



Open your mind. LUT.
Lappeenranta **University of Technology**

Bluetooth -tekniikan käyttö sähkölukon tiedonsiirrossa

Jami Kettunen

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Jami Kettunen

Bluetooth -tekniikan käyttö sähkölukon tiedonsiirrossa

Kandidaatintyö, 2015

26 sivua, 9 kuvaa, 1 taulukko, 2 liitettä

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja Mikko Kuisma

Uudet langattomat tekniikat kehittyvät nopeasti ja ovat pian tulossa yhä suuremmaksi osaksi jokapäiväistä elämäämme. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää sopiiko Bluetooth teknologia käytettäväksi sähkölukon ja sitä ohjaavan keskuksen välisenä tiedonsiirtoväylänä. Työn kirjallisuusosuudessa selvitetään tavoitetaanko langattomalla tekniikalla halutut raja-arvot jotta käyttö sähkölukossa olisi järkevää. Kokeellisessa osassa mitataan oleellisia muuttujia, kuten kantamaa sekä virrankulutusta. Samalla myös verrataan keskenään kahta tutkimuksen kohteeksi valittua Bluetooth moduulia. Tekniikka täytti sille asetetut rajat ja kokeellisen tutkimuksen perusteella todettiin teknologian sekä valitun moduulin sopivan hyvin käyttötarkoitustaan varten.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Jami Kettunen

Using Bluetooth technology for data transfer in electric lock

Bachelor's Thesis.

26 pages, 9 figures, 1 tables, 2 appendices

Examiner: Associate professor Mikko Kuisma

New wireless technologies are evolving rapidly and are quickly becoming an even larger part of our everyday lives. The aim of this thesis was to determine whether the Bluetooth technology can be used to transfer data between an electronic door lock and a center controlling the lock. In the literature part of the work the limits of wireless technology are examined to establish whether desired limits suitable for an electronic lock application can be achieved. In the experimental part relevant parameters such as range and power consumption are measured. We simultaneously compare two modules chosen for this thesis in order to find out whichever is better. Technology met the expected limits and on the basis of experimental test the technology and module are well suited for their intended use.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	4
1.1	TYÖN TAVOITTEET JA RAJAUS	4
2	BLUETOOTH TEKNIikka	5
2.1	YLEISTÄ.....	5
2.2	TAAJUUSKAISTA	6
2.2.1	TAAJUUSHYPPELY	6
2.3	TOPOLOGIA.....	7
2.4	BLUETOOTH LOW ENERGY	8
3	KANTAMAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	10
3.1	AALLONPITUUS	10
3.2	VAPAANTILAN VAIMENNUS	10
3.3	FRESNELIN ALUE	11
3.4	KOKONAISHÄVIÖN ARVIOIMINEN	12
3.5	MONITIE-ETENEMINEN.....	13
3.5.1	TASOHEIJASTUMAHÄVIÖ	14
4	LAITTEIDEN KUVAUS	16
4.1	BLUEGIGA BLE112 JA FUJITSU MBH7BLZ07 MODUULIEN ESITTELY	16
4.1.1	BLUEGIGA BLE112.....	16
4.1.2	FUJITSU MBH7BLZ07	17
4.2	PIIRILEVYN SUUNNITTELU	18
5	MITTAUKSET	20
5.1	KANTAMA	20
5.2	VIRRANKULUTUS.....	23
5.3	LÄPÄISY ERI RAKENTEISSA	24
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	26
	LÄHTEET	27
LIITTEET	LIITE I	Vaimentumisen mittaustulokset
	LIITE II	Virrankulutusmittausten tulokset

MERKINNÄT JA LYHENTEET

I	Virta, A
d	Etäisyys, m
f	Taajuus, Hz
G	Antennin vahvistus, dBm
Gr	Vastaanottavan antennin vahvistus, dBm
Gt	Lähtävän antennin vahvistus, dBm
h	Antennin korkeus maanpinnasta, m
k	Aaltoluku, m ⁻¹
L ₀	Vapaantilan vaimennus, dB
r	Säde, m
P	Tehotiheys, W
Pr	Vastaanotettu teho, dBm
Pt	Lähetysteho, dBm
v	Nopeus, m/s
λ	Aallonpituus, m

LYHENTEET

AA	Yleisnimitys 14,5mm x 50,5mm kokoiselle pyöreälle paristolle
AAA	Yleisnimitys 10,5mm x 44,5mm kokoiselle pyöreälle paristolle
AFH	Adaptive Frequency-Hopping Spread Spectrum Mukautuva taajuushyppely
BLE	Bluetooth Low energy (myös Bluetooth smart)
CE	Conformité Européenne Merkintä jolla valmistaja takaa tuotteen täyttävän sille asetetut määräykset
EIRP	The Effective Isotropic Radiated Power Efektiivinen isotrooppinen lähetysteho
ETSI	European Telecommunications Standards Institute Eurooppalainen telealan standardoimisjärjestö
FCC	Federal Communications Commission Yhdysvaltain telehallintovirasto

FHSS	Frequency hopping spread spectrum Taajuushyppely hajaspektritekniikka.
GATT	Generic Attribute Profile
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying (modulation)
IC	Industry Canada Kanadalainen standardeja valvova hallituksen virasto
I/O	Input/Output Tulo-/lähtöliitäntä
ISI	Intersymbol interference Symbolien välinen keskinäisinterferenssi
ISM	Industrial Scientific and Medical Band) Lupavapaa taajuuskaista lyhyen kantaman radiolähettimien käyttöön.
IoT	Internet of Things Esineiden internet
MIC	Ministry of Internal Affairs and Communications (Japan) Japanin viestintävirasto
RSSI	Received Signal Strength Indicator Radiovastaanottimessa oleva vastaanotetun tehon indikaattori.
SIG	(Bluetooth) Special Interest Group Järjestö joka valvoo Bluetooth järjestelmän kehitystä
SoC	System-on-Chip Kokonainen järjestelmä samalla mikropiirillä
USB	Universal Serial Bus Sarjamoitoinen tiedonsiirtoväylä laitteiden väliseen tiedonsiirtoon.

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatin työssä tutkitaan Bluetooth tekniikan mahdollista käyttöä ovilukon tiedonsiirrossa ovesta sijaitsevan sähkömekaanisen lukkoyksikön ja sitä ohjaavan keskuksen välillä. Työssä suoritetaan tarvittavia mittauksia sekä tutkitaan suunnittelussa huomioitavia аспекteja. Lisäksi perehdytään langattoman teknologian toimintaan, vaatimuksiin ja ilmiöihin. Erityisesti huomioitavia seikkoja Bluetooth –tekniikan toiminnan kannalta on kantama, langattoman linkin luotettavuus sekä toiminta-aika. Työssä keskitytään Bluetooth, erityisesti Bluetooth Smart, teknologialla toimivan langattoman lähetin/vastaanotin parin toimintaan avoimessa tilassa sekä sen normaalissa toimintaympäristössä.

Lisäksi työssä pohditaan mahdollisia keinoja laitteen toiminnan, erityisesti kantaman, virrankulutuksen sekä luotettavuuden, parantamiseksi. Työn kokeellisessa osuudessa keskitytään langattoman lähettimen käytännönmittauksiin. Mittamaalla muun muassa varmennetaan langattoman linkin kantama ja toimivuus normaalissa toimintaympäristössä. Samalla tutkitaan antennin suuntaavuutta, ja sen vaikutusta kantamaan. Mittauksia varten suunniteltiin ja toteutettiin piirilevy halutuilla ominaisuuksilla niin että mittauksista saatiin keskenään vertailukelpoisia.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Tavoitteena oli selvittää onko nykyisen Bluetooth tekniikan käyttäminen järkevää sisäkäytössä noin 100 metrin etäisyydellä ovilukkokäytössä. Samalla myös pohditaan, olisiko työssä valmistetun laitteen jatkokehitys järkevää sekä mahdollista.

Työn tavoitteet voidaan tiivistää neljään peruskysymykseen:

- Saavutetaanko Bluetooth -tekniikalla haluttu kantama?
- Kuinka pitkä toiminta-aika moduulilla on mahdollista saavuttaa paristokäytössä?
- Kykeneekö signaali läpäisemään yleiset rakennuselementit, eli voidaanko laitetta käyttää sen ominaisessa käyttöympäristössä?
- Mitä asioita piirilevysuunnittelussa tulee erityisesti huomioida langattomassa laitteessa?

Käytettäessä valmista Bluetooth moduulia työn suurin paino häiriöiden estämiseksi asettuu piirilevyn suunnitteluun sekä mittausten suorittamiseen. Piirilevyn suunnittelussa huomioidaan suunnittelun hyväksi todetut käytännöt, valmistajan suositukset sekä erityisesti kiinnitetään huomiota johtuvien

häiriöiden vähentämiseen. Suunnittelussa myös huomioidaan tuotteen lopullinen asennus lukkorunkoon erilaisissa asennusympäristöissä, sekä asennuksen vaikutus antennin sijaintiin ja asentoon oven sisällä.

Työssä ei tutkittu tekniikan tietoturvaa eikä laitteen mahdolliseen jatkokehitykseen vaikuttavia standardeja, patenteja tai lakeja. Myös laitteen mekaaninen kestävyys sekä myyntipotentiali jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle.

2 BLUETOOTH TEKNIikka

Tässä luvussa käydään läpi Bluetooth teknologian historiaa, tekniikkaa sekä nykytilannetta. Perehdyttiin myös Low Energy tekniikkaan joka on oleellisessa osassa tässä tutkimuksessa.

2.1 Yleistä

Bluetooth (IEEE 802.15.1) on tiedonsiirron langaton teknologia joka on ensisijaisesti tarkoitettu lyhyille, alle 100 metrin, matkoille. Bluetoothia muistuttavan tekniikan kehitys aloitettiin matkapuhelinvalmistaja Ericssonin toimesta vuonna 1994. Tarkoituksena oli löytää edullinen ja vähävirtainen langaton tekniikka, joka korvaisi kiinteät kaapelit erityisesti matkapuhelinkäytössä. Pian Ericssonilla kumminkin huomattiin, ettei näin suurta teknologian kehitystä ole järkevää kehittää yksin.

Vuonna 1998 tekniikan kehitystyöhön liittyi muita alan yrityksiä, muun muassa Nokia, IBM, Intel ja Toshiba. Yhdessä nämä yritykset muodostivat Bluetooth Special Interest Group (SIG) organisaation jonka tarkoituksena on kehittää ja hallinnoida Bluetooth teknologiaa sekä lisensoida tekniikka laitevalmistajille. Samalla myös nimi Bluetooth otettiin virallisesti käyttöön. Nykyään organisaation kuuluu yli 25 000 eri yritystä mm. tietotekniikka-, telekommunikaatio-, autoteollisuus ja verkkotekniikka-aloilta (Ericsson Oy, The history Of Bluetooth). Bluetooth-spesifikaation ensimmäinen versio 1.0 julkaistiin vuoden 1999 puolivälissä. Toistaiseksi uusin merkittävä päivitysversio, Bluetooth 4.0, julkaistiin kesällä 2010.

