

Teemu Savikoski

ETÄISYYDEN MITTAUS SIGNAALIN KULKUAIKAAN
PERUSTUVALLA MENETELMÄLLÄ WPAN-VERKOSSA



ETÄISYYDEN MITTAUS SIGNAALIN KULKUAI-
KAAN PERUSTUVALLA MENETELMÄLLÄ WPAN-
VERKOSSA

Teemu Savikoski
2010
Tekniikan yksikkö
Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Opinnäytetyö

TIIVISTELMÄ

Koulutusohjelma Tietotekniikka	Projekti Insinööriyö	Sivuja 99	+	Liitteitä 0
Suuntautumisvaihtoehto Langaton tietoliikenne	Aika 2010		+	
Työn tilaaja OAMK, Vinski Bräysy	Työn tekijä Teemu Savikoski			
Työn nimi Etäisyyden mittaus signaalin kulku-aikaan perustuvalla menetelmällä WPAN-verkossa				
Asiasanat Signaalin kulku-aika, IEEE 802.15.4 -standardi, WPAN, ZigBee, Jennic, Päikannus, vastaanotetun signaalin teho				

Insinööriyössä tutustuttiin IEEE 802.15.4 -standardiin pohjautuvaan lyhyen kantaman langattomaan radiotekniikkaan, jota kutsutaan WPAN-tekniikaksi. Työssä tutustuttiin lisäksi standardin pohjalle rakennettuun ZigBee-tekniikkaan.

Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla radiotekniikoiden teoriaosuuteen ja koulun hankkimaan Jennic-valmistajan kehitysympäristöön, joka on kyseisten tekniikoiden rajapintoihin suunniteltu laitteistoympäristö. Työssä mitattiin kahden laiteparin välistä etäisyyttä signaalin kulku-aikaan perustuvalla menetelmällä. Työssä tutkittiin etäisyyden tarkkuutta paikallaan mitattavaan ja liikkuvaan kohteeseen. Työssä tutkittiin myös järjestelmän maksimietäisyyttä, datan vastaanottokykyä sekä järjestelmän epävakaisuutta. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää tulevia käyttökohteita kehitettäessä.

Insinööriyössä saatiin kerättyä paljon hyödyllistä tietoa käytettävästä kehitysympäristöstä ja sen ominaisuuksista. Mittausten perusteella järjestelmä on melko epävakaa ja mittaustulokset olivat vaihtelevia etäisyydestä riippumatta. Etäisyyttä kasvatettaessa etäisyyden tarkkuus ja järjestelmän luotettavuus paranivat.

ALKUSANAT

Kiitokset Oulun seudun ammattikorkeakoululle, Tekniikan yksikölle opinnäytetyön tarjoamisesta. Kiitokset lisäksi Jari-Pekka Ronnulle opinnäytetyön ohjauksesta ja Vinski Bräysylle työn tilauksesta. Kiitokset myös Tuula Hopeavuorelle opinnäytetyön tekstin ohjauksesta, Mikko Karjalaiselle mittausohjelmistojen kehittämisestä ja Juha Juutille yhteistyöstä sekä projektikumppanuudesta. Juuti teki kanssani tutkimustyötä Jenni-kehitysympäristöstä ja tekee WPAN-verkkoihin sekä paikannukseen liittyvää opinnäytetyötä.

Oulussa 30.9.2010

Teemu Savikoski

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT	4
SISÄLTÖ.....	5
LYHENTEET JA TERMIT	7
1 JOHDANTO	9
2 WPAN-VERKON KÄYTTÖKOHTEET	10
3 JENNIC-LAITTEISTO	13
3.1 Ohjausyksikkö	15
3.2 Anturiyksikkö	16
4 WPAN-STANDARDI	17
4.1 Toimintaperiaate	18
4.2 Radiotaajuus	19
4.3 Aktiiviset laitteet.....	20
5 ZIGBEE.....	21
5.1 ZigBee-laitetyypit.....	22
5.2 Verkkotopologiat.....	23
5.2.1 Tähtiverkko	23
5.2.2 Puuverkko.....	24
5.2.3 Mesh-verkko	26
5.3 Lähetysmuodot.....	27
5.3.1 Suora lähetys.....	28
5.3.2 Epäsuora lähetys.....	28
6 MITTAUSTEKNIIKAT	30
6.1 Signaalin kulkuaikaan perustuva mittaus	30
6.1.1 Mittausmekanismi.....	31
6.1.2 Datan siirto	32
6.1.3 Järjestelmän virheet.....	34
6.1.4 Etäisyyden laskeminen	35
6.2 Vastaanotetun signaalin tehoon perustuva mittaus.....	35
7 MITTAUKSET	38
7.1 Mittaustulokset eri etäisyyksillä	39
7.1.1 Yhden metrin etäisyys	40

7.1.2 Kolmen metrin etäisyys.....	43
7.1.3 Viiden metrin etäisyys.....	46
7.1.4 Seitsemän ja puolen metrin etäisyys	49
7.1.5 10 metrin etäisyys.....	52
7.1.6 15 metrin etäisyys.....	55
7.1.7 20 metrin etäisyys.....	58
7.1.8 30 metrin etäisyys.....	61
7.1.9 40 metrin etäisyys.....	64
7.1.10 50 metrin etäisyys.....	67
7.1.11 75 metrin etäisyys.....	70
7.2 Negatiiviset mittaustulokset.....	73
7.3 Liikkuva kohde.....	74
7.4 Maksimietäisyys	76
7.4.1 100 metriä.....	76
7.4.2 150 metriä.....	77
7.4.3 200 metriä.....	78
7.4.4 220 metriä.....	79
7.4.5 224,5 metriä.....	80
7.5 Datan vastaanottokyky	82
7.6 Tarkkuuden parantaminen	85
8 ETÄISYYDEN TARKKUUS.....	87
8.1 Suora näköyhteys.....	87
8.2 Estemittaus	90
8.3 Johtopäätökset.....	93
9 POHDINTA	96
LÄHTEET.....	98

LYHENTEET JA TERMIT

AES	Advanced Encryption Standard, 128-bittinen langattoman verkon salausmenetelmä
ACK	Acknowledgement, kuittausparametri
API	Application Programming Interface, ohjelmistorajapinta, jolla eri laitteet ja ohjelmistot voivat kommunikoida keskenään
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, tietoliikenteessä käytettävä monikäyttömenetelmä usean laitteen käyttöön, jolla vältetään yhteentörmäyksiä
FFD	Full Function Device, IEEE 802.15.4 -standardiin pohjautuvassa likiverkossa toimiva täyden toiminnan laite
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan standardeja hoitava järjestö
ISM	Industrial, Scientific and Medical, teollisuuden, tieteen ja lääketieteen lupavapaa taajuuskaista
LCD	Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö
LED	Light Emitting Diode, valodiodi
MAC	Media Access Control, OSI-mallin siirtoyhteyserros, verkon varausta ja liikennöintiä kontrolloiva järjestelmän osa
OSI	Open Systems Interconnection, OSI-mallilla kuvataan tiedonsiirtoprotokollien eri kerroksia
PAN	Personal Area Network, likiverkko

PHY	Physical Layer, OSI-mallin fyysinen kerros, kontrolloi tiedonsiirrossa hoidettavia sähköisiä ja loogisia asioita
RAM	Random Access Memory, keskusmuisti
RFD	Reduced Function Device, IEEE 802.15.4 -standardiin pohjautuvan likiverkon rajoitetun toiminnan laite
RISC	Reduced Instruction Set Computer, yksinkertainen prosessori
ROM	Read Only Memory, lukumuisti
RSSI	Received Signal Strength Indication, vastaanotetun signaalin teho
SMA	Sub Miniature version A, antenniliitin
USB	Universal Serial Bus, sarjaväylä oheislaitteiden liittämiseen tietokoneeseen
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, oheislaitteiden ja tietokoneen välille suunniteltu muunin
TOF	Time of Flight, signaalin kulku-aika
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko
WPAN	Wireless Personal Area Network, langaton likiverkko

1 JOHDANTO

Langattomien verkkotekniikoiden ja -palveluiden yleistyessä kasvavat samalla laitteistojen erilaiset tarpeet ja vaatimukset. WPAN-verkkojen (Wireless Personal Area Network) ominaisimpiin tunnusmerkkeihin kuuluvat lyhyt kantomatka, valmistettavien laitteiden pieni koko sekä tuotteiden halpa valmistus. Muita todella tärkeitä piirteitä eri verkkotekniikoita suunniteltaessa ovat tiedonsiirtonopeuden tarve sekä virrankulutus. Radiotekniikoita tutkitaan tarkemmin työn edetessä.

Työssä tutkitaan signaalin kulku-aikaan perustuvan etäisyyden mittauksen menetelmään teoreettisella tasolla ja testimittauksia suoritetaan Jennic-valmistajilta saadulla TOF-demo-ohjelmalla (Time of Flight). Työssä tutkitaan etäisyyden tarkkuutta ja mittaustulosten vaihtelevuutta paikallaan mitattavaan ja liikkuvaan kohteeseen. Järjestelmän toimintakykyä tutkitaan suoralla näköyhteydellä sekä estemittauksia suorittamalla. Työssä tutkitaan myös järjestelmän maksimietäisyyttä, datan vastaanottokykyä sekä järjestelmän epävakaisuutta. Insinööriyössä otetaan kantaa lisäksi siihen, miten etäisyysmittauksia saataisiin parannettua ja kehitettyä tarkemmiksi. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää tulevia käyttökohteita kehitettäessä.

Työssä otetaan vähäisempänä osa-alueena kantaa myös vastaanotetun signaalin tehoon perustuvaan etäisyyden mittaukseen. Menetelmää voidaan hyödyntää mahdollisesti tulevissa käyttökohteissa. Tässä työssä ei kaikkia mahdollisia mittaamenetelmiä käsitellä vaan otetaan enemmän kantaa niihin, jotka tässä työssä ovat avainasemassa.

Opinnäytetyö voidaan jakaa karkeasti kahteen osioon, teoriaosuuteen ja varsinaiseen mittausosioon. Teoriaosuudessa tutkitaan mittauksissa käytettävää järjestelmää ja radiotekniikkaa. Mittausosuudessa on havainnollisesti selitetty suoritettut mittaukset sekä raportoitu ja analysoitu saatuja tuloksia.

2 WPAN-VERKON KÄYTTÖKOHTEET

Kun langattomat WPAN-verkot yleistyvät tulevaisuudessa, saattavat ne korvata useita tekniikoita juuri yksinkertaisuutensa ja pienen kokonsa vuoksi. Vaikka WPAN-verkkojen tekninen puoli on monimutkainen ja laaja kokonaisuus, voi vähemmälläkin tietotasolla saada merkittäviä laitteistoratkaisuja toteutettua.

Erilaisten WPAN-ratkaisujen tarjonta on kehittymässä siihen suuntaan, että kehitysympäristöt tarjoavat valmiita palveluita, joiden rajapintojen tekninen osuus on valmiiksi toteutettu. Järjestelmän suunnittelun kannalta alimmat kerrokset, kuten verkon muodostus ja laitteiden liittyminen toisiinsa, ovat siis valmiiksi rakennettu. Järjestelmää suunniteltaessa ei siis tarvitse tietää kokonaisuudessaan, miten laitteet toimivat bittitasolla. Lopullinen käyttötarkoitus laitteistolle kehitetäänkin vasta sovellustasolla.

Tulevaisuudessa voidaankin tarjota valmiita tuotepaketteja, eikä asiakkaan tarvitse huolehtia muusta kuin toiminnallisuuksien kehittämisestä, kuten missä laitteita käytetään, mihin tarkoitukseen laitteita käytetään ja mitä laitteilla halutaan saada aikaan. Asiakas voi näin räätälöidä itselleen sopivimman vaihtoehdon ja keskittää järjestelmän kehittämisen käyttökohteen määrittelyyn. Asiakkaalle voitaisiin tarjota myös erilaisia sovelluksia, joten laitteistoa ja kehitysympäristöä voitaisiin käyttää monessa eri tarkoituksessa ja vaihdella näin toimintaympäristöä.

WPAN-tekniikalla toteutettuja verkkoympäristöjä ja laitteita voidaan hyödyntää lukemattomissa määrissä erilaisia sovelluksia ja ratkaisuja. Erinomaisia käyttökohteita on useita.

Kodin automaatio ja turvallisuus

Langattomalla lyhyen kantaman kotiverkolla voidaan valvoa esimerkiksi lämmitystä ja ilmastointia. Potentiaalisena käyttökohteena voisi olla myös va-

laistus, verhojen ja kaihtimien kontrollointi sekä erilaiset ovet ja lukot. Ehdottoman tärkeä käyttökohde on myös turvallisuus, murto- ja palonhavaitseminen. (1, s. 8.)

Kuluttajatuotteet

Langattomalla verkolla voidaan hallita myös kulutuselektroniikkaa. Kodin yleinen hallintakeskus ja kaukosäädin, jolla voitaisiin kontrolloida eri huoneiden viihdelaitteita, kuten televisiot ja musiikkilaitteet, olisi ehdottoman kätevä. Muita esimerkkejä ovat yleiset tietojärjestelmät, joissa kaapeliyhteys voidaan korvata langattomalla versiolla, kuten esimerkiksi hiiri ja pöytätietokone. (1, s. 8.)

Terveydenhuolto

Terveydenhuolto työllistää antureihin ja diagnostiikkaan sekä tutkimustyöhön tarkoitettuja laitteita, joiden välille langaton verkko voidaan muodostaa. Tekniikalla toteutetut laitteet ja ratkaisut voisivat soveltua henkilön terveydenhuolto-ohjelmiin sekä kuntoiluun. Järjestelmästä voitaisiin kehittää sovelluksia seurantaan sekä ihan erityistarkoituksiin tarkoitettuja lääketieteellisiä sovelluksia varten, jossa kehityssuuntaa löytyy pidemmäksi aikaa. Paikannämäärittäystä voitaisiin käyttää myös sairaalalaitteiden sijainnin määrittämiseen, sillä kaikkien sairaaloissa olevien laitteiden sijainti ei aina ole välttämättä selvillä. Paikannusta voisi hyödyntää myös ihmisten seurantaan, esimerkiksi vanhainkodeissa ja päiväkodeissa. (1, s. 8.)

Logistiikka

Ajoneuvot sisältävät useita antureita ja diagnostiikkaa vaativia laitteita. Kulusosien seuranta ja kontrollointi onnistuisivat kätevästi tekniikan avulla. Ajoneuvoissa löytyy paljon osia ja alueita, joihin ei ole mahdollista liittää kaapeleita. Tähän tarkoitukseen järjestelmä soveltuu siis erinomaisesti. Satamat ja konttiterminaalit olisivat myös oivallinen käyttökohde, sillä vuosittain logistikkassa häviää ja hukkuu satoja kontteja. (1, s. 8.)

Maatalous

Langattomalla verkolla ohjatulla seurantalaitteistolla voitaisiin optimoida maa- ja ympäristöolosuhteet maatalousympäristössä ja tällä saataisiin optimoitua tuotettavat sadot. Tällainen verkosto voisi toimia hyvin. Käyttökohteita maataloudessa löytyy varmasti paljon lisää ja WPAN-verkkojen käyttö maataloudessa tulee yleistymään tulevaisuudessa paljon. (1, s. 8.)

Muita potentiaalisia käyttökohteita

WPAN-verkkojen laitteiden pienen koon ja vähäisen virrankulutuksen vuoksi käyttökohteita voi laitteille kehittää todella paljon. WPAN-verkoilla toteutettu- ja kehitysympäristöjä voidaan käyttää lukemattomissa eri sovelluksissa ja vain mielikuvitus on rajana. Muutamia potentiaalisia käyttökohteita lisäksi edellä mainittuihin:

- ympäristön mittaukset
- robotiikka
- valvonta
- hälytystoimenpiteet
- lelut
- musiikkibisnes
- urheilubisnes.

3 JENNIC-LAITTEISTO

Insinööriyössä käytetään Jennic-valmistajan JN5148-EK010 Evaluation Kit -mallista kehitysympäristöä etäisyysmittauksien suorittamiseen. Alustalla on mahdollista rakentaa omia sovelluksia sekä ajaa valmiita demoja. Sovellukset rakennetaan Jennic Software Developer's Kit -rajapintaohjelmistolla. Ohjelmistorajapinta (API, Application Programming Interface) tarjoaa valmiit kehitystyökalut sekä kirjastot lähdekoodin ohjelmointia varten. Ohjelmistorajapinta sisältää valmiita esimerkkipohjia omien sovelluksien koostamiseen ja kehittämiseen. Rajapinta pitää sisällään työkalut lähdekoodin virheiden etsimiseen ja poistamiseen. Ohjelmiston nimi on Eclipse IDE, joka käyttää C/C++-kääntäjää lähdekoodin kääntämiseen. Rakennetut ohjelmistot voidaan siirtää laitteistolle Jennic Flash Programmer -ohjelmistolla. Jennic JN5148-EK010 -laitteisto mahdollistaa langattoman verkon sovellukset käytettäväksi IEEE 802.15.4 -standardiin, sekä ZigBee-tekniikkaan pohjautuen, joita tässä insinööriyössä käsitellään. (2)

Jennic-laitteisto sisältää seuraavanlaisia komponentteja, numerot viitaten kuvaan 1:

- ohjainyksikkö taustavalollisella LCD-näytöllä (Liquid Crystal Display) (1)
- neljä anturiyksikköä (2)
- kaksi korkeampaa virrankulutusta käyttävää vahvistinmoduulia antenniliittimen kera (3)
- kolme kappaletta antenni SMA-liittimellä (Sub Miniature version A) (4)
- kaksi kappaletta USB-UART-kaapeleita (Universal Serial Bus-Universal Asynchronous Receiver Transmitter) (5)
- paristoja yksiköitä varten (6). (3, s. 8.)



KUVA 1. Jennic-laitteisto (3)

Jennic JN5148 -mikrokontrollerin ja tuoteperheen kehityksessä on panostettu vähävirtaisiin komponentteihin ja pieneen lepovirtaan. Laitteiston kulutus on saatu erittäin alhaiseksi 32-bittisen RISC-prosessorin (Reduced Instruction Set Computer) avulla, joka käyttää salaukseen ja verkon suojaamiseen 128-bittistä AES-menetelmää (Advanced Encryption Standard). (4, s. 1.)

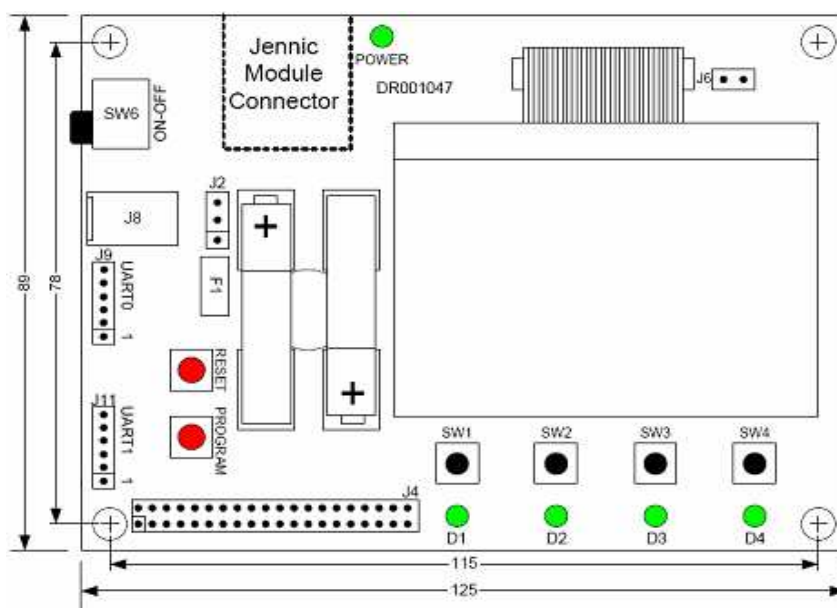
Mikrokontrolleri sisältää lähetin-vastaanotinyksikön informaation molemminpuoliseen lähettämiseen. Yksiköt sisältävät 128 kilotavua ROM-muistia (Read Only Memory) ja 128 kilotavua RAM-muistia (Random Access Memory) tiedon tallennusta, datan prosessointia sekä mittaustuloksien käsittelyä varten. Radiovastaanottimen herkkyys lähenee -95 dBm:n tasoa, joten järjestelmä pystyy tunnistamaan hyvin heikkojakin tehotasoja. Radiolohkoon on mahdollista sijoittaa vahvistinmoduuli pidemmän kantomatkan radiosovelluksia varten, jolloin käytettävä virrankulutus kasvaa. (4, s. 1.)

3.1 Ohjausyksikkö

Ohjausyksikkö on Jennic DR1047 -mallinen ja koostuu pääosin seuraavallisista komponenteista:

Ohjausyksikkö sisältää suuren 128 x 64 kuvapisteen LCD-näytön, johon voidaan ohjelmoida muun muassa tekstiä, kuvia ja taulukoita. Yksikkö sisältää neljä LEDiä (Light Emitting Diode), jotka voidaan ohjelmoida toimimaan halumallaan tavalla. Yksikkö sisältää myös neljä kappaletta painokytкимиä, joita voidaan hyödyntää toiminnallisuuksia ja ominaisuuksia kehitettäessä. Ohjausyksiköstä löytyy integroituna lämpötila-anturi, kosteusanturi sekä valomäärää mittaava anturi. Järjestelmästä löytyy lisäksi audioulostulo ja laajennettavuusportti omia ulkoisia antureita ja sovelluksia varten. (3, s. 11.)

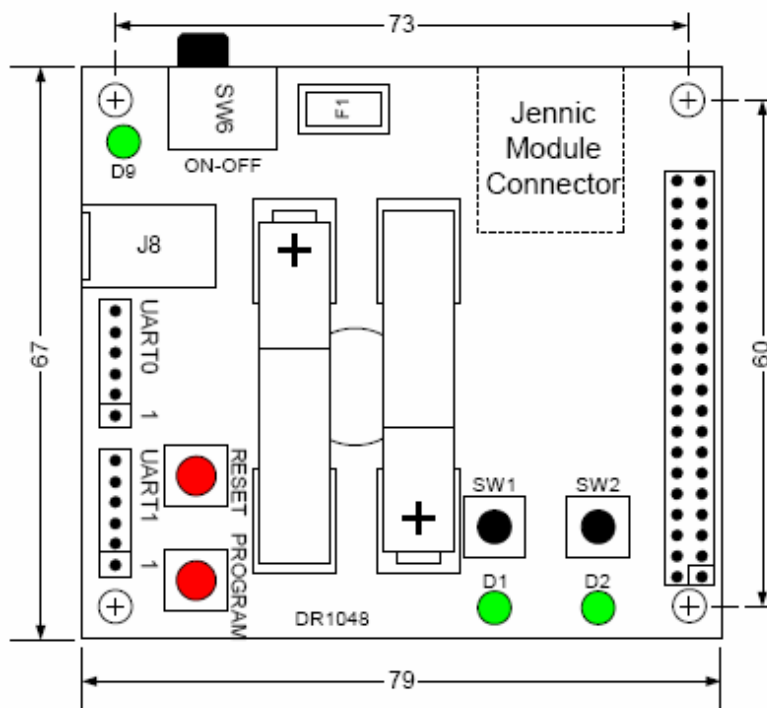
Ohjausyksikköä voidaan ohjelmoida UART-rajapinnan kautta, jolla valmiit ohjelmistot saadaan siirrettyä yksikköön. UART-rajapinnan kautta voidaan kerätä myös dataa sarjaportin kautta tietokoneelle mittaustuloksien tallennusta ja tarkkailua varten. Ohjausyksikkö toimii yleensä verkon täyden toiminnan laitteena tai ZigBee-verkossa koordinaattorina (Co-ordinator), riippuen käytettävästä tekniikasta. Kuvassa 2 on esitetty ohjausyksikön osasijoittelukuva. (3, s. 11.)



KUVA 2. Ohjausyksikkö (3)

3.2 Anturiyksikkö

Neljä anturiyksikköä ovat fyysisesti identtisiä ja jokaiseen yksikköön on esi-
asennettu Jennic JN5148 -mikrokontrolleri ohjelmistoa varten. Anturiyksikön
radiolohko tarjoaa ohjausyksikön tapaan mahdollisuuden käyttää korkeam-
paa virrankulutusta käyttävää vahvistinmoduulia pidemmille kantomatkoille.
Yksikkö sisältää kaksi LEDiä sekä kaksi painokytkintä. Anturiyksikkö sisältää
ohjausyksikön tapaan lämpötila-anturin, kosteusanturin sekä valomäärää
mittaavan anturin. Anturiyksikkö sisältää myös UART-rajapinnan sekä laa-
jennettavuusportit omia sovelluksia ja antureita varten. Anturiyksikkö toimii
yleensä verkon rajoitetun toiminnan laitteena tai ZigBee-verkossa päätelait-
teena (End Device), riippuen käytettävästä tekniikasta. Kuvassa 3 on esitetty
anturiyksikön osasijoittelukuva. (3, s. 10.)



KUVA 3. Anturiyksikkö (3)

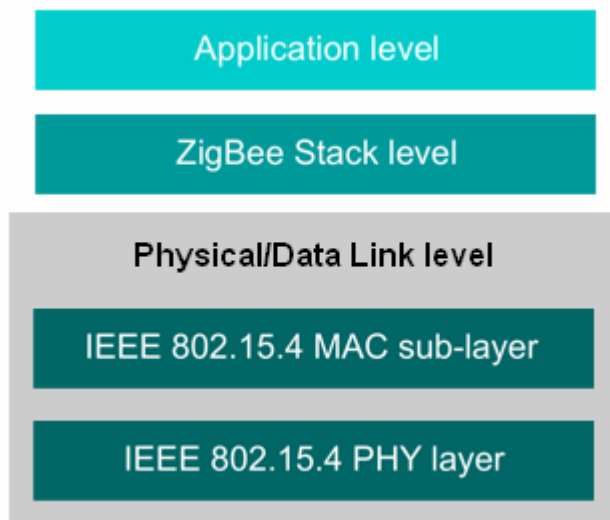
4 WPAN-STANDARDI

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.15.4-standardissa määritellään lyhyen kantaman langaton likiverkko eli WPAN. Keskeinen piirre standardin vaatimukselle oli verkossa toimivien laitteiden erittäin alhainen virrankulutus. Pieni lähetysteho on siis laitteille hyvin ominaista. Koska laitteet toimivat pienellä teholla, niiden kantomatka ei ole myöskään kovin suuri. Motivaatio tähän tiukkaan tehontarpeeseen on se, että mahdollistetaan verkkolaitteiden akkukäyttöisyys, jonka avulla laitteet voidaan asentaa ilman verkko- ja virtakaapeleita. Laitteiden langattomuus toimii edukseen tiloissa, joissa kaapeleita on vaikeaa tai jopa mahdotonta asentaa. Yksi tekniikan tärkeimmistä kulmakivistä on lisäksi laitteiden edullinen valmistus. (1, s. 7.)

WPAN-standardi optimoitiin laitemääräisesti suurille ja virrankulutuksellisesti pienille verkoille. WPAN-standardin tarpeisiin kuuluu lisäksi laitteiden pieni koko ja yksinkertaisuus. Vaativampia tarpeita varten on kehitetty omat järjestelmänsä. Sovellukset, jotka lähettävät dataa suhteellisen harvoin ja pienillä nopeuksilla, ovat verkkojärjestelmässä elementissään. (1, s. 7.)

Standardiin pohjautuvat laitteet kommunikoivat 2,4 GHz:n lupavapaalla ISM-radiotaajuudella (Industrial, Scientific and Medical) joka on yleisesti käytössä myös muun muassa WLAN- (Wireless Local Area Network) ja Bluetooth-tekniikassa. Lisäksi ZigBee-tekniikka on rakennettu täysin tämän standardin pohjalle.

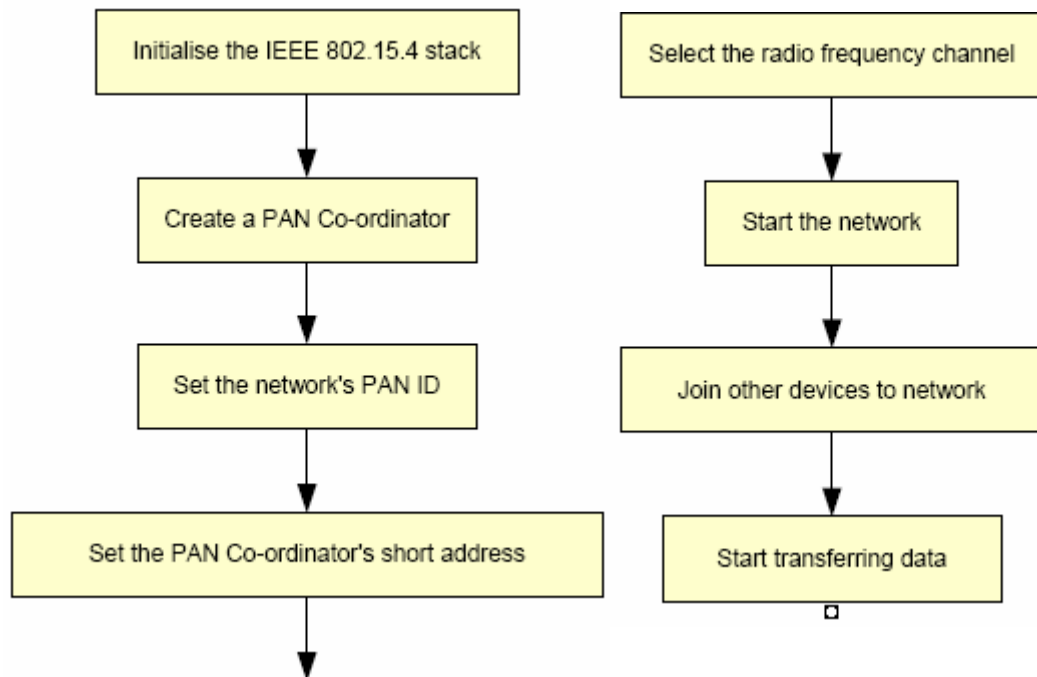
Tekniikka on standardipohjainen eli eri valmistajien välillä on mahdollista toteuttaa ja sovittaa laitteistoratkaisuja yhteen. Standardissa on tarkkaan määriteltä ainoastaan alimmat OSI-mallissa (Open Systems Interconnection) olevat kerrokset eli fyysinen kerros (PHY, Physical Layer) ja siirtoyhteyserros (MAC, Media Access Control), jonka kuva 4 osoittaa. (5)



KUVA 4. IEEE 802.15.4 -standardin ja ZigBee-kerroksen määrittely (5)

4.1 Toimintaperiaate

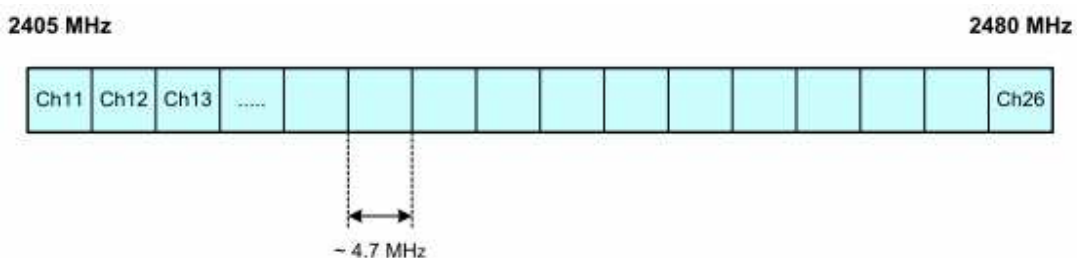
Kun aktiivisesti toimiva radioverkko käynnistetään, aloitetaan verkon muodostaminen tiettyjen normien mukaisesti. Verkon aloituksessa käydään läpi useita vaiheita, jonka jälkeen verkko on valmis käytettäväksi ja dataa voidaan lähettää. Ensimmäisenä vaiheena on fyysisen kerroksen ja siirtoyhteyskerroksen määrittäminen ja alustus. Tämän jälkeen luodaan verkkoympäristölle PAN-koordinaattori (Personal Area Network), joka toimii verkon isäntälaitteena. Tämän jälkeen määritetään koordinaattorille tunnus ja osoite. Seuraavana vaiheena on sopivan radiokanavan valinta sekä verkon alustus ja käynnistys. Tämän jälkeen verkkoympäristö on valmis käytettäväksi ja muut laitteet voivat liittyä verkkoon ja lähettää dataa. Kuvassa 5 esitetään verkon muodostamisen vaiheet lohkokatasolla. (6, s. 11.)



