



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JAAKKO MARIN

60 GHZ:N TAAJUUSALUEEN SOVELTUVUUS VR- JA AR-LASIEN
LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON TARPEISIIN

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Markus Allén

TIIVISTELMÄ

JAAKKO MARIN: 60 GHz:n taajuusalueen soveltuvuus VR- ja AR-lasien langattoman tiedonsiirron tarpeisiin
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 22 sivua, 3 liitesivua
Toukokuu 2018
Tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Tietoliikennetekniikka
Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Markus Allén

Avainsanat: Langaton tiedonsiirto, tietoliikenne, IEEE 802.11ad, virtuaalitodellisuus, lisätty todellisuus

VR- ja AR-lasit ovat viime vuosina kasvattaneet suosiotaan. Laittevalmistajat yrittävät kovasti luoda niille kysyntää, mutta todennäköisesti laitteiden korkean hintatason, heikon kuvanlaadun ja vaikeakäyttöisyyden johdosta teknologiat eivät ole vielä saavuttaneet suurta yleisöä.

Yksi vaikeakäyttöisyyteen vaikuttava tekijä on VR-lasien kypäränäytön sekä prosessointiyksikön välissä olevat johdot. Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta korvata nämä johdot langattomalla linkillä. 60 GHz:n taajuusalueella toimivaa WiGig-teknologiaa tarkastellaan mahdollisena johtojen korvaajana.

Tässä tutkimuksessa kerättiin tietoa Wi-Fi- ja WiGig-järjestelmistä IEEE:n julkaisemista standardeista, sekä arvioitiin olemassa olevien ja tällä hetkellä suunnitteilla olevien VR- ja AR-lasien tarpeita tietoliikenteen näkökulmasta. Tämän lisäksi suoritettiin mittauksia kaupallisesti saatavissa olevilla laitteilla. Mittauksissa käytetyt laitteet olivat TPCAST, joka on suunniteltu korvaamaan johdot VR-lasien kypäränäytön ja prosessointiyksikön välillä, sekä Wireless Wire -silta, joka on tarkoitettu point-to-point-yhteyden muodostamiseen ulkokäytössä.

Tutkimuksen perusteella WiGig toimii tarpeeksi vakaasti lyhyellä kantomatalla. Sen tiedonsiirtonopeus ei kuitenkaan välttämättä riitä siirtämään pakkaamatonta videokuvaa VR-lasien kypäränäytön ja prosessointiyksikön välillä.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LANGATON TIEDONSIIRTO LYHYELLÄ KANTOMATKALLA	2
2.1	Tiedonsiirrosta yleisesti	2
2.1.1	Siirtonopeus	3
2.1.2	Viive	4
2.1.3	Toimintavarmuus	4
2.2	Wi-Fi	6
2.3	WiGig	7
3.	VIRTUAALISEN TODELLISUUDEN TEKNISET VAATIMUKSET	10
3.1	VR-lasien tarpeet tietoliikenteen näkökulmasta	10
3.2	AR-lasien tarpeet tietoliikenteen näkökulmasta	12
4.	KÄYTÄNNÖN MITTAUKSIA KAUPALLISILLA LAITTEILLA	13
4.1	TPCAST	13
4.2	Wireless Wire	15
5.	YHTEENVETO	18
	LÄHTEET	21
	LIITE 1: WIRELESS WIRE BANDWIDTH TESTER -MITTAUSTULOKSET	23
	LIITE 2: SADAN PING-PAKETIN MITTAUSTULOKSET WIRELESS WIRELLÄ SUORALLA NÄKÖYHTEYDELLÄ	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AR	Augmented Reality eli lisätty todellisuus. Tässä työssä lyhenne liitetään usein AR-laseihin, jotka päälle pukemalla käyttäjä näkee todellisen maailman, johon on lisätty virtuaalisia elementtejä.
BPSK	Binary Phase Shift Keying. Binäärinen vaiheavainnus, jossa modulaatioaakkostossa on kaksi eri vaihetta.
FSK	Frequency Shift Keying. Modulaatiomenetelmä, jossa hyötydata sijoitetaan kanta-aallon taajuuteen.
HMD	Head Mounted Display eli kypäränäyttö, joka laitetaan käyttäjän päähän.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kansainvälinen tekniikan alan järjestö, joka julkaisee alaan liittyviä tutkimuksia, sekä standardeja.
ISM-kaistat	Industrial, Scientific and Medical. ITU:n määrittämät taajuuskaistat, joita kuka tahansa saa käyttää radioaaltoja hyödyntävässä tekniikassaan. Valtiokohtaiset lähetystehorajoitukset koskevat myös näillä taajuuksilla toimivia laitteita.
ITU	International Telecommunication Union. Kansainvälinen YK:n alaisuudessa toimiva järjestö, joka ohjaa maailmanlaajuisesti taajuuskaistojen käyttöä.
MCS	Modulation and Coding Scheme. Indeksiluku, jota käytetään IEEE:n standardeissa kertomaan käytetyn modulaatioaakkoston sekä kanavakoodaussuhteen.
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output. Tiedonsiirtojärjestelmä, jossa on enemmän kuin yksi lähetin- ja vastaanotin antenni.
PAM	Pulse Amplitude Modulation. Modulaatiomenetelmä, jossa hyötydata sijoitetaan kanta-aallon hetkelliseen amplitudiin.
PSK	Phase Shift Keying. Modulaatiomenetelmä, jossa hyötydata sijoitetaan kanta-aallon vaiheeseen.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation. Modulaatiomenetelmä, jossa hyötydata sijoitetaan kanta-aallon amplitudiin ja vaiheeseen.

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying. Vaiheavainnus, jossa modulaatioaakkostossa on neljä vaihetta.
SNR	Signal-to-Noise Ratio. Signaalin teho suhteessa kohinatehoon.
TTY	Tampereen Teknillinen Yliopisto.
VR	Virtual Reality eli virtuaalitodellisuus. Tässä työssä lyhenne usein liitetään VR-laseihin. Laitteiston kypäränäytön päälle pukemalla käyttäjä näkee ainoastaan kypärän näyttöihin/laseihin heijastettavan virtuaalitodellisuuden.
Wi-Fi	Wireless Fidelity eli langaton lähiverkko, joka yleisimmin käyttää 2,4, 5,2 ja 5,8 GHz:n taajuusalueita.
WiGig	Wireless Gigabit eli järjestelmä, joka käyttää 60 GHz:n taajuusaluetta.
WLAN	Wireless Local Area Network eli langaton lähiverkko.
WPAN	Wireless Personal Area Network eli langaton likiverkko tai omaverkko.
WWAN	Wireless Wide Area Network eli langaton laajaverkko tai suuralueverkko.

1. JOHDANTO

VR-lasit (Virtual Reality, virtuaalitodellisuus) ovat teknologia, jossa käyttäjän päässä olevien lasien ja kuulokkeiden avulla käyttäjä ikään kuin siirretään virtuaalimaailmaan. Hän näkee ja kuulee ainoastaan virtuaalimaailmassa tapahtuvia asioita. Virtuaalilasit ovat olleet pitkään kehityksessä, mutta vasta viime vuosina teknologinen kehitys on mahdollistanut ensimmäisten kaupallisten mallien julkaisun.

AR-lasit (Augmented Reality, lisätty todellisuus) ovat erittäin todennäköinen kännyköiden seuraaja ja syrjäyttäjä. AR-lasit ovat käytännössä läpinäkyvä näyttöpari, joka laiteaan käyttäjän kasvoille ja joista läpi katsomalla käyttäjän näkemään tilaan voidaan luoda illuusio esimerkiksi hologramminäytöistä tai -esineistä. Ne mahdollistaisivat mm. navigoinnin reaali maailman ”päälle” piirtyvien virtuaalisten nuolien avulla.

