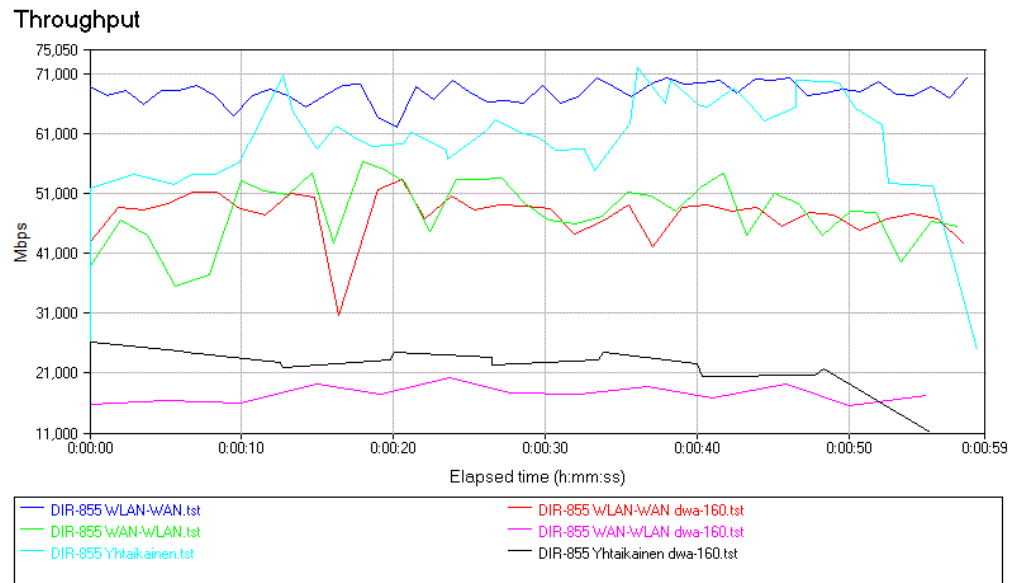
5 GHz:n taajuusalueella DWA-160 toimii paremmin. Keskisiirtonopeudet ovat 58,355 Mbps, 61,706 Mbps ja 77,764 Mbps. Vastaavat nopeudet sisäisellä kortilla ovat 65,743 Mbps, 59,390 Mbps ja 71,222 Mbps. Testin kulku on nähtävillä kuvassa 52.



Kuva 52. DIR-855, 5 GHz, 3 metriä

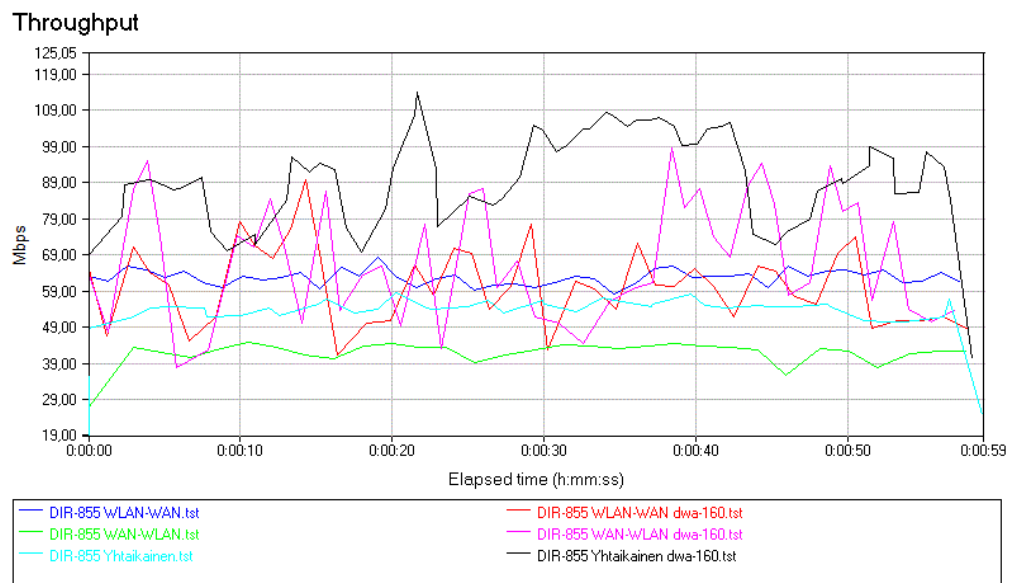
Kuuden metrin testissä 2,4 GHz:n alueella DWA-160 toimii erittäin huonosti. Alueelle on saattanut ilmestyä toinen, häiritsevä verkko. Alue skannattiin muista verkoista vain testien alussa. Ensimmäinen, WLAN-WAN-testi on hyvin lähellä sisäisen kortin WAN-WLAN-testin tuloksia, mutta muiden testien tulokset ovat hyvin vaatimattomia. Asia selvinnee, kun tutkitaan muiden reitittimien tuloksia samoilla etäisyyksillä.

Testin kulku on nähtävillä kuvassa 53. Keskisiirtonopeudet DWA-160:llä ovat 47,049 Mbps, 17,402 Mbps ja 23,058 Mbps. Paremmin suoriutuneella sisäisellä kortilla vastaavat tulokset ovat 67,820 Mbps, 47,487 Mbps ja 60,084 Mbps.



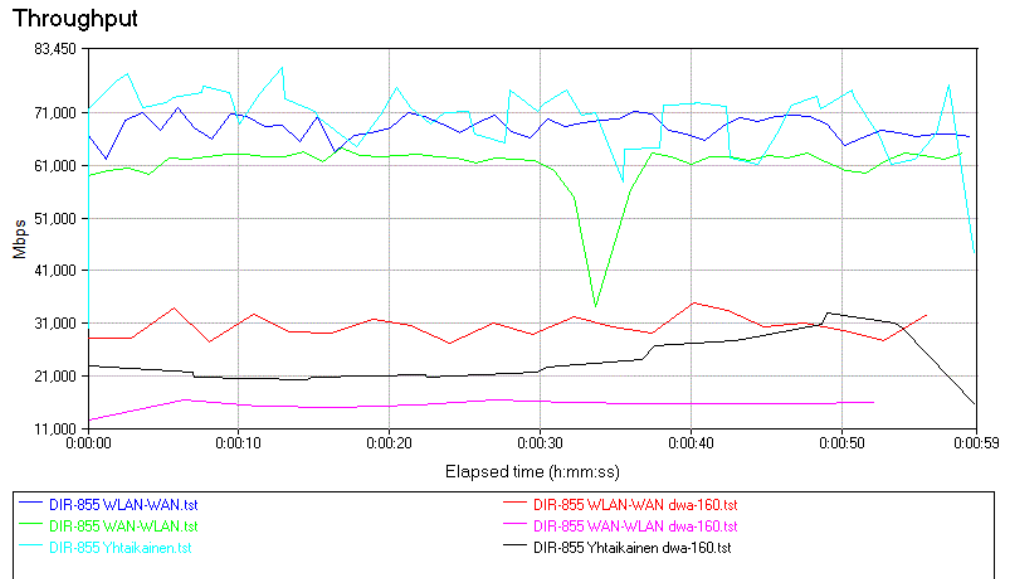
Kuva 53. DIR-855, 2,4 GHz, 6 metriä

DWA-160:n suorituskyky paranee moninkertaisesti siirryttäessä 5 GHz:n taajuusalueelle (kuva 54). DWA-160:n yhtaikaisessa siirtotestissä saavutetaan tähän mennessä testien paras hetkellinen maksiminopeus, 114,082 Mbps.



Kuva 54. DIR-855, 5 GHz, 6 metriä

Keskimääräiset siirtonopeudet DWA-160:n osalta tässä testissä ovat 59,075 Mbps, 64,147 Mbps ja 88,416 Mbps. Vastaavat tulokset sisäisellä kortilla ovat 62,640 Mbps, 41,480 Mbps ja 53,410 Mbps. Näyttäisi siltä, että DWA-160 on optimoitu hyödyntämään 5 GHz:n taajuusalueetta.

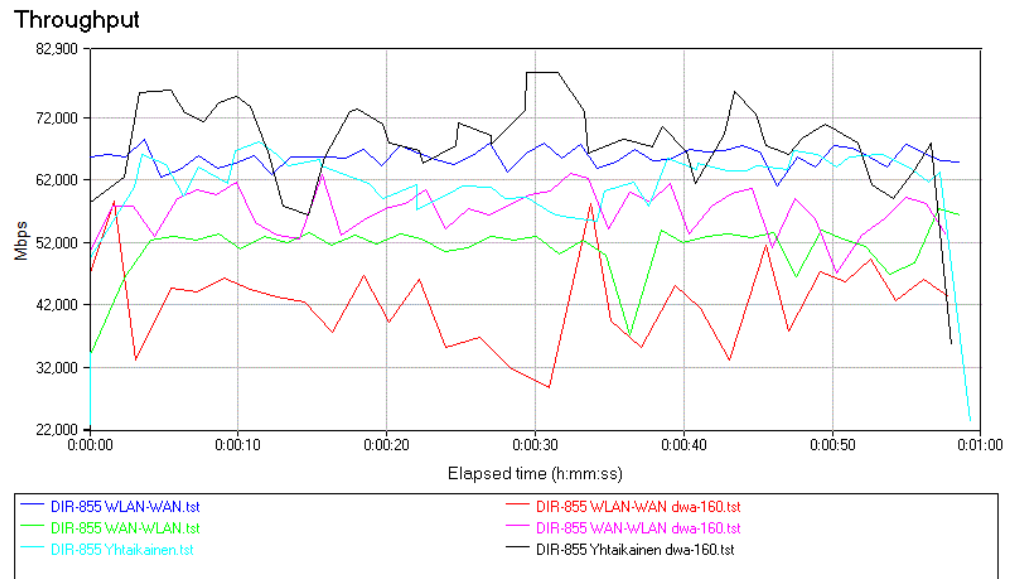


Kuva 55. DIR-855, 2,4 GHz, 6 metriä ovi kiinni

Kuvassa 55 nähdään testin tulos kuudessa metrissä, kun reitittimen ja kannettavan väliin laitetaan puuovi kiinni. Edellisessä testissä havaittu huono siirtonopeus DWA-160:n osalta jatkuu. Sisäisen kortin toimintaan este ei juuri vaikuta. Keskiirtonopeudet DWA-160:lla ovat 30,267 Mbps, 15,387 Mbps ja 24,313 Mbps. Tulokset ovat melko lähellä edellisen testin tuloksia. Nopeuden pudotusta tapahtuu WLAN-WAN-testissä noin 35 % ja WAN-WLAN-testissä noin 12 %. Yhtäikäisen siirron osalta tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan.

Sisäisen kortin osalta vastaavat tulokset ovat 68,274 Mbps, 60,705 Mbps ja 70,537 Mbps. Puuovella ei näyttäisi olevan minkäänlaista merkitystä sisäisen kortin toimintaan. Tulokset ovat jopa paremmat kuin ilman estettä. WLAN-WAN-testissä parannusta on 0,7 %, WAN-WLAN-testissä jopa 27 % ja yhtäikäisessä 17 %.

Kuten edellisessä testissäkin, DWA-160:n suorituskyky paranee siirryttäessä 5GHz:n taajuudelle. Testitulokset ovat nähtävissä kuvassa 56.