KUVA 5. Verkon muodostus (6)

4.2 Radiotaajuus

Jennic JN5148-EK010 Evaluation kit -ympäristö kommunikoi 2,4 GHz:n radiotaajuudella ja tekniikalla mahdollistetaan 250 kbit/s:n tiedonsiirtonopeus. Tämä on IEEE 802.15.4 -standardin ja ZigBee-tekniikan yleisesti käyttämä langattomien verkkojen radiotaajuus ja on vapaasti käytettävissä lisensoimattomassa käytössä maanpäällisillä alueilla. Tekniikka levittää taajuuskais-tan 2405–2480 MHz:n alueelle ja jakaa sen 16 eri kanavaan, numeroinnit 11–26. Verkkoympäristön ollessa aktiivinen voidaan kanavan käyttö valita manuaalisesti käytettävässä sovelluksessa. Verkon voidaan myös antaa etsiä parasta eli vähimmällä rasituksella olevaa kanavaa käytettäväksi. Kuvassa 6 on esitetty kanavajaottelu. (3, s. 13.)



KUVA 6. Kanavajaottelu (3)

4.3 Aktiiviset laitteet

IEEE 802.15.4 -standardiin pohjautuvassa verkossa tarvitaan kahdentyyppisiä laitteita aktiivisen verkon muodostamiseen. Molemmilla laitetyypeillä on omat toimintatapansa ja käyttötarkoituksensa.

Täyden toiminnan laite (FFD, Full Function Device) on laite, joka tarjoaa täydet asetukset verkon muodostamiselle sekä sen ylläpitämiselle. Täyden toiminnan laitteet tarjoavat siis täyden tuen standardin määrittelemille ominaisuuksille ja toiminnoille. Täyden toiminnan laite sisältää kaikki tarvittavat palvelut, jotta se voi toimia verkon isäntälaitteena. Jokaisessa aktiivisesti muodostetussa verkossa on oltava vähintään yksi täyden toiminnan laite. Täyden toiminnan laite toimii ZigBee-verkossa koordinaattorina. (1, s. 15.)

Rajoitetun toiminnan laite (Reduced Function Device) on laite, joka tarjoaa suppeammat verkon palvelut, joilla rajoitetaan prosessointi- ja muistiresursseja. Rajoitetun toiminnan laitteessa ei ole määritelty tarkkaan kuin standardin pakolliset osat ja niiden tukeminen. Jokaisessa aktiivisesti muodostetussa verkossa on yleensä vähintään yksi rajoitetun toiminnan laite. Rajoitetun toiminnan laite ei voi toimia ZigBee-verkossa koordinaattorina vaan toimii päätelaitteena. (1, s. 15.)

5 ZIGBEE

IEEE 802.15.4 -standardista eteenpäin viety tekniikka on ZigBee. ZigBee-standardissa on kehitetty OSI-mallissa valmiiksi kokonaisuudeksi verkkoyhteyskerros ja kuljetuskerros, joka osoitetaan kuvassa 4. Ylemmät kerrokset ovat sovellustason tehtäviä, jotka ovat kolmansien osapuolien kehitettävissä.

ZigBee-allianssi on kehitysympäristö ja yhteisö, joka on vastuussa ZigBee-standardista ja sen kehittämisestä. Allianssin tehtäviin IEEE 802.15.4 -standardiin pohjautuvien toteutuksien testaus ja kehitys. Allianssiin kuuluu useita isoja kansainvälisiä yrityksiä, kuten Philips, Hewlett Packard ja Intel. Allianssiin liittyminen oikeuttaa standardin käyttämisen kaupallisissa tarkoituksissa. (7.)

ZigBeen perusominaisuuksiin kuuluu aktiivisten laitteiden erittäin nopea toimintakuntoon herääminen. Nukkuva laite herää verkkoon takaisin 15 millisekunnissa. Mikäli verkossa toimiva aktiivinen laite putoaa pois ja katkaisee yhteyden, laitteen uudelleen liittyminen verkkoon sekä uudelleenreititys kestää noin 30 millisekuntia. (8.)

IEEE 802.15.4 -standardipohjaisessa ZigBee-verkossa käytettäviä taajuusalueita on kolme kappaletta. 868 MHz toimii lisenssivapaasti Euroopassa ja sillä on käytettävissään yksi radiokanava. 915 MHz toimii lisenssivapaasti USA:ssa ja sillä on käytettävissään 10 radiokanavaa. Yleisin ja maailmanlaajuinen käytettävä radiokanava on 2,4 GHz ja sillä on käytettävissään 16 radiokanavaa. Tiedonsiirtonopeudet eri taajuusalueille ovat vastaavasti 20, 40 ja 250 kbit/s. (8.)

Tekniikalla mahdollistetaan laitemääräisesti suuret verkot, aktiiviseen verkkoon mahtuu yli 64 000 laitetta. Verkkojen koko ja suunnittelu riippuu siitä, mitä taajuusaluetta verkko käyttää ja kuinka usein laitteiden tarvitsee kommunikoida toistensa kanssa. Verkon suunnittelun kannalta merkittävä asia

on myös se, kuinka paljon datapakettien hukkumisia tai uudelleenlähettämistä sallitaan käytettävässä sovelluksessa. (8.)

ZigBee-pohjaisen verkon häiriön sietokykyä on parannettu käyttämällä CSMA-CA -protokollaa (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), joka vähentää muiden verkon käyttäjien kanssa kommunikoitaessa tapahtuvaa häiriötä ja estää päällekkäisen datan lähetyksen. Muita ominaisuuksia ovat lisäksi kuittauspakettien käyttö, vapaana olevan radiokanavan valitseminen ja radioyhteyden laadunvalvonnan todentaminen. (8.)

5.1 ZigBee-laitetyypit

ZigBee-verkko sisältää kolmentyyppisiä laitteita. Laitetyypit, joita tässä luvussa käsitellään, ovat virallisesti määritelty ZigBee-standardissa. Läpi käytävät laityypit eivät ole virallisesti määritelty WPAN-standardissa, mutta ovat alalla kuitenkin yleisesti käytössä.

Koordinaattori

Verkossa voi olla vain yksi PAN-koordinaattori, jota voidaan kutsua arkikielillä verkon isäntälaitteeksi. Koordinaattorin rooliin kuuluu oman yksityiskohtaisen tunnuksen määrittäminen verkolle, jota kutsutaan PAN ID:ksi. Koordinaattori etsii sopivan radiotaajuuden sekä kanavan verkon muodostamista varten. Koordinaattorin tehtäviin kuuluu lisäksi oman osoitteen määrittäminen muiden laitteiden kanssa kommunikointia varten. Se käsittelee pyynnöt muiden laitteiden verkkoon liittymisestä ja välittää viestejä solmupisteestä toiseen päätelaitteiden välillä. Koordinaattori on yleensä verkon kallein tuotettava komponentti. (1, s. 15.)

Reititin

Reitittimen tehtäviin kuuluu käsittely- ja kuittauspyynnöt muiden laitteiden liittymisestä verkkoon ja viestien välitys yhdestä solmusta toiseen. Reitittimiä (Router) kutsutaan toiselta nimeltään myös paikallisiksi koordinaattoreiksi.

Puutopologian mukaisessa verkossa jokainen paikallinen koordinaattori palvelee omaa laitettaan tai laiteryhmäänsä. Verkkotopologioita käsitellään kappaleessa 5.2. ZigBee-verkko voi sisältää useita reitittämiä. (1, s. 15.)

Päätelaite

Päätelaite on ZigBee-verkon solmupiste, jolla on mahdollisuus lähettää sekä vastaanottaa informaatiota, muttei se osallistu datapakettien reititykseen. Päätelaite voi olla suuren osan ajastaan virransäästötilassa, eli unutilassa, riippuen aktiivisuudesta ja verkon sovelluksesta. ZigBee-verkko voi sisältää useita päätelaitteita. Päätelaite on yleensä verkon halvin tuotettava komponentti. (1, s. 15.)

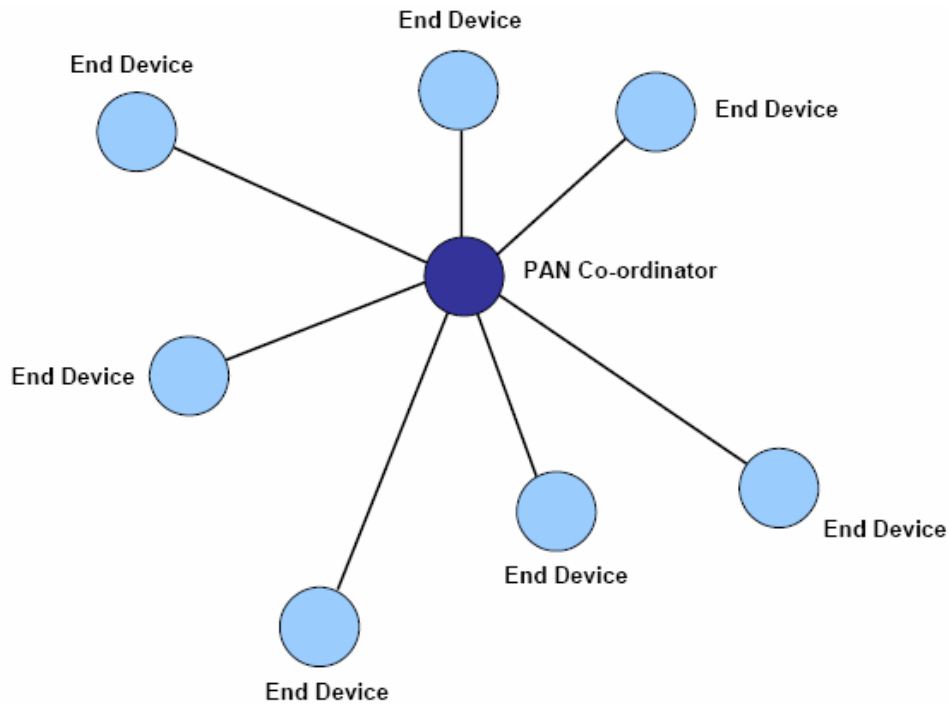
5.2 Verkkotopologiat

Verkkotopologiat, joita tässä kappaleessa käsitellään eivät kuulu suoranaisesti WPAN-standardiin. Verkkotopologiat ovat siis vain esimerkkeinä mahdollisuuksista, miten verkkojärjestelmä voidaan toteuttaa WPAN-standardiin pohjautuvaan verkkoon.

ZigBee-tekniikassa alla olevat verkkotopologiat ovat yleisesti käytössä. Koska opinnäytetyö käsittelee sekä WPAN-standardia että ZigBee-tekniikkaa, on suotavaa käydä läpi kyseiset verkkotopologiat. Mainittakoon, että WPAN-verkko voidaan näiden topologioiden mukaan kuitenkin toteuttaa.

5.2.1 Tähtiverkko

Perustyyppi verkon topologiasta on tähtiverkko (Star Topology). Tähtiverkko koostuu keskusyksiköstä eli koordinaattorista, jota ympäröivät muut solmut verkossa, joita kutsutaan päätelaitteiksi. Jokainen näistä päätelaitteista voi kommunikoida vain koordinaattorin kautta. Jos päätelaite lähettää viestin toiselle päätelaitteelle, viesti on lähetettävä koordinaattorin kautta, joka välittää viestin eteenpäin perille toiseen päätelaitteeseen. Tähtiverkon topologia on esitetty kuvassa 7. (1, s. 12.)



KUVA 7. Tähtitopologia (1)

Paikannusjärjestelmää toteutettaessa verkkotopologiana voisi toimia tähti-verkko, mikäli seurattavia kohteita on yksi kappale. Päätelaitteet mittaavat koordinaattoriin nähden etäisyydet ja laskevat niiden avulla koordinaattorille keskimääräisen paikkaestimaatin. Laiteparit voidaan tietysti vaihtaa myös niin päin, että keskimääräinen paikkaestimaatti laskettaisiin päätelaitteesta.

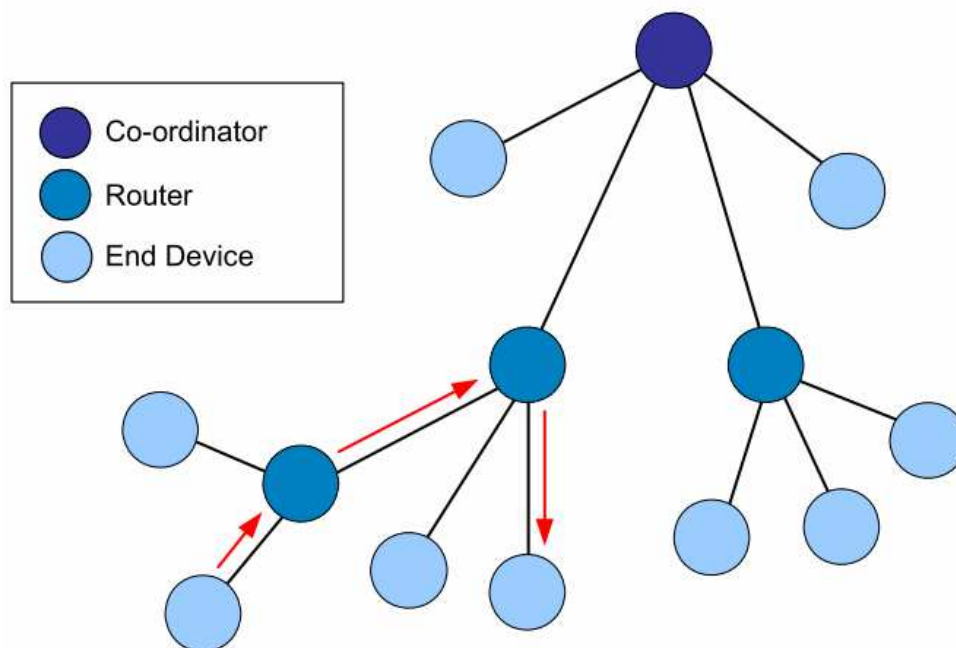
Ikävänä puolena tähtitopologiassa on se, ettei laitteilla ole vaihtoehtoisia reittejä datan reititykseen. Jos radioyhteys katoaa koordinaattorin ja päätelaitteen välillä, on yhteys muodostettava uudestaan. Jos järjestelmä on heikosti suunniteltu, koordinaattori voi toimia ”pullonkaulana” ja aiheuttaa ruuhkia ja epätoivottuja ilmiöitä järjestelmässä. Seurauksena voi syntyä muun muassa yhteyden katkeilua ja järjestelmän epävakaisuutta. (1, s. 12.)

5.2.2 Puuverkko

Puuverkon (Tree Topology) rakenne koostuu ja pohjautuu isäntälaitteen ja päätelaitteen väliseen suhteeseen. Jokaisella päätelaitteella, paitsi koordinaattorilla on oma isäntänsä. Myös koordinaattorilla voi olla yksi tai use-

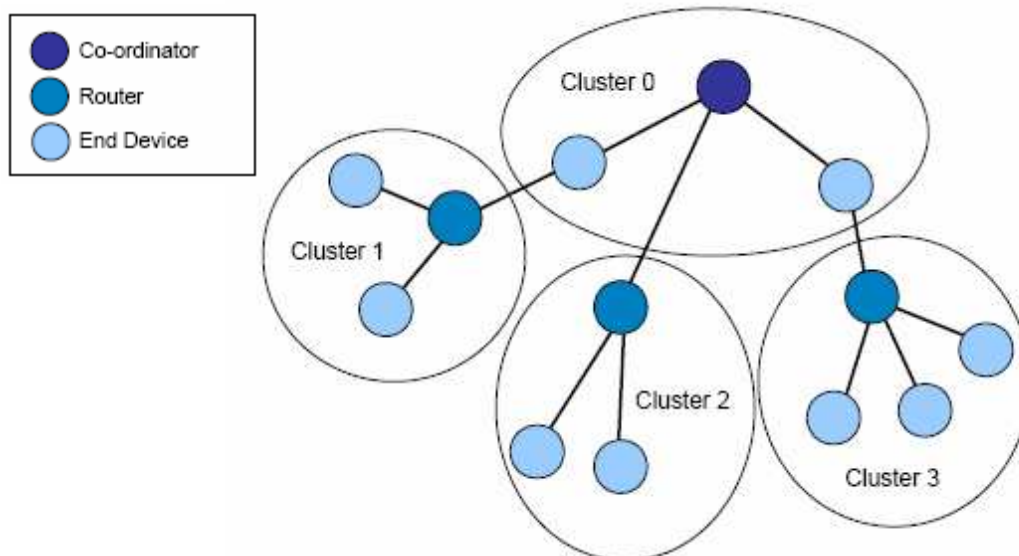
ampi päätelaite. Jokainen päätelaite voi kommunikoida vain isäntälaitteensa kanssa. (3, s. 16.)

Reititin kuljettaa viestejä solmupisteistä toisiin, "oksien" välillä. Puuverkko soveltuu tapauksiin, jossa verkkoliikennettä eri laitteiden ja solmupisteiden välillä on paljon. Mikäli jokin reitittimistä kadottaa yhteyden, putoaa koko "oksa" verkosta pois, eikä verkko osaa korjata itseään. Puuverkon topologia on esitetty kuvassa 8. (3, s. 16.)



KUVA 8. Puutopologia (3)

Erytistapaus puutopologiasta on cluster tree -topologia, jossa isäntä-päätelaite -yhdistelmä on koottu yhdeksi ryhmäksi. Jokaisella ryhmällä on oma yksilökohtainen tunnuksensa verkossa kommunikointia varten. Kuva 9 kuvaa cluster tree -topologiaa. (1, s. 14.)

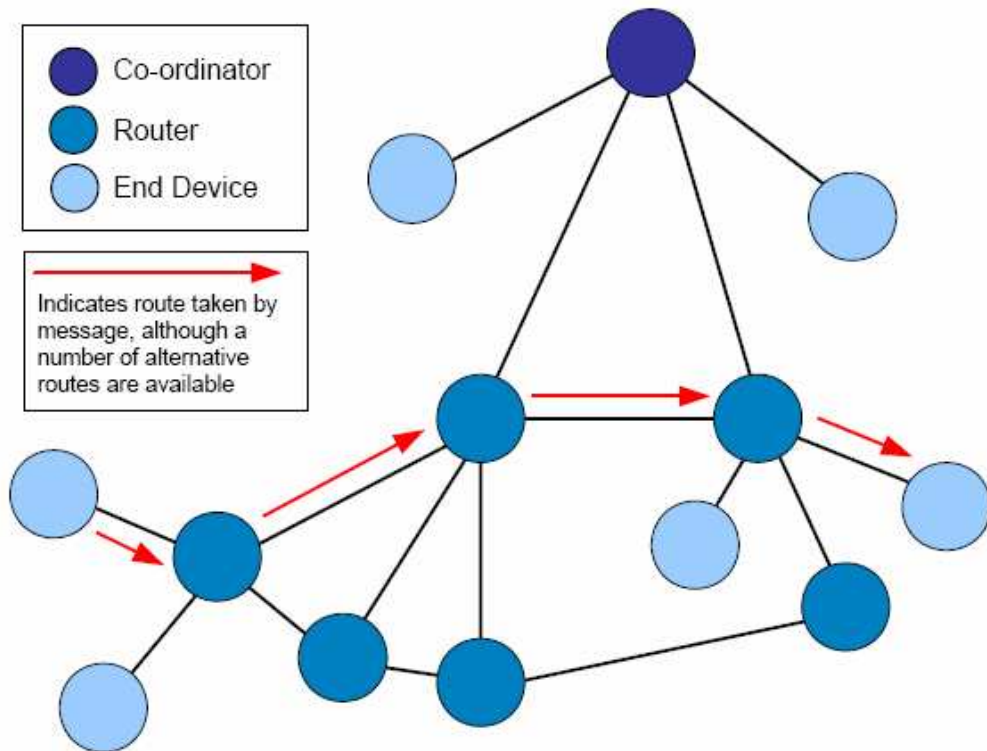


KUVA 9. Cluster tree -topologia (1)

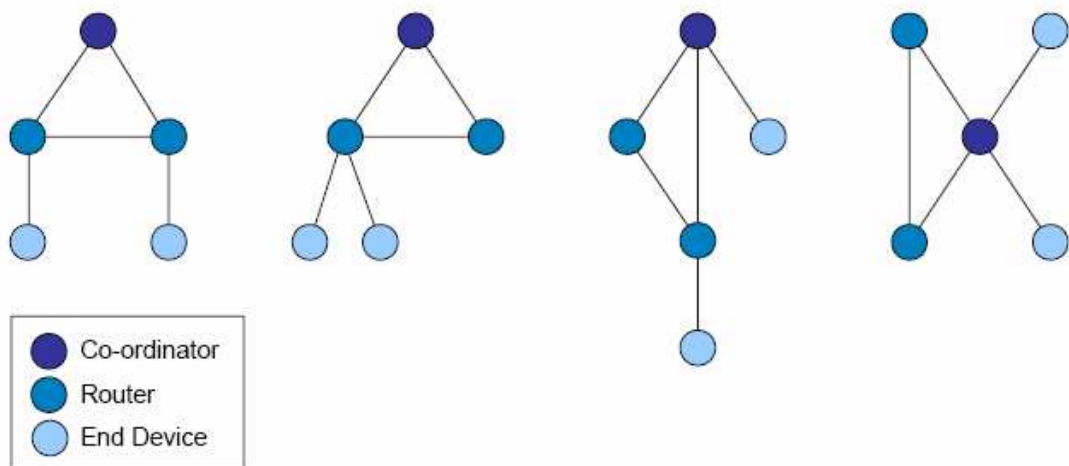
5.2.3 Mesh-verkko

Mesh-verkon topologiassa, kaikki laitteet voivat olla identtisiä, lukuun ottamatta koordinaattoria. Kaikki reitittimet voivat kommunikoida suoraan toisensa kanssa verkon kuuluvuusalueella. Jos joku solmupiste on kantaman ulkopuolella, voidaan viesti reitittää toisia laitteita pitkin kohteeseensa. Mesh-verkko soveltuu parhaiten tilanteeseen, jossa ympäristö on vaihteleva ja dataa liikkuu verkossa paljon. (3, s. 17.)

Mesh-verkko on kehittyneempi versio puuverkosta sen vuoksi, koska verkko osaa korjata itsensä. Mikäli joku osa verkon komponenteista katkaisee yhteyden ja putoaa ulos verkosta, osaa verkko korjata virheen ja määrittää vaihtoehtoisen reitin datan välitykseen. Kuva 10 esittää mesh-topologiaa. Kuva 11 esittää Jennic-kehitysympäristöllä toteutettuja mesh-verkkoja. (3, s. 17.)



KUVA 10. Mesh-topologia (3)



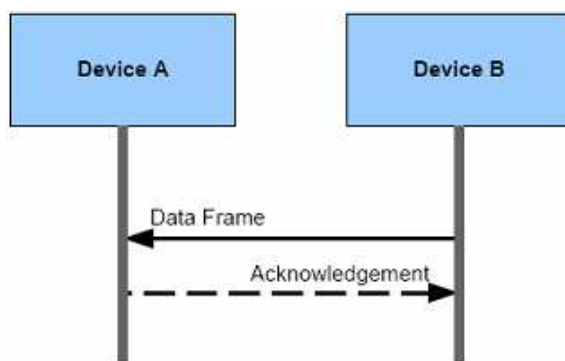
KUVA 11. Jennic-kehitysympäristöllä toteutettuja mesh-verkkoja (3)

5.3 Lähetysmuodot

Aktiivisesti toimivan verkon käyttö edellyttää sitä, että verkolle on määritetty oma koordinaattorinsa ja päätelaitteensa. Verkossa on kaksi tapaa, joilla tietoa voidaan siirtää eri laitteiden välillä.

5.3.1 Suora lähetys

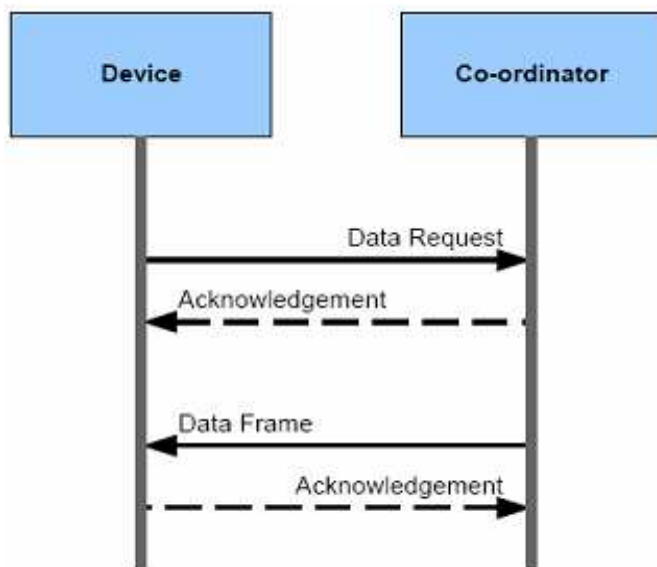
Koordinaattori voi lähettää datakehysten suoraan verkossa olevaan päätelaitteeseen ilman suurempia toimenpiteitä. Kun tarvittava data on saatu siirrettyä, päätelaite lähettää kiituskäskyn datan vastaanottamisesta koordinaattorille. Jotta tämä voi tapahtua, pitää päätelaitteen olla aktiivisessa tilassa ja kykenevä vastaanottamaan tietoa. Suora lähetystapa on yleisesti käytettävä lähetystapa koordinaattorin ja päätelaitteen välillä. Kuvassa 12 esitetään suora lähetystapa. (6, s. 14.)



KUVA 12. Suora lähetys (6)

5.3.2 Epäsuora lähetys

Epäsuorassa lähetyksessä koordinaattori pitää dataa hallussaan niin kauan, kunnes päätelaite lähettää pyynnön koordinaattorilta datan lähettämiseksi. Tämän jälkeen koordinaattori vastaa päätelaitteelle oikeaan osoitteeseen kiituskäskyn, jonka jälkeen dataa voidaan siirtää. Päätelaite vastaanottaa paketit ja lähettää seuraavaksi kiituskäskyn koordinaattorille. Epäsuora lähetystapa on kätevä esimerkiksi silloin, kun päätelaitteen ei tarvitse olla kokoajan aktiivisessa tilassa, vaan on virransäästötilassa suurimman osan ajasta. Vastaavassa tapauksessa päätelaite lähettäisi pyynnön koordinaattorille lepotilaan siirtymisestä. Kuvassa 13 esitetään epäsuora lähetystapa. (6, s. 14.)



KUVA 13. Epäsuora lähetys (6)

6 MITTAUSTEKNIIKAT

Etäisyyden pystyy mittaamaan usealla eri tavalla, mutta tämä insinööriö käsittelee pääosin signaalin kulku-aikaan sekä vastaanotetun signaalin tehoon perustuvia menetelmiä. Hyvin useat paikannusjärjestelmät pohjautuvat näihin kahteen menetelmään.

Paikannusjärjestelmää toteutettaessa paikanmäärityksen peruslähtökohta on se, että verkossa on useampia solmuja vertailukohteina, joiden sijainti on tiedossa. Oman paikannustietonsa määrittävä solmu laskee vertailusolmuista lähetettävien signaalien kulkuajat tai signaalien voimakkuudet ja laskee tämän avulla oman paikkasijaintinsa. Vertailukohteita eli solmuja tarvitaan vähintään kolme kappaletta, jotta paikkaestimaatti voidaan laskea. Jos vertailukohteita on useampi, parantaa se mittaustulosten tarkkuutta.

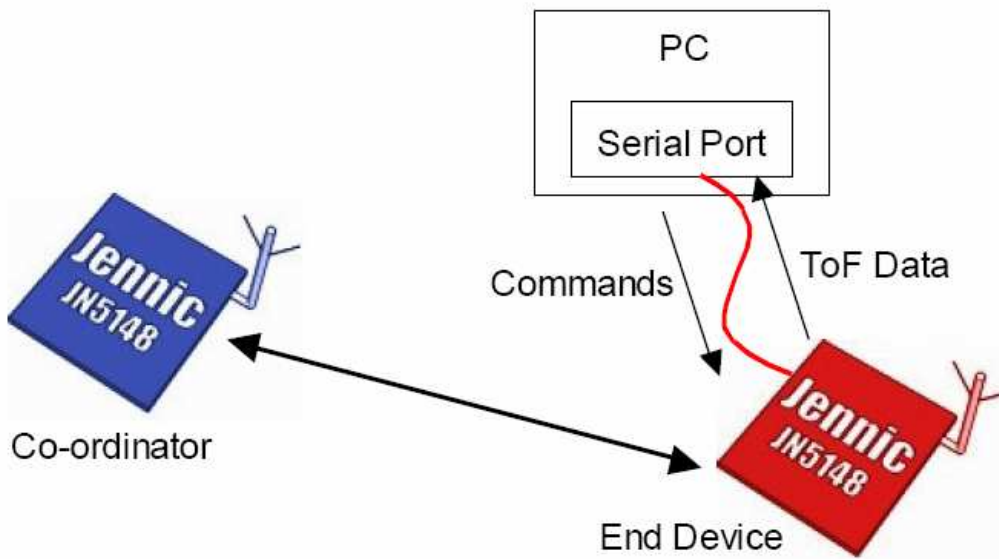
6.1 Signaalin kulku-aikaan perustuva mittaus

Signaalin kulku-aikaan perustuvat etäisyysmittaukset suoritetaan TOF Developer Pack -ohjelmistolla, joka on Jennic-valmistajilta ja kehittäjiltä saatu valmis tiedostopaketti. Paketti sisältää tarvittavat komponentit ja tiedostot ohjelmiston kääntämiseen binäärimuotoon laitteita varten.