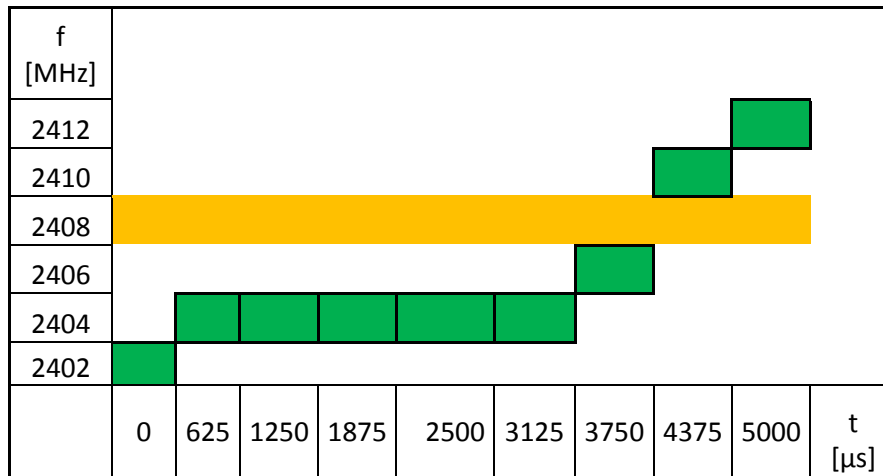
Alunperin Nokia kehitti Bluetooth Smart:n tapaista tekniikka jo vuonna 2001 ja julkaisi sen kaupalliseksi Wibree nimellä vuonna 2006. Nokian ja SIG:n yhteisellä päätöksellä Wibree implementoitiin osaksi Bluetooth -standardia neljä vuotta myöhemmin vuonna 2010.

2.2 Taajuuskaista

Bluetooth -tekniikka käyttää 2400 – 2483.5 MHz:n ISM (industrial, scientific and medical) taajuutta. ISM-taajuus on lisenssivapaa joka mahdollistaa tekniikkaa käyttävien laitteiden halvan hinnan sekä helpottaa markkinoille tuloa. Bluetooth tekniikan nykyisin käytössä oleva neljäs versio käyttää 40:tä kanavaa 2 MHz:n välein joista 37 kanavaa on varattu datalle ja loput 3 kanavaa yhteyden muodostamiseen. Taajuusalueesta ensimmäiset 2 MHz sekä viimeiset 3.5 MHz on varattu niin sanotuksi suojataajuudeksi häiriöiden välttämiseksi, eivätkä nämä taajuudet ole siksi käytössä tiedonsiirtoon (Bluetooth technology 101). Suurin sallittu säteilyteho tällä taajuuskaistalla toimiville langattomille lähiverkkolähettimille on - 10 dBW eli 100 mW EIRP (The Effective Isotropic Radiated Power).

2.2.1 Taajuushyppely

Bluetooth käyttää tiedonsiirtoon taajuushyppelyhajaspektristä (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) muokattua adaptiivista taajuushyppelyä AFH:ta (Adaptive Frequency Hopping Spread Spectrum). AFH -tekniikassa lähetettävä data jaetaan pienempiin paketteihin jotka lähetetään vastaanottajalle vaihtamalla taajuutta useita kertoja sekunnissa. Bluetooth pystyy vaihtamaan taajuutta 1600 kertaa sekunnissa, eli yhden hypyn kesto on 625µs (Mills, 2005). Yksi lähetettävä paketti voi pysyä enimmillään 5 aikaväliä samalla taajuudella. Taajuushyppelyn tarkoituksena on vähentää häiriöitä, lisätä tietoturvaa sekä vähentää taajuusalueen ruuhkautumista. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 1.

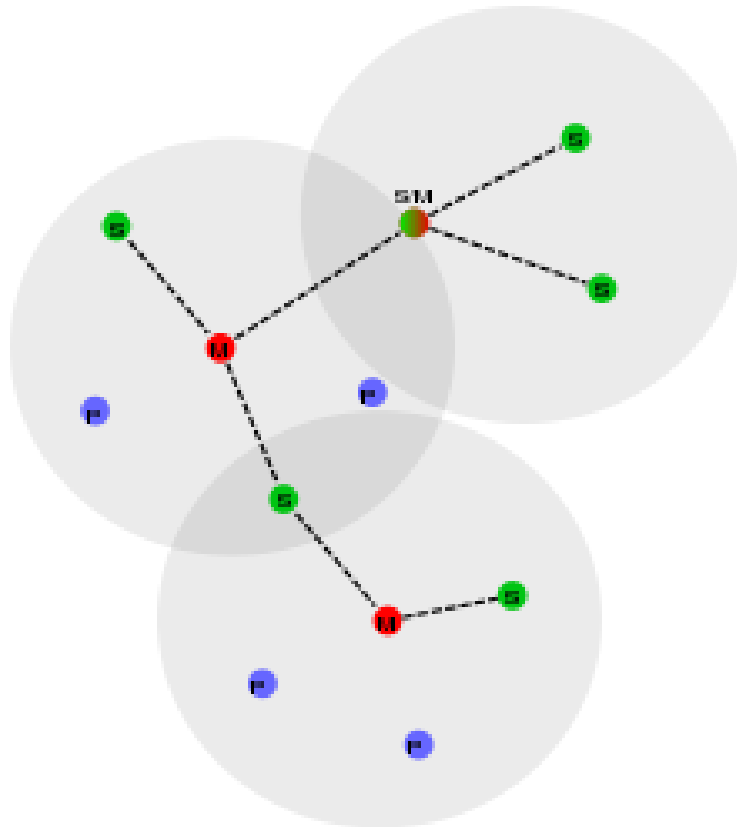


Kuva 1. Havainnekuva Bluetoothin käyttämän mukautuvan taajuushyppelyn toiminnasta. Lähetystaajuus vaihtelee ja hyppää taajuudella 2408 MHz:ä ilmenevän häiriön yli.

Kuvassa paketti lähetetään taajuusvälillä 2402 ... 2410MHz ja se pysyy viiden hyppäyksen ajan taajuudella 2404 MHz. Taajuudella 2408 MHz esiintyy häiriöitä joten lähetin ei käytä tätä taajuutta vaan hyppää sen yli seuraavalle vapaalle kanavalle.

2.3 Topologia

Bluetooth laitteet toimivat pohjimmiltaan pico-verkko periaatteella, jossa kaksi laitetta on yhteydessä toisiinsa point-to-point periaatteella. Yksi pico-verkko voi sisältää enimmillään kahdeksan laitetta, yhden isännän (master) ja seitsemän orjaa (slave). Mikä tahansa laite voi toimia joko isäntänä tai orjana. Kun näitä pico-verkkoja linkitetään yhteen, saadaan aikaiseksi scatter-verkko, joka voi sisältää huomattavasti enemmän laitteita. Scatter-verkko muodostuu kun pico-verkossa oleva laite liitetään orjalaitteena toiseen pico-verkkoon ja toimii näin ollen osana molempia verkkoja (Bluetooth core specification version 4.2 vol. 2). Scatter-verkon toimintaa on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Rakennekuva scatter-verkon toimintatopologiasta. Punainen piste kuvaa isäntä laitetta ja vihreä orjalaitetta. (Wikipedia 2015)

2.4 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low energy:n (BLE) suurin etu aikaisempiin versioihin nähden on huomattavasti pienempi virrankulutus. BLE:ssä tiedon lähetykseen käytetty aika on pienennetty aikaisemmasta 100 millisekunnista vain 3 millisekuntiin joka suurimmalta osin laskee virrankulutusta. Lisäksi protokollan kerrosten optimoinnilla on saavutettu lisää virransäästöominaisuuksia. Passiivitulassa ollessa Bluetooth laite kuluttaa jopa alle mikroampeerin virtaa (Bluetooth low energy technical information). Näin alhainen virrankulutus mahdollistaa langattoman moduulin käytön useiksi kuukausiksi tai jopa vuosiksi esimerkiksi kahdella AA-paristolla. Pitkä käyttöaika ilman paristojen vaihtoja mahdollistaa Bluetooth laitteiden käytön kustannustehokkaasti monissa IoT ja langattomissa sovelluksissa aikaisempaa paremmin. Esimerkiksi mikäli laite käyttää 180mAh paristoa ja lähettää tilatietoja isäntälaitteelle kerran minuutissa, kestää paristo ilman muuta kulutusta 15,000 vuorokautta, eli yli 40 vuotta. BLE tekniikka käyttää vanhemmasta Bluetooth:sta poiketen Gaussian Frequency-shift keying (GFSK) modulaatiota.

Pienen koon, alhaisen virran kulutuksen ja alhaisten kehityskustannusten ansiosta BLE tekniikalla on hyvät mahdollisuudet yleistyä Internet of Things (IoT) sovelluksissa, joihin myös tähän työhön kuuluva langaton sähkölukko voidaan laskea.

3 KANTAMAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä kappaleessa käydään läpi työssä tarvittavia yhtälöitä sekä teoria. Samalla myös lasketaan teorian pohjalta mittauksissa tarvittavia arvoja sekä oletettuja tuloksia.

3.1 Aallonpituus

Aallonpituus voidaan ratkaista aallonpituuden perusyhtälöllä kun tiedetään signaalin keskitaajuus.

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

jossa v on valonnopeus (299 792 458 m/s) ja f käytetyn taajuuden keskiarvo, 2.44 GHz:ä. Tällöin signaalin aallonpituudeksi saadaan 0.1229 metriä.

3.2 Vapaantilan vaimennus

Kun aallonpituus ja lähtetimen etäisyys d tunnetaan, voidaan signaalille ratkaista vapaan tilan vaimennus L desibeleinä yhtälön (2) perusteella,

$$L_0 = 10 * \text{Log}_{10}\left(\frac{4*\pi*d}{\lambda}\right)^2. \quad (2)$$

Tällöin esimerkiksi tässä työssä käytetty 2.4 GHz:n taajuus vaimenee yhden metrin matkalla 40.38dB ja 100 metrin matkalla 80dB.

Vapaassa tilassa voidaan vastaanotettu teho watteina P_r laskea Friisin yhtälön avulla (Tor-Inge Kvaksrud, 2007)

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_0}, \quad (3)$$

missä P_t on lähetetty teho, G_t on lähettimen antennin vahvistuskerroin ja vastaavasti G_r vastaanottimen antennin vahvistuskerroin. L_0 on yhtälön 2 perusteella laskettu vapaan tilan vaimennus desibeleinä.

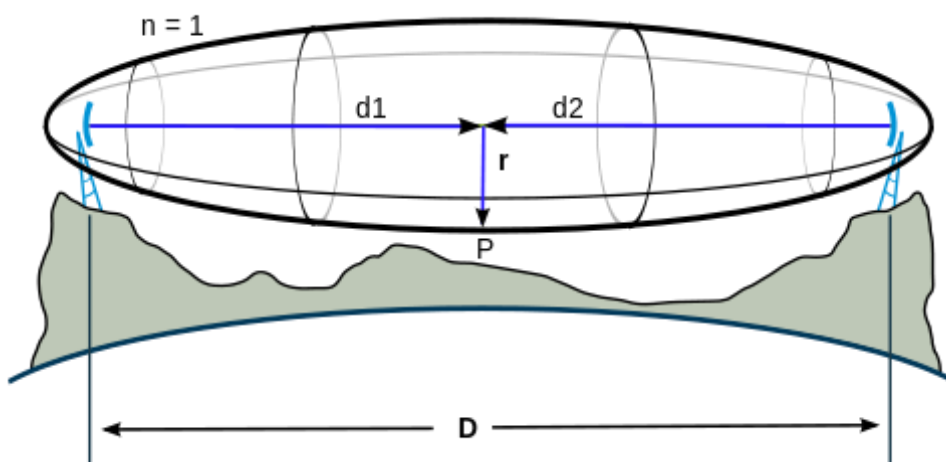
Täten vapaassa tilassa tarvittava lähetysteho voidaan ratkaista desibeleinä yhtälön 4 (Särkimäki 2004) mukaisesti

$$P_r(dB) = P_t(dB) + G_r(dB) + G_t(dB) - L_0(dB) \quad (4)$$

Jotta langaton linkki toimisi oikein, on yhtälön vasen puoli oltava oikeaa puolta suurempi. Tällä yhtälöllä voidaan arvioida langattoman yhteyden toimivuutta ja pisintä mahdollista toimintaetäisyyttä optimaalisissa olosuhteissa.

