Olli-Pekka Valtteri Hakkarainen

5G-teknologia ja V2X-standardi

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

30. huhtikuuta 2019

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Olli-Pekka Valtteri Hakkarainen

Yhteystiedot: olli.p.v.hakkarainen@student.jyu.fi

Työn nimi: 5G-teknologia ja V2X-standardi

Title in English: 5G technology and V2X standard

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 22+0

Tiivistelmä: Mobiliiteknologiat ovat murroksessa, 5G-teknologia on valtava kehitysaskel, joka mahdollistaa uudenlaista tehoa ja luotettavuutta tiedonsiirtoon. 5G-teknologian ja V2X-standardin avulla voidaan myös ratkaista autojen väliseen kommunikaatioon liittyviä ongelmia, ja siten parantaa liikenneturvallisuutta ja liikenteen tehokkuutta. Näiden teknologioiden yhteistoiminnalla voidaan jopa mahdollistaa itseajavat autot.

Avainsanat: 5G, V2X, yhdistetyt autot

Abstract: Mobile technology is facing great changes. 5G technology is a revolutionary step for the better, it provides much greater data rates and reliability for mobile networks. 5G technology together with V2X standard can be used to resolve issues regarding connected vehicles to improve traffic safety and efficiency. These technologies together can even make self driving vehicles a possibility.

Keywords: 5G, V2X, connected vehicles

Kuviot

Kuvio 1. Erilaisia vaatimuksia 5G-teknologian suorituskyvylle ja infrastruktuurille (Choudhury 2015) 4
Kuvio 2. Erilaisia liikennevälineiden kommunikoinnin muotoja (MacHardy ym. 2018) ... 8

Sisältö

1 JOHDANTO 1

2 5G-TEKNOLOGIAT 3
2.1 Verkon tiheyttäminen 4
2.2 Massiivinen MIMO 5
2.3 Millimetriaallot 6

3 V2X-STANDARDI 8
3.1 Hyödyt 9
3.2 Haasteet 10
3.3 Hyödyntäminen itseajavien autojen kehityksessä 11

4 TEKNOLOGIOIDEN YHDISTÄMINEN 12
4.1 NOMA 13
4.2 Kehittynyt V2X 14

5 YHTEENVETO 15

LÄHTEET 16

1 Johdanto

Ajoneuvot, kuten autot, ovat oleellinen osa jokapäiväistä elämäämme. Vaikka emme itse niillä ajaisi, ne vaikuttavat turvallisuuteemme ja elämänlaatuumme. Autojen muuttaminen itseajaviksi on ollut ihmisten unelma jo hyvinkin pitkään. Uhlemann (2017) selvittää, että uudet teknologiat, kuten 5G-teknologia voivat mahdollistaa tämän muutoksen, sillä itseajavien autojen täytyy pystyä siirtämään suuria määriä dataa pienellä viiveellä. Itseajavan auton reagointia voisi helpottaa mobiilinen V2X-standardi(*Vehicle-to-Everything standard*), jossa autot kommunikoivat sekä muiden autojen että ympäristön kanssa. Pandi ym. (2016) toteavat, että tämä yhdistettyjen autojen idea mahdollistaisi paljon tehokkaamman ja turvallisemman liikenteen kuin jos ihmiset tai jopa tavalliset itseajavat autot ajaisivat. Esimerkiksi nykyaikaiset lähes itseajavien autojen kamerat sekä muut havainnointilaitteet ovat lähes hyödyttömiä huonojen sääolosuhteiden vallitessa. Sen lisäksi LiDAR (*Light Detection and Ranging*), kamerat, tutka ja kaikuluotain, joita käytetään ympäristön havaitsemiseen, eivät toimi, jos näkölinja puuttuu, ja ovat alttiita virheille, toteaa Cao ym. (2016). Yhdistetyt autot voisivat jakaa toisilleen tietoa sijainnistaan ja nopeudestaan. Tämän tiedon avulla voitaisiin ennakoida vaaratilanteet ja siten parantaa liikenneturvallisuutta. Sen lisäksi liikennevalojen kanssa kommunikointi voisi ohjata liikennettä pois ruuhkaisemmilta alueilta ja siten vähentää liikenteessä käytettyä aikaa (Uhlemann 2017). Hänen mukaansa liikenneturvallisuus- ja taloudellisten hyötyjen lisäksi autojen, muiden tienkäyttäjien ja infrastruktuurin kanssa kommunikointi on äärimmäisen tärkeä keino parantaa tulevien automaattisten ajoneuvojen turvallisuutta ja helpottaa niiden yhdistämistä olemassa oleviin teknologioihin. Ei ole järkevää olettaa, että itseajavien autojen yleistyessä kaikki autot liikenteessä olisivat itseajavia. Nykypäivänäkin iso ongelma on autokannan vanhuus. Ihmiset eivät välttämättä pysty ostamaan tai halua uutta autoa, joten uusien järjestelmien tulee pystyä toimimaan yhdessä vanhojen järjestelmien kanssa.

V2X-standardin yleistymiseen lienee kuitenkin vielä matkaa V2X-standardin tiukat tiedonsiirtovaatimukset, kuten tiedonsiirto suurissa nopeuksissa pienellä viiveellä ja suuri laitteiden määrä edellyttävät hyvinkin kehittynyttä tukiasemien verkostoa. Uhlemann (2017) kertoo, että Euroopan komission vuonna 2016 hyväksymän Cooperative ITS, eli yhteistyötä hyödyn-

tävän liikennetelematiikan strategian päätavoitteita ovat näiden teknologioiden tarvitseman lainsäädännön valmistelu ja tietoturvallisuusongelmien ratkaisu kansainvälisellä tasolla. Hänen mukaansa näiden teknologioiden laajempi kaupallinen implementointi voitaisiin aloittaa vuoden 2019 aikana, mutta valmistumisajankohdasta ei ole tietoa.