Jennic-laitteistolla toteutettu signaalin kulku-aikaan perustuva mittaus pohjautuu siihen, että yksi laite toimii verkon koordinaattorina ja toinen päätelaitteena. Verkon koordinaattori muodostaa pienikokoisen verkon itsensä ja päätelaitteen välille, joiden välillä signaalin kulku-aikaa mitataan. Päätelaite on kiinnitetty USB-UART-liittimellä tietokoneeseen, joka kerää dataa päätelaitteelta. Dataa voidaan myöhemmin käsitellä ja muokata tarpeisiin sopivaksi. (9, s. 1.)

Dataa voidaan kerätä millä tahansa sarjaporttia kuuntelevalla ohjelmalla. Työssä käytettiin datan keräykseen Hyper Terminal -ohjelmistoa, RealTerm-

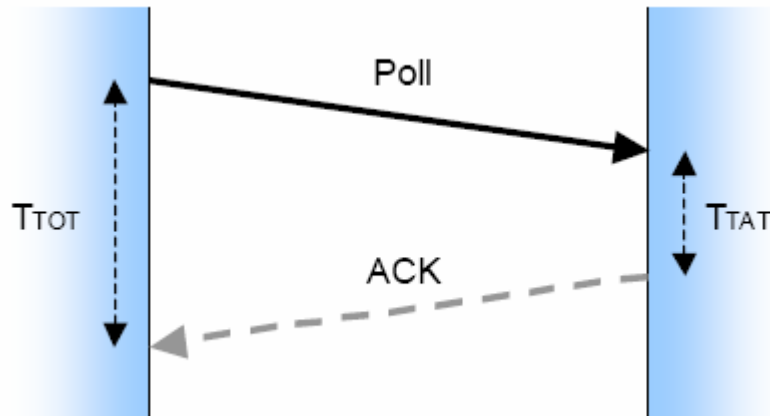
ohjelmistoa sekä MYSQL-tietokantaohjelmiston kautta dataa keräävää menetelmää. Kuvassa 14 esitetään järjestelmän kuvaus.



KUVA 14. Järjestelmän kuvaus (9)

6.1.1 Mittausmekanismi

Jennic JN5148-EK010 -järjestelmä sisältää tarvittavat toiminnallisuudet radiolohkossa sekä mikrokontrollerissa, jotta signaalin kulkuaikaan perustuva mittaus voidaan toteuttaa. TOF-mekanismi käyttää 2,45 GHz:n taajuutta radiosignaalin matkustamiseen kahden laitteen välillä. Datapakettien lähetysmoodina toimii suora menetelmä. Mitattaessa signaalin kulkuaikaa kahden solmupisteen välillä, on mahdollista laskea etäisyys kahden näiden pisteen välissä. Päälaite lähettää aluksi kyselyn (Poll) koordinaattorille eli kohteeseen. Koordinaattori vastaa kiituskäskyllä (ACK, Acknowledgement), kun datapaketti on saapunut perille. Kuvassa 15 esitetään mittausmekanismin toimintaperiaate. (10, s. 7.)



KUVA 15. Time of Flight -tiedustelu ja kuittaus (10)

Kun vastaanotin on käsitellyt komennon, valmistautuu se kuittaamaan takaisin lähettäjälle. Koordinaattori ei pysty lähettämään kuittausta reaaliaikaisesti vaan kyselyn prosessointi kestää oman aikansa. Tätä parametria kutsutaan nimellä T_{TAT} (Turnaround Time). Kun radiosignaali ”käynyt kääntymässä” vastaanottimessa, lähetetään kuittauskäsky takaisin. Järjestelmä tallentaa signaalin kulkuajat pikosekunneina. Signaalin kulku-aika saadaan laskettua kaavan 1 avulla, jossa T_{TOF} kuvaa signaalin kulku-aikaa, T_{TOT} kokonaisaikaa ja T_{TAT} kuvaa käsittelyaikaa. (10, s. 7.)

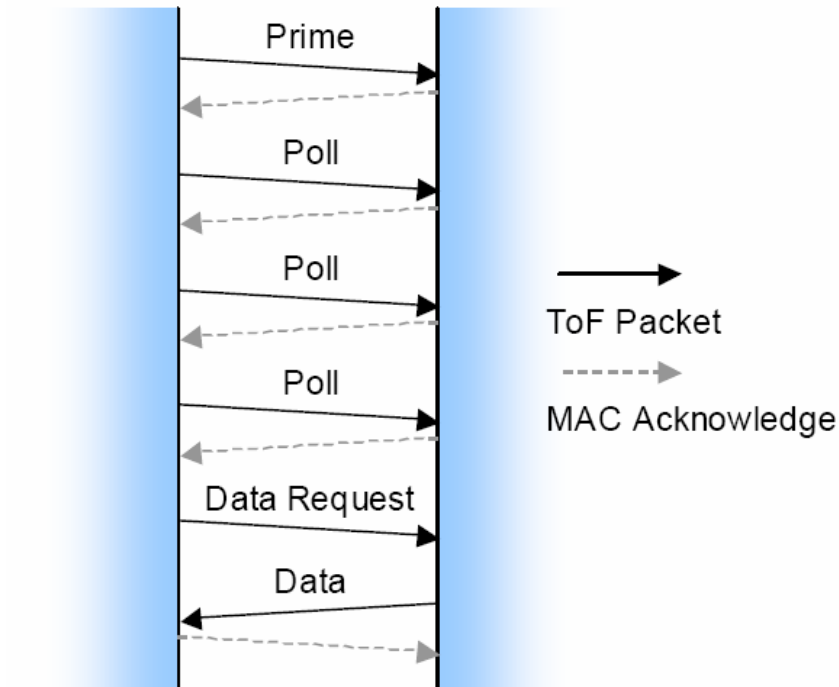
$$T_{TOF} = \left(\frac{T_{TOT} - T_{TAT}}{2} \right)$$

KAAVA 1

6.1.2 Datan siirto

Ensimmäisenä vaiheena datan siirrossa lähetetään kysely vastaanottimelle aikaleimalla varustettuna. Seuraavaksi vastaanotin kuittaa kyselyn ja lähettää signaalin saapumisajan aikaleiman lähettäjälle. Järjestelmä prosessoi yhden kysely-kuittausparin noin 4 millisekunnissa. Siirtotien avaus, datan lähetysoynty sekä datan keräys lisää viivettä noin 6 millisekuntia järjestelmään. Järjestelmän mittaustulokset lähetetään viimeisessä datapaketissa, joka voi sisältää maksimissaan 11 signaalin kulku-aikamittausta. Mikäli halu-

taan lähettää useampia kysely-kuittauspareja, joudutaan lähettämään useampia datapaketteja. Mittausalgoritmia kehitettäessä voidaan valita, kuinka paljon mittauksia halutaan suorittaa. Kuva 16 kuvaa datan siirtoa. (10, s. 8.)



KUVA 16. Datan siirto (10)

Yhteen datapakettiin mahtuu siis 11 signaalin kulkuajamittaus, joka kestää ajallisesti 50 millisekuntia. Näin ollen, sekunnissa on mahdollista siirtää teoriassa ihanneolosuhteissa 20 datapakettia, jotka sisältävät 220 mittausa.

TAULUKKO 1. Kysely-kuittausparien määrä ja aika

Poll-ACK -pareja	Paketteja	Aika[ms]
1	1	10
5	1	26
10	1	46
11	1	50
22	2	100
33	3	150
44	4	200
55	5	250
110	10	500
220	20	1000

Osa mittauksista suoritettiin MySQL-tietokantaohjelmiston kautta, jolloin datan keräys oli suhteessa hitaampaa verrattuna suoraan sarjaporttia kuunte-

lemaan RealTerm-ohjelmistoon. Tietokannan kautta kerättävässä menetelmässä järjestelmä kykeni mittaamaan noin 1500 mittausta minuutissa. Mittaukset eivät sisältäneet kuitenkaan kaikkia etäisyystuloksia, vaan niistä oli karsittu negatiiviset tulokset pois.

RealTerm-ohjelmistolla dataa kerätessä mittausohjelmisto kuuntelee suoraan sarjaporttia, eikä ylimääräisiä välietappeja datan keräyksessä tullut. Datan keräys oli näin huomattavasti nopeampaa. Mittauksia suoritettaessa käytettävää datankeräysohjelmistoa vaihdeltiin koulun ohjelmistokehittäjien tehdessä erilaisia ratkaisuja.

6.1.3 Järjestelmän virheet

Pienillä etäisyyksillä signaalin kulkuaikaa mitattaessa järjestelmän kellojen tarkkuus ei pysy perässä ja etäisyystuloksista voi tulla hyvin vaihtelevia. Etäisyystulokset voivat saada myös negatiivisen arvon kellovirheistä johtuen. (10, s. 12.)

Mittauksia suoritettaessa järjestelmä saattaa altistua kellovirheille kyselyjen ja kuittausten välillä. Ongelman ratkaisemiseksi järjestelmä tarjoaa mahdollisuuden suorittaa mittaukset käänteisessä järjestyksessä, jolloin kyselyn lähettää koordinaattori ja kuittauksen paikallinen päätelaite. Lähettämällä mittauksia tasainen määrä kummastakin päästä, saadaan tuloksia tasapainotettua ja suljettua mahdolliset virheet pois. (10, s. 7.)

Radiosignaali etenee ihanteellisissa olosuhteissa suorinta reittiä lähettimestä vastaanottimeen. Tämä ei kuitenkaan ole realistinen tilanne, vaan radiosignaali heijastuu objekteista ja esteistä. Jos vaihtoehtoisia reittejä tulee useita linnuntien sijaan, voi mittaustulosten tarkkuus heikentyä paljon myös tämän vuoksi. Pienet muutokset solmupisteiden sijainnissa tai asennoissa vaikuttavat mittaustuloksiin, joten mittaustuloksia pitää ottaa runsaasti. Olosuhteet vaikuttavat lisäksi hyvin voimakkaasti radiosignaalien etenemiseen. Yleisesti vastaanotettu radiosignaali on summa suoraan kulkeneen ja heijastuneiden signaalien välillä. (10, s. 12.)

Ulkopuoliset häiriöt vaikuttavat lisäksi etäisyysmittauksiin tarkkuutta heikentävästi. Häiriöiden sietokykyä ei tässä opinnäytetyössä tutkita, mutta otetaan kantaa kuitenkin siihen, että ne voivat etäisyyden tarkkuutta heikentää.

6.1.4 Etäisyyden laskeminen

Radiosignaali etenee valon nopeudella (299 792 458 m/s), joten etäisyys on suoraan verrannollinen mitattavaan signaalin kulkuaikaan. Mitattava radiosignaalin kulkuaika saadaan muutettua suoraan metreiksi kaavan 2 avulla, jossa d kuvaa etäisyyttä, T_{TOT} kokonaisaikaa, c valonnopeutta ja T_{TAT} kuvaa käsittelyaikaa. (10, s. 12.)

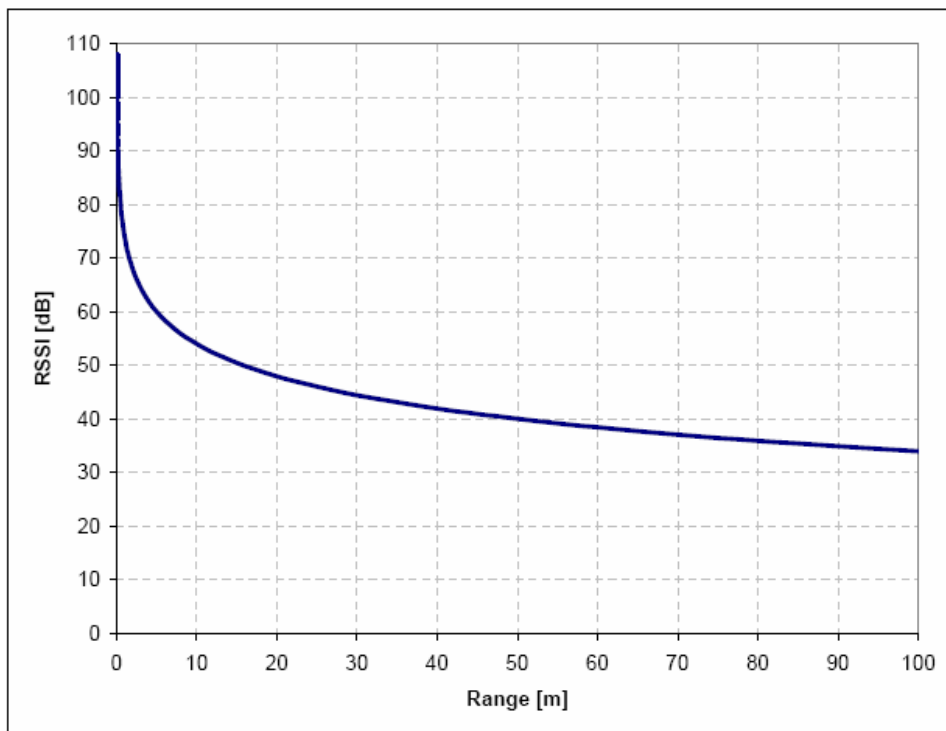
$$d = \left(\frac{T_{TOT} - T_{TAT}}{2} \right) c \quad \text{KAAVA 2}$$

6.2 Vastaanotetun signaalin tehoon perustuva mittaus

RSSI (Received Signal Strength Indication) kuvaa radorajapinnan yli vastaanotettavaa radiosignaalin tehoa. Näin ollen, vastaanotetun signaalin tehoa voidaan käyttää etäisyyden mittaukseen, kun lähetettävä ja vastaanotettava tehotaso tunnetaan. Etäisyys saadaan laskettua kaavan 3 avulla, jossa d kuvaa etäisyyttä metreinä ja $RSSI$ kuvaa vastaanotettavaa tehotasoa. (10, s. 14)

$$d = 0,02 * 10^{\left(\frac{108 - RSSI}{20}\right)} \quad \text{KAAVA 3}$$

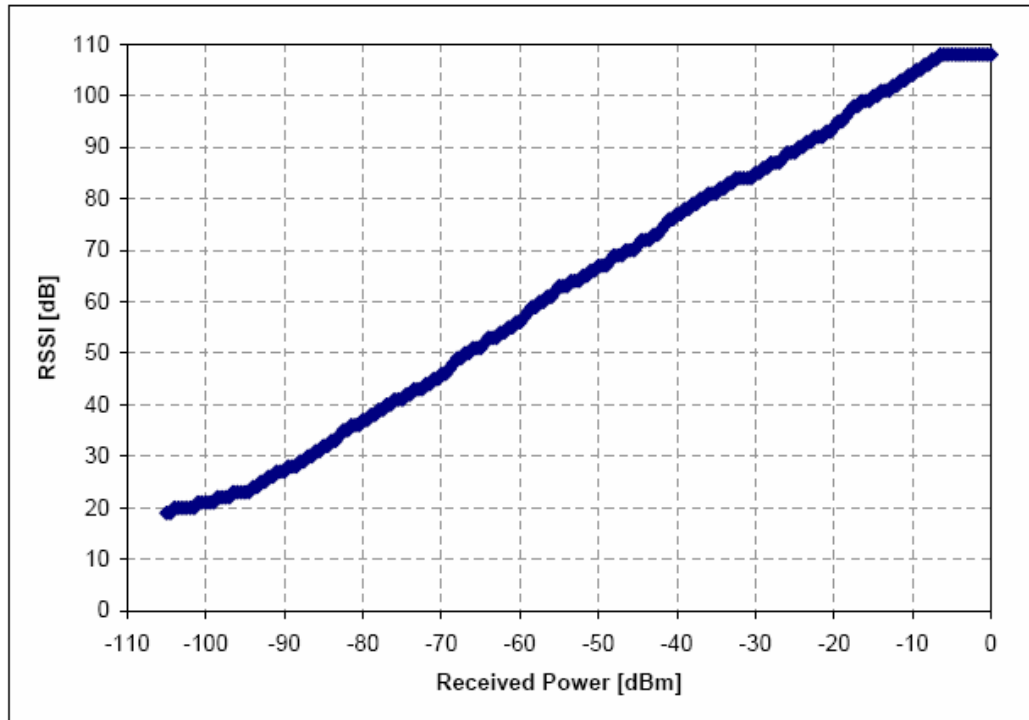
Vastaanotettu teho on käänteisesti verrannollinen etäisyyteen, eli kun etäisyyttä kasvatetaan, RSSI-arvo pienenee. Suuremmilla etäisyyksillä RSSI-arvo muuttuu epäluotettavammaksi ja tarkkuus kärsii. Kuva 17 esittää vastaanotettua signaalin tehoa etäisyyteen verrattuna. (10, s. 13.)



KUVA 17. Vastaanotetun signaalin teho etäisyyteen verrattuna (10)

RSSI-mittauksilla parhaimpia tuloksia saavutetaan pienillä etäisyyksillä, jolloin vastaanotettu teho on suurimmillaan. Kun etäisyyttä kasvatetaan, lähetetty teho vaimenee logaritmisesti ja leviää ympäristöön, jolloin tarkkuustulokset kärsivät. Yleisesti, kun etäisyys kaksinkertaistuu, mahdollinen virhe mittaustuloksessa kaksinkertaistuu myös. RSSI-tekniikkaa käytetään monissa tietoliikennesovelluksissa paikannuksen tarkkuuden parantamiseen. Ympäristöllä on lisäksi hyvin suuri vaikutus etäisyyden tarkkuuteen. (10, s. 13.)

Kuva 18 esittää 1 dB:n välein tehtyä mittausta RSSI-arvoilla verrattuna vastaanotettuun signaalin tehoon. RSSI-arvolla osoitetaan tiettyä vastaanotettua tehotasoa. Kuvasta nähdään, että suurin vastaanotettava RSSI-arvo voi olla 108, jonka jälkeen vastaanotin ei tunnista suurempia tehotasoja. Päinvastaisesti pienin tunnistettava RSSI-arvo on noin 20. (10, s. 13.)



KUVA 18. RSSI- lukema ja vastaanotettu signaalin teho (10)

7 MITTAUKSET

Tämä luku käsittelee signaalin kulkuaikaan perustuvalla menetelmällä toteutettavaa etäisyyden mittausta ja sitä, kuinka tarkkoja tuloksia mittausjärjestelmällä saadaan aikaan. Etäisyysmittauksia suoritettiin eri etäisyyksillä mitanauhan avulla. Mittaukset suoritettiin 1,40 metriä korkean kameratelineen päällä. Ilmanlaatu oli mitattaessa jokaisena päivänä hyvä. Tällä pyrittiin poistamaan sääolosuhteiden aiheuttamat ilmiöt mittaustuloksien tarkkuudessa niin pieneksi kuin mahdollista. Mittaukset suoritettiin normaalilla standardilla ympärisäteilevällä antenniratkaisulla. Korkeampaa virrankulutusta käyttäviä vahvistinmoduuleja ei etäisyysmittauksissa tässä insinööriyössä käytetty.

Mittauksia suoritettiin suoralla näköyhteydellä kokonaisuudessaan aina metristä maksimietäisyyteen saakka. Työssä otetaan kantaa lisäksi siihen, kuinka hyvin järjestelmä pystyi mittaamaan etäisyyttä liikkuvaan kohteeseen. Työ käsittelee lisäksi sitä, kuinka tarkasti järjestelmä pystyi mittaamaan etäisyyttä, kun suoran näköyhteyden välissä on este. Estemittauksella saadaan tarkempi kuva mittauksien vaihtelevuudesta sekä monitie-etenemisen aiheuttamista ilmiöistä. Työssä tutkitaan lisäksi datan vastaanottokykyä, eli sitä kuinka suuren prosenttiosuuden järjestelmä vastaanottaa kokonaisuudessaan lähetetyistä datapaketeista eri etäisyyksillä.

Suoritetuilla mittauksilla pyritään havainnollistamaan järjestelmän epävakaisuutta ja mittaustuloksien vaihtelevuutta. Mittauksien tavoitteena on saada kokonaisvaltaisempi kuva järjestelmän etäisyyden tarkkuudesta. Saatuja mittaustuloksia voidaan käyttää hyödyksi lopullisia käyttökohteita kehitettäessä.

Järjestelmä on hyvin altis ulkopuolisten radioverkkojen häiriöille, jotka toimivat samalla radiotaajuudella. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että järjestelmä voi mitata etäisyyden liian pitkäksi tai lyhyeksi. Etäisyysmittaukset suoritettiin sen vuoksi ulkotiloissa parkkipaikalla, jolloin koulun aiheuttamat verkon häiriöt pyrittiin minimoimaan niin pieneksi kuin mahdollista, vaikka kokonaan tätä ilmiötä ei pystytä poistamaan kaupunkiolosuhteissa. Mittauspaikka sijaitsi

melko lähellä moottoritietä, jolloin huomioitavaa on, että mahdollisia häiriöitä sieltäkin suunnasta esiintyi. Tässä työssä ei tutkita häiriön sietokykyä, mutta otetaan kantaa kuitenkin siihen kuinka paljon ne voivat heikentää mittaustuloksia.

7.1 Mittaustulokset eri etäisyyksillä

Luku sisältää eri etäisyyksillä suoritettuja mittauksia ja niistä tehtyjä todennäköisyysjakaumia. Jakaumat kuvastavat sitä, kuinka monta prosenttia mittauksista sijoittuu millekin metrietäisyydelle. Jakaumilla pyrittiin havainnollistamaan mittaustuloksien vaihtelevuutta. Etäisyysmittaukset ovat pyöristetty puolen metrin tarkkuudella ylöspäin. Todennäköisyysjakaumat on tehty Excel-ohjelmistolla. Mikäli etäisyysmittaukset menivät yli todennäköisyysjakaumassa olevan asteikon, kerrotaan se ennen kuvaa olevassa tekstissä tai kuvassa.

Etäisyysmittaukset voidaan jakaa kahteen mittausosioon. Ensimmäisessä osiossa on koottu viiden erillisen mittauksen tulokset yhteen. Ensimmäinen osio koostuu kolmen kuvan kuvasarjasta. Ensimmäinen jakauma kuvaa forward-suuntaa, eli suoraan tietokoneessa kiinni olevasta päätelaitteesta etäisyysmittausta koordinaattorille. Toinen jakauma kuvaa reverse-suuntaa eli päinvastaista koordinaattorista päätelaitteelle suoritettua mittausta. Kolmas jakauma kuvaa molempia mittauksia yhdessä. Jakaumilla pyritään havainnollistamaan sitä, vaikuttaako mittauksen suunnan valinta etäisyyden tarkkuuteen. Jakaumilla tutkitaan lisäksi sitä, tasapainottaako molempiin suuntiin suoritettu mittaustulos etäisyysmittauksia. Ensimmäisen mittausosion tulokset eivät sisällä negatiivisia mittaustuloksia.

Toinen mittausosio koostuu kahden kuvan kuvasarjasta, joka kuvastaa yksittäistä laajaa etäisyysmittausta ja estemittausta, sekä näiden välistä eroavaisuutta. Ylempi kuvaaja esittää suoralla näköyhteydellä suoritettua mittausta ja alempi kuvaaja esittää estemittausta. Mittausosiossa pyritään havainnollistamaan se, vaikuttaako este etäisyysmittaukseen ja sen tarkkuuteen. Esteel-

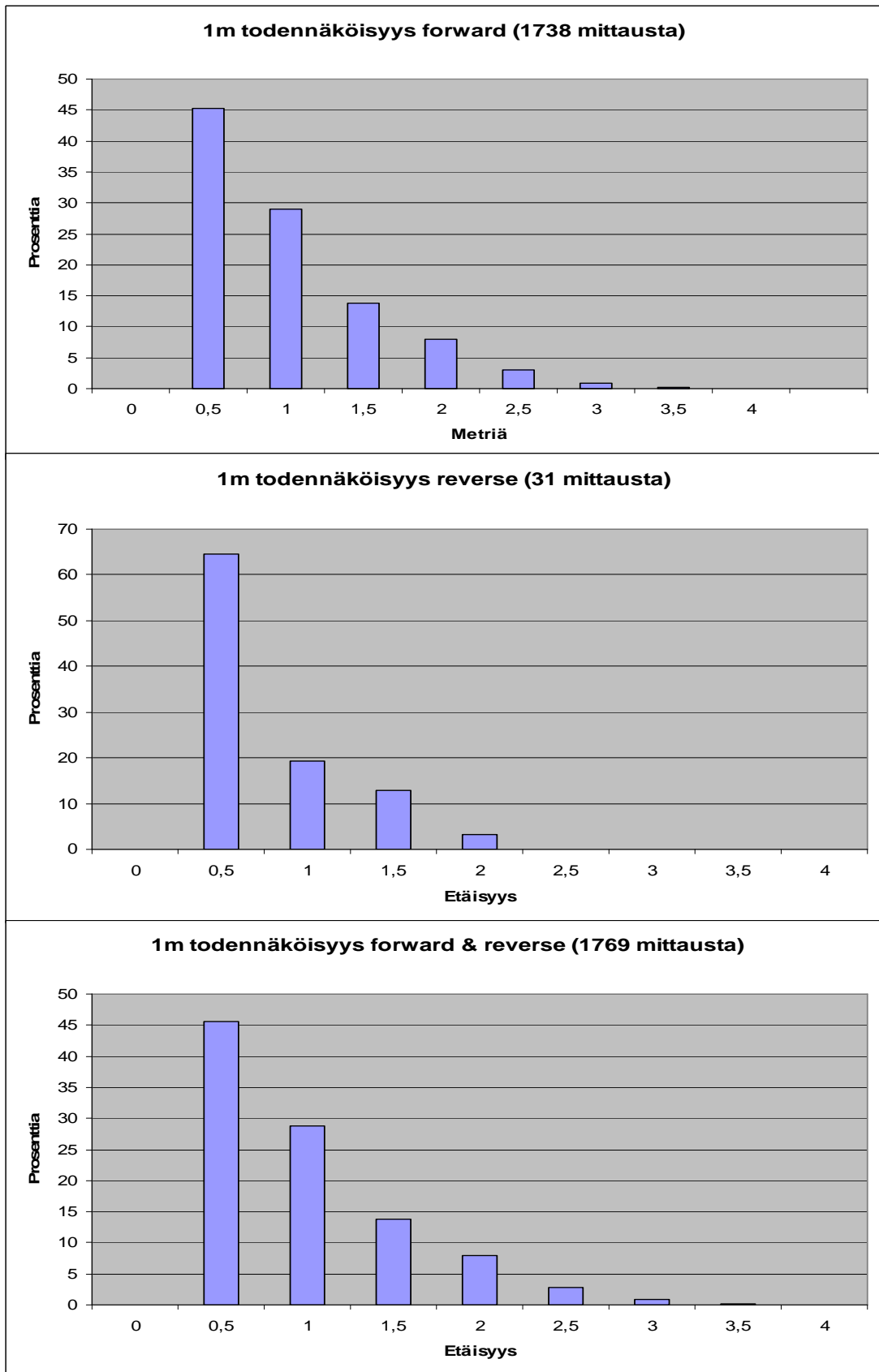
lä tarkoitetaan tässä tapauksessa henkilöä, joka seisoj vastaanottimen edessä. Toisen mittausosion tulokset sisältävät kaikki mittaustulokset.

7.1.1 Yhden metrin etäisyys

1 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

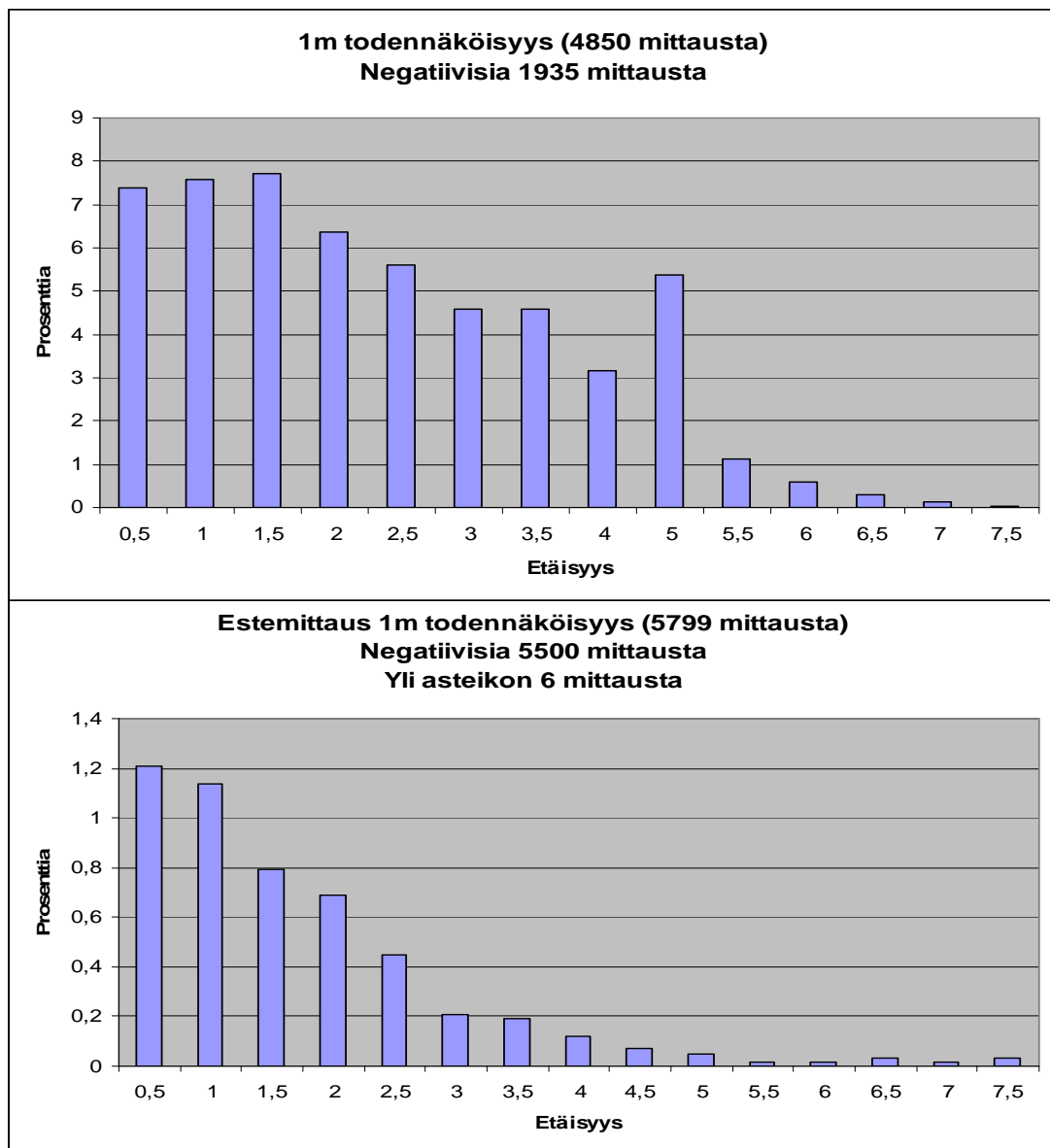
1 metrin etäisyyttä mitattaessa suurin prosenttiosa mittaustuloksista osuu 0,5 metrin etäisyydelle. Suurin osa reverse-mittauksista päätyi hylätyiksi, eli ne saivat negatiivisen arvon. 1 metrin etäisyydellä reverse-mittaukset olivat lyhyempiä forward-mittauksiin verrattuna. Korkein prosenttiosuus onnistuneista mittauksista oli 0,5 metriä. 1 metrin etäisyyttä mitattaessa mittausosiossa 1 ei esiintynyt asteikon ulkopuolelle mitattuja etäisyyksiä. Kuva 19 havainnollistaa mittausosion 1 etäisyystuloksia.