3.3 Fresnelin alue

Vapaan tilan mittauksia suorittaessa on mittaustulosten käytettävyyden kannalta mittauspaikka valittava niin, että heijastumat ja siitä aiheutuva sironta ovat mahdollisimman vähäisiä; mitattavan lähettimen ja vastaanottimen välissä on oltava riittävän suuri esteetön alue. Signaali muodostaa edetessään parabolimaisen kuvion jota kutsutaan Fresnelin pyörähdysellipsoidiksi. Jotta signaalin kulkemaa aluetta voidaan käsitellä vapaana tilana, ei pyörähdysellipsoidin alueella saa olla esteitä (Parsons 2000). Tällöin vastaanotin ja lähetin on sijoitettava vähintään ellipsin säteen korkeudelle, kuten kuvassa 3 on esitetty.



Kuva 3. Fresnelin ellipsoidin muoto. Jotta signaali voi kulkea esteettä, on antenni sijoitettava vähintään ellipsoidin säteen r korkeudelle (Wikipedia 2015).

Ellipsin säde r ja samalla myös antennin pienin korkeus mittauksissa saadaan lasketuksi yhtälöllä 5 (Särkimäki 2004) kun etäisyydet d_1 ja d_2 sekä aallonpituus λ tunnetaan,

$$r = \sqrt{\frac{\lambda * d_1 * d_2}{d_1 + d_2}}. \quad (5)$$

Kun mittaukset suoritetaan 2.44 GHz:n taajuudella ja enimmillään 150 metrin etäisyydellä, saadaan antennin korkeudeksi maatasosta tasaisella pinnalla vähintään 1.76 metriä.

3.4 Kokonaishäviön arvioiminen

Radioaallot vaimenevat edetessä väliaineessa tai osuessaan esteeseen. Käytettäessä langatonta tekniikkaa sisätiloissa suurimmat häviöt aiheutuvat signaalin matkalla olevista esteistä, kuten seinistä ja ovista. Vaimentuman tarkka simulointi on vaikeaa, mutta yhtälöllä 6 (Lloret 2004) voidaan arvioida häviöiden vaikutusta

$$L(dB) = L_0 + 10 \log(d) + \sum(K_i F_i) + \sum(I_j W_j) + L_{ms} \quad (6)$$

jossa;

L_0 = tehohäviöt (dB) 1 metrin etäisyydellä, 2.44 GHz:n taajuudella 40.39dB

d = lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys

K_i = i tyyppisten lattioiden lukumäärä signaalitiellä

F_i = i tyyppisen lattian vaimennus

I_j = j tyyppisten seinien lukumäärä signaalitiellä

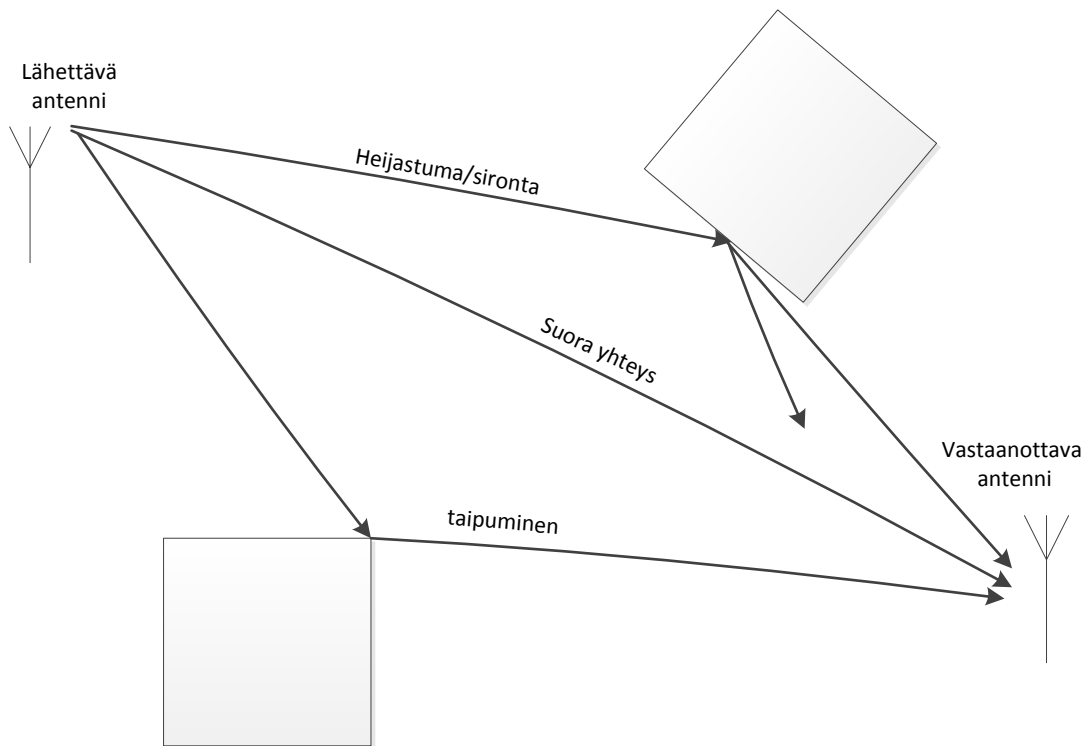
W_j = j tyyppisen seinän vaimennus

L_{ms} = Monitie-etenemisestä aiheutuva vaimennus/vahvistus

Yhtälöstä havaitaan esteiden määrän, niiden tyyppin sekä lähettimen ja vastaanottimen välisen etäisyyden vaikuttavan vaimenemiseen. Näitä muuttujia voidaan optimoida sijoittamalla lähetin mahdollisimman lähelle vastaanotinta ja siten, että välissä on mahdollisimman vähän esteitä. Yhtälöllä voidaan myös hyvin arvioida lähettimen toimivuutta erilaisissa ympäristöissä ja etäisyyksillä jos eri materiaalien vaimennukset tunnetaan. Monitie-etenemistä on tarkemmin käsitelty seuraavassa kappaleessa.

3.5 Monitie-eteneminen

Kun sisätiloissa käytetään langatonta yhteyttä, on lähettimen ja vastaanottimen välillä käytännössä aina joitain esteitä. Nämä esteet aiheuttavat signaaliin vääristymiä ja vaimentumia. Signaali voi muun muassa heijastua eri pinnoista, kuten seinistä tai lattiaista. Heijastuessa signaali ei välttämättä jatka matkaansa ehjänä vaan samalla voi tapahtua signaalin sirontaa. Osuessaan terävään kulmaan signaali ei jatka matkaansa lineaarisesti vaan taipuu (Faruque 2015). Tilanne on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Monitie etenemistä havainnollistava kuva. Signaali voi siirron aikana heijastua, sirota ja taipua jolloin eri signaalit saapuvat kohteeseen eri aikoihin

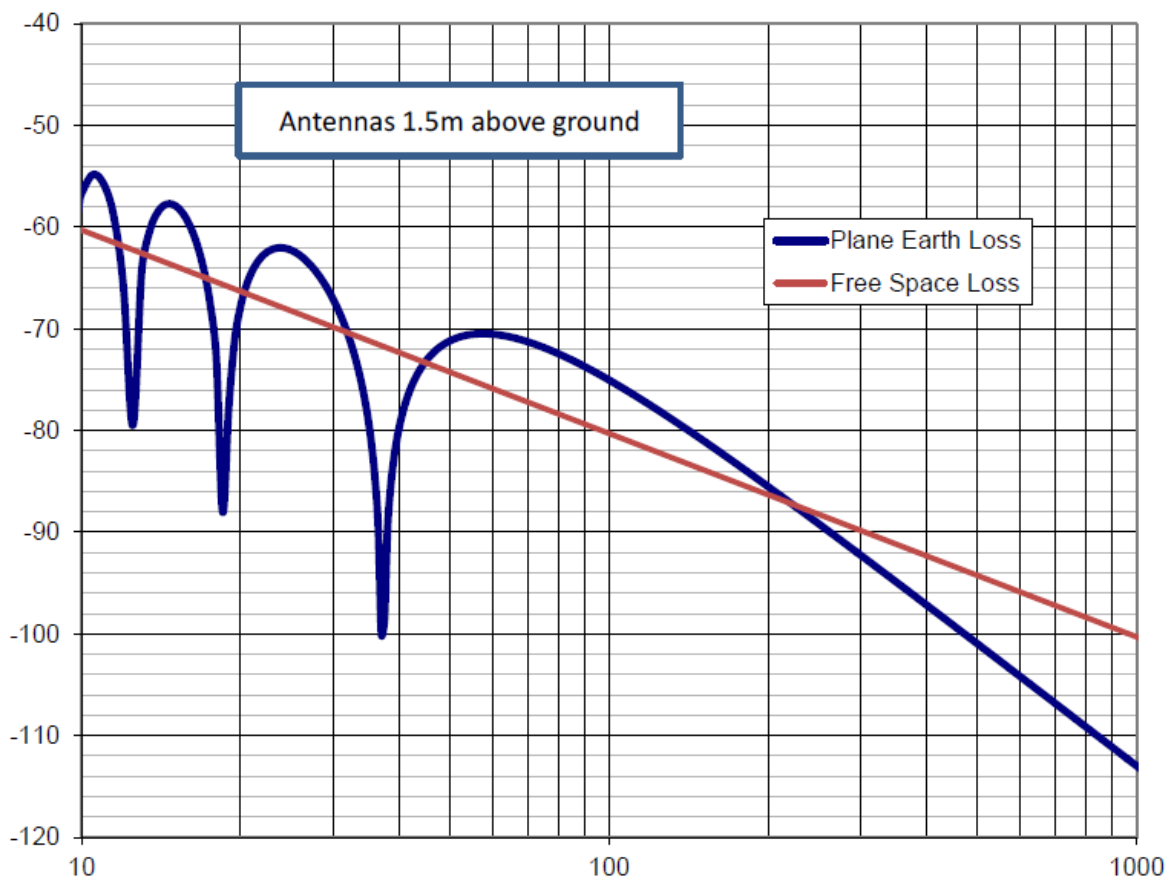
Näistä edellä mainituista ilmiöistä muodostuu monitie-etenemistä joka voi aiheuttaa moninaisia ongelmia, kuten vaimentumista, heijastumista, sirontaa ja diffraktiota signaalin kulussa. Pahimpia ongelmia on viiveestä johtuva symbolien välinen keskinäisinterferenssi (Intersymbol Interference, ISI), jossa heijastuksista ja viiveistä johtuen kaksi tai useampi signaali saapuu eri aikaan vastaanottimelle ja summautuvat uudeksi, vääristyneeksi signaaliksi.

