

Joonas Hyvärinen

VEDENALAISTEN ROBOTTIEN LANGATTOMAT KOMMUNIKOINTIMENETELMÄT

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Joonas Hyvärinen: Vedenalaisten robottien langattomat kommunikointimenetelmät
Wireless communication methods of underwater robots
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2019

Vedenalaisilla roboteilla on tärkeä rooli vedenalaisen ympäristön tarkkailussa, kunnossapidossa ja tutkinnassa. Toimiakseen yhdessä toisten robottien ja ulkomaailman kanssa, tarvitsevat robotit langattomia kommunikointimenetelmiä. Haastava ympäristö aiheuttaa ongelmia kommunikaatiolle, minkä takia useat tavanomaiset menetelmät eivät ole käytännöllisiä vedenalaisessa ympäristössä. Ympäristö mahdollistaa akustiikan, optiikan, radioaaltojen ja sähkömagneettisen induktion käytön kommunikaatiossa. Kuhunkin menetelmään liittyy merkittäviä etuja ja haasteita, jotka tulee ottaa huomioon vedenalaisten robottien kommunikointijärjestelmiä suunniteltaessa. Työn tavoite on tutustua näihin etuihin ja haasteisiin ja vertailla eri menetelmiä siten, että vertailun perusteella on mahdollista valita paras kommunikointimenetelmä eri ympäristöihin.

Työ koostuu kolmesta osasta. Ensimmäisessä osassa esitellään vedenalaisia robotteja ja kommunikaatioon liittyviä komponentteja. Toisessa osassa tutustutaan kirjallisuuskatsauksen avulla eri kommunikointimenetelmiin ja niihin liittyviin etuihin ja haittoihin. Kolmannessa osassa kootaan kommunikointimenetelmät yhteen ja vertaillaan niitä. Vertailun tuloksena esitetään suositus käytettävistä menetelmistä eri kommunikointiympäristöissä.

Tutkimus osoittaa, että käyttämällä akustisia menetelmiä pitkillä kommunikointietäisyyksillä ja valitsemalla optisten menetelmien ja sähkömagneettisen induktion välillä lyhyemmillä etäisyyksillä saavutetaan joustava, moniin kommunikointiympäristöihin soveltuva kommunikointimahdollisuus. Radioaaltojen käyttö puolestaan ehdotetaan korvattavaksi uudemmalla ja ominaisuuksiltaan paremmalla sähkömagneettisella induktiolla ja käytettäväksi vain tilanteissa, jotka eivät rajoitu pelkkään vedenalaiseen kommunikaatioon.

Avainsanat: Vedenalainen kommunikaatio, AUV, kommunikointimenetelmä, akustinen kommunikaatio, optinen kommunikaatio, radioaallot, sähkömagneettinen induktio.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Haluan kiittää ohjaajaani Arttu Heinistä mielenkiintoisesta työn aiheesta ja yhteistyökykyisyydestä. Haluan myös kiittää tyttöystävääni tuesta ja kannustuksesta hetkinä, jolloin motivaatio työn tekemiseen on ollut vähissä.

Tampereella, 12.5.2019

Joonas Hyvärinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VEDENALAISET ROBOTIT JA KOMPONENTIT	2
3. AKUSTINEN KOMMUNIKAATIO	4
3.1 Akustinen aalto vedessä	4
3.2 Moniteinen eteneminen	5
3.3 Vaimennus	6
3.4 Kohina	7
3.5 Doppler-ilmiö	7
4. OPTINEN KOMMUNIKAATIO	8
4.1 Optinen aalto vedessä	8
4.2 Absorboituminen	8
4.3 Sironta	11
4.4 Kohina	12
5. RADIOAALLOT	13
5.1 Radioaalto vedessä	13
5.2 Vaimennus	14
6. SÄHKÖMAGNEETTINEN INDUKTIO	15
7. KOMMUNIKOINTIMENETELMIEN VERTAILU	17
7.1 Kommunikointimenetelmien ominaisuudet	17
7.2 Vertailu kommunikointiympäristön mukaan	19
8. YHTEENVETO	21
LÄHTEET	23

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>General Dynamics Bluefin-9 AUV. Perustuu lähteeseen (General Dynamics 2019a).</i>	2
Kuva 2.	<i>Teledyne Marine ATM-920 Benthos akustinen lähetin (vasen) ja Sonardyne Bluecomm 200 optinen lähetin (oikea) (Sonardyne 2019, Teledyne Marine 2019).</i>	3
Kuva 3.	<i>General Dynamics Bluefin akku (General Dynamics 2019b).</i>	3
Kuva 4.	<i>Akustisen aallon moniteinen eteneminen matalassa (ylempi) ja syvässä (alempi) vedessä. Perustuu lähteeseen (Stojanovic & Preisig 2009, s. 84).</i>	5
Kuva 5.	<i>Absorboitumiskerroin aallonpituuden mukaan puhtaassa makeassa vedessä. Perustuu lähteeseen (Smith & Baker 1981, s. 179).</i>	9
Kuva 6.	<i>Sirontakerroin aallonpituuden mukaan kirkkaassa merivedessä. Perustuu lähteeseen (Smith & Baker 1981, s. 180).</i>	11

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Veden absorboitumiskerroin veden tyyppin mukaan. Perustuu lähteeseen (Kaushal ja Kaddoum 2016, s. 1524).....</i>	10
Taulukko 2.	<i>Optimaalinen aallonpituus veden tyyppin mukaan suuruusluokkien vertailua varten. Perustuu lähteeseen (Kaushal ja Kaddoum 2016, s. 1525).....</i>	10
Taulukko 3.	<i>Veden sirontakerroin veden tyyppin mukaan suuruusluokkien vertailua varten. Perustuu lähteeseen (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1524).....</i>	12
Taulukko 4.	<i>Eri kommunikointimenetelmien edut ja haitat.</i>	17
Taulukko 5.	<i>Kommunikointimenetelmien ominaisuudet lukuarvoina. Perustuu lähteisiin (Lanbo et al. 2008; Kaushal & Kaddoum 2016; Mostafa et al. 2018; Li et al. 2019; Wang et al. 2019).</i>	18
Taulukko 6.	<i>Parhaiksi valitut kommunikointimenetelmät kommunikointietäisyyden ja veden ominaisuuksien suhteen matalassa ja syvässä vedessä.....</i>	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
LED	Light-Emitting Diode
MI	Magnetic Induction
NFC	Near Field Communication
Wi-Fi	Wireless Fidelity
bps	Bits per second

1. JOHDANTO

Vesistöt peittävät noin kaksi kolmasosaa maapallon pinnasta, mutta vain pieni osa vesistöistä on tutkittuja. Vesistöjen tutkinta on yksi monista tehtävistä, joihin hyödynnetään autonomisia vedenalaisia robotteja. Muita käyttökohteita ovat ympäristön tarkkailu ja kunnossapito, kaivos- ja öljyteollisuus, sotilaskohteet sekä muut kohteet, kuten hylkyjen tutkinta. Tarve vedenalaisille roboteille on lisääntynyt 1970-luvun jälkeen, jolloin kehitykset teknologiassa mahdollistivat sen, että autonomisten robottien käyttöä vedenalaisessa ympäristössä alettiin todella kehittää. (Yuh et al. 2011, s. 221–222)

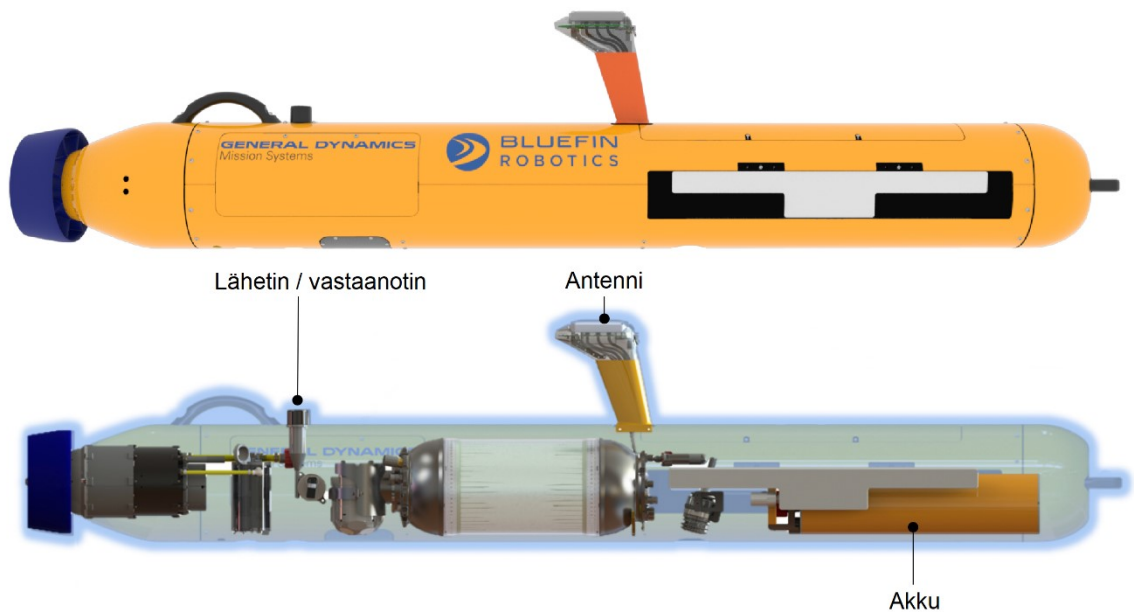
Autonomiset vedenalaiset robotit keräävät tietoa ympäristöstään erilaisten sensoreiden avulla. Merkittävä ongelma vedenalaisissa tehtävissä onkin robotin keräämän datan sekä erilaisten tilatietojen lähettäminen robotilta eteenpäin. Tämän tiedon siirtämiseen tarvitaan vedenalaisia kommunikointimenetelmiä. Usein langalliset kommunikointimenetelmät rajoittavat autonomisten robottien toimintaa liikaa, joten langattomat menetelmät ovat käytännöllisempiä vedenalaisessa toiminnassa.