KUVA 19. Mittausosio 1: yhden metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

Mittausosion 2 todennäköisyysjakaumista nähdään, että mittaustulokset jakaantuivat 0,5–7,5 metriin. Suoralla näköyhteydellä suoritettussa mittauksessa etäisyystuloksista vajaa puolet sai negatiivisen arvon. Estemittauksessa suurin osa mittauksista sai negatiivisen arvon ja sijoittui asteikon ulkopuolelle. Tämä johtuu järjestelmän kellovirheistä ja mahdollisesta häiriöille altistumisesta. Kuva 20 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



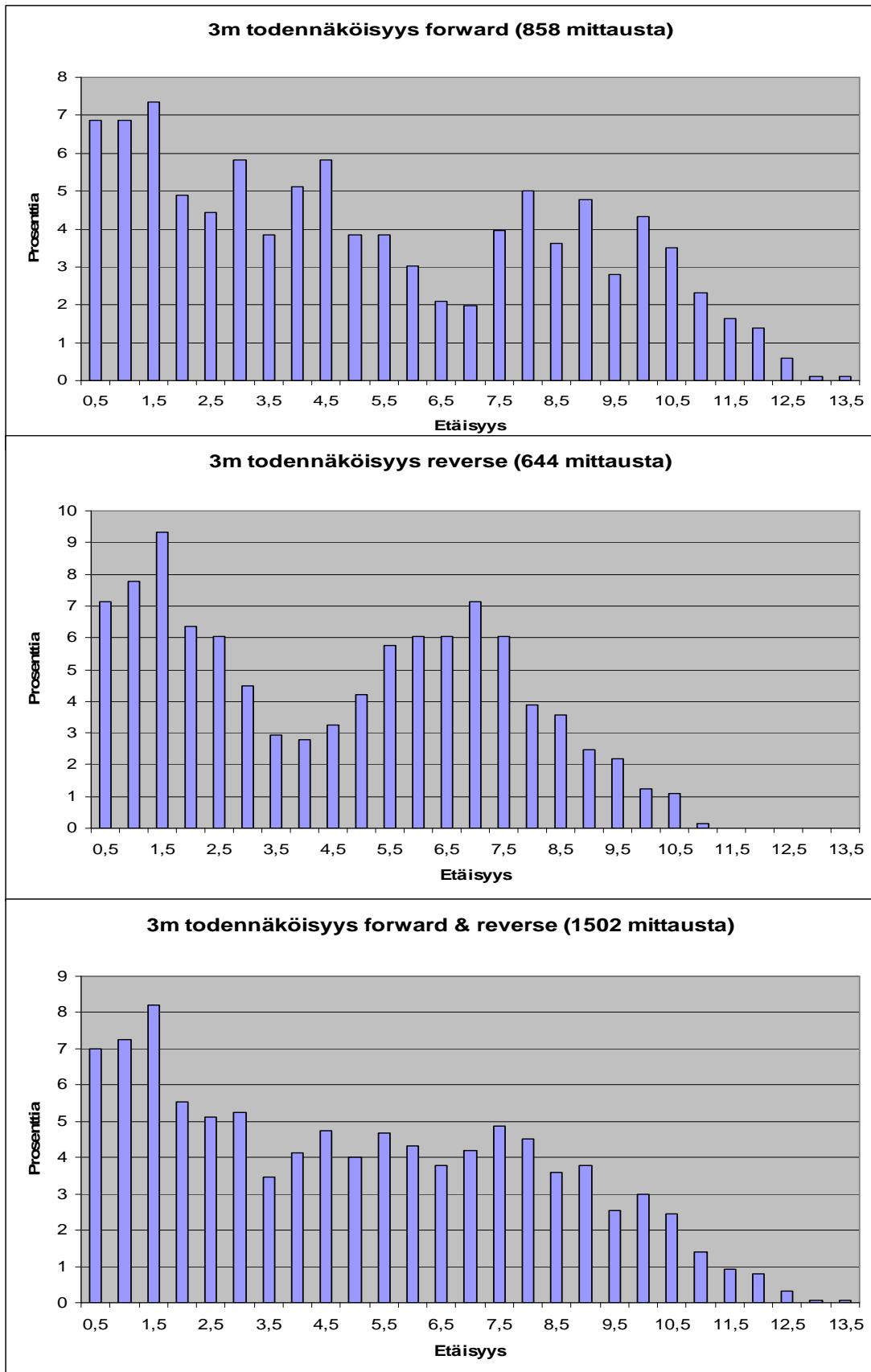
KUVA 20. Mittausosio 2: yhden metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.2 Kolmen metrin etäisyys

3 metrin etäisyyttä mitattaessa mittaustulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

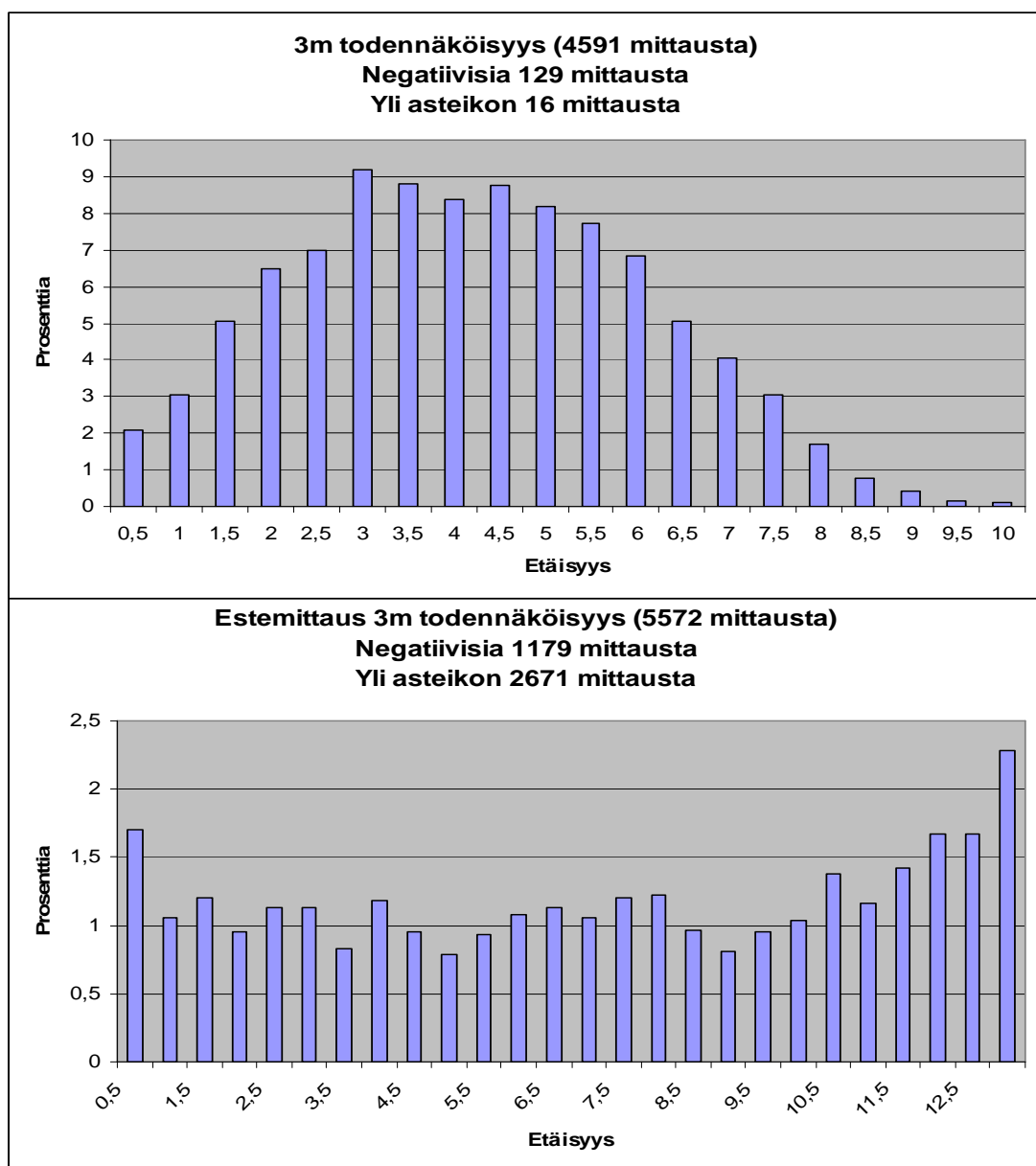
3 metrin etäisyyttä mitattaessa mittaustulokset jakaantuivat 0,5–13,5 metriin. Kuten 1 metrin etäisyydelläkin, reverse-suuntaan mitatut etäisyydet ovat suhteessa hieman lyhyempiä forward-mittauksiin verrattuna. 3 metrin etäisyyttä mitattaessa tulokset olivat hyvin vaihtelevia. Kuva 21 havainnollistaa mittausosion 1 tuloksia.



KUVA 21. Mittausosio 1: kolmen metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

Suoralla näköyhteydellä suoritetussa mittauksessa etäisyystulokset olivat selkeämpiä mittausosion 1 tuloksiin verrattuna. Järjestelmässä esiintyy siis hyvin paljon vaihtelevuutta. Estemittauksissa tulokset jakaantuivat aina 0,5 metristä reiluun 25 metriin asti todennäköisyysjakauman ulkopuolella. Estemittauksella oli selkeästi vaikutusta mittaukseen, koska tulokset jakaantuivat vaihtelevasti eri etäisyyksille. Kuva 22 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



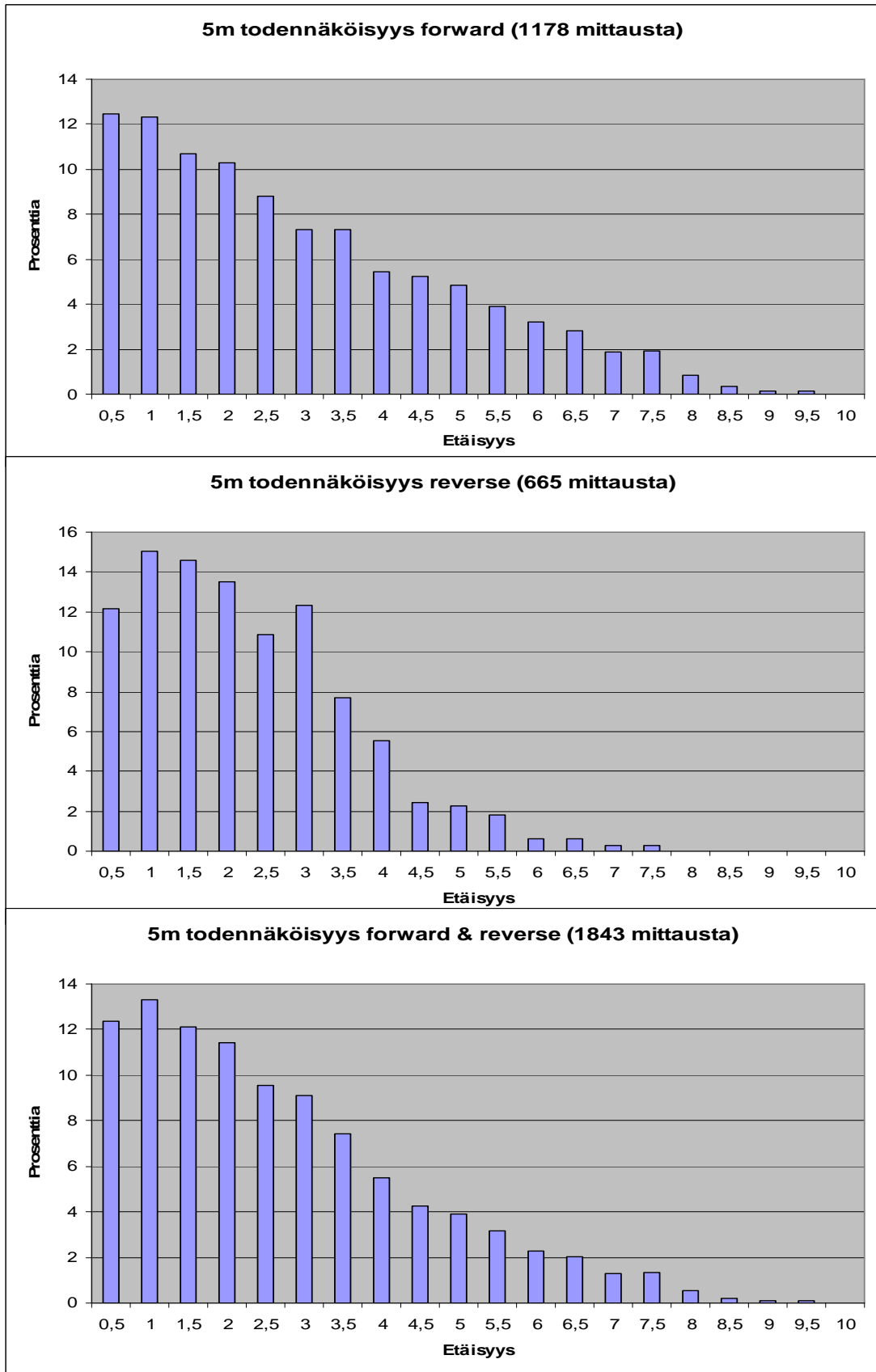
KUVA 22. Mittausosio 2: kolmen metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.3 Viiden metrin etäisyys

5 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

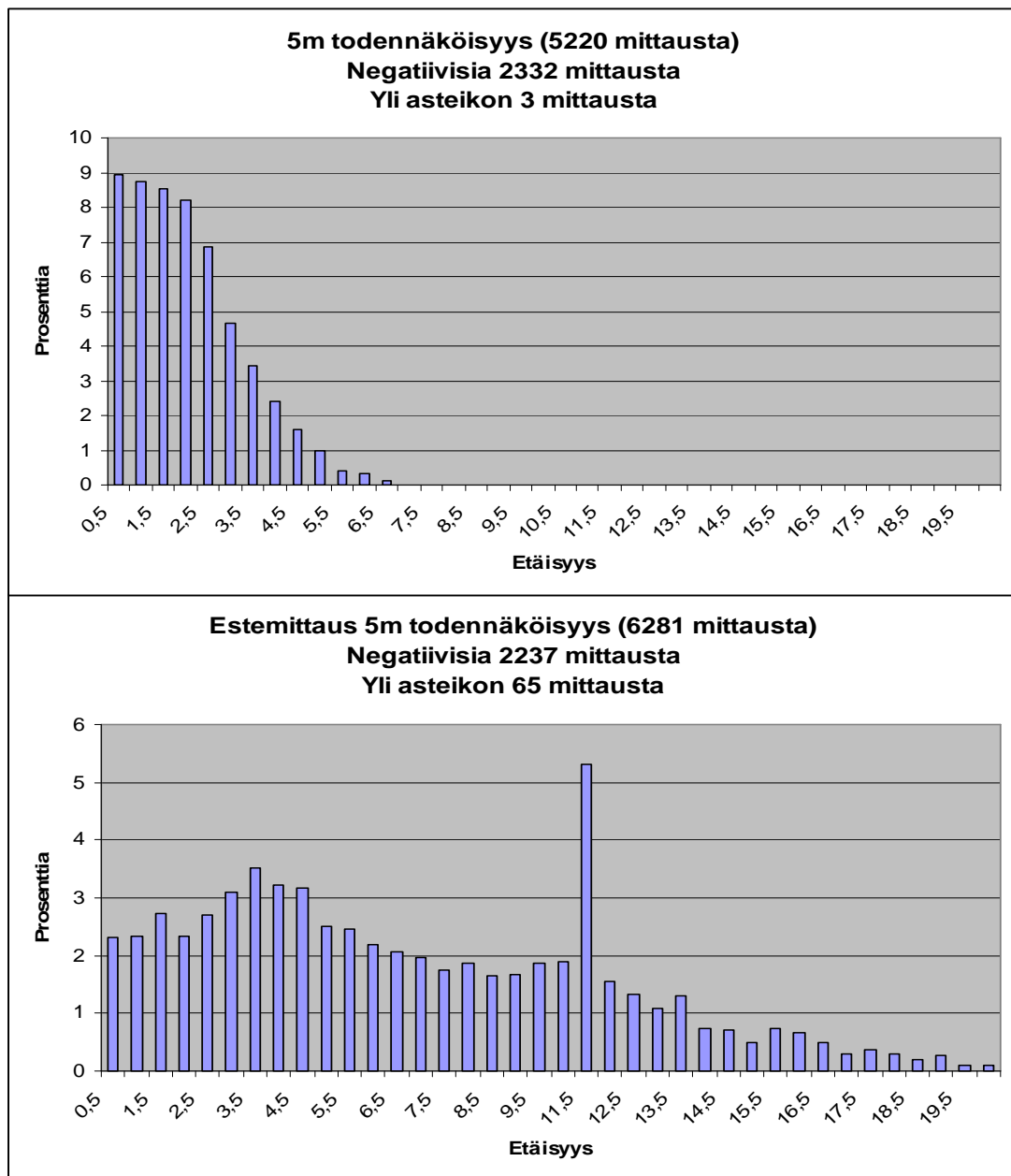
Kuten muissakin lyhyillä matkoilla mitatuissa etäisyysissä, 5 metrin etäisyysmittauksessa merkittävä osa etäisyystuloksista sijoittuu liian lyhyeksi. Reverse-mittaukset ovat suhteessa forward-mittauksiin hieman lyhyempiä. Suuri osa onnistuneista mittauksista sijoittuu alle 5 metrin etäisyydelle. Mittausosiossa 1 ei esiintynyt asteikon ulkopuolella mitattuja etäisyyksiä. Kuva 23 havainnollistaa mittausosion 1 tuloksia.



KUVA 23. Mittausosio 1: viiden metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

Suoralla näköyhteydellä suoritetussa mittauksessa suurin prosenttiosa etäisyyksistä sijoittuu alle 5 metrin etäisyydelle. Mittaus on hyvin samankaltainen mittausosion 1 tuloksiin verrattuna. Negatiivisia arvoja järjestelmällä tulee paljon verrattuna mittauksen kokonaismäärään. Estemittauksessa tulokset jakaantuivat vaihtelevasti aina 0,5 metristä reiluun 20 metriin. Kuva 24 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



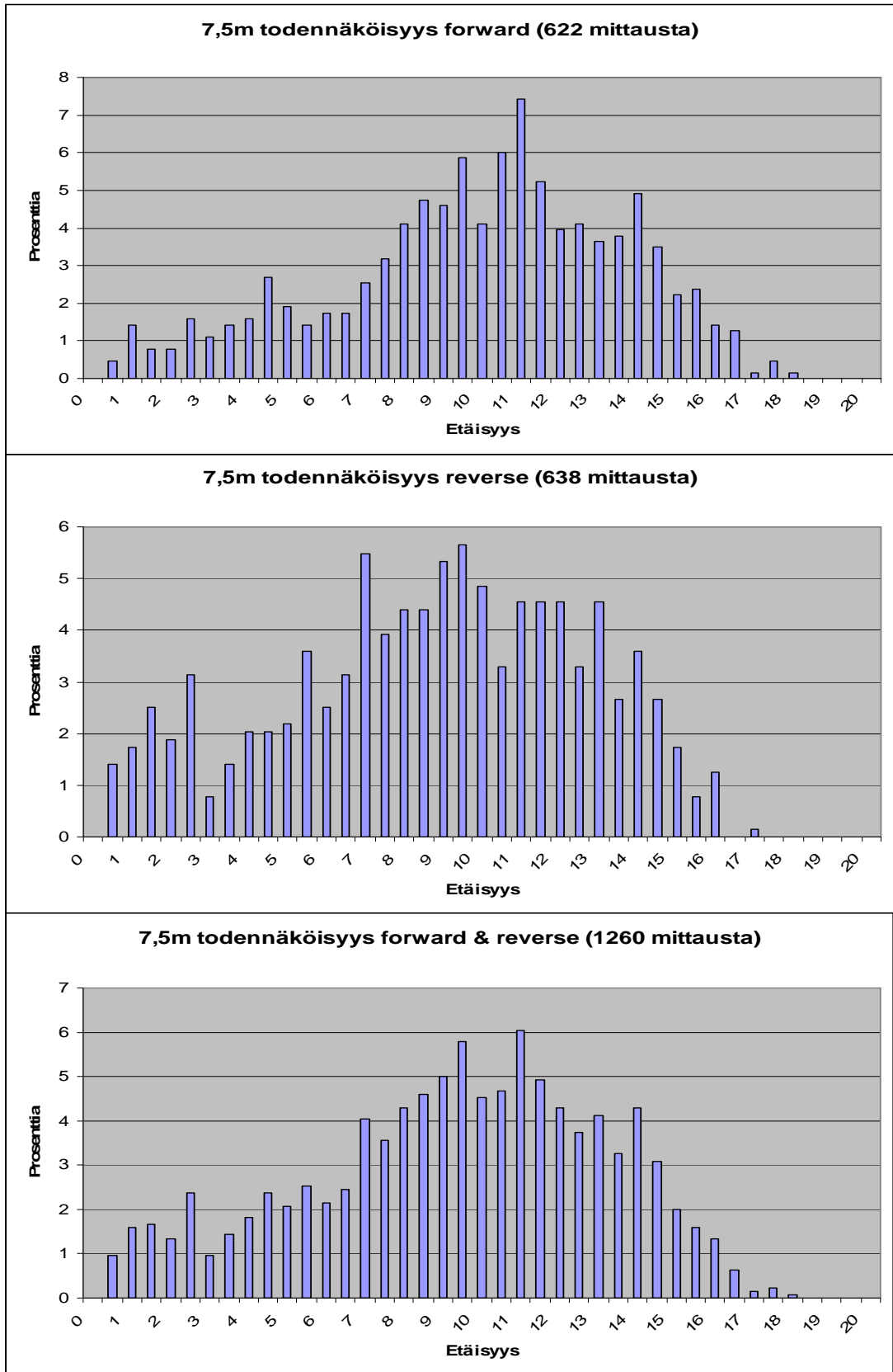
KUVA 24. Mittausosio 2: viiden metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.4 Seitsemän ja puolen metrin etäisyys

7,5 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

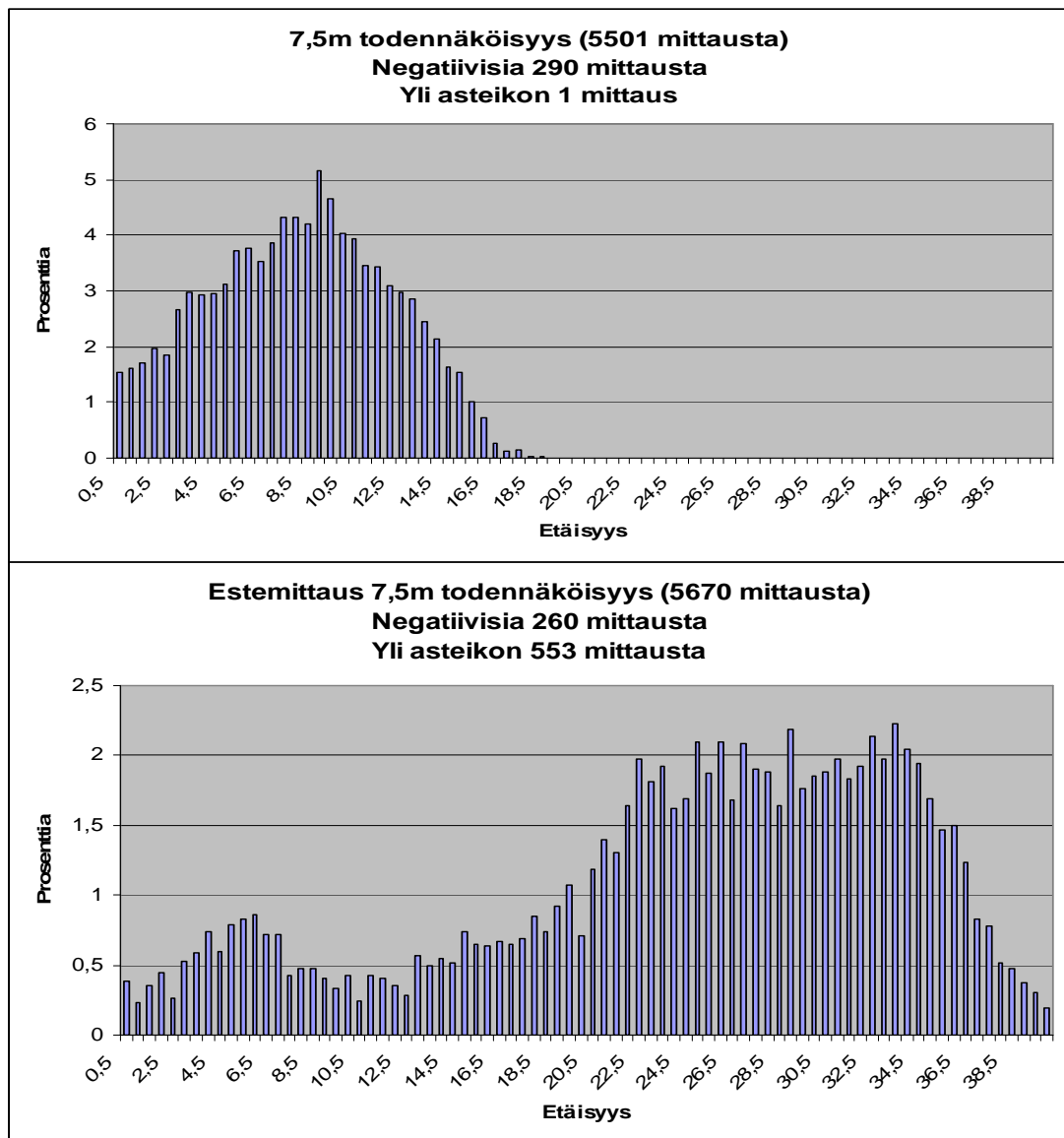
7,5 metrin etäisyyttä mitattaessa, korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu yli alkuperäisen mitatun etäisyyden. Vaihtelevuutta mittauksissa esiintyi aina 1 metristä vajaan 20 metriin. Mittauksen suunnalla ei ollut merkittävää eroavaisuutta. Korkein prosenttiosuus mitatuista etäisyystuloksista sijoittuu 10–12 metrin lähimaastoon. Mittausosiossa 1 ei esiintynyt esteiden ulkopuolella mitattuja etäisyyksiä. Kuva 25 havainnollistaa mittausosion 1 tuloksia.