Näitä ilmiöitä voi tapahtua kaikkia tai ei mitään yhtä aikaa sijainnista riippuen jonka takia näistä johtuvia signaalin muutoksia on todella vaikea simuloida tai laskea teoreettisesti. Monitie-etenemisen

vaikutuksia on kumminkin hyvä karkeasti arvioida ja ennakoida etukäteen tai mitata paikan päällä kun suunnitellaan uutta langatonta yhteyttä. Vaikka monitie-etenemisestä voi olla haittaa, voi siitä myös sopivasti käytettynä olla hyötyä. Esimerkiksi signaali voi kimmota seinistä jolloin lähettimen kantama kattaa myös katvealueelle jäävän laitteen (Parsons 2000). Samoin heijastuksen sekä diffraktion yhteisvaikutuksella voi olla katvealueella signaalia riittävästi voimistava vaikutus jolloin yhteys toimii halutulla tavalla.

3.5.1 Tasoheijastumahäviö

Tasoheijastumahäviö on yksi monitie-etenemisen muoto, jossa signaali heijastuu maasta ja aiheuttaa signaaliin viivettä. Eri aikaan vastaanottimeen saapuvat signaalit joko vaimentavat tai vahvistavat toisiaan. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. tasoheijastumahäviön vaikutus signaalin vaimenemiseen 1.5m antennilla ja 2.4GHz:n taajuudella (Bluegiga 2015)

Kuten kuvasta 5 nähdään, osuu muutama vaimennus- ja vahvistuskohta tässä tutkielmassa käytetyille alle 100 metrin etäisyydelle.

Tasoheijastumahäviön vaikutusta voidaan arvioida eri etäisyyksillä yhtälöllä 7 (Bluegiga Oy 2014).

$$\frac{P_r}{P_t} = 2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left[1 - \cos \left(k \frac{2h_1 h_2}{r} \right) \right], \quad (7)$$

jossa k on vapaantilan aallonnumero ja r antennien välinen etäisyys. Raja-arvo millä Tasoheijastumahäviö alkaa vaikuttamaan enemmän kuin vapaantilan vaimennus voidaan ratkaista yhtälöllä 8,

$$d_m = \frac{12h_1 h_2}{\lambda}. \quad (8)$$

Näillä edellä esitetyillä yhtälöillä voidaan arvioida häviön suuruutta, mutta tarkkaa arvoa ei saada. Tulokseen vaikuttaa lisäksi muun muassa maan laatu (johtavuus sekä karheus) ja ilmankosteus.

4 LAITTEIDEN KUVAUS

Tutkimuksen kokeelliseen osaan valittiin kaksi Bluetooth moduulia. Tässä kappaleessa käydään läpi käytettyjen moduulien perusominaisuuksia sekä niiden eroavaisuuksia. Kokeellista osiota varten moduuleille suunniteltiin mahdollisimman yhtenevät piirilevyt.

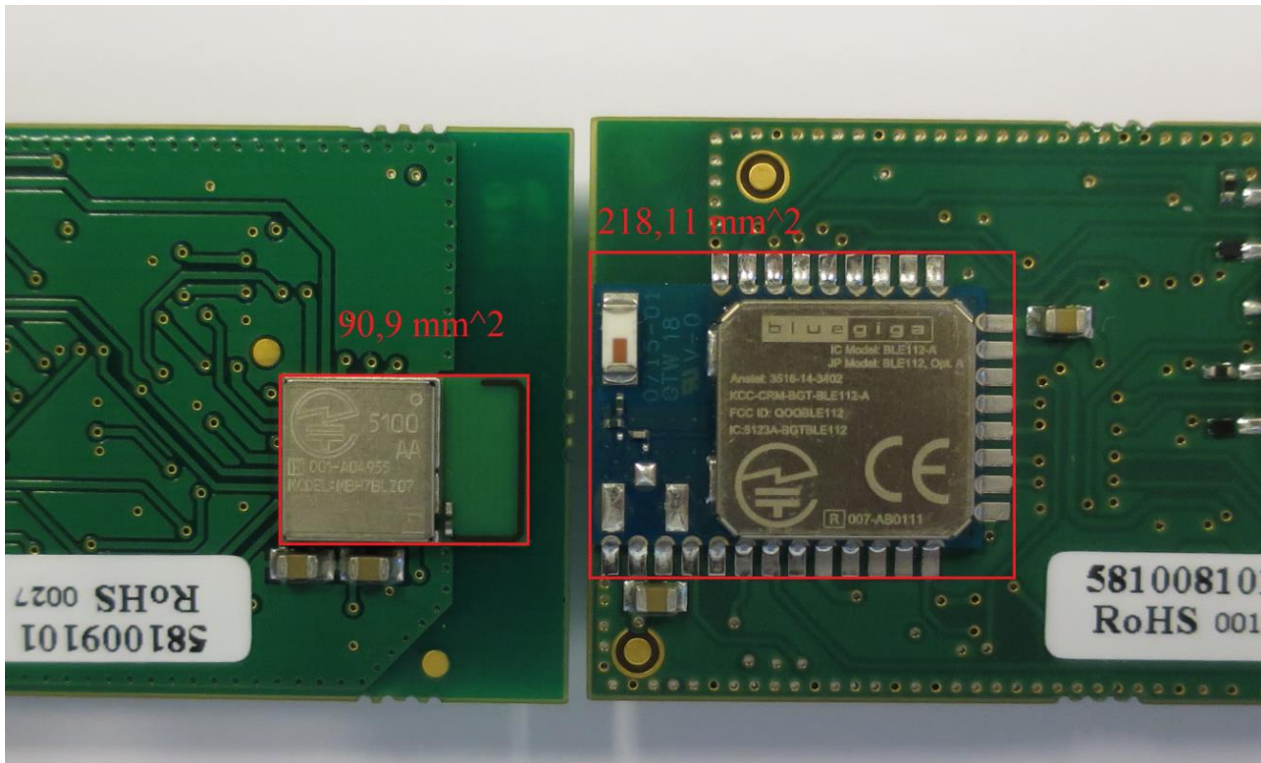
4.1 Bluegiga BLE112 ja Fujitsu MBH7BLZ07 moduulien esittely

Bluetooth moduuli on komponentti joka integroi sisäänsä Bluetoothin käyttöön tarvittavat ominaisuudet; radion, antennin, ohjelmapinon ja GATT-profiilit (Generic Attribute Profile). Toimivan laitteen kehittämiseen ei tarvita muuta kuin ulkoinen ohjelmointiliitin ja mahdollisesti jänniteregulointi. Valmiin Bluetooth moduulin käytön etuna on varma toiminta sekä jo valmiiksi olevat viranomaishyväksynät, tässä tapauksessa FCC, CE, IC, KCC ja MIC. Moduulin käyttö myös vähentää huomattavasti suunnittelukustannuksia ja suunnitteluun tarvittavaa aikaa. Näin ollen valmismoduuli tarjoaa loistavat lähtökohdat langattomalle IoT laitteelle.

Työhön vertailtavaksi valitut moduulit on esitelty kuvassa 6. Moduulit valittiin case – perusteella ja työn tavoitteena oli selvittää kumpi valituista moduuleista sopii tarkoitukseen paremmin. Myös useilla muilla valmistajilla on saatavilla vastaavan tyyppisiä Bluetooth LE moduuli ratkaisuita ja valmistajat kehittävät koko ajan uusia moduuleita.

4.1.1 Bluegiga BLE112

Ensimmäinen tutkittava moduuli on Suomalaisen Bluegiga:n valmistamaan BLE112 Bluetooth moduuli. Kooltaan BLE112 on vain 12.05mm x 18.10mm kokoinen, toimii CR2032 tai kahdella AA-paristolla ja kuluttaa virtaa lepotilassa vain 0.4 μ A. Lähetystilassakin virran kulutus on enimmillään vain 36 mA. Alhaisen virrankulutuksen ja pienen koon ansiosta moduulin pitäisi sopia hyvin tässä työssä tarvittavaan käyttötarkoitukseen. Moduuli perustuu Texas Instrumentsin valmistamaan, yleisesti paljon käytössä olevaan, CC2540 System-on-Chip (SoC) Bluetooth Low Energy piiriin. Piirissä on 19 ohjelmoitavaa I/O- porttia ja kaksi porttia USB tiedonsiirtoa varten.



Kuva 6. Moduulien kokoverailu; oikealla puolella Bluegiga:n ja vasemmalla Fujitsun moduuli. Kuvasta myös nähdään piirilevyn kiertävä läpivientiverkko.

Integroidulla PCB-antennillaan moduuli kykenee parhaimmillaan +3dBm (n. 2mW) lähetys ja -91dBm (n. $7.9 \cdot 10^{-10}$ mW) vastaanottotasoihin (Bluegiga BLE112 Datasheet). Eri moduuliversioita on saatavilla myös ulkoisilla- ja chip-antenneilla eri käyttökohteisiin sopivaksi. Kumminkaan tässä tapauksessa suuntaavan antennin käyttö ei ole kovin suotavaa vaihtelevien asennuskohteiden takia.

4.1.2 Fujitsu MBH7BLZ07

Toinen vertailuun valittu moduuli on Fujitsu MBH7BLZ07. Suurimpana erona Fujitsu:n moduuli käyttää CC2540 SoC piirin sijaan Nordic Semiconductor:n valmistamaa nRF51822 piiriä. Valmistajan datalehden perusteella lepotilan virrankulutus on $5\mu\text{A}$, eli huomattavasti Bluegiga:n moduulia suurempi. Toisaalta lähetystehoksi on ilmoitettu +4dBm jolloin kantaman pitäisi olla Bluegiga:a parempi (Fujitsu Component MBH7BLZ07-109011 Datasheet). Kooltaan moduuli on huomattavasti pienempi, mutta oheiskomponenttien takia itse moduulin koko ei vaikuttanut lopullisen piirilevyn kokonaisuuteen. Hinnaltaan, saatavuudeltaan ja oletetulta eliniältä moduulit asettuvat lähes samaan luokkaan. Virta- ja kuuluvuusmittaukset on esitetty luvussa 6.

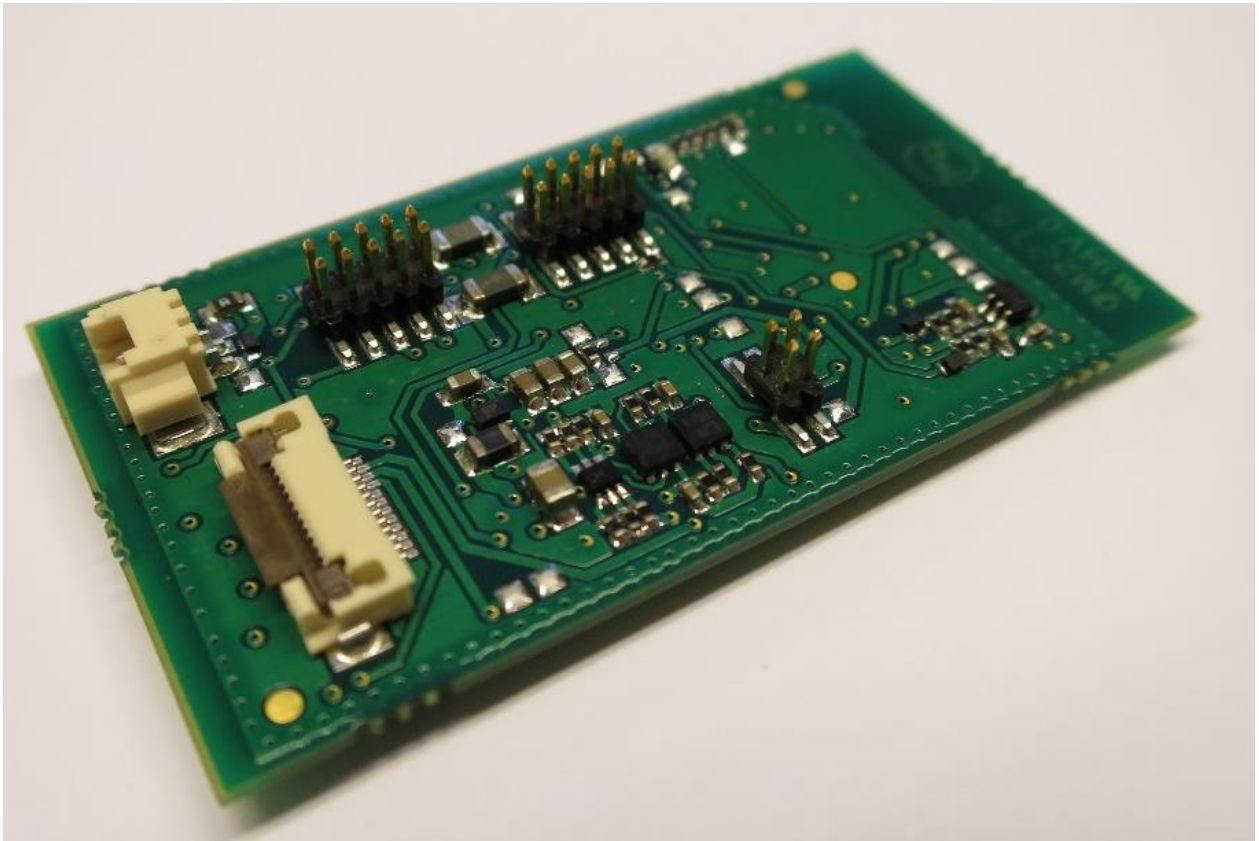
4.2 Piirilevyn suunnittelu

Mittauksia varten piirilevyt suunniteltiin itse. Vaikka valmistajilla on omia kehitysalustoja, ei näiden käyttäminen olisi antanut vertailukelpoisia tuloksia niiden eroavaisuuksien takia.

Piirilevyn suunnittelussa käytettiin paljon valmistajien datalehdissä ilmoittamia suosituksia. Lähtökohdiana oli käyttää 4-kerroslevyä, jossa ulommat kerrokset on varattu signaalilinjoille ja sisemmät kerrokset jännitteelle ja maatasolle (Mardiguian 2014). Erityisesti maataso pyrittiin pitämään mahdollisimman yhtenäisenä ja siksi välttämään vetojen käyttöä tällä tasolla. Yhtenäisellä maatasolla saavutetaan hyvä häiriönsuojaus. Lopullisessa versiossa tämä onnistuikin, eikä kyseisellä tasolla ole yhtään vetoa.

Suunnitteluun käytettiin Altium Designer 15 -ohjelmistoa. Piirilevyn käyttötarkoitusta mukailien piirilevyn koko pyrittiin pitämään mahdollisimman pienenä. Vaikka suurten liittimien ja muun muassa releiden sijoittelu tuottikin ongelmia -saatiin piirilevyn lopullinen koko pidettyä hyvin alustavien speksien mitoissa. Koon lähes ainoaksi rajoitteeksi muodostui käytettävien komponenttien fyysinen koko ja piirilevyn valmistajan määräämät minimimitat vetojen paksuudelle sekä läpivientien halkaisijalle. Optimoimalla olisi voinut saavuttaa vielä hieman pienemmän levyn, mutta se ei olisi ollut järkevää ajankäytöllisesti ja hyödyt olisivat jääneet erittäin vähäisiksi. Lopullisen tuotteen kooksi saatiin 50mm*27mm, eli pituudeltaan halutun AA – pariston pituinen. Piirilevyn leveys jäi haluttua suuremmaksi, pariston paksuinen (14.5 mm) piirilevy tuskin olisi edes mahdollista käytetyillä komponenteilla. Piirilevy on esitelty kuvassa 7.

Radiotekniikalla toimivassa laitteessa erityistä huomiota tulee kiinnittää antennin sijaintiin ja siihen mahdollisesti kohdistuvien häiriöiden vähentämiseen. Suunnittelussa erityisen paljon huomiota kiinnitettiin laitteen eri komponenttikokonaisuuksien sijoitteluun keskenään, niin että mahdollisesti paljon häiriötä tuottavat kytkennän osat ovat mahdollisimman kaukana antennista jotta vältetään piirilevystä itsestään aiheutuvista häiriöistä (Mardiguian 2014). Myös liian pitkiä signaalivetoja pyrittiin välttämään kaikin mahdollisin keinoin, etteivät vedot toimi epäsuotuisasti antennina. Samoin häiriöiden johtumista vähennettiin piirilevyn reunaan sijoitetulla läpivientiverkolla sekä moduulin mikropiirin alle sijoitetulla yhtenäisellä maatasolla.



Kuva 7. Kuva valmiista piirilevystä liitin-/testipistepuolelta kuvattuna. Käytössä Fujitsun MBH7BLZ07 moduuli joka on sijoitettu levyn toiselle puolelle.

Lisäksi huomioitiin piirilevyn tuotettavuuteen vaikuttavia seikkoja kuten valmistettavuutta sekä esimerkiksi liittimien ja testauspisteiden sijaintia (Hubing 2003). Tästä syystä kaikki liittimet on sijoitettu samalle puolelle levyä testipisteiden kanssa ja levyn reunassa on 0.3 mm:n suoja-alue komponenttien koneellista ladontaa varten. Liittimien sijoittelussa otettiin huomioon kaapelin käsin liittämisen helppous sekä kaapelin kiinnityksestä aiheutuva tilantarve kotelon sisällä.

Suunnittelussa ainoat virheet tulivat oikeastaan liiankin pienestä toleranssista ja koosta jolloin jälkikäteen piirilevyn muokkaaminen erilaisia prototyypiversioita varten osoittautui erittäin vaikeaksi. Muokattavuutta silmällä pitäen piirilevystä tehtiin vielä paranneltu versio jossa kyseiset virheet korjattiin.

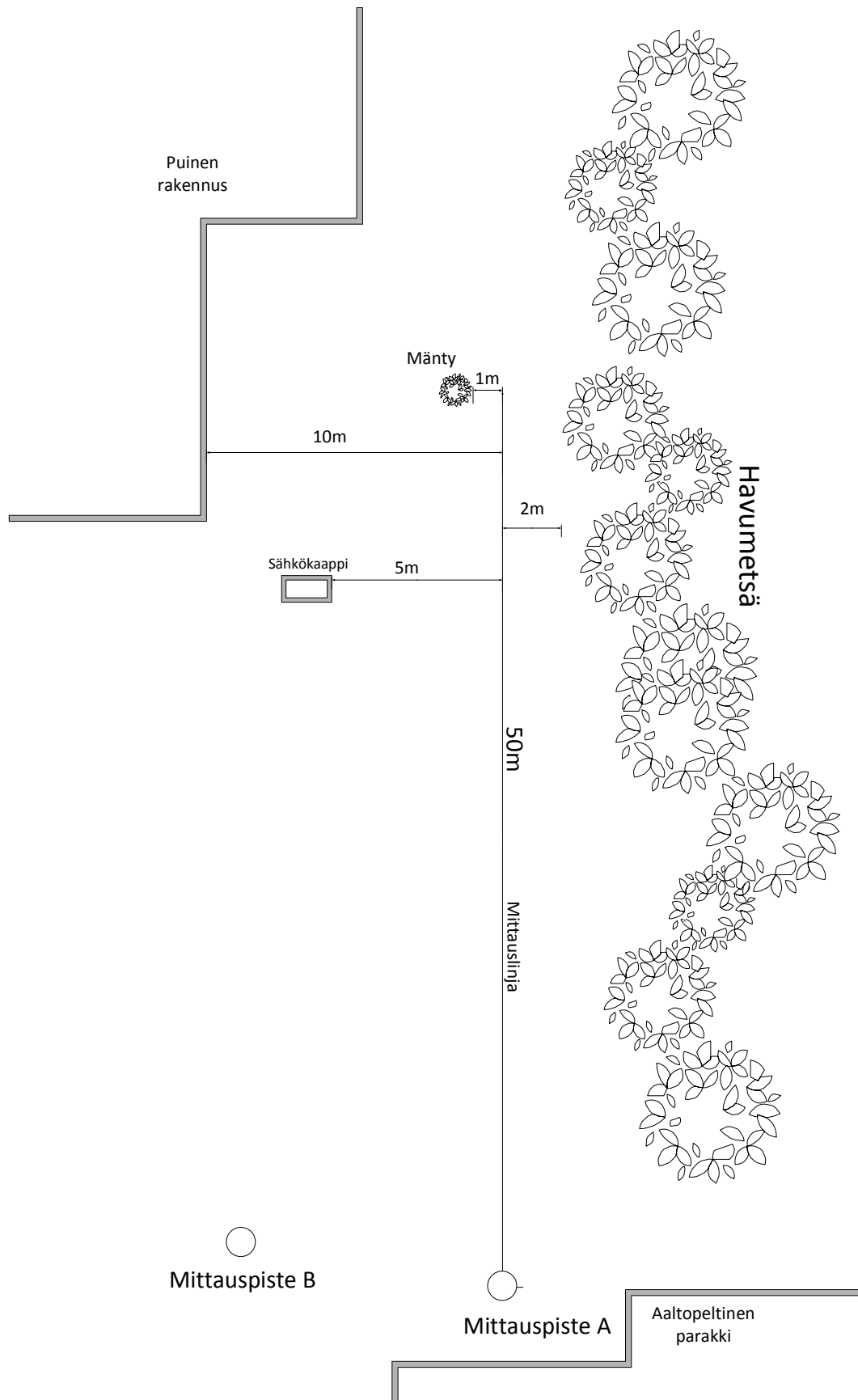
5 MITTAUKSET

Tässä kappaleessa esitellään työn aikana suoritettujen mittausten rakenne, suoritus tavat sekä tulokset. Mittausten tavoitteena oli selvittää molemmista moduuleista suurin toimintaetäisyys ja antennin suuntakuviota. Lisäksi vertailtiin moduuleiden virrankulutusta sekä signaalien läpäisykykyä erilaisissa rakenteissa.

5.1 Kantama

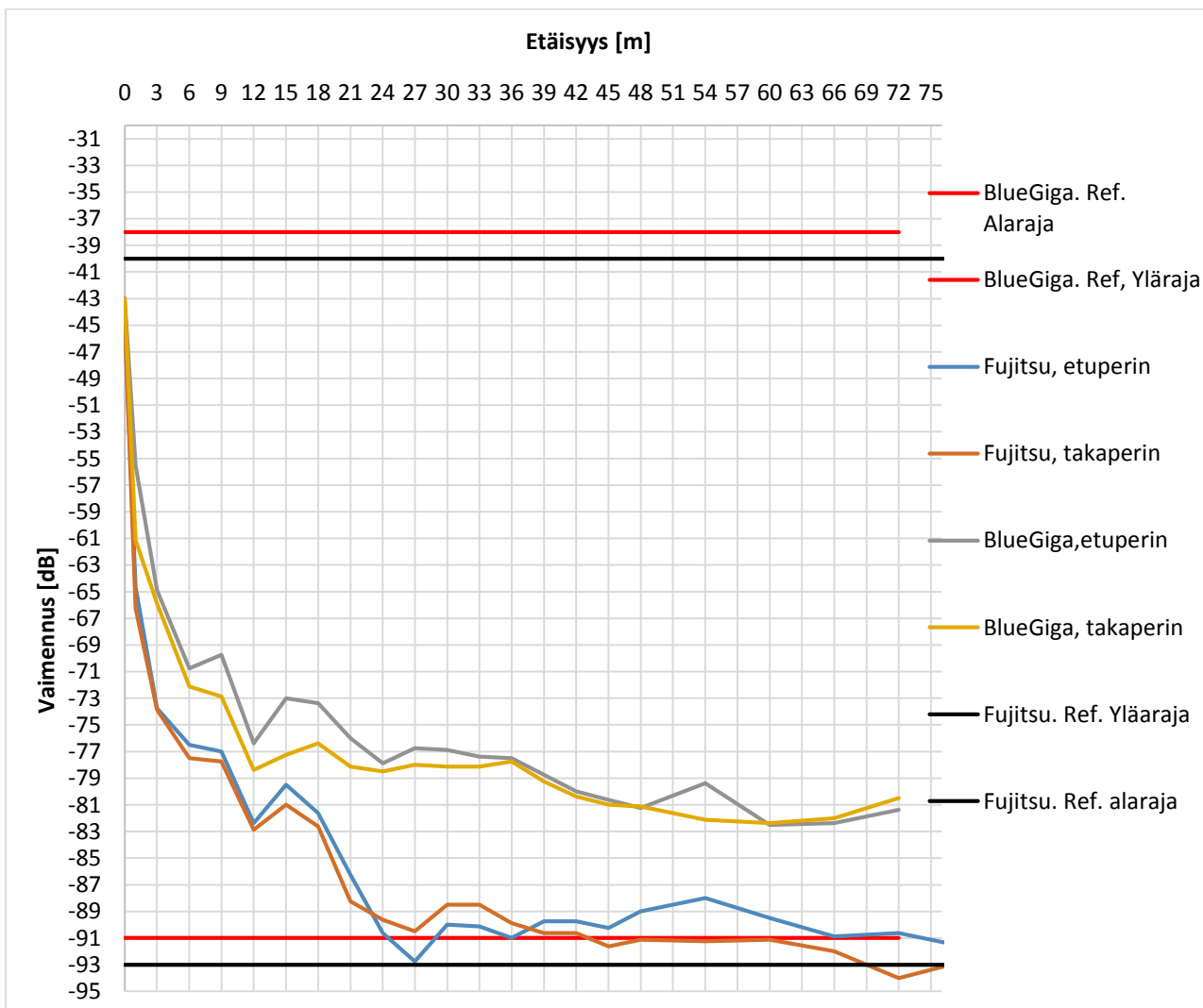
Mittauspaikka ei aivan vastaa vapaata tilaa ja erityisen ongelmalliseksi tilan tekee lähettimen takana oleva metallinen parakkirakennus. On huomioitava kuitenkin, että mittauksen tarkoituksena oli vertailla kahden laitteen toimintaan toisiinsa ja todentaa toimivuus reaali maailmassa jolloin tila katsottiin parhaimmaksi kompromissiksi. Suurin mittausta häiritsevä tekijä oli mittapaikan takana sijaitseva metallinen, aaltopellistä valmistettu, parakki. Parakin vaikutus mitattiin 48 metrin kohdalla siirtämällä mittauspaikkaa kauemmas parakista ja todettiin molemmilla moduuleilla parakin aiheuttavan signaaliin vahvistusta noin 2 dBm. Mittauspaikan havainnekuva on esitetty kuvassa 8. Kummankin mittauksen aikaan sää oli aurinkoinen, ilmankosteus vähäinen ja lämpötila 17 - 22 °C. Henkilöliikennettä tai muita merkittäviä häiriötekijöitä ei mittauspaikalla ollut. Mittausten perustana käytettiin kappaleessa 3 laskettuja arvoja ja teorian pohjalta tehtyjä oletuksia..

Mittauslaitteisto koostuu kappaleessa 5 esitetystä lähetin/vastaanotin parista ja lähetintä mittaavasta tietokoneesta. Lähetin kytkettiin tietokoneeseen moduulin kehitysalustan avulla. Laitteiston lähetin kiinnitettiin 1.5 metrin korkeuteen vastaamaan tukiaseman sijaintia ja vastaanotin 100 cm korkeuteen havainnollistamaan lukkorungon asennusta oveen. Vastaanotin asennettiin lukkorungon sisään jotta tilanne vastaisi reaali maailman normaalia asennusta. Tukiasema pidettiin mittausten ajan samassa kohdassa ja vastaanotinta liikutettiin kauemmas kunnes yhteys ei enää toiminut luotettavasti. Yhteyden toimivuuden varmistamiseksi laitteet sammutettiin ja testattiin saadaanko yhteys vielä muodostettua näiden välillä virran uudelleen kytkemisen jälkeen.



Kuva 8. Havainnekuva mittauspaikasta

Jokaisessa mittauspisteessä otettiin 30:n RSSI (Received Signal Strength Indicator) arvon keskiarvo. Mittaus toistettiin, mikäli tuloksessa oli huomattavaa poikkeamaa edellisiin mittauspisteeseen verrattuna. Mittaukset suoritettiin vastaanottimelle neljässä eri asennossa ja lähettimelle kahdessa eri asennossa 3 metrin välein, eli yhteensä kahdeksan mittausta eri asennoissa jokaisessa mittauspisteessä. Tukiaseman 2 eri asentoa valittiin valmistajan antaman suuntauskuvion perusteella vastaamaan suuntakuvion suurinta (kuvassa 9 tekstillä ”etuperin”) ja pienintä (kuvassa 9 tekstillä ”takaperin”) vaimentumaa. Näin ollen lähettimestä saatiin mitattua paras sekä huonoin asennussuunta. Mittaukset toistettiin niin kauan kun yhteyslinkin muodostaminen onnistui luotettavasti. Tulosten keskuksen eri asennoista saatu signaalin voimakkuuden keskiarvo on esitetty kuvassa 9. Referenssin yläraja on mitattu asettamalla lähettimet 1 cm:n päähän toisistaan, joka vastaa käytännössä voimakkainta mahdollista signaalia. Vastaavasti alaraja on vastaanottimen pienin dBm arvon herkkyys jonka moduuli valmistajan ilmoituksen mukaan kykenee havaitsemaan.



Kuva 9. Mitatun signaalin vaimeneminen etäisyyden funktiona molemmilla käytetyillä laitteilla kahdessa eri lähettimen asennossa.

Kuvasta 9 havaitaan Bluegiga:n moduulin signaalin pienempi vaimentuminen etäisyyden mukaan. Kumminkin testeissä yhteys ei toiminut luotettavasti enää 66 metrin jälkeen, vaan yhteysvirheen takia tapahtui välillä yhteyden aikakatkaisua. Tästä syystä Fujitsun moduuli toimi huomattavasti vakaammin ja luotettavammin vaikka sen signaalinvoimakkuus oli lähes koko mittausmatkalta lähellä referenssin alarajaa ja huomattavasti Bluegiga:a heikompi. Fujitsun moduulilla päästiin myös 4 metriä pidemmälle etäisyydelle jopa 76 metriin asti ilman yhteysongelmia. Liian pitkä kantama voi tosin olla tietoturvaongelma ja onkin mahdollista että kantamaa joudutaan rajoittamaan keinotekoisesti vähentämällä lähettimen tehoa tai suunnittelemalla kotelointi paremmin suuntaavaksi.

Mittauksissa ilmenevät vaimennukset 12 metrin ja noin 24 metrin kohdalla johtuvat maan aiheuttamasta heijastumisesta ja tästä johtuvasta monitie-etenemisestä. Samasta syystä noin 9 metrin, 15 metrin, 30 metrin ja 54 metrin kohdilla on havaittavissa signaaleissa selkeää voimistumista. Vaimentumaa sekä voimistumista on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.5.1.

Mittauksien tulosten poikkeamat vastaavat hyvin Bluegigan:n laskennallisia tuloksia (Bluegiga Oy, 2014) vaikka antennien korkeus hieman poikkeaa heidän mittauksistaan. Mittauspöytäkirja on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Tuloksista havaittiin myös moduulien säteilykuvioiden olevan hyvin samanlaisia vaikka moduulit käyttävät eri antenneita. Molemmissa mittauksissa paras ja huonoin kuuluvuus saavutettiin moduulien samoista asennoista, kuten valmistajien tiedoista pystyi oletamaan.

5.2 Virrankulutus

Virtamittauksissa käytettiin Agilent Technologies:n MSO-X 3024A digitaali-oskilloskooppi ja Bluegiga:n Bluetooth Low Energy kehitysalustaa. Oskilloskoopilla mitattiin kehitysalustan jännitteen alenema sekä kunkin eri tapahtumaketken kesto ja näitä tietoja hyväksikäyttäen ratkaistiin virta. Kun virrankulutus eri tapauksissa tiedetään, voidaan eri skenaarioiden perusteella arvioida pariston vaihtovälin pituutta. Tulokset on esitetty liitteessä 2.

Vaikka Bluegiga:n moduuli käyttää ylimääräistä Texas Instrumentsin TPS62730 DC/DC step-down hakkuria alentamaan lähetysketken virrankulutusta, kuluttaa se silti kokonaisuudessaan huomattavasti Fujitsu:n moduulia enemmän virtaa. Ero kasvaa vielä entistä enemmän Fujitsu:n eduksi, mikäli hakkuria ei käytetä. Fujitsu:n virrankulutusta on optimoitu moduulin mikro-ohjaimessa

eikä se siksi tarvitse erillistä virranhallinnan piiriä. Hakkuripiirin puuttuminen myös vähentää laitteen kokonaishintaa ja marginaalisesti mahdollisia vikaantumisia sekä piiristä aiheutuvia häiriöitä.

Kokonaisuudessaan Fujitsu:n moduulin virrankulutus oli Bluegiga:a huomattavasti pienempi. Erittäin pienen virran kulutuksen mahdollistaa Bluetooth Low Energy standardin toimintaperiaate, lähetys hetki on vain murto-osa kokonaisajasta ja laite on suurimman osan ajasta lepotilassa jolloin se kuluttaa vain noin 10 μ A virtaa. Fujitsun moduulissa GATT-profiilia on karsittu ja optimoitu jolloin virrankulutus on saatu mahdollisimman matalaksi. Erilaisissa realistisissa tilanteissa Fujitsun moduulilla pariston vaihtoväli voi olla yli vuoden Bluegiga:a pidempi ja huonoimmassakin tilanteessa useita kuukausia pidempi. Erilaisia mahdollisia käyttöskenaarioita sekä näillä saavutettavia teoreettisia pariston kestoja on esitetty liitteessä 2. Mittausten pohjana käytettiin Texas Instruments:n Bluetooth LE:n virtamittaustaulukkoa (Kamath 2014) jota muokattiin tarkoituksiimme paremmin sopivaksi. Virtamittausten tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

5.3 Lämpäisy eri rakenteissa

Vapaan tilan vaimennuksen lisäksi tutkittiin eri rakennusmateriaalien aiheuttamaa vaimennusta signaaliin. Tällä haluttiin varmistaa, ettei signaali katkea, mikäli asennuspaikassa ei ole suoraa näköyhteyttä lähetin parin välillä. Mittaukset suoritettiin kappaleessa 5.1 paremmaksi todetulla Fujitsu MBH7BLZ07 moduulilla.

Järjestelmää testattiin asettamalla yksi moduuli sille suunniteltuun koteloon ja asentamalla tämä kotelo ovea simuloivan puukappaleen sisään moottorilukkorungon yläpuolelle simuloimaan asennusta ovilukkoon. Toinen moduuli asennettiin muoviseen koteloon joka vastaa asennusta lukkokeskukseen. Mittaus toistettiin asentamalla lukossa oleva moduuli metallisen lukkorungon sisään. Tulokset on esitetty taulukossa 1. Mittauksissa keskus ja lukko asetettiin 1 metrin etäisyydelle vastakkaisille puolille mitattavasta pinnasta ja mittauksista otettiin 30:n RSSI arvon keskiarvo. Molemmat moduulit asetettiin mahdollisimman lähelle normaalia asennusta vastaavaa asentoa yhden metrin korkeuteen maanpinnasta.

Järjestelmällä ei ollut huomattavia ongelmia perusrakennusmateriaalien läpäisemisessä. Ainoan mahdollisen ongelman muodosti huomattavasti normaalia lattiaa paksumpi lattia, jonka läpäistyään signaali oli vaimennut lähelle moduulinherkkyyden referenssitason (-93 dB). Toisaalta tässä mittauksessa moduuli oli asennettuna metalliseen koteloon, jatkokehityksessä kotelon rakennetta

voitaisiin parantaa jolloin kotelosta aiheutuva vaimennus vähenee. Yllättävää oli järjestelmän kyky läpäistä myös huomattavan paksu metallinen kaksikerroksinen pommisuojaan ovi ilman huomattavaa ongelmaa ja yleensäkin signaalin kyky läpäistä kaikki rakenteet ilman suuria ongelmia. Ongelmia voi tosin muodostua mikäli laitteen asennusasento ei ole optimaalinen tai mikäli tilassa on järjestelmää huomattavasti häiritseviä laitteita tai esteitä. Kun eri materiaalien vaimennus sekä vapaantilanvaimennus tunnetaan, voitaisiin laitteen toimintaan eri käyttöolosuhteissa arvioida yhtälöllä 6.

Taulukko 1. MBH7BLZ07 moduulin signaalin vaimentuma eri materiaaleissa

Läpäisytestit Fujitsu MBH7BLZ07				
	Lukon sisällä [dBm]		Kotelossa [dBm]	
	Keskus	Lukko	Keskus	Lukko
3-kerros ikkuna	-77	-80	-77	-76
kevyt väliseinä	-71	-73	-67	-65
Tiiliseinä	-72	-76	-72	-70
Paksu lattia	-89	-92	-86	-82
Kevyt väliovi/sisäovi	-71	-73	-69	-66
Palo-ovi(Pommisuoja)	-78	-80	-79	-78
Ulko-ovi	-70	-72	-72	-69

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkittiin Bluetooth tekniikan käyttömahdollisuutta osana langattoman sähkövilukon tiedonsiirtoa. Tarkoitus oli selvittää voidaanko tekniikkaa ja valmista moduulia käyttää IoT laitteessa, kuten sähkölukossa, ja kannattaako tekniikan jatkotutkimus. Erityisesti painotettiin signaalin kantaman riittävyttä vapaassa tilassa sekä vaimenemisesta sen osuessa esteeseen. Tämän lisäksi tutkimuksen painopisteenä oli mitata prototyypilaitteen virrankulutusta ja tästä arvioida paristonkestoa erilaisissa käyttötilanteissa.

Kokeellisessa osassa vertailtiin kahden eri valmistajan Bluetooth Low Energy moduulia. Tutkittavat laitteet olivat Bluegiga:n valmistama BLE112 ja Fujitsu Component:n MBH7BLZ07 moduulit. Vertailua varten suunniteltiin ja valmistettiin molemmille moduuleille yhtenevä piirilevy. Piirilevyn suunnittelussa onnistuttiin hyvin; laite toimi halutulla tavalla, laitteen kokoa ei enää pysty merkittävästi pienentämään, laite ei häiriintynyt mittausten aikana ulkopuolisista signaaleista eikä muitakaan piirilevystä johtua ongelmia havaittu.

Teorian pohjalta havaittiin Bluetooth teknologian sopivan hyvin sähkövilukkokäyttöön riittävän kantaman sekä paristokeston ansiosta. Tulokset varmennettiin käytännön mittauksilla. Laboratoriomittauksissa saavutettiin tavoiteltu yli 70 metrin kantama avoimessa tilassa ja riittävä läpäisykyky yleisimmissä asennustilanteissa. Normaalisissa käyttöympäristössä testattu laite toimii luotettavasti ja halutulla tavalla. Myös virrankulutus on tarpeeksi matala joka mahdollistaa moduulin toiminnan ilman pariston vaihtoa riittävän pitkän aikaa.

Tulosten perusteella Bluetooth Low Energy tekniikka sopii käytettäväksi IoT laitteissa, kuten sähkölukossa, joissa riittää alle 100 metrin kantama ja halutaan pieni virrankulutus. Työn tarkoituksena oli selvittää kumpi, jos kumpikaan, moduuleista sopii jatkokehitystä varten ja tämä tavoite saavutettiin.

Jatkokehitystä varten olisi tärkeää tutkia tekniikan tietoturvaa, mekaanista kestävyyttä, ja toimintaikää. Samoin voisi tutkia tekniikalle mahdollisia muita hyödyntämiskohteita. Lisäksi paristonkesto olisi hyvä varmentaa pitkänajan testillä, jolloin nähtäisiin todellinen pariston käyttöikä ja voitaisiin varmistua mittausten oikeellisuudesta.

LÄHTEET

Bluegiga BLE112 Datasheet v. 1.21

Saatavilla: https://www.bluetooth.org/tpg/RefNotes/BLE112_Datasheet1.pdf

[Haettu 2015]

Bluegiga Oy, 2014, *BLE112, BLE113 and BLE121LR Range Analysis application note version 1.1*, s. 13.

Saatavilla:

https://bluegiga.zendesk.com/attachments/token/dhSzk93MpGFS6Pc9fn26drlrL/?name=BLE_Range_Comparison.pdf

[Haettu 2015]

Bluetooth core specification version 4.2 vol. 2 Part B, p. 184

Saatavilla:

https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=286439

[Haettu 2015]

Bluetooth low energy technical information

Saatavilla: <http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy-tech-info.aspx>

[Haettu 2015]

Bluetooth technology 101

Saatavilla: <http://www.bluetooth.com/Pages/Fast-Facts.aspx>

[Haettu 2015]

Ericsson Oy, *The History of Bluetooth*

Saatavilla:

<http://www.ericssonhistory.com/changing-the-world/Anecdotes/The-history-of-Bluetooth/>

[Haettu 2015]

Faruque S. 2015 , *Radio Frequency Propagation Made Easy*, Springer International Publishing Switzerland, DOI 10.1007/978-3-319-11394-4_3, s. 27- 32.

Fujitsu Component , MBH7BLZ07-109011, Datasheet

Saatavilla:

<http://www.fcl.fujitsu.com/downloads/services/wireless-modules/mbh7blz07.pdf>

[Haettu 20.08.2015]

Lloret, J, Lopez, J, Turro, C, Flores,S, 2004, *A Fast Design Model For Indoor Radio Coverage In The 2.4 GHz Wireless LAN*

Saatavilla: <http://personales.upv.es/turro/articulos/iswc04.pdf>

[Haettu 2015]

Mardiguian M., 2014, *Controlling Radiated Emissions by Design*, third edition, ISBN 978-3-319-04770-6, s. 117-118, 135-141

Mills, K., 2005, National institute of standards and technology, *Networking for pervasive computings*. s. 118-120

Saatavilla: http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/sp/2005/sp500_259.pdf#page=125

[Haettu 2015]

Parsons, J.D., 2000, *The Mobile Radio Propagation Channel, Second edition*, ISBN 0-471-98857-X, s. 36

Särkimäki, V., 2004, Diplomityö, *Lyhyen kantaman radiolähettimien soveltuvuus sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tiedonsiirtotarpeisiin*, s.12-13

Saatavilla:

<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/34573/nbnfi-fe20051369.pdf?sequence=1>

Kamath S. & Lindh J., 2012, Texas Instruments, Application note AN092, *Measuring Bluetooth Low Energy Power Consumption*,

Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/swra347a/swra347a.pdf>

[Haettu 2015]

Hubing, Todd H. 2003, Missouri University of Science and Technology, *PCB EMC design guidelines: a brief annotated list*

Saatavilla: http://scholarsmine.mst.edu/faculty_work/1672

[Haettu 2015]

Tor-Inge Kvakrsrud, 2007 , Texas Instruments ,Design note DN018, *Range Measurements in an Open Field Environment*

Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>

[Haettu 2015]

LIITE 1. Vaimentumisen mittaustulokset

FUJITSU, Keskus etuperin											
Suuntima	Ulkopuoli		Rintalevy		Sisäpuoli		Takapuoli		KA	Referenssit	
Etäisyys [m]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	[dBm]	1cm	Herkkyys [dBm]
0	-43	-46	-43	-46	-43	-46	-43	-46	-44,5	-40	-93
1	-64	-66	-66	-67	-59	-61	-67	-67	-64,625	-40	-93
3	-73	-74	-74	-75	-68	-74	-75	-77	-73,75	-40	-93
6	-73	-77	-78	-78	-75	-79	-75	-77	-76,5	-40	-93
9	-75	-76	-79	-81	-70	-72	-82	-81	-77	-40	-93
12	-76	-77	-86	-87	-79	-84	-83	-87	-82,375	-40	-93
15	-75	-76	-78	-80	-76	-77	-86	-88	-79,5	-40	-93
18	-77	-78	-84	-85	-78	-81	-84	-86	-81,625	-40	-93
21	-85	-87	-85	-87	-84	-86	-87	-89	-86,25	-40	-93
24	-89	-92	-89	-91	-90	-92	-90	-92	-90,625	-40	-93
27	-90	-92	-92	-96	-91	-92	-93	-96	-92,75	-40	-93
30	-84	-85	-90	-92	-90	-93	-91	-95	-90	-40	-93
33	-83	-85	-90	-94	-90	-93	-92	-94	-90,125	-40	-93
36	-83	-85	-95	-98	-90	-92	-92	-93	-91	-40	-93
39	-84	-85	-91	-93	-86	-88	-94	-97	-89,75	-40	-93
42	-84	-85	-91	-93	-86	-88	-94	-97	-89,75	-40	-93
45	-88	-91	-91	-93	-84	-86	-93	-96	-90,25	-40	-93
48	-88	-88	-89	-93	-85	-89	-89	-91	-89	-40	-93
54	-83	-85	-89	-90	-86	-88	-90	-93	-88	-40	-93
60	-85	-88	-90	-93	-88	-92	-89	-91	-89,5	-40	-93
66	-89	-94	-92	-91	-87	-90	-91	-93	-90,875	-40	-93
72	-87	-91	-89	-91	-88	-90	-93	-96	-90,625	-40	-93
78	-87	-91	-91	-92	-90	-93	-93	-96	-91,625	-40	-93

(jatkuu)

LIITE 1. Vapaan tilan vaimentumisen mittaustulokset (jatkoa)

FUJITSU, Keskus takaperin												
Suuntima	Ulkopuoli		Rintalevy		Sisäpuoli		Takapuoli		KA	Referenssit		
Etäisyys [m]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	[dBm]	1cm	Herkkyys [dBm]	
0	-43	-46	-43	-46	-43	-46	-43	-46	-44,5	-40	-93	
1	-67	-68	-67	-69	-62	-64	-64	-69	-66,25	-40	-93	
3	-71	-72	-75	-74	-71	-72	-76	-80	-73,875	-40	-93	
6	-73	-76	-80	-83	-78	-78	-75	-77	-77,5	-40	-93	
9	-75	-76	-78	-79	-73	-76	-81	-84	-77,75	-40	-93	
12	-77	-84	-86	-86	-80	-83	-84	-83	-82,875	-40	-93	
15	-77	-83	-81	-80	-80	-80	-82	-85	-81	-40	-93	
18	-79	-81	-84	-86	-79	-80	-85	-87	-82,625	-40	-93	
21	-87	-89	-86	-87	-89	-91	-87	-90	-88,25	-40	-93	
24	-88	-90	-89	-93	-85	-91	-89	-92	-89,625	-40	-93	
27	-83	-86	-91	-95	-89	-90	-93	-97	-90,5	-40	-93	
30	-82	-85	-91	-92	-85	-89	-91	-93	-88,5	-40	-93	
33	-82	-87	-88	-90	-88	-89	-92	-92	-88,5	-40	-93	
36	-84	-87	-93	-97	-87	-90	-90	-91	-89,875	-40	-93	
39	-84	-86	-93	-97	-87	-91	-92	-95	-90,625	-40	-93	
42	-84	-86	-93	-97	-87	-91	-92	-95	-90,625	-40	-93	
45	-89	-94	-93	-95	-85	-90	-91	-96	-91,625	-40	-93	
48	-88	-91	-89	-93	-91	-94	-90	-93	-91,125	-40	-93	
54	-91	-94	-87	-90	-91	-94	-90	-93	-91,25	-40	-93	
60	-94	-96	-88	-91	-83	-86	-94	-97	-91,125	-40	-93	
66	-90	-92	-90	-93	-89	-92	-95	-95	-92	-40	-93	
72	-94	-99	-91	-94	-91	-93	-94	-96	-94	-40	-93	
78	-94	-93	-90	-94	-89	-93	-94	-95	-92,75	-40	-93	

LIITE 1. Vapaan tilan vaimentumisen mittaustulokset (jatkoa)

Bluegiga, keskus etuperin												
Suuntima	Ulkopuoli		Rintalevy		Sisäpuoli		Takapuoli		KA	Referenssit		
Etäisyys [m]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	[dBm]	1cm	Herkkyyks [dBm]	
0	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-38	-91	
1	-51	-52	-62	-64	-46	-47	-61	-61	-55,5	-38	-91	
3	-63	-64	-68	-69	-63	-63	-64	-65	-64,875	-38	-91	
6	-69	-69	-73	-75	-71	-71	-69	-69	-70,75	-38	-91	
9	-68	-70	-74	-73	-66	-66	-70	-71	-69,75	-38	-91	
12	-78	-78	-77	-77	-75	-75	-76	-75	-76,375	-38	-91	
15	-72	-72	-73	-74	-74	-74	-73	-72	-73	-38	-91	
18	-71	-72	-74	-74	-72	-72	-76	-76	-73,375	-38	-91	
21	-75	-75	-76	-77	-75	-76	-77	-77	-76	-38	-91	
24	-77	-79	-78	-79	-77	-75	-78	-80	-77,875	-38	-91	
27	-73	-74	-79	-79	-77	-78	-77	-77	-76,75	-38	-91	
30	-73	-74	-78	-79	-76	-77	-79	-79	-76,875	-38	-91	
33	-77	-77	-78	-79	-76	-76	-78	-78	-77,375	-38	-91	
36	-78	-78	-77	-78	-75	-75	-80	-79	-77,5	-38	-91	
39	-76	-75	-82	-83	-76	-78	-80	-80	-78,75	-38	-91	
42	-80	-80	-79	-80	-77	-78	-83	-83	-80	-38	-91	
45	-81	-80	-80	-79	-79	-80	-82	-84	-80,625	-38	-91	
48	-78	-78	-82	-84	-83	-81	-81	-83	-81,25	-38	-91	
54	-79	-76	-79	-81	-79	-82	-78	-81	-79,375	-38	-91	
60	-78	-79	-85	-84	-83	-83	-84	-84	-82,5	-38	-91	
66	-83	-82	-82	-81	-81	-81	-85	-84	-82,375	-38	-91	
72	-80	-81	-83	-85	-80	-81	-80	-81	-81,375	-38	-91	
72	-88	-88	-87	-88	-85	-87	-85	-87	-86,875	-38	-91	

(jatkuu)

LIITE 1. Vapaan tilan vaimentumisen mittaustulokset (jatkoa)

Bluegiga, keskus takaperin												
Suuntima	Ulkopuoli		Rintalevy		Sisäpuoli		Takapuoli		KA	Referenssit		
Etäisyys [m]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	RSSI kesk. [dBm]	RSSI lukko [dBm]	[dBm]	1cm	Herkkyys [dBm]	
0	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-38	-91	
1	-60	-61	-67	-69	-54	-54	-62	-62	-61,125	-38	-91	
3	-62	-64	-67	-69	-62	-63	-70	-70	-65,875	-38	-91	
6	-73	-71	-71	-70	-72	-72	-74	-74	-72,125	-38	-91	
9	-72	-73	-73	-74	-70	-70	-75	-76	-72,875	-38	-91	
12	-75	-74	-76	-77	-81	-81	-83	-80	-78,375	-38	-91	
15	-81	-80	-74	-77	-75	-76	-78	-77	-77,25	-38	-91	
18	-76	-76	-77	-77	-74	-74	-78	-79	-76,375	-38	-91	
21	-76	-77	-78	-80	-75	-76	-81	-82	-78,125	-38	-91	
24	-73	-74	-79	-82	-78	-77	-82	-83	-78,5	-38	-91	
27	-76	-77	-81	-81	-77	-77	-77	-78	-78	-38	-91	
30	-76	-77	-79	-81	-76	-76	-80	-80	-78,125	-38	-91	
33	-75	-75	-83	-84	-75	-76	-78	-79	-78,125	-38	-91	
36	-73	-74	-79	-81	-74	-77	-82	-82	-77,75	-38	-91	
39	-75	-76	-80	-82	-77	-80	-82	-82	-79,25	-38	-91	
42	-74	-75	-81	-83	-78	-78	-86	-88	-80,375	-38	-91	
45	-78	-81	-82	-81	-78	-79	-84	-85	-81	-38	-91	
48	-79	-80	-83	-83	-80	-79	-84	-81	-81,125	-38	-91	
54	-77	-77	-86	-85	-85	-84	-80	-83	-82,125	-38	-91	
60	-80	-81	-84	-84	-79	-79	-86	-86	-82,375	-38	-91	
66	-83	-82	-83	-83	-77	-79	-84	-85	-82	-38	-91	
72	-80	-80	-80	-82	-80	-79	-81	-82	-80,5	-38	-91	
72	-87	-88	-86	-87	-83	-84	-87	-87	-86,125	-38	-91	

LIITE 2. Virrankulutusmittausten tulokset Bluegiga BLE112

Bluegiga BLE112	Idle				Motor drive + door use event			
	Time (us)	Current (mA)	Voltage (V)	Total current (mA μ s)	Time (us)	Current (mA)	Voltage (V)	Total current (mA μ s)
State 1	640	13,54	2,885	8665,6	1600	14,70667	2,85	23530,67
State 2	200	17,10667	2,778	3421,333	2680	6,54	3,095	17527,2
State 3	300	11,27333	2,953	3382	134920	73,37333	1,09	9899530
State 4	530	6,54	3,095	3466,2	5300	8,04	3,05	42612
State 5	500	17,37333	2,77	8686,667	480	18,04	2,75	8659,2
State 6	0	0		0	18880	14,70667	2,85	277661,9
State 7	0	0		0	233750	0,706667	3,27	165183,3
State 8	0	0		0	407000	6,54	3,095	2661780
State 9	0	0		0	24750	18,70667	2,73	462990
				27621,8				13559474
Total time of connection event (μ s)	2170				829360			
Average Current draw during connection event (mA):		12,72894				16,34932		
Average current draw accounting for sleep (mA):				0,1204				54,21472

(Jatkuu)

LIITE 2. Virrankulutusmittausten tulokset Fujitsu MBH7BLZ07 (Jatkoa)

Fujitsu MBH7BLZ07	Idle				Motor drive + door use event			
	Time (us)	Current (mA)	Voltage (V)	Total current (mA μ s)	Time (us)	Current (mA)	Voltage (V)	Total current (mA μ s)
State 1	1560	1,473333	3,247	2298,4	14040	1,473333	3,247	20685,6
State 2	700	9,34	3,011	6538	6300	9,34	3,011	58842
State 3	540	5,24	3,134	2829,6	4320	5,24	3,134	22636,8
State 4					1920	6,656667	3,0915	12780,8
State 5					161440	84,20667	0,765	13594324
State 6					95800	1,706667	3,24	163498,7
Total time of connection event (μ s)	2800				283820			
Average Current draw during connection event (mA):		4,166429				48,87876		
Average current draw accounting for sleep (mA):				0,056552				55,48972

(Jatkuu)

LIITE 2. Virrankulutusmittausten vertailu (Jatkoa)

Battery life calculations	Configuration			Bluegiga BLE112		Fujitsu MBH7BLZ07	
	Capacity (mAh)	Con. Interval (ms)	Lock daily usage	Battery life (days)	Battery life (years)	Battery life (days)	Battery life (years)
Configuration 1	2500	100	50	295	0,81	532	1,46
Configuration 2	2500	100	100	247	0,68	393	1,08
Configuration 3	2500	250	50	706	1,93	1236	3,39
Configuration 4	2500	250	100	597	1,64	930	2,55
Configuration 5	2500	500	50	1323	3,62	2209	6,05
Configuration 6	2500	500	100	1129	3,09	1708	4,68
Configuration 7	1200	100	50	141	0,39	256	0,70
Configuration 8	1200	100	100	119	0,33	189	0,52
Configuration 9	1200	250	50	339	0,93	593	1,62
Configuration 10	1200	250	100	287	0,79	446	1,22
Configuration 11	1200	500	50	635	1,74	1061	2,91
Configuration 12	1200	500	100	542	1,48	820	2,25
Configuration 13	620	250	50	175	0,48	306	0,84
Configuration 14	620	250	100	148	0,41	230	0,63
Configuration 15	620	500	50	328	0,90	548	1,50
Configuration 16	620	500	100	280	0,77	424	1,16
Configuration 17	620	1000	50	582	1,59	904	2,48
Configuration 18	620	1000	100	505	1,38	728	1,99