Tutkielman tavoitteena on esitellä 5G-teknologia ja V2X-standardi yleisesti, niiden erilaisia hyötyjä ja haasteita pohtien. Luvussa 2 käydään yleisesti läpi, mikä 5G-teknologia on, mitkä ovat sen avainteknologiat ja miten se liittyy V2X-standardiin ja yhdistettyihin autoihin. Sen jälkeen luvussa 3 kuvaillaan V2X-standardia, mitkä ovat sen tuomat hyödyt, haasteet ja miten sitä voidaan hyödyntää yhdistettyjen autojen kehityksessä. Lopuksi luvussa 4 käsitellään vielä näiden teknologioiden yhdistämistä, jonka jälkeen seuraa yhteenveto-osio.

2 5G-teknologiat

Mobiiliteknologioiden maailma on muuttunut hyvinkin paljon viime vuosikymmenen aikana. Vanhoista teknologioista on siirrytty uudempiin ja kehitys on ollut merkittävää, toteavat Patil, Patil ja Bhat (2012). Nykyään onkin todennäköisempää, että ihmisellä on jonkinlainen älylaite kuin ettei ole. Ihmisten henkilökohtaisten älylaitteiden lisäksi yhdistetyt laitteet, kuten autot, pahentavat ruuhkaa entisestään. Mobiiliyhteyksiä käyttävien laitteiden määrä asettaakin suuria paineita mobiiliverkoille. Patel, Chauhan ja Kapadiya (2012) toteavat, että nykyinen 4G-mobiiliverkko, joka näyttää olevan tulossa tiensä päähän, tuskin pystyy ylläpitämään tätä rajua siirretyn datan määrän kasvua. Suuremman kapasiteetin ja tiedonsiirtokyvyn omaavan, uuden 5G-mobiiliverkon uskotaan pystyvän vastaamaan tähän haasteeseen.

Patil, Patil ja Bhat mukaan 5G-mobiiliteknologia saa nimensä osuvasti siitä, että se on mobiiliteknologioiden viides sukupolvi. Heidän mukaansa nimi ei itsessään viittaa mihinkään tiettyyn spesifikaatioon, vaan yleisesti näihin teknologioihin. Shafi ym. (2017) toteavat, että jokainen sukupolvi on tuonut merkittäviä parannuksia suorituskykyyn verrattuna edelliseen sukupolveen, mutta 5G-teknologia tulee olemaan käänteentekevä edistysaskel verrattuna 4G-teknologiaan.

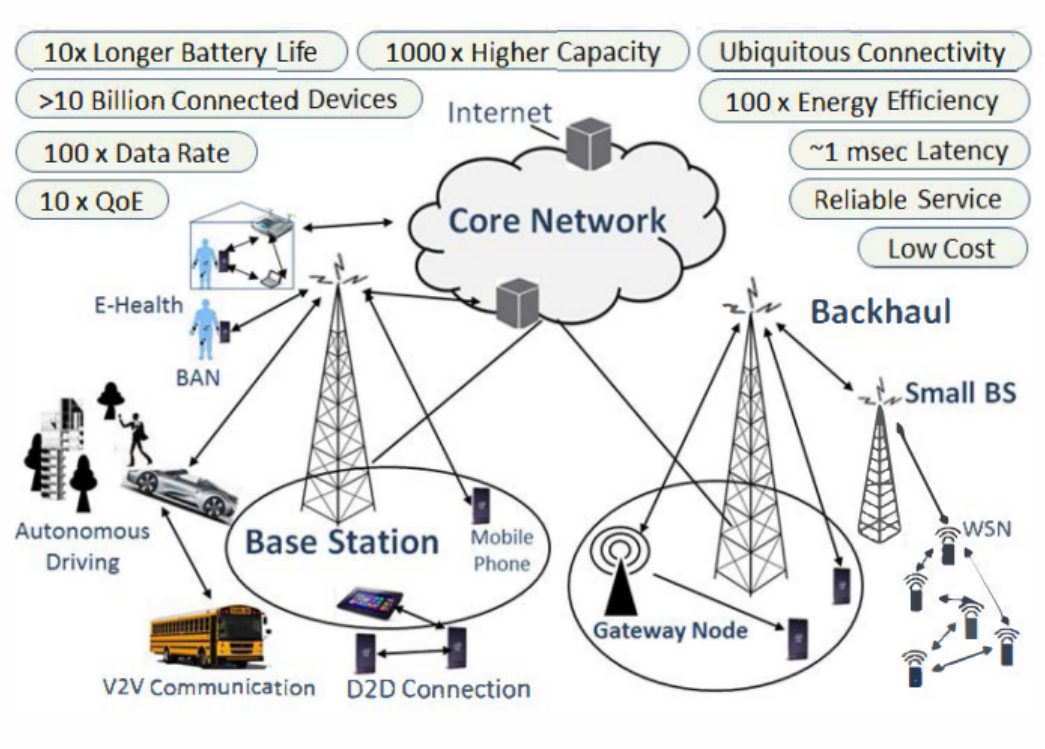
5G-teknologioille on määritelty useita vaatimuksia, jotka kuvastavat hyvin sen edistystä 4G-teknologioihin verrattuna. Kuviosta 1 voidaan nähdä, että 5G-teknologian olisi mahdollistettava kymmenen kertaa pidempi akunkesto yhdistetyille laitteille (*10x Longer Battery Life*), 1000-kertainen kapasiteetti (*1000 x Higher capacity*, kattava yhteys kaikkialla (*Ubiquitous Connectivity*), yli kymmenen miljardia yhdistettyä laitetta (>*10 Billion Connected Devices*), 100-kertainen energiatehokkuus (*100 x Energy Efficiency*), 100-kertainen siirtonopeus (*100x Data Rate*), noin yhden millisekunnin viive (*~1 msec latency*), kymmenkertaien palvelun laatu (*10x QoE*), luotettava yhteys (*Reliable Service*) ja matalat kustannukset (*Low Cost*)

Kuten aiemmin mainittiinkin, mobiiliverkkoja käyttävien laitteiden määrä on kasvanut merkittävää vauhtia. Sen lisäksi Rappaport ym. (2015) ennustavat vuosittain siirretyn datan määrän kasvavan jopa yli 291,8 eksatavun. Tämä suuri tietoliikenteen määrä vaatinee uusia ratkaisuja tietoliikenneteknologioiden saralla. Rappaport, Roh ja Cheun (2014) toteavat, et-

tä mikään nykyisistä ratkaisuista yksinään, kuten antennien määrän lisääminen, älykkäämpi viestintä laitteiden välillä tai pienempien lähettimien käyttäminen, ei ole kestävä ratkaisu. He toteavat, että lähettimien määrän kasvattamisen lisäksi uusien taajuuksien käyttöönotto on välttämätöntä. Shafi ym. (2017) mukaan kolme tärkeintä tekniikkaa 5G-teknologian onnistumisen kannalta ovat verkon tiheyttäminen, massiivinen MIMO (*Multiple-Input,Multiple-Output*), ja millimetriaaltojen, eli 28-300 GHz taajuuksien käyttäminen.

2.1 Verkon tiheyttäminen

Suuri käyttäjämäärä on ongelma, johon on useita ratkaisuja. Yksi niistä on verkon tiheyttäminen, eli pienten solutukiasemien käyttäminen (*Small BS, tai Small Base Station*), jonka toimintaa kuviosta 1 voidaan havainnoida. Bhushan ym. (2014) mukaan eri keinoja kasvattaa verkon kapasiteettia, kuten isomman kaistanleveyden käyttämistä (*s*pectral aggregation) ja tukiasemien lisäämistä yhdistettynä kutsutaan yleisesti verkon tiheyttämiseksi. Tukiasemien



Kuvio 1. Erilaisia vaatimuksia 5G-teknologian suorituskyvylle ja infrastruktuurille (Choudhury 2015)

tiheyttä alueella voidaan parantaa kasvattamalla lähettimien määrää sekä kohdelaitteissa että yhdyspisteillä. Shafi ym. (2017) mukaan liian montaa tukiasemaa ei kuitenkaan ole järkevää lisätä pienelle alueelle, sillä jokainen signaalinlähde voi aiheuttaa häiriöitä (*i*nterference) toisille lähettimille, mikä puolestaan vähentää kapasiteettia sen lisäämisen sijaan. Heidän mukaansa on kuitenkin tekniikoita, joilla tätä häiriötä voidaan vähentää, kuten vuorottelualgoritmeja. Ehkäpä tukiasemia on siis järkevä lisätä kriittisiin paikkoihin, eikä suinkaan kaikkialle.

Verkon tiheyttämisellä voidaan saada aikaan suuria parannuksia tiedonsiirrossa tukiasemilta laitteille. Jotta voitaisiin saada parempi käyttäjäkokemus aikaiseksi hyödyntäen tätä tehokkaampaan tiedonsiirtoa, täytyy taustalla olla hyvä runkoliityntäyhteys (*Backhaul*). Bhushan ym. (2014) mukaan tähän on olemassa kaksi pääasiallista ratkaisua, joista toinen on pilven hyödyntäminen (*Cloud-RAN -architecture*) ja toinen on hyödyntää pieniä liityntäsoluja runkoyhteyden luomiseen. Pienten liityntäsolujen käyttäminen tarkoittaisi pienten solutukiasemien sijoittamista esimerkiksi lamppupylväisiin, joiden ainoa tarkoitus olisi viedä yhteyttä piensolutukiasemilta pääasialliselle tukiasemalle.

2.2 Massiivinen MIMO

Mobiiliverkkoon yhdistettyjen laitteiden määrän, ja siten vastaanotettujen ja lähetettyjen syötteiden määrän kasvaessa mobiiliverkon tukiasemien tihentäminen, eli määrän lisääminen ei välttämättä riitä, vaan antennien määrää lähettimillä lienee myös aiheellista kasvattaa. Näin toimii massiivinen MIMO.

MIMO on pitkälle tutkittu teknologia, josta on tullut oleellinen osa kommunikaatiostandardeja. Tämä liittyy sen kykyyn kasvattaa merkittävästi langattomien järjestelmien kapasiteettia ja luotettavuutta, toteavat Lu ym. (2014). MIMO onkin siis nykyäänkin käytössä oleva teknologia, mutta massiivinen MIMO tarkoittaa teknologian laajentamista entisestään. Rusek ym. (2012) mukaan nykyinen LTE-standardi sallii jopa kahdeksan antennia tukiasemalla. Mitä enemmän antenneja, sitä parempi tiedonsiirtokyky ja luotettavuus. Massiivisen MIMOn myötä tulisi mahdolliseksi käyttää jopa yli 100 antennia, jotka toisivat mukanaan aivan uudenlaista suorituskykyä, mutta myös omat ongelmansa, selvittävät Lu ym. (2014).

Heidän mukaansa nämä massiiviset MIMO -järjestelmät mahdollistaisivat jopa 17 megabittia sekunnissa datansiirtonopeuden jokaiselle 50 käyttäjälle 20 megahertsin laajuisella kaistalla, ja 730Mb/s datansiirtonopeuden yksittäistä solua kohti. Nämä antennit myös tarjoaisivat suuren spektrisen tehokkuuden, jopa 26,5 bittiä sekunnissa yhtä hertsiä kohti.

Massiivisilla MIMO -järjestelmillä on kuitenkin joitakin perustavanlaatuisia ongelmia, jotka vielä kaipaavat vastauksia. Lu ym. (2014) mukaan näihin kuuluvat signaalin etenemismallit, ongelmat liittyen signaalien erotteluun käyttäen TDD (*Time-division duplexing*) ja FDD (*Frequency-division duplexing*) -järjestelmiä, modulaatio, eli signaalin kantaminen, *pilot contamination*, eli solujen sisäisen häiriön ilmeneminen, antennitekniikkaan liittyvät ongelmat ja antennien sijoitteluun liittyvät ongelmat. Näistä monet ongelmat liittyvät signaalinyhdistelyyn eli sitä varten lienee aiheellista kehitellä vielä parempia algoritmeja ratkaisemaan nämä ongelmat. Lu ym. (2014) toteavatkin lisätutkimuksen olevan tarpeellista.

2.3 Millimetriaallot

Aiemmin esiteltiin joitakin tapoja kasvattaa verkon kapasiteettia ja suorituskykyä, ja siten vastata suureen käyttäjämäärän kasvuun. Nykyaikana kuitenkin kaikki mobiilitietoliikenne sijoittuu alle 6 GHz:n taajuuksille johtuen niiden suotuisista ominaisuuksista, toteaa Choudhury (2015). Hänen mukaansa nämä taajuudet ovat jo nykyaikana hyvinkin ruuhkaisia, joten laitteiden ja lähettiminen määrän kasvattaminen ei tulisi onnistumaan käyttämällä näitä taajuuksia. Kaistaa lieneekin siis aiheellista etsiä jostakin toisaalta. Lähestulkoon käyttämätön millimetriaaltojen spektri mahdollistaisi kapasiteetin kasvattamisen johtuen suuresta mahdollisesta kaistanleveydestä, toteavat Rappaport ym. (2015).

Uudet edistykset mobiiliteknologioiden saralla ovat mahdollistaneet suurempien, mahdollisesti kymmenien GHz:n taajuuksien ja millimetriaaltojen hyödyntämisen, selvittää Choudhury (2015). Hänen mukaansa tyypillinen spektri voisi kasvaa jopa moninkertaiseksi. Ottamalla käyttöön suuremmat taajuudet voitaisiin mahduttaa kaikki tietoliikenne ja siten mahdollistaa suurempi käyttäjämäärä. Millimetriaaltojen hyödyntämisessä on kuitenkin haasteensa. Bhushan ym. (2014) mukaan millimetriaallot ovat hyvin herkkiä esimerkiksi vaimenemiselle (*p*ath loss) ja ympäristön esteille, kuten rakennuksille. Tämä kannattaa ottaa

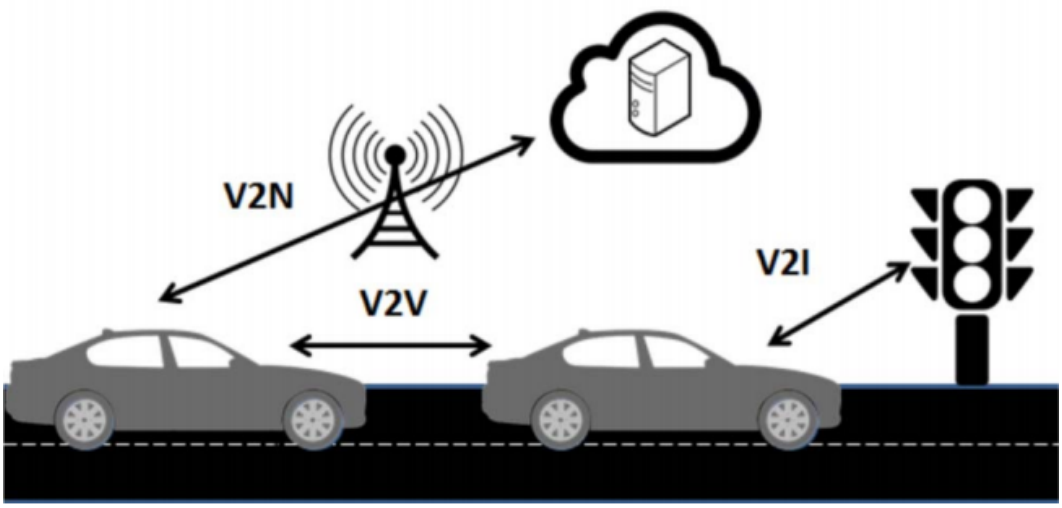
huomioon uusia tukiasemia pystyttäessä.

3 V2X-standardi

Nykyaikana, kun entistä useampia laitteita pyritään yhdistämään internetiin, kiinnostus itseajaviin ja yhdistettyihin autoihin on kasvanut. Nykyään olemmekin lähempänä kuin ikinä oikeita itseajavia autoja. Kaksi uusinta teknologiaa autojen alalla ovatkin ajoneuvojen autonomia ja V2X-standardi (*Vehicle-to-everything*) -standardi, joka tarkoittaa autojen kommunikointia ympäristön ja muiden kulkuvälineiden kanssa.

V2X-standardi voidaan jakaa neljään luokkaan, vehicle-to-vehicle (*V2V*), vehicle-to-pedestrian (*V2P*), vehicle-to-infrastructure (*V2I*) ja vehicle-to-network (*V2N*). Kuviosta 2 nähdään, miten nämä kaikki pyrkivät vaikuttamaan positiivisesti liikenneturvallisuuteen ja liikenteen tehokkuuteen. V2V viittaa autojen väliseen kommunikointiin, joka on jatketta aiemmasta device-to-device-kommunikaatiosta (*D2D communication*) (Uhlemann 2017). Hänen mukaansa poiketen D2D-kommunikaatiosta, V2V pyrkii vastaamaan kommunikaatiovaatimuksiin suurissa nopeuksissa.

Liikennevälineiden kommunikointi toistensa, ympäristönsä ja infrastruktuurin välillä tuo monia hyötyjä, joita käydään seuraavaksi läpi, jonka jälkeen esitellään joitakin haasteita standardin yleistymiselle.



Kuvio 2. Erilaisia liikennevälineiden kommunikoinnin muotoja (MacHardy ym. 2018)

3.1 Hyödyt

Nykypäivänä liikenteessä ajan viettämistä ei voida välttää. Keskivertoihminen viettää liikenteessä 60–90 minuuttia päivässä, ja matkustaa noin 35 kilometriä päivässä, selviää tutkimuksesta, jonka tekivät Wedel, Schünemann ja Radusch (2009). Liikenteen tehokkuuden kasvattamisesta voitaisiin siis saada merkittäviä ajallisia hyötyjä koko yhteiskunnan tasolla. V2X-standardi tuokin monia hyötyjä muunmuassa tieturvallisuuteen ja liikenteen tehokkuuteen liittyen.

Ruuhkien ilmeneminen on yleinen ongelma isommissa kaupungeissa, joissa autoja on enemmän ja työmatkaliikennettä esiintyy. Tätä ajan tuhlausta voitaisiin kenties välttää, jos autot jakaisivat tietoa omasta nopeudestaan, sijainnistaan sekä suunnastaan infrastruktuurille. Wedel, Schünemann ja Radusch (2009) mukaan reittejä ruuhkien välttämiseksi voidaan laskea paljon dynaamisemmin ja älykkäämmin kuin nykyisillä järjestelmillä. Hänen mukaansa toinen etu yhdistetyistä autoista olisi se, ettei kiinteää infrastruktuuria tarvitsisi olla kaikkialla, vaan informaation jakamisesta voitaisiin hyötyä kaikkialla, missä yhdistettyjä autoja on, sillä autot kommunikoisivat keskenään. Ruuhkien välttämisen sivuvaikutuksena voitaisiin kenties myös huomioida ilmastovaikutukset. Autojen viettäessä vähemmän aikaa ruuhkassa, päästöt vähentyisivät.

Autojen kommunikointi toistensa ja ympäristönsä kanssa voisi auttaa myös liikenneturvallisuuden parantamisessa. Autolla ajaminen vaatii tarkkaavaisuutta kuljettajalta, jotta voidaan välttyä vaaratilanteilta. Jos nämä vaaratilanteet voitaisiin ennakoida, voitaisiin kenties vähentää liikenneonnettomuuksien määrää. Uhlemann (2017) mukaan autot voisivat esimerkiksi viestiä jarruttamisesta takana olevalle autolle, jolloin törmäysriski pienenee. Kommunikointi auttaa myös esimerkiksi kääntymistilanteissa tai kuolleen kulman huomioimisessa ohituksien yhteydessä, kun ei tarvitsisi luottaa siihen, että ihminen havaitsee toisen auton. Cao ym. (2016) toteaa, että autot voisivat jakaa tietoa jopa näkölinjan ulkopuolelta. Näin voitaisiin vähentää myös vaaratilanteita vaarallisilla risteysalueilla.

Kommunikoinnilla jalankulkijoiden kanssa voisi olla myös eräänlaisia psykologisia hyötyjä, esimerkiksi Uhlemann (2017) mukaan Semcon tutkimuksessa selvisi, että hyvin suuri osa jalankulkijoista katsoo pysähtyneen auton kuskia silmiin ylittäessään tien. Tämän pohjalta

he kehittivätkin hymyilevän auton konseptin, joka tarkoittaa, että kun auto havaitsee jalankulkijan, auto muodostaa hymyilmeen esimerkiksi valoilla auton etuosassa, joka taas viestii jalankulkijoille turvallisuudesta. Tämä voisi olla hyvinkin toimiva ratkaisu, joka vaikuttaisi positiivisesti jalankulkijoiden mielikuvaan tieturvallisuudesta.

3.2 Haasteet

V2X-standardi tuo mukanaan hyvinkin merkittäviä hyötyjä, mutta on vielä joitakin haasteita, jotka täytyy ratkaista ennen kuin standardi voi yleistyä. MacHardy ym. (2018) mukaan suurimmat suorituskykymittarit, joihin täytyy vastata, ovat kapasiteetti, viive, turvallisuus, yksityisyys sekä taloudelliset vaikutukset. Monet näistä mittareista liittyvätkin 5G-infrastruktuuriin, jota ollaan parhaimmillaan rakentamassa.

Liikennevälineiden välinen kommunikointi vaatii pienen viiveen viestejä lähetettäessä, onhan kyseessä liikenneturvallisuuteen liittyvä tekijä, jos viestin vastaanottaminen myöhästyy, voi sillä olla vakavia seurauksia. MacHardy ym. (2018) toteavat, että infrastruktuurin ollessa puutteellinen, ongelmaksi voi nousta viestien määrän kasvaessa kaistan puute ja viive viesteissä. Heidän mukaansa lyhyen kantaman tiedonsiirtojärjestelmien (*Dedicated short-range communications, DSRC*) ollessa puutteellisia ongelmaksi voi nousta myös muiden kulkuneuvojen viestien oikeaksi toteaminen. Verrattuna DSRC:hen esimerkiksi LTE on paljon paremmin skaalautuva, vaikkakin sillä on myös ruuhkautumiseen liittyviä ongelmia. MacHardy ym. (2018) mukaan on arvioitu, että yhden LTE-solun pitäisi pystyä käsittelemään jopa 3400 autojen välistä viestiä sekunnissa. Simulaatiotulokset kertovat myös, että nykyisillä järjestelmillä voitaisiin palvella jopa 150 autoilijaa tarvittavan pienellä viiveellä.

Liikennevälineiden välinen kommunikaatio lienee vaativan kattavaa tilannetietoa toisista autoista, ja niiden liikkeistä. Kun dataa jaetaan autoilta toisille ja infrastruktuurille jatkuvasti, on aiheellista huomioida tietoturva. Weimerskirch (2011) toteaa, että V2X-standardiin liittyen yksityisyys voidaan jakaa kahteen osaan, jotka ovat yksityisyys kolmansia osapuolia kohtaan, ja yksityisyys auktoriteettia kohtaan. Lefevre ym. (2013) tutkimuksesta selviää, että yksityisyys on hyvin tärkeä kriteeri ajoneuvojen langattomassa kommunikaatiossa. Heidän mukaansa tähän ongelmaan onkin jo useita ratkaisuita, kuten esimerkiksi autoilijoiden ni-

mien piilottaminen eräänlaisten salanimien alle, jotka vaihtuisivat tietyn välimatkan tai ajan jälkeen. Tämä lienee järkevä ratkaisu, sillä jos näitä autojen välisiä kommunikaatioita onnistuttaisiin sieppaamaan, niistä voitaisiin kenties saada hyvinkin paljon tietoa autojen käyttäjistä. Käyttäjien tietojen piilottamisen lisäksi viranomaisten ei pitäisi pystyä yksipuolisesti keräämään näitä käyttäjien tietoja.

Jotta autot pystyisivät kommunikoimaan keskenään tehokkaasti, ja turvallisesti, on tarpeellista, että kaikissa autoissa on riittävän korkea teknologinen varustelu. MacHardy ym. (2018) toteavat tutkimuksessaan, että yksityisen autoilijan kustannukset riittävän tehokkaiden lähettimien asentamiseksi olisivat hyvinkin marginaaliset, mutta avaininfrastruktuurin rakentamisen ja ylläpidon kustannukset asettavat isoimman esteen standardin käyttöönotolle. Heidän mukaansa ei ole vielä selvää, kuka rahoittaa tämän infrastruktuurin, mutta se on selvitettävä, ennen kuin voidaan saada aikaan toimivaa ratkaisua. Ei ole välttämättä taloudellista rakentaa samanlaista infrastruktuuria kaikkialle, mutta järjestelmien tulisi pystyä toimimaan silti kaikkialla.

3.3 Hyödyntäminen itseajavien autojen kehityksessä

Lähivuosina on esiintynyt suurta kiinnostusta itseajavia autoja kohtaan sekä autoteollisuudelta että tutkijoilta, toteaa Hobert ym. (2015). Kenties kiinnostus on aiheellista, sillä itseajavat autot voivat mahdollisesti parantaa liikenneturvallisuutta merkittävästi. Nykyaikaisten itseajavien autojen ympäristönhahmotuskyky perustuu pääasiassa erilaisiin sensoreihin ja tutkiin, jotka kartoittavat aluetta autolle. Tämä voi rajoittaa auton hahmotuskykyä muun muassa tilanteissa, joissa ei ole suoraa näköyhteyttä edessä oleviin autoihin, kuten ketjussa-ajotilanteissa.

Itseohjautuvien autojen lisäksi eräät autovalmistajat ovat hahmotelleet täysin itsestäänajavia kulkuneuvoja kaupunkeihin, jotka toimisivat esimerkiksi takseina. Näille kulkuneuvoille kommunikointi ympäristön kanssa on elintärkeää, sillä niiden täytyy pystyä toimimaan itsestään, ilman valvontaa. Kommunikointia voitaisiin myös hyödyntää näiden autojen kutsumisessa.

4 Teknologioiden yhdistäminen

V2X-standardi on teknologia, jolla voidaan parantaa liikenneturvallisuutta ja liikenteen tehokkuutta merkittävästi. Yhdistetyt kulkuneuvot ovatkin yksi nopeimmin kasvavimmista yhdistettyjen laitteiden tyypeistä, toteavat Luoto ym. (2016). V2X-standardi on nähty myös tärkeänä osana tulevaisuuden älykkäitä kuljetusjärjestelmiä (*ITS, Intelligent Transportation Systems*. Näin ollen V2X-standardin kehittäminen on erittäin tärkeää. Monia teknologioita on kaavailtu ylläpitämään tätä kulkuneuvojen välistä kommunikointia.

DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*), joka tarkoittaa lyhyen kantaman tiedonsiirtoteknologiaa, on jo pitkälle kehitetty, ja se nähtiinkin hyvänä teknologiana ylläpitämään V2X-kommunikaatiota. Di ym. (2017) mukaan DSRC on suunniteltu erityisesti vastaamaan näistä kulkuneuvojen turvallisuuskriittisistä toiminnoista. Yhdistettyjen autojen kommunikaatio usein sisältää tietoja kulkuneuvon tilasta, kuten nopeudesta ja suunnasta. Viestejä on kahdenlaisia, tapahtumien laukaisemia (*CAM, Cooperative Awareness Message*), kuten jarrutusvaroitus, ja yleisiä tiedonjakamisilmoituksia (*DENM, Decentralized Environmental Notification Message*). DSRC:n heikkouksista ja viestien mahdollisista törmäyksistä johtuen palvelun laatu voi heikentyä merkittävästi, eikä tällä hetkellä ole selviää kehityssuuntaa, jolla näihin ongelmiin voitaisiin vastata. Luoto ym. (2016) toteavat, että viimeaikaiset tutkimukset ovat todenneet LTE-verkon paremmaksi vaihtoehdoksi johtuen siitä, että sen vaatima infrastruktuuri on jo laajalti olemassa. Di ym. (2017) selvittävät kuitenkin, ettei LTE-verkko pystyisi ylläpitämään suurta yhdistettyjen kulkuneuvojen määrää. LTE on OMA(*Orthogonal Multiple Access*)-pohjainen järjestelmä, joka tarkoittaa, että laitteet jakavat tietoa kohtisuoraan toisilleen, mikä johtaa ongelmiin johtuen rajoittuneesta kaistanleveydestä. Yhteydessä voi ruuhkan kasvaessa ilmentyä suurta viivettä, joka aiheuttaa suuria haasteita turvallisuuskriittisille toiminnoille, kuten peräänajon estämiselle. NOMA(*Non-Orthognal Multiple Access*) -järjestelmiä on esitetty ratkaisuksi tähän ongelmaan.