KUVA 25. Mittausosio 1: seitsemän ja puolen metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

7,5 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 10 metrin lähimaastoon. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus sijoittuu 30 metrin lähimaastoon. Monitie-etenemisen aiheuttamat ilmiöt ovat siis hyvin havaittavissa. Negatiivisten tulosten määrä vähenee lyhyempiin etäisyyksiin verrattuna. Kuva 26 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



KUVA 26. Mittausosio 2: seitsemän ja puolen metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.5 10 metrin etäisyys

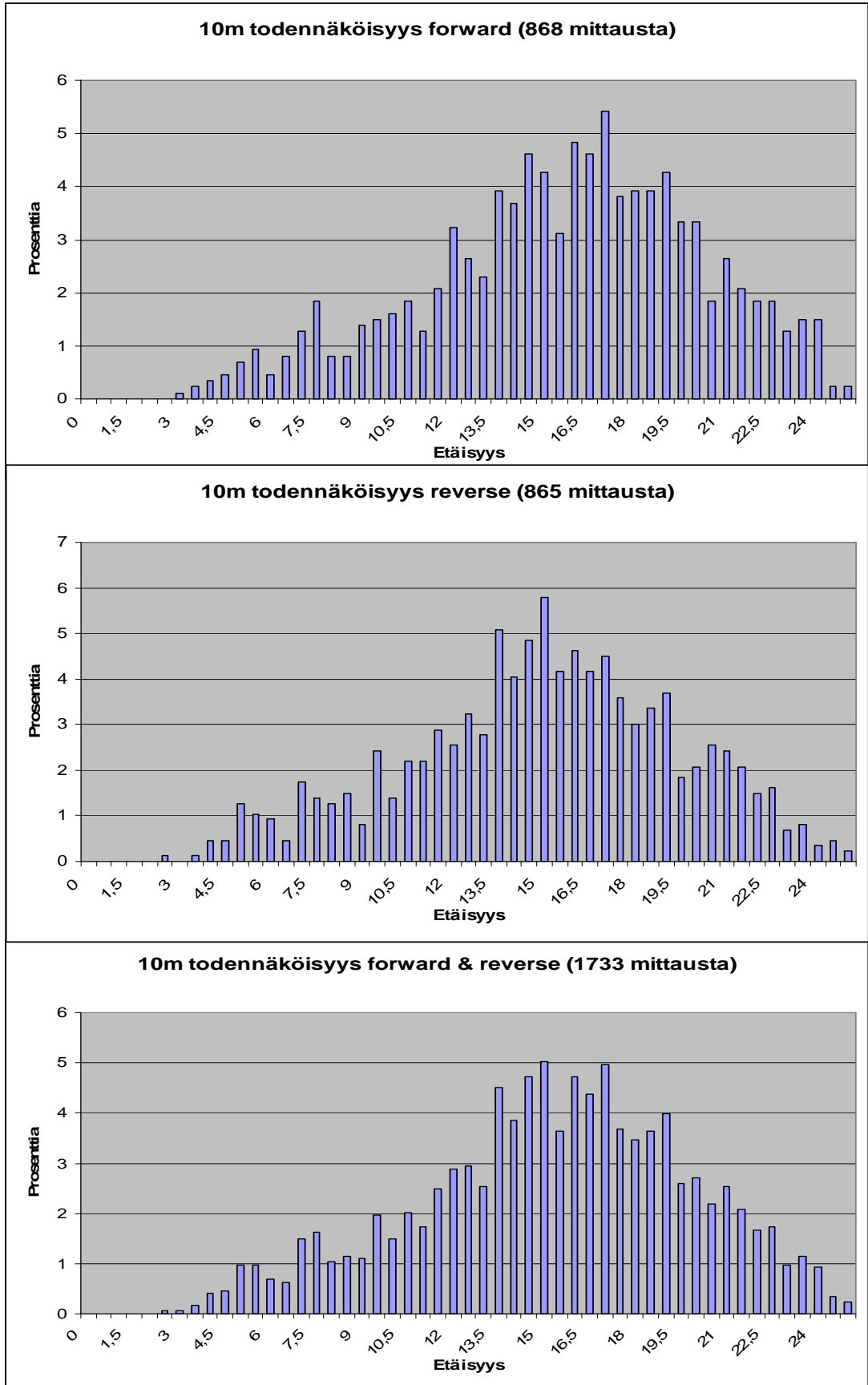
10 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

10 metrin etäisyyttä mitattaessa virhe kasvoi 7,5 metrin etäisyysmittauksiin verrattuna. Korkein prosenttiosa onnistuneista mittaustuloksista sijoittui 15 metrin lähimaastoon. Keskimääräisesti mitattu etäisyys oli siis liian pitkä. Mittaustulokset vaihtelivat aina 3 metristä reiluun 25 metriin. Kuten pienemmilläkin etäisyyksillä, reverse-mittaus mittaa etäisyyden hieman lyhyemmäksi forward-mittaukseen verrattuna. Kuva 27 havainnollistaa mittausosion 1 tuloksia.

Mittausosiossa 1 asteikon ulkopuolelle sijoittuneet etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

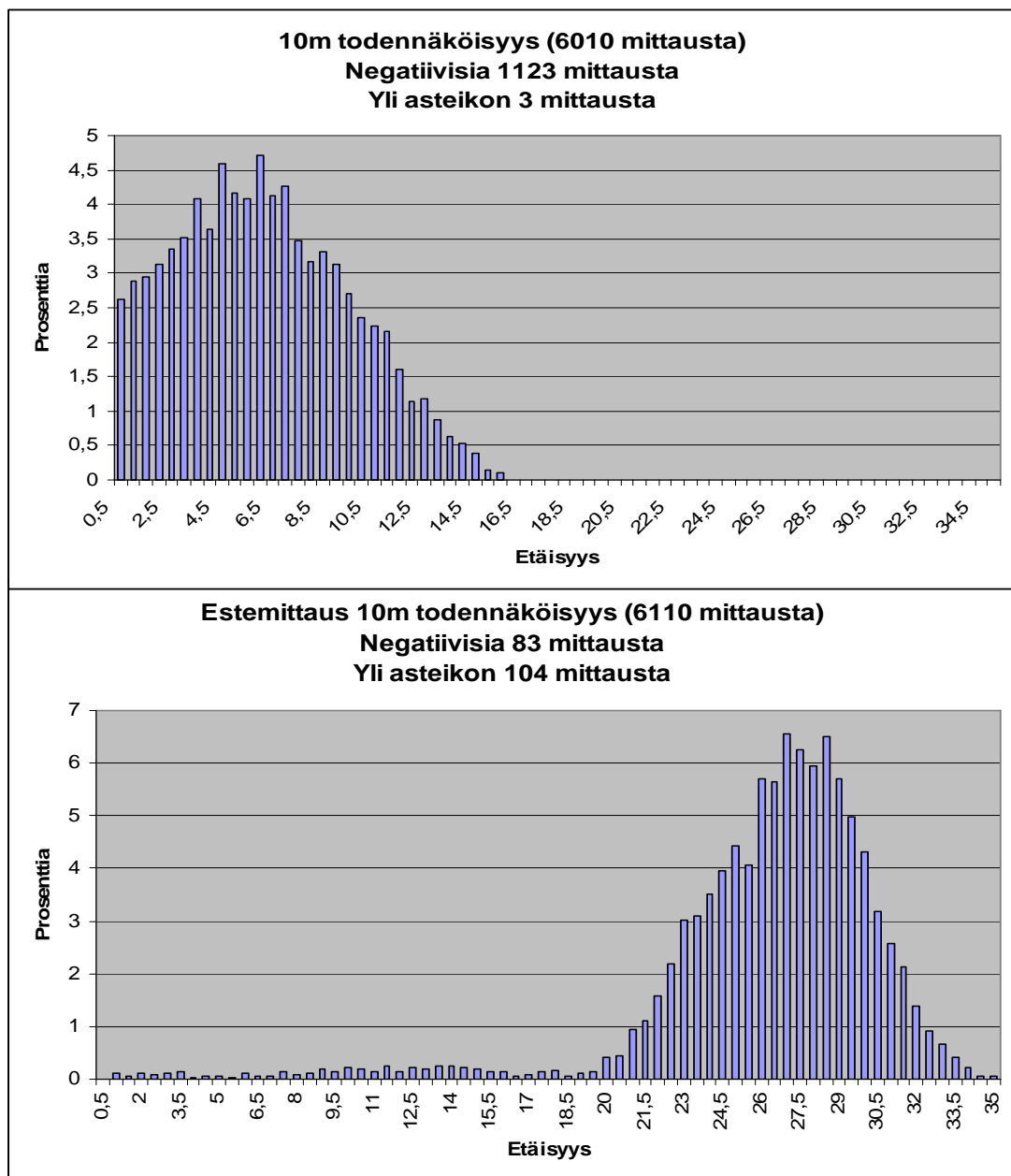
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 12 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 11 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 23 kappaletta.



KUVA 27. Mittausosio 1: 10 metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

Korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 7 metrin lähimaastoon. Mittausosion 1 tulokset jakaantuivat puolestaan hie- man mitattua etäisyyttä pidemmäksi. Mittauksissa esiintyy siis vaihtelevuutta suoralla näköyhteydelläkin, vaikka olosuhteet olivat eri mittausosioilla samat. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus mittauksista sijoittuu 25–30 metrin lähimaastoon. Monitie-etenemisen aiheuttamat ilmiöt ovat siis hyvin havait- tavissa. Kuva 28 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



KUVA 28. Mittausosio 2: 10 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.6 15 metrin etäisyys

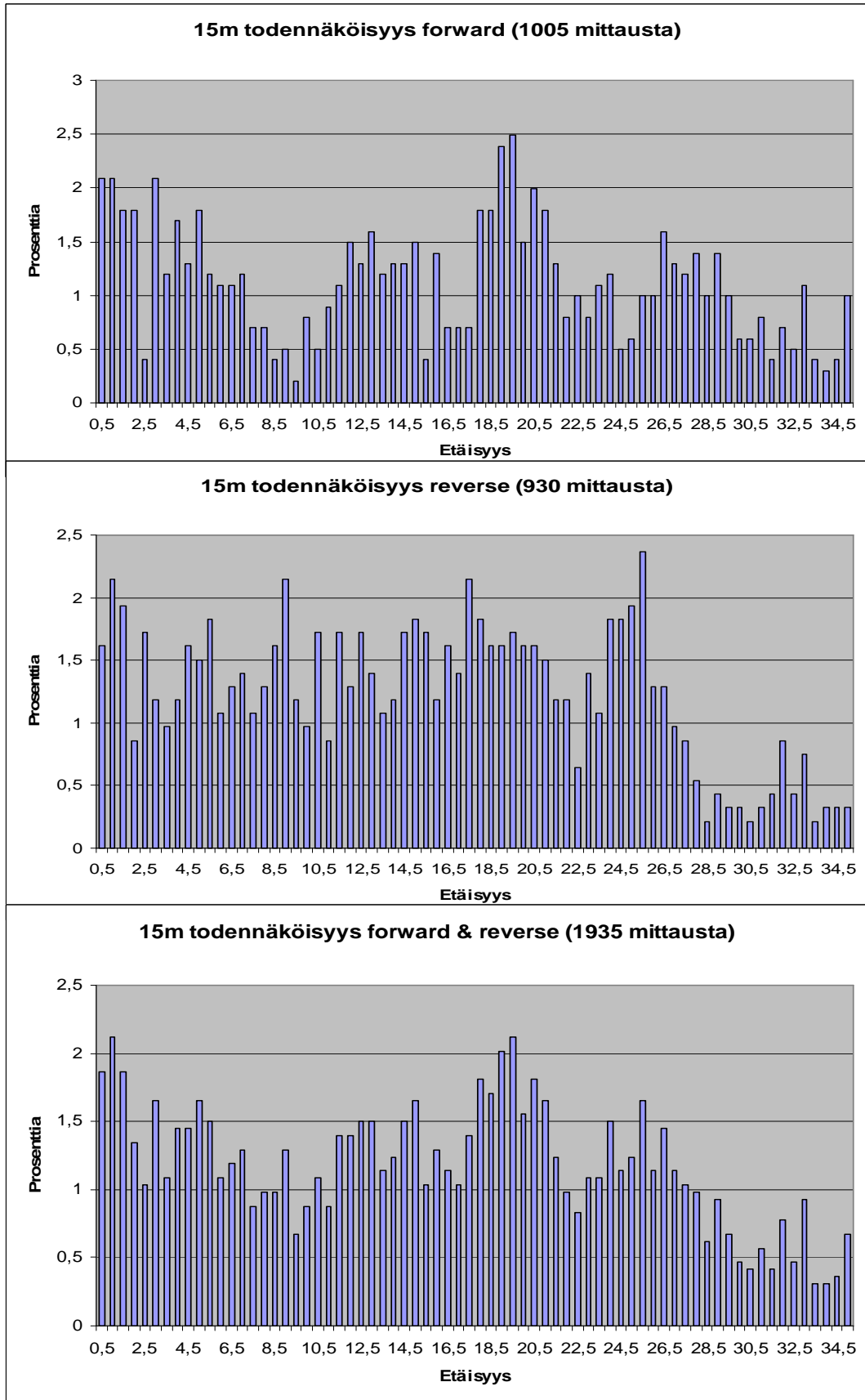
15 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

15 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystuloksissa esiintyi enemmän vaihtelua lyhyempiin etäisyyksiin verrattuna. Mittaustuloksien perusteella ei voida sanoa, mitä etäisyyttä järjestelmällä ollaan mitattu, vaikka olosuhteet ovat olleet kelin puolesta ihanteelliset. Ulkopuolisella häiriöllä voi olla vaikutusta asiaan. Kuva 29 havainnollistaa mittausosion 1 tuloksia.

Mittausosiossa 1 asteikon ulkopuolelle sijoittuneet etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

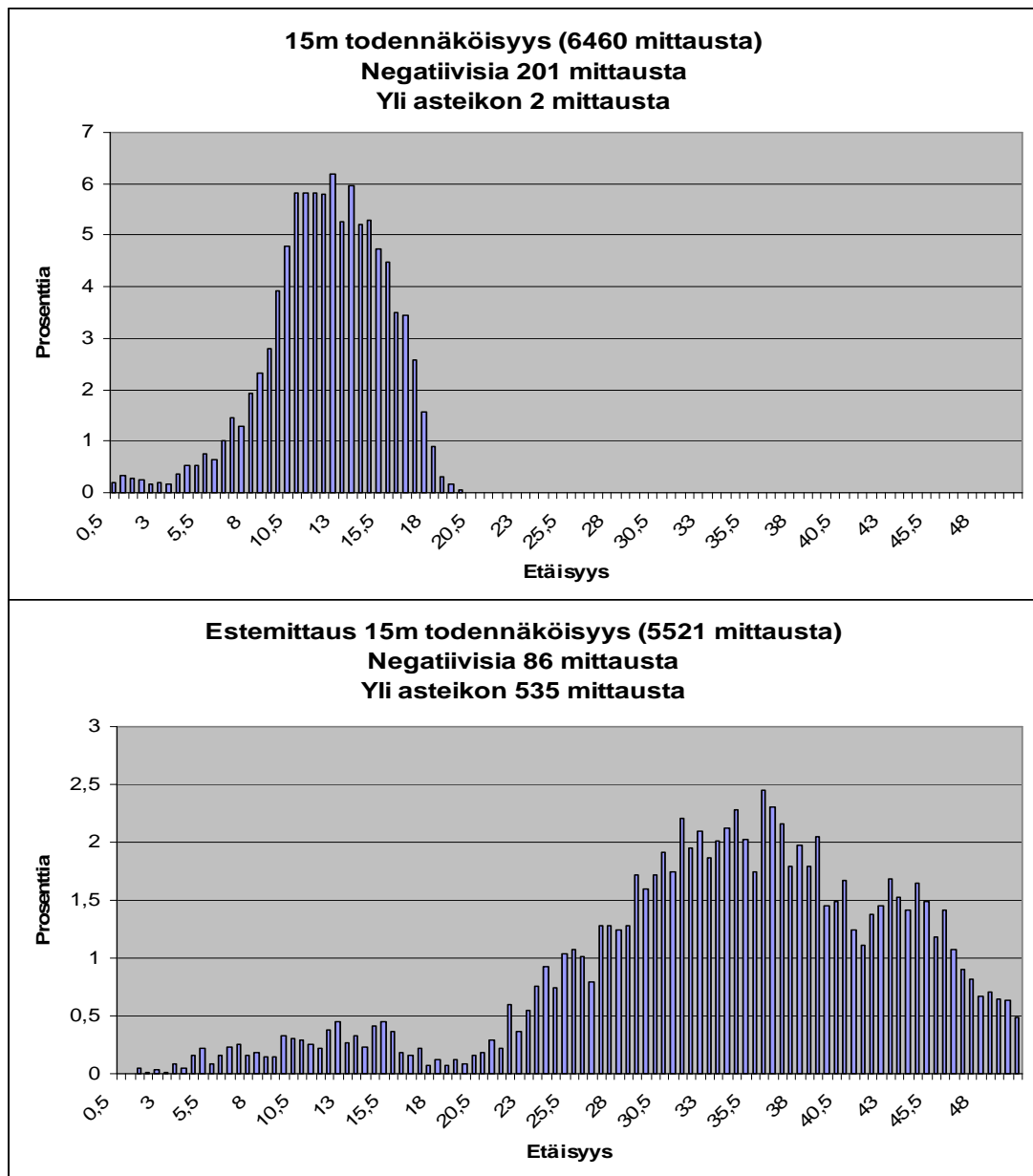
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 214 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 125 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 339 kappaletta.



KUVA 29. Mittausosio 1: 15 metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

15 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 15 metrin lähimaastoon. Tulokset olivat huomattavasti selkeämpiä verrattuna mittausosion 1 etäisyystuloksiin. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu 35–40 metrin lähimaastoon. Kuva 30 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



KUVA 30. Mittausosio 2: 15 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.7 20 metrin etäisyys

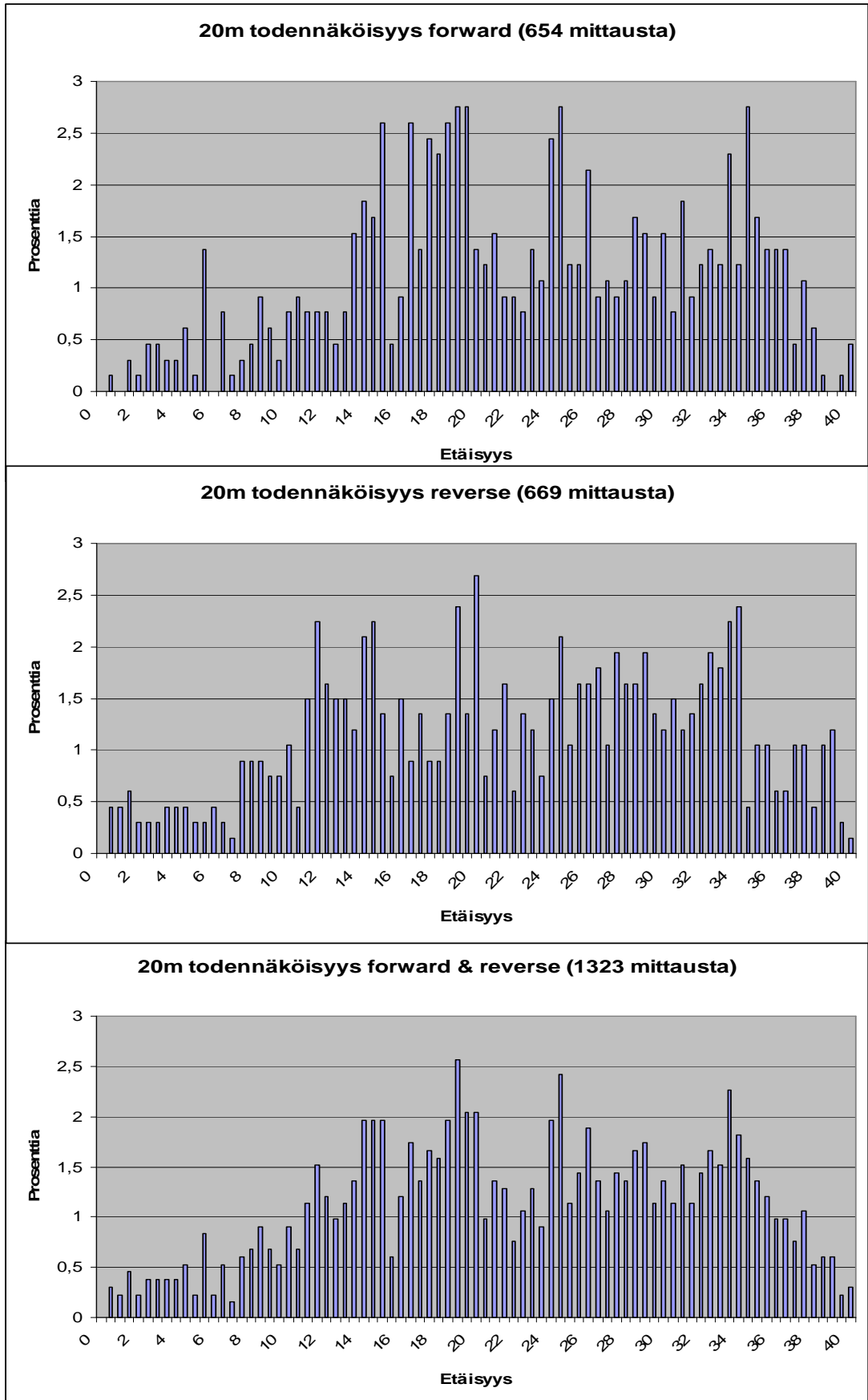
20 metrin etäisyyttä mitattaessa mittaustulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

20 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista jakaantui 15–35 metrin lähimaastoon. Etäisyystuloksien vaihteluväli oli siis melko suuri. Forward- ja reverse-suunnan mittauksissa ei ole suuria eroja havaittavissa. Molempiin suuntiin suoritettu mittaus tasapainotti kuitenkin todennäköisyysjakaumaa. Kuva 31 havainnollistaa mittausosion 1 etäisyystuloksia.

Mittausosiossa 1 asteikon ulkopuolelle sijoittuneet etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

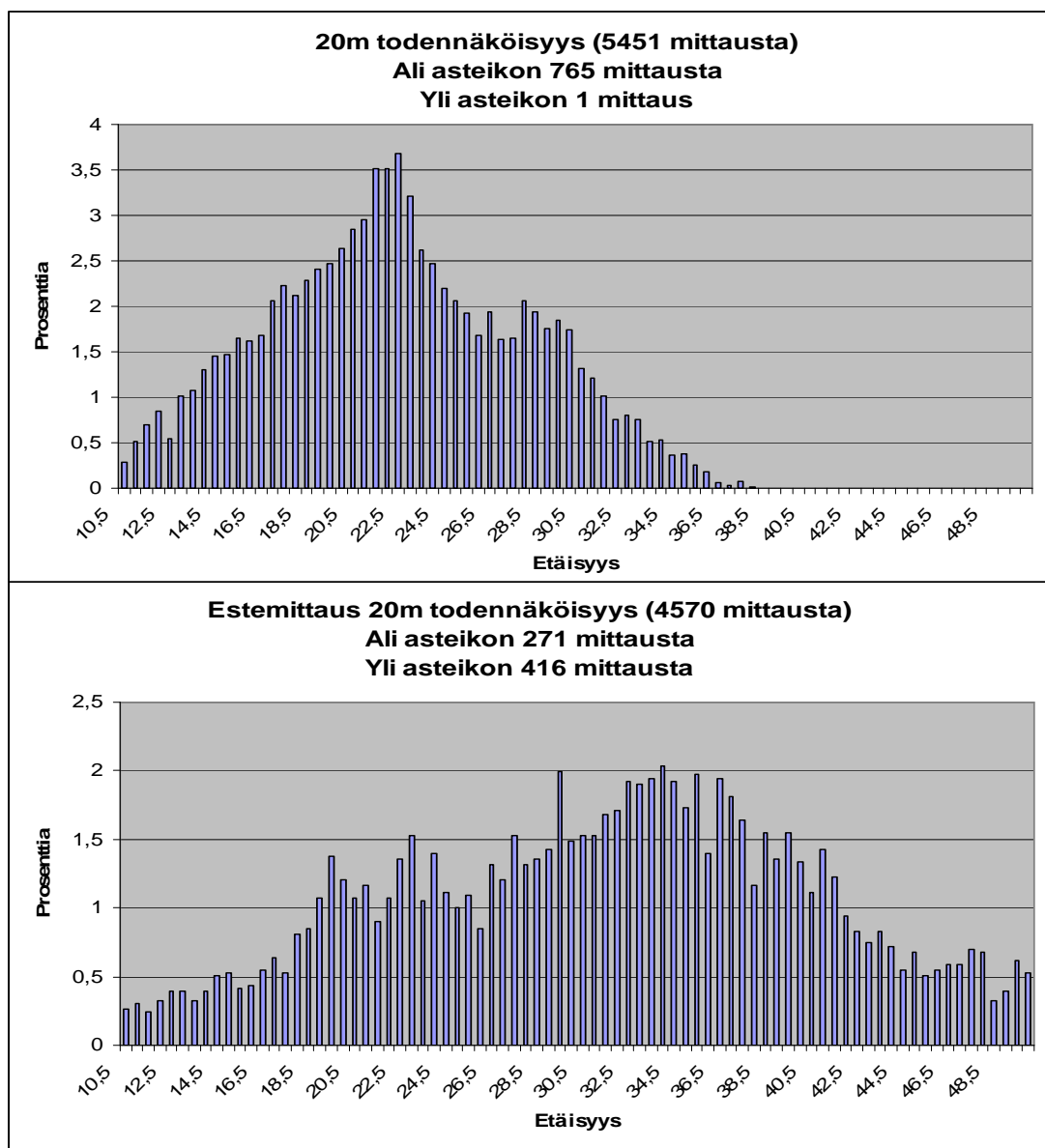
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 67 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 59 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 126 kappaletta.



KUVA 31. Mittausosio 1: 20 metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

20 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 23 metrin lähimaastoon. Mittausosion 2 tulokset olivat huomattavasti parempia ja selkeämpiä mittausosion 1 tuloksiin verrattuna. Tämä kuvaa hyvin järjestelmän epävakaisuutta ja mittaustulosten vaihtelevuutta. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu 30–40 metrin välimaastoon. Kuva 32 havainnollistaa mittausosion 2 etäisyystuloksia.



KUVA 32. Mittausosio 2: 20 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.8 30 metrin etäisyys

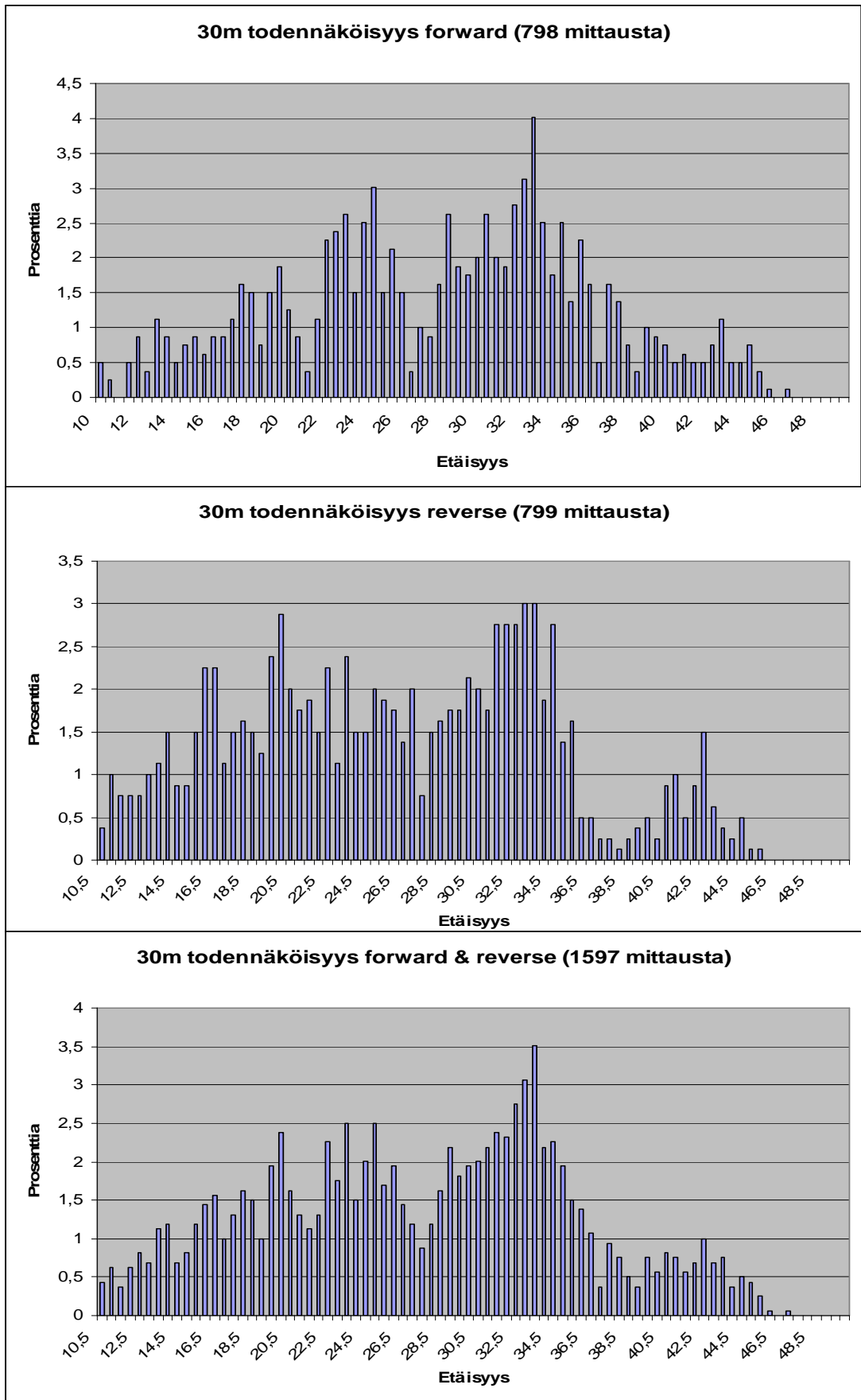
30 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

30 metrin etäisyyttä mitattaessa tulokset jakaantuivat vaihtelevasti. Korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittui molemmissa mittaustapauksissa 25–35 metrin välimaastoon. Forward- ja reverse-suunnan mittauksissa ei ole suuria eroja havaittavissa. Molempiin suuntiin suoritettu mittaus tasapainotti kuitenkin todennäköisyysjakaumaa. Kuva 33 havainnollistaa mittausosion 1 tuloksia.

Mittausosiossa 1 asteikon ulkopuolelle sijoittuneet etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

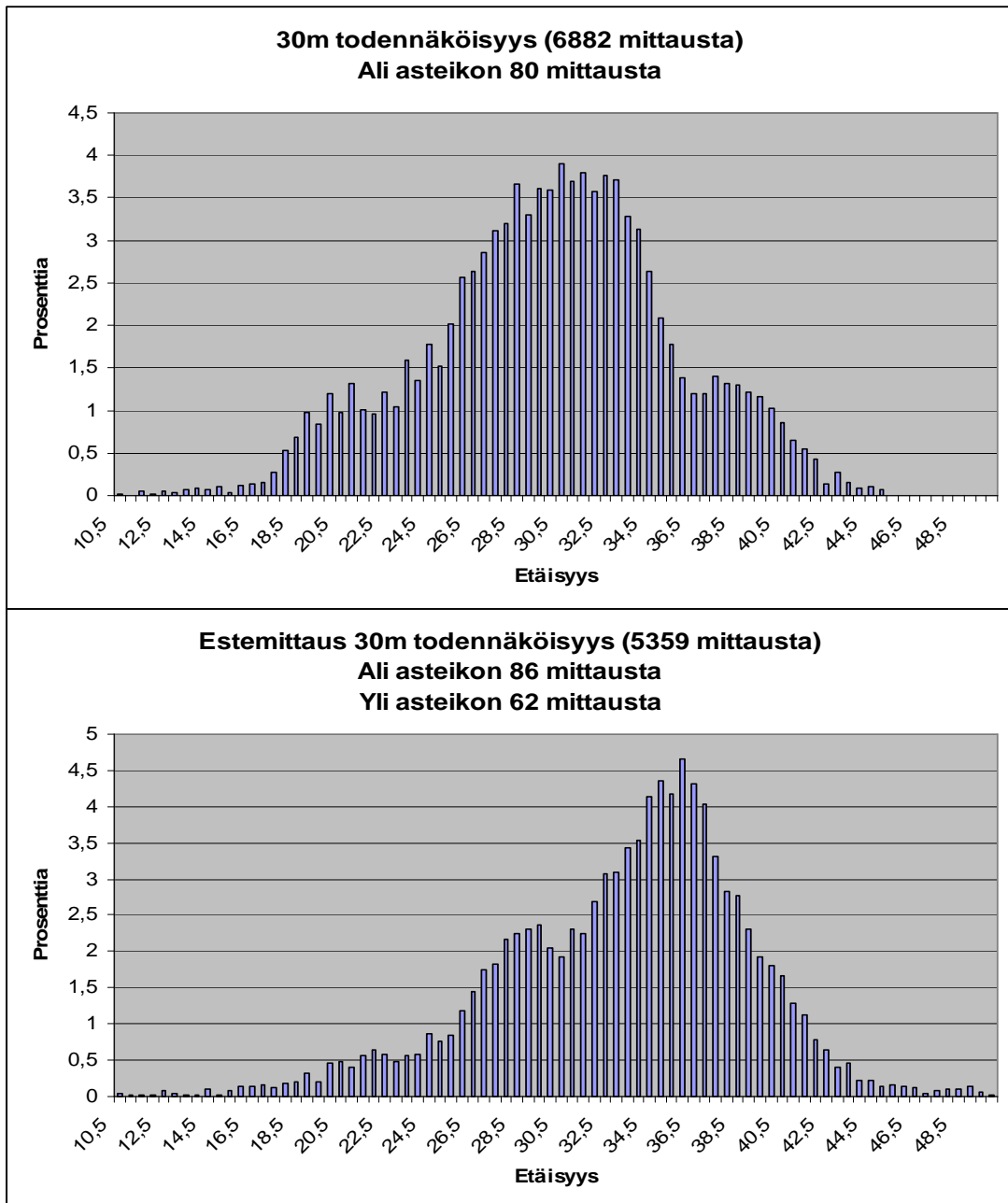
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 42 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 23 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 65 kappaletta.