Olemassa olevat VR-lasit käyttävät yksiköiden väliseen tiedonsiirtoon pääasiallisesti yhdistelmää HDMI- ja USB-johdoista. Olemassa olevat AR-lasit sisältävät prosessointiyksikön tai ottavat yhteyden esimerkiksi käyttäjän kännykkään Wi-Fi:n (Wireless Fidelity, langaton lähiverkko) tai Bluetoothin välityksellä. Tavallisille kuluttajille suunnattuja monikäyttöisiä AR-laseja ei kuitenkaan ole vielä saatavilla, joten vakiintuneita vaatimuksia niiden tiedonsiirrolle ei vielä ole.

Monimutkaiset, paljon laskentatehoa vaativat sovellukset lisäävät merkittävästi VR- ja AR-lasien kokoa ja painoa, joten laskentatehon siirtäminen lasien ulkopuoliseen prosessointiyksikköön saattaa olla mielekkäämpää. Prosessointiyksikön ja lasien välille tarvitaan suurella tiedonsiirtonopeudella ja pienellä viiveellä toimiva yhteys, joka tarkoittaa joko paksua johtoa tai korkealla taajuusalueella toimivaa langatonta linkkiä.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan 60 GHz:n taajuusalueen käyttökelpoisuutta VR- ja AR-lasien tiedonsiirrossa HMD:n (Head Mounted Display) ja prosessointiyksikön välillä. Aluksi luvussa 2 kerrotaan yleisesti lyhyen kantomatkan langattomaan tiedonsiirtoon liittyvistä haasteista ja miten ne on ratkaistu. Tämän jälkeen kerrotaan yksityiskohtaisemmin Wi-Fi- ja WiGig-tekniikoista (Wireless Gigabit) sekä niille laadituista standardeista. Luvussa 3 kerrotaan VR- sekä AR-laseista sekä niiden vaatimuksista tietoliikenteen näkökulmasta. Luvussa 5 kerrotaan kaupallisilla laitteilla toteutetuista käytännön mittauksista ja lopulta yhteenvedossa pohditaan, soveltuuko 60 GHz:n taajuusalue VR- ja AR-lasien tiedonsiirron tarpeisiin.

2. LANGATON TIEDONSIIRTO LYHYELLÄ KANTOMATKALLA

Langaton tiedonsiirto on poistanut johtojen tarpeen mobiililaitteista. Langaton tiedonsiirto on kuitenkin huomattavasti haastavampaa kuin langallinen tiedonsiirto ja tästä syystä langattomia järjestelmiä kehitetään jatkuvasti paremmiksi, jotta myös langattomissa linkeissä päästäisiin korkeisiin tiedonsiirto- sekä luotettavuustavoitteisiin. Langaton tiedonsiirto voidaan edelleen jakaa WPAN- (Wireless Personal Area Network, langaton likiverkko), WLAN- (Wireless Area Network, langaton lähiverkko) sekä WWAN-järjestelmiin (Wireless Wide Area Network, langaton laajaverkko).

WPAN-verkkojen ajatellaan kattavan verkot, joiden kantama rajoittuu alle 10 metriin. Tällä hetkellä merkittävin WPAN-luokkaan kategorioituva teknologia on Bluetooth. WLAN-verkkojen kantomatkan ajatellaan olevan alle 100m, ja tässä kategoriassa hallitseva teknologia on Wi-Fi. WWAN-verkko kattaa laajan maantieteellisen alueen, ja tästä luokasta löytyvät muun muassa mobiiliverkot. Tässä työssä keskitytään WLAN-järjestelmiin.

2.1 Tiedonsiirrosta yleisesti

Langattomassa tiedonsiirtojärjestelmässä hyötydataa sisältävät bitit moduloidaan osaksi antennin kautta lähetettävää radioaaltoa. Modulointi voidaan toteuttaa yhdistämällä bitit osaksi kantoaallon amplitudia (PAM), vaihetta (PSK), taajuutta (FSK) tai amplitudia ja vaihetta (QAM). Näistä QAM on nykyisin laajasti käytössä mobiili- sekä lähiverkoissa. [1]

Langattomat järjestelmät ovat monimutkainen kokonaisuus, joiden teknisistä ominaisuuksista on kirjoitettu lukuisia teoksia. Kuitenkin käyttäjän näkökulmasta, langattomien tiedonsiirtojärjestelmien merkittävimpiä ominaisuuksia ovat bittien siirtonopeus, järjestelmän viive sekä tasainen toimintavarmuus.

2.1.1 Siirtonopeus

Siirtonopeuteen vaikuttaa merkittävimmin järjestelmän käyttämä kaistanleveys. Tämä määrittää nopeuden, jolla langattoman kanavan yli voidaan lähettää bitti-informaatiota sisältäviä symboleita. Tietyn symbolinopeuden vaatima kaistanleveys QAM-modulaatiota käytettäessä voidaan laskea kaavasta

$$B = (1 + \alpha) * R_s, \quad (1)$$

missä B on järjestelmän kaistanleveys, α on lisäkaistakerroin ja R_s on symbolisiirtonopeus [2].

Symboliaakkoston kokoa kasvattamalla pystytään nostamaan bittisiirtonopeutta entisestään, kun yksittäinen lähetetty symboli sisältää enemmän bitti-informaatiota. Käytettävän symboliaakkoston maksimikokoa rajoittaa vastaanottimen kokema signaali-kohinasuhde (SNR). Signaalitehon suuruuteen vaikuttavat pääasiallisesti lähettimen käyttämä lähetysteho sekä etenemisvaimennus, joka kasvaa vastaanottimen liikkua kauemmas lähettimestä. Suomessa lainsäädäntö rajoittaa langattomien lähiverkkojen lähetinlaitteiden lähetystehoa taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Suomen lainsäädännön asettamat efektiivisten lähetystehojen maksimiarvot WiFi- ja WiGig-taajuusalueilla [3].

Taajuusalue	Efektiivinen lähetysteho
2,4–2,4835 GHz	≤ 100 mW tai ≤ 20 dBm
5,15–5,35 GHz	≤ 200 mW tai ≤ 23 dBm
57,0–66,0 GHz	≤ 10 W tai ≤ 40 dBm

Shannon-Hartley-kaavasta voidaan laskea kanavan teoreettinen maksimikapasiteetti tietyllä kaistalla

$$C < B \log_2 \left[1 + \frac{S}{N} \right], \quad (2)$$

missä C on kanavan maksimikapasiteetti eli maksimitiedonsiirtonopeus, S on vastaanotetun signaalin teho ja N on kohinateho [2].

Sen avulla voidaan myös laskea kyseisen nopeuden saavuttamiseen tarvittava symboliaakkoston koko. Tämä voidaan laskea kaavasta

$$M \leq 1 + \frac{S}{N}, \quad (3)$$

missä M kertoo symboliaakkoston koon [2]. Tämän koon pitää olla käyttökelpoinen, esimerkiksi QAM-järjestelmissä 4-QAM, 16-QAM tai 64-QAM.

Käytännössä teoreettista maksimikapasiteettia ei olemassa olevilla järjestelmillä pystytä saavuttamaan, mutta symboliaakkostoa ja kanavakoodaussuhdetta dynaamisesti muokkaamalla voidaan päästä lähelle Shannon-Hartley-kaavan antamaa maksimikapasiteettia. Varsinainen bittisiirtonopeus voidaan laskea kaavasta

$$R_{\text{bit}} = \log_2(M) * (1 + \alpha) * R_s, \quad (4)$$

missä R_{bit} on bittisiirtonopeus [2].

2.1.2 Viive

Viive on aika, mikä datan lähetyksestä kuluu datan vastaanottamiseen. Dataa kuljettava signaali etenee tiedonsiirtojärjestelmässä lähes valonnopeutta, sekä johdoissa että radio-kanavassa. Toisin sanoen esimerkiksi 100 km:n matkaan menee radioaallolta noin 0.3 ms. Näin ollen tiedonsiirtojärjestelmän aiheuttama lisäviive johtuu kanavakoodauksen, ekvalisoinnin, tietoturvan yms. tuomasta lisäprosessointitarpeesta ennen käyttäjätietoa siirtävän radioaallon lähettämistä. Mikäli lähetyksen aikana tapahtuu bittivirheitä, aiheuttaa pakettien uudelleenlähetykseen lisää viivettä käyttäjän näkökulmasta.