Vedenalainen ympäristö asettaa useita haasteita langattomalle kommunikaatiolle. Useat vedenpinnan yläpuolella laajasti käytetyt kommunikointimenetelmät eivät toimi ollenkaan tai toimivat merkittävästi alennetulla tehokkuudella vedenpinnan alapuolella. Ympäristö mahdollistaa akustisen kommunikaation, optisen kommunikaation, radioaaltojen ja sähkömagneettisen induktion käytön kommunikaatiossa. Tässä työssä tarkastellaan eri kommunikointimenetelmiin liittyviä hyviä ja huonoja puolia, sekä vertaillaan eri menetelmien ominaisuuksia. Vertailun perusteella esitetään parhaiten soveltuvat menetelmät eri vedenalaisiin ympäristöihin. Työssä pyritään tarjoamaan perusteellinen kuva vedenalaisten robottien langattomista kommunikointimenetelmistä ja siitä, mihin tilanteeseen kukin niistä soveltuu. Työn laajuuden takia signaalinkäsittely jätetään työn rajauksen ulkopuolelle, ja tämän seurauksena myös vahvasti signaalinkäsittelyyn sidottu laskennallinen määrittely jätetään käsittelemättä.

Työn aluksi luvussa 2 esitellään tarkemmin vedenalaisia robotteja, niiden ominaisuuksia ja vedenalaiseen kommunikaatioon liittyviä komponentteja. Tämän jälkeen luvuissa 3–6 esitellään kirjallisuuskatsauksen avulla eri kommunikointimenetelmät ja niihin liittyvät edut ja haasteet. Luvun ensimmäiset alaluvut on varattu kommunikointimenetelmien yleisille tiedoille ja eduille ja loput alaluvut on varattu kommunikointimenetelmien haasteille. Luku 7 sisältää koostettuna eri kommunikointimenetelmien ominaisuudet ja niihin liittyvän vertailun. Luvun perusteella lukija pystyy valitsemaan parhaiten sopivan kommunikointimenetelmän mihin tahansa tilanteeseen. Luvussa 8 tehdään yhteenveto ja tarkastellaan työn tavoitteiden toteutumista.

2. VEDENALAISET ROBOTIT JA KOMPONENTIT

Autonomia vedenalaisten robottien tapauksessa tarkoittaa omavaraisuutta, älykkyyttä ja kykyä itsenäiseen päätöksentekoon vedenalaisessa toiminnassa (Yuh et al. 2011, s. 221). AUV (Autonomous Underwater Vehicle) on robotti, joka kykenee autonomiseen toimintaan veden alla. AUV:t koostuvat tavallisesti useista komponenteista, joista kommunikoinnin kannalta oleellisimpia ovat lähettimet, vastaanottimet, antennit ja akut. Alla on General Dynamicsin valmistama yleisellä tavalla muotoiltu AUV, jossa nämä komponentit ovat merkittyinä viivojen ja tekstien avulla.



Kuva 1. General Dynamics Bluefin-9 AUV. Perustuu lähteeseen (General Dynamics 2019a).

Kuvassa 1 on esitettyä robotin ulko- ja sisäpuoli. Kuvan AUV käyttää kommunikointiin akustista modeemia, joka toimii samalla sekä lähettimenä että vastaanottimena. Lähettimen ja vastaanotimen tyyppi sekä vaadittu antennin koko vaihtelevat kommunikointimenetelmän mukaan. Antennit sijaitsevat usein vedenalaisten robottien sisällä tai esimerkiksi rungon siivekkeissä veden vastuksen vähentämiseksi (Yuh et al. 2011, s. 227). Kuvassa 2 on esitettyä kaksi erilaista useissa vedenalaisissa roboteissa käytössä olevaa lähetintä, joista ensimmäistä käytetään akustiseen ja toista optiseen kommunikaatioon.



Kuva 2. Teledyne Marine ATM-920 Benthos akustinen lähetin (vasen) ja Sonardyne Bluecomm 200 optinen lähetin (oikea) (Sonardyne 2019, Teledyne Marine 2019).

Akut ovat merkittävä rajoittava tekijä vedenalaisten robottien toiminnassa. Tällä hetkellä akut rajoittavat robottien tehtävien kestoja ja toimintasädeä ja niiden kasvattaminen vaatisi AUV:jen koon kasvattamista, mikä olisi epäkäytännöllistä. (d'Amore-Domenech et al. 2018, s. 387) Kuvasta 1 nähdään, että akut vievät suuren osan AUV:n sisätilasta. Siksi on tärkeää, että vedenalaisten robottien langattomat kommunikointimenetelmät ovat mahdollisimman energiatehokkaita. Eri kommunikointimenetelmien esittelyn ja vertailun yhteydessä kiinnitetäänkin huomiota kunkin kommunikointimenetelmän virrankulutukseen. Tarkempi kuva AUV:n käyttämästä akusta on esitettyä kuvassa 3.



Kuva 3. General Dynamics Bluefin akku (General Dynamics 2019b).

On yleistä, että vedenalainen robotti hyödyntää useampaa kuin yhtä kommunikointimenetelmää ja sisältää usean kommunikointimenetelmän vaatimat komponentit. Tällaisessa tilanteessa robotti pystyy autonomisilla ominaisuuksillaan tekemään päätöksen käytettävästä kommunikointimenetelmästä esimerkiksi halutun tiedonsiirtonopeuden, vaaditun lähetystehon tai robotin sijainnin perusteella.

3. AKUSTINEN KOMMUNIKAATIO

3.1 Akustinen aalto vedessä

Akustisia aaltoja hyödyntävä akustinen kommunikaatio on vedenalaisista kommunikointimenetelmistä monipuolisin, käytetyin ja vanhin (Lanbo et al. 2008). Se on myös menetelmistä ainoa, joka mahdollistaa tiedonsiirron etäisyydestä riippumatta (Huang et al. 2018, s. 951–952). Tämän riippumattomuuden vuoksi akustinen kommunikaatio on yhä hyvin käytetty menetelmä vedenalaisten robottien kommunikaatiossa.

Akustisen kommunikaation mahdollistama pitkä kommunikointietäisyys johtuu äänen verrattain matalasta vaimennuksesta vedessä. Matalasta vaimennuksesta huolimatta akustisella kommunikaatiolla voidaan parhaassakin tapauksessa saavuttaa vain alle Mbps:n tiedonsiirtonopeudet, jotka ovat matalammat kuin millään muulla kommunikointimenetelmällä. (Lanbo et al. 2008, s. 978) Vaimennuksen voimakkuus on verrannollinen taajuuteen ja kommunikointietäisyyteen, joten suurten tiedonsiirtonopeuksien saavuttaminen korkeilla etäisyyksillä on mahdotonta (Huang et al. 2018, s. 952). Vaimennusta käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.3.

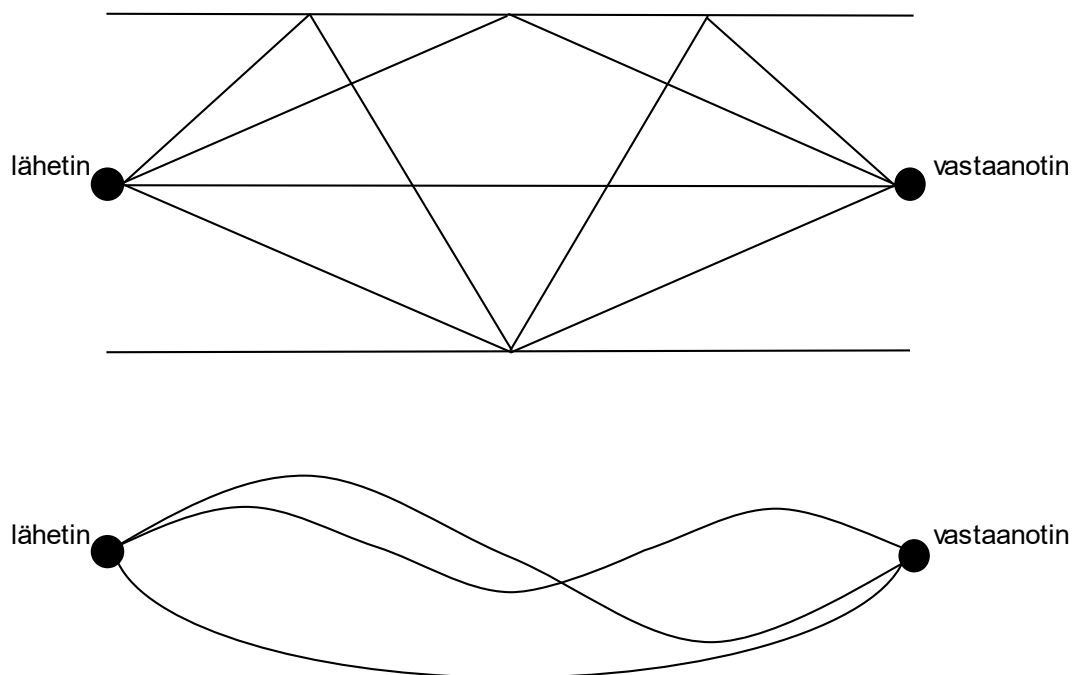
Akustinen aalto etenee vedessä keskimäärin viisinkertaisella nopeudella ilmaan verrattuna. Silti aallonnopeus on melko pieni ja merkittävästi pienempi kuin muilla vedenalaisilla kommunikointimenetelmillä. Matala aallonnopeus aiheuttaa merkittävää Doppler-ilmiötä, joka hankaloittaa vedenalaista kommunikaatiota (Lanbo et al. 2008, s. 985). Doppler-ilmiön vaikutusta kommunikaatioon käsitellään alaluvussa 3.5.

Vaimennuksen ja Doppler-ilmiön lisäksi akustiseen kommunikaatioon liittyy heikkouksia matalassa vedessä. Näitä ovat moniteinen eteneminen sekä kohina, joita esitellään tarkemmin alaluvuissa 3.2 ja 3.4. (Lanbo et al. 2008 s. 978) Näiden heikkouksien vuoksi akustinen kommunikaatio sopii parhaiten syviin vesistöihin, joissa heikkouksien vaikutus jää vähäiseksi ja akustisen kommunikaation hyödyt tulevat esiin.

On yleistä, että vedenalaisissa roboteissa on vähintään yhtenä kommunikointimenetelmänä akustinen vaihtoehto sen tarjoamien etujen takia. Usein akustisen kommunikaation heikkouksia kompensoidaan toisilla menetelmillä, kun se on mahdollista. Kaushalin ja Kaddoumin (2016, s. 1519) mukaan akustiset kommunikointimenetelmät vaativat roboteilta vain pienen antennin, mikä on käytännöllistä usein rajoitetun tilan takia. Toisaalta ne vaativat yleensä muita menetelmiä suuremman lähetystehon, mikä on epäkäytännöllistä rajallisen akkukapasiteetin takia (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1519). Yleisesti akustiset kommunikointimenetelmät ovat lähes pakollinen valinta niiden heikkouksista huolimatta, kun AUV:jen kommunikointietäisyys ylittää 100 m.