KUVA 33. Mittausosio 1: 30 metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

30 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 32 metrin lähimaastoon. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu noin 37 metrin lähimaastoon, joten monitie-etenemisen aiheuttamat ilmiöt ovat hyvin havaittavissa. Kuva 34 havainnollistaa mittausosion 2 tuloksia.



KUVA 34. Mittausosio 2: 30 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.9 40 metrin etäisyys

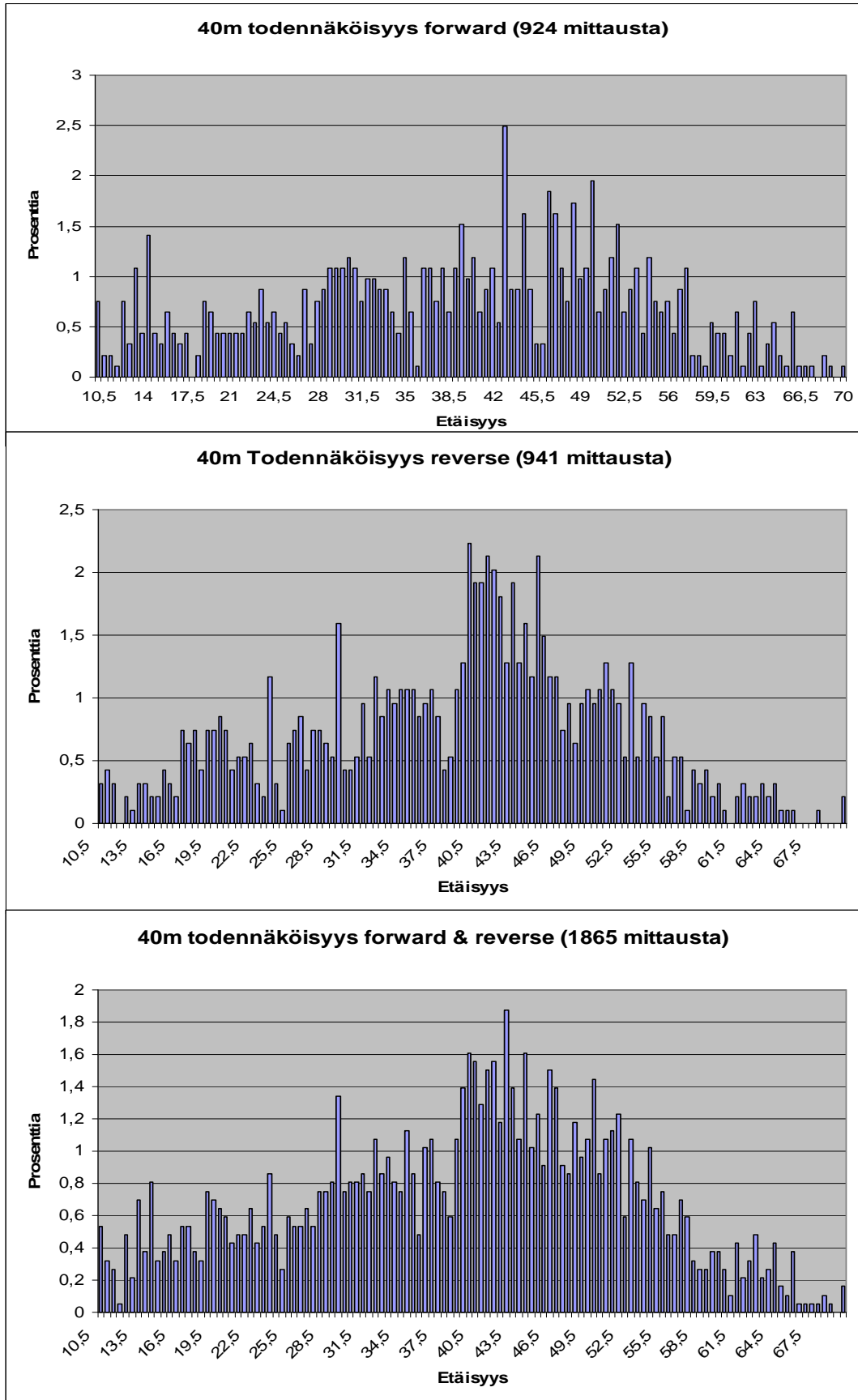
40 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

40 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu vaihtelevasti 45 metrin lähimaastoon. Forward- ja reverse-suunnan mittauksissa ei ole suuria eroja havaittavissa. Molempiin suuntiin suoritettu mittaus tasapainotti kuitenkin todennäköisyysjakaumaa. Kuva 35 havainnollistaa mittausosion 1 etäisyystuloksia.

Mittausosiossa 1 asteikon ulkopuolelle sijoittuneet etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

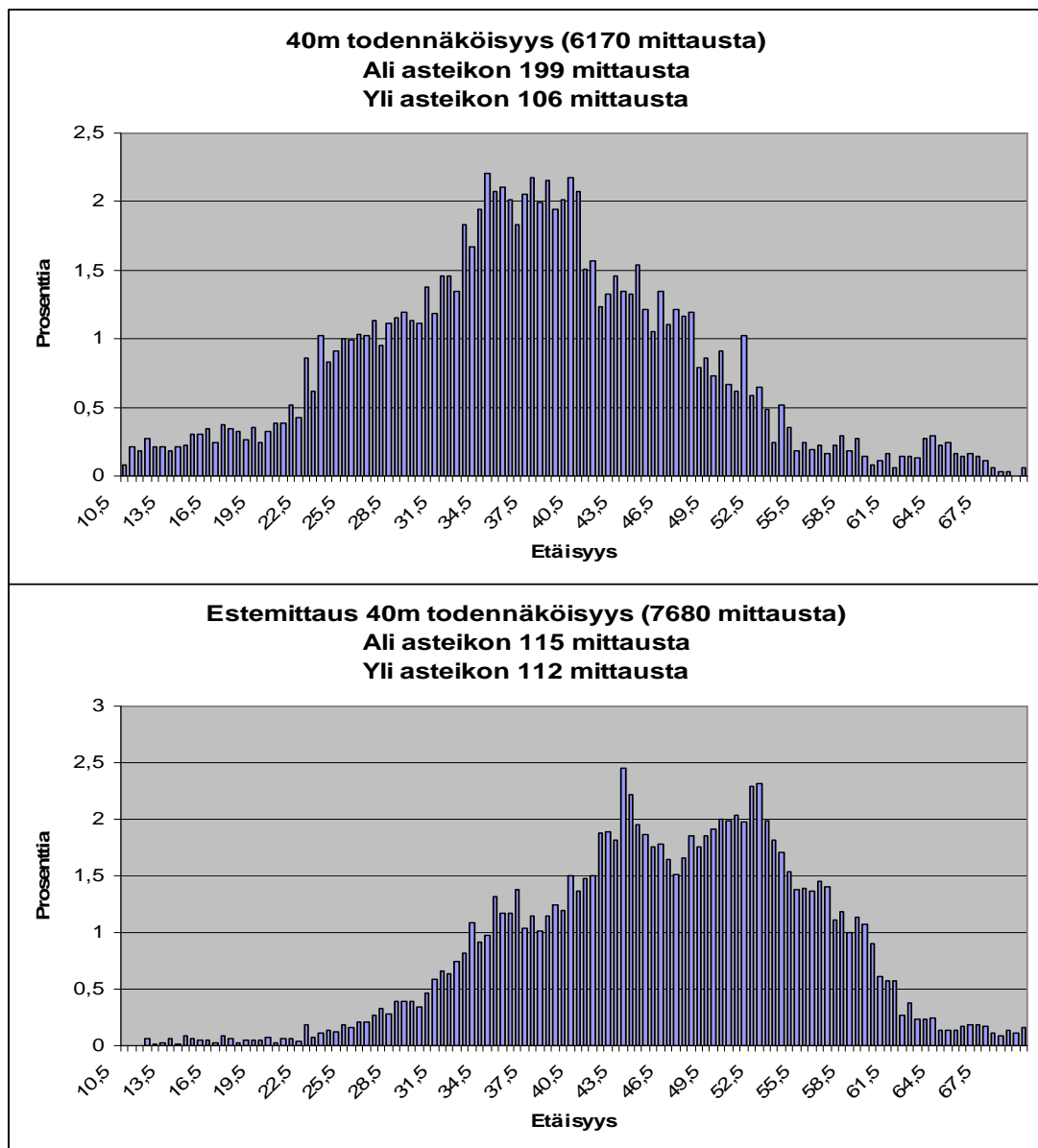
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 156 kappaletta
- ali asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 37 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 21 kappaletta
- ali asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 136 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 177 kappaletta
- ali asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 173 kappaletta.



KUVA 35. Mittausosio 1: 40 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

Mittausosio 2

40 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 40 metrin lähimaastoon. Mittausosion 2 tulokset olivat hyvin samankaltaisia mittausosion 1 tuloksiin verrattuna, joskin hieman tasaisemmin jakautuvia todennäköisyysjakaumien mukaan. Estemittauksissa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittui vaihtelevasti 45–55 metrin välimaastoon. Järjestelmä mittasi etäisyyden hieman pidemmäksi, kun vastaanottimen edessä oli este, joten siltä osin mittaus oli onnistunut. Kuva 36 havainnollistaa mittausosion 2 etäisyystuloksia.



KUVA 36. Mittausosio 2: 40 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.10 50 metrin etäisyys

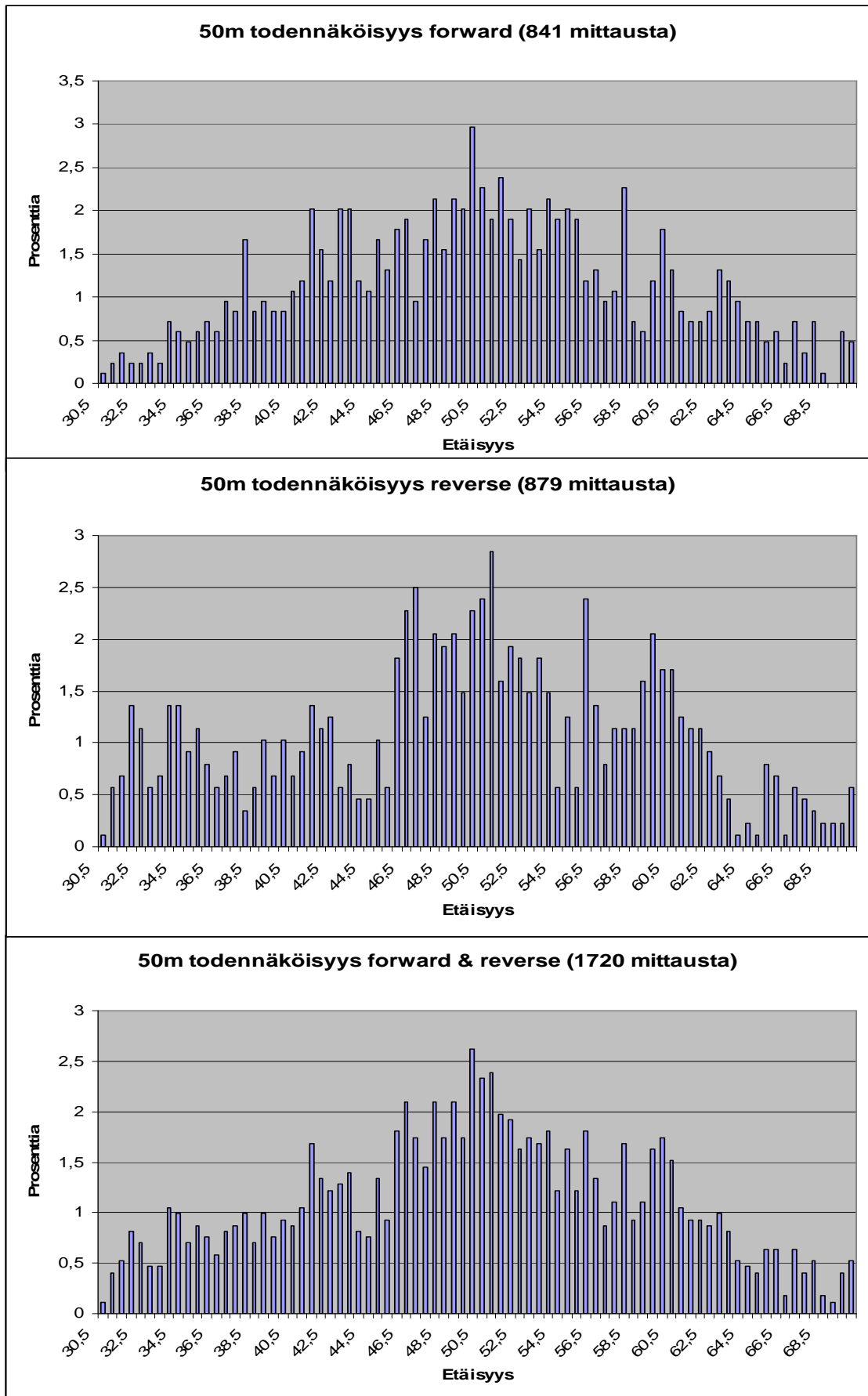
50 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

50 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu molemmissa mittaustapauksissa 50 metrin lähimaastoon. Etäisyystuloksien vaihteluväli oli kokonaisuudessaan kuitenkin molemmissa mittaustapauksissa melko laaja. Kuva 37 havainnollistaa etäisyystuloksia ja mittausten vaihteluväliä.

Mittausosiossa 1 asteikon ulkopuolelle sijoittuneet etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

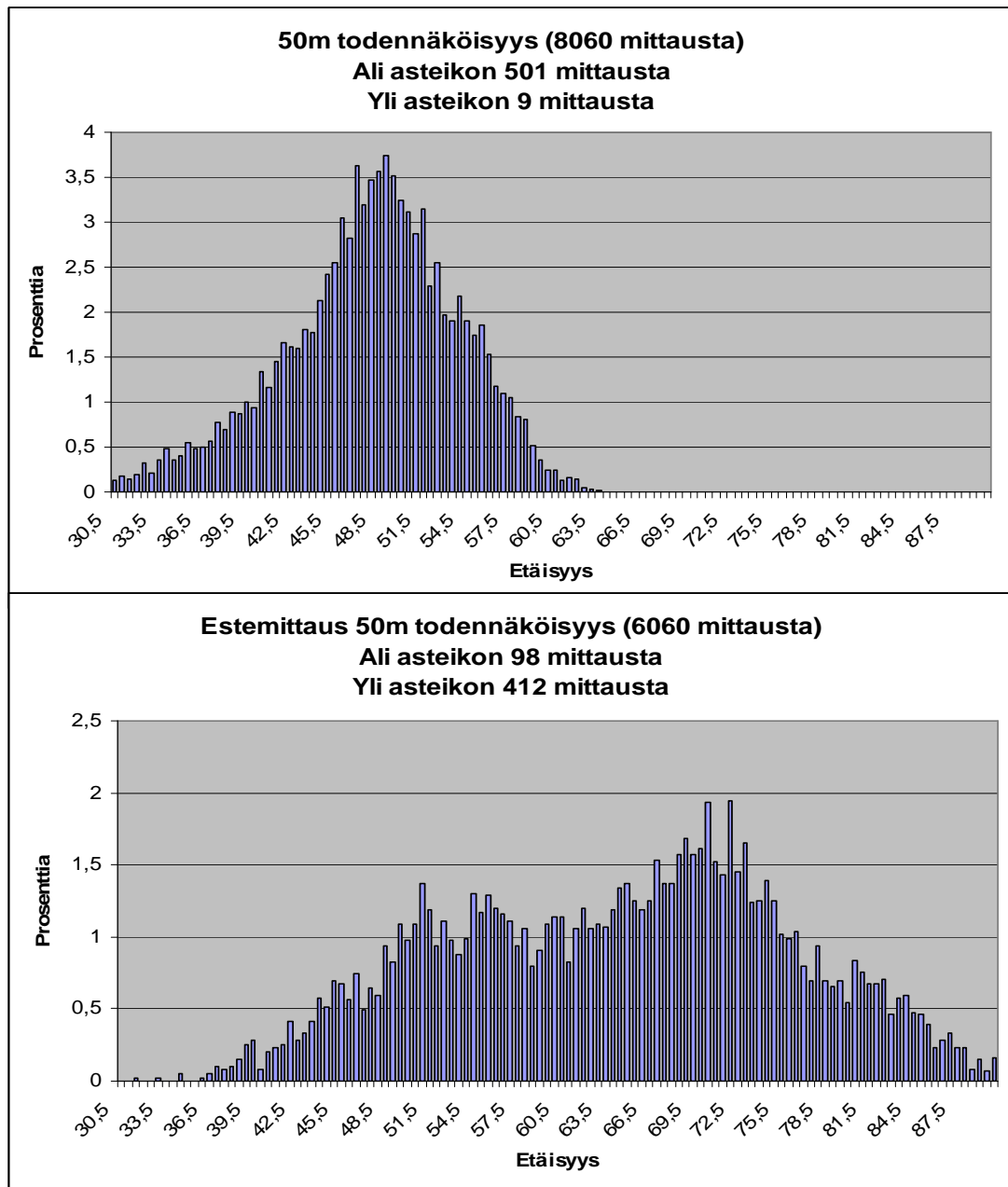
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 34 kappaletta
- ali asteikon mitattuja etäisyyksiä forward-suunnassa 35 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 57 kappaletta
- ali asteikon mitattuja etäisyyksiä reverse-suunnassa 63 kappaletta
- yli asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 91 kappaletta
- ali asteikon mitattuja etäisyyksiä yhteensä 98 kappaletta.



KUVA 37. Mittausosio 1: 50 metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

50 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu 50 metrin lähimaastoon. Mittaustulokset jakaantuivat tasaisesti ja todennäköisyysjakaumasta tuli selkeä. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu 70 metrin lähimaastoon. Monitie-etenemisen aiheuttamat ilmiöt ovat näillä etäisyyksillä hyvin havaittavissa. Kuva 38 havainnollistaa mittausosion 2 etäisyystuloksia.



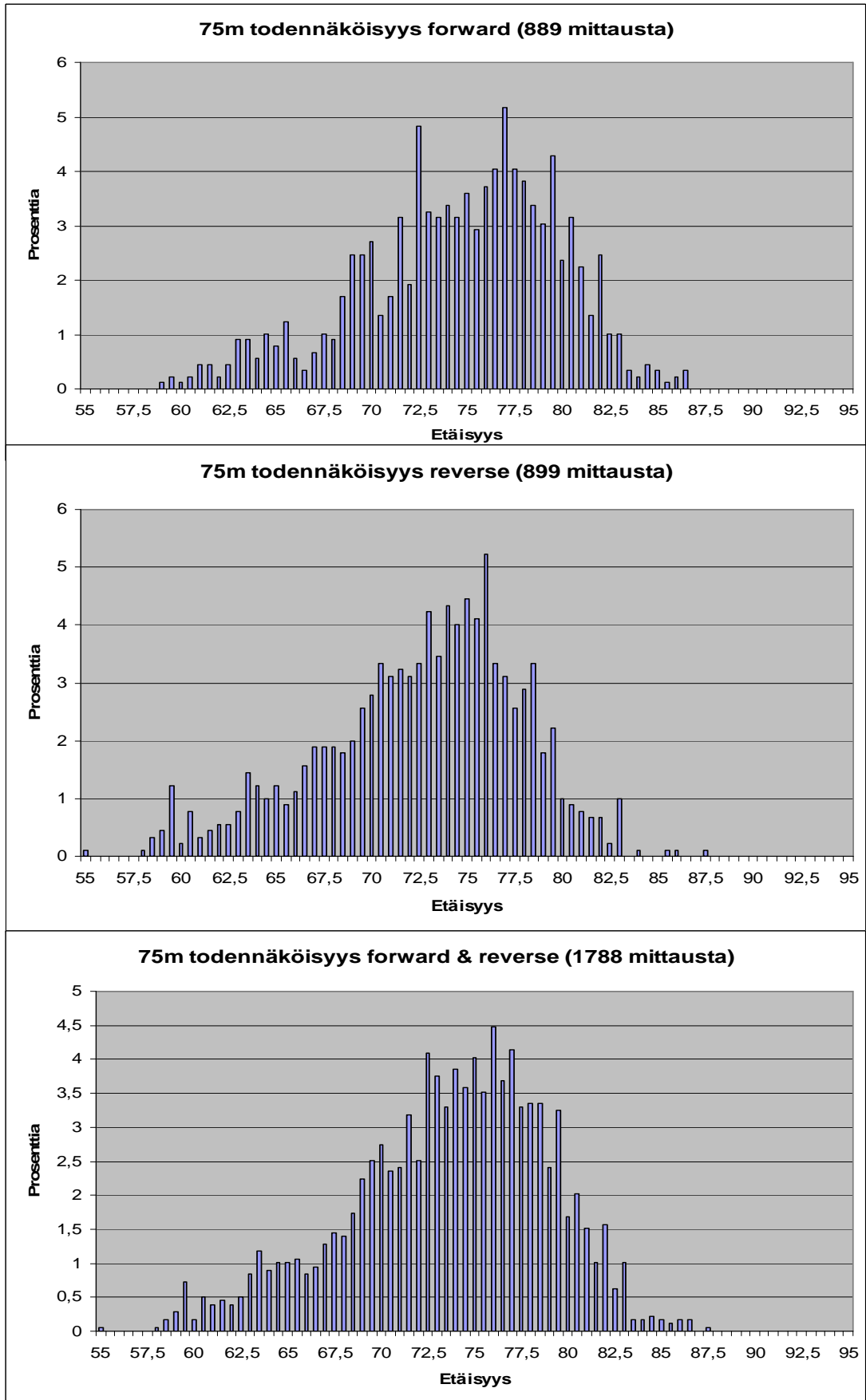
KUVA 38. Mittausosio 2: 50 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

7.1.11 75 metrin etäisyys

75 metrin etäisyyttä mitattaessa etäisyystulokset jakaantuivat seuraavanlaisesti:

Mittausosio 1

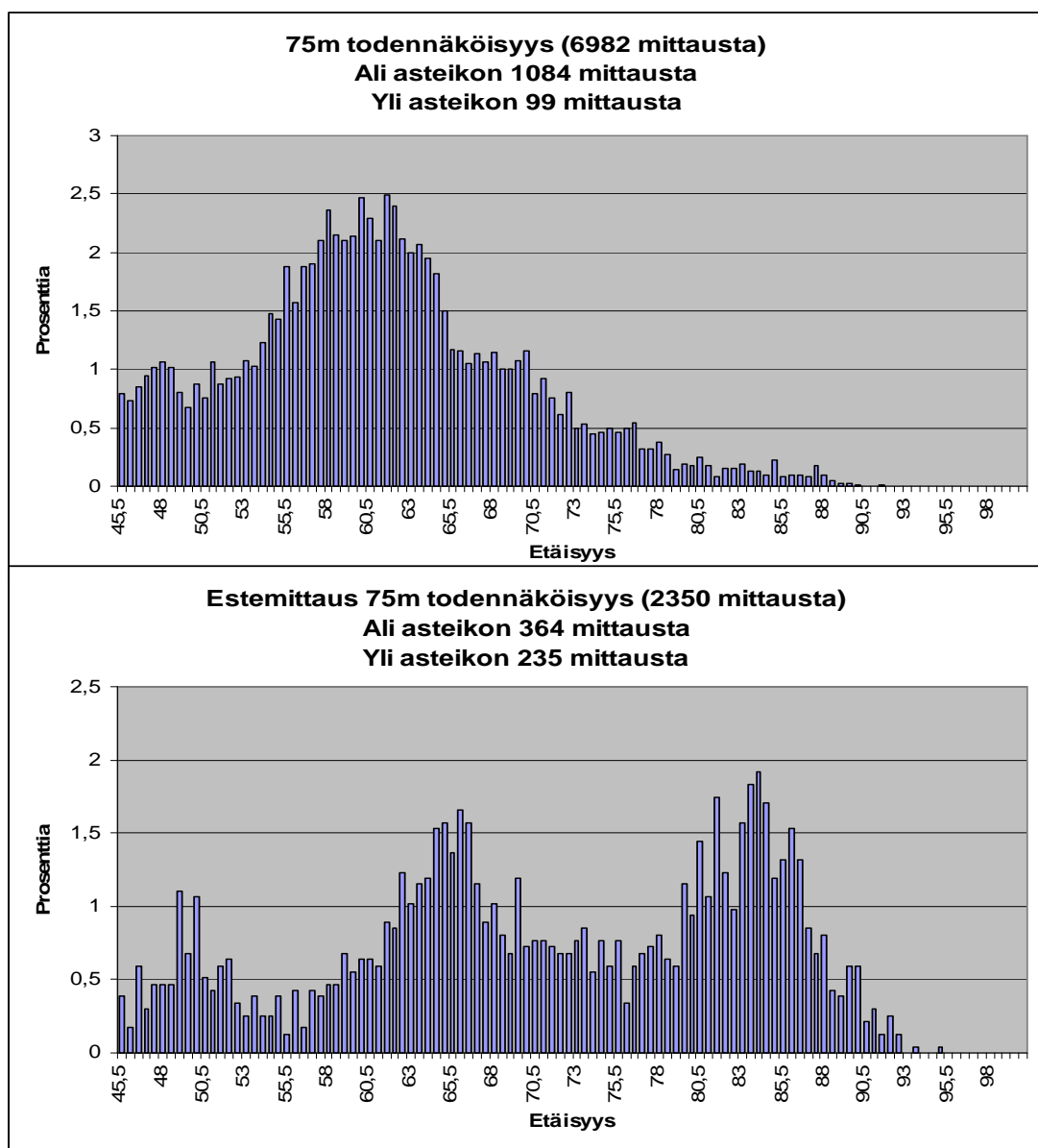
75 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu todennäköisyysjakaumassa 75 metrin lähimaastoon. Mittauksen suunnalla ei ollut merkittävää eroavaisuutta havaittavissa. Mittausosion 1 etäisyystulokset olivat kokonaisuudessaan erittäin hyviä näillä etäisyyksillä. Mittausosiossa 1 yli asteikon sijoittuneita etäisyystuloksia ei esiintynyt. Kuva 39 havainnollistaa mittausosion 1 etäisyystuloksia.



KUVA 39. Mittausosio 1: 75 metrin todennäköisyysjakaumat

Mittausosio 2

75 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu suoralla näköyhteydellä 60 metrin lähimaastoon. Vaihtelevuutta tuloksissa esiintyi siis huomattavasti enemmän mittausosion 1 tuloksiin verrattuna. Estemittauksessa korkein prosenttiosuus etäisyystuloksista sijoittuu 85 metrin lähimaastoon. Merkittävä osa etäisyystuloksista sijoittuu kuitenkin alkuperäistä mitattua etäisyyttä lyhyemmäksi. Kuva 40 havainnollistaa mittausosion 2 etäisyystuloksia.