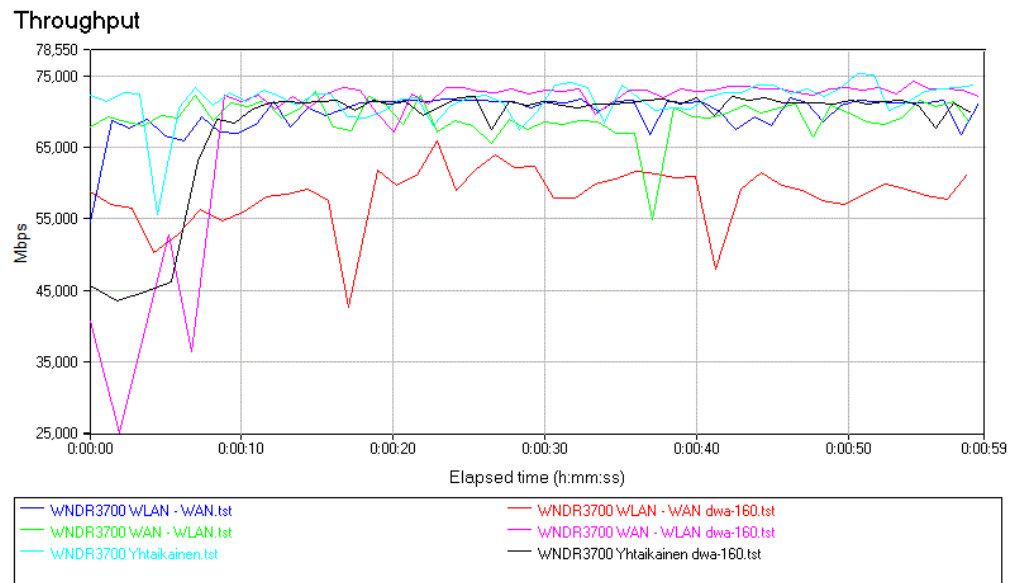


Kuva 56. DIR-855, 5 GHz, 6 metriä ovi kiinni

Puuovi vaikuttaa jonkin verran siirtonopeuksiin 5 GHz:n taajuudella. Keski-siirtonopeudet DWA-160:llä ovat 41,544 Mbps, 56,801 Mbps ja 67,924 Mbps. Vastaavat arvot sisäisellä kortilla ovat 65,541 Mbps, 50,676 Mbps ja 61,428 Mbps. Siirtonopeuksien pudotusta esteettömään testiin DWA-160:llä on WLAN-WAN-testissä noin 30 %, WAN-WLAN-testissä noin 11,5 % ja yht-aikaisessa noin 23 %. Siirtonopeudet heikkenivät myös sisäisellä kortilla. Vastaavat nopeuden pudotukset sisäisellä kortilla ovat 5 %, 18 % ja 13 %. Oven vaikutus on pienempi käytettäessä sisäistä korttia.

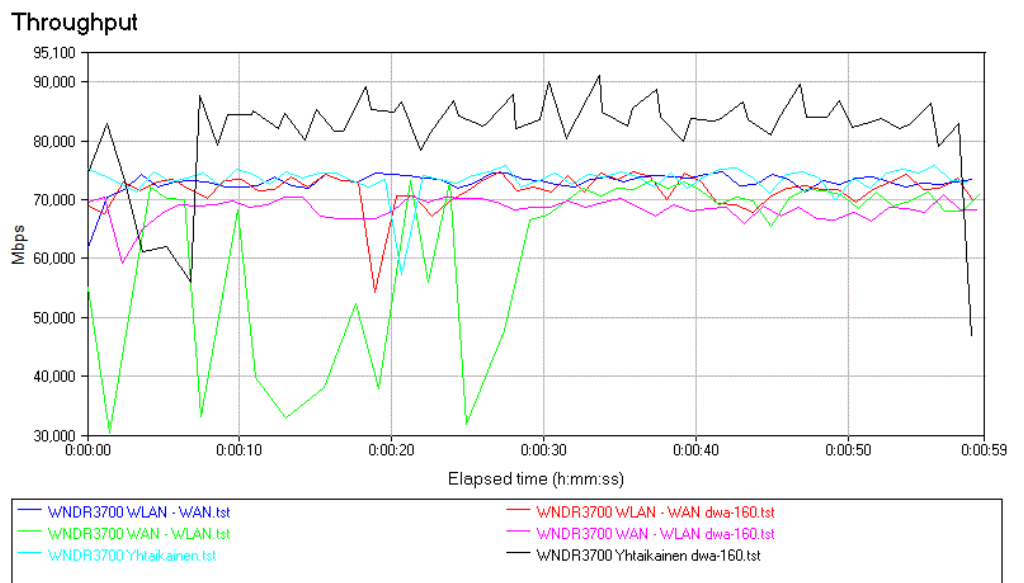
6.5.2 WNDR3700

Yhden metrin etäisyydellä 2,4 GHz:n taajuusalueella käyttäen WNDR3700:n siirtonopeudet ovat hyvin tasaisia. Ainoastaan DWA-160:n WLAN-WAN-testin tulos on muita heikompi. Saavutetut keski-siirtonopeudet DWA-160:llä ovat 58,101 Mbps, 66,955 Mbps ja 67,532 Mbps. Vastaavat tulokset sisäisen kortin osalta ovat 69,626 Mbps, 68,904 Mbps ja 71,413 Mbps. Toisin kuin DIR-855:n yhden metrin yhtaikaisen siirron testissä, minkäänlaista siirtonopeuspiikkiä ei ole havaittavissa. Testin tulokset ovat nähtävissä kuvassa 57.



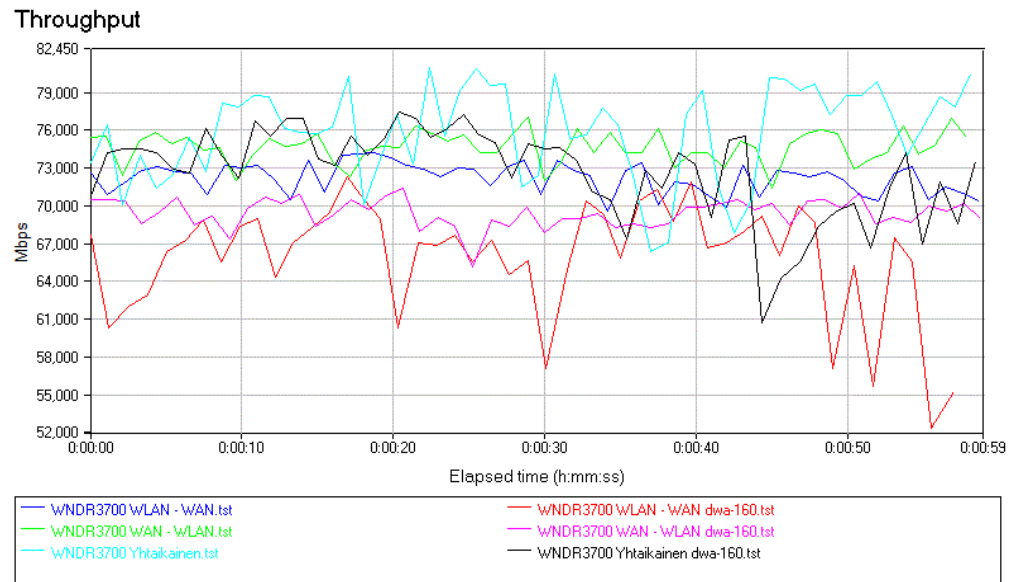
Kuva 57. WNDR3700, 2,4 GHz, 1 metri

5 GHz:n taajuudelle siirryttäessä siirtonopeudet paranevat. Sisäisen kortin WLAN-WAN-testissä alussa siirtonopeus on melko alhainen ja heilahteleva, mutta testin loppua kohti siinäkin päästään muiden testien tasolle. Testin tulokset ovat kuvassa 58. Yhtaikaisen siirron testissä DWA-160:llä saadaan WNDR3700:n tähän mennessä paras tulos. Hetkellinen maksimisiirtonopeus on 91,050 Mbps. Keskimääräiset siirtonopeudet DWA-160:llä ovat 71,367 Mbps, 68,311 Mbps ja 81,327 Mbps. Vastaavat tulokset sisäistä korttia käyttäen ovat 72,860 Mbps, 58,797 Mbps ja 73,244 Mbps.



Kuva 58. WNDR3700, 5 GHz, 1 metri

2,4 GHz:n taajuudella kolmen metrin testissä DWA-160 saa keskiirtonopeuksiksi 65,646 Mbps, 69,368 Mbps ja 72,575 Mbps. Sisäisen kortin tulokset ovat 72,166 Mbps, 74,619 Mbps ja 75,742 Mbps. DWA-160:n heikompi suoritus sisäiseen korttiin nähden 2,4 GHz:n taajuudella siis jatkuu. Tulokset ovat näkyvillä kuvassa 59.

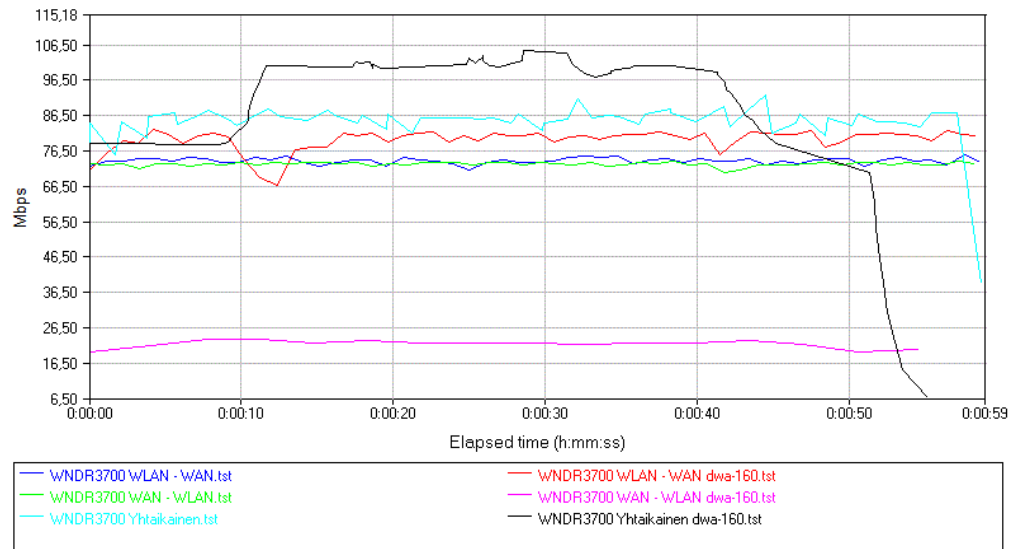


Kuva 59. WNDR3700, 2,4 GHz, 3 metriä

5 GHz:n taajuuteen siirryttäessä DWA-160:n suorituskyky WAN-WLAN-testiä lukuun ottamatta paranee huomattavasti. WAN-WLAN-testin huonoon tulokseen ei ole selvää syytä. Testilaitteistossa tai -ohjelmistossa on saattanut testin aikana olla jotain vialla. Myös yhtaikaisessa siirrossa testin lopussa tapahtuu kummallinen siirtonopeuden pudotus. Näistä ilmiöistä huolimatta WNDR3700:n hetkellinen maksimitulos paranee jälleen. Tässä testissä saatu hetkellinen maksimisiirtonopeus DWA-160:n yhtaikaisessa siirrossa on 104,860 Mbps.

Keskisiirtonopeudet DWA-160:llä ovat 79,464 Mbps, 21,860 Mbps ja 86,728 Mbps. Vastaavat tulokset sisäisellä kortilla ovat 73,655 Mbps, 72,752 Mbps ja 85,710 Mbps. Testin kulku on näkyvillä kuvassa 60.

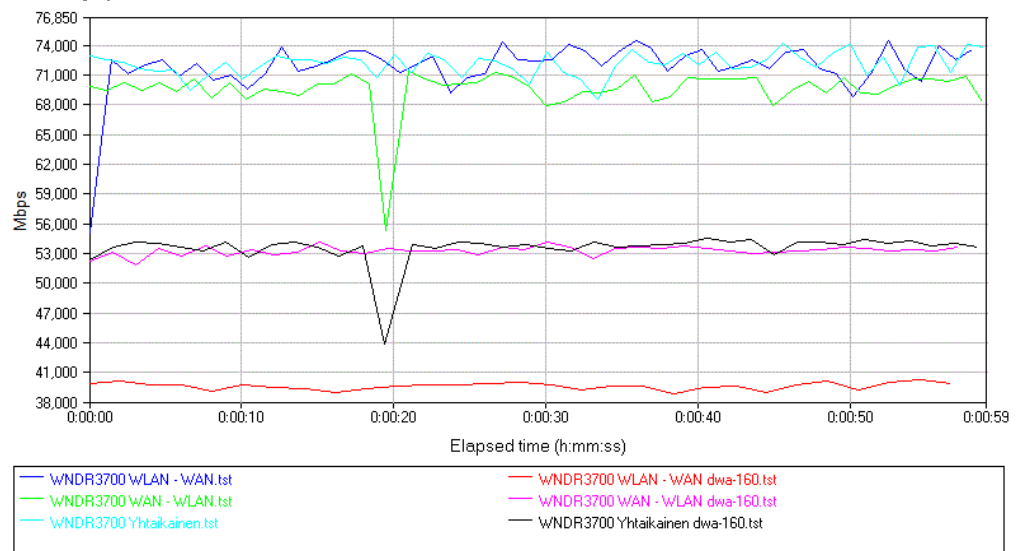
Throughput



Kuva 60. WNDR3700, 5 GHz, 3 metriä

Kuvassa 61 nähdään kuuden metrin testin tulokset 2,4 GHz:n taajuudella. DWA-160:n suorituskyky on jälleen heikompi kuin sisäisen kortin. Keskiirtonopeudet DWA-160:n osalta ovat 39,594 Mbps, 53,247 Mbps ja 53,453 Mbps. Vastaavat nopeudet sisäisellä kortilla ovat 71,712 Mbps, 69,450 Mbps ja 72,111 Mbps.

Throughput

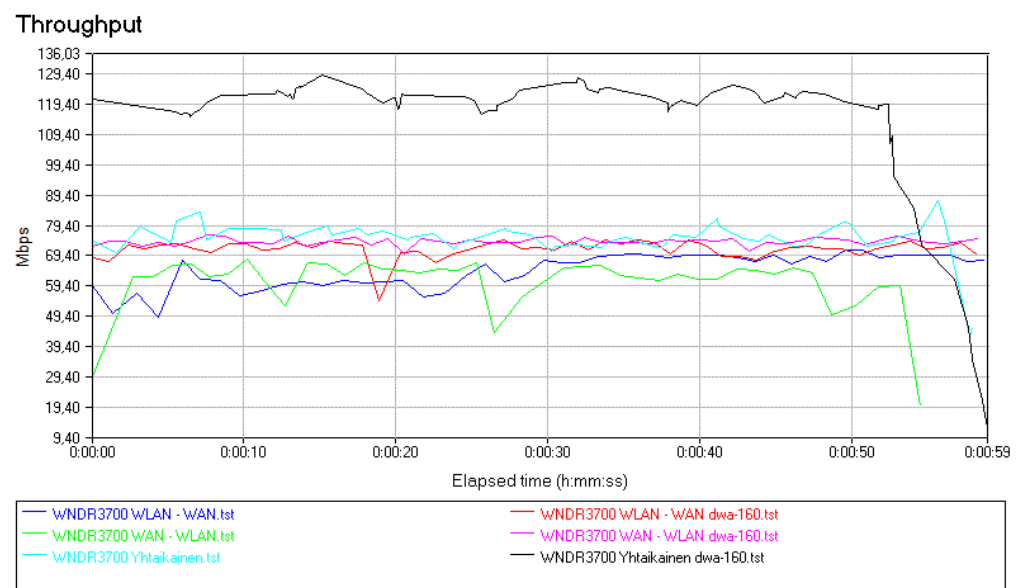


Kuva 61. WNDR3700, 2,4 GHz, 6 metriä

DWA-160:n yhtaikaisessa siirrossa WLAN-WAN-suuntaisesta liikenteestä ei saada tulosta lainkaan, joten siirtonopeus pysyttelee hyvin lähellä yhden

suunnan WAN-WLAN-siirron tulosta. WLAN-WAN-siirron tulos on myös omassa testissään varsin heikko.

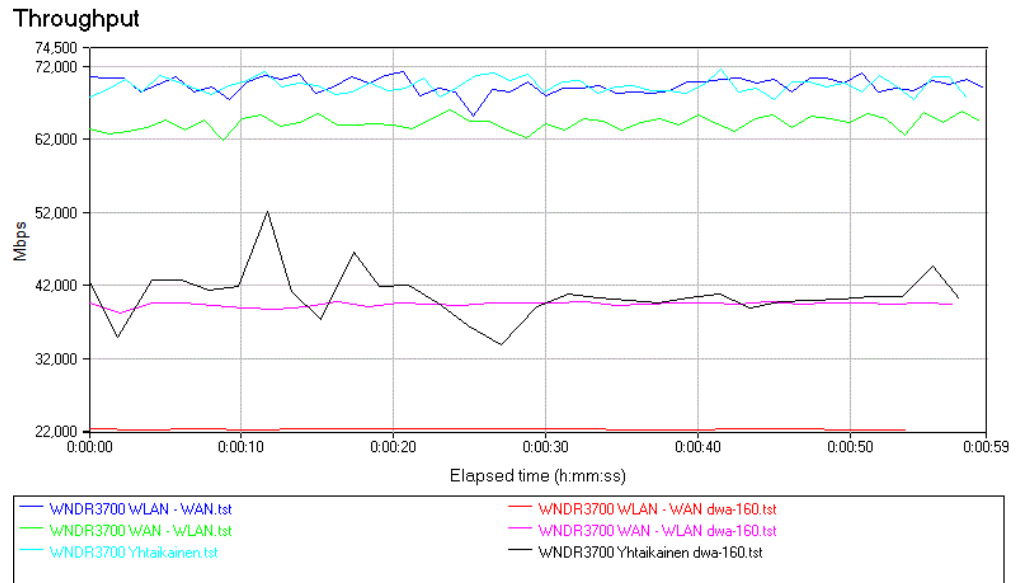
5 GHz:n testin kulku on nähtävissä kuvassa 62. Tällä taajuudella siirtonopeudet tasoittuvat DWA-160:n ja sisäisen kortin välillä lukuun ottamatta DWA-160:n yhtäkaista siirtotestiä. Siinä saavutetaan erittäin hyvä siirtonopeus koko testin ajan. WNDR3700:n saavutettu maksimisiirtonopeus paranee entisestään. Tässä testissä saavutettu hetkittäinen maksiminopeus on jopa 129,076 Mbps.



Kuva 62. WNDR3700, 5 GHz, 6 metriä

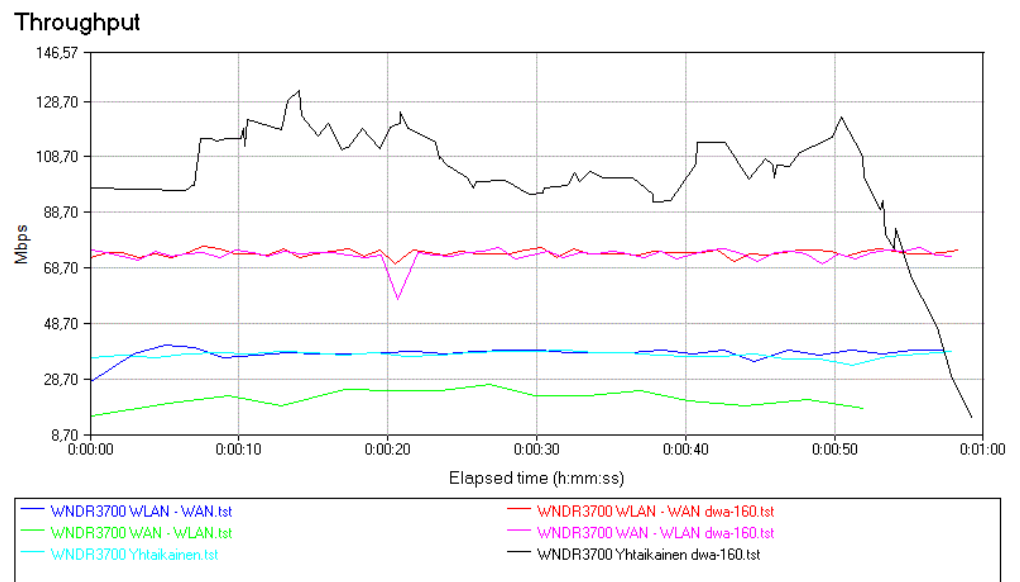
Keskisiirtonopeudet tässä testissä DWA-160:n osalta ovat 71,367 Mbps, 74,017 Mbps ja 116,703 Mbps. Sisäisellä kortilla saadut tulokset ovat 64,036 Mbps, 57,383 Mbps ja 74,984 Mbps.

Kun puuovi laitetaan kiinni, DWA-160:n tulokset huononevat entisestään. Testin tulokset ovat kuvassa 63. Keskisiirtonopeudet DWA-160:lla ovat 22,355 Mbps, 39,432 Mbps ja 40,542 Mbps. DWA-160:n yhtäkaisten testin aikana WLAN-WAN-suuntaisesta liikenteestä ei saada taaskaan tulosta. Sisäisen kortin tulokset ovat 69,368 Mbps, 64,196 Mbps ja 69,311 Mbps.



Kuva 63. WNDR3700, 2,4 GHz, 6 metriä ovi kiinni

Esteettömään testiin nähden siirtonopeuden pudotusta DWA-160:llä on WLAN-WAN-testissä noin 44 %, WAN-WLAN-testissä noin 26 % ja yhtäaikaisessa testissä noin 24 %. Sisäisen kortin testeissä siirtonopeudet ovat hyvin lähellä toisiaan. Siirtonopeuden pudotukset ovat WLAN-WAN-testissä noin 3 %, WAN-WLAN-testissä noin 8 % ja yhtäaikaisen siirron testissä 4 % esteettömän testin tuloksiin nähden.



Kuva 64. WNDR3700, 5 GHz, 6 metriä ovi kiinni

Kuten kuvasta 64 nähdään, 5 GHz:n testissä tapahtuu erikoinen käänne. DWA-160 suoriutuu testistä mallikkaasti, mutta tähän asti tasaisesti suoriu-

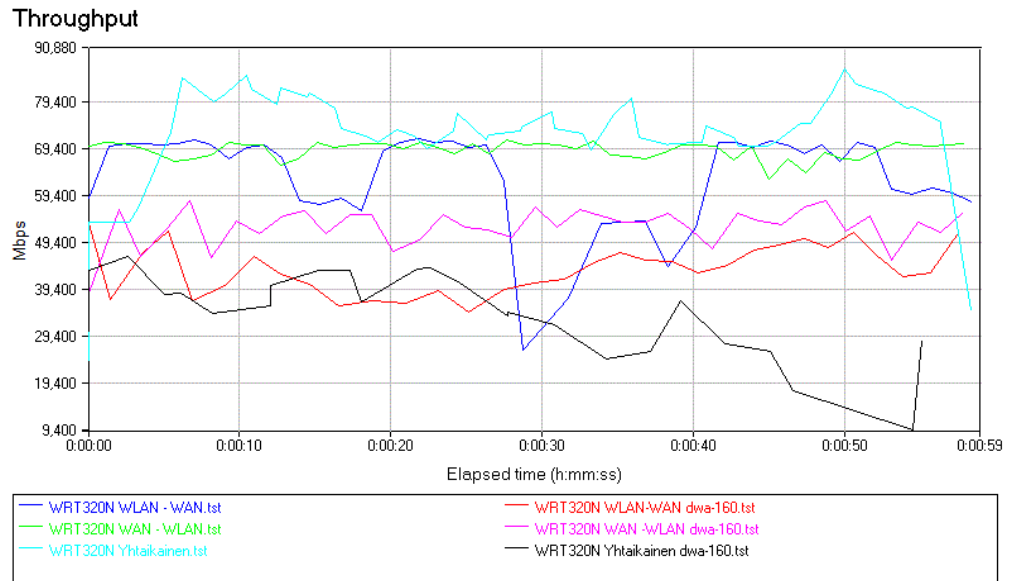
tunut sisäinen kortti saa todella huonoja tuloksia. DWA-160:n yhtaikaisen siirron testissä saadaan jälleen parannettua WNDR3700:n hetkittäistä maksimisiirtonopeutta. Maksimisiirtonopeudeksi saadaan 132,497 Mbps.

Keskisiirtonopeudet DWA-160:n osalta ovat 74,007 Mbps, 73,244 Mbps ja 101,930 Mbps. Vastaavat tulokset sisäisen kortin osalta ovat 37,702 Mbps, 21,290 Mbps ja 37,348 Mbps. DWA-160:n siirtonopeudet ovat WLAN-WAN-testissä noin 104 %, WAN-WLAN-testissä noin 99 % ja yhtaikaisessa testissä noin 87 % esteettömän testin tuloksista. Sisäisellä kortilla saadut tulokset ovat WLAN-WAN-testissä noin 59 %, WAN-WLAN-testissä noin 37 % ja yhtaikaisessa testissä noin 50 % esteettömän testin vastaavista tuloksista.

Sisäisen kortin yhtaikaisen siirron testissä WAN-WLAN-suunnan testistä ei saada tulosta lainkaan. Yhtaikaisissa testeissä on tapahtunut sama ilmiö niin usein, että kyseessä on todennäköisesti jonkinlainen toimintavirhe itse testiohjelmistossa. IxChariot-testiohjelmassa konsolikone lähettää tietyn kokoisen tiedoston toiselle koneelle, joka vastaanotettuaan sen kokonaisuudessaan, lähettää kuittausbitin konsolille. Oletettavasti osassa yhtaikaisen siirron testejä kuittausbittä ei ole vastaanotettu eikä tuloksia ole näin ollen rekisteröity lainkaan.

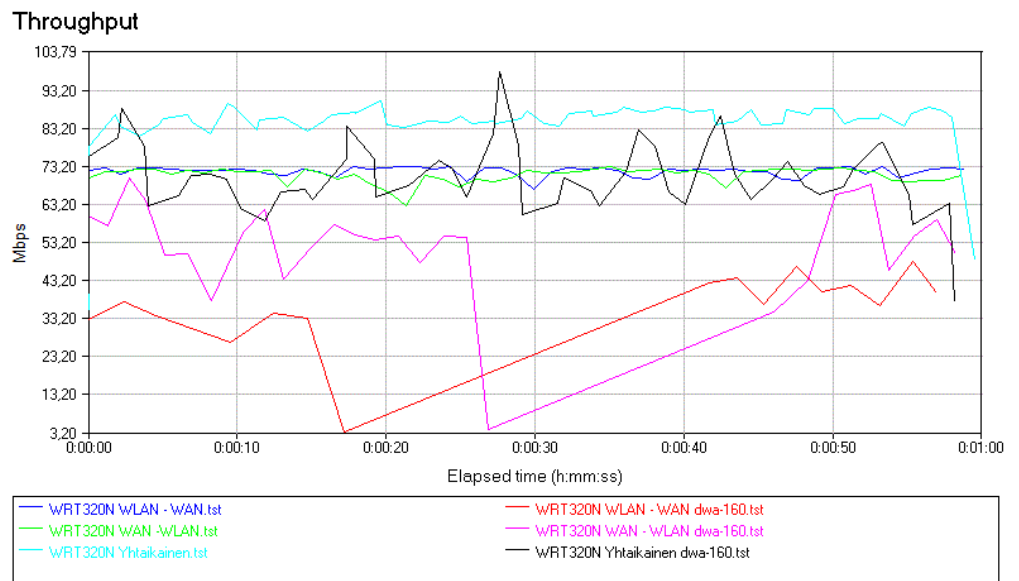
6.5.3 WRT320N

Yhden metrin etäisyydellä käytettäessä 2,4 GHz:n taajuutta sisäinen kortti suoriutuu testeistä paremmin kuin DWA-160. Keskimääräiset siirtonopeudet tällä etäisyydellä DWA-160:llä ovat 43,287 Mbps, 52,577 Mbps ja 33,152 Mbps. Vastaavat nopeudet sisäistä korttia käyttäen ovat 61,518 Mbps, 69,039 Mbps ja 73,612 Mbps. Testien kulku on nähtävillä kuvassa 65.



Kuva 65. WRT320N, 2,4 GHz, 1 metri

5 GHz:n taajuudella DWA-160 toimii paremmin yhtäaikaisen siirron testissä, mutta yksittäisten suuntien testissä tulokset ovat vaatimattomia. 5 GHz:n testin kulku on nähtävissä kuvassa 66.

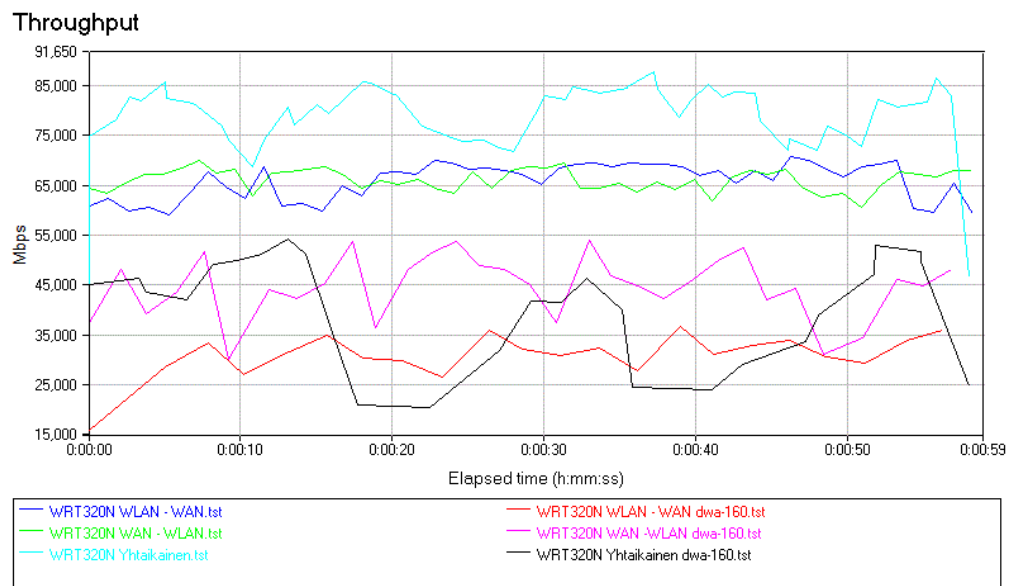


Kuva 66. WRT320N, 5 GHz, 1 metri

DWA-160:n siirtonopeudet putoavat erittäin alas, minimissään käydään jopa noin 3 Mbps:n kohdalla. Sisäinen kortti taas toimii hyvin tasaisesti. DWA-160:llä saadaan jälleen hetkittäin hyviä nopeuksia yhtäaikaisessa siirrossa. WRT320N:n kohdalla maksiminopeus on 98,451 Mbps. Keskisiirtonopeudet 5 GHz:n testissä DWA-160:ä käyttäen ovat 23,050 Mbps, 37,403 Mbps ja

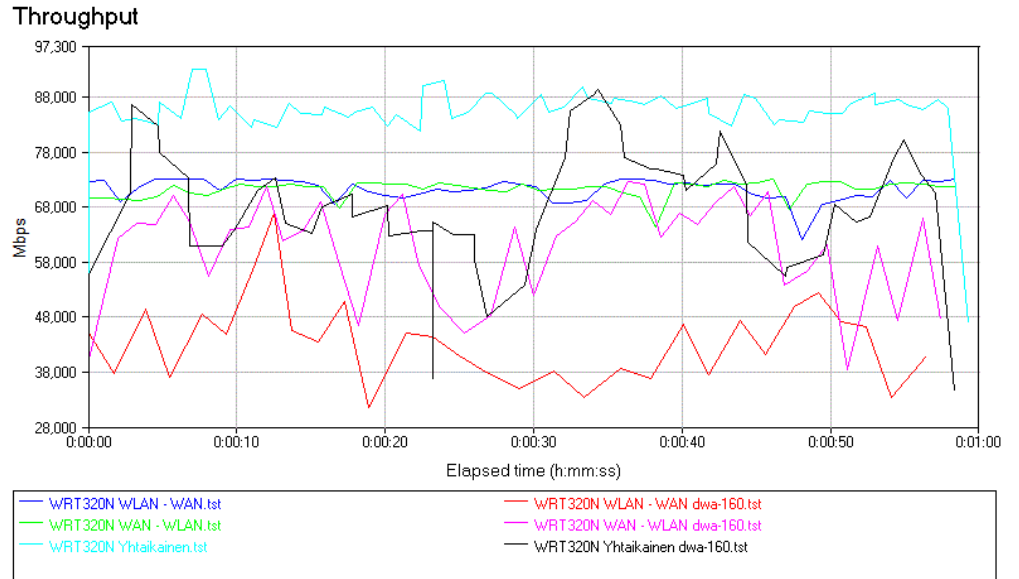
69,338 Mbps. Sisäisellä kortilla keskinopeudet ovat 72,050 Mbps, 71,024 Mbps ja 85,782 Mbps.

Kolmeen metriin siirryttäessä tulokset ovat hyvin samankaltaisia. Sisäinen kortti toimii tasaisesti hyvillä nopeuksilla DWA-160:n toimiessa huomattavasti alhaisemmilla siirtonopeuksilla. Keskiirtonopeudet 2,4 GHz:n taajuudella ovat DWA-160:llä 30,082 Mbps, 43,761 Mbps ja 37,185 Mbps. Sisäisen kortin vastaavat tulokset ovat 65,712 Mbps, 65,968 Mbps ja 79,162 Mbps. Testin kuvaajat ovat nähtävissä kuvassa 67.



Kuva 67. WRT320N, 2,4 GHz, 3 metriä

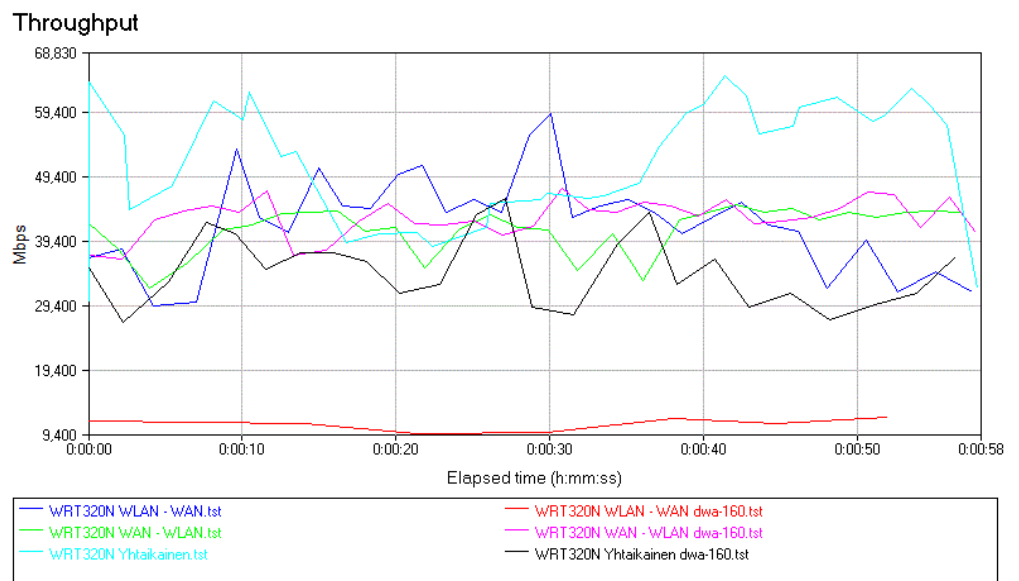
DWA-160:n heikohko suoritustaso verrattuna sisäiseen korttiin jatkuu myös 5 GHz:n puolella. Parannusta 2,4 GHz:n testiin nähden kuitenkin on. Testin kulku on nähtävissä kuvassa 68.



Kuva 68. WRT320N, 5 GHz, 3 metriä

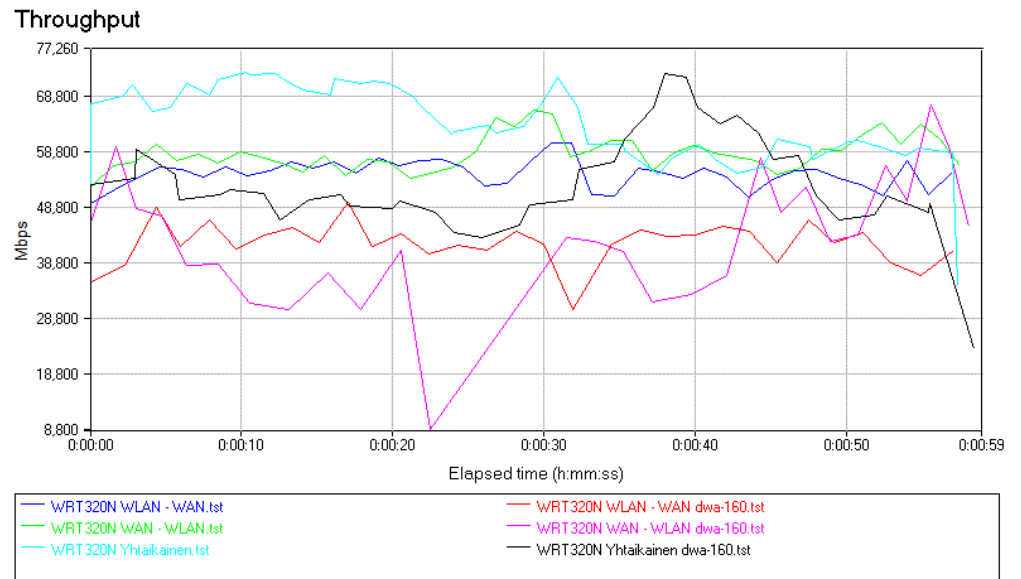
Keskisiirtonopeudet koko testin osalta DWA-160:llä ovat 42,416 Mbps, 59,567 Mbps ja 67,350 Mbps. Vastaavat tulokset sisäisellä kortilla ovat 71,207 Mbps, 71,199 Mbps ja 85,918 Mbps. Sisäisen kortin yhtäaikaisessa testissä saadaan hetkittäin korkeita tuloksia. Maksiminopeus testin aikana on 93,162 Mbps.

Kuuden metrin kohdalla erot sisäisen kortin ja DWA-160:n välillä tasoittuvat DWA-160:n WLAN-WAN-testiä lukuun ottamatta. Testin kulku on kuvassa 69.



Kuva 69. WRT320N, 2,4 GHz, 6 metriä

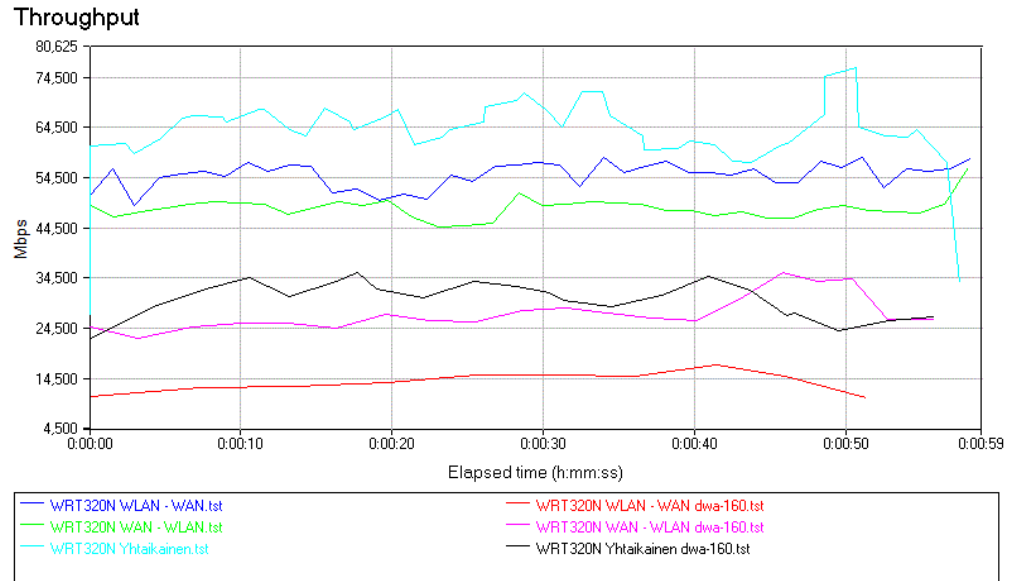
Kuten kuvasta 69 nähdään, DWA-160 suoriutuu WLAN-WAN-testistä erittäin heikosti. Keskinopeus testin aikana on vain 10,908 Mbps. WNDR3700:n kuuden metrin testissä havaittu DWA-160:n heikko suorituskyky yhtäaikaisessa siirrossa WLAN-WAN-suuntaan toistuu myös WRT320N:n testissä samalla etäisyydellä. WRT320N:llä ei saada WLAN-WAN-suuntaisesta liikenteestä tulosta lainkaan. Keskisiirtonopeudet 2,4 GHz:n taajuudella DWA-160:llä ovat 10,908 Mbps, 42,875 Mbps ja 34,151 Mbps. Sisäisen kortin osalta nopeudet ovat 41,347 Mbps, 40,986 Mbps ja 52,132 Mbps.



Kuva 70. WRT320N, 5 GHz, 6 metriä

5 GHz:n testin tulokset ovat näkyvillä kuvassa 70. 2,4 GHz:n testiin nähden DWA-160 suoriutuu testeistä paremmin. Keskisiirtonopeudet DWA-160:llä ovat 41,958 Mbps, 37,381 Mbps ja 52,928 Mbps. Vastaavat tulokset sisäistä korttia käyttäen ovat 54,725 Mbps, 58,387 Mbps ja 63,334 Mbps.

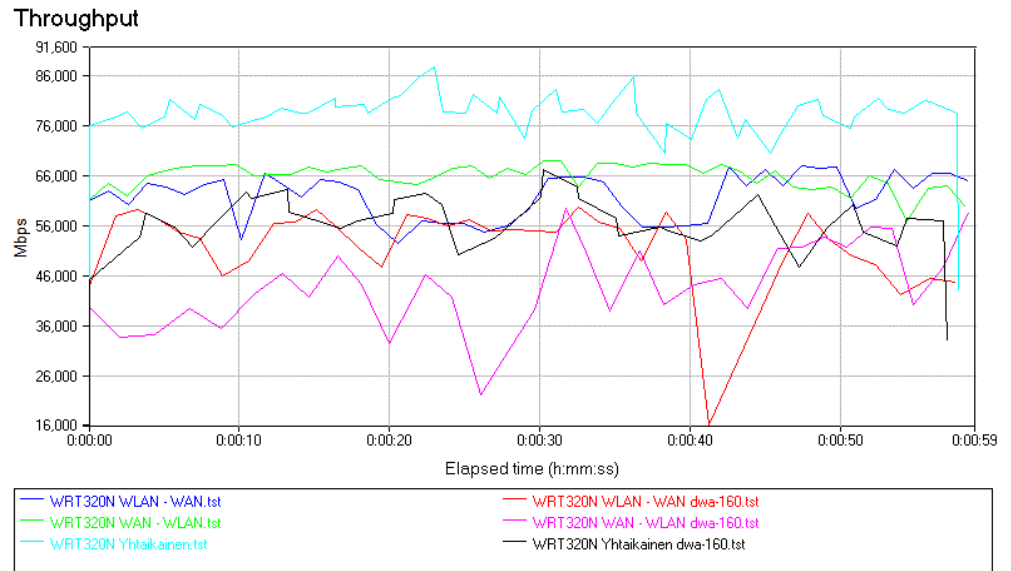
Puuovi vaikuttaa DWA-160:n toimintaan merkittävästi. 2,4 GHz:n tulokset ovat nähtävissä kuvassa 71. Kaikki DWA-160:n testissä saadut siirtonopeudet ovat hyvin vaatimattomia. Keskimääräiset siirtonopeudet DWA-160:llä tässä testissä ovat 13,582 Mbps, 27,167 Mbps ja 29,883 Mbps. Vastaavasti sisäisellä kortilla saatiin tuloksiksi 54,969 Mbps, 48,349 Mbps ja 63,643 Mbps. Sisäinen kortti siis toimii paremmin oven takana kuin ilman ovea.



Kuva 71. WRT320N, 2,4 GHz, 6 metriä ovi kiinni

DWA-160:n osalta WLAN-WAN-testissä siirtonopeus on noin 25 % parempi kuin ilman ovea, WAN-WLAN-testissä noin 35 % huonompi ja yhtaikaisessa testissä noin 12 % huonompi. Yhtaikaisessa testissä WLAN-WAN-suuntaisen liikenteen suorituskyky on jälleen erittäin heikko. Keskimääräinen siirtonopeus on vain 5,209 Mbps.

Testien kulku 5 GHz:n taajuudella on kuvassa 72.



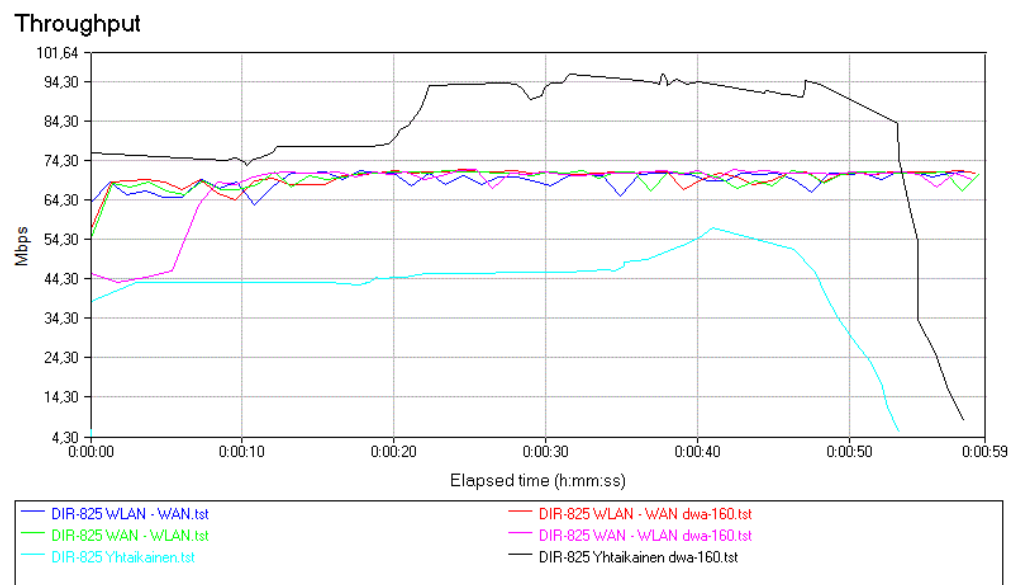
Kuva 72. WRT320N, 5 GHz, 6 metriä ovi kiinni

Kuten aikaisemminkin, 5 GHz:n testissä DWA-160 toimii paremmin kuin 2,4 GHz:n taajuudella. Keskiirtonopeudet ovat 49,762 Mbps, 42,712 Mbps ja

55,304 Mbps. Sisäisen kortin vastaavat tulokset ovat 61,603 Mbps, 65,675 Mbps ja 77,739 Mbps. Molemmat kortit saavat parempia tuloksia oven läpi kuin esteettömässä testissä.

6.5.4 DIR-825

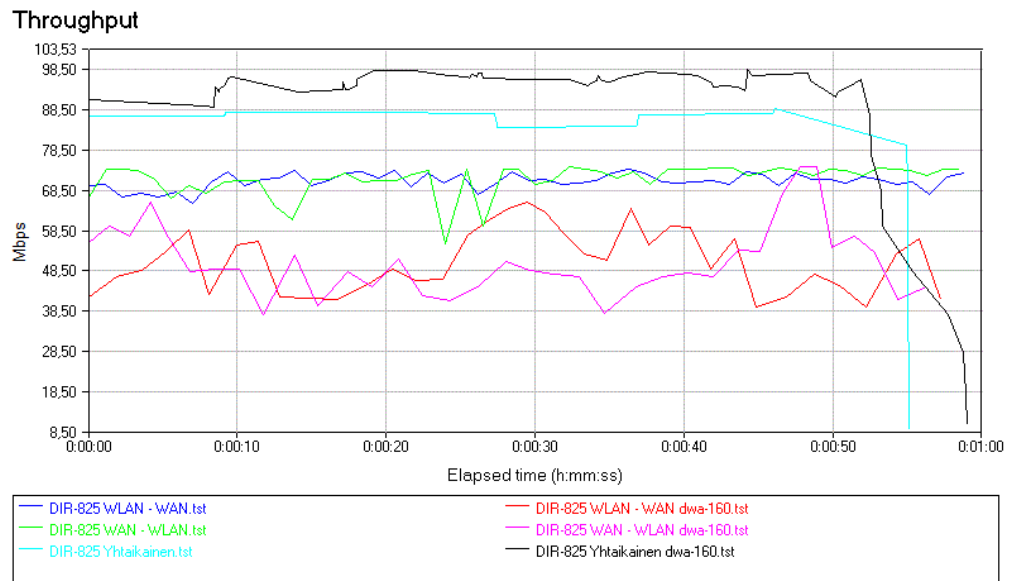
DIR-825:n testissä DWA-160 aloittaa vakuuttavasti. Ensimmäisessä testissä päästään jo hetkittäiseen maksiminopeuteen 96,399 Mbps. Sisäisen kortin yhtäaikaisen testin tulos on suhteellisen huono. Vaikka molempien suuntien liikenteestä saadaan tuloksia, keskisiirtonopeus jää alhaiseksi muihin testin tuloksiin nähden, vain 43,601 Mbps. Testin tulokset ovat kuvassa 73.



Kuva 73. DIR-825, 2,4 GHz, 1 metri

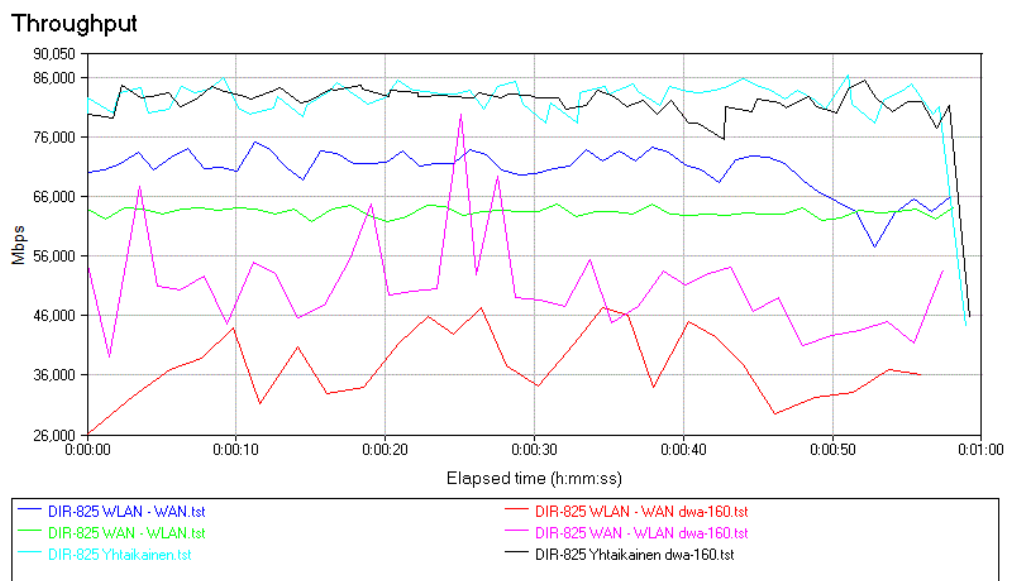
Keskimääräiset siirtonopeudet tässä testissä DWA-160:n osalta ovat 69,873 Mbps, 67,532 Mbps ja 83,229 Mbps. Sisäisen kortin vastaavat tulokset ovat 69,324 Mbps, 69,626 Mbps ja 43,601 Mbps.

5 GHz:n taajuudella sisäisen kortin suorituskyky paranee. Myös DWA-160 saa edellistä testiä paremman maksimisiirtonopeuden 98,498 Mbps. Testin keskisiirtonopeudet DWA-160:lle ovat 50,036 Mbps, 49,589 Mbps ja 89,826 Mbps. Sisäisen kortin tulokset ovat 70,766 Mbps, 71,141 Mbps ja 87,102 Mbps. Testin kulku on kuvassa 74.



Kuva 74. DIR-825, 5 GHz, 1 metri

Vaikka DWA-160:n yhtaikaisen siirron nopeus onkin hyvä, yksittäisen suunnan siirrot ovat 2,4 GHz:n testiä huonommat. Sisäisellä kortilla yksittäisten suuntien keskinopeudet pysyttelevät lähellä edellistä testiä. Yhtaikaisessa siirrosta parannus on huomattava, jopa noin 50 %.

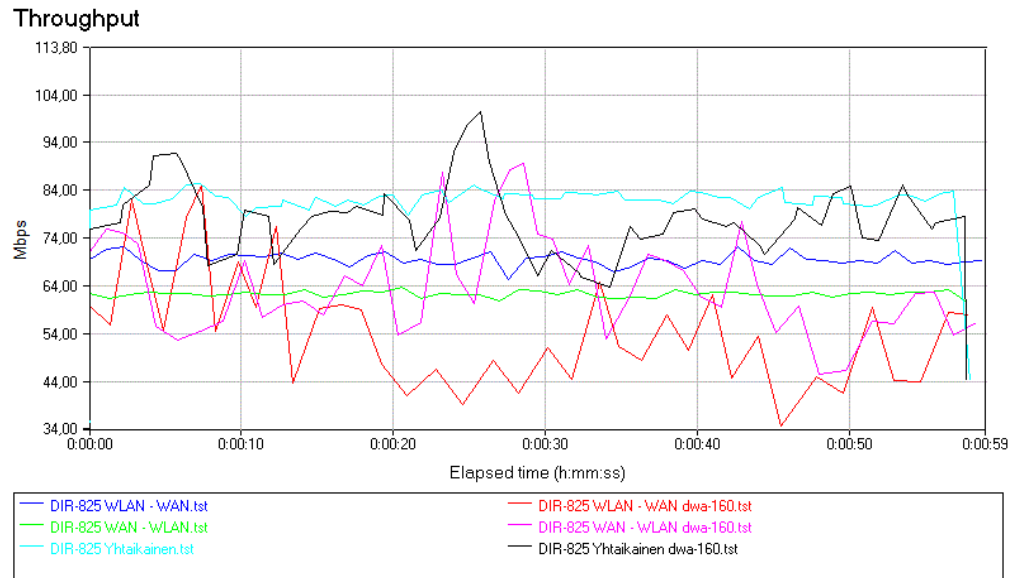


Kuva 75. DIR-825, 2,4 GHz, 3 metriä

Kuvassa 75 nähdään 2,4 GHz:n testi kolmen metrin etäisyydellä. Sisäinen kortti toimii koko testin ajan hyvällä tasolla. DWA-160:n yksittäisten suuntien tulokset ovat heikkoja. Molemmat kortit kuitenkin suoriutuvat yhtaikaisesta siirrosta hyvällä tuloksella. DWA-160:n keskiirtonopeudet tässä testissä

ovat 37,148 Mbps, 50,282 Mbps ja 81,863 Mbps. Sisäisellä kortilla tulokset ovat 70,314 Mbps, 63,299 Mbps ja 82,706 Mbps.

5 GHz:n taajuudelle siirryttäessä DWA-160:llä saadaan jälleen hyvä tulos maksimisiirtonopeudessa. Tällä kertaa korkein saavutettu nopeus on 100,423 Mbps. Muutenkin kortti parantaa suorituskykyään yhden metrin testiin nähden. Testin tulokset ovat kuvassa 76.

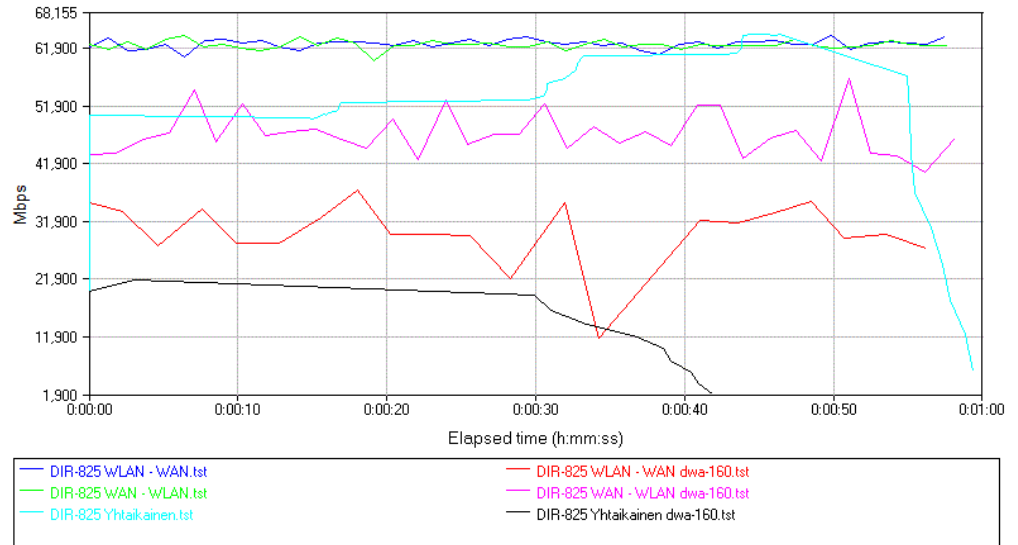


Kuva 76. DIR-825, 5 GHz, 3 metriä

5 GHz:n testissä saadut keskiirtonopeudet DWA-160:llä ovat 52,618 Mbps, 62,868 Mbps ja 76,730 Mbps. Vastaavat tulokset sisäistä korttia käytettäessä ovat 69,418 Mbps, 62,230 Mbps ja 81,780 Mbps.

Kuuden metrin testi 2,4 GHz:n taajuudella on nähtävillä kuvassa 77. DWA-160:n tulokset ovat erittäin vaatimattomia. Varsinkin yhtaikaisen siirron osalta siirtonopeus on todella huono. Yhtaikaisen testin aikana WLAN-WAN-suuntaisesta liikenteestä ei saada tulosta lainkaan ja WAN-WLAN-siirrostakin tiedonsiirto loppuu täysin noin 40 sekunnin jälkeen.

Throughput

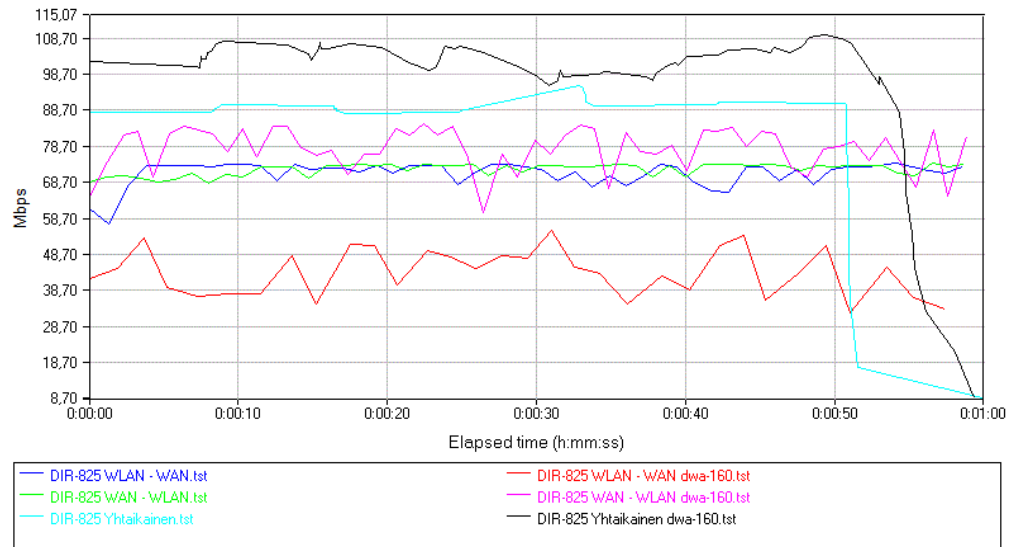


Kuva 77. DIR-825, 2,4 GHz, 6 metriä

2,4 GHz:n testissä keskiirtonopeudet DWA-160:n osalta ovat 28,413 Mbps, 46,768 Mbps ja 18,306 Mbps. Sisäisen kortin tulokset ovat 62,611 Mbps, 62,413 Mbps ja 53,924 Mbps.

5 GHz:n taajuudella suoritustasot kasvavat molemmilla korteilla huomattavasti. Testin kulku on kuvassa 78.

Throughput

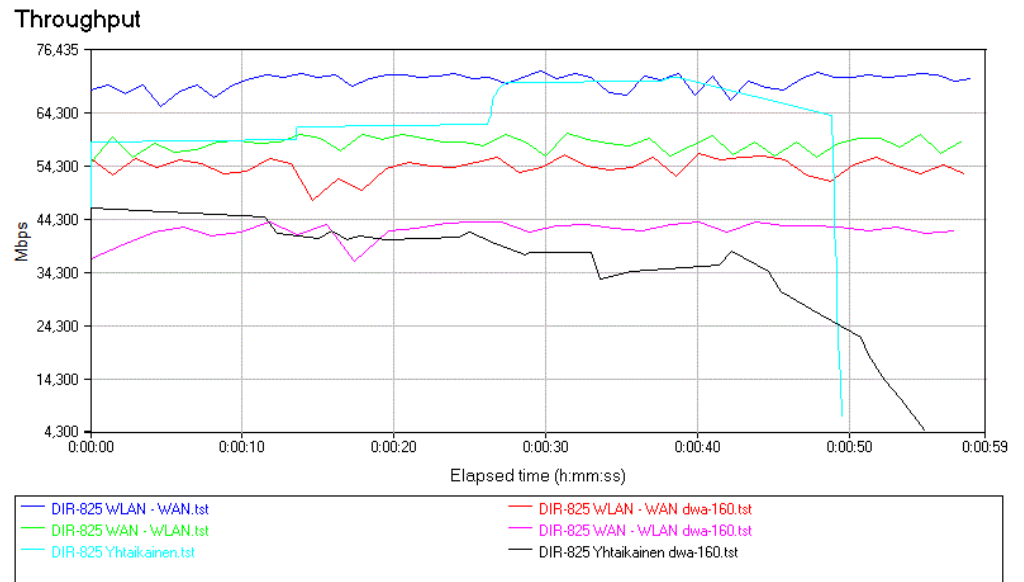


Kuva 78. DIR-825, 5 GHz, 6 metriä

Kuten kuvasta 78 nähdään, hetkittäiset maksiminopeudet molemmilla korteilla ovat korkeita. DWA-160 saa maksimitulokseksi tässä testissä 109,586 Mbps. Sisäisen kortin maksimitulos on 95,533 Mbps. Olettaen, että sisäisen

kortin ajurit eivät edelleenkään toimi 40 MHz:n kanavavevyydellä, tulos on huimat 66 % teoreettisesta maksimista 144 Mbps.