3.2 Moniteinen eteneminen

Akustisessa kommunikaatiossa viestiä kuljettavat aallot voivat saavuttaa viestin vastaanottajan useita eri reittejä pitkin. Myöhemmin esiteltävien syiden takia eri aallot kulkevat eri reittejä, joista toisiin menee enemmän aikaa, jolloin vastaanottimelle saapuu useita versioita samasta aallosta. Tätä kutsutaan moniteiseksi etenemiseksi. Aallot käyttäytyvät eri tavalla sen mukaan, tapahtuuko kommunikaatio matalassa vai syvässä vedessä. (Lanbo et al. 2008, s. 980–981; Stojanovic & Preisig 2009, s. 85–87)



Kuva 4. Akustisen aallon moniteinen eteneminen matalassa (ylempi) ja syvässä (alempi) vedessä. Perustuu lähteeseen (Stojanovic & Preisig 2009, s. 84).

Kuvasta 4 nähdään, miten akustinen aalto käyttäytyy matalassa ja syvässä vedessä. Kuvan viivat kuvaavat vedessä kulkevia aaltoja, jotka kulkevat lähettimen ja vastaanottimen välillä. Lanbon et al. (2008, s. 980) mukaan matalan veden kommunikaatio on tilanne, jossa viestin kulkema matka ylittää veden syvyyden. Matalassa vedessä syy aallon moniteiseen etenemiseen on akustisten aaltojen heijastuminen vedenpohjasta ja -pinnasta. Syvässä vedessä puolestaan aaltojen taipuminen on merkittävin syy moniteiseen etenemiseen. (Lanbo et al. 2008, s. 980)

Äänen nopeus vedessä vaihtelee lämpötilan, paineen, virtauksen nopeuden, syvyyden ja veden suolapitoisuuden perusteella, jolloin syntyy rajapintoja eri alueiden välille. Lähellä vedenpintaa lämpötila ja paine pysyvät vakioina, mutta mentäessä syvemmälle lämpötila laskee ja paine nousee. Tietyissä syvyydessä veden lämpötila saavuttaa vakion 4 °C, mutta paine jatkaa kasvamistaan. Snellin lain mukaan akustinen aalto pyrkii aina taipumaan kohti matalamman nopeuden

aluetta. Tämä johtaa siihen, että jokainen akustinen aalto taipuu rajapinnoissa hieman eri tavalla ja aallot kulkevat joka kerta hieman eri reittiä vastaanottajan luo. (Stojanovic & Preisig 2009, s. 85–86; Huang et al. 2015, s. 1538)

Moniteinen eteneminen aiheuttaa ongelmia erityisesti akustisten aaltojen interferenssin seurauksena (Lanbo et al. 2008, s. 980). Se onkin yksi suurimmista syistä kommunikaatiovirheille (Huang et al. 2015, s. 1538). Marchetti ja Reggiannini (2016) esittävät työssään vaihtoehtoisen vastaanottimen yleensä käytetyille vastaanottimille sekä menetelmän aaltojen jäljennösten erottamiseksi toisistaan. Vastaanotin pystyy käsittelemään useita signaaleja yhden sijaan käyttäen rinnakkaisarkkitehtuuria (Marchetti & Reggiannini 2016).

3.3 Vaimennus

Akustinen aalto vaimenee edetessään vedessä. Vaimennuksen voimakkuus riippuu kommunikointietäisyydestä ja taajuudesta. Korkeataajuiset aallot kokevat voimakasta vaimennusta jo lyhyilläkin etäisyyksillä, kun taas matalataajuiset aallot voivat kulkea pitkiä matkoja pienemmällä vaimennuksella. Tästä seuraa se, että akustisen aallon kaistanleveys on hyvin rajoitettu pidemmillä kommunikointietäisyyksillä. (Lanbo et al. 2008, s. 980–981) Kaistanleveys kuvaa systeemin kapasiteettia tiedonsiirtoon ja on verrannollinen tiedonsiirtonopeuteen (Clapham & Nicholson 2014).

Stojanovic ja Preisig (2009, s. 84) jakavat akustisen aallon vaimennuksen kahteen kategoriaan: absorboivaan vaimennukseen sekä sironnasta johtuvaan vaimennukseen. Lanbo et al. (2008, s. 980–981) esittävät lisäksi kolmannen tavan, geometrisen leviämisen. Lv et al. (2016) esittävät tutkimuksessaan empiirisen mallin kommunikaation vaimennuksen laskemiseksi. Mallin tarkempi käsittely ei ole työn rajauksen takia oleellista, mutta mainittakoon kuitenkin, että malli ei huomioi geometristä leviämistä.

Absorboiva vaimennus aiheutuu siitä, kun osa aallon energiasta muuttuu aallon kulkiessa epätäydellisten materiaalien läpi muiksi energiamuodoiksi, pääosin lämmöksi (Lanbo et al. 2008, s. 981). Tutkimalla Lv et al. (2016) esittämää mallia voidaan todeta, että absorboivan vaimennuksen suuruus kasvaa eksponentiaalisesti suhteessa kommunikointietäisyyden kasvuun. Kommunikointietäisyys on siis dominoiva tekijä absorboivassa vaimennuksessa.

Akustinen aalto siroaa kohdatessaan partikkeleja tai ilmakuplia vedessä. Jokainen aallon sironta kuluttaa pienen määrän aallon energiasta, jolloin aallon voimakkuus pienenee ja aalto vaimenee. (Lanbo et al. 2008, s. 979–981) Sironnasta johtuvan vaimennuksen osuus ei ole yhtä merkittävä kuin absorboivan vaimennuksen.

Akustiset aallot levittäytyvät aallon lähettämispisteestä ympäristöönsä, jolloin ne jakaantuvat etäisyyden kasvaessa laajemmalle alueelle. Tällöin niiden energia pinta-alayksikköä kohden on pienempi ja ne ovat vaimeampia. Tätä kutsutaan geometriseksi leviämiseksi. Geometriseen leviämiseen vaikuttaa pelkästään kommunikointietäisyys, ja se on riippumaton taajuudesta. (Lanbo et al. 2008, s. 981; Huang et al. 2018, s. 952–953)

3.4 Kohina

Vedenalaisessa ympäristössä on useita lähteitä akustiseen hyötysignaaliin kuulumattomalle satunnaisignaaliille – kohinalle. Stojanovic ja Preisig (2009, s. 84) esittävät, että kohinalähteet jakautuvat kahteen kategoriaan: kaikissa meriympäristöissä taustalla esiintyvään tasaiseen ympäristön kohinaan sekä vain tietyillä alueilla esiintyvään paikkakohtaiseen kohinaan.

Tasaista ympäristön kohinaa muodostuu laivojen liikkeistä ja niiden välisestä akustisesta kommunikaatiosta, aaltojen hajoamisesta ja siitä aiheutuvista ilmakuplista sekä merieläinten aiheuttamista pitkälle kantautuvista äänistä. Paikkakohtaista kohinaa puolestaan aiheuttavat esimerkiksi kovaääniset jään murtumiset kylmillä vesillä (Lanbo et al. 2008, s. 981; Stojanovic & Preisig 2009, s. 84–85; Diamant et al. 2017, s. 8038).

Veden vaimennuksen vuoksi akustinen signaali heikkenee signaalin kulkeman etäisyyden kasvaessa. Lanbon et al. (2008, s. 981) mukaan pienillä kommunikointietäisyyksillä ympäristön kohina ei aiheuta merkittävää häiriötä kommunikaation onnistumiselle. Pidemmällä etäisyyksillä kumpikin ympäristön kohina nousee usein merkittäväksi ja saattaa jopa ylittää kommunikaatiosignaalin vahvuuden, mikä johtaa pahimmillaan yhteyden katkeamiseen (Lanbo et al. 2008, s. 981). Tämän takia kohina on merkittävä rajoittava tekijä AUV:jen välisessä kommunikaatiossa erityisesti pidemmillä välimatkoilla.

3.5 Doppler-ilmiö

Vedenalaiset robotit ovat tehtäviä suorittaessaan jatkuvassa liikkeessä. Liikettä aiheuttavat veden jatkuva liike sekä robottien liikkeet vedessä. Usein molemmat, lähettäjä ja vastaanottaja, ovat liikkeessä yhtä aikaa ja toistensa suhteen, minkä seurauksena Doppler-ilmiö on yksi vaikuttava tekijä vedenalaisten robottien väliseen akustiseen kommunikaatioon.

Doppler-ilmiön suuruus vedessä on suoraan verrannollinen lähettäjän ja vastaanottajan väliseen suhteelliseen nopeuteen sekä äänen nopeuteen vedessä. Koska äänen kulkunopeus vedessä on hidas verrattuna muihin kommunikointimenetelmiin, on akustisessa kommunikaatiossa Doppler-ilmiöllä hyvin merkittävä haittavaikutus. (Stojanovic & Preisig 2009, s. 84–88; Lv et al. 2016) Ilmiön voimakkuuden arviointia varten on tehty useita tutkimuksia. Diamant et al. (2012) esittävät menetelmän, jonka avulla ilmiön vaikutus kommunikointisignaalin vahvuuteen voidaan laskea. Menetelmä kuuluu kuitenkin signaalinkäsittelyn puolelle, ja siksi sitä ei mainintaa lukuun ottamatta esitellä tarkemmin tässä työssä.

Vaikka tarkkaa ilmiön suuruusluokkaa ei voidakaan esitellä, voidaan sen merkittävyttä verrata muihin menetelmiin. Stojanovic ja Preisig (2009, s. 87–88) vertaavat akustiseen kommunikaatioon ja radioaaltoihin pohjautuvaan kommunikaatioon liittyvää Doppler-ilmiötä keskenään. Kahden hitaasti liikkuvan akustista kommunikaatiota käyttävän AUV:n välinen Doppler-ilmiö voi olla voimakkuudeltaan jopa 10 000-kertainen verrattuna nopeasti liikkuviin radioaaltoja hyödyntäviin laitteisiin (Stojanovic & Preisig 2009, s. 87–88).