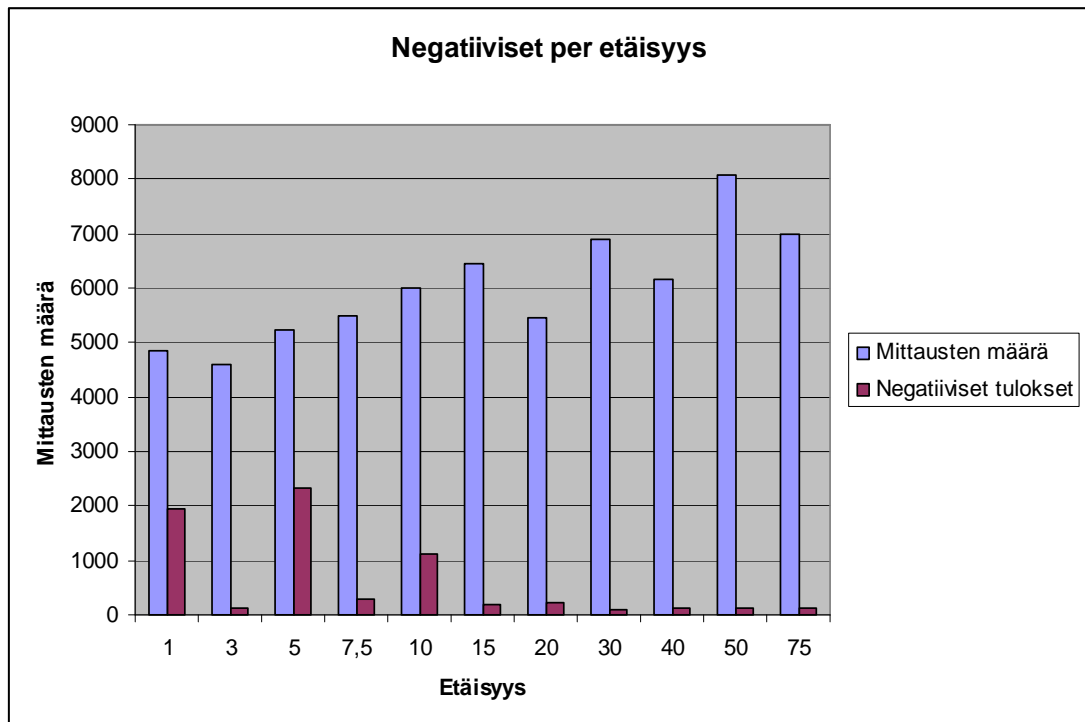


KUVA 40. Mittausosio 2: 75 metrin todennäköisyysjakaumat ja estemittaus

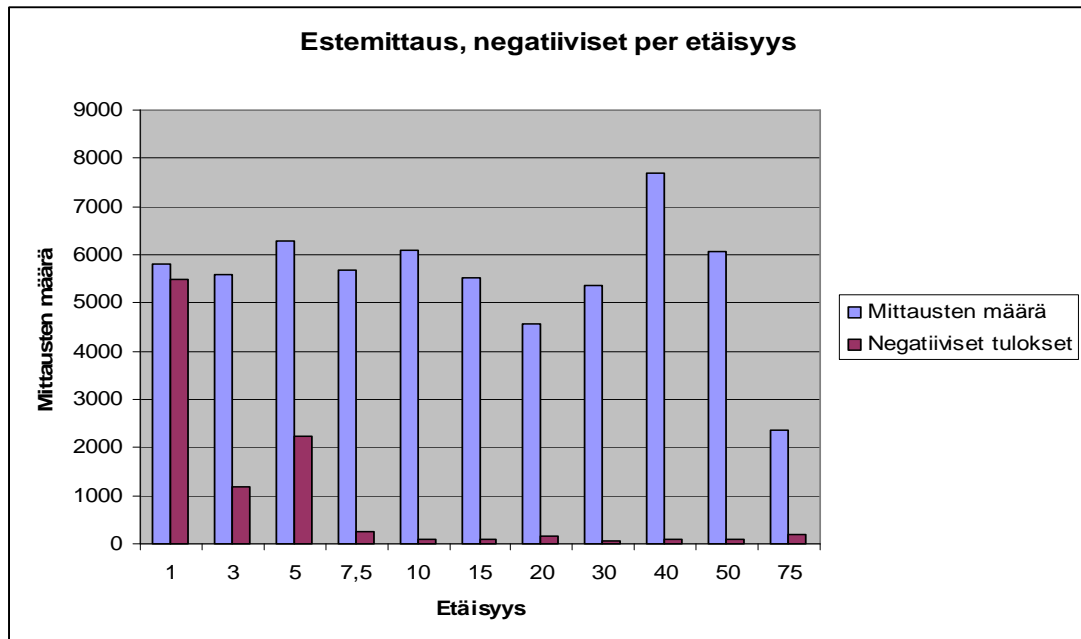
7.2 Negatiiviset mittaustulokset

Etäisyyttä mitattaessa Jennicin laitteet voivat saada negatiivisia mittaustuloksia järjestelmän kellovirheiden ja ulkopuolille häiriöille altistumisen takia. Työssä suoritettiin Jennic-laitteistolla raakamittauksia ja selvitettiin, kuinka suuri määrä mittauksista saa negatiivisia arvoja eri etäisyyksillä. Mittauksella pyrittiin havainnollistamaan Jennic-järjestelmän häiriöille altistumista ja virheellisten tuloksien esiintymistä eri etäisyyksillä.

Mittausten perusteella etäisyyttä kasvatettaessa negatiivisten mittaustulosten määrä suhteessa pienenee. Järjestelmän epävakaisuuden vuoksi negatiivisten mittaustulosten esiintyminen on lyhyillä etäisyyksilläkin vaihtelevaa. Kuva 41 havainnollistaa negatiivisten mittaustulosten esiintymistä eri etäisyyksillä suoralla näköyhteydellä. Kuva 42 havainnollistaa negatiivisten mittaustulosten esiintymistä, kun vastaanottimen edessä oli este.



KUVA 41. Negatiiviset mittaustulokset eri etäisyyksillä, suora näköyhteys

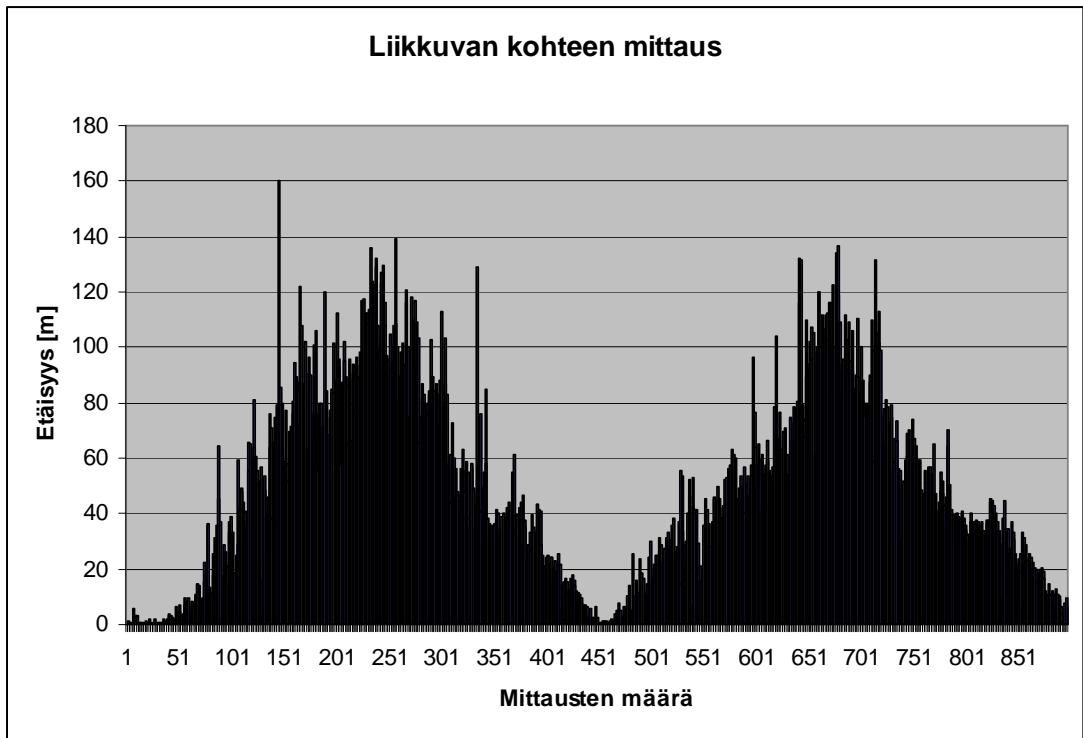


KUVA 42. Negatiiviset mittaukset eri etäisyyksillä, estemittaus

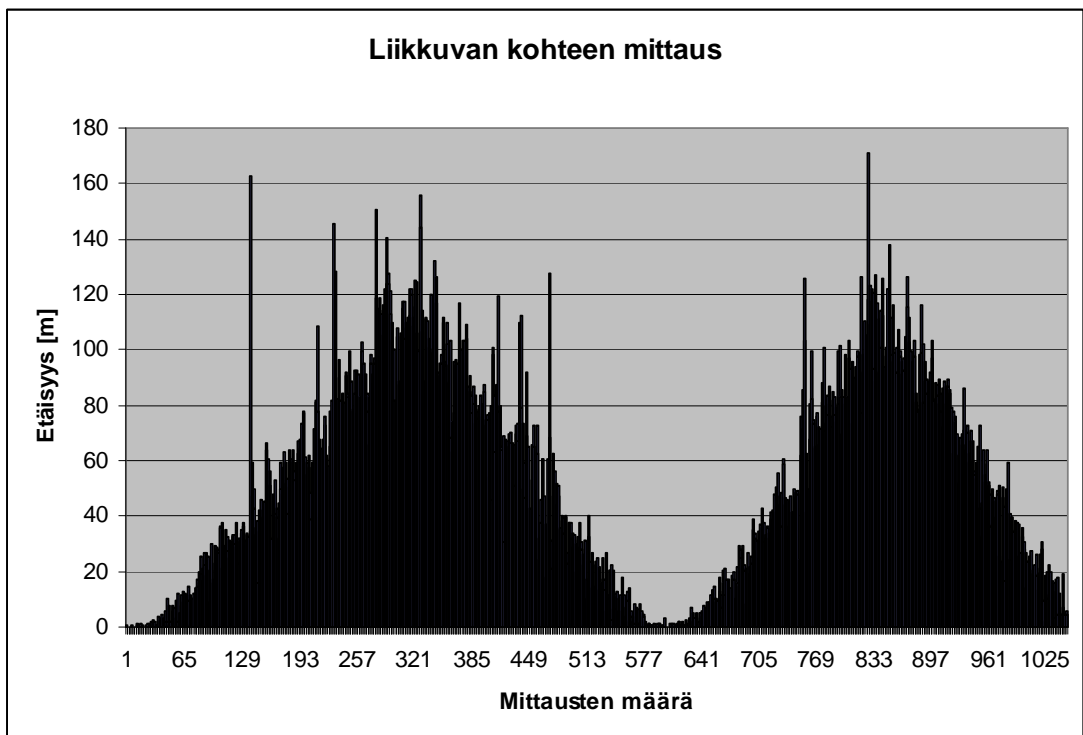
7.3 Liikkuva kohde

Liikkuvan kohteen mittauksella pyrittiin havainnollistamaan sitä, kuinka hyvin Jennicin laitteet pystyvät mittaamaan etäisyyttä liikkuvaan kohteeseen. Mittaus suoritettiin niin, että etäisyysmittausohjelmisto käynnistettiin, kun laitteiden välinen etäisyys oli nolla. Etäisyyttä kasvatettiin kävellen aina 100 metriin asti. Tämän jälkeen etäisyys laskettiin laitteiden välillä takaisin nollaan ja sama toimenpide toistettiin. Liikkuvan kohteen mittaukset suoritettiin suoralla näköyhteydellä. Liikkuvan kohteen mittaukset suoritettiin kahdessa eri kokonaisuudessa. Molemmista mittauskerroista tehtiin oma kaavionsa. Kuvalla pyritään havainnollistamaan häiriöpiikkien esiintymistä ja etäisyystulosten vaihtelevuutta.

Kokonaisuudessaan liikkuvan kohteen mittauksista ja jakaumista tuli melko hyviä ja selkeitä. Muutamia häiriöpiikkejä mittauksissa kuitenkin esiintyi, mutta jakaumissa on havaittavissa tasaista etäisyyden kasvattamista. Jakaumien huippukohdat tosin sijoittuvat hieman mitattua etäisyyttä korkeammalle, joten järjestelmä mittasi suurimman etäisyyden hieman liian pitkäksi. Kuvat 43 ja 44 havainnollistavat liikkuvan kohteen mittausta.



KUVA 43. Liikkuvan kohteen mittaus versio 1



KUVA 44. Liikkuvan kohteen mittaus versio 2

7.4 Maksimietäisyys

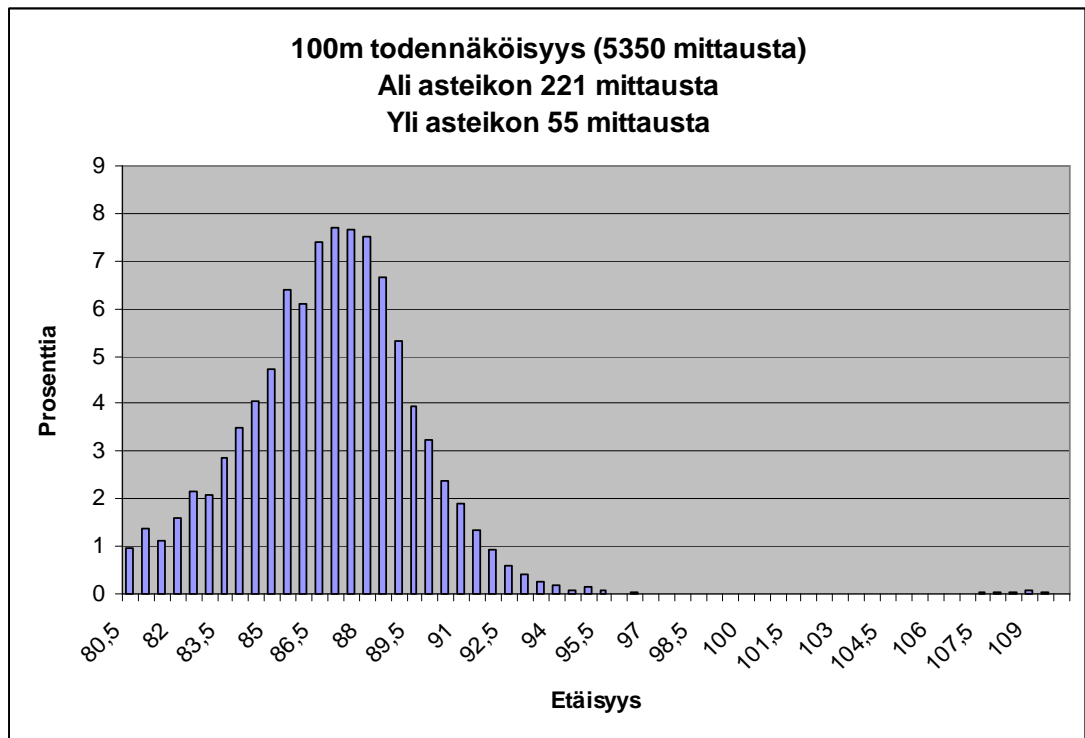
Maksimietäisyysmittauksilla pyrittiin havainnollistamaan Jennic-järjestelmän toimintaetäisyyttä, jolloin etäisyysmittauksia pystytään vielä suorittamaan. Mittaukset suoritettiin niin, että koordinaattori oli liikkuva laite ja päätelaite oli kiinni pc:ssä. Etäisyydet mitattiin mittanauhan avulla.

Laitteistot käynnistettiin aina uudestaan kun etäisyyttä kasvatettiin, joten järjestelmä joutui muodostamaan verkon aina uudestaan. Maksimietäisyyttä tavoitellessa etäisyyttä kasvatettiin niin pitkälle, että järjestelmä ei enää lähettänyt datapaketteja vastaanottimelle eikä yhteys muodostunut.

Etäisyys mitattiin aluksi 100 metrin etäisyydeltä. Etäisyyttä kasvatettiin niin pitkälle, että maksimietäisyys löydettiin, jolloin datapaketit saatiin vielä luotettavasti vastaanotettua.

7.4.1 100 metriä

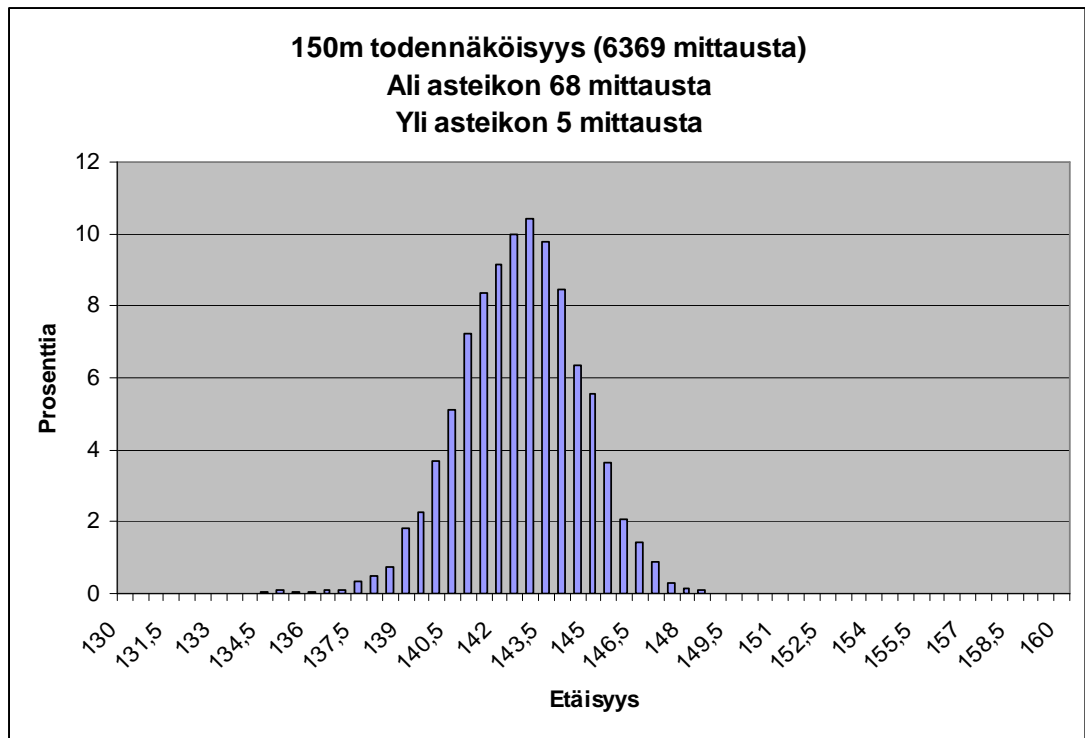
100 metrin etäisyyttä mitattaessa järjestelmä vastaanotti kaikki datapaketit, eikä yli asteikon menneitä virheellisiä datapaketteja tullut merkittävää määrää. Järjestelmä toimii siis luotettavasti 100 metrin etäisyydellä. 100 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu 90 metrin lähimaastoon. Järjestelmä mittasi etäisyyden siis hieman liian lyhyeksi alkuperäiseen mitattuun etäisyyteen verrattuna. Kuva 45 havainnollistaa 100 metrin mittausta.



KUVA 45. 100 metrin etäisyysmittaus ja todennäköisyysjakauma

7.4.2 150 metriä

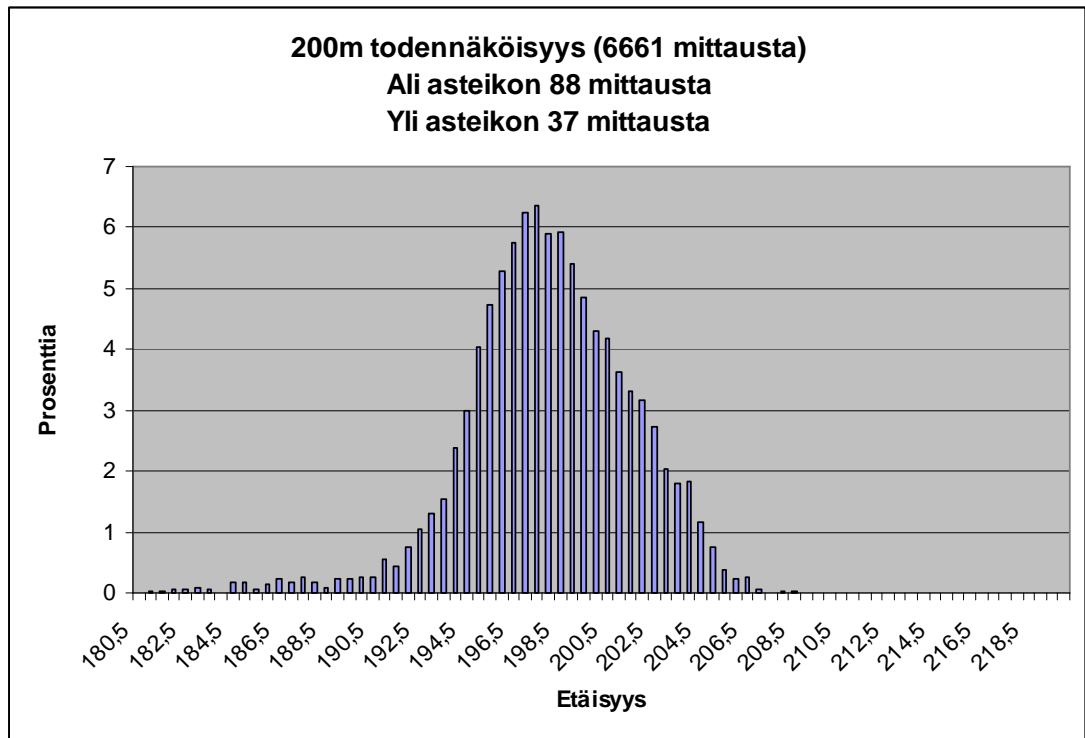
150 metrin etäisyyttä mitattaessa järjestelmä vastaanotti edelleen kaikki datapaketit, eikä yli asteikon menneitä datapaketteja tullut merkittävää määrää. Todennäköisyysjakaumassa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu 143 metrin lähimaastoon. Virheellisiä ali asteikon menneitä datapakettejakin tuli suhteessa mittauksiin pieni määrä, joten järjestelmä toimii luotettavasti vielä näillä etäisyyksillä. Kuva 46 havainnollistaa 150 metrin etäisyystuloksia.



KUVA 46. 150 metrin etäisyysmittaus ja todennäköisyysjakauma

7.4.3 200 metriä

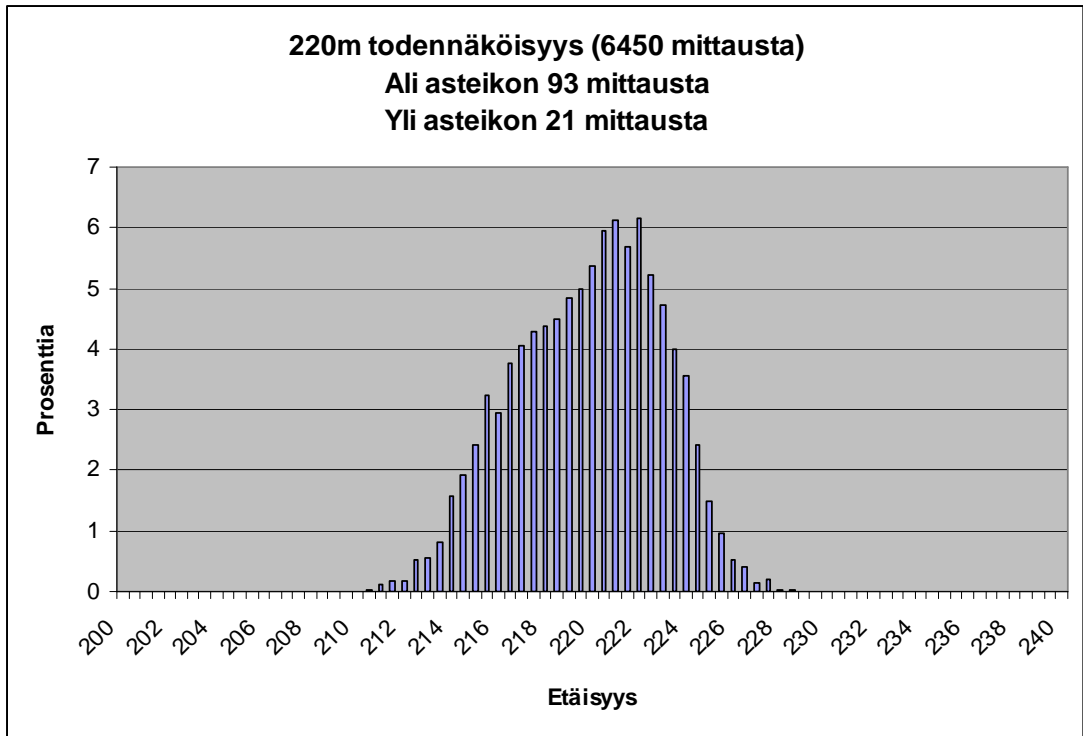
200 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittui 200 metrin puolin ja toisin, joten näillä etäisyyksillä etäisyysmittaus toimii suhteellisen tarkasti. Yli asteikon menneitä virheellisiä tuloksia ei tullut kokonaismittauksiin nähden merkittävää määrää, joten mittauksia voi pitää näillä etäisyyksillä vielä suhteellisen luotettavana. Kuva 47 havainnollistaa 200 metrin etäisyystuloksia.



KUVA 47. 200 metrin etäisyysmittaus ja todennäköisyysjakauma.

7.4.4 220 metriä

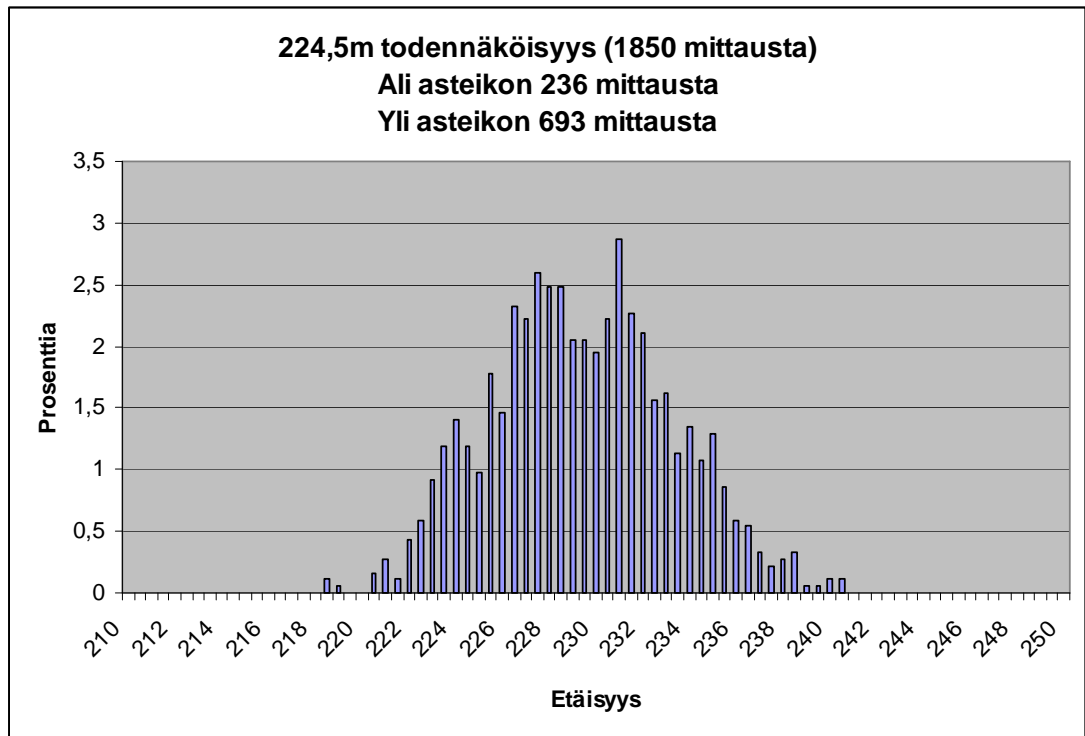
220 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu 220 metrin puolin ja toisin, joten etäisyysmittaukset olivat melko tarkkoja. Ali asteikon sekä yli asteikon menneitä tuloksia ei tullut suhteessa kokonaisuuttamme merkittävää määrää, joten etäisyysmittauksia voi pitää näillä etäisyyksillä vielä suhteellisen luotettavana. Kuva 48 havainnollistaa 220 metrin etäisyystuloksia.



KUVA 48. 220 metrin etäisyysmittaus ja todennäköisyysjakauma

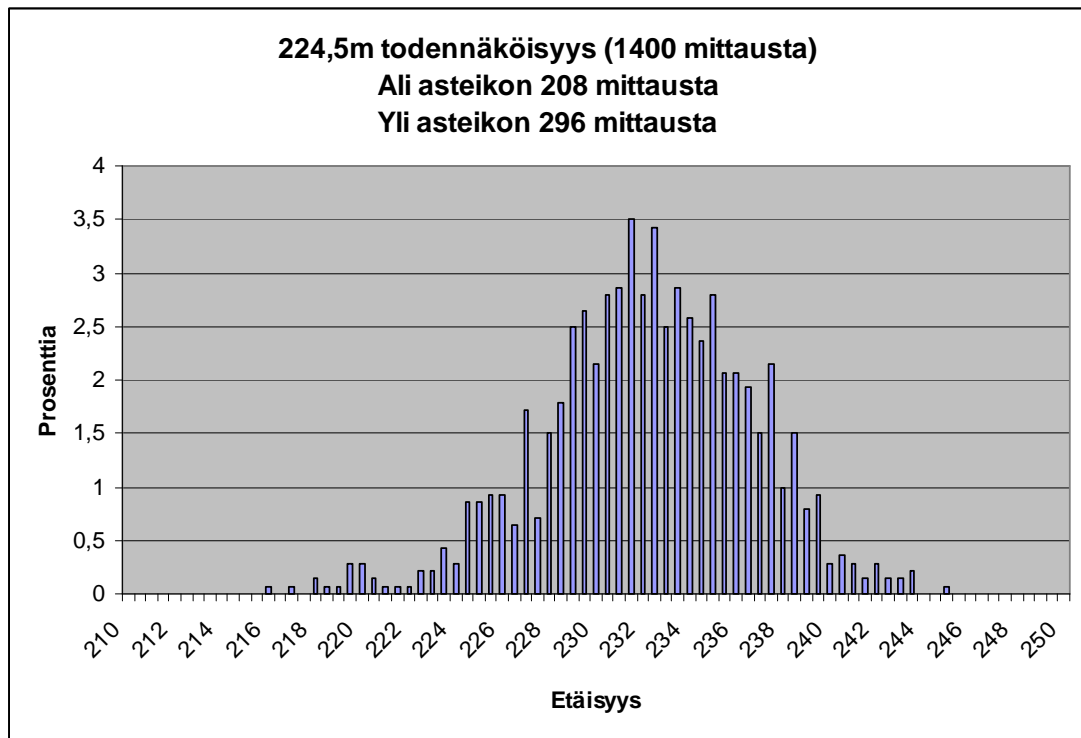
7.4.5 224,5 metriä

224,5 metrin etäisyyttä mitattaessa korkein prosenttiosa etäisyystuloksista sijoittuu 230 metrin puolin ja toisin, joten mittaukset sijoittuivat hieman liian pitkäksi. Merkittävää eroa ei mitattavaan etäisyyteen nähden kuitenkaan ollut, joten mittausta voi pitää vielä suhteellisen hyvänä. Huomioitavaa on, että ali asteikon menneitä ja yli asteikon menneitä mittaustuloksia tuli suhteessa mittauksiin nähden yllättävän paljon. Tästä voi tehdä johtopäätöksen, että järjestelmä alkaa toimia ääri rajoilla. Mittauksia tuli perille suhteessa harvemmin, joten osa paketeista hukkui matkalle. Kuva 49 esittää 224,5 metrin etäisyysmittausta.