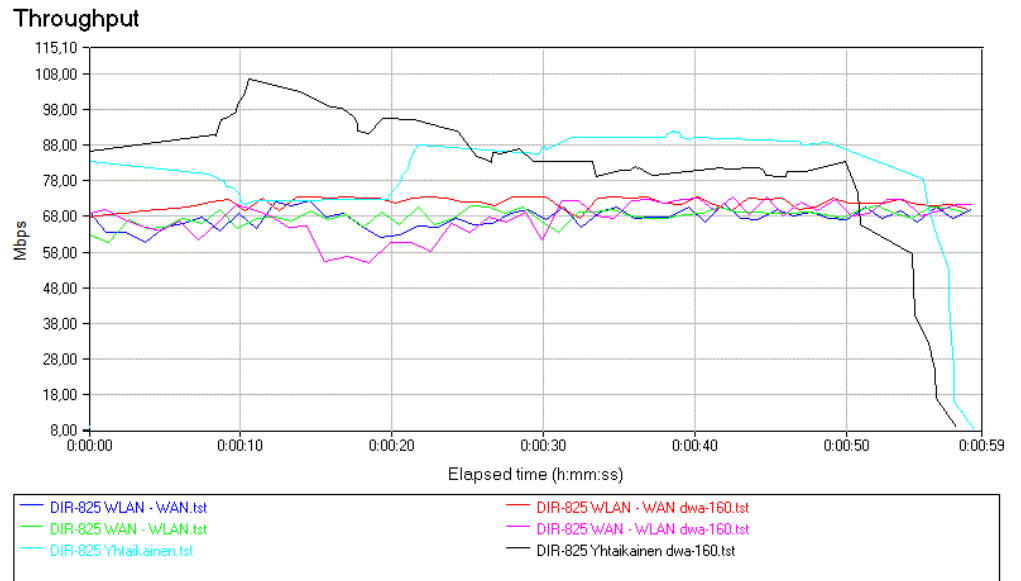
Keskisiirtonopeudet 5 GHz:n taajuudella DWA-160:n osalta ovat 42,786 Mbps, 77,557 Mbps ja 97,728 Mbps. Vastaavat tulokset sisäisellä kortilla ovat 71,074 Mbps, 72,254 Mbps ja 78,693 Mbps.



Kuva 79. DIR-825, 2,4 GHz, 6 metriä ovi kiinni

Kuvassa 79 nähdään 2,4 GHz:n testin tulokset, kun puuovi laitetaan kiinni. Puuovi esteenä vaikuttaa 2,4 GHz:n taajuudella suhteellisen vähän siirtonopeuksiin. Testissä saadut keskisiirtonopeudet DWA-160:llä ovat 54,090 Mbps, 42,146 Mbps ja 34,839 Mbps. Sisäisellä kortilla saatiin tuloksiksi 70,281 Mbps, 58,470 Mbps ja 64,101 Mbps.

Esteettömään testiin verraten molemmat kortit paransivat tuloksiaan WLAN-WAN- ja yhtaikaisessa testissä. DWA-160:llä molemmissa testeissä parannusta oli noin 90 %. Sisäisellä kortilla WLAN-WAN-testin tulos parani noin 12 % ja yhtaikaisen noin 19 %. DWA-160:llä WAN-WLAN-testin tulos oli noin 10 % alhaisempi kuin esteettömässä testissä. Sisäisellä kortilla nopeuden pudotusta oli noin 6 %.



Kuva 80. DIR-825, 5 GHz, 6 metriä ovi kiinni

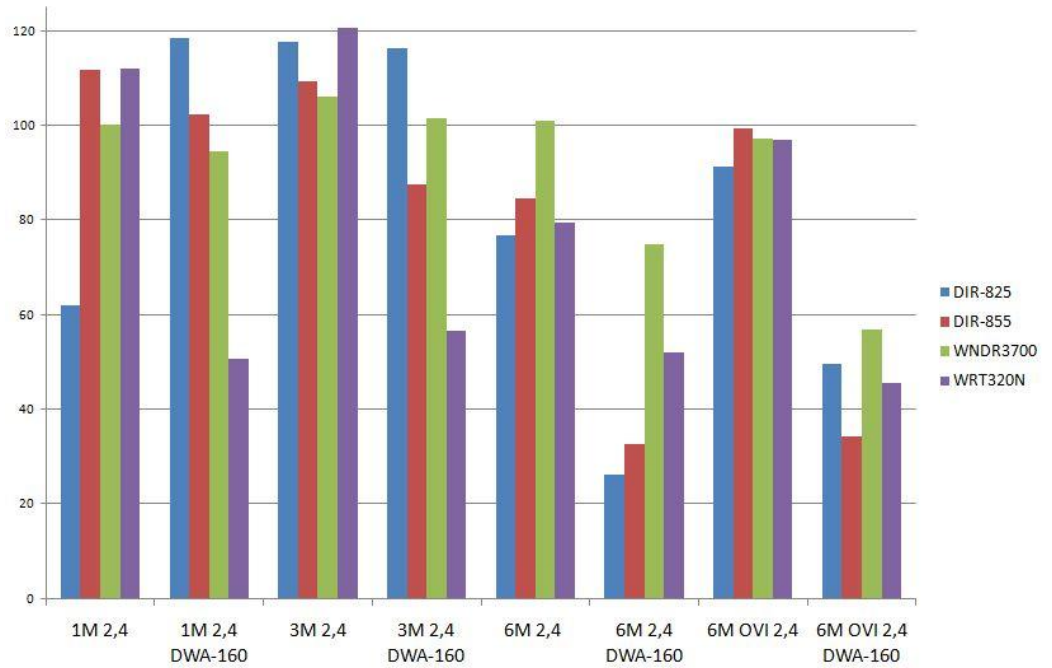
Kuten kuvasta 80 voidaan nähdä, 5 GHz:n taajuudella korttien siirtonopeudet tasoittuvat. Tulokset molemmilla korteilla ovat hyvin tasaisia. DWA-160:n yhtäaikaisessa siirrossa saadaan erittäin hyvä maksimitulos. Tällä kertaa nopeus on hetkellisesti 106,246 Mbps. Myös sisäinen kortti suoriutuu testeistä hyvin.

Keskisiirtonopeudet DWA-160:llä tässä testissä ovat 71,643 Mbps, 67,234 Mbps ja 81,258 Mbps. Sisäisen kortin vastaavat tulokset ovat 67,341 Mbps, 67,825 Mbps ja 81,779 Mbps.

Molemmilla korteilla tulokset ovat hyvin samankaltaisia esteettömään testiin nähden. DWA-160:llä WLAN-WAN-testissä tulos on noin 67 % parempi, WAN-WLAN-testissä noin 13 % huonompi ja yhtäaikaisessa noin 17 % huonompi kuin esteettömässä testissä. Sisäisellä kortilla WLAN-WAN-testissä tulos on noin 5 % huonompi, WAN-WLAN-testissä noin 6 % huonompi ja yhtäaikaisessa testissä noin 4 % parempi kuin esteettömässä testissä.

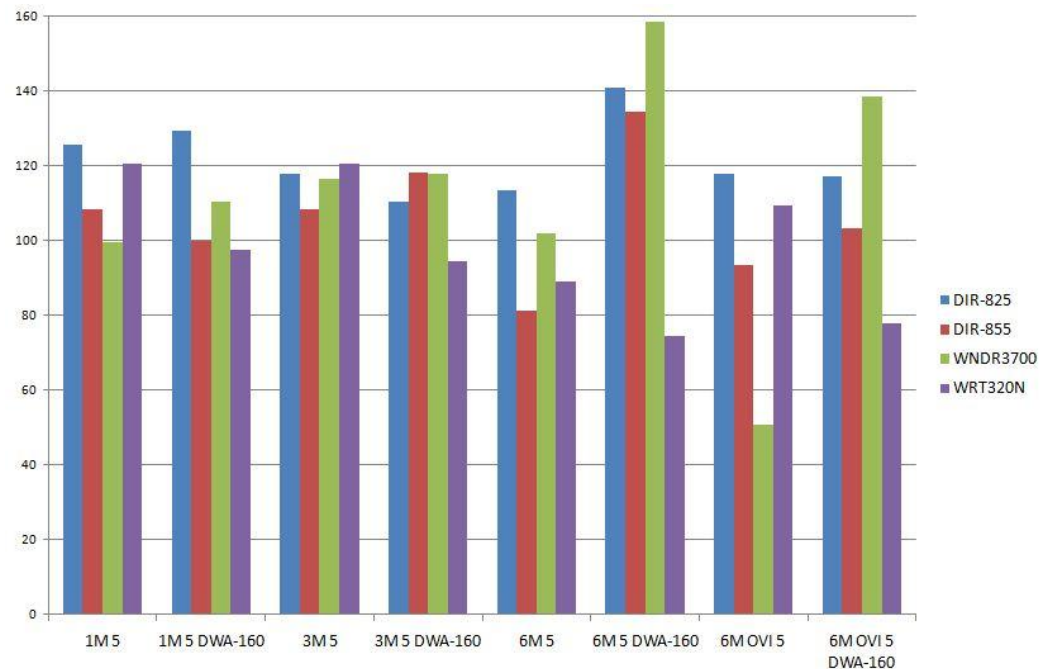
6.5.5 Yhteenveto etäisyysmittauksista

Kuvassa 81 nähdään kunkin reitittimen taulukon 6 mukaisiin referenssiarvoihin suhteutettu vertailukaavio 2,4 GHz:n taajuudella. Verrattavat arvot ovat yhtäaikaisten mittausten tuloksia.



Kuva 81. Etäisyysmittausten suhteutettu vertailukaavio 2,4 GHz:n taajuudella

Kuvassa 82 on suhteutettu vertailukaavio 5 GHz:n testeistä. Kaaviossa verrataan yhtäaikaisen siirron mittauksissa saatuja tuloksia taulukon 7 referenssiarvoihin.



Kuva 82. Etäisyysmittausten suhteutettu vertailukaavio 5 GHz:n taajuudella

Etäisyysmittauksista saaduissa tuloksissa DWA-160:n heikko suorituskyky 2,4 GHz:n taajuudella yllätti. Kortin tulokset ajoittain tällä taajuudella olivat

erittäin heikkoja. Varsinkin kuuden metrin etäisyydellä kortilla tuntui olevan erittäin paljon ongelmia tiedonsiirrossa.

5 GHz:n taajuudella molemmat kortit toimivat paremmin ja ajoittain saatiin erittäin hyviä tuloksia hetkellisissä maksiminopeuksissa. Testien aikana saadut maksimitulokset olivat DIR-855:llä 114,082 Mbps, WNDR3700:lla 132,497 Mbps, WRT320N:llä 98,451 Mbps ja DIR-825:llä 109,586 Mbps. Onneksi testiin saatiin mukaan myös DWA-160, että saatiin jonkinlainen käsitys standardin maksiminopeuksista myös 40 MHz:n kanavaleveydeltä.

Esteen vaikutukset siirtonopeuksiin olivat yllättävän pieniä. Monessa testissä siirtonopeudet jopa paranivat oven ollessa kiinni. Näiden testien perusteella suositeltava etäisyys 2,4 GHz:n taajuudella on kolme metriä ja 5 GHz:n taajuudella 6 metriä.

7 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä oli tarkoitus vertailla erilaisia kuluttajille suunnattuja 802.11n-standardin mukaisia reitittämiä ja tutkia samalla itse standardin siirtonopeuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksen kohteena oli myös päällekkäisten 802.11n- ja 802.11g-verkkojen vaikutus toisiinsa eri reitittämiä käyttäen.

Häiriömittauksissa 802.11n-verkon vaikutus 802.11g-verkkoon oli yllättävän raju. DIR-855:n ja WRT320N:n testeissä tiedonsiirto 802.11g-verkossa loppui käytännössä kokonaan, kun molemmat verkot olivat samalla kanavalla. Vaikka kanavan 13 taajuusalueen pitäisi olla riittävän kaukana kanavan 1 taajuuksista päällekkäisyyden välttämiseksi, testit osoittivat tilanteen olevan toisin. 802.11n-verkon vaikutukset olivat erittäin selkeästi nähtävissä.

Häiriömittaukset osoittivat, että 2,4 GHz:n taajuudella toimivien 802.11n-verkkojen yleistyessä vanhojen 802.11g-laitteiden toiminta tulee häiriintymään niin, että vanhojen laitteiden omistajat todennäköisesti joutuvat vaihtamaan laitteensa uusiin. 802.11n-verkon vaikutukset toiseen 802.11n-verkkoon jäivät valitettavasti testaamatta.

Reitittimien siirtonopeuksissa oli suuria eroja. Lopullinen vertailu reitittimien välillä tehtiin ottamalla kaikki etäisyystestissä saadut tulokset vertailuun. (Liite 1). Kunkin testin parhaasta tuloksesta reititin sai 4 pistettä, toisesta sijasta 3, kolmannesta 2 ja viimeisestä 1 pisteen. Liitteen 1 taulukkoon on merkitty ensimmäinen sija punaisella, toinen sija vihreällä, kolmas sinisellä ja viimeinen sija mustalla värillä. Parhaan tuloksen sai WNDR3700 pistemäärällä 152, toisena oli DIR-825 tuloksella 143, kolmas oli DIR-855 pisteillä 110 ja viimeiseksi tuli WRT320N pistemäärällä 85.

Hinta-laatu-suhteen selvittämiseksi reitittimen saamat pisteet jaettiin reitittimen hinnalla [16]. Näin saadut tunnusluvut ovat:

- DIR-825: 1,21
- WNDR3700: 1,15
- WRT320N: 0,96
- DIR-855: 0,66.

Hintaansa nähden WNDR3700 (131,90 €) ja DIR-825 (117,90 €) suoriutuivat testeistä erittäin hyvin. Testin kallein laite, DIR-855 (165,90 €), saa huonoimman tunnusluvun näiden testien perusteella. Testin halvin laite WRT320N (88,90 €) sai odotetusti huonoimmat pisteet, mutta paremman hinta-laatusuhteen kuin DIR-855. Suositeltavat reitittimet tämän insinöörityön perusteella ovat DIR-825 ja WNDR3700.

Testeissä saatiin myös erittäin hyviä maksiminopeustuloksia. WNDR3700:lla testien parhaaksi tulokseksi saatiin 132,497 Mbps, joka on huomattavasti parempi nopeus kuin 10/100 Ethernetillä on mahdollista saavuttaa. Saatu tulos on noin 44 % teoreettisesta maksimista, 300 Mbps. Testeissä kuitenkin havaittiin paljon heittelyä siirtonopeuksissa ja nopeudet olivat suurimman osan ajasta huomattavasti hitaampia. 802.11n-laitteita voi kuitenkin varauksella suositella suurienkin tiedostojen siirtoon. Suositeltavaa on hankkia tässä työssä käytettyjen laitteiden kaltaisia reitittimiä, jotka pystyvät hyödyntämään myös ruuhkattomamman ja testien mukaan nopeamman 5 GHz:n taajuuden.

Macbook Pron sisäisen verkkokortin ja D-Linkin DWA-160:n välinen vertailu jäi valitettavasti hieman vajavaiseksi sisäisen kortin ajuriongelmiensa vuoksi. DWA-160 toi kuitenkin tietoja myös 40 MHz:n kanavien vaikutuksista siirtonopeuksiin.

802.11n-standardi on erittäin onnistunut pyrkimyksissään nostaa langattomien lähiverkkojen siirtonopeutta, luotettavuutta ja käyttöetäisyyttä. Verrattaessa tässä työssä saatuja 802.11g-verkon maksiminopeuksia ja 802.11n-verkossa saatuja maksiminopeuksia, selviää että 802.11n-verkon siirtonopeus on kasvanut noin kuusinkertaiseksi.

Testien tulokset antavat uskoa siihen, että standardilla on vahvat mahdollisuudet tulevaisuudessa korvata 10/100 Ethernet kotikäytössä. Vahvempi kuuluvuus ja verkon hyvät nopeudet antavat standardille kaikki edellytykset menestyä.

VIITELUETTELO

- [1] Computer Language Company, Inc. *ISM band - Computer Dictionary Definition* [WWW-dokumentti] 1981-2010 [viitattu 12.4.2010] Saatavissa: <http://www.yourdictionary.com/computer/ism-band>.
- [2] Geier, Jim, Cisco Press, *Langattomat verkot*. Helsinki: IT Press, Edita. 2005.
- [3] Wikipedia *IEEE 802.11* [WWW-dokumentti] [Viitattu 12.4.2010] Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11.
- [4] Gast, Matthew, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. Copyright © O'Reilly & Associates, Inc. 2002.
- [5] Perahia, Eldad - Stacey, Robert, *Next Generation Wireless LANs - Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n*. New York: Cambridge University Press. 2008.
- [6] Cisco Systems, Inc. *Fundamentals of Wireless LANs Companion Guide*. Indianapolis: Cisco Press. 2004.
- [7] Meru Networks, Inc. *The State of 802.11n* [PDF-dokumentti] 2009 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: http://www.merunetworks.com/pdf/whitepapers/stateof11n_0909.pdf.
- [8] Meru Networks, Inc. *Wireless Without Compromise: Delivering the promise of IEEE 802.11n* [PDF-dokumentti] [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: http://www.merunetworks.com/pdf/whitepapers/WP_80211nAppDelivery_v1.pdf.
- [9] WiFi Jedi.com *How Stuff Works - 802.11n and Spatial Multiplexing* [WWW-dokumentti] 1.2.2009 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://wifijedi.com/2009/02/01/how-stuff-works-spatial-multiplexing/>.
- [10] Airmagnet, Inc. *802.11n Primer* [PDF-dokumentti] 05.08.2008 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://www.airmagnet.com/products/whitepaper/download.php?dwn=WP-802.11nPrimer.pdf>.
- [11] Wilson, James, M. *Quadrupling Wi-Fi speeds with 802.11n* [WWW-dokumentti] 9.8.2004 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://www.deviceforge.com/articles/AT5096801417.html?%20regen=yes&display=yes>.
- [12] Cisco Systems, Inc. *802.11n: The Next Generation of Wireless Performance* [PDF-dokumentti] 2009 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6973/ps8382/prod_white_paper0900aecd806b8ce7_ns767_Networking_Solutions_White_Paper.html.

- [13] SmallNetBuilder, *How We Test Hardware Routers* [WWW-dokumentti] 29.12.2008 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://www.smallnetbuilder.com/lanwan/lanwan-howto/26563-how-we-test-hardware-routers->.
- [14] Tom's Hardware Guide, *How We Test Hardware Routers 2006* [WWW-dokumentti] 23.5.2006 [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://www.tomsguide.com/us/how-we-test-hardware-routers-2006,review-717.html>.
- [15] DIR-825: Langaton N Quadband -reititin [WWW-dokumentti] Saatavissa: http://dlink.fi/cs/Satellite?c=Product_C&childpagename=DLinkEurope-FI%2FDLProductCarousel&cid=1197378061160&p=1197318961124&packedargs=ParentPageID%3D1197318961103%26TopLevelPageProduct%3DConsu-mer%26locale%3D1195806935789%26packedargs%3DProductParentID%253D1197318789239&pagename=DLinkEurope-FI%2FDLWrapper.
- [16] Verkkokauppa.com [Hinnat tarkistettu 14.5.2010] Saatavissa: <http://www.verkkokauppa.com>.
- [17] DIR-855: Wireless N Quadband Gigabit -reititin [WWW-dokumentti] Saatavissa: http://dlink.fi/cs/Satellite?c=Product_C&childpagename=DLinkEurope-FI%2FDLProductCarousel&cid=1197319393558&p=1197318961124&packedargs=ParentPageID%3D1197318961103%26TopLevelPageProduct%3DConsu-mer%26locale%3D1195806935789%26packedargs%3DProductParentID%253D1197318789239&pagename=DLinkEurope-FI%2FDLWrapper.
- [18] WNDR3700 - RangeMax Dual Band Wireless-N Gigabit Router [WWW-dokumentti] Saatavissa: <http://www.netgear.com/Products/RoutersandGateways/WirelessNRoutersandGateways/WNDR3700.aspx>.
- [19] Linksys by Cisco Dual-Band Wireless-N Gigabit Router WRT320N [WWW-dokumentti] Saatavissa: <http://www.linksysbycisco.com/EU/en/products/WRT320N>.

REITITTIEN VERTAILUTAULUKKO

TESTI	DIR-825	DIR-855	WNDR3700	WRT320N
1M 2,4 WAN-WLAN	69,324	70,645	69,626	61,518
1M 2,4 WLAN-WAN	69,626	67,66	68,904	69,039
1M 2,4 YHTAIKAINEN	43,601	79,244	71,413	73,612
1M 2,4 WAN-WLAN DWA-160	69,873	60,171	58,101	43,287
1M 2,4 WLAN-WAN DWA-160	67,532	58,221	66,955	52,577
1M 2,4 YHTAIKAINEN DWA-160	83,229	72,686	67,532	33,152
1M 5 WAN-WLAN	70,766	67,676	72,86	72,05
1M 5 WLAN-WAN	71,141	60,405	58,797	71,024
1M 5 YHTAIKAINEN	87,102	71,155	73,244	85,782
1M 5 WAN-WLAN DWA-160	50,036	44,971	71,367	23,05
1M 5 WLAN-WAN DWA-160	49,589	53,051	68,311	37,403
1M 5 YHTAIKAINEN DWA-160	89,826	65,764	81,327	69,338
3M 2,4 WAN-WLAN	70,314	71,065	72,166	65,712
3M 2,4 WLAN-WAN	63,299	67,27	74,619	65,968
3M 2,4 YHTAIKAINEN	82,706	77,562	75,742	79,162
3M 2,4 WAN-WLAN DWA-160	37,148	38,679	65,646	30,082
3M 2,4 WLAN-WAN DWA-160	50,282	55,779	69,368	43,761
3M 2,4 YHTAIKAINEN DWA-160	81,863	62,155	72,575	37,185
3M 5 WAN-WLAN	69,418	65,743	73,655	71,207
3M 5 WLAN-WAN	62,23	59,39	72,752	71,199
3M 5 YHTAIKAINEN	81,78	71,222	85,71	85,918
3M 5 WAN-WLAN DWA-160	52,618	58,355	79,464	42,416
3M 5 WLAN-WAN DWA-160	62,868	61,706	21,86	59,567
3M 5 YHTAIKAINEN DWA-160	76,73	77,764	86,728	67,35
6M 2,4 WAN-WLAN	62,611	67,82	71,712	41,347
6M 2,4 WLAN-WAN	62,413	47,487	69,45	40,986
6M 2,4 YHTAIKAINEN	53,924	60,084	72,111	52,132
6M 2,4 WAN-WLAN DWA-160	28,413	47,049	39,594	10,908
6M 2,4 WLAN-WAN DWA-160	46,768	17,402	53,247	42,875
6M 2,4 YHTAIKAINEN DWA-160	18,306	23,058	53,453	34,151
6M 5 WAN-WLAN	71,074	62,64	64,036	54,725
6M 5 WLAN-WAN	72,254	41,48	57,383	58,387
6M 5 YHTAIKAINEN	78,693	53,41	74,984	63,334
6M 5 WAN-WLAN DWA-160	42,786	59,075	71,367	41,958
6M 5 WLAN-WAN DWA-160	77,557	64,147	74,017	37,381
6M 5 YHTAIKAINEN DWA-160	97,728	88,416	116,703	52,928
6M OVI 2,4 WAN-WLAN	70,281	68,274	69,368	54,969
6M OVI 2,4 WLAN-WAN	58,47	60,705	64,196	48,349
6M OVI 2,4 YHTAIKAINEN	64,101	70,537	69,311	63,643

6M OVI 2,4 WAN-WLAN DWA-160	54,09	30,267	22,355	13,582
6M OVI 2,4 WLAN-WAN DWA-160	42,146	15,387	39,432	27,167
6M OVI 2,4 YHTAIKAINEN DWA-160	34,839	24,313	40,542	29,883
6M OVI 5 WAN-WLAN	67,341	65,541	37,702	61,603
6M OVI 5 WLAN-WAN	67,825	50,676	21,29	65,675
6M OVI 5 YHTAIKAINEN	81,779	61,428	37,348	77,739
6M OVI 5 WAN-WLAN DWA-160	71,643	41,544	74,007	49,762
6M OVI 5 WLAN-WAN DWA-160	67,234	56,801	73,244	42,712
6M OVI 5 YHTAIKAINEN DWA-160	81,258	67,924	101,93	55,304
MAKSIMISIIRTONOPEUS	109,586	114,082	132,497	98,451

20	4	24	1	4
8	17	12	12	3
18	15	7	9	2
3	13	6	27	1

49	49	49	49	Tuloksia Yht.
----	----	----	----	---------------

143	110	152	85	Pisteitä Yht.
-----	-----	-----	----	---------------