4. OPTINEN KOMMUNIKAATIO

4.1 Optinen aalto vedessä

Akustisen kommunikaation ohella optinen kommunikaatio on suosittu vedenalaisten robottien kommunikointimenetelmä (Diamant et al. 2017, s. 8037). Optinen kommunikaatio vaatii vedenalaiselta robotilta optisen lähettimen, joka on yleensä laser- tai LED-pohjainen, sekä valokennon, jota käytetään optisen aallon vastaanottamiseen (Sticklus et al. 2018, s. 1).

Laseriin pohjautuvat ratkaisut tarjoavat korkeamman säteilyvoimakkuuden ja samalla korkeammat tiedonsiirtonopeudet, mutta vaativat tarkan paikannuksen ja kohdistuksen, mikä voi olla hankalaa vedenalaisessa ympäristössä. Ledit (Light Emitting Diodes) puolestaan tarjoavat laaja-alaisemman säteilyn ja helpommin toteutettavan kohdistuksen. (Sticklus et al. 2018, s. 1)

Optisen kommunikaation suurin etu on suuri tiedonsiirtonopeus. Lu et al. (2016) esittävät työssään laseriin pohjautuvan kommunikaatoratkaisun, jolla pystytään saavuttamaan jopa 9,6 Gbps:n tiedonsiirtonopeus 8 m:n kommunikointietäisyydellä (Lu et al. 2016). Verrattuna akustisen kommunikaation suurimpiin tiedonsiirtonopeuksiin, jotka ovat pienillä etäisyyksillä noin 500 kbps, on kyseisen menetelmän tiedonsiirtonopeus lähes 20 000-kertainen (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1518–1519). Vaikka optisten menetelmien tiedonsiirtonopeus onkin akustisia menetelmiä merkittävästi suurempi, on optisten kommunikointimenetelmien vaatima lähetysteho vain noin kymmenesosa akustisten menetelmien vaatimasta tehosta (Kaushal ja Kaddoum 2016, s. 1519). Korkea tiedonsiirtonopeus ja pieni virrankulutus on erityisen tärkeä, kun robotit joutuvat välittämään suurempia määriä dataa, kuten korkealaatuista videokuvaa.

Optisen kommunikaation suurin heikkous verrattuna akustiseen kommunikaatioon on huomattavasti pienempi kommunikointietäisyys. Lanbon et al. (2008, s. 984) mukaan optisen kommunikaation tehokas kommunikointietäisyys on noin 10–100 m, kun taas akustisella kommunikaatiolla voidaan päästä useiden kilometrien mittaisiin etäisyyksiin. Pieni kommunikointietäisyys johtuu optisten aaltojen absorboitumisesta veteen, mitä esitellään lisää alaluvussa 4.2. Muita heikkouksia ovat signaalin sironta sekä ympäristön aiheuttama kohina, joita esitellään alaluvuissa 4.3 ja 4.4.

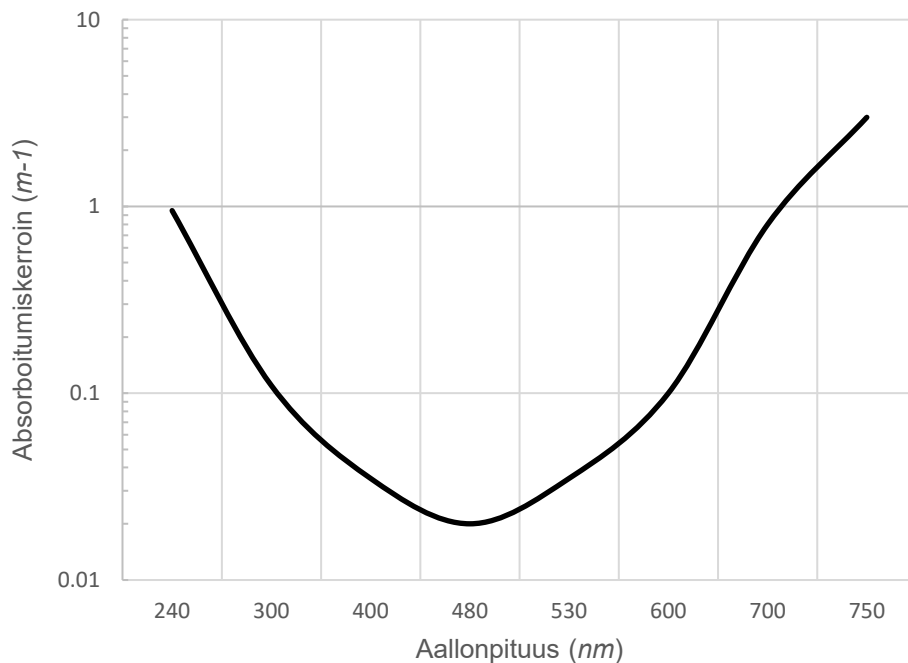
4.2 Absorboituminen

Sillä, millaisessa ympäristössä robotteja halutaan käyttää, on merkittäviä vaikutuksia kommunikaation vahvuuteen. Optiselle kommunikaatiolle rannikkoalueet ovat merkittävästi haasteellisempia kuin avomeri (Sticklus et al. 2018, s. 1–2). Ympäristössä vaikuttaa erityisesti veden tyyppi, jossa kommunikaatio tapahtuu.

Kaushal ja Kaddoum (2016, s. 1520–1524) esittävät, että optisen kommunikaation vahvuutta heikentävän vaimennuksen laskennallisessa määrittämisessä hyödynnetään kahta kerrointa. Nämä

ovat veden absorboitumiskerroin ja sirontakerroin, joista absorboitumiskertoimen vaikutus on merkittävämpi (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1520–1524). Vaikka tämä kandidaatintyö ei käsittele laskennallisia määrittämiä, on silti olennaista esittää se, miten ja miksi kommunikointiympäristö vaikuttaa absorboitumiseen ja sirontaan. Tässä alaluvussa käsitellään absorboitumisen näkökulmaa tarkemmin.

Ensiksi on tärkeää ymmärtää eräs asia valon ominaisuuksista. Kappaleen tai partikkelin väri pohjautuu siihen, minkä aallonpituisia optisia aaltoja se heijastaa havaitsijan silmään. Loput kappaleeseen tai partikkeliin osuvista optisista aalloista imeytyvät siihen. Tämä valon ominaisuus pätee myös optisessa kommunikaatiossa. Esimerkiksi punaisen valon aallonpituudet imeytyvät meriveden partikkeleihin sinisen valon aallonpituuksia vahvemmin ja se on osatekijä siihen, miksi merivesi näyttää kirkkaan siniseltä (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1522–1523).



Kuva 5. Absorboitumiskerroin aallonpituuden mukaan puhtaassa makeassa vedessä. Perustuu lähteeseen (Smith & Baker 1981, s. 179).

Kuvassa 5 kuvataan tarkemmin optisen aallon aallonpituuden vaikutusta sen absorboitumiskertoimeen ja samalla absorboitumisen määrään. Kuvaa tulkitessa nähdään, että siniset ja vihreät aallonpituusalueet 400–500 nm ovat optimaalisia kommunikaation puhtaissa vesistöissä, koska niiden absorboituminen on vähäisintä. Myös Kaushal ja Kaddoum (2016, s. 1525) päätyvät samaan tulokseen.

Kun halutaan vertailla erilaisia veden tyyppisiä optisen aallon absorboitumisen näkökulmasta, on hyvä aloittaa käymällä läpi eri veden tyyppisiä. Kaushal ja Kaddoum (2016, s. 1523) jakavat tyypit neljään kategoriaan: puhtaaseen meriveteen, kirkkaaseen meriveteen, rannikkoalueen meriveden ja sameisiin satamiin. Puhtaassa merivedessä absorboituminen käyttäytyy samalla tavalla

kuin kuvassa 5, koska meriveden suolojen aiheuttama absorboituminen on hyvin pientä näkyvän valon aallonpituusalueella. Muissa kolmessa kategoriassa on kasvava määrä liuenneita partikkeleja, kuten erilaisia orgaanisia materiaaleja. (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1523) Taulukossa 1 esitetään kirkkaan meriveden, rannikkoalueen meriveden ja sameiden satamien absorboitumiskeroin suuruusluokkien vertaamiseksi. Taulukosta huomataan, että siirryttäessä sameampiin vesiin absorboitumiskertoimen kasvu on prosentuaalisesti hyvin merkittävä.

Taulukko 1. Veden absorboitumiskeroin veden tyypin mukaan. Perustuu lähteeseen (Kaushal ja Kaddoum 2016, s. 1524).

Veden tyyppi	Absorboitumiskeroin (m^{-1})
Kirkas merivesi	0,114
Rannikkoalue	0,179
Samea satama	0,366

Suurin syy taulukossa 1 esitettyyn absorboitumiskertoimen nousuun on erilaisen yhteyttävän orgaanisen materian, kuten planktonin, määrän nousu siirryttäessä kohti rannikkoalueita (Sticklus et al. 2018, s. 2). Tällainen orgaaninen materia on usein keltaista tai punaista ja absorboi sinisiä aallonpituuksia (Kaushal & Kaddoum 2016). Taulukossa 2 esitetään optimaaliset aallonpituudet käytettäväksi vedenalaisten robottien optiseen kommunikaatioon veden tyypin mukaan. Taulukosta nähdään, että siirryttäessä sameampiin vesiin aallonpituudet muuttuvat kohti keltaisia aallonpituusalueita.

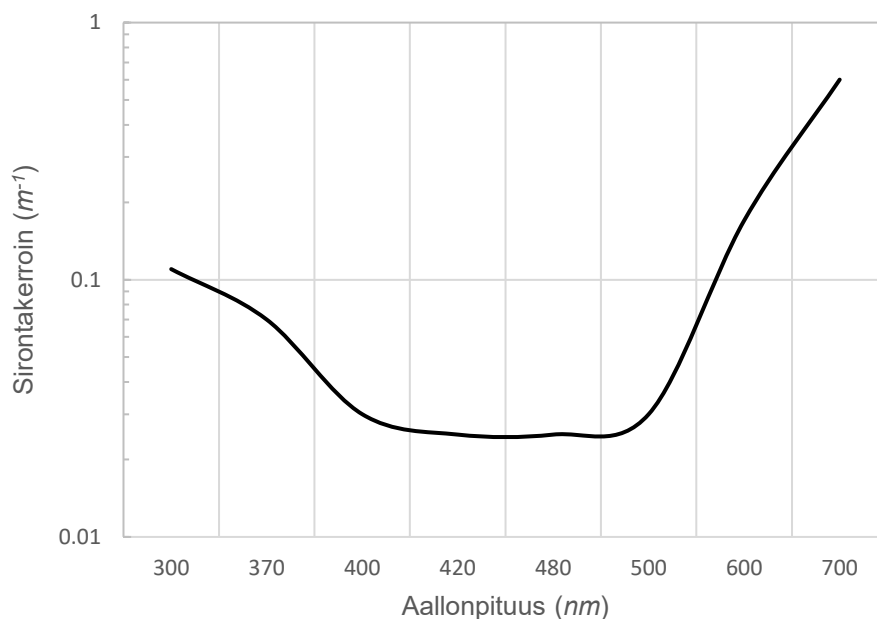
Taulukko 2. Optimaalinen aallonpituus veden tyypin mukaan suuruusluokkien vertailua varten. Perustuu lähteeseen (Kaushal ja Kaddoum 2016, s. 1525).

Veden tyyppi	Aallonpituus (nm)
Kirkas merivesi	450–500 (sininen–vihreä)
Rannikkoalue	520–570 (vihreä–keltainen)
Samea satama	520–570 (vihreä–keltainen)

4.3 Sironta

Optinen aalto siroaa eli muuttaa suuntaansa pois alkuperäiseltä reitiltään kohdatessaan partikkeleja tai ilmakuplia vedessä (Oubei et al. 2017, s. 2–3). Lun et al. (2016) mukaan sironnan vahvuuden määrittää sirontakerroin, joka on puhtaan veden sirontakertoimen, kasviplanktonin sirontakertoimen ja orgaanisen hajotustuotteen sirontakertoimen summa. Sironnan määrän merkittävien osatekijä on vedessä olevien eri partikkelien määrä (Lu et al. 2016).

Lu et al. (2016) esittävät myös, että sirontakerroin olisi suhteellisen riippumaton optisen aallon aallonpituudesta. Kuitenkin tutkittaessa kuvaa 6 huomataan, että sirontakertoimen ja aallonpituuden välillä on selkeä yhteys, joskaan ei yhtä voimakas kuin absorboitumiskertoimen ja aallonpituuden välillä.



Kuva 6. Sirontakerroin aallonpituuden mukaan kirkkaassa merivedessä. Perustuu lähteeseen (Smith & Baker 1981, s. 180).

Sirontakertoimen määrittämiseksi on olemassa kaksi teoriaa: Rayleigh'n teoria ja Mien teoria. Rayleigh'n teoria pätee partikkeleille, joiden koko on pienempi kuin optisen aallon aallonpituus. Mien teoria on yleispätevämpi eikä aseta rajoituksia partikkelien koolle. (Lanbo et al. 2008, s. 983–984) Koska laskennallinen määrittäminen ei kuulu työn rajaukseen, ei teorioihin syvennytä sen tarkemmin. On kuitenkin tärkeää käsitellä, miten robottien toimintaympäristö vaikuttaa sironnan määrään. Taulukossa 3 esitetään laskettuja sirontakertoimen arvoja sinisen–vihreän-aallonpituusalueen optiselle kommunikaatiolle eri toimintaympäristöissä.

Taulukko 3. Veden sirontakerroin veden tyyppin mukaan suuruusluokkien vertailua varten. Perustuu lähteeseen (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1524).

Veden tyyppi	Sirontakerroin (m^{-1})
Kirkas merivesi	0,037
Rannikkoalue	0,220
Samea satama	1,829

Taulukosta nähdään, että kirkkaassa merivedessä sirontakerroin on pieni ja sironta on vähäistä. Siirryttäessä kohti sameampia vesialueita sironnan määrä kasvaa merkittävästi. Tämä johtuu siitä, että sameammilla alueilla on paljon pienhiukkasia ja orgaanista materiaa, jotka aiheuttavat enemmän sirontaa kuin kirkas merivesi, jossa sirontaa aiheuttavat suolaionit (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1523).

4.4 Kohina

Lanbo et al. (2008, s. 983) ja Kaushal ja Kaddoum (2016, s. 1529) esittävät, että lähellä vedenpintaa auringonvalo aiheuttaa eniten kohinaa optisessa signaalissa ja rajoittaa optisen kommunikaation käytettävyyttä. Kaushalin ja Kaddoumin (2016, s. 1529) mukaan kuitenkin myös syvemällä veden alla on kohinaa, joka aiheutuu mustan kappaleen säteilystä sekä sironneesta valosta, jota päätyy vastaanottajalle. Lisäksi jotkin syvänmeren eläimet tuottavat valoa, joka häiritsee optisen kommunikaation signaaleja.

Optista kohinaa voidaan vähentää käyttäen optisia suodattimia. Lisäksi pienentämällä vastaanottimen näkökenttää voidaan välttää ylimääräistä valoa (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1528–1529). Lu et al. (2016) esittämässä 9,6 Gbps optisessa kommunikaatoratkaisussa on hyödynnetty korkeatehoista laseria sen hyvän kohinansietokyvyn takia.

5. RADIOAALLOT

5.1 Radioaalto vedessä

Radioaallot ovat laajasti käytössä oleva kommunikointimenetelmä maanpinnan päällä tapahtuvassa kommunikaatiossa. Esimerkiksi paljon käytetyt Bluetooth ja Wi-Fi (Wireless Fidelity) perustuvat 2,4 GHz:n taajuusalueen radioaaltoihin. Veden sähkömagneettisten ominaisuuksien, kuten johtavuuden ja permittiivisyyden vuoksi vesi absorboi tehokkaasti kyseisen taajuusalueen radioaaltoja, jolloin veden molekyylit alkavat värähtelemään ja tuottamaan lämpöä. Tämän ominaisuuden takia tavanomaiset radioaaltoihin pohjautuvat kommunikointimenetelmät eivät ole käytännöllisiä vedenalaisessa ympäristössä. (Shaneyfelt et al. 2008)

Radioaallot ovat sähkömagneettisia aaltoja, joilla on laaja taajuuksien vaihteluväli. Radioaaltojen etuja ovat aaltojen suuri etenemisnopeus ja korkeat taajuudet, jotka mahdollistavat suuret kaistanleveydet. Aaltojen etenemisnopeus, mahdollinen taajuusalue ja absorboitumisen suuruus ovat erilaisia makeassa ja suolaisessa vedessä. (Lanbo et al. 2008, s. 982–983, Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1520–1523) Näitä asioita käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.2.

Munasinghe et al. (2017, s. 1–2) luettelevat myös muita radioaaltoihin liittyviä etuja. Radioaalloilla saavutetaan akustista kommunikaatiota suuremmat tiedonsiirtonopeudet, jotka ovat Mbps tasolla kbps sijaan. Radioaaltojen käyttö ei myöskään vaadi näköyhteyttä, kuten optisen kommunikaation käyttö vaatisi. Lisäksi radioaallot selviävät vesi–ilma-rajapinnasta helposti, mikä helpottaa kommunikaatiota vedenalaisesta ympäristöstä pinnalle. (Munasinghe et al. (2017, s. 1–2)

Vedenalaisten robottien käytössä radioaaltoihin liittyy suuria haittoja. Kaushalin ja Kaddoumin (2016, s. 1519–1522) mukaan radioaaltojen käyttö vaatii pitkiä antennoja, jotka ovat epäkäytännöllisiä erityisesti pienemmillä roboteilla. Lisäksi radioaaltojen hyödyntäminen kommunikaatiossa suuremmilla etäisyyksillä vaatii jopa satoja kertoja sen määrän tehoa, mitä akustiset ja optiset kommunikointimenetelmät vaativat (Kaushal & Kaddoum 2016 s. 1519–1522). Ero on merkittävä, koska vedenalaisten robottien käytettävissä on hyvin rajallinen määrä akkuja.

Edut ja haitat huomioiden voidaan päätyä lopputulokseen, että radioaaltojen hyödyntäminen vedenalaisten robottien välisessä langattomassa kommunikaatiossa on järkevää, kun kommunikaatio tapahtuu matalilla kommunikointietäisyyksillä haasteellisessa ympäristössä, tai ympäristössä, jossa ei pystytä muodostamaan näköyhteyttä. Suuremmilla kommunikointietäisyyksillä korkeiden tiedonsiirtonopeuksien ylläpitäminen vaatii liikaa tehoa, jolloin akustisen kommunikaation käyttäminen on järkevämpää. Pienillä kommunikointietäisyyksillä tavallisissa vedenalaisissa ympäristöissä taas optisen kommunikaation suuret tiedonsiirtonopeudet tuovat merkittävän edun verrattuna radioaaltoihin.

On olemassa myös radioaaltoja hyödyntäviä kommunikaatiojärjestelmiä, jotka hyödyntävät kelluvia vastaanottimia (Kaushal & Kaddoum 2016, s. 1521). Tällaiset järjestelmät hyödyntävät usein mekaanista linkkiä veden alle ja täten niitä ei käsitellä tässä kandidaatintyössä.

5.2 Vaimennus

Kuten alaluvussa 5.1 mainittiin, radioaaltojen ominaisuuksiin vedenalaisessa kommunikaatiossa vaikuttaa merkittävästi se, tapahtuuko kommunikaatio makeassa vai suolaisessa vedessä. Lanbo et al. (2008, s. 982–983) mukaan veden suolapitoisuus vaikuttaa veden johtavuuteen ja permittiivisyyteen ja samalla myös radioaallon käyttäytymiseen. Tämän seurauksena on hyvä esittää molemmille vesityypeille omat tilanteensa.

Makeassa vedessä radioaallon etenemisnopeus ja absorboituminen ovat riippumattomia radioaallon aallonpituudesta. Tämän seurauksena radioaallot voivat edetä makeassa vedessä melko vapaasti kokien vain vähän vaimennusta. (Lanbo et al. 2008, s. 982) Makeissa vesissä radioaallot ovat vaihtoehto, jota kannattaa harkita käytettäväksi kommunikaatioon erityisesti silloin, kun aiemmin alaluvussa 5.1 esitetyt olosuhteet täyttyvät ja optisen ja akustisen kommunikaation käyttäminen ei ole mahdollista tai järkevää. Seuraavassa luvussa kuitenkin esitetään mahdollisesti korvaava vaihtoehto radioaalloille.

Suolaisessa vedessä on liuenneena suoloja, jotka nostavat veden sähkönjohtokykyä. Toisin kuin makeassa vedessä, sähkömagneettisen aallon nopeuteen ja absorboitumiseen korkean johtokyvyn väliaineessa vaikuttaa radioaallon taajuus. Sekä nopeus että absorboituminen ovat verrannollisia taajuuden neliöjuureen. (Lanbo et al. 2008, s. 982) Verrannollisuus taajuuden ja aallonnopeuden ja absorboitumisen välillä aiheuttaa sen, että vain matalat taajuudet ovat käytännöllisiä suolaisessa vedessä. Tästä puolestaan seuraa se, että suolaisessa merivedessä useat radioaaltojen hyödyistä, kuten aaltojen suuri etenemisnopeus ja korkeat taajuudet, jotka mahdollistavat suuret kaistanleveydet ja suuret tiedonsiirtonopeudet, käyvät merkittävän pieniksi. Lisäksi radioaaltojen taajuuden pienenytessä antennien kokoja joudutaan kasvattamaan yhä suuremmiksi (Akyildiz et al. 2015, s. 42–43). Li et al. (2019, s. 5) mukaan radioaaltojen kommunikointietäisyys on suolaisessa vedessä alle 10 m, mikä on merkittävästi muita kommunikointimenetelmiä alhaisempi. Lanbo et al. (2008, s. 983) esittävätkin, että pelkkien radioaaltojen hyödyntäminen suolaisessa vedessä on hyvin epäkäytännöllistä.

Vaikka vedenalaisten robottien kommunikaatiossa radioaallot soveltuvatkin paremmin makean veden kommunikaatioon, on niiden hyödyntäminen mahdollista myös suolaisessa vedessä. Esimerkiksi Shome et al. (2012, s. 220) ovat kehittäneet AUV:n, joka hyödyntää sekä akustista kommunikaatiota että radioaaltoja. AUV hyödyntää akustista modeemia kommunikaatioon vedenalaisessa ympäristössä ja radioaaltoja noustessaan pinnalle ja kommunikoidessaan vedenpinnan yläpuolisen ympäristön kanssa. (Shome et al. 2012, s. 220) On kuitenkin tulkinnanvaraista laskeaanko tätä enää vedenalaiseksi kommunikaatioksi.

6. SÄHKÖMAGNEETTINEN INDUKTIO

Sähkömagneettinen induktio on uusin vedenalaisten robottien välisistä kommunikointimenetelmistä. Tavallisiin menetelmiin suurimpana erona on se, että kommunikaatioon käytetään antennien sijaan käämejä, jotka luovat magneettikentän ja mahdollistavat langattoman tiedonsiirron hyödyntäen NFC-tekniologiaa (Near Field Communication) (Wang et al. 2019, s. 5975). Vasta tällä vuosikymmenellä on julkaistu tutkimuksia aiheeseen liittyen.

Akyildizin et al. (2015, s. 42–43) mukaan sähkömagneettisella induktiolla on useita lupaavia ominaisuuksia ja etuja verrattuna akustisiin, optisiin ja radioaaltoihin pohjautuviin kommunikointimenetelmiin. Näitä etuja ovat suuri aallon etenemisnopeus, ennakoitava käyttäytyminen ja riittävän suuri kommunikointietäisyys ja tiedonsiirtonopeus useiden vedenalaisten robottien kommunikointitarpeisiin (Akyildiz et al. 2015, s. 42–43).

Sähkömagneettiseen induktioon pohjautuvan kommunikaation aallon etenemisnopeus on sama kuin optisella ja radioaaltoihin pohjautuvalla kommunikaatiolla. Suuren etenemisnopeuden seurauksena menetelmään ei kohdistu Doppler-ilmiötä. Lisäksi se on immuuni moniteiselle etenemiselle. Menetelmään kohdistuva kohina on myös muihin menetelmiin kohdistuvaa kohinaa vähäisempää, koska vesi vaimentaa voimakkaasti korkeataajuisia sähkömagneettisia aaltoja ja täten myös ympäristöstä tulevaa kohinaa. Näiden ominaisuuksien lisäksi sähkömagneettiseen induktioon eivät vaikuta useat veden ominaisuudet, kuten veden sameus. (Akyildiz et al. 2015, s. 42–43) Kaikki nämä yhdistettynä tekevät sähkömagneettisesta induktiosta ennakoitavan käyttäytymiseltään.

Li et al. (2019, s. 5) esittävät, että sähkömagneettisen induktion avulla voidaan saavuttaa 10–100 m:n kommunikointietäisyys ja noin Mbps:n tiedonsiirtonopeus. Etäisyys on likimain sama, kuin mikä on saavutettavissa optisilla kommunikointimenetelmillä. Sähkömagneettinen induktio käytetään veden alla useilla tavoilla samalla tavalla kuin radioaallot, ja esimerkiksi vaimennus on hyvin samankaltaista. Sähkömagneettista induktiota käytettäessä kuitenkin vaaditaan vain pienet käämit ja pieni teho matalien taajuuksien tuottamiseen, jolloin kommunikaatioon ei kohdistu niin suurta vaimennusta ja pidemmät kommunikointietäisyydet ovat mahdollisia (Akyildiz et al. 2015, s. 43). Pienet käämit ovat myös käytännöllisempiä verrattuna radioaaltojen vaatimiin suuriin antenneihin, koska AUV:jen koko on rajallinen. Mostafan et al. (2018) mukaan sähkömagneettinen induktio vaatii lisäksi vain murto-osan tehosta verrattuna muihin kommunikointimenetelmiin.

Tämän kandidaatintyön julkaisuhetkellä sähkömagneettisen induktion käytöstä vedenalaisten robottien kommunikoinnissa löytyy melko vähän tutkimustietoa. Lin et al. (2019, s. 3) mukaan sähkömagneettinen induktio on laajasti käytössä oleva teknologia sotilaskäyttöön tarkoitetuissa AUV:issä, koska se on äänetön ja näkymätön vedenalaisessa ympäristössä. Sähkömagneettista induktiota käytetään kuitenkin laajemmin vedenalaisten langattomien sensoriverkkojen kommu-

nikointimenetelmänä. Sensoriverkot eroavat vedenalaisista roboteista siten, että verkon osat eivät liiku veden alla, jolloin sensoriverkoissa voidaan hyödyntää passiivisia, paikallaan olevia käämejä, jotka välittävät sähkömagneettista induktiota ja pidentävät sähkömagneettisen induktion kommunikointietäisyyttä tarvitsematta omaa virtalähdettä (Wang et al. 2019, s. 5976).

Pieni virrankulutus ja muut sähkömagneettisen induktion tarjoamat edut tekevät siitä potentiaalisen kilpailijan muille kommunikointimenetelmille. Aiheeseen liittyvän tutkimuksen yhä lisääntyessä on hyvin mahdollista, että sähkömagneettinen induktio yleistyy sotilaskäytön ulkopuolella ja kilpailee keskipitkän etäisyyden kommunikaatiosta optisen kommunikaation ja radioaaltojen kanssa.

7. KOMMUNIKOINTIMENETELMIEN VERTAILU

7.1 Kommunikointimenetelmien ominaisuudet

Kommunikointimenetelmien vertailun tavoitteena on kartoittaa, mitkä menetelmät sopivat ominaisuuksiltaan parhaiten mihinkin ympäristöön. Eri kommunikointimenetelmiin kohdistuu erilaisia haasteita, joita on käsitelty tarkemmin aiemmin tässä työssä. Ennen vertailun aloittamista on hyvä koota eri kommunikointimenetelmien pääkohtaiset edut ja haitat yhteen, jotta niihin on helppo viitata vertailua tehdessä. Tämä on tehty taulukkoon 4.

Taulukko 4. Eri kommunikointimenetelmien edut ja haitat.

	Edut	Haitat
Akustiset	<ul style="list-style-type: none"> • Pitkä kommunikointietäisyys • Paljon tutkittu 	<ul style="list-style-type: none"> • Matala tiedonsiirtonopeus • Moniteinen eteneminen • Doppler-ilmiö • Korkea kohina • Suuri virrankulutus
Optiset	<ul style="list-style-type: none"> • Erittäin korkea tiedonsiirtonopeus • Pieni virrankulutus 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaatii näköyhteyden • Vahvasti riippuvainen veden kirkkaudesta • Melko lyhyt kommunikointietäisyys
Radioaallot	<ul style="list-style-type: none"> • Korkea tiedonsiirtonopeus • Pieni ympäristön vaikutus suolapitoisuutta lukuun ottamatta 	<ul style="list-style-type: none"> • Epäkäytännöllinen suolaisessa vedessä • Suuri virrankulutus • Vaatii pitkät antennit
Sähkömagneettinen induktio	<ul style="list-style-type: none"> • Korkea tiedonsiirtonopeus • Melko pitkä kommunikointietäisyys • Pieni virrankulutus 	<ul style="list-style-type: none"> • Uusi menetelmä, jota on tutkittu muita vähemmän • Ei vielä yhtä laajasti käytetty tai saatavilla kuin muut menetelmät

Useat taulukossa 4 esitetyt ominaisuudet liittyvät vedenalaisten kommunikointimenetelmien tiedonsiirtonopeuksiin, kommunikointietäisyyksiin, virrankulutuksiin ja roboteilta vaadittujen antennien kokoihin. Nämä ovat kaikki ominaisuuksia, joihin kiinnitetään huomiota eri kommunikointimenetelmien vertailua tehdessä. Jotta vertailu olisi selkeämpää ja eri parametrien vertailu olisi konkreettisesti mahdollista, kerätään yllämainitut ominaisuudet lukuarvoina taulukkoon 5.

Taulukko 5. Kommunikointimenetelmien ominaisuudet lukuarvoina. Perustuu lähteisiin (Lanbo et al. 2008; Kaushal & Kaddoum 2016; Mostafa et al. 2018; Li et al. 2019; Wang et al. 2019).

	Akustiset	Optiset	Radioaallot	Sähkömagneettinen induktio
Tiedonsiirtonopeus (<i>kbps</i>)	< 500	10^3 – 10^7	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$
Kommunikointietäisyys (<i>m</i>)	> 10^3	10–100	< 10	10–100
Lähetysteho (<i>mW</i>)	> 10^3	1–10	1 – 10^5	< 1
Antennin koko (<i>m</i>)	0,1	0,1	> 0,5	0,15

Taulukon 5 arvoja tutkittaessa nähdään konkreettisesti eri kommunikointimenetelmien etuja ja haittoja. Ensimmäiseltä riviltä nähdään optisten menetelmien tarjoavan huonoimmassakin tilanteessa parhaat tiedonsiirtonopeudet, kun taas akustiset menetelmät tarjoavat parhaimmassakin tilanteessa huonoimmat tiedonsiirtonopeudet. Radioaaltoihin ja sähkömagneettiseen induktioon puolestaan liittyy keskitasoa oleva tiedonsiirtonopeus, joka on riittävä moniin tilanteisiin.