Tästä seuraa, että monimutkaisempien toimintavarmuutta ja tiedonsiirtonopeutta kasvattavien teknologioiden käyttö lisää myös väistämättä tiedonsiirtojärjestelmän viivettä. Prosessointijärjestelmän tehoja lisäämällä voidaan vähentää prosessointiviivettä, mutta samalla myös järjestelmän kustannukset kasvavat.

2.1.3 Toimintavarmuus

Yksi toimintavarmuuteen vaikuttavista tekijöistä on radiotie-etenemiseen liittyvä etenemisvaimennus, joka määrittää kuinka pitkä kantomatka langattomalla linkillä on käytettävissään. Radiotie-etenemiseen liittyy vapaan tilan etenemisvaimennus, säteen kimpoaminen tai siroaminen esteistä, sekä useita reittejä kohteeseen saapuvien saman symbolin kopioiden summautuminen vastaanottimessa.

Etenemisvaimennuksen laskemiseen käytetään approksimaatiokaavoja, jotka soveltuvat erilaisiin tilanteisiin ja kohteisiin. Esimerkkeinä vapaan tilan etenemisvaimennuksen kaava

$$L = 32,4 + 20 \log_{10}(R_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}), \quad (5)$$

missä L on etenemisvaimennus desibeleinä, R_{km} on lähettimen ja vastaanottimen etäisyys kilometreinä ja f_{MHz} on järjestelmän käyttämä kanta-aaltotaajuus, sekä kahden säteen mallin kaava

$$L_{2RAY} = 40 \log_{10}(r) - 20 \log_{10}(h_t) - 20 \log_{10}(h_R), \quad (6)$$

missä L_{2RAY} on etenemisvaimennus desibeleinä, r on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys metreinä, h_t on lähettimen korkeus metreinä ja h_R on vastaanottimen korkeus metreinä [4].

Etenemisvaimennus määrittää kuinka usein ja missä tukiasemia tulee olla, jotta käyttäjän kokema yhteys pysyy hyvällä tasolla. Jos käyttäjä liikkuu tukiaseman kantoalueen ulkopuolelle, eikä tukiaseman vaihtoa ole suoritettu, katkeaa yhteys ja käyttäjä joutuu muodostamaan yhteyden uudestaan, kun hän saapuu jonkin tukiaseman kantoalueelle.

Kanavan vaihtelu vaikuttaa merkittävästi käyttäjän kokemaan yhteyden tasoon sekä modulaatioaakkoston kautta siirtonopeuteen. Kanavan signaaliin aiheuttama häiriö eri taajuuskanavilla muuttuu, kun ympäristössä tapahtuu muutoksia, esimerkiksi kun käyttäjä tai hänen ympäristössään olevat henkilöt tai esineet liikkuvat. Tämän lisäksi samaa taajuuskanavaa käyttävät muut laitteet aiheuttavat häiriötä käyttäjän tiedonsiirtoon.

Kohina ja symbolien välinen keskinäisvaikutus saattavat aiheuttaa vastaanottavassa laitteessa symbolin lukuvirheen. Mikäli järjestelmä käyttää Gray-koodausta, on todennäköisintä, että kun virheen sattuessa havaitaan alkuperäisen lähetetyn symbolin naapurisymboli, tulee vastaanottimessa vain yhden bitin virhe. Kanavakoodauksesta johtuen suurin osa virheistä pystytään havaitsemaan ja osittain korjaamaan. Mikäli vastaanotin ei pysty korjaamaan vastaanotetun paketin sisältöä, täytyy paketti lähettää uudestaan, mikä vähentää radiokanavan siirtonopeutta. Vaikeammissa olosuhteissa kanavakoodauksen määrää suhteessa hyötydatan määrään joudutaan lisäämään. Radiokanavan hyötydatan läpäisyprosentin laskiessa käyttäjän kokema siirtonopeus niin ikään laskee.

Signaalin kokeman radiokanavan voimakas vaihtelu saatetaan havaita käytön pätkimisenä tai tasaista siirtonopeutta vaativan käytön kuten puhelun tai videokuvan katkeamisena. Mikäli kanava heikkenee tarpeeksi, saattaa käyttäjä menettää yhteyden kokonaan.

2.2 Wi-Fi

Wi-Fi on lyhyen kantaman langattomaan tiedonsiirtoon kehitetty teknologia, joka vähentää johtojen tarvetta sisätiloissa. Wi-Fi on nykyään erittäin voimakkaasti yleistynyt teknologia ja sitä hyödyntäviä tukiasemia löytyy lähes kaikista rakennuksista. Wi-Fi mahdollistaa nopean tiedonsiirron lyhyellä kantomatalla, mutta kantomatkan ja viiveen vaihtelu kuitenkin rajoittavat sen käytettävyyttä vaativissa sovelluksissa, kuten palvelinperustaisissa pilvipalveluissa. Näissä tapauksissa, mikäli viive kasvaa liian suureksi, saattaa käyttäjän toimintojen ja serverillä tapahtuvien muutosten välinen aikaero kasvaa niin suureksi, että se haittaa käyttäjäkokemusta.

Tällä hetkellä uusin IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardi, joka määrittää Wi-Fi-teknologiaa käyttävien laitteiden toimintaa, on 802.11ac. Wi-Fi käyttää keskitaajuuksia 2,4 GHz, 5,2 GHz ja 5,8 GHz. Mahdolliset kaistanleveydet, joita Wi-Fi voi käyttää, ovat 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz sekä 160 MHz. Modulaatiot, joita Wi-Fi käyttää, ovat BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) sekä 16-, 64- ja 256-QAM. Optimaalisissa olosuhteissa, jos käytetään 160 MHz kaistanleveyttä, 4 MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) kanavaa, 256-QAM:ia, 5/6 koodaussuhdetta ja 400 ns suojaväliä symboleiden välillä, voidaan päästä jopa 3,47 Gb/s fyysisen kerroksen tiedonsiirtonopeuteen yhden käyttäjän ja reitittimen välillä. [5]

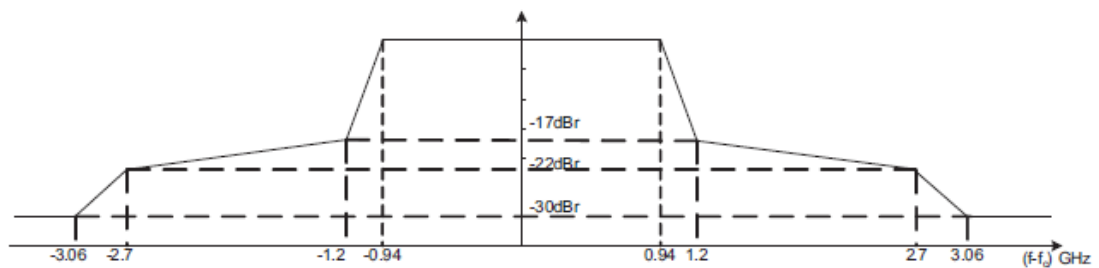
Käytännössä 160 MHz:n kaistanleveyttä ei voida käyttää usein, koska samaa taajuusalueita käyttää myös muun muassa muut Wi-Fi-laitteet. Tämän lisäksi kaistan 4-kertaistaminen MIMO-tekniikalla vaatisi, että tilassa eri reittiä kulkevat signaalit eivät korreloisi keskenään, ja että sekä lähettimessä, että vastaanottimessa olisi 4 antennia. Todennäköisemmin tiedonsiirtojärjestelmä saattaisi esimerkiksi käyttää 80 MHz:n kaistanleveyttä, 2:ta MIMO-kanavaa, 64-QAM:ia, 5/6 kaistanleveyttä sekä 800 ns suojaväliä symboleiden välillä. Näillä parametreilla fyysisen kerroksen teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus putoaa jo lukuun 585 Mb/s [5].

Wi-Fi käyttää keskitaajuuksia 2,4 GHz, 5,2 GHz sekä 5,8 GHz koska ne kuuluvat ISM-taajuusalueelle (Industrial, Scientific and Medical) [4]. ISM-kaistat ovat vapaassa käytössä, mikä tarkoittaa, että samoja kaistoja käyttävät muiden Wi-Fi-laitteiden lisäksi myös muut radioaaltoja hyödyntävät laitteet, kuten Bluetoothia käyttävät laitteet. Tämän lisäksi esimerkiksi mikroaaltouunit toimivat 2,45 GHz:n taajuudella. Samalla taajuuskaistalla toimivat laitteet aiheuttavat häiriötä muiden kyseisellä taajuusalueella toimivien tietoliikennelaitteiden toimintaan.

2.3 WiGig

WiGig on suhteellisen uusi tiedonsiirtoon tarkoitettu teknologia, joka toimii 60 GHz taajuusalueella. WiGig perustuu IEEE:n standardiin 802.11ad, joka määrittelee sitä hyödynnettävien laitteiden toimintaa. WiGigiä käyttävät kaupalliset tiedonsiirtojärjestelmät eivät ole vielä yleistyneet ja esimerkiksi nykyiset mobiilipuhelimet eivät tue sitä.

WiGig käyttää keskitaajuutta 60 GHz. Taajuusaluetta 57–66 GHz saa viestintäviraston lausunnon perusteella käyttää Suomessa laajakaistaisissa datasiirtolaitteissa [3]. Korkeammalla taajuusalueella on käytettävissä huomattavasti enemmän vapaata kaistaa, mikä mahdollistaa korkean tiedonsiirtonopeuden. Standardi 802.11ad määrittää WiGigin kaistanleveydeksi 1,8 GHz:iä [6], joka on yli 10 kertaa leveämpi kuin maksimikaistanleveys Wi-Fi:llä. Kuvasta 1 nähdään standardissa määritetty lähetysmaski.



Kuva 1. Standardissa 802.11ad ilmoitettu lähetysmaski WiGig-järjestelmille [6].

Toisaalta kuten aikaisemmassa luvussa todettiin, korkeammat taajuudet kokevat voimakkaamman vapaan tilan etenemisvaimennuksen kuin matalammat taajuudet, mikä lyhentää linkin maksimikantosädettä näköyhteydellä. Tämän lisäksi lyhyemmät aallonpituudet myös siroavat voimakkaammin epätasaisista pinnoista. Nämä asiat yhdessä lyhentävät WiGigiä käyttävän järjestelmän kantosädettä ja herkkyyttä esteille radiokanavassa. Näiden tietojen perusteella voidaan päätellä, että WiGig voisi soveltua Wi-Fi:ä paremmin korkeaa tiedonsiirtonopeutta vaativaan lyhyen kantaman tiedonsiirtoon, kuten esimerkiksi korkearesoluutioisen videokuvan siirtoon.

Optimaalisissa olosuhteissa, jos käytetään OFDM:iä, 64-QAM aakkostoa ja 13/16 koodaussuhdetta, voidaan saavuttaa jopa 6,8 Gb/s fyysisen kerroksen tiedonsiirtonopeus. Taulukosta 2 nähdään eri MCS (Modulation and Coding Scheme) indeksien käyttämät modulaatiot, koodaussuhteet, teoreettiset tiedonsiirtonopeudet sekä vastaanottimen vaaditun herkkyytason. MCS-indeksi kertoo tiedonsiirtolaitteen käyttämän modulaatioaakkoston sekä koodaussuhteen. MCS:ä vaihdetaan kanavaolosuhteiden muuttuessa.

Taulukko 2. WiGig MCS-indeksi [6].

MCS-indeksi	SC/OFDM	Modulaatio	Koodaus- suhde	Tiedonsiirto- nopeus (Mb/s)	Vastaanotti- men herk- kyystaso (dBm)
0	SC	DBPSK	1/2	27,5	-78
1	SC	$\pi/2$ -BPSK	1/2	385	-68
2	SC	$\pi/2$ -BPSK	1/2	770	-66
3	SC	$\pi/2$ -BPSK	5/8	962,5	-65
4	SC	$\pi/2$ -BPSK	3/4	1155	-64
5	SC	$\pi/2$ -BPSK	13/16	1251,25	-62
6	SC	$\pi/2$ -QPSK	1/2	1540	-63
7	SC	$\pi/2$ -QPSK	5/8	1925	-62
8	SC	$\pi/2$ -QPSK	3/4	2310	-61
9	SC	$\pi/2$ -QPSK	13/16	2502,5	-59
10	SC	$\pi/2$ -16QAM	1/2	3080	-55
11	SC	$\pi/2$ -16QAM	5/8	3850	-54
12	SC	$\pi/2$ -16QAM	3/4	4620	-53
13	OFDM	SQPSK	1/2	693	-66
14	OFDM	SQPSK	5/8	866,25	-64
15	OFDM	QPSK	1/2	1386	-63
16	OFDM	QPSK	5/8	1732,5	-62

17	OFDM	QPSK	3/4	2079	-60
18	OFDM	16-QAM	1/2	2772	-58
19	OFDM	16-QAM	5/8	3465	-56
20	OFDM	16-QAM	3/4	4158	-54
21	OFDM	16-QAM	13/16	4504,5	-53
22	OFDM	64-QAM	5/8	5197,5	-51
23	OFDM	64-QAM	3/4	6237	-49
24	OFDM	64-QAM	13/16	6756,75	-47
25	Low-power SC	$\pi/2$ -BPSK	13/28	626	-64
26	Low-power SC	$\pi/2$ -BPSK	13/21	834	-60
27	Low-power SC	$\pi/2$ -BPSK	52/63	1112	-57
28	Low-power SC	$\pi/2$ -QPSK	13/28	1251	-57
29	Low-power SC	$\pi/2$ -QPSK	13/21	1668	-57
30	Low-power SC	$\pi/2$ -QPSK	52/63	2224	-57
31	Low-power SC	$\pi/2$ -QPSK	13/14	2503	-57

WiGig-yhteensopivat laitteet voivat käyttää säteenohjausta [6], jonka käyttäminen mahdollistaa, että yksittäisille käyttäjille lähetetään tarkasti suunnattu signaali. Näin suunnattu signaali ei aiheuta yhtä voimakasta häiriötä muille samalla taajuusalueella toimiville laitteille, kuin perinteinen tiedonsiirto ilman säteenohjausta. Vietynä äärimmilleen tämä mahdollistaisi, että koko käytettävissä oleva kaistanleveys voitaisiin luovuttaa kaikille käyttäjille samassa tilassa. Tämän lisäksi säteenohjaus lisää antennivahvistuksen määrää, mikä parantaa vastaanotetun signaalitehon kasvun myötä SNR:ta ja lopulta myös tiedonsiirtonopeutta.

3. VIRTUAALISEN TODELLISUUDEN TEKNISET VAATIMUKSET

VR-tekniologialla tyypillisesti luodaan virtuaalinen maailma, jonka sisällä käyttäjä pystyy liikkumaan ikään kuin olisi oikeasti virtuaalisen maailman sisällä. Käyttäjän päässä on yleensä kypäränäyttö, jonka kautta käyttäjä näkee virtuaalimaailman sekä kuulokkeet, joiden kautta käyttäjä kuulee virtuaalimaailman ääniä. Olemassa olevat VR-järjestelmät sulkevat käyttäjän ulos todellisuudesta siten, että käyttäjä ei näe tai kuule todellista maailmaa. VR-järjestelmien suurin ongelma tällä hetkellä on suuren osan käyttäjistä kokema liikepahoinvointi sovelluksissa, joissa käyttäjää liikutetaan virtuaalimaailmassa.

AR-tekniologiassa olemassa olevaan maailmaan luodaan virtuaalisia elementtejä. VR:stä poiketen käyttäjä näkee ja kuulee todellisen maailman, mutta sen lisäksi AR-lasit lisäävät käyttäjän näkemään tilaan virtuaalisia tai epätodellisia elementtejä, kuten näyttöjä, suuntanuolia tai hahmoja.

AR-tekniologia on käyttäjäystävällisempi, koska yleensä tavoitteena ei ole liikuttaa käyttäjää keinotekoisesti virtuaalimaailmassa, vaan käyttäjä liikkuu normaalisti reaaliympäristössä. AR-tekniologian ei pitäisi aiheuttaa liikepahoinvointia käyttäjälle, koska käyttäjän näkökenttä ei liiku ilman, että käyttäjä itse liikkuisi.

3.1 VR-lasien tarpeet tietoliikenteen näkökulmasta

Olemassa olevat VR-lasit suorittavat prosessoinnin lasien ulkopuolisessa yksikössä, josta lasihin tuotava kuva sekä yksiköiden välinen kalibroidut data siirretään HDMI- sekä USB-kaapeleilla yksiköiden välillä. HDMI 2.0b kykenee saavuttamaan 18 Gb/s tiedonsiirtonopeuden, joka riittää siirtämään 4K-videokuva 60 Hz:n virkistystaajuudella [7]. Vuonna 2017 julkaistu HDMI 2.1 kykenee saavuttamaan 48 Gb/s tiedonsiirtonopeuden, joka riittää siirtämään 8K-videota 60 Hz tai 4K-videota 120 Hz virkistystaajuuksilla.

VR-lasien suurin ongelma käytettävyyden kannalta on osan käyttäjistä kokema liikepahoinvointi, joka liittyy siihen, että silmät näkevät kehon olevan liikkeessä, vaikka sisäkorvan tasapainoelimet eivät havaitsekaan liikettä [8]. Tämän lisäksi, mikäli näkökentän muutokset eivät vastaa täsmälleen päännäliikkeitä, saattaa tämä myös aiheuttaa osalle käyttäjistä pahoinvoinnin tunnetta.

VR-lasien kokonaisviive koostuu näytön virkistystaajuudesta, prosessointiviiveestä sekä tiedonsiirtojärjestelmän viiveestä. Jotta käyttäjä saisi parhaan mahdollisen kokemuksen, tulee lasien kuvan virkistystaajuuden olla vähintään 60 Hz. Tällä virkistystaajuudella kuvien välillä on jo 16,7 ms:n viive. VR-järjestelmän maksimiviive pahoinvoinnin välttämiseksi on hyvin käyttäjäkohtaista. Jonkinlaisena nyrkkisääntönä ohjelmien kehittäjien

keskuudessa pidetään maksimissaan 20 ms:n viivettä [9]. Tutkimustuloksia, jotka tukisivat tätä väitettä, on vaikeaa löytää, mutta laitevalmistajat ja tutkimus keskittyvät silti minimoimaan prosessointiviivettä sekä maksimoimaan näyttöjen virkistystaajuutta. Tiedonsiirtojärjestelmän tuoma lisäviive on HDMI-kaapeleiden tapauksessa alle 1 ms. Mikäli tiedonsiirto haluttaisiin siirtää langattomaksi, ei se saisi aiheuttaa merkittävää lisäviivettä järjestelmään.

Taulukko 3. Markkinoilla olevien VR lasien tietoja [10-14].

Nimi	Resoluutio (pikseliä)	Virkistystaajuus (Hz)	Laskettu tiedonsiirtonopeus ilman pakkausta (Gb/s)	Laskettu tiedonsiirtonopeus pakkauksella (Gb/s)
PSVR	1920x1080 (960x1080x2)	120	7,962624	2,22953472
HTC Vive	2160x1200 (1080x1200x2)	90	7,46496	2,0901888
HTC Vive pro	2880x1600 (1440x1600x2)	90	17,69472	4,9545216
Oculus Rift	2160x1200 (1080x1200x2)	90	9,95328	2,7869184
Google daydream view	Riippuu puhelimesta	Riippuu puhelimesta	-	-
Samsung Gear VR	Riippuu puhelimesta	Riippuu puhelimesta	-	-

Taulukosta 3 nähdään olemassa olevien VR-lasien vaatimuksia tietoliikenteen kannalta. Taulukon arvot on kerätty laitevalmistajien omilta verkkosivuilta, paitsi Oculus Riftin tapauksessa, jonka tiedot täytyi hakea kolmannen osapuolen verkkosivuilta. Resoluutio kertoo laitteen käyttämän kokonaisresoluution ja sulussa oleva luku kertoo resoluution per silmä.

Laskettu tiedonsiirtonopeus ilman pakkausta on laskettu kaavalla

$$bittinopeus = resoluutio * virkistystaajuus * \frac{bittia}{pikseli}, \quad (7)$$

missä bittinopeus on resoluution ja virkistystaajuuden saavuttamiseen vaadittu bittien siirtonopeus, resoluutio on laitteen käyttämä kokonaisresoluutio, virkistystaajuus on suoraan laitteen valmistajien ilmoittama virkistystaajuus ja $\frac{bittia}{pikseli}$ on, kuinka monta bittia käytetään yhden pikselin kuvaamiseen. Näissä laskuissa on käytetty oletuksena $32 \frac{bittia}{pikseli}$.

Tämä luku voi vaihdella käytetyn standardin mukaisesti.

Pakkauskoodekkina käytettiin H.264-koodekkia. Laskettu tiedonsiirtonopeus pakkauksella laskettiin käyttämällä johdettua Amerasinghen kaavaa vuodelta 2010

$$pakattu\ bittinopeus = bittinopeus * kuvanaktiivisuuskerroin * 0,07, \quad (8)$$

missä pakattu bittinopeus on vaadittu bittien siirtonopeus pakkaamisen jälkeen ja kuvanaktiivisuuskerroin on tässä tapauksessa 4, mikä vastaa Amerasinghen kaavassa voimakasta liikettä kuvien välillä. Nämä tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia ja todellisen tiedonsiirtonopeuden selvittämiseen H.264-koodekilla tarvittaisiin käytännön mittaustuloksia. [15]

3.2 AR-lasien tarpeet tietoliikenteen näkökulmasta

AR-laseja ei ole vielä juurikaan kuluttajamarkkinoilla. Monet tällä hetkellä kehitteillä olevat järjestelmät ovat sisällyttäneet prosessointiyksikön suoraan HMD:in. Lasit voivat kuitenkin olla yhteydessä muihin laitteisiin langattomalla linkillä.

AR-lasit tyypillisesti näyttävät käyttäjälle reaali maailman joko suoraan lasien läpi tai kameran ja näyttölinssien välityksellä. Mikäli käyttäjän lasien läpi näkemää maailmaa ei peitetä merkittävästi virtuaalisilla elementeillä, ei lasien käytön pitäisi aiheuttaa huonovointisuutta tai vaaratilanteita. Mikäli lasit kuitenkin peittävät virtuaalielementeillä suurimman osan tai koko käyttäjän näkökentästä, tulee lasien turvallisessa toiminnassa vastaan samat rajoitteet kuin VR-lasien tapauksessa. Mikäli käyttäjä ei näe suoraan lasien läpi vaan reaali maailma välitetään hänelle kameroiden ja näyttöjen välityksellä, ei näiden välillä myöskään saa olla häiriöitä tai merkittävää viivettä.

AR-lasien tapauksessa ei ole täysin mielekästä tehdä samanlaista taulukkoa kuin VR-lasien taulukon 3 tapauksessa, koska koko käyttäjän näkemää ruutua ei tarvitse päivittää joka ajanhetki. Raskaimmankin käytön tapauksessa vaadittu tiedonsiirtonopeus HMD:n ja prosessointiyksikön välillä nousee samoille tasoille kuin samaa resoluutiota käytävien VR-lasien tapauksessa. Esimerkkinä annettakoon tulevaisuudessa julkaistava Microsoft Hololens, jonka kokonaisresoluution sanotaan olevan 1280x720 ja sovellusten suositellun virkistystaajuuden 60 Hz [10]. Edellisen luvun kaavan 7 perusteella vaadittu pakkaamaton tiedonsiirtonopeus tälle näytölle jatkuvalla ruudunpäivityksellä olisi noin 1,77 Gb/s ja pakattuna H.264-koodekilla kaavalla 8 laskettuna noin 495 Mb/s, mikä on jo huomattavasti pienempi siirtonopeus kuin useimmilla VR-laseilla.

4. KÄYTÄNNÖN MITTAUKSIA KAUPALLISILLA LAITTEILLA

Tämän kandidityön aikana suoritettiin mittauksia Tampereen teknillisen yliopiston (TTY:n) hankkimilla TPCAST- ja Wireless Wire -laitteilla [16, 17]. Molemmat laitteet toimivat 60 GHz:n taajuusalueella. TPCAST on suunniteltu korvaamaan johdot tietokoneen ja Oculus Rift tai HTC Vive VR-lasien välillä. Wireless Wire on suunniteltu toimimaan kiinteänä langattomana linkkinä ulkokäytössä.

4.1 TPCAST

TPCAST on samannimisen valmistajan tekemä laite, jonka tarkoituksena on korvata VR-lasien johdot 60 GHz:n taajuusalueella toimivalla radiolinkillä videokuvan siirtämiseen, sekä Wi-Fi-reitittimellä kontrolli- ja sensoridatan siirtämiseen. 60 GHz:n lähetinyksikkö ja Wi-Fi-reititin liitetään tietokoneeseen. 60 GHz:n vastaanotinyksikkö liitetään HMD:n päälle. 60 GHz:n vastaanotinyksikköön liitetään akku sekä Wi-Fi-vastaanotinyksikkö johdoilla. Kuvassa 2 nähdään TPCAST 60 GHz:n lähetys- ja vastaanotinyksiköt, Wi-Fi-reititin ja sen vastaanotinyksikkö sekä akku.



Kuva 2. TPCAST-laitteisto [18].

Mittaukset TPCAST-laitteella suoritettiin TTY:n Tietotalon käytävällä. Kannettava tietokone oli yhdistettynä lähetinyksikköön, joka oli asennettu kameratelineeseen. Vastaanotinyksikkö oli liitetty näyttöön. Vastaanotinyksikköä sekä siihen liitettyä näyttöä työnnettiin kärryillä käytävällä. Kanavan läpi lähetettiin videokuvaa ja yhteyden laatua arvioidtiin silmämääräisesti näytöstä. Näytössä olevassa kuvassa värit näkyivät väärin, sillä käytössä ollut näyttö ei ollut täysin yhteensopiva HMD:lle tarkoitetun kuvasignaalin kanssa. Kuvassa 3 näkyy testilaitteisto.



Kuva 3. Kuva TPCAST-testilaitteistosta. TX tarkoittaa lähetinyksikköä ja RX tarkoittaa vastaanotinyksikköä.

Taulukosta 4 nähdään testin tulokset. Taulukosta nähdään etäisyys, millä mittaus suoritettiin, oliko kyseisen mittauksen aikana lähetin- ja vastaanotinyksiköiden välillä näköyhteys sekä tarkempi kuvaus siitä, minkälaisia esteitä yksiköiden välillä oli ja kuinka hyvin yhteys toimi esteistä huolimatta.

Taulukko 4. TPCAST:in mittaustulokset.

Etäisyys	Näköyhteys	Toimiiko
5m	Ei	Kyllä, kun käsi antenneissa, ihminen välissä
10m	Ei	Pätkii, kun seisoo vastaanotinantennin edessä tai käsi lähettimessä
15m	Ei	Pätkii, kun seisoo antennin lähellä

20m	Ei	Pätkii, kun ihminen kävelee välissä
24m	Ei	Pätkii, kun ihminen kävelee välissä
24m	Kyllä	Kyllä
33m	Kyllä	Ei

Testin tuloksien perusteella linkki toimii silmämääräisesti virheettömästi enimmillään 24 metrin etäisyydellä, kunhan antennien välillä ei ole esteitä. Alle 15 metrin etäisyydellä linkki vaikuttaisi toimivan vaikka käyttäjä vahingossa hetkellisesti katkaisisi antennien välisen linkin. Alle 5 metrin säteellä linkki vaikuttaisi toimivan täydellisesti normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Mittausten luotettavuutta laskee se, että testi tehtiin silmämääräisesti eikä yhteyden laadusta ole mitään mitattua dataa. Tiedonsiirtonopeutta, pakettivirheiden määrää tai viivettä voidaan vain arvailla.

4.2 Wireless Wire

Wireless Wire on MikroTikin valmistama silta, joka on tarkoitettu kiinteäksi radiolinkiksi ulkokäyttöön jatkamaan Ethernet-lähiverkkoa langattomasti. Yritys kertoo laitteen kykenevän 1 Gb/s full-duplex-tiedonsiirtoon sekä 60°:n säteenohjaukseen. Kuvassa 4 on Wireless Wire -reititinyksiköt.



Kuva 4. Wireless Wire -laitteisto [19].

Mittaukset Wireless Wire -laitteella suoritettiin kerrostalokolmiossa sekä TTY:n Tietotalon käytävällä. Kannettava tietokone oli liitettyä Ethernet-verkkokaapelilla toiseen reititinyksikköön ja tietokoneella käytettiin MikroTikin tarjoamaa Winbox nimistä ohjelmaa reititinyksiköiden välisen yhteyden tarkempaan tutkimiseen. Siirtonopeutta, signaalin laatua, modulaatioaakkostoa ja kanavakoodausta testattiin käyttämällä reitittimen Bandwidth Tester -ohjelmaa. Viivettä ja pakettivirheiden määrää testattiin lähettämällä 100 ping-pakettia reititinyksiköiden välillä. Molemmat ohjelmat ajettiin Wireless Wire -laitteiden sisällä ja toiseen reitittimeen yhdistettyä kannettavaa käytettiin vain komentojen antamiseen. Näin ollen kannettavan ja reitittimen välisen verkkokaapelin ominaisuudet eivät vaikuttaneet testin tuloksiin.

Taulukoista 5 ja 6 nähdään lyhennetyt versiot testin tuloksista. Työn lopussa on liitteenä kaikki testin tulokset. Taulukoissa kerrotaan TCP-siirtonopeuden keskiarvo sekä viiveen maksimi- ja keskiarvot.

Taulukko 5. Wireless Wire -mittaustulokset näköyhteydellä.

Etäisyys	Sijainti	TCP siirtonopeus keskiarvo [Mbps]	Viive keskiarvo [ms]	Viive maksimi [ms]
1m	Asunto	430,7	0	2
5m	Asunto	420,6	0	2
8m	Asunto	420,6	0	3
13m	Tietotalon käytävä	415,2	0	3
22m	Tietotalon käytävä	402,6	0	2

Taulukko 6. Wireless Wire -mittaustulokset ilman näköyhteyttä.

Etäisyys	Sijainti	Kuvaus	TCP siirtonopeus keskiarvo [Mbps]	Viive keskiarvo [ms]	Viive maksimi [ms]
1m	Asunto	Ihminen välissä	367	0	3
5m	Asunto	Välissä betoniseinä, puuovi auki	427,7	0	3
5m	Asunto	Välissä betoniseinä, puuovi kiinni	431,1	0	2

8m	Asunto	Välissä puuovi	412,2	0	0
10m	Asunto	Kulman takana, puuovi auki	5,4	0	3
10m	Asunto	Kulman takana, puuovi kiinni	0,07	7	57
30m	Tietotalon käytävä	Kulman takana	366,4	0	3

Taulukoista nähdään yhteyden toimivan hyvin näköyhteydellä ja TCP-siirtonopeuden laskevan etäisyyden kasvaessa. Näköyhteyden puuttuessa linkki toimi yllättävän hyvin siihen asti, kunnes yhteys katkesi kokonaan. Työn lopusta löytyvistä liitteistä 1 ja 2 nähdään, että laitteen käyttämä MCS oli välillä 1–11, joka standardin 802.11ad perusteella vastaa yhden kantaallon järjestelmää [6]. Laittevalmistaja ei ole ilmoittanut kykeneekö laite OFDM-tiedonsiirtoon. Keskimäärin laite käytti MCS 8:aa näköyhteydellä. Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus fyysisellä kerroksella käytettäessä MCS 8:aa on standardin 802.11ad perusteella 2,31 Gb/s [6]. Sovelluskerroksella saavutettava maksimitiedonsiirtonopeus on tätä nopeutta pienempi, koska välissä olevat kerrokset käyttävät osan tiedonsiirtokapasiteetista.

Mittausten luotettavuutta heikentää valmistajan tarjoaman Winbox-sovelluksen tarjoamat puutteelliset tilastot. Viive- ja pakettivirheiden määrä piti tarkistaa ping-sovelluksen kautta, joka ei 100 paketin lähetyksen aikana havainnut yhtään virhettä missään testitilanteessa. Lisäksi tiedonsiirtonopeus saattoi olla pienempi kuin todellisuutta vastaavassa tilanteessa, koska osa reitittimien prosessointitehoista meni Bandwidth Tester -sovelluksen ajamiseen.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin olemassa olevien tiedonsiirtojärjestelmien tiedonsiirtonopeuksia sekä olemassa olevien, että tulevien VR- ja AR-lasien vaatimuksia HMD:n ja prosessointiyksikön yhdistäville tiedonsiirtojärjestelmille. Taulukosta 7 nähdään eri tiedonsiirtojärjestelmien ilmoitetut maksimitiedonsiirtonopeudet. Taulukosta 8 nähdään VR- ja AR-lasien vaatimia tiedonsiirtonopeuksia, joita laskettiin luvuissa 3.1 ja 3.2.

Taulukko 7. Eri tiedonsiirtoteknologioiden ilmoitetut maksimitiedonsiirtonopeudet [5-7, 20].

Nimi	Tiedonsiirtonopeus (Gb/s)
HDMI 2.0b	18
HDMI 2.1	48
USB 3.1 Gen 2	10
Wi-Fi (IEEE 802.11ac)	3,47
WiGig (IEEE 802.11ad)	6,76

Taulukko 8. Markkinoilla olevien tai tulevien VR- ja AR-lasien vaatimukset tiedonsiirtonopeudelle [10-14].

Nimi	Laskettu tiedonsiirtonopeus ilman pakkausta (Gb/s)	Laskettu tiedonsiirtonopeus pakkauksella H.264 (Gb/s)
PSVR	7,96	2,23
HTC Vive	7,46	2,09
HTC Vive pro	17,69	4,95
Oculus Rift	9,95	2,79
Microsoft Hololens	1,77	0,50

Tutkimuksen perusteella ja taulukoiden 7 ja 8 arvoja vertailemalla, standardin 802.11ad mukaan toteutettu tiedonsiirtojärjestelmä ei välttämättä riitä siirtämään pakkaamatonta kuvadataa olemassa olevien VR-lasien HMD:n ja prosessointiyksikön välillä. Arvioidut VR-lasien vaatimukset ovat kuitenkin sen verran lähellä WiGigin standardissa annettua maksimitiedonsiirtonopeutta, että järjestelmä on todennäköisesti mahdollista saada toimimaan, jos ei pakkaamattomalla kuvalla, niin ainakin kevyehköä pakkausta käyttämällä.

AR-lasien pakkaamattoman kuvatiedonsiirtoon WiGig saattaisi riittää siinä tapauksessa, jos kuvaprosessointi halutaan toteuttaa HMD:n ulkopuolisessa yksikössä. Tämän lisäksi AR-lasien tapauksessa tiedonsiirtonopeus on todennäköisesti arvioitua pienempää siinä tapauksessa, jos koko näyttöä ei tarvitse päivittää joka ajanhetki. Tämä olisi tyypillistä esimerkiksi tilanteessa, jossa käyttäjä navigoi lasien avulla ja suurin osa näytöstä ei sisällä päivittyviä virtuaalisia elementtejä.

VR-lasien normaalissa käytössä, mikäli lähetinyksikkö on pöytätasolla, kamerajalustalla tai seinällä, on mahdollista, että näköyhteys katkeaa käyttäjän liikkua. Tämä rajoittaa linkin maksimikantosädetä. Mikäli antenni on kiinnitettynä kattoon, on epätodennäköisempää, että näköyhteys tiedonsiirtoyksiköiden välillä katkeaisi tavanomaisen käytön aikana. Tällaisessa käytössä linkin kantomatka saattaisi olla pidempi. AR-lasien tapauksessa, mikäli prosessointiyksikkö on esimerkiksi käyttäjän vyöllä tai housun taskussa, ei näköyhteyttä saavuteta tavallisen käytön aikana välttämättä lainkaan. Tämä ei kuitenkaan välttämättä ole ongelma linkin lyhyen kantomatkan takia. Mikäli prosessointiyksikkö on sijoitettu esimerkiksi internetin välityksellä maantieteellisesti kauemmaksi käyttäjästä, tulee antennien sijoituksen suunnittelussa huomioida käyttäjän liikkuminen sekä linkin maksimikantosäde näköyhteyden puuttuessa.

Luvussa 4 esitettyjen käytännön mittaustulosten perusteella WiGig-järjestelmät vaikuttavat toimivan jopa yllättävän hyvin edellisessä kappaleessa esitellyissä käyttöolosuhteissa. Kummankin testatun laitteen tapauksessa yhteys oli vakaa lyhyellä kantomatalla. Wireless Wiren tapauksessa TCP-tiedonsiirtonopeudeksi saatiin 8 metrin etäisyydellä ja näköyhteydellä 480 Mb/s. UDP-tiedonsiirtonopeudeksi saatiin samoilla parametreilla 894 Mb/s. TPCAST:in tapauksessa ei pystytty saamaan mitään tietoa tiedonsiirtonopeudesta. Wireless Wire ei mittausten perusteella lisännyt yli 3 ms:n hetkellistä viivettä tiedonsiirtoon alle 22 metrin etäisyydellä näköyhteydellä. TPCAST:in tapauksessa ei saatu tietoa viiveestä.

Kerättyjen tulosten perusteella voidaan sanoa, että WiGig-järjestelmät vaikuttavat olevan toiminnaltaan tarpeeksi vakaita VR-lasien tarpeisiin, mutta niiden tiedonsiirtonopeus ei välttämättä riitä pakkaamattoman videokuvan lähettämiseen HMD:n ja prosessointiyksikön välillä. AR-lasien tiedonsiirtoon WiGig saattaisi riittää siinä tapauksessa, että prosessointiyksikkö haluttaisiin sijoittaa HMD:n ulkopuolelle. Mittaustulosten perusteella WiGigin tuoma lisäviive on tarpeeksi lyhyt VR- ja AR-lasien tarpeisiin nähden. Viiveen tulee olla mahdollisimman lyhyt etenkin VR-lasien tapauksessa, koska merkittävä viive HMD:n ja prosessointiyksikön välillä on havaittu aiheuttavan useille käyttäjille liikepahoinvointia.

Tulevaisuudessa VR-lasien resoluutio ja virkistystaajuus tulevat todennäköisesti kasvamaan, mikä aiheuttaa myös lisävaatimuksia tiedonsiirrolle. 60 GHz:n taajuusalue vaikuttaisi kuitenkin olevan varsin hyvä vaihtoehto VR-laseille, AR-laseille, sekä muille korkeaa tiedonsiirtonopeutta vaativille sovelluksille. Tällä hetkellä kehityksessä oleva IEEE:n standardin 802.11ay lupailaan nostavan WiGigin maksimitiedonsiirtonopeuden jopa 100 Gb/s [21]. Tämä aiotaan saavuttaa muun muassa nostamalla maksimikaistanleveys noin 14 GHz:iin. Näin korkea tiedonsiirtonopeus riittäisi hyvin olemassa olevien VR-lasien tarpeisiin. Tietysti todellista tiedonsiirtonopeutta, järjestelmän viivettä ja maksimikantosädettä ei voida vielä kovin hyvin arvioida tässä vaiheessa standardointiprosessia.

Lisätutkimusta aiheesta voisi toteuttaa esimerkiksi mittaamalla VR-lasien HMD:n ja prosessointiyksikön välistä tiedonsiirtonopeutta. Myöskin tarkempi tutkimus markkinoilla olevien WiGig-tiedonsiirtojärjestelmien toiminnasta käyttäen erillistä mittauslaitteistoa voisi olla hyödyllistä.

LÄHTEET

- [1] A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2. painos, Wiley, 2010, 885 s.
- [2] M. Valkama & M. Renfors, *ELT-43007 DIGITAL COMMUNICATION lecture notes*, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Suomi, 2018, 483 s.
- [3] Viestintävirasto, Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä, Helsinki, 2018, Saatavissa (viitattu 13.3.2018): https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Maarays_15AM.pdf.
- [4] Tietoliikennetekniikan laitos, TLT-6206 RADIO PROPAGATION IN WIRELESS NETWORKS section 2 Lecture notes, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Suomi, 2017, 74 s.
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems, Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz, IEEE 802.11ac-2013*, joulukuu 2013, 425 s.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *ISO/IEC/IEEE International Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band (adoption of IEEE Std 802.11ad-2012)*, IEEE 802.11ad-2014, maaliskuu 2014, 634 s.
- [7] HDMI Licensing Administrator Inc., *HDMI verkkosivu*, Saatavissa (viitattu 12.4.2018): <https://www.hdmi.org/manufacturer/>.
- [8] S. -m. Jung, S. -H. Oh, T. -k. Whangbo, 360 Stereo image based VR motion sickness testing system, 2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI), s. 150-153.
- [9] M. Abrash, *Latency – the sine qua non of AR and VR*, 2012, Saatavissa (viitattu 12.4.2018): <http://blogs.valvesoftware.com/abrash/latency-the-sine-qua-non-of-ar-and-vr/>.
- [10] A. Turner, M. Zeller, E. Cowley & B. Bray, *Windows Mixed Reality*, 2018, Saatavissa (viitattu 13.4.2018): <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/rendering>.
- [11] HTC corporation, *HTC Vive Pro technical specifications*, Saatavissa (viitattu 13.4.2018): <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro/>.

[12] HTC corporation, HTC Vive technical specifications, Saatavissa (viitattu 13.4.2018): <https://www.vive.com/eu/product/#vive-spec>.

[13] J. Martindale, Oculus Rift vs. HTC Vive, Saatavissa (viitattu 13.4.2018): <https://www.digitaltrends.com/virtual-reality/oculus-rift-vs-htc-vive/>.

[14] Sony Interactive Entertainment Europe Limited., Playstation VR technical specifications, Saatavissa (viitattu 13.4.2018): <https://www.playstation.com/en-gb/explore/playstation-vr/tech-specs/>.

[15] K. Amerasinghe, H.264 For the rest of us, 2010, s. 1-26. Saatavissa (viitattu 13.4.2018): https://issuu.com/konu/docs/h264_primer.

[16] MikroTik, MikroTik-valmistajan verkkosivut, Saatavissa (viitattu 26.4.2018): <https://mikrotik.com/>.

[17] Tpcast U.S. Inc., TPCAST-valmistajan verkkosivut, Saatavissa (viitattu 26.4.2018): <https://www.tpcastvr.com/>.

[18] Newegg inc., Kuva TPCAST-laitteistosta, Saatavissa (viitattu 12.4.2018): <https://images10.newegg.com/NeweggImage/ProductImage/26-906-001-Z01.jpg>.

[19] MikroTik, Kuva Wireless Wire -laitteistosta, Saatavissa (viitattu 12.4.2018): https://img.routerboard.com/mimg/1353_hi_res.png.

[20] USB Implementers Forum Inc., SuperSpeed USB 10Gbps (USB 3.1 Gen 2) from the USB-IF, Saatavissa (viitattu 13.4.2018): <http://www.usb.org/developers/ssusb>.

[21] Y. Ghasempour, da Silva, Claudio R. C. M, C. Cordeiro, E.W. Knightly, IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi, IEEE Communications Magazine, Vol. 55, Iss. 12, 2017, s. 186-192.

LIITE 1: WIRELESS WIRE BANDWIDTH TESTER - MITTAUSTULOKSET

Näkö- yhteys	Band- width Tester							
Etäisyys	Sijainti	TX UDP siirtono- peus avg	RX UDP siirtono- peus avg	TX TCP siirtono- peus avg	MCS min	MCS avg	MCS max	Signal quality avg (%)
1m	Asunto	893,7	910	430,7	3	8	10	80
5m	Asunto	892,5	922,3	420,6	3	8	8	95
8m	Asunto	894	643,5	420,6	2	8	8	65
13m	Tietotalo käytävä	917,3	902,4	415,2	8	8	8	95
22m	Tietotalo käytävä	916	601,2	402,6	8	8	8	80

Ei näkökyhteyttä	Bandwidth - Tester								
Etäisyys	Sijainti	Kommentti	TX UDP siirtonopeus avg	RX UDP siirtonopeus avg	TX TCP siirtonopeus avg	MCS min	MCS avg	MCS max	Signal quality avg (%)
1m	Asunto	Ihminen välissä	899,6	913	367	4	6	8	70
5m	Asunto	Välissä betoniseinä, puuovi auki	897,1	953,4	427,7	3	8	8	95
5m	Asunto	Välissä betoniseinä, puuovi kiinni	820	949,2	431,1	8	8	8	80
8m	Asunto	Välissä puuovi	892,4	635,6	412,2	3	8	8	95
10m	Asunto	Kulman takana, puuovi auki	896	906,4	5,4	1	1	3	40
10m	Asunto	Kulman takana, puuovi kiinni	0,078	6,8	0,07	0	0	1	30
30m	Tietotalo käytävä	Kulman takana	802,6	913	366,4	1	3	6	60

LIITE 2: SADAN PING-PAKETIN MITTAUSTULOKSET WIRELESS WIRELLÄ SUORALLA NÄKÖYHTEYDELLÄ

Näköyhteys	Ping 100 pakettia				
Etäisyys	Sijainti	Viive min	Viive keskiarvo	Viive max	Packet loss
1m	Asunto	0	0	2	0
5m	Asunto	0	0	2	0
8m	Asunto	0	0	3	0
13m	Tietotalo käytävä	0	0	3	0
22m	Tietotalo käytävä	0	0	2	0

Ei näköyhteyttä	Ping 100 pakettia					
Etäisyys	Sijainti	Kommentti	Viive min	Viive keskiarvo	Viive max	Packet loss
1m	Asunto	Ihminen välissä	0	0	3	0
5m	Asunto	Välissä betoniseinä, puuovi auki	0	0	3	0
5m	Asunto	Välissä betoniseinä, puuovi kiinni	0	0	2	0
8m	Asunto	Välissä puuovi	0	0	0	0
10m	Asunto	Kulman takana, puuovi auki	0	0	3	0
10m	Asunto	Kulman takana, puuovi kiinni	0	7	57	0
30m	Tietotalo käytävä	Kulman takana	0	0	3	0