4.1 NOMA

NOMA-järjestelmiä esitelty lupaavaksi radioyhteysteknologiaksi langattomille 5G-järjestelmille. Kizilirmak (2016) toteaa, että käytännön implementaatio vaatii suurta laskentatehoa ja hyviä häiriönestoalgoritmeja. Implementaation uskotaan onnistuvan, kun 5G-verkon infrastruktuuri on valmis, sillä 5G-verkko tarjoaa tarvittavan suuren kapasiteetin ja tiedonsiirtonopeuden.

Aiemmin esitellyissä OMA-järjestelmissä on monia eroja verrattuna NOMA-järjestelmiin. Di ym. (2017) mukaan LTE:ssä tietoa tyypillisesti jaetaan ei-limittäisissä aikaikkunoissa, joiden synkronoiminen tuottaa suuria haasteita erityisesti lähetettäessä. NOMA-järjestelmissä käytetään häiriönestojärjestelmiä, kuten SIC(*Successive Interference Cancellation*) -vastaanotinta, joka kykenee erottamaan lähettäjät ja vastaanottajat toisistaan. Kaistanhallinta eroaa näissä järjestelmissä siten, että NOMA, toisin kuin OMA sallii useita käyttäjiä tietyllä taajuusalueella, joka tarjoaa suuremman spektrisen tehokkuuden.

Tehonhallinta ja yhteydenjako ovat myös hyvin erilaisia NOMA-järjestelmissä. Tehonhallintaa varten on vielä suunniteltava uusia strategioita johtuen siitä, että tiheässä verkossa häiriöiden estäminen saa aikaan haasteita Tehonhallinnalle. Yhteyksiä jakaessa tarvitaan aiempaa tietoa sekä lähettäjästä, että vastaanottajasta. Yleisesti OMA-järjestelmissä tämän tiedon tarjoaa tukiasema, mutta se aiheuttaa suurta viivettä V2X-laitteissa. NOMA-järjestelmissä tiedonjakaminen voisi tapahtua järkevämmin käyttäjältä toiselle.

Tehon jakaminen eri lähetyksille on haaste tukiasemalle. Mille lähetykselle annetaan eniten tehoa? Yleisesti NOMA-siirtoyhteydessä annetaan eniten tehoa signaalille, joka lähetetään pisimmän matkan päähän. Tukiaseman signaalin lähetys voidaan kirjoittaa muotoon

$$x(t) = \sum_{k=1}^{K} \sqrt{a_k P_T x_k(t)}, \tag{4.1}$$

missä $x(t)$ yksilöity informaatio, a_k on käyttäjän laitteen tehonjakomuuttuja ja P_T on kokonaisteho, joka on saatavilla tukiasemalla. Tehonjakomuuttuja a_k määräytyy käyttäjälaitteen etäisyyden mukaan, ja yhteydelle osoitettu teho on siten $P_k = a_k P_T$.

4.2 Kehittynyt V2X

Kuten aiemmin mainittiin, LTE-verkkoa kaavailtiin alunpelin hyväksi järjestelmäksi V2X-standardin ylläpitämiseen, mutta kanavien ruuhkautumisongelmat tulivat esteeksi. Ratkaisuksi tähän ongelmaan onkin kaavailtu 5G-teknologiaan pohjautuvan NR(New Radio)-V2X-standardin ottamista käyttöön. NR-V2X-standardin ei ole kuitenkaan tarkoitus korvata LTE-V2X-standardia, vaan pikemminkin täydentää sitä. Näin saavummekin alaluvun aiheeseen, kehittyneeseen V2X-standardiin(*eV2X*), jonka on lopulta tarkoitus tarjota 5G-V2X ratkaisuja.

NR-V2X on tarkoitettu erityisesti mahdollistamaan itseajavat autot, ja 5GAA(*5G Automotive Association*) on määritellyt sille useita vaatimuksia eri käyttötarkoituksiin. Ketjussa ajamisessa viive saisi olla korkeintaan kymmenen millisekuntia, luotettavuuden täytyisi olla 99,99% ja datansiirtonopeuden pitäisi yltää 65 megabittiin sekunnissa. Edistyneessä ajamisessa, kuten muiden autojen kanssa toimimisessa, viive saisi olla korkeintaan kolme millisekuntia, luotettavuuden täytyisi olla 99,999% ja datansiirtonopeuden pitäisi olla vähintään 53 megabittiä sekunnissa. Itseajavan auton laajennetulle ympäristönhavainnoinnille vaatimukset ovat vielä kovemmat. Viive saisi olla korkeintaan kolme millisekuntia, ja luotettavuuden pitäisi olla 99,999%, mutta datansiirtonopeuden pitäisi yltää jopa 1000 megabittiin sekunnissa, jotta autot pystyisivät jakamaan informaatiota toisilleen tehokkaasti.

5GAA:n mukaan yhteistoiminta NR-V2X-standardin ja LTE-V2X-standardin välillä voidaan järjestää hyvinkin joustavasti. Vanhemmat autot voivat toimia vaikka pelkällä LTE-V2X-standardilla, joka riittää ylläpitämään perustavanlaatuisia turvallisuustoimintoja. Uudet autot voidaan varustaa sekä NR-V2X että LTE-V2X -järjestelmillä, jolloin uuden teknologian sopeuttaminen vanhaan voidaan myös järjestää.

5 Yhteenveto

Mobiiliteknologiat ovat parhaillaan murroksessa. Edessä on käänteentekevä edistysaskel, 5G-teknologia, joka tarjoaa hyvinkin suuria parannuksia tehokkuuteen ja luotettavuuteen. 5G-teknologian taustalla vaikuttaa useita merkittäviä tekniikoita, eikä nimi viittaakaan vain yhteen menetelmään. 5G-teknologian tehoa hyödyntämällä voidaan myös mahdollistaa parannuksia liikenteeseen hyödyntämällä kulkuneuvojen välistä kommunikaatiota, eli V2X-standardia. V2X-standardi parantaa liikenneturvallisuutta ja liikenteen tehokkuutta merkittävästi. Liikenteessä vietettyä aikaa ja liikenneonnettomuuksien määrää voidaan vähentää. Teknologiat voidaan viedä entistä pidemmälle hyödyntämällä niitä järkevästi yhdessä vanhempien teknologioiden, kuten LTE:n kanssa. Näin voidaan mahdollistaa jopa itseajavat autot.

Lähteet

Wedel, Jan W, Björn Schünemann ja Ilja Radusch. 2009. “V2X-based traffic congestion recognition and avoidance”. Teoksessa *2009 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks,* 637–641. IEEE.

Weimerskirch, André. 2011. “V2X security & privacy: the current state and its future”. Teoksessa *ITS World Congress, Orlando, FL.*

Bhushan, Naga, Junyi Li, Durga Malladi, Rob Gilmore, Dean Brenner, Aleksandar Damnjanovic, Ravi Teja Sukhavasi, Chirag Patel ja Stefan Geirhofer. 2014. “Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G”. *IEEE Communications Magazine* 52 (2): 82–89.

Cao, Hanwen, Sandip Gangakhedkar, Ali Ramadan Ali, Mohamed Gharba ja Josef Eichinger. 2016. “A 5G V2X testbed for cooperative automated driving”. Teoksessa *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC),* 1–4. IEEE.

Choudhury, Debabani. 2015. “5G wireless and millimeter wave technology evolution: An overview”. Teoksessa *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium,* 1–4. IEEE.

Di, Boya, Lingyang Song, Yonghui Li ja Zhu Han. 2017. “V2X meets NOMA: Non-orthogonal multiple access for 5G-enabled vehicular networks”. *IEEE Wireless Communications* 24 (6): 14–21.

Hobert, Laurens, Andreas Festag, Ignacio Llatser, Luciano Altomare, Filippo Visintainer ja Andras Kovacs. 2015. “Enhancements of V2X communication in support of cooperative autonomous driving”. *IEEE communications magazine* 53 (12): 64–70.

Kizilirmak, Refik Caglar. 2016. “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks, Towards 5G Wireless Networks - A Physical Layer Perspective”. *IntechOpen.*

Lefevre, Stéphanie, Jonathan Petit, Ruzena Bajcsy, Christian Laugier ja Frank Kargl. 2013. “Impact of v2x privacy strategies on intersection collision avoidance systems”. Teoksessa *2013 IEEE Vehicular Networking Conference,* 71–78. IEEE.

Lu, Lu, Geoffrey Ye Li, A Lee Swindlehurst, Alexei Ashikhmin ja Rui Zhang. 2014. “An overview of massive MIMO: Benefits and challenges”. *IEEE journal of selected topics in signal processing* 8 (5): 742–758.

Luoto, Petri, Mehdi Bennis, Pekka Pirinen, Sumudu Samarakoon, Kari Horneman ja Matti Latva-aho. 2016. “System level performance evaluation of LTE-V2X network”. Teoksessa *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference,* 1–5. VDE.

MacHardy, Zachary, Ashiq Khan, Kazuaki Obana ja Shigeru Iwashina. 2018. “V2X access technologies: Regulation, research, and remaining challenges”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20 (3): 1858–1877.

Pandi, Sreekrishna, Frank HP Fitzek, Christopher Lehmann, David Nophut, Domokos Kiss, Viktor Kovacs, Akos Nagy, Gabor Csorvasi, Miklós Tóth, Tamas Rajacsis ym. 2016. “Joint design of communication and control for connected cars in 5G communication systems”. Teoksessa *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016 IEEE,* 1–7. IEEE.

Patel, Saurabh, Malhar Chauhan ja Kinjal Kapadiya. 2012. “5G: Future mobile technology-vision 2020”. *International Journal of Computer Applications* 54 (17).

Patil, Suvarna, Vipin Patil ja Pallavi Bhat. 2012. “A review on 5G technology”. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* 1 (1): 26–30.

Rappaport, Theodore S, George R MacCartney, Mathew K Samimi ja Shu Sun. 2015. “Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design”. *IEEE Transactions on Communications* 63 (9): 3029–3056.

Rappaport, Theodore S, Wonil Roh ja Kyungwhoon Cheun. 2014. “Mobile’s millimeter-wave makeover”. *IEEE Spectrum* 51 (9): 34–58.

Rusek, Fredrik, Daniel Persson, Buon Kiong Lau, Erik G Larsson, Thomas L Marzetta, Ove Edfors ja Fredrik Tufvesson. 2012. “Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays”. *arXiv preprint arXiv:1201.3210.*

Shafi, Mansoor, Andreas F Molisch, Peter J Smith, Thomas Haustein, Peiying Zhu, PD Silva, Fredrik Tufvesson, Anass Benjebbour ja Gerhard Wunder. 2017. “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35 (6): 1201–1221.

Uhlemann, Elisabeth. 2017. “Initial steps toward a cellular vehicle-to-everything standard [connected vehicles]”. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 12 (1): 14–19.