Toiselta riviltä nähdään, että akustiset menetelmät ovat ainoat, jotka mahdollistavat kommunikation kilometriä pidemmillä etäisyyksillä. Optiset ja sähkömagneettiseen induktioon perustuvat menetelmät menettävät käytännöllisyytensä sadan tai viimeistään muutaman sadan metrin jälkeen. Radioaaltoja puolestaan pidetään yleisesti käytännöllisinä vain hyvin lyhyillä etäisyyksillä (Lanbo et al. 2008; Kaushal & Kaddoum 2016; Mostafa et al. 2018).

Kolmannelta riviltä nähdään, että kaikista menetelmistä pienimmän lähetystehon vaatii sähkömagneettinen induktio. Myös optiset menetelmät vaativat melko pienen lähetystehon. Radioaaltojen lähetysteho puolestaan voi suolaisessa vedessä pidemmillä kommunikointietäisyyksillä nousta hyvin suureksi, mutta parhaimmassa tapauksessa se on samaa tasoa optisten menetelmien kanssa. Yleensä kuitenkin akustiset menetelmät vaativat suurimman lähetystehon.

Neljännellä rivillä on esitetty eri menetelmien vaatimat antennien koot. Myös sähkömagneettisen induktion käämin koko on merkitty samalle riville käytännöllisistä syistä. Pääosin antennin koko on likimain vakio, mutta radioaallot vaativat merkittävästi suuremmat antennit. Suolaisessa vedessä radioaallot vaativat vielä esitettyäkin suuremmat antennit, joten silloin radioaaltojen käytännöllisyys laskee entisestään.

7.2 Vertailu kommunikointiympäristön mukaan

Aiemmassa kappaleessa esiteltiin ja vertailtiin vedenalaisten robottien käytössä olevien langattomien kommunikointimenetelmien ominaisuuksia. Työn johdannossa asetettiin tavoitteeksi se, että tämän luvun perusteella lukija pystyy valitsemaan parhaiten sopivan kommunikointimenetelmän mihin tahansa tilanteeseen. Tämä tavoite saavutetaan vertailemalla eri kommunikointimenetelmiä kommunikointiympäristön mukaan ja valitsemalla parhaiten sopivat menetelmät kuhunkin ympäristöön.

Työssä määriteltiin, että kommunikoinnin kannalta merkittävimmät veden ominaisuudet ovat lämpötila, suolapitoisuus, paine, sameus ja sähköiset ominaisuudet. Sähköiset ominaisuudet ovat verrannollisia suolapitoisuuteen ja lämpötila ja paine ovat verrannollisia veden syvyyteen. Tämän seurauksena lämpötila ja paine voidaan korvata veden syvyydellä ja sähköiset ominaisuudet voidaan yhdistää suolapitoisuuteen. Jäljelle jäävät suolapitoisuus, sameus ja syvyys, joita voidaan käyttää kommunikointiympäristöjen parametreina. Koska kommunikointietäisyys vaikuttaa myös merkittävästi kommunikointimenetelmien tehokkuuteen, käsitellään jokaista parametria kolmella eri kommunikointietäisyysvälillä: 0–10 m, 10–100 m ja yli 100 m.

Nyt voidaan valita käsiteltäviksi kommunikointiympäristöiksi samea suolainen, kirkas suolainen, samea makea ja kirkas makea vesi. Taulukossa 6 on esitettynä valittujen parametrien suhteen parhaiksi valitut kommunikointimenetelmät siten, että ympäristön rajoissa on valittu menetelmä, joka tarjoaa mahdollisimman suuren tiedonsiirtonopeuden ja pienen virrankulutuksen kullakin kommunikointietäisyydellä. Parhaiten syvään ja matalaan veteen sopivat menetelmät voidaan esittää yhdessä taulukossa siksi, että veden syvyys vaikuttaa eniten akustisen kommunikaation ominaisuuksiin. Akustinen kommunikaatio on valittu parhaaksi menetelmäksi vain silloin, kun muita vaihtoehtoja ei ole, joten tuolloin sen käyttö on heikentyneistä ominaisuuksistaan huolimatta ainoana vaihtoehtona paras sekä matalassa että syvässä vedessä.

Taulukko 6. Parhaiksi valitut kommunikointimenetelmät kommunikointietäisyyden ja veden ominaisuuksien suhteen matalassa ja syvässä vedessä.

	Samea suolainen	Kirkas suolainen	Samea makea	Kirkas makea
0-10 m	MI / Optiset	Optiset / MI	MI / Radioaallot	Optiset / MI
10-100 m	Akustiset	Optiset / Akustiset	MI / Radioaallot	Optiset / MI
> 100 m	Akustiset	Akustiset	Akustiset	Akustiset

Taulukossa on pyritty esittämään kaksi parasta vaihtoehtoa vedenalaisten robottien väliselle kommunikaatiolle kussakin ympäristössä. Menetelmät ovat järjestyksessä siten, että esimerkiksi 0–10 m:n etäisyydelle sameassa suolaisessa vedessä (vasen yläkulma) sähkömagneettinen induktio eli MI (Magnetic Induction) on valittu parhaaksi ja optiset kommunikointimenetelmät toiseksi

parhaaksi vaihtoehdoksi. Kaksi menetelmää on valittu siksi, että useilla menetelmillä on rajoitteita, jotka monimutkaistavat kommunikointimenetelmien käyttöä eri ympäristöissä. Esimerkiksi optiset kommunikointimenetelmät vaativat näköyhteyden, joten vaikka ne olisivatkin parhaaksi valittu menetelmä kommunikaatioon tietyssä ympäristössä, joudutaan kommunikoinnissa turvautumaan johonkin muuhun menetelmään ympäristön ollessa sellainen, että robottiin tai robottien välille ei saada muodostettua näköyhteyttä.

Sameissa suolaisissa vesissä pienillä etäisyyksillä sähkömagneettinen induktio on optisten menetelmien lisäksi hyvä vaihtoehto, koska suolapitoisuus ei vaikuta siihen yhtä voimakkaasti kuin radioaaltoihin. 10-100 m:n etäisyys sameassa suolaisessa vedessä on yksi haastavimmista ympäristöistä, koska sähkömagneettisen induktion ja optisten menetelmien tehokkuus on huomattavasti heikentynyt suolapitoisuuden ja sameuden takia, ja radioaallot eivät toimi ollenkaan, joten akustiset menetelmät jäävät ainoaksi vaihtoehdoksi. Yli 100 m:n kommunikointietäisyyksille akustiset menetelmät on puolestaan valittu parhaaksi ja ainoaksi käytännölliseksi menetelmäksi kaikissa ympäristöissä muiden menetelmien rajallisten kommunikointietäisyyksien takia.

Kirkkaassa suolaisessa ja makeassa vedessä optiset menetelmät ovat tehokkaimpia 0–100 m:n kommunikointietäisyyksillä erittäin korkean tiedonsiirtonopeuden ja pienen virrankulutuksen takia. Optiselle kommunikaatiolle vaihtoehtoisena tapana suolaisessa vedessä 0-10 m:n etäisyydellä ehdotetaan sähkömagneettista induktiota ja 10-100 m:n etäisyydellä akustisia menetelmiä jo aiemmin mainituista syistä. Makeaan veteen puolestaan sähkömagneettinen induktio soveltuu molemmille etäisyyksille.

Samea makea vesi on ympäristö, jossa sekä sähkömagneettisen induktion että radioaaltojen edut tulevat esiin. Molempien edut makeassa vedessä ovat samankaltaiset, mutta sähkömagneettinen induktio on valittu paremmaksi menetelmäksi sen vaatimien lyhyiden antennien ja pienemmän virrankulutuksen takia.

Usein AUV:t ovat varustettuja kahdella eri kommunikointimenetelmällä, joiden välillä ne osaavat vaihdella autonomisesti ympäristön mukaan. Yleisesti akustiset menetelmät ovat pakollinen valinta, kun kommunikointietäisyys ylittää 100 m. Akustisten menetelmien lisäksi on kaksi hyvää vaihtoehtoa AUV:n varustamiseksi. Ensimmäinen on optisten menetelmien käyttö silloin, kun näköyhteyden muodostaminen on mahdollista eli vesi on riittävän kirkasta tai robotti ei tutki esimerkiksi kaivoksia tai hylkyjä. Toinen vaihtoehto on sähkömagneettisen induktion käyttö niissä tilanteissa, kun optisten menetelmien käyttö ei ole mahdollista.

8. YHTEENVETO

Tässä työssä tutustuttiin kirjallisuuskatsauksen avulla vedenalaisten robottien langattomiin kommunikointimenetelmiin ja käsiteltiin niihin liittyviä etuja ja haittoja. Työn tavoitteena oli tarjota lukijalle työkalut parhaan kommunikointimenetelmän valintaan kuhunkin kommunikointiympäristöön. Tavoite saavutettiin vertailemalla eri kommunikointimenetelmien ominaisuuksia sekä menetelmien käytännöllisyyttä eri kommunikointiympäristöissä. Vertailun perusteella esitettiin parhaiten soveltuvat menetelmät syvän, matalan, kirkkaan, samean, suolaisen ja makean veden kommunikaatioon.

Vedenalainen ympäristö mahdollistaa neljän erilaisen kommunikointimenetelmän käytön. Näitä ovat akustinen kommunikaatio, optinen kommunikaatio, radioaalto ja sähkömagneettinen induktio. Haasteellinen ympäristö ja kommunikointimenetelmien ominaisuudet aiheuttavat menetelmille erilaisia etuja ja haittoja. Akustiset menetelmät tarjoavat erittäin pitkät kommunikointietäisyydet, mutta niiden tiedonsiirtonopeudet ovat rajalliset ja ne kärsivät useista rajoittavista tekijöistä erityisesti matalissa vesissä. Optiset menetelmät tarjoavat merkittävästi suuremmat tiedonsiirtonopeudet pienellä virrankulutuksella, mutta niiden kommunikointietäisyys on rajallinen sameammissa vesissä. Radioaalto ja sähkömagneettinen induktio puolestaan mahdollistavat melko korkeat tiedonsiirtonopeudet, mutta kärsivät korkeasta vaimennuksesta suolaisessa vedessä.