KUVA 49. 224,5 metrin etäisyysmittaus ja todennäköisyysjakauma

Kun 224,5 metrin etäisyysmittaus toistettiin, todennäköisyysjakauman suurin prosenttiosa mittauksista sijoittui lähes samalle etäisyydelle. Huomioitavaa on, että suhteellisen korkea prosenttiosa mittauksista meni yli asteikon ja ali asteikon toisessakin mittauksessa. Lisäksi mittauksia tuli perille suhteessa harvemmin, joten maksimietäisyys on lähellä. Kuva 50 havainnollistaa 224,5 metrin toista etäisyysmittausta.



KUVA 50. 224,5 metrin etäisyysmittauksen toinen versio ja todennäköisyysjakauma

Etäisyyttä kasvatettaessa yhteyttä ei saanut enää muodostettua kuin satunnaisesti ja datapaketteja tuli vain harvoin perille. Tästä muodostuu johtopäätös, että maksimietäisyys on tavoitettu.

7.5 Datan vastaanottokyky

Työssä selvitettiin myös, kuinka suuren prosenttiosuuden järjestelmä vastaanottaa lähetetyistä datapaketeista. Työssä tutkittiin myös vastaavasti sitä, kuinka suuren määrän järjestelmä hukkaa datapaketteja matkalle suhteessa mitattuun etäisyyteen. Teoriassa järjestelmä kykenee vastaanottamaan ihanneolosuhteissa 220 mittaustulosta sekunnissa.

Järjestelmän datan lähetys on toteutettu niin, että kyselyitä tehdään 10 kappaletta peräkkäin molempiin suuntiin. Datan vastaanottokykyä tutkittiin 200 ensimmäisen vastaanotetun datapaketin perusteella. Järjestelmä vastaanotti kaikki lähetetyt datapaketit jokaisella etäisyydellä. Mittauksien perusteella

järjestelmä lähettää datan uudelleen niin kauan, että lähetetty datapaketti löytää kohteeseensa. Vastaanottokykyä tutkittiin mittausosion 2 suoralla näköyhteydellä toteutetuista mittauksista. Taulukko 2 kuvastaa lähetettyjen ja vastaanotettujen datapakettien määrää eri etäisyyksillä.

TAULUKKO 2. Vastaanotetut datapaketit

Etäisyys [m]	Lähet. paketteja	Vast.otettuja paketteja	Yhteensä
1	200	200	100 %
3	200	200	100 %
5	200	200	100 %
7,5	200	200	100 %
10	200	200	100 %
15	200	200	100 %
20	200	200	100 %
30	200	200	100 %
40	200	200	100 %
50	200	200	100 %
75	200	200	100 %
100	200	200	100 %
150	200	200	100 %
200	200	200	100 %
220	200	200	100 %
224,5	200	200	100 %

Koska järjestelmä vastaanotti kaikki lähetetyt datapaketit, ei taulukosta näe todellista lähetettyjen datapakettien määrää. Osa datapaketeista ei löydy vastaanottimelle ja ne pitää lähettää uudelleen. Näin ollen datan vastaanottokykyä pitää tutkia aikaleimojen perusteella. Seuraavassa taulukossa on tutkittu jokaisella etäisyydellä vastaanotettavien datapakettien määrää ja käytettyä aikaa. Näin ollen pystytään laskemaan datan todellinen vastaanottokyky ja hukattujen datapakettien määrä vertaamalla saatua tulosta teoreettiseen arvoon. Taulukko 3 kuvastaa todellista datan vastaanottokykyä.

TAULUKKO 3. Datan vastaanottokyky

			Teoreettinen maksimi 220 vastaanotettua datapakettia sekunnissa	
Etäisyys [m]	Vast. otettu	Mitattu aika [s]	Sekunnissa	Datapaketteja vast. otettu [%]
1	4850	21,6	224,54	102,06
3	4591	22,5	204,04	92,75
5	5220	24,7	211,34	96,06
7,5	5501	26,2	209,96	95,44
10	6010	28,6	210,14	95,52
15	6460	31,2	207,05	94,11
20	5451	26	209,65	95,30
30	6882	33,1	207,92	94,51
40	6170	34,7	177,81	80,82
50	8060	39,2	205,61	93,46
75	6982	38,1	183,25	83,30
100	5350	25,8	207,36	94,26
150	6369	30,3	210,20	95,54
200	6661	32,1	207,51	94,32
220	6450	30,7	210,10	95,50
224,5	1850	43	43,02	19,56
224,5 v. 2	1400	25	56,00	25,45

Taulukosta 3 nähdään, että järjestelmä toimii vakaasti ja luotettavasti datan vastaanottamisen kannalta aina maksimietäisyydelle asti. Kun maksimaalinen kantomatka on saavutettu, datan vastaanottokyky romahtaa. Kuva 51 esittää datan vastaanottokykyä eri etäisyyksillä graafisessa muodossa.



KUVA 51. Datan vastaanottokyky eri etäisyyksillä

7.6 Tarkkuuden parantaminen

Mittausohjelmistoa voidaan kehittää paremmaksi kokonaisuudeksi siten, että annetaan etäisyysmittauksille tiettyjä ehtoja, joiden pitää toteutua onnistuneen mittauksen suorittamiseksi. Jos etäisyysmittaukselle annetaan ehto, ettei mitattava lukema voi olla tiettyjen rajojen ulkopuolella, pudotetaan tämä pois etäisyysmittauksesta, koska tulos heikentäisi etäisyyden tarkkuutta.

Kun mittauksia suoritetaan, koko ajan laskettavalla keskiarvolla saataisiin keskimääräinen mitattava etäisyys laskettua. Mittaustulokset muuttuvat tarkemmaksi, kun mitattavia parametreja otetaan enemmän. Jennic-laitteistolla mitattava etäisyyden vaihteluväli on niin suuri, että keskiarvon käyttäminen on järkevää etäisyyttä mitattaessa. Etäisyyden tarkkuutta saadaan parannettua siten, että keskiarvoon verrattuna mitattavien etäisyyksien pitää olla tiettyjen raja-arvojen sisällä. Mikäli virhe mitattavaan kohteeseen kasvaa liian suureksi, ei ole järkevää ottaa sitä mukaan koko ajan laskettavaan keski-

määräiseen etäisyyteen. Raja-arvojen ulkopuolella olevia mittaustuloksia tulee Jennic-laitteistolla vaihtelevasti järjestelmän häiriöille altistumisen, kellovirheiden ja monitie-etenemisen vuoksi.

Jos mitattavaan etäisyyden keskiarvoon nähden virhe olisi esimerkiksi 20 %, voitaisiin tämä vielä ottaa huomioon etäisyysmittauksissa. Kaikki etäisyydet, joissa virhe kasvaa suuremmaksi, pudotettaisiin pois mittaustuloksista. Esimerkiksi jos keskiarvo mittauksella olisi 10 metriä, sallittaisiin 8–12 metrin mittaukset. Jos raja-arvoa pienennettäisiin esimerkiksi 10 %:iin mitattavasta etäisyyden keskiarvosta, mittaustuloksista saadaan tarkempia, mutta tuloksien mittaaminen kestää kauemmin. Raja-arvoa voitaisiin säätää sen tarpeen mukaan, kuinka tarkkoja tuloksia järjestelmällä on saatava aikaan. Kun raja-arvoa pienennetään, saadaan mittausalgoritmista tehokkaampi ja näin ollen etäisyysmittauksien keskiarvosta tarkempi.

Etäisyysmittauksia suoritettaessa on syytä suorittaa tasainen määrä mittauksia molemmista päistä eli päätelaitteesta koordinaattorille ja koordinaattoris- ta päätelaitteelle mahdollisimman tarkkojen mittaustuloksien tasapainottami- sen vuoksi. Jos etäisyysmittauksia suorittaa pelkästään yhteen suuntaan, voi järjestelmän etäisyyden tarkkuus heikentyä.

Jennic-laitteistossa antennien läheisyydessä sijaitsee piirilevyllä useita pin- nejä sekä liittimiä, jotka voivat altistaa laitteiston ulkopuoliselle häiriöille. Mit- taustulosten vaihtelevuutta voitaisiin parantaa rakentamalla laitteille kotelot, jotka ovat ulkopuolelta metallivuorattuja. Näin saataisiin laitteistossa muut komponentit piilotettua paitsi antenni.

Kiihtyvyyssanturia käyttämällä saataisiin etäisyysmittaukselle suuntaa- antavaa etäisyyttä kohteeseen, jolloin raja-arvoja käyttämällä saataisiin vas- taanotettava data pysymään tiettyjen rajojen sisällä. Tällä saataisiin paran- nettua keskimääräistä etäisyyden tarkkuutta.

8 ETÄISYYDEN TARKKUUS

Luvussa tutkitaan etäisyyden tarkkuutta suoralla näköyhteydellä ja estemitauksen perusteella. Luku käsittelee myös mittaustulosten keskimääräistä poikkeavuutta alkuperäisestä mitatusta etäisyydestä. Etäisyyden tarkkuutta tutkitaan molempiin mittaussuuntiin suoritetuista mittauksista.

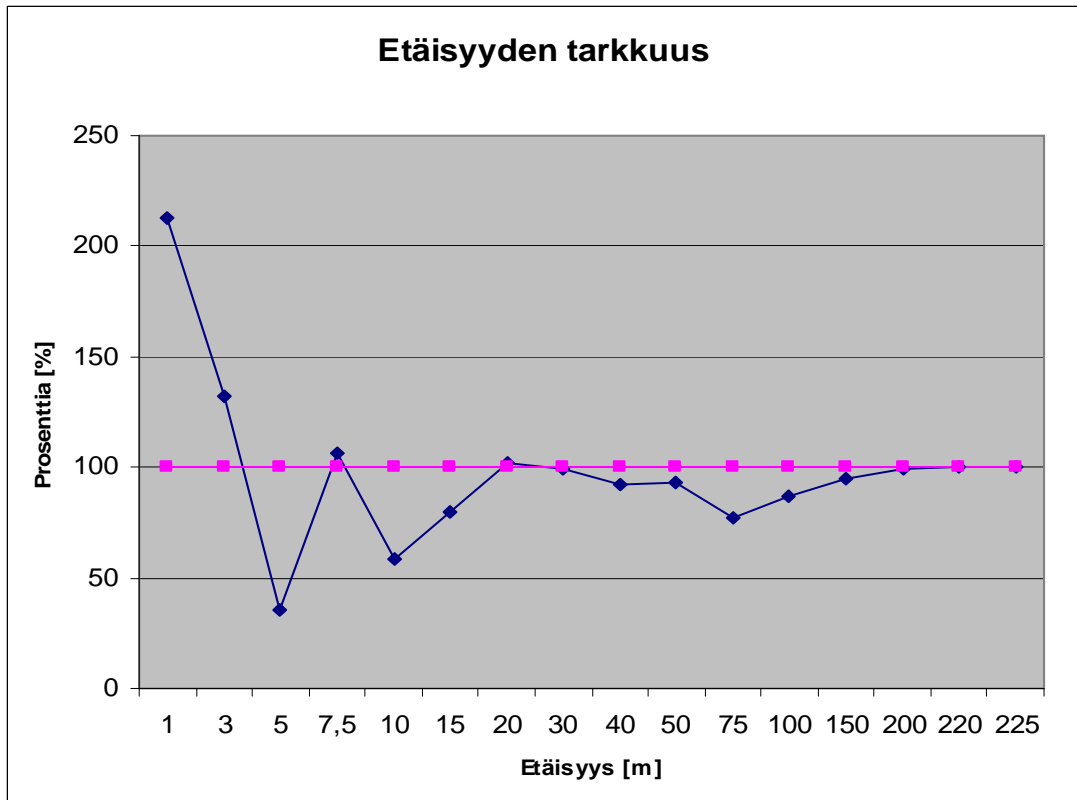
8.1 Suora näköyhteys

Taulukko 4 kuvaa etäisyysmittausten vaihtelua suoralla näköyhteydellä. Taulukossa tutkitaan kokonaismittausten keskiarvoa, keskihajontaa ja varianssia. Etäisyystuloksista on suodatettu pois negatiiviset mittaustulokset, koska ne eivät vastaa todellisuutta vaan ovat järjestelmän häiriölle altistumisesta ja kellovirheistä johtuvia tuloksia. Taulukosta nähdään, kuinka vaihtelevia tuloksia järjestelmä mittaa. Keskiarvon perusteella poikkeavuutta ei välttämättä tule alkuperäiseen mitattuun etäisyyteen nähden kuitenkaan kovinkaan paljon. Kokonaisvaihteluväli etäisyystuloksissa on kuitenkin hyvin laaja. Järjestelmä mittaa etäisyyden hyvin usein liian lyhyeksi alkuperäiseen mitattuun etäisyyteen verrattuna.

TAULUKKO 4. Datan yhteenveto suoralla näköyhteydellä

	Suora näköyhteys				
[m]	Keskiarvo	Keskihajonta	Varianssi	Max [m]	Min [m]
1,00	2,13	1,49	2,23	7,39	0,01
3,00	3,97	1,92	3,69	10,10	0,01
5,00	1,78	1,26	1,59	7,22	0,01
7,50	7,95	3,85	14,85	18,03	0,02
10,00	5,89	3,39	11,46	15,30	0,01
15,00	11,91	3,21	10,33	19,02	0,01
20,00	20,41	7,61	57,87	37,81	0,00
30,00	29,83	5,64	31,79	44,81	0,00
40,00	36,98	11,55	133,41	86,22	0,00
50,00	46,39	8,74	76,41	63,23	0,19
75,00	58,08	10,96	120,23	91,05	10,01
100,00	86,54	3,94	15,55	126,14	41,58
150,00	142,41	2,47	6,11	148,43	70,06
200,00	197,70	4,35	18,91	208,26	96,02
220,00	219,59	3,11	9,68	228,38	210,17
224,50	224,50	26,91	724,09	423,57	15,41

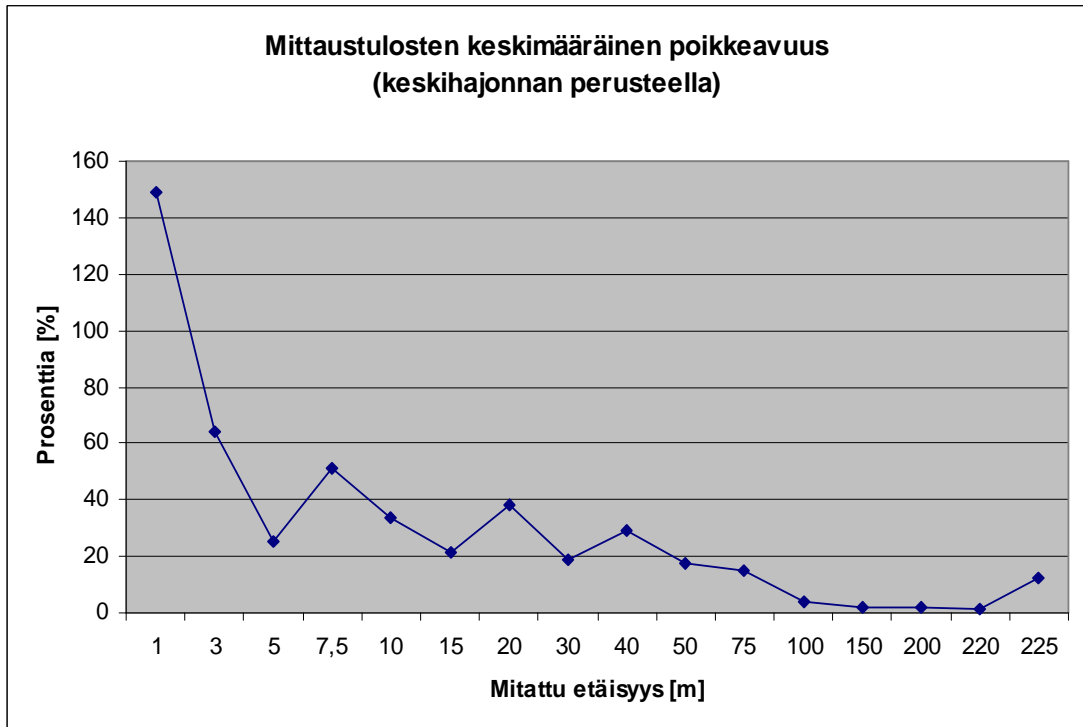
Kuva 52 esittää etäisyyden tarkkuutta suoralla näköyhteydellä keskiarvon perusteella. Kuva esittää yhteenvetona sitä, kuinka paljon etäisyyksmittausten keskiarvot poikkeavat todellisesta mitatusta etäisyydestä. Kuvasta nähdään selkeästi, kuinka etäisyyttä kasvatettaessa järjestelmän tarkkuus paranee. Järjestelmä toimii luotettavasti aina maksimietäisyydelle saakka. Kuva havainnollistaa hyvin sitä, kuinka vaihtelevia tuloksia järjestelmä mittaa lyhyemmillä etäisyyksillä.



KUVA 52. Etäisyyden tarkkuus keskiarvon perusteella

Mittausten perusteella järjestelmälle voisi määrittää karkean toimintaetäisyyden noin 20–220 metrin välimatkan mittaukseen, jolloin järjestelmä toimii luotettavimmin ja tasaisimmin. Etäisyyttä kasvatettaessa mittaustulokset jakaantuvat tasaisemmin ja todennäköisyysjakaumista tulee selkeämpiä. Etäisyydsmittausten perusteella alle 20 metrin etäisyydsmittauksia ei siis ole järkevää ottaa huomioon paikannusjärjestelmää toteutettaessa.

Kuva 53 esittää etäisyydustulosten keskimääräistä poikkeavuutta alkuperäisestä mitatusta etäisyydestä. Kuvasta nähdään hyvin, että etäisyyttä kasvatettaessa mittaustulosten keskimääräinen poikkeavuus pienenee. Kuva esittää hyvin sitä, kuinka järjestelmä toimii luotettavammin etäisyyttä kasvatettaessa.



KUVA 53. Etäisyyden tarkkuus keskihajonnan perusteella

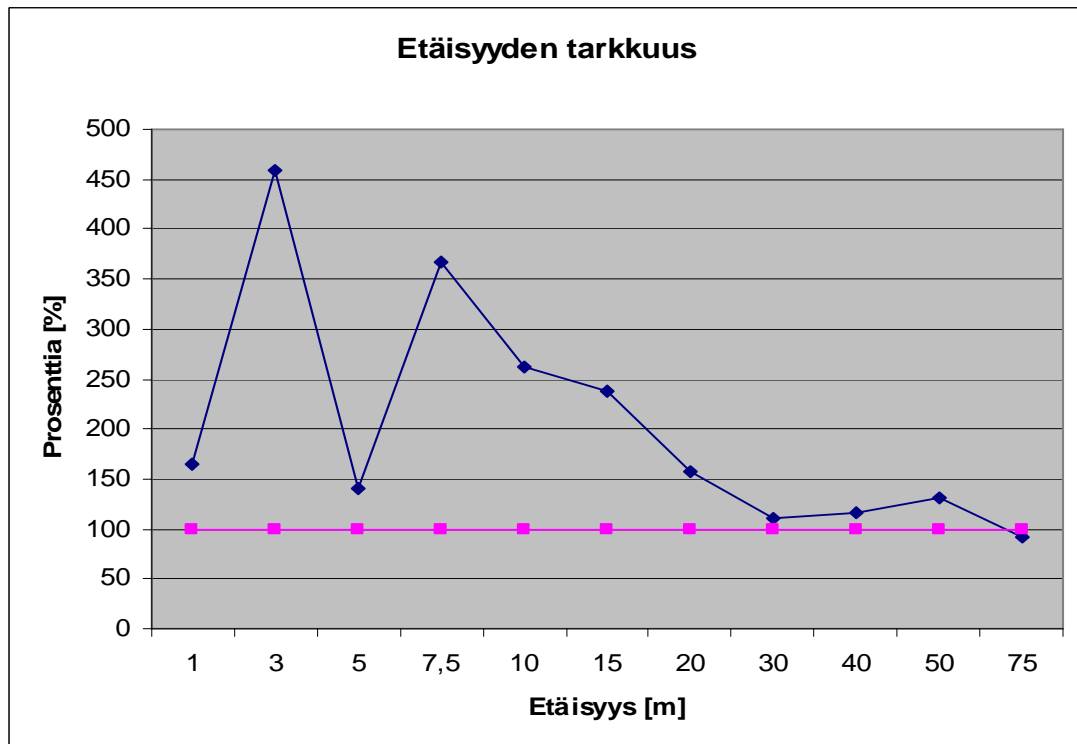
8.2 Estemittaus

Taulukko 5 kuvastaa etäisyystulosten keskimääräistä vaihtelua estemittauksessa. Estemittauksessa keskiarvot ovat suurempia verrattuna suoralla näköyhteydellä toteutettuun mittaukseen. Kokonaisvaltaisesti myös mitatut maksimietäisyydet ovat pidempiä. Radiosignaali ei pääse suorinta tietä vastaanottimeen vaan heijastuu ulkopuolisista objekteista ja mittaa näin matkan pidemmäksi. Taulukko kuvastaa etäisyystulosten vaihtelua eri etäisyyksillä estemittauksessa.

TAULUKKO 5. Datan yhteenveto estemittauksessa

	Estemittaus				
[m]	Keskiarvo	Keskihajonta	Varianssi	Max [m]	Min [m]
1,00	1,64	1,90	3,60	13,72	0,01
3,00	13,75	6,51	42,36	26,62	0,01
5,00	6,99	5,07	25,67	37,17	0,01
7,50	27,51	14,65	214,63	112,51	0,01
10,00	26,26	4,99	24,94	53,72	0,68
15,00	35,64	11,44	130,85	109,62	1,26
20,00	31,64	11,04	121,87	68,18	0,02
30,00	33,23	7,13	50,80	99,23	0,22
40,00	46,09	10,14	102,73	140,55	0,70
50,00	65,94	13,94	194,43	118,63	0,19
75,00	68,56	17,50	306,19	139,56	11,77

Kuva 54 esittää etäisyyden tarkkuutta estemittauksessa keskiarvon perusteella. Kuva esittää yhteenvetona sitä, kuinka paljon etäisyyksmittausten keskiarvot poikkeavat todellisesta mitatusta etäisyydestä. Kuvasta nähdään hyvin, kuinka etäisyyden tarkkuus paranee etäisyyttä kasvatettaessa. Lisäksi monitie-etenemisen aiheuttamat ilmiöt ovat suhteessa pienempiä, kun etäisyyttä kasvatetaan.



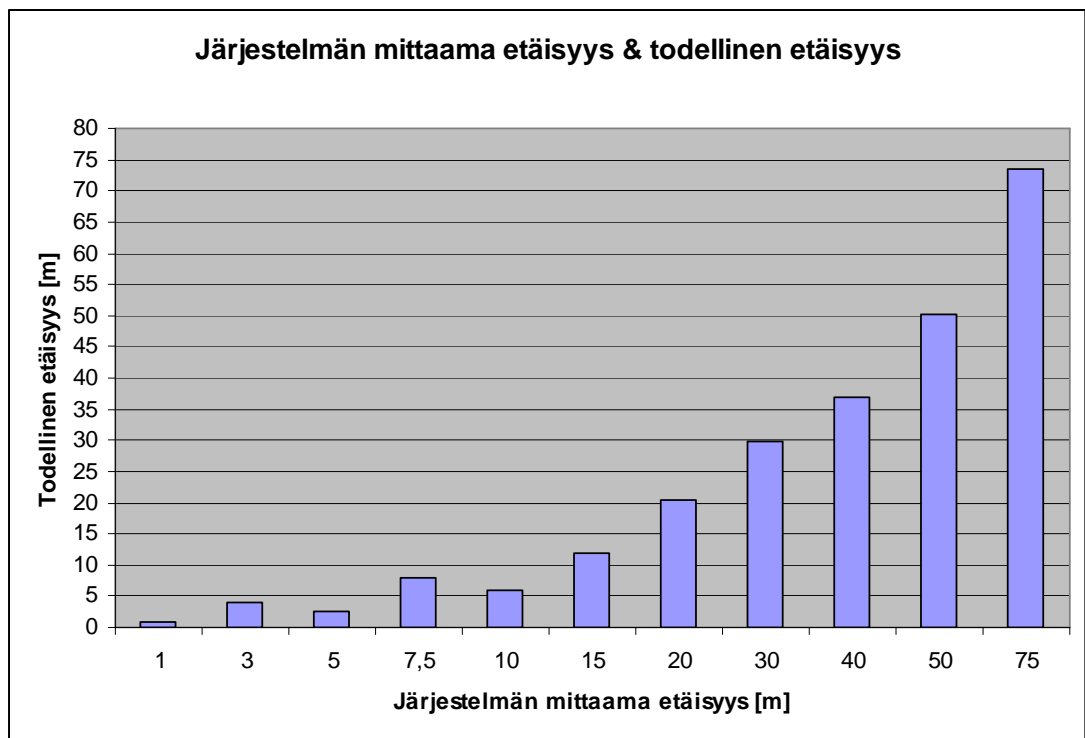
KUVA 54. Etäisyyden tarkkuus keskiarvon perusteella estemittauksessa

Mittauksia suoritettiin kokonaisuudessaan kahdessa mittausosiossa. Kun molemmat mittausosiot yhdistetään, saadaan kokonaisvaltaisempi kuva etäisyyden tarkkuudesta. Mittausosioiden tuloksia vertaamalla ja tarkempaa tulosta käyttämällä saadaan esitettyä käytännön tilanne, jossa vertailukohteita käytetään useampia. Järjestelmän epävakaisuuden vuoksi etäisyystuloksista voi tulla hyvin vaihtelevia, joten sen vuoksi on järkevää käyttää useampaa vertailukohdetta. Jos yhden vertailukohteen tulokset poikkeavat selkeästi mitatusta etäisyydestä, voidaan tulokset näin ollen pudottaa pois mittauksista. Kuvalla 55 pyritään havainnollistamaan sitä, kuinka tarkkoja tuloksia järjestelmällä voidaan saada metrimääräisesti mitattua. Taulukko 6 kuvastaa mittausosion 1 ja mittausosion 2 keskiarvoja sekä näiden kahden vertailukohteen välillä olevaa tarkempaa etäisyystulosta.

TAULUKKO 6. Mittausosion 1 ja 2 etäisyystulosten keskiarvot

	Mittausosio 1		Mittausosio 2		Tarkempi
Mitattu etäisyys [m]	Keskiarvo [m]	Mitattu etäisyys [m]	Keskiarvo [m]	Mitattu etäisyys [m]	Keskiarvo [m]
1	0,71	1,00	2,13	1	0,71
3	4,72	3,00	3,97	3	3,97
5	2,45	5,00	1,78	5	2,45
7,5	9,08	7,50	7,95	7,50	7,95
10	15,21	10,00	5,89	10,00	5,89
15	23,85	15,00	11,91	15,00	11,91
20	25,13	20,00	20,41	20,00	20,41
30	26,27	30,00	29,83	30,00	29,83
40	48,17	40,00	36,98	40,00	36,98
50	50,09	50,00	46,39	50	50,09
75	73,38	75,00	58,08	75	73,38

Kuvasta 55 nähdään, että vaikka järjestelmä on epävakaainen ja mittauksien tulokset vaihtelevia, voidaan järjestelmällä saada suhteellisen tarkkojakin etäisyysmittauksia aikaan. Useampaa vertailukohdetta käyttämällä saadaan hyvien ja onnistuneiden mittausten todennäköisyyttä parannettua. Samalla heikot tulokset saadaan karsittua laskennasta pois. Mittausalgoritmeja kehittämällä sekä raja-arvoja määrittämällä voidaan järjestelmästä saada suhteellisen tarkka ja toimiva kokonaisuus toteutettua. Mittausten perusteella järjestelmän tarkkuus vaihtelee muutamista senteistä muutamisiin metreihin.



KUVA 55. Järjestelmän mitaama etäisyys ja todellinen mitattu etäisyys

8.3 Johtopäätökset

Luvussa tutkitaan etäisyyden tarkkuuteen liittyviä ilmiöitä sekä tutkitaan etäisyyden tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Kokonaisuudessaan etäisyysmittauksissa esiintyi yllättävän paljon vaihtelevuutta mittausosion 1 ja 2 välillä. Kaikissa etäisyysmittauksissa olosuhteet olivat samanlaiset ja mittaukset suoritettiin samassa paikassa. Mittaustulokset ja erilaiset graafiset kuvaajat kuvastavat hyvin sitä, kuinka epävakaainen järjestelmä kokonaisuudessaan on. Mittausten vaihtelevuus ja epätarkkuus saattoi johtua osittain ulkopuolisille häiriöille altistumisesta.

Pienillä etäisyyksillä järjestelmän kellojen tarkkuus ei pysy perässä ja mittauksissa esiintyy suhteessa enemmän vaihtelevuutta. Näin ollen mittauksia ei voida pitää lyhyellä välimatkalla niin luotettavana. Etäisyyttä kasvatettaessa järjestelmän tarkkuus suhteessa paranee ja tulokset jakaantuvat selkeämmin. Järjestelmä toimii luotettavammin siis pidemmällä etäisyyksillä. Etäisyy-

den tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kellovirheet, monitie-eteneminen sekä ulkopuolisille häiriöille altistuminen.

Etäisyystuloksista merkittävä osa sijoittui liian lyhyeksi. Monitie-etenemisestä tämä ei voi johtua, koska silloin radiosignaali kulkisi pidemmän matkan ja mittaisi etäisyyden pidemmäksi. Jos radiosignaali kulkisi suorinta tietä vastaanottimeen, ilmoittaisi järjestelmä etäisyyden oikeaksi, koska etäisyys on suoraan verrannollinen signaalin kulkuaikaan. Radiosignaalin heijastuessa esteistä ja objekteista kuljettu matka kasvaa. Näin ollen järjestelmän mittaama etäisyys olisi pidempi oikeaan mitattuun etäisyyteen verrattuna. Estemittauksella tämä pystyttiin hyvin havainnollistamaan. Järjestelmä mittaa kuitenkin suuren osan etäisyystuloksista liian lyhyeksi oikeaan mitattuun etäisyyteen verrattuna. Tästä syntyy johtopäätös, että järjestelmässä esiintyy suhteellisen paljon kellovirheitä. Ulkopuolisille häiriöille altistumista ei voi myöskään sulkea pois kuvioista. Tämä opinnäytetyö ei kuitenkaan käsittele sitä, kuinka paljon järjestelmä kestää häiriötä, koska silloin työn laajuus olisi kasvanut liian suureksi. Mielenkiintoista olisi kuitenkin tietää, johtuuko suuri osa virheellisistä mittaustuloksista kellojen epätarkkuudesta vai ulkopuolisista häiriöistä.

Etäisyyden tarkkuutta voisi tutkia lisää, kun järjestelmä mittaa etäisyyden useampaan kohteeseen kