

Matti Keskikuru

5G-TEKNOLOGIA SISÄVESILIIKENTEESSÄ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Helena Leppäkoski
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Matti Keskkikuru: 5G-teknologia sisävesiliikenteessä
kandidaatintyö, 24 sivua
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2023

5G-teknologian yleistyminen mahdollistaa monien liikumismuotojen kehittämisen älykkämpiä vaihtoehtoja kohti. Kuitenkin sisävesiliikenteen käyttämät tietoliikenneverkot ovat jääneet vanhempien yhteyksien varaan. Sisävesiliikenteen kehitys vaatii uuden hyvän verkkoyhteyden, joka on luotettava ja sitä voidaan käyttää myös tulevaisuuden innovaatioissa, kuten alusten autonomisessa ohjauksessa. Verkon täytyy myös olla tietoturvallinen sisävesiliikenteelle. 5G on nopea, luotettava, pieni viiveinen ja suuri kapasiteettinen verkkoyhteys, joka saadaan tietoturvalliseksi, mikäli sitä kehitetään jatkuvasti. Satelliittien ja 5G:n avulla paikannustarkkuuskin saadaan erittäin tarkaksi.

Tässä työssä tutkitaan 5G:n sovelluksia sisävesiliikenteessä ja sen haasteita ja mahdollisuuksia, jotka liittyvät sen kantamaan, tietoturvallisuuteen, kustannuksiin ja paikantamiseen. 5G:n kantama on ongelma, sillä 5G signaalit eivät kulje pitkiä matkoja korkean taajuutensa vuoksi. 5G:n asentaminen sisävesialueilla maksaa paljon, koska tukiasemia täytyy olla useampia kuin edellisillä mobiiliverkoilla, koska 5G:llä on lyhyempi kantama. Lopussa vertaillaan 5G:tä edellisen sukupolven mobiiliverkkoon ja esitellään kaksi 5G:n onnistunutta hyödyntämistä sisävesialueilla. 5G:n hyödyntämisesimerkit ovat proomun automatisoitu satamaan ohjaaminen ja vesistöjä siivoavien robottien hallinta Singaporessa.

Tutkimisen tuloksena todetaan 5G:n sopivan hyvin sisävesialueille. Kuitenkin syrjäiset joet ja isot järvet muodostuvat ongelmaksi 5G:n pienelle kantamalle. Vaikeakulkuisille alueille tukiasemien rakentaminen on kallista. Ratkaisuksi tarvitaan uusi teknologinen kehitys 5G:n kantaman parantamiseksi. Vaihtoehtoisesti jotkut sisävesialueet voidaan jättää ilman 5G-verkkoa ja käyttää niissä muita teknologioita. 5G:n ongelmaksi muodostuu myös sähkönkulutuksesta aiheutuvat kustannukset, jotka kuitenkin voidaan ratkaista verkon tarkalla suunnittelulla.

Avainsanat: 5G, sisävesiliikenne, sisävesi, autonomiset alukset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VERKKOYHTEYDEN MERKITYS SISÄVESILIIKENTEELLE	3
2.1 Sisävesiliikenne	3
2.2 Navigointi	4
2.3 Turvallisuus	4
2.4 Autonomisuus	5
3. 5G-TEKNOLOGIA	8
3.1 Tietoverkkojen termistöä	8
3.2 5G:n perustietoa	9
3.3 5G-verkon rakenne	11
3.4 5G-verkon ominaisuudet	12
4. 5G:N MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET SISÄVESILÄ	15
4.1 Tämänhetkinen sisävesiliikenteen viestintä	15
4.2 Verkon lyhyt kantama teknisenä haasteena	16
4.3 Tietoturvallisuus	17
4.4 Kustannukset	18
4.5 5G paikantaminen	19
4.6 5G ja LTE vertailu sisävesillä	21
4.7 Esimerkit 5G:n hyödyntämisestä sisävesiverkossa	21
5. YHTEENVETO	24
LÄHTEET	25

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Autonomisen aluksen laitteet (Peeters et al., 2020, s. 13)</i>	6
Kuva 2.	<i>5G:n Käyttötapaukset (Oughton & Russell, 2020, s. 2)</i>	11
Kuva 3.	<i>5G ja 4G maksimikantama ja nimellisnopeudet (Eloranta et al., 2020, s. 10)</i>	13
Kuva 4.	<i>Tyypillisiä merenkulun radioviestintätekniikoita (Chen et al., 2021, s. 2)</i>	15
Kuva 5.	<i>Jangtse joki ja sen ympäristö (Chen et al., 2021, s. 3)</i>	17
Kuva 6.	<i>5G-paikannusrakenne (Mogyorósi et al., 2022, s. 3)</i>	20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	3rd generation partnership project, Kansainvälinen yhteistyöprojekti, joka kehittää mobiiliverkkojen teknisiä standardeja
4G LTE	4G long-term evolution, neljännen sukupolven mobiiliverkon radioteknologia
5G	fifth generation, Viidennen sukupolven matkaviestintäjärjestelmä
5G NR	5G new radio, 5G-mobiiliverkon radioteknologia
CN	core network, ydinverkko
D2D	Device-to-device, teknologia, joka mahdollistaa laitteiden suoran kommunikoinnin keskenään
eMBB	Enhanced Mobile Broadband, parannettu mobiiliviestintä
GNSS	Global navigation satellite system, maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
LTE	Long term evolution, Uusi neljännen sukupolven verkko
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output, usean antennin käytön mahdollistava langattoman viestinnän tekniikka
mMTC	Massive Machine Type Communications, massiivinen konetyyppinen viestintä
mmWave	Millimeter wave, millimetriaalto
NAVTEX	Navigational telex, Radiolähetysillä toimiva järjestelmä vesialueilla
RAN	Radio access network, matkapuhelinverkon tukiasemat ja niihin liittyvät verkkolaitteet
SDN	Software defined networking, ohjelmisto-ohjattu verkko
UAV	Unmanned aerial vehicle, miehittämätön ilma-alus
UE	User equipment, käyttäjälaite
URLLC	Ultra Reliable and Low Latency Communications, Erittäin luotettava ja pieniviiveinen viestintä
USV	Unmanned surface vehicle, miehittämätön pinta-alus
WiMAX	Worldwide Interoperability for microwave Access, langaton laajakaistateknikka

1. JOHDANTO

Jatkuva talouskehitys asettaa tällä hetkellä valtavia paineita liikennejärjestelmille. Autotiet ja rautatiet ovat tärkeimpiä liikennöintikeinoja, mutta ne usein kohtaavat ruuhka- ja kapasiteettiongelmia (Haseltalab et al., 2019). Ratkaisu näille ongelmille voisi löytyä sisävesialueista, joissa kapasiteettia on vielä jäljellä. Sisävesiliikenne ei ole yleensä yhtä nopeaa kuin muut liikennöintikeinot, mutta se on ympäristöystävällisempää melun ja päästöjen osalta (Haseltalab et al., 2019).

5G (fifth generation) -matkaviestintäjärjestelmän tavoitteena on laajentaa verkon kattavuutta maalle, merelle ja avaruuteen (Chen et al., 2021, s. 1–2), mikä avaisi uusia mahdollisuuksia 5G:n käytölle eri liikennemuodoissa. Vesiliikenteessä 5G:n käyttöönotto mahdollistaisi uudenlaisien verkkoyhteyksien luomisen aluksille ja matkustajille, mikä parantaisi viestintää ja tietojen jakamista merellä. 5G:llä saataisiin nopeampaa ja suurempaa tiedonsiirtoa. Älykkäät sisävesiväylät voisivat myös toteutua paremmin 5G:n avulla.

Meriviestintäverkot ovat edelleen yleisesti riippuvaisia satelliiteista ja maissa sijaitsevista tukiasemista (Feng et al., 2022). Meriviestintäverkkojen kehitys viimeisimpien tietoliikennetekniikoiden tasolle on odotettavaa lähivuosina. 5G-tekniologian käyttöä on tutkittu jo esimerkiksi vuonna 2018 surfauksen maailmancupissa ja miehittämättömissä drooneissa (Chen et al., 2018; Feng et al., 2022). Tutkimuksissa tarkasteltiin erityisesti, miten 5G-yhteys voidaan saada vesialueille, joihin tavallinen antenniyhteys ei riitä.

5G-tekniologian laajentaminen sisävesialueille kohtaa haasteita ja ongelmia. 5G-signaalin kattavuus on välillä heikko tietyillä sisävesialueilla, mikä on seurausta muun muassa maaston muodoista ja signaalin heikentymisestä pitkillä matkoilla. Tämä rajoittaa 5G-tekniologian käyttöä sisävesiliikenteessä, erityisesti syrjäisemmillä alueilla. Lisäksi 5G-tekniologian käyttöönotto edellyttää uusien infrastruktuurien rakentamista, mikä on kallista ja vaatii huomattavia investointeja. Alusten on myös varustauduttava uusilla laitteilla ja järjestelmillä, jotta ne voivat hyötyä 5G-tekniologiasta

Tässä työssä tarkastellaan sisävesiliikenteen vaatimuksia verkkoyhteydelle ja käsitellään 5G:n mahdollisia vaikutuksia sisävesiliikenteen navigointiin, viestintään, turvallisuuden ja autonomisuuteen. Työn tarkoituksena on tutkia 5G:n hyödyntämismahdollisuuksia

sia älykkäisiin sisävesiväyliin ja erilaisiin itsenäisesti kulkeviin aluksiin. Työssä käsitellään myös haasteita ja ongelmia, joita 5G:n laajentaminen sisävesialueille tuottaa. Työn lopussa esitellään muutamaa onnistunutta 5G:n hyödyntämistä sisävesialueilla.

2. VERKKOYHTEYDEN MERKITYS SISÄVESILIIKENTEELLE

Verkkoyhteyden tärkeys yhteiskunnalle kasvaa jatkuvasti, sillä tärkeät palvelut ovat siirtymässä verkkoon. Lisäksi useat laitteet tarvitsevat yhä useammin verkkoyhteyden toimiakseen halutulla tavalla. Ihmisten tarve olla jatkuvasti verkkoyhteyden kuuluvuusalueella sekä älykkäiden ajoneuvojen yleistymisen vaativat kaikille liikennöintialueille verkkoyhteyden. Tässä luvussa esitellään, mitä sisävesiliikenne on ja millaisia vaatimuksia se asettaa verkkoyhteydelle.

2.1 Sisävesiliikenne

Sisävesiväylät ovat kulkukelpoisia jokia ja järviä sekä ihmisen luomia vesistöjä, kuten kanaaleja, järviä ja säädeltyjä jokia (Żabowska, 2017). Sisävesiväylät ovat olleet tärkeimpiä tavaroiden ja ihmisten kuljetustapoja jo ennen lentokoneiden ja autojen kehittymistä, sillä suurin osa ihmiskeskittymistä sijaitsi vesialueiden lähellä. Jokia pystyttiin hyödyntämään liikennöinnissä jopa yksinkertaisilla veneillä.

Sisävesiväylät ovat nykyaikana erittäin tärkeitä Euroopassa kuljetettavien tavaroiden kuljetuksessa. Euroopassa sisävesiväyliä pitkin kuljetetaan vuosittain yli 500 miljoonaa tonnia tavaraa ja kulkukelpoisien sisävesiväylien kokonaispituus on yli 40 000 kilometriä. Tämä väyläverkosto yhdistää Euroopan teollisuuskeskittymät kaupan keskuksiin ja tarjoaa myös tärkeän kulkuyhteyden meriliikenteeseen. (Directorate General for Environment, 2018) Sisävesiväylät ovat siten elintärkeitä Euroopan taloudelle mahdollistaen tavaroiden tehokkaan kuljetuksen paikasta toiseen.

Kolme tärkeintä maiden sisäisestä liikennemuodoista ovat sisävesiliikenne, rautatieliikenne ja autoliikenne. Sisävesiliikenne on erittäin ympäristöystävällinen, hidas, turvallinen ja tehokas kuljetusmuoto, joka on ollut käytössä jo pitkään. Sisävesireitit ovat erinomaisia ja kestäviä kuljetusreittejä. Rautatieliikenne puolestaan on halvempaa ja nopeampaa, mutta vaatii enemmän alkupääomaa, jotta raiteet saadaan rakennettua. Autoliikenne on halpaa, helposti muokattavaa ja nopeaa, mutta sillä on valtavat päästöt ja teiden rakentamismahdollisuudet ovat lopulta rajalliset. (Rohács & Simongáti, 2007)

Vaikka sisävesiliikenteellä on potentiaalia kasvaa ja kehittyä haastamaan rautateitä liikennemuotona, se ei voi haastaa autoliikennettä, koska vesireitit harvoin kulkevat koko matkan lähtöpisteestä päätepisteeseen. Kuitenkin autoliikenteen kapasiteettiongelmien

ja suurien päästöjen vuoksi tarvitaan lisää ympäristöystävällisiä liikennemuotoja, joissa on vielä mahdollisuuksia kasvaa ja kehittyä.

2.2 Navigointi

Osa sisävesiväylistä on erittäin kapeita ja vaikeakulkuisia, minkä vuoksi tällaisilla alueilla paikannuksen täytyy olla erittäin tarkkaa. Navigointitiedonsiirtojärjestelmän tulee myös kattaa mahdollisimman suuri alue sisävesillä, jotta alukset voivat vastaanottaa navigointitietoa riippumatta siitä, missä ne ovat. Lisäksi navigointitiedonsiirtojärjestelmän tulee olla luotettava ja toimiva kaikissa olosuhteissa, jotta se toimii myös huonon sään ja muiden häiriötekijöiden aikana.

Reaaliaikaisuus on myös tärkeä vaatimus verkkoyhteyksille, sillä se mahdollistaa aluksen nopean reagoinnin tarvittaessa. Yhteensopivuus muiden alusten, laitteiden ja järjestelmien kanssa on myös tärkeää, jotta tiedonsiirto on sujuvaa ja alukset voivat kommunikoida keskenään tarvittaessa. Turvallisuus on olennainen vaatimus verkkoyhteyksille, sillä navigointitiedonsiirtojärjestelmän tulee olla suojattu ulkopuolisilta häiriöiltä, jotta väärin tietojen lähettäminen tai vastaanottaminen voidaan estää.

2.3 Turvallisuus

Sisävesillä liikkuvat alukset ja veneet ovat yhä useammin varustettuina erilaisilla elektronisilla laitteilla ja järjestelmillä, jotka ovat yhteydessä verkkoon. Tämä kehitys on tuonut mukanaan uusia haasteita tietoturvan suhteen, sillä verkkoyhteyden avulla hyökkääjät voivat päästä käsiksi aluksen tai veneen tietoihin ja järjestelmiin. Tämä johtaa esimerkiksi navigointiin, moottorin toimintaan tai viestintään liittyviin häiriöihin tai jopa vakaviin turvallisuusriskeihin. Verkkoyhteyden turvallisuus onkin noussut entistä tärkeämmäksi sisävesillä liikkuvien alusten ja veneiden turvallisuuden kannalta.

Esimerkiksi ryhmä hakkereita Naval Domessa on raportoinut todellisesta kyberhyökkäyksestä, joka perustui aluksella olevaan verkon haavoittuvuuteen. Hyökkäyksessä hakkeriryhmä onnistui manipuloimaan aluksen sijaintia ja ohjaamaan aluksen pois kursilta. (Enoch et al., 2021) Tällaiset tapahtumat herättävät huolta ja pelkoa verkkoyhteyksien yleistyessä aluksissa sisävesialueilla.

Verkon turvallisuudelle asetetaan vielä suuremmat vaatimukset, mikäli autonomiset alukset yleistyvät. Autonomisiin aluksiin tietoturvanloukkausten vaikutukset olisivat paljon suuremmat. Jos aluksen järjestelmässä tapahtuisi vikatilanne, alus ei pystyisi reagoi-

maan ihmisen tavoin tilanteeseen ja se voisi aiheuttaa suuria haittoja ympäristölle ja ihmisille. Mikäli alukset eivät pystyisi keskustelemaan keskenään, voisi aiheutua törmäyksiä tai ennakoimattomia vesiliikenteen ongelmia.

2.4 Autonomisuus

Alusten autonomisuudessa on neljä eri tasoa. Tason yksi aluksessa on automatisoituja prosesseja ja päätöksentekoa tukevia sovelluksia. Lisäksi tason yksi aluksella on miehistöä operoimassa ja hallitsemassa aluksen järjestelmiä ja toimintoja. Joitakin toimintoja voidaan automatisoida tasolla yksi. Tason kaksi alukset ovat kauko-ohjattavia ja aluksella on miehistöä, jotka ottavat aluksen hallintaan tarvittaessa. Tason kolme alus on kauko-ohjattava eikä laivalla ole miehistöä. Tason neljä alus on täysin autonominen. (Rivkin, 2021) Tason kolme ja neljä aluksia kutsutaan USV:ksi (Unmanned surface vehicle) (Yan et al., 2010).

Autonomisten alusten ja varsinkin USV:den on kyettävä kommunikoimaan keskenään ja rannassa olevien laitteiden kanssa reaaliajassa, jotta ne voivat suorittaa tehtävänsä tehokkaasti ja turvallisesti. Verkkoyhteyden on oltava luotettava, jotta se ei häiriinny tai katkea kesken tehtävän. (Peeters et al., 2020) Tämä on erityisen tärkeää, kun alus on kaukana rannikosta tai syrjäisillä alueilla. Verkkoyhteyden on myös oltava nopea, jotta alus pystyy lähettämään ja vastaanottamaan tietoa nopeasti. Esimerkiksi satelliittiyhteydet voivat tarjota viiveisen, mutta luotettavan yhteyden.

Lisäksi verkkoyhteyden on mahdollistettava reaaliaikainen tiedonsiirto aluksen ja maalla sijaitsevien tukiasemien välillä, jotta alus pystyy vastaanottamaan ajantasaista tietoa ympäristöstään. Tämä on erityisen tärkeää, kun alus navigoi vaikeissa olosuhteissa, kuten myrskyisellä merellä tai lähestyy vaarallisia esteitä. Verkkoyhteyden on myös oltava turvallinen, jotta ulkopuoliset tahot eivät pysty häiritsemään tai saa pääsyä aluksen järjestelmiin.

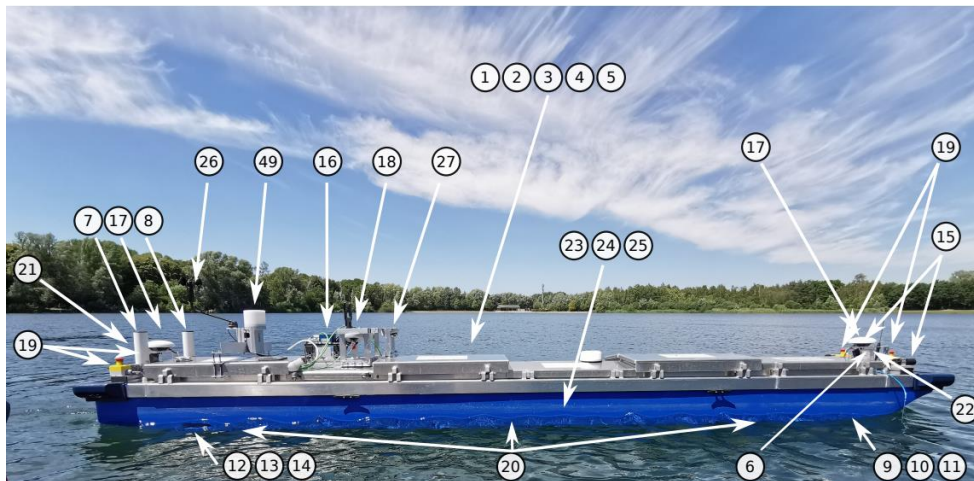
Tärkeimmät verkkoyhteyden vaatimukset kaikkien tasojen autonomisille aluksille ovat korkea tiedonsiirtonopeus ja alhainen viiveaika. Korkea tiedonsiirtonopeus mahdollistaa nopean ja tehokkaan tiedonsiirron, kun taas alhainen viiveaika tarkoittaa, että tiedonsiirto tapahtuu lähes reaaliajassa. Tämä on erityisen tärkeää, kun alus on liikkeessä ja etäohjaajan tai valvojan on kyettävä reagoimaan nopeasti ympäristön muutoksiin.

Yksi tapa käyttää semiautomaatiota ennen täysautomaatiota on letka-ajo. Letka-ajossa tarvitaan yksi normaali miehistöllinen alus ja loput alukset seuraavat tätä alusta. (Hasel-

talab et al., 2019) Seuraavien alusten tarvitsee olla vain tason kaksi tai kolme autonomisia aluksia. Alusten letka-ajo kuitenkin vaatii yhteyksiltä paljon, sillä miehistöllisestä aluksesta täytyy pystyä vaikuttamaan seuraaviin aluksiin nopeasti ja luotettavasti.

Kaikkien tasojen autonomiset alukset keräävät tietoa useista antureista, kuten satelliittilaitteista ja kamerajärjestelmistä. Lisäksi ne lähettävät tietoa verkon kautta aluksen ohjausjärjestelmille ja maalla sijaitseville valvontajärjestelmille. Kuvassa 1 ja taulukosta 1 nähdään erään tason kolme autonomisen aluksen kaikki tarvittavat anturit, tietokoneet, moottorit, antennit ja muut oleelliset osat. Kuvasta 1 voidaan lisäksi huomata, että käytetty alus on suhteellisen pieni, mutta sisältää jopa 27 aluksen ohjaamiseen liittyvää osaa. Suuremmat alukset tarvitsisivat vielä useampia laitteita, jotta aluksen kulkeminen ilman miehistöä on mahdollista.

Hyvän verkkoyhteyden merkitys kasvaa entisestään, kun monia autonomisia aluksia käytetään yhtä aikaa. Verkkoyhteyden pitää pystyä käsittelemään suuri määrä dataa useilta eri sensoreilta ja lähettämään se nopeasti ja luotettavasti ohjausjärjestelmille sekä muille tietokoneille. Lisäksi verkkoyhteyden on oltava jatkuvasti käytettävissä ja häiriöttömässä tilassa, jotta alusten viestinnässä ei tule ongelmia. Kaiken kaikkiaan verkkoyhteyden on oltava erittäin luotettava, sillä mahdolliset viiveet tai häiriöt voivat aiheuttaa vakavia seurauksia.



Kuva 1. Autonomisen aluksen laitteet (Peeters et al., 2020, s. 13)

Taulukko 1. Aluksen osat muokattu lähteestä (Peeters et al., 2020)

Nr.	Kuvaus	Lyhenne/Nimi
1	Ohjelmoitava ohjain	PLC
2	Tietokone	I-PC
3	Ethernet kytkin	POE kytkin
4	Teollinen reititin USV	Quartz reititin USV
5	Radio vastaanotin	RR

6	LTE antenni (PLC)	PLC antenni
7	Antenni LTE (Quartz)	LTE antenni
8	Antenni Wifi (Quartz)	Wifi antenni
9	Keulapotkuri moottorinkäyttö	Keulapotkuri käyttö
10	Keulanohjaus	Keulanohjaus
11	Keulapotkuri moottori	Keulamoottori
12	Päämoottoripotkuri moottorinkäyttö	Päämoottori moottorinkäyttö
13	Päämoottorin ohjaus	Päämoottorin ohjaus
14	Päämoottori	Päämoottori
15	Stereo Kamerateat (2x)	Stereo Kamerateat
16	Nopeuden laskuyksikkö	IMU
17	Navigaatio GNSS sensori	GNSS
18	Laser skanneri	LIDAR
19	Hätä seis (4x)	ESTOP
20	Pilssi pumpput (3x)	Pilssi pumpput
21	Päämoottorivalo	Päämoottorivalo
22	Keulan veneen ajovalot	Tyyrpuuri ja paapuuri valo
23	Akun valvonta järjestelmä	BMS
24	Akku 24 V	24 V DC
25	Akku 24 V (2 x 12 V)	2 x 12 V DC
27	Verkko Kamerateat (4x)	IP Kamerateat
49	MBR Antenni	MBR 144 Antenni

3. 5G-TEKNOLOGIA

5G-tekniikan odotetaan kehittävänsä kaupunkiympäristöjä tarjoamalla enemmän käyttäjäpaikkoja ja alhaisemman viiveen mobiiliviestintään. 5G-tekniikalla on merkittäviä parannuksia, joita tarvitaan erityisesti tiheillä kaupunkialueilla. 5G-tekniikalla on mahdollista kehittää teknologioita, kuten älykkäitä liikennejärjestelmiä, joita esitetään ratkaisuksi erilaisiin taloudellisiin, sosiaalisiin ja ympäristöä koskeviin ongelmiin (Oughton & Russell, 2020, s. 1–3) Tämän luvun alussa määritellään tarvittavia tietoverkkojen termejä, minkä jälkeen esitellään 5G:n perustiedot, rakenne sekä ominaisuudet.

3.1 Tietoverkkojen termistöä

Tietoverkkojen toimintaa käsitellään monin teknisin käsittein ja termein, jotka ovat keskeisiä, jotta tietoverkkojen toimintaa voi ymmärtää. Yksi tärkeimmistä käsitteistä on **Viive**, joka tarkoittaa aikaa, joka kuluu jonkin tapahtuman tai signaalin kulkemisen kahden tai useamman pisteen välillä. Tietoverkoissa viive viittaa ajanjaksoon, joka kuluu tiedon lähettämisestä sen vastaanottamiseen. Viive muodostuu esimerkiksi viestien kulkemasta matkasta.

Kapasiteetti on yleisesti ottaen kyky sisältää tai vastaanottaa jotakin. Tietoverkoissa ja tietoliikenteessä kapasiteetti tarkoittaa yleensä sitä määrää tietoa, joka voidaan siirtää tietyn ajanjakson aikana. Tämä kapasiteetti ilmaistaan usein eri mittayksiköissä, kuten bitteinä sekunnissa. **Läpäisykyky** kuvaa sitä datan määrää, joka pystytään siirtämään tietoverkon läpi jatkuvasti tietyssä ajassa. Läpäisykykyyn vaikuttaa useat tekijät, kuten verkon kapasiteetti, ruuhkaisuus ja viive. **Kantama** tarkoittaa etäisyyttä, jonka signaali kulkee ennen kuin se vaimenee niin paljon, ettei sitä voida enää tunnistaa.

Yksi keskeinen käsite on **taajuus**, joka tarkoittaa signaalin värähtelytaajuutta ja vaikuttaa tiedonsiirtonopeuteen. Korkeammat taajuudet mahdollistavat nopeamman tiedonsiirron, mutta ovat samalla herkempiä häiriöille. **Kuuluvuusalue** viittaa mobiiliyhteyksien tapauksessa maantieteelliseen alueeseen, jonka tietyn mobiilioperaattorin tarjoama matkapuhelinverkko kattaa.

Kaistanleveys viittaa radiotaajuuksilla käytettävään taajuusalueeseen, joka on käytettävissä signaalin välittämiseen langattomasti. Tämä taajuusalue määrittää sen, kuinka monta informaatiobittiä voidaan välittää tietyn ajanjakson aikana. Saavutettava tiedon-

siirtokapasiteetti riippuu käytettävissä olevan kaistanleveyden lisäksi myös **spektritehokkuudesta**, joka määrittää sen, kuinka tehokkaasti signaali käyttää kyseistä taajuus- aluetta tiedon välittämiseen. (Eloranta et al., 2020, s. 51)

3.2 5G:n perustietoa

5G on globaalisti käyttöönotettu viidennen sukupolven mobiiliverkko, joka on uudempi versio jo aiemmin käytössä olleista 1G-, 2G-, 3G- ja 4G-verkoista. 5G:n avulla pystytään yhdistämään verkkoon lähes mitä tahansa, esimerkiksi koneita, esineitä ja laitteita. Langattoman 5G-tekniikan tarkoituksena on tarjota korkeampia nopeuksia, erittäin alhaista viivettä, suurempaa luotettavuutta, massiivista verkkojen kapasiteettia, lisääntyntä saatavuutta ja tasaisempaa käyttökokemusta käyttäjille. Korkeampi suorituskyky ja parempi tehokkuus mahdollistavat uudenlaisia käyttäjäkokemuksia ja yhdistävät uusia teollisuudenaloja. (Yu et al., 2017, s. 3–7)

Mobiiliverkkojen kehityksessä on tapahtunut taajuusalueiden muutoksia. Alussa mobiiliverkkojen taajuudet keskittyivät pääasiassa 800–900 megahertsin (MHz) alueelle. 3G-tekniikan myötä taajuusalue siirtyi noin 2 gigahertsin (GHz). Tämän jälkeen 3G- ja 4G-verkkojen kehityksen myötä taajuusalue laajeni välille 450 MHz–6 GHz. Tämän hetken 5G mahdollistaa jopa 60 GHz taajuusalueiden käytön. (Dahlman et al., 2021) Suuremmilla taajuuksilla saadaan siirrettyä enemmän tietoa lyhyemmässä ajassa.

5G:tä varten 3GPP (3rd generation partnership project) kehitti 5G NR:n (5G New radio). Se on uusi radiolähetystekniikka, joka on standardoitu 5G:n verkkorajapinnoille. 5G NR ja 4G LTE (4th Generation Long-Term Evolution) voivat toimia yhdessä, mikä on erittäin tärkeää sujuvaan siirtymiseen LTE:stä 5G NR:ään. Esimerkiksi tukiasema pystyy toimimaan samanaikaisesti sekä 5G NR- että LTE-verkossa, jolloin asiakaslaitteet voivat käyttää kumpaakin tekniikkaa. (Dahlman et al., 2021) Tämän ansiosta kaikkia tukiasemia ei tarvitse vaihtaa kerralla, joten 5G:n laajentuminen on pienempi riski.

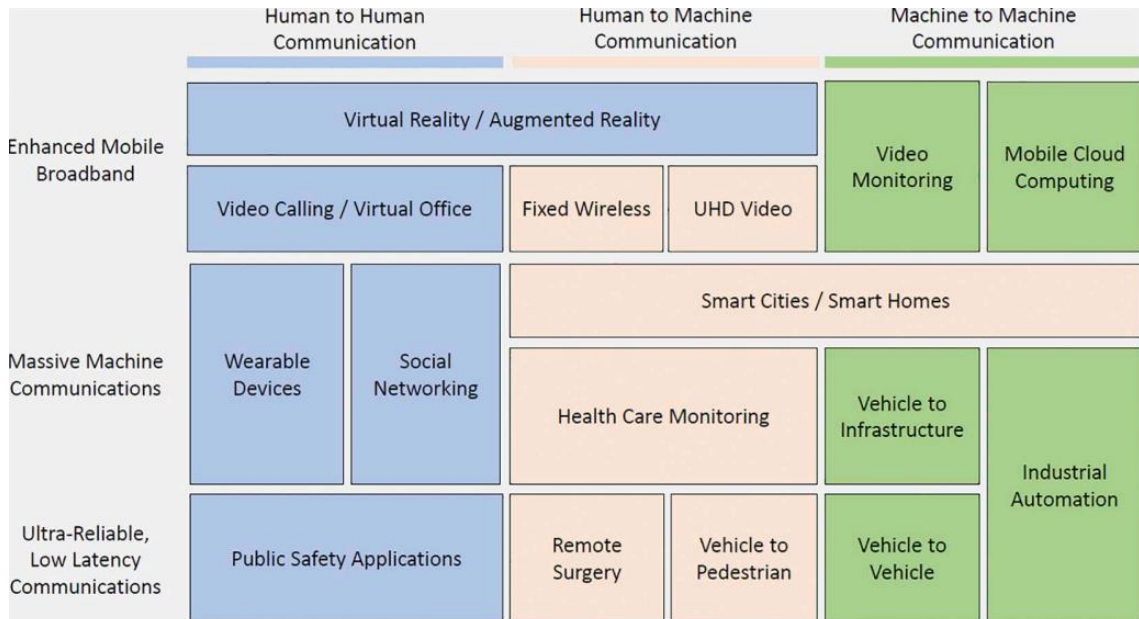
5G-verkko koostuu kolmesta päätekniikasta, jotka mahdollistavat suuremman verkkokapasiteetin ja siten suuremman määrän käyttäjiä. Nämä päätekniikat ovat mmWave (millimeter wave), pienet solut (engl. Small cells) ja MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). mmWave käyttää korkeita taajuuskaistoja, mikä mahdollistaa korkean kaistanleveyden. Pienet solut mahdollistavat käyttäjälaitteiden (UE, User equipment) kommunikoinnin millimetrialtojen avulla, jolloin lähetysalue pienenee ja häiriöt vähenevät. MIMO mahdollistaa tukiaseman useiden antennien käytön lähetykseen ja vastaanottamiseen samanaikaisesti. 5G:n säteenmuodostus (engl. beamforming) mahdollistaa tarkan lähetyksen vastaanottajalle. (Hassan et al., 2019)

5G:n kolme tällä hetkellä tärkeintä verkon käyttötapaa ovat eMBB (Enhanced Mobile Broadband), mMTC (Massive machine type communications) sekä URLLC (Ultra Reliable and Low Latency Communications) (Yu et al., 2017, s. 2–7). Kaikilla kolmella edellä mainituista on omat vahvuutensa, joten jokaista käyttötapaa voidaan käyttää erilaisissa tilanteissa. Kuvasta 2 nähdään, minkälaisia käyttötarkoituksia kullakin käyttötavalla on.

eMBB on käyttötapaa, jossa keskitytään nopeisiin ja luotettaviin langattomiin laajakais-tayhteyksiin (Oughton & Russell, 2020, s. 2). eMBB:ssä tiedonsiirron täytyy olla gigabitti sekunnissa (Khan et al., 2022, s. 17). Tämä mahdollistaa suurempien tiedonsiirtono-peuksien ja paremman kapasiteetin, mikä on tarpeen kuvan 2 mukaan suorituskykyisten sovellusten, kuten virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden käyttämiseen. eMBB so-vellukset vaativat yleensä alhaisen latenssin, korkean kapasiteetin ja luotettavan verkon.

mMTC on käyttötapaa, jossa tavoitteena on tukea suurta määrää laitteita. Näissä sovel-luksissa tarvitaan usein vain vähän tiedonsiirtoa, mutta yhteyksiä on paljon. mMTC:n avulla voidaan tukea jopa miljoonia laitteita, joilla on lyhyitä datansiirtovaatimuksia, kuten älykkäiden kotien sensorit ja valaistus. (Oughton & Russell, 2020, s. 13)

URLLC on käyttötapaa, jossa keskitytään erittäin luotettaviin, viiveettömiin ja turvallisiin yhteyksiin. URLLC:n tavoitteena on varmistaa, että tieto välitetään luotettavasti ja nope-asti ilman viivettä, jotta mahdollisimman nopea reaktio on mahdollista (Oughton & Rus-sell, 2020). URLLC:ssä viiveen täytyy olla alle 1 millisekunti ja luotettavuuden 99,99% (Khan et al., 2022, s. 17). Kuvan 2 mukaan näihin sovelluksiin kuuluvat esimerkiksi teol-lisuusautomaatio, autonomiset ajoneuvot sekä etäleikkaukset.



Kuva 2. 5G:n Käyttötapaukset (Oughton & Russell, 2020, s. 2)

3.3 5G-verkon rakenne

5G-verkkoarkkitehtuuri on suunniteltu tukemaan nopeita ja luotettavia yhteyksiä sekä monipuolisia sovelluksia ja palveluja. Tämä mahdollistaa joustavat käyttöönotot käyttämällä uusia konsepteja, kuten SDN (Software defined networking) tai verkon viipalointia. (Dahlman et al., 2021) SDN:n perusidea on erottaa verkon ohjaus- ja välitystasot, jolloin verkon ohjaus voidaan ohjelmoida suoraan ja verkon alustan käyttöaste voidaan abstrahoida sovelluksia ja verkkopalveluja varten. SDN-ohjain toimii verkon älykkyytenä ja tarjoaa kokonaiskuvan koko verkosta sekä mahdollistaa verkonhallinnan ja ohjauksen. (Dahlman et al., 2021)

5G-verkko koostuu neljästä pääalueesta. Nämä pääalueet ovat käyttäjälaite, RAN (Radio Access Network), CN (Core network) ja kuljetusverkko. RAN on vastuussa radiotaajuusverkon kaikkien toimintojen suorittamisesta. Se koostuu tukiasemista, jotka lähettävät ja vastaanottavat signaaleja käyttäjälaitteiden välillä. CN vastaa verkon toiminnoista, jotka eivät liity RAN:iin. CN huolehtii autentikoinnista, laskutehtävistä ja yhteyksien loppuunsaattamisesta. Kuljetusverkko on vastuussa yhteyksien välittämisestä RAN:n ja CN:n välillä. Se käyttää erilaisia teknologioita, kuten optisia kuituja, kuparikaapeleita ja langattomia yhteyksiä siirtääkseen tietoa nopeasti ja tehokkaasti. RAN ja CN on jaettu toiminnoittain, jotta 5G voi käyttää samaa ydintä ja mahdollistaa tehokkaamman verkon hallinnan. (Dahlman et al., 2021)

5G-verkko koostuu useista soluista, jotka voivat sisältää yhden tai useamman tukiaseman. Jokainen solu on vastuussa tietyn alueen kattavuudesta ja palvelee käyttäjiä kyseisellä alueella. Soluverkon tiheyden kasvattaminen mahdollistaa suuremman kapasiteetin ja nopeamman tiedonsiirron, mutta samalla se vaatii myös enemmän tukiasemia ja verkon rakentamista. (Dahlman et al., 2021) Käyttäjälaitteet pystyvät valitsemaan halutun solun kuuluvuuden perusteella, ja kun käyttäjä liikkuu alueelta toiselle, laite vaihtaa automaattisesti solua. Tämä mahdollistaa jatkuvan yhteyden säilymisen, vaikka käyttäjä liikkuisi laajalla alueella.

3.4 5G-verkon ominaisuudet

5G-tekniikan odotetaan muuttavan kaupunkiympäristöjä tarjoamalla suuremman kapasiteetin ja alhaisemman viiveen mobiiliviestintään. 5G-tekniikka tarjoaa useita muitakin ominaisuuksia kuin suuremman kapasiteetin ja alhaisemman viiveen. Näiden lisäksi yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on suurempi taajuusalue, joka mahdollistaa nopeamman tiedonsiirron. (Oughton & Russell, 2020, s. 1–4)

Kun taajuusalue kasvaa, verkon taajuuksia voidaan jakaa useammalle käyttäjälle ja käyttää suurempia osia taajuuskaistasta. Nämä ovat pääasialliset tekijät, joiden ansiosta 5G-verkolla on suurempi kapasiteetti ja mahdollisuus nopeaan tiedonsiirtoon suurten tiedostojen kohdalla. Nopea tiedonsiirto pienentää laitteiden välistä viivettä.

Korkeammalla taajuusalueella oleva kaistanleveys aiheuttaa ongelmia, kuten lyhentää signaalin kulkemaa matkaa. Kuvassa 3 on 4G ja 5G oletetut maksimikantamat, kaistanleveydet ja nimellisa nopeudet. Kuvasta voidaan huomata kuinka taajuusalueen kasvaessa 700MHz:stä 26000MHz:iin nimellisa nopeudet kasvavat, mutta myös maksimikantama laskee 10 kilometristä puoleen kilometriin.

Taajuus- alue (MHz)	Verkko	Oletettu solun maksimikan- tama (km)	Kaistan- leveys (MHz)	FDD tai TDD	Teoreettinen spektritehok- kuus (bit/s/Hz) DL/UL	Nimellisa nopeus (Mbit/s)	
						Vastaan- otto	Lähetys
700	5G	10	10	FDD	11 / 5,5	110	55
800	4G	10	10	FDD	7,5 / 2,5	75	25
900	4G	10	11	FDD	7,5 / 2,5	75	25
1 800	4G	5	25	FDD	7,5 / 2,5	150	50
2 100	4G	4	20	FDD	7,5 / 2,5	150	50
2 600	4G	2	20 - 25	FDD (TDD)	7,5 / 2,5	150	50
3 500	5G	2	130	TDD	11 / 5,5	1200	400
26 000	5G	0,5	800	TDD	11 / 5,5	8 800	3 000

Kuva 3. 5G ja 4G maksimikantama ja nimellisa nopeudet (Eloranta et al., 2020, s. 10)

5G on suunniteltu energiatehokkaaksi teknologiaksi vähentämällä jatkuvia tiedonsiirtoja. Tämä vähentää verkkojen energiankulutusta ja häiriöitä suurten tietoliikennemäärien aikana. (Dahlman et al., 2021) Tämä energiatehokas lähestymistapa on tärkeä askel kohti kestävästä kehitystä ja ympäristönsuojelua, koska se vähentää energiankulutusta ja hiili-dioksidipäästöjä.

Verkon viipalointi (engl. Network slicing) on 5G:n ominaisuus. Sen avulla fyysisen tietoliikenneverkon päälle voidaan luoda erilaisia loogisia verkkoja, jotka vastaavat erilaisiin tarpeisiin ja käyttötarkoituksiin. Viipaloinnin avulla voidaan esimerkiksi määritellä verkon nopeus ja kapasiteetti erikseen kullekin verkolle, jolloin voidaan optimoida verkon käyttö ja resurssit paremmin. (Eloranta et al., 2020, s. 44,51)

Autonomisten laivojen välisessä tietoliikenteessä tällaisia viipaleita voidaan käyttää eristämään tietoliikenne muista verkon käyttäjistä. Näin tietoliikenne voidaan pitää erillisessä ympäristössä, joka on suojattu häiriöiltä. Kun autonomiset laivat jakavat sijainti- ja nopeusdataa toisilleen ja ohjauskeskuksille, erillinen verkkoyhteys antaisi varmuutta siitä, että viestit ja ohjauskomennot kulkevat verkon yli häiriöttömästi.

5G-verkoissa pystytään hyödyntämään pilvi- (engl. cloud computing) ja reunalaskentaa (engl. edge computing). Molemmissa laskennoissa suurempi keskitetty tietokone suorittaa vaikeammat ja raskaammat laskut käyttäjälaitteen puolesta. Pilvilaskennassa keskitetty tietokone eli serveri on yleensä kaukana käyttäjälaitteesta. Suuren etäisyyden takia on myös kehitetty reunalaskenta, jossa laskentaresursseja tuodaan lähemmäksi käyttäjälaitteita. Reunalaskennalla on paljon pienempi viive tietyissä tapauksissa, sillä tiedon tarvitsee kulkea paljon lyhyempi matka. (Hassan et al., 2019)

5G-verkkojen avulla voidaan myös optimoida käyttäjälaitteiden suorituskykyä ja parantaa niiden akunkestoa, kun laskentaa siirretään pois laitteista ja keskitetään pilvi- tai reunal palvelimille. Tämä johtaa yksinkertaisempiin ja tehokkaampiin käyttöliittymiin. Reunalaskenta soveltuu erityisesti sellaisiin sovelluksiin, joissa reaaliaikaisuus ja laskutehokkuus ovat tärkeitä, kuten esimerkiksi itseohjautuvissa ajoneuvoissa, pelialustoilla ja terveydenhuollossa. Käyttämällä reunalaskentaa voidaan vähentää viivettä, joka syntyy, kun tietoja lähetetään edestakaisin etäällä sijaitsevan pilvipalvelimen ja käyttäjän laitteen välillä.

5G-verkon laitteet pystyvät keskustelemaan ja siirtämään laskennallisia tehtäviä viereisille kohteille laitteelta laitteelle kommunikaatio (D2D, Device-to-device) -ominaisuuden avulla. D2D:ta käytettäessä tieto ei kulje tukiaseman kautta vaan se kulkeutuu suoraan toiselle 5G-verkon laitteelle, jolla on mahdollisesti paremmin resursseja tai tehoa laskentaan. D2D parantaa järjestelmän läpäisykykyä, energiatehokkuutta ja spektri tehokkuuden käyttöä. D2D on yksi tapa hyödyntää reunalaskentaa. (Hassan et al., 2019)

4. 5G:N MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET SISÄVESILÄ

Vaikka 5G-tekniologia tarjoaa monia mahdollisuuksia sisävesiverkoissa, sen käyttöönotto vaatii vielä paljon työtä ja kehitystä ennen kuin se voidaan toteuttaa laajasti. Tällä hetkellä vesialueilla on käytössä vanhempia tietoliikennetekniikoita, jotka toimivat hyvin perinteiseen vesillä liikkumiseen. Kuitenkin uusien sovelluksien, kuten etäohjauksen yleistyessä, nykyiset tietoverkot eivät riitä. Tässä luvussa esitellään tämänhetkiset viestintätekniikat ja tutkitaan 5G:n haasteita sekä 5G:n mahdollisuuksia sisävesiliikenteessä.

4.1 Tämänhetkinen sisävesiliikenteen viestintä

Merenkulun radioviestintäjärjestelmiä käytetään tyypillisesti keski- tai korkeilla taajuuksilla tai erittäin korkeilla taajuusalueilla lyhyellä kuuluvuudella ja alhaisella tiedonsiirtonopeudella. Merenkulun radioviestintäjärjestelmiä ovat esimerkiksi NAVTEX (Navigational telex) ja alusten automaattinen tunnistusjärjestelmä. Satelliitit voivat tarjota suuren kattavuuden. Kuitenkin suuri viive ja korkeat toteutuskustannukset rajoittavat verkon nopeaa kehitystä meriliikenteessä. (Chen et al., 2021, s. 2)

Kuvassa 4 nähdään yleisimpiä radioviestintätekniikoita, joita käytetään nykyaikana meriliikenteessä. Kommunikaatioetäisyydet vaihtelevat 10 km:stä 740 km:iin sekä satelliittien vielä suurempaan etäisyyteen. Kuvasta 4 voidaan huomata, että etäisyyden kasvaessa datansiirtonopeus laskee huomattavasti. Myös teknologian valinnalla on suuri vaikutus datansiirtonopeuteen. Esimerkiksi LTE ja WiMAX yltävät yhtä pitkälle, mutta WiMAX:n datansiirtonopeus on yli puolitoista miljoona bittiä sekunnissa hitaampi.

Typical maritime radio communication technologies.

Communication technology	Data rate (bps)	Communication distance (km)
MF (NAVTEX, 518 kHz)	50	463–740
MF/HF (1650–27500 kHz)	–	Medium/long distance
VHF(156.0–174.0 MHz)	1.2k	120
VHF (AIS, 156.025–162.025 MHz)	9.6k	120
WiMAX	5000–6000k	10
WLAN	4700k	20
Long range Wi-Fi	3000k	20–50
LTE	7600k	10
Satellite	Depend on systems	Long distance

Kuva 4. Tyypillisiä merenkulun radioviestintätekniikoita (Chen et al., 2021, s. 2).

Vaikka merenkulun radioviestintäjärjestelmät on suunniteltu erityisesti meriliikenteeseen, niitä käytetään myös sisävesillä. Sisävesillä viestintäetäisyydet ovat yleensä lyhy-

empiä, mutta teknologian valinta ja datansiirtonopeus ovat silti tärkeitä huomioitavia tekijöitä. Tulevaisuudessa 5G-teknologia voi tarjota erinomaisen vaihtoehdon juuri lyhyemmille matkoille.

4.2 Verkon lyhyt kantama teknisenä haasteena

5G-teknologiaan liittyvä merkittävin tekninen haaste on sen kattavuuden laajentaminen järviolueilla ja ruuhkaisilla joilla, joissa tarvitaan erittäin korkeaa tiedonsiirtonopeutta ja alhaista viivettä. Tämä haaste aiheutuu 5G-verkon lyhyestä kantamasta. Yhteydet voivat häiriintyä aluksista, silloista ja muista esteistä sisävesillä (Chen et al., 2021, s. 3). Tämä haaste on tärkeä ratkaista, jotta voidaan hyödyntää täysimääräisesti 5G-teknologian potentiaalia myös näillä alueilla. 5G:n huonosta kantamasta aiheutuvia ongelmia esitellään seuraavissa kappaleissa.

Sisävesillä erityisesti metallisiltojen rakenteet aiheuttavat heijastumisia ja vaimentavat signaalin voimakkuutta. Rakennukset vesistön rannoilla ovat myös merkittäviä monitieheijastuskohteita, samoin kuin sisävesisatamat ja muut alukset. Järvien aallokko ja vedenpinnan karheus vaikuttavat signaalin heijastumiseen ja vaimenemiseen. Maan kaarevuus on myös otettava huomioon, kun analysoidaan kaukana järvellä tapahtuvaa langatonta tiedonsiirtoa. Esimerkki Kuvassa 5 näkyvät rakennukset rannoilla, satamat ja ohittavat alukset ovat tärkeitä tekijöitä, jotka vaikuttavat langattoman kanavan ominaisuuksiin. (Chen et al., 2021, s. 2–4)

Usein jokien ja järvien reuna-alueille on vaikea kulkea tai pystyttää 5G-tukiasemia. Uusia kulkureittejä täytyisi rakentaa vesireittien lähialueille, jotta asemia pystyttäisiin asentamaan ja huoltamaan tarvittaessa. Saaristoihin 5G-tukiasemien rakentaminen aiheuttaisi myös suuria ongelmia, sillä niihin pitäisi rakentaa vedenalaisia kaapeleita (Eloranta et al., 2020). Näiden ongelmien ratkaisemiseksi pitäisi kehittää uusia tekniikoita, joilla 5G saataisiin myös syrjäisemmille alueille.



Kuva 5. Jangtse joki ja sen ympäristö (Chen et al., 2021, s. 3)

Yksi tapa ratkaista tämä haaste on hyödyntää merillä tutkittua tapaa käyttää miehittämättömiä ilma-aluksia (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) verkon kantaman pidentämiseen. UAV:t lentäisivät vesialueiden yläpuolella ja voisivat jatkaa maalla sijaitsevan tukiaseman yhteyttä aluksille (Li et al., 2020). UAV:illa on omat haasteensa, mutta kun ne ovat ratkaistu, voisi niitä hyödyntää verkon saamisessa syrjäisille järvi- ja jokialueille.

4.3 Tietoturvallisuus

Mikäli langattomat yhteydet yleistyvät sisävesialuksilla, tietoturvariskit kasvavat, sillä langattomat yhteydet altistavat alukset tietoturvauhille. Langattomien yhteyksien turvallisuusriskit johtuvat esimerkiksi siitä, että useat laitteet yrittävät käyttää samoja taajuuksia, jolloin häiriöitä ja yhteentörmäyksiä on mahdollista syntyä. Lisäksi langattomien yhteyksien tietoturvassa on omat riskinsä, sillä niitä voidaan häiritä, vakoilla tai jopa manipuloida.

5G vaatii huomattavan määrän tietoturvaa uusille verkkorakenteille. Erityisesti tietoturvaa tarvitaan useiden laitteiden todentamiseen. Ohjelmistopohjaisuus, virtualisointi, mobiili reunalaskenta ja muut uudet teknologiat tuovat myös joitakin muutoksia ja tietoturvauhkia. Nykyinen 4G-verkon tietoturvallisuusarkkitehtuuri sekä -avaimet eivät ratkaise näitä uusia tietoturva-ongelmia. (Ji et al., 2018) 5G ei tuottaisi uusia merkittäviä tietosuojongelmia, mutta verkon käytön lisääntyminen ja kriittisten käyttökohteiden määrän lisääntyminen tekee tietoturvallisuudesta tärkeämpää.

5G-verkkojen turvallisuuden kehittämistrendi perustuu 5G-tietoturva-arkkitehtuuriin, joka yhdistää 5G-verkon pilvien, yhdistämisen ja virtualisoinnin ominaisuudet. Uusia puolustusmekanismeja on kehitettävä turvallisuusvaatimusten ja järjestelmän sisäisen turvallisuusmekanismin näkökulmista. Tämä sisältää esimerkiksi fyysisen kerroksen turvallisuuden, kevyen salauksen, verkkoviipaleen turvallisuuden, käyttäjän yksityisyydensuojan ja lohkoketjun avainteknologiat. Tärkeä arkkitehtuuri on matkimispuolustusjärjestelmä (engl. mimic defense), joka tarjoaa universaalien puolustusteorian ja kyberavaruuden menetelmät tuntemattomien uhkien käsittelyyn. (Ji et al., 2018)

4.4 Kustannukset

Uusimpien verkkoyhteyksien yleistyessä täytyy ajatella myös 5G asemien valmistus-, asennus- ja ylläpitokustannuksia. 5G:ssä tukiasemia täytyy olla useampia kuin vanhemmissa sukupolvissa, sillä 5G:llä on lyhyempi kantama. 5G tukiasemat kuluttavat myös huomattavan määrän sähköä, mikä ei myöskään ole ilmaista. Useammat asemat sekä suurempi sähkönkulutus kasvattavat kuluja huomattavasti.

5G:n sähkönkulutus muodostaa ongelman, sillä 5G-tukiasema vaatii yli 11,5 kilowatin tehon, mikä on lähes 70 % enemmän kuin tukiasema, joka käyttää 2G-, 3G- ja 4G-verkkoja sekoituksena. Sähkönkulutus on suurempi, koska 5G-tukiasema tarvitsee etäradioyksikön (engl. Remote radio unit) ja kantataajuusyksikön (engl. Baseband unit). 5G-verkon korkeampi energiankulutus aiheuttaa useita ongelmia, kuten tukiasemien virtalähteiden riittämättömyyttä siirtää tarpeeksi virtaa tukiasemalle ja kyvyttömyyttä tukemaan pitkän matkan siirtoa. Tilastot osoittavat, että matkapuhelinverkkojen kokonaisenergiankulutus on kasvanut merkittävästi 5G:n myötä. (Israr et al., 2021, s. 3)

5G-verkon erittäin kevyellä suunnitelulla (engl. Ultra-lean desing) verkon laitteet lähettävät viestejä vain silloin kun niitä tarvitaan. Tämä muotoilu poistaa jatkuvan ja yleensä turhan tiedonsiirron. (Dahlman et al., 2021) 5G-verkon laitteiden viestien määrää vähentämällä sähkönkulutus laskisi huomattavasti ja verkko ei olisi yhtä suurella kapasiteetilla. Esimerkiksi 5G:n laivaliikennesovelluksissa tästä olisi hyötyä, koska energiaa jäisi muille laivojen käyttötarpeille tai säästettäisiin sähkön kustannuksissa.

Sähkönkulutusta voidaan myös rajoittaa käyttämällä enemmän reuna- ja pilvilaskentaa, sillä keskittämällä laskentaa erillisille palvelimille, voidaan hallita paremmin käyttäjälaitteen sähkönkulutusta. Jos jollain laitteella on ylijäämä energiaa, se pystytään myös hyödyntämään D2D:n avulla. (Hassan et al., 2019) Täten 5G:llä on useita mahdollisia energiatehokkuutta parantavia keinoja.

Vuonna 2020 suomen operaattoreiden verkkoinfrastruktuuri kattoi Suomen sisävesialueet, merellisen saariston sekä lähellä rannikkoa sijaitsevat vesistöt Itämerellä, ainakin teoreettisesti. Käytännössä kuitenkin etäällä asutuksesta ja vilkkaasti liikennöidyiltä väyliltä sijaitsevat vesistöt ovat haastavia 5G yhteyksien varmistamisessa. Tämän vuoksi parempien tiedonsiirtoyhteyksien toteutus edellyttäisi kalliita teknisiä ratkaisuja, kuten uusien radiolinkkien ja vedenalaisten kaapeleiden rakentamista. Tällä hetkellä ei ole näkyvissä uusia investointiohjelmia, jotka keskittyisivät tällaiseen meriliikenteen tukemiseen. Tiedonsiirtoyhteyksien parantaminen edellyttäisi siten markkinaehtoista rakentamista. (Eloranta et al., 2020, s. 42)

Todennäköisesti myös muualla maailmassa etäällä asutuksesta oleville sisävesi väylille on vaikea saada 5G yhteyksiä. 5G:n laajentaminen sisävesialueille vaatii suuria rahallisia sijoituksia, joita ilman tällä hetkellä ei ole mahdollista saada 5G:tä kaikille sisävesialueille. Lisäksi 5G tarvitsee lisäbudjetointia sähkön kulutukseen. Ennen 5G:n laajentamista täytyy siis miettiä, ovatko sen mahdollistamat edut kustannusten arvoisia. 5G:lla voidaan saada säästettyä muista asioista, kuten miehistön määrästä aluksilla.

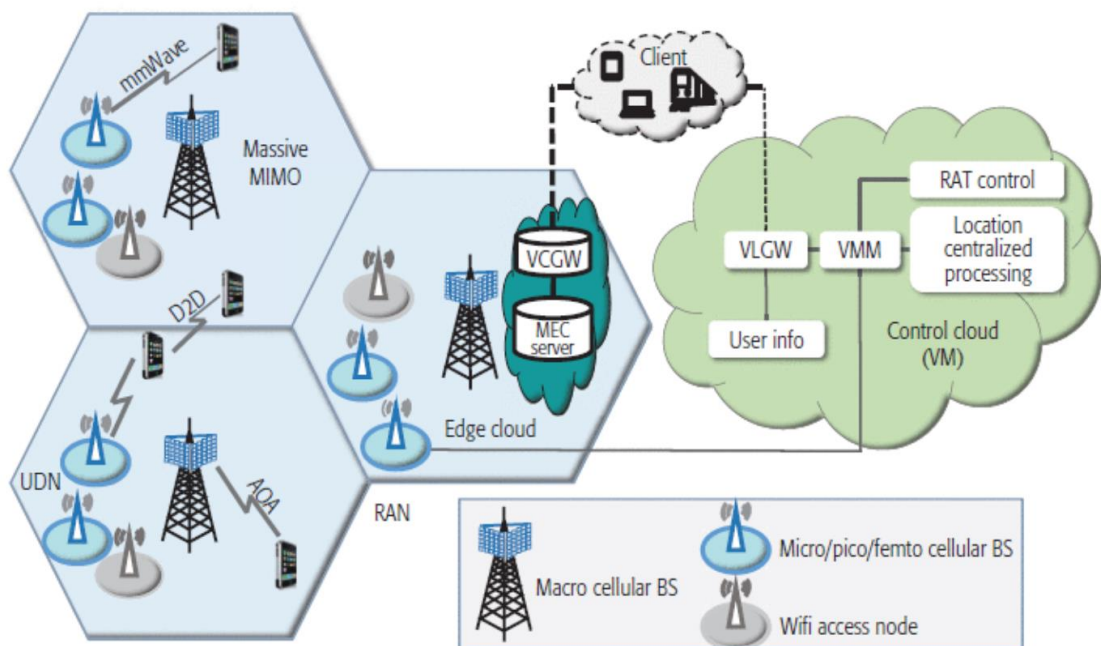
5G-verkkojen kehitys tuo mahdollisesti mukanaan merkittäviä taloudellisia hyötyjä tulevaisuudessa. Nopeampi yhteysnopeus ja alhaisempi viive mahdollistavat älykkäiden laitteiden käytön laajentumisen, mikä puolestaan johtaa tehokkaampaan toimintaan ja säästöihin kustannuksissa. Lisäksi 5G-verkot mahdollistavat uusien palveluiden, kuten virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden, kehittämisen, mikä avaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia viihde- ja matkailualalla. Yritykset, jotka ovat valmiita hyödyntämään näitä mahdollisuuksia, voivat menestyä tulevaisuudessa paremmin, luoda uusia työpaikkoja ja taloudellista kasvua.

4.5 5G paikantaminen

Paikannustiedon tarkkuus ja reaaliaikaisuus ovat tärkeitä paikannukseen perustuvissa palveluissa. Paikannustiedot ovat hyödyllisiä myös radioresurssien hallinnassa 5G-verkoissa, jotka on otettu käyttöön merkittävien suorituskykyparannusten saavuttamiseksi olemassa oleviin soluverkkoihin verrattuna. Useat uudet teknologiat, kuten MIMO, mmWave-, ja D2D-viestintä on otettu käyttöön 5G-verkoissa. Näitä teknologioita ei käytetä ainoastaan kommunikointisuorituskyvyn parantamiseksi, vaan myös merkittävän paikannustarkkuuden kasvattamisen mahdollistamiseksi. Tämän vuoksi 5G-verkot kykenevät paikantamaan käyttäjälaitteen metrin tarkkuudella. 5G ja GNSS (Global navigation satellite system) yhteispaikannuksella 2D paikannusvirhe on alle 10 m 95 % ajasta. (Mogyorósi et al., 2022, s. 7–10)

Solupohjaisessa paikannuksessa tukiaseman ja mobiililaitteen välisiä lähetyksiä voidaan käyttää käyttäjälaitteen paikan määrittämiseen. Solupohjaiset paikannusmenetelmät voidaan jakaa kahteen pääluokkaan sen mukaan, kuka laskee sijainnin: mobiililaitteeseen perustuva, jossa käyttäjälaite laskee sijaintinsa itse ja verkkoon perustuva, jossa verkon sijaintipalvelin laskee käyttäjälaitteen sijainnin. Useimmat solupohjaiset paikannusratkaisut ovat verkkoon perustuvia verkon keskitetyn luonteen vuoksi, mikä mahdollistaa täyden hallinnan sijaintipalvelusta verkon operaattorille sekä sen tukemisen vanhemmille laitteille, jotka eivät enää saa päivityksiä. (Mogyorósi et al., 2022, s. 2–5) Suuremmissa laivoissa ja aluksissa riittäisi virtaa ja laskentatehoa siihen, että ne itse määrittäisivät oman sijaintinsa.

5G-paikannusrakenne koostuu pääasiassa kahdesta osasta ohjauspilvestä ja radioliityntäverkosta (engl. Radio access network), joka sisältää radioverkon. Kuvassa 6 on oikealla ohjauspilvi ja vasemmalla radioliityntäverkko. Reunapilvi (engl. Edge cloud) on osa radioliityntä verkkoa. Reuna- ja ohjauspilvi ovat yhdistetty suoraan toisiinsa. Sijainti määritetään käyttäjälaitteen ja tukiasemien mittauksien perusteella ohjauspilvessä tai käyttäjälaitteessa. Osat keskustelevat keskenään reunapilven kautta (Mogyorósi et al., 2022, s. 3–5).



Kuva 6. 5G-paikannusrakenne (Mogyorósi et al., 2022, s. 3)

Tulevaisuudessa 5G-verkkojen paikannusta voidaan tehostaa koneoppimiseen perustuvilla menetelmillä sekä sisä- että ulkotiloissa. Tämä on todettu useissa tutkimuksissa, joissa on hyödynnetty erilaisia paikannustekniikoita. Koneoppimisella voidaan parantaa paikannuksen tarkkuutta ennustamalla ympäristö- ja signaaliparametreja. (Mogyorósi et

al., 2022, s. 5) Koneoppimisella voidaan ratkaista vaikeasti löydettäviä ympäristön parametreja, jotka vaihtuvat ympäristön muuttuessa.

4.6 5G ja LTE vertailu sisävesillä

LTE on mobiiliverkko, joka perustuu 4G-tekniikkaan. Vaikka LTE käyttää vain taajuuksia, jotka ovat pienempiä kuin 5G NR:n käyttämät taajuudet, se on muilla tavoilla hyvin samanlainen. 5G on perinyt useita asioita 4G:ltä. LTE-verkkoa voidaan viipaloida kuten 5G NR:ää. MIMO-tekniikkaa käytetään sekä LTE:ssä että 5G:ssä, mutta 4G:ssä ei ole URRLC:ta tai mMTC:tä, joita käytetään 5G:ssä. Säteenmuodostus on mahdollista vain 5G:ssä. (Dahlman et al., 2021) Vaikka 5G NR ei tuottanut mitään mullistavaa, se on parannettu versio 4G LTE:stä. 5G NR:llä voidaan käsittää suurempia kaistanleveyksiä ja korkeampia taajuuskaistoja kuin LTE:llä.

Nykyiset LTE-verkot eivät kykene tarjoamaan välitöntä pilvipalvelua, laajamittaisia esineiden internet -sovelluksia (engl. internet of things) tai kommunikaatiota droonien ja robotiikan kanssa samalla takaamaan korkealaatuista käyttökokemusta. Lisäksi LTE-verkot pystyvät tarjoamaan korkealaatuista videokokemusta vain rajoitetulle määrälle mobiilikäyttäjää samanaikaisesti (Yu et al., 2017). Viive, tiedonsiirtonopeus ja kapasiteetti ovat LTE-verkon heikkouksia sisävesillä, sillä ne eivät ole riittäviä vedessä liikkuvien alusten ohjaukseen tai useiden videokuvien samanaikaiseen siirtoon. LTE:llä on kuitenkin pidempi kantama kuin 5G NR:lla. LTE:tä voidaan käyttää kevyempiin tehtäviin kuten sähköpostiin, mutta sillä ei ole mahdollista kehittää sisävesiväyliä automatisoiduiksi.

4.7 Esimerkit 5G:n hyödyntämisestä sisävesiverkossa

5G:tä on käytetty hyödyksi erilaisissa sisävesialueiden kohteissa, kuten autonomisten proomujen ohjauksessa ja jokien roskaa keräävien robottialusten käytössä (Slamnik-Kriještorac et al., 2023; Chia, 2023). Molemmat käyttökohteet ovat suhteellisen uusia. Proomujen ohjausprojekti Belgian ja Alankomaiden satamissa on rahoitettu 2020 ja loppuu vuoden 2023 jälkeen (Slamnik-Kriještorac et al., 2023). Jokien roskaa keräävät robotit Singaporen hallitus ja Infocomm Media Development Authority on rahoittanut 2021 ja vuonna 2023 niiden pitäisi liikkua Singaporen joissa. (Chia, 2023)

Automatisoitujen proomujen ohjaus on toteutettu osana Euroopan unionin rahoittamaa 5G Blueprint -projektia. Hankkeen tarkoituksena on parantaa kuljetus- ja logistiikka-alan prosesseja 5G-tekniikan avulla. Projektin päämääränä on luoda toimiva ekosysteemi, jossa 5G-tekniikkaa hyödynnetään laajasti erilaisissa sovelluksissa ja palveluissa. Tämän lisäksi hankkeen tarkoituksena on luoda kattava suunnitelma ja suositukset 5G-

verkkojen rakentamiselle ja käytölle. (Slamnik-Kriještorac et al., 2023) Euroopan Unionin 5G Blueprint -projektin tavoitteet ovat erittäin tärkeitä viestintäteknologioiden parantumiselle sisävesillä.

Proomujen ohjaustutkimuksessa todetaan, että yksi suurimmista haasteista automaation toteuttamisessa on epätehokas kommunikaatio alusten ja satamien välillä. Satelliittiviestintä on tähän asti ollut ainoa vaihtoehto, mutta se on kallis ja sisältää suuren viiveen. (Slamnik-Kriještorac et al., 2023) 5G-tekniikan mahdollistama alhainen viive ja korkea datanopeus mahdollistaisi paremmin alusten automatisoinnin ja etäohjauksen.

Tutkimus toteutettiin käyttäen kaupallista proomu testialustana. Proomu varustettiin useilla antureilla ja kameroilla ympäristön havainnointia sekä tilannekuvan parantamista varten. 5G-modeemi asennettiin proomuun, jotta se voisi kommunikoida mobiiliverkon kautta. Tieto, kuten kameroiden tuottama video, siirretään kuljetus- ja ydinverkkojen kautta pilvipalveluun, johon sekä ohjauskeskus että proomu ovat yhteydessä. Ohjauskeskus luo ohjauksikäskyt, jotka lähetetään takaisin proomulle 5G-infrastruktuurin kautta. Tutkimuksessa käytettiin eMBB-tapaa tiedonsiirtoon proomulta pilvipalveluun ja URLLC-tapaa tiedonsiirtoon proomulle. (Slamnik-Kriještorac et al., 2023) Proomu oli tason kolme autonominen alus, sillä se tarvitsi etäohjausta, eikä sisältänyt miehistöä.

Työn päätelmänä 5G:n todetaan olevan lupaava ratkaisu automatisoitujen proomukontrollijärjestelmien kehittämiseksi. Kuitenkin tekijät toteavat, että lisätestejä tarvitaan laajemmissa olosuhteissa, jotta saataisiin tarkempia tuloksia 5G:n suorituskyvystä. Tutkijat suunnittelevatkin jatkavansa testejä ja mittauksia tulevaisuudessa. (Slamnik-Kriještorac et al., 2023)

Vesialueen roskankeräysrobotit ovat yksi Infocomm Media Development Authority-ohjelman tukemia 5G sovelluksia. Ohjelman tarkoituksena on nopeuttaa 5G-ratkaisujen käyttöönottoa ja kaupallistamista. Yhteensä seitsemän 5G-projektia on saanut tukea ohjelman puitteissa. Vesialueen roskankeräysrobotit ovat miehittämättömiä tason kolme autonomisia aluksia, jotka puhdistavat ja tarkastavat jokia. Robotit ovat 5G yhteydessä ohjausyksikköön, jossa ohjausyksikkö käsittelee saadun videokuvan ja ohjaa robotteja. (Chia, 2023)

Molemmissa 5G esimerkeissä sisävesialueilla nähdään, että 5G:n käyttö onnistuu sisävesialueilla mahdollisesti laajemminkin. Vaikka käyttötapaukset on tehty suhteellisen pienellä alueella, ne tuovat 5G:n idean hyvin esille. Proomujen ohjauksesta 5G:n avulla nähdään, että isompiakin aluksia voidaan ohjata hankalissa ja ahtaissa paikoissa, jollaisia satamat yleensä ovat. Tutkimus toteutettiin suhteellisen lyhyellä jokiosuudella, joten käytön kasvaessa voi esiintyä uudenlaisia ongelmia. Euroopan unioni tuskin lopettaa

5G:n tutkimista, jolloin sisävedet ja satama-alueet tulevat olemaan 5G:n kuuluvuusalueella.

Vesistöjen roskankeräysrobotit esittävät hyvin, kuinka 5G:n pienellä viiveellä ja suurella tiedonsiirtonopeudella voidaan tehdä tason kolme autonomisia robotteja, jotka lähettävät videokuvaa ohjausyksikköön. Robottien määrää on myös helppo lisätä 5G:n suuren kapasiteetin ansiosta. Suurin eroavaisuus esimerkkien välillä on alusten koko. Proomut ovat paljon suurempia kuin vesistöjen siivousrobotit. Yhteyksissä ja ohjaustavassa esimerkit ovat kuitenkin samanlaisia.

5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, millaisia vaatimuksia sisävesialueet asettavat verkkoyhteyksille ja kuinka hyvin 5G vastaa näihin vaatimuksiin. Työn tarkoituksena oli myös selvittää 5G:n mahdollisia ongelmia ja mahdollisuuksia sisävesialueilla. Aihe on tällä hetkellä erittäin merkityksellinen, sillä 5G-teknologia avaa uusia mahdollisuuksia liikenne-
muotojen kehittämiseksi.

Sisävesiliikenne on ollut tärkeä liikennemuoto jo pitkään ja se on yhdistänyt teollisuuskeskittymät kaupankäynnin keskuksiin. Suuret kaupungit on usein rakennettu vesialueiden äärelle, mikä tekee vesireiteistä vielä tärkeämpiä. Vesiliikenne tarvitsee verkkoyhteydeltä hyvän kuuluvuuden, reaaliaikaisuuden, mahdollisuuden sijainnin määrittämiseen, tietoturvan ja mahdollisimman suuren tiedonsiirtonopeuden. Varsinkin sisävesialueiden automatisointi vaatii suuria tiedonsiirtonopeuksia ja erittäin pientä viivettä.

5G-verkko soveltuu hyvin sisävesiliikenteen tarpeisiin, mutta sen suurin haaste on heikko kantama. Tämän haasteen ratkaisemiseksi tarvitaan joko merkittäviä investointeja 5G-verkon levittämiseksi syrjäisillekin vesialueille tai uuden teknologian käyttöönottoa, esimerkiksi UAV-tukiaseman muodossa. Mahdollisuutena on myös jättää tietoisesti osa sisävesialueista ilman 5G-yhteyttä.

Verkon käytön lisääntyminen kasvattaa myös tietoturvan tärkeyttä. Lisäksi 5G-verkko kuluttaa enemmän sähköä ja vaatii enemmän tukiasemia kuin aikaisemmat verkot, mikä tarkoittaa korkeampia kustannuksia. On kuitenkin tärkeää huomata, että 5G-verkon järkevällä suunnittelulla kulutusta saadaan vähennettyä ja 5G voi tuottaa kulutetut varat takaisin. 5G-verkko mahdollistaa myös erittäin tarkan paikannuksen GNSS-signaalin kanssa.

Jatkotutkimusaiheita 5G:lle sisävesisovelluksille on valtavasti. Tällä hetkellä tärkeintä olisi löytää 5G:lle lisää käyttökohteita alueille, joissa on jo 5G. Hyviä esimerkkejä näistä ovat vesistöjen siivousrobotit ja autonominen proomu. Todennäköisesti Euroopan unioni jatkaa tämänhetkistä tutkimusta. Sen jälkeen olisi hyvä tutkia tapoja, miten 5G saadaan otettua käyttöön kaikilla sisävesialueilla. Jatkossa tutkimuksia voitaisiin soveltaa myös suuremmille vesialueille, kuten kansainvälisille merille.

LÄHTEET

- Chen, W., Chen, Y., Li, J., Wang, Y., & Quek, T. Q. S. (2018). Maritime 5G Experiment in Windsurfing World Cup by Using 28 GHz Band Massive MIMO. *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1134–1135. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580672>
- Chen, W., Li, C., Yu, J., Zhang, J., & Chang, F. (2021). A survey of maritime communications: From the wireless channel measurements and modeling perspective. *Regional Studies in Marine Science*, 48, 102031. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102031>
- Chia, O. (2023, maaliskuuta 7). 5G-enabled robots to clean Singapore's rivers, patrol streets and build Hyundai EVs. *The Straits Times*. <https://www.straitstimes.com/tech/5g-enabled-robots-to-clean-singapore-s-rivers-patrol-streets-and-build-hyundai-evs>
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2021). *5G NR: The next generation wireless access technology* (Second edition). Academic Press.
- Directorate General for Environment. (2018). *Ohjeasiakirja Sisävesiliikenne ja Natura 2000: Yhteenveto*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/963774>
- Eloranta, P., Jokinen, O., Mäkipää, M., Piuva, J.-P., Riihentupa, L., & Virtanen, S. (2020). *Viestintäverkkojen kustannuselvitys*. Traficom. <https://www.traficom.fi/fi/julkaisut/viestintäverkkojen-kustannuselvitys-liikennevaylilla>
- Enoch, S. Y., Lee, J. S., & Kim, D. S. (2021). Novel security models, metrics and security assessment for maritime vessel networks. *Computer Networks*, 189, 107934. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107934>
- Feng, W., Chen, Y., Li, J., Wang, Y., & Quek, T. Q. S. (2022). Guest editorial: Maritime communications in 5G and beyond networks. *China Communications*, 19(9), iii–v. <https://doi.org/10.23919/JCC.2022.9900230>
- Haseltalab, A., Chen, L., Colling, A., Borst, L., Garofano, V., Hekkenberg, R., & Negenborn, R. R. (2019). Waterborne platooning by smart vessels for smart shipping. *Department of Maritime and Transport Technology*, 2019. <http://www.negenborn.net/pubs/2019-naval-architect-haseltalab-et-al.pdf>
- Hassan, N., Yau, K.-L. A., & Wu, C. (2019). Edge Computing in 5G: A Review. *IEEE Access*, 7, 127276–127289. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938534>
- Israr, A., Yang, Q., Li, W., & Zomaya, A. Y. (2021). Renewable energy powered sustainable 5G network infrastructure: Opportunities, challenges and perspectives. *Journal of Network and Computer Applications*, 175, 102910. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102910>
- Ji, X., Huang, K., Jin, L., Tang, H., Liu, C., Zhong, Z., You, W., Xu, X., Zhao, H., Wu, J., & Yi, M. (2018). Overview of 5G security technology. *Science China Information Sciences*, 61(8), 081301. <https://doi.org/10.1007/s11432-017-9426-4>

- Khan, B. S., Jangsher, S., Ahmed, A., & Al-Dweik, A. (2022). URLLC and eMBB in 5G Industrial IoT: A Survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 1134–1163. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3189013>
- Li, X., Feng, W., Wang, J., Chen, Y., Ge, N., & Wang, C.-X. (2020). Enabling 5G on the Ocean: A Hybrid Satellite-UAV-Terrestrial Network Solution. *IEEE Wireless Communications*, 27(6), 116–121. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000076>
- Mogyorósi, F., Revisnyei, P., Pašić, A., Papp, Z., Törös, I., Varga, P., & Pašić, A. (2022). Positioning in 5G and 6G Networks—A Survey. *Sensors*, 22(13), 4757. <https://doi.org/10.3390/s22134757>
- Oughton, E. J., & Russell, T. (2020). The importance of spatio-temporal infrastructure assessment: Evidence for 5G from the Oxford–Cambridge Arc. *Computers, Environment and Urban Systems*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101515>
- Peeters, G., Yayla, G., Catoor, T., Van Baelen, S., Afzal, M. R., Christofakis, C., Storms, S., Boonen, R., & Slaets, P. (2020). An Inland Shore Control Centre for Monitoring or Controlling Unmanned Inland Cargo Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 758. <https://doi.org/10.3390/jmse8100758>
- Rivkin, B. S. (2021). Unmanned Ships: Navigation and More. *Gyroscopy and Navigation*, 12(1), 96–108. <https://doi.org/10.1134/S2075108721010090>
- Rohács, J., & Simongáti, G. (2007). THE ROLE OF INLAND WATERWAY NAVIGATION IN A SUSTAINABLE TRANSPORT SYSTEM. *TRANSPORT*, 22(3), 148–153. <https://doi.org/10.3846/16484142.2007.9638117>
- Slamnik-Kriještorac, N., Vandenberghe, W., Masoudi-Dione, N., Van Staeyen, S., Xiangyu, L., & Kusumakar, R. (2023). Leveraging 5G to Enable Automated Barge Control: 5G-Blueprint Perspectives and Insights. *2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 1151–1154. <https://doi.org/10.1109/CCNC51644.2023.10060113>
- Yan, R., Pang, S., Sun, H., & Pang, Y. (2010). Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 9(4), 451–457. <https://doi.org/10.1007/s11804-010-1033-2>
- Yu, H., Lee, H., & Jeon, H. (2017). What is 5G? Emerging 5G Mobile Services and Network Requirements. *Sustainability*, 9(10), 1848. <https://doi.org/10.3390/su9101848>
- Żabowska, M. (2017). *Inland waterways*. <https://stat.gov.pl/en/metainformation/glossary/terms-used-in-official-statistics/982,term.html>