Kommunikointimenetelmien ominaisuuksia vertailtaessa havaittiin, että akustisten menetelmien käyttö yhdessä optisten tai sähkömagneettiseen induktioon pohjautuvien menetelmien kanssa tarjoaa joustavat puitteet kommunikaatioon vaihtelevissa kommunikointiympäristöissä. Akustiset menetelmät ovat ainoat, jotka mahdollistavat pitkän matkan kommunikaation. Valinta optisten menetelmien ja sähkömagneettisen induktion välillä tulisi tehdä sen perusteella, saadaanko ympäristössä muodostettua näköyhteys, jota ilman optiset menetelmät eivät pysty toimimaan.

Toisena havaintona radioaalto jäivät edellisen listan ulkopuolelle. Melko laajasti käytössä olevien radioaaltojen ominaisuudet asettavat rajoitteita niiden käytölle vedenalaisten robottien kommunikaatiossa. Suurimmassa osassa tilanteista uudempi sähkömagneettinen induktio tarjoaa paremmat ominaisuudet kommunikaatioon pienemmän virrankulutuksen ja antennin koon seurauksena. Siksi esitetäänkin, että radioaaltoja ei käytettäisi tilanteissa, jossa kommunikointi tapahtuu täysin vedenpinnan alla. Jos AUV joutuu välittämään tietoa myös pinnalta käsin, niin silloin radioaaltojen käyttö voi olla käytännöllistä.

Useissa samankaltaisissa tutkimuksissa ei käsitellä ollenkaan sähkömagneettista induktiota kommunikointimenetelmänä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että menetelmä on melko uusi ja siitä löytyvien tutkimusten määrä on melko rajallinen. Tässä työssä sähkömagneettinen induktio on kuitenkin käsiteltyä ja sille on annettu paljon arvoa. Tämä tekee työstä kattavamman ja toteutusta kommunikointimenetelmien vertailusta monipuolisemman.

Tulevaisuudessa akustinen kommunikaatio tulee todennäköisesti säilyttämään asemansa eniten käytettynä menetelmänä, kunnes jokin toinen menetelmä yltää samankaltaisiin kommunikointitietäisyyksiin. Sähkömagneettisen induktion tutkimus ja sitä myötä myös käyttö tulee sen hyvien ominaisuuksien takia erittäin todennäköisesti lisääntymään myös sotilaskäytön ulkopuolella, ja se luultavasti syrjäyttää radioaaltojen käytön pienempien haittojen ansiosta. Optisten menetelmien asema puolestaan on todennäköisesti melko hyvin turvattu tulevaisuudessakin, koska muilla menetelmillä ei ole vielä päästy lähelle yhtä suuria tiedonsiirtonopeuksia.

Työssä ei aiheen rajauksen takia käsitelty signaalinkäsittelyä ja siihen liittyvää laskennallista määrittelyä. Työ tarjoaa kattavan kuvan vedenalaisten robottien langattomista kommunikointimenetelmistä, niiden perusominaisuuksista ja suurimmista eduista ja haitoista. Rajauksen takia eri haittojen suuruuksia ei kuitenkaan pystytty käsittelemään kovin perusteellisesti. Jatkotutkimustarpeena onkin tutkimus, joka syventyisi tarkemmin eri kommunikointimenetelmien haasteiden laskennalliseen määrittelyyn ja kokoaisi yhteen eri teorian toteuttamiseksi.

LÄHTEET

Akyildiz, I.F., Wang, P. & Sun, Z. 2015, "Realizing underwater communication through magnetic induction", IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 11, pp. 42–48. Saatavissa (viitattu 10.3.2019): <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7321970>

Clapham, C. & Nicholson, J. 2014, "The Concise Oxford Dictionary of Mathematics", Oxford University Press, 5th ed. Saatavissa (viitattu 4.3.2019): <http://www.oxfordreference.com.libproxy.tuni.fi/view/10.1093/acref/9780199679591.001.0001/acref-9780199679591-e-3121>

d'Amore-Domenech, R., Raso, M.A., Villalba-Herreros, A., Santiago, Ó, Navarro, E. & Leo, T.J. 2018, "Autonomous underwater vehicles powered by fuel cells: Design guidelines", Ocean Engineering, vol. 153, pp. 387–398. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0029801818301392>

Diamant, R., Feuer, A. & Lampe, L. 2012, "Choosing the right signal: Doppler shift estimation for underwater acoustic signals", ACM. Saatavissa: <https://dl-acm-org.libproxy.tuni.fi/citation.cfm?id=2398971>

Diamant, R., Campagnaro, F., de Filippo de Grazia, M., Casari, P., Testolin, A., Sanjuan Calzado, V. & Zorzi, M. 2017, "On the Relationship Between the Underwater Acoustic and Optical Channels", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 12, pp. 8037–8051. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8053791>

Domingo, M.C. 2012, "Magnetic Induction for Underwater Wireless Communication Networks", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 6, pp. 2929–2939. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6183466>

Huang, J., Barbeau, M., Blouin, S., Hamm, C. & Taillefer, M. 05/2015, "Simulation of communications using underwater acoustic signals impaired by wide band attenuation", IEEE, pp. 1538–1543. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7129509>

Huang, J., Wang, H., He, C., Zhang, Q. & Jing, L. 2018, "Underwater acoustic communication and the general performance evaluation criteria", *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 951–971. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/article/10.1631%2FFITEE.1700775>

General Dynamics 2019, Bluefin-9, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.5.2019): <https://gdmissionsystems.com/products/underwater-vehicles/bluefin-9-autonomous-underwater-vehicle>

General Dynamics 2019, Bluefin Battery, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.5.2019): <https://gdmissionsystems.com/en/products/underwater-vehicles/bluefin-robotics/1-5-kwh-subsea-battery>

Kaushal, H. & Kaddoum, G. 2016, "Underwater Optical Wireless Communication", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518–1547. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7450595>

Lanbo, L., Shengli, Z. & Jun-Hong, C. 2008, "Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 8, no. 8, pp. 977–994. Saatavissa: <https://onlinelibrary-wiley-com.libproxy.tuni.fi/doi/epdf/10.1002/wcm.654>

Li, Y., Wang, S., Jin, C., Zhang, Y. & Jiang, T. 2019, "A Survey of Underwater Magnetic Induction Communications: Fundamental Issues, Recent Advances, and Challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8634811>

Lu, H., Chung-Yi Li, C., Lin, H., Tsai, W., Chu, C., Chen, B. & Wu, C. 2016, "An 8 m/9.6 Gbps Underwater Wireless Optical Communication System", *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 5. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7547906>

Lv, Z., Zhang, J., Jin, J. & Liu, L. 2016, "Link strength for Unmanned Surface Vehicle's underwater acoustic communication", *IEEE*. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7535831>

Marchetti, L. & Reggiannini, R. 2016, "An Efficient Receiver Structure for Sweep-Spread-Carrier Underwater Acoustic Links", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 41, no. 2, pp. 440–449. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7161407>

Mostafa, M., Esmail, H. & Mohamed, E.M. 04/2018, "A comparative study on underwater communications for enabling C/U plane splitting based hybrid UWSNs", IEEE. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8377209>

Munasinghe, K., Aseeri, M., Almorqi, S., Hossain, M.F., Binte Wali, M. & Jamalipour, A. 2017, "EM-Based High Speed Wireless Sensor Networks for Underwater Surveillance and Target Tracking", Journal of Sensors, vol. 2017, pp. 1–14. Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1876471807?pq-origsite=summon>

Oubei, H.M., ElAfandy, R.T., Park, K.H., Ng, T.K., Alouini, M. & Ooi, B.S. 2017, "Performance Evaluation of Underwater Wireless Optical Communications Links in the Presence of Different Air Bubble Populations", IEEE Photonics Journal, vol. 9, no. 2, pp. 1–9. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7879801>

Quintana-Díaz, G., Mena-Rodríguez, P., Pérez-Álvarez, I., Jiménez, E., Dorta-Naranjo, B., Zazo, S., Pérez, M., Quevedo, E., Cardona, L. & Hernández, J.J. 2017, "Underwater electromagnetic sensor networks—part I: Link characterization", Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 189, pp. 1–16. Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1862133875?pq-origsite=summon>

Shaneyfelt, T., Joordens, M.A., Nagothu, K. & Jamshidi, M. 2008, "RF communication between surface and underwater robotic swarms", IEEE. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4699051>

Shome, S.N., Nandy, S., Pal, D., Das, S.K., Vadali, S.R.K., Basu, J. & Ghosh, S. 2012, "Development of Modular Shallow Water AUV: Issues & Trial Results", Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, vol. 93, no. 3, pp. 217–228. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/article/10.1007%2Fs40032-012-0026-0>

Smith, R.C. & Baker, K.S. 1981, "OPTICAL PROPERTIES OF THE CLEAREST NATURAL WATERS (200-800 nm)", Applied Optics, vol. 20, no. 2, pp. 177–184. Saatavissa: <https://www-osa-publishing-org.libproxy.tuni.fi/ao/fulltext.cfm?uri=ao-20-2-177&id=24568>

Somaraju, R. & Trumpf, J. 2006, "Frequency, Temperature and Salinity Variation of the Permittivity of Seawater", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 11, pp. 3441–3448. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4012473>

Sonardyne 2019, Bluecomm 200, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.5.2019): <https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-200-wireless-underwater-video/>

Sticklus, J., Hoehner, P.A. & Rottgers, R. 2018, "Optical Underwater Communication: The Potential of Using Converted Green LEDs in Coastal Waters", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 1–13. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8353342>

Stojanovic, M. & Preisig, J. 2009, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 1, pp. 84–89. Saatavissa (viitattu 20.1.2019): <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4752682>

Teledyne Marine, ATM-920 Benthos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.5.2019): <http://www.teledynemarine.com/920-series-atm-925?ProductLineID=8>

Wang, S., Nguyen, T.L.N. & Shin, Y. 2019, "Energy-Efficient Clustering Algorithm for Magnetic Induction-Based Underwater Wireless Sensor Networks", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 5975-5983. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8598829>

Yuh, J., Marani, G. & Blidberg, D.R. 2011, "Applications of marine robotic vehicles", *Intelligent Service Robotics*, vol. 4, no. 4, pp. 221–231. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/article/10.1007%2Fs11370-011-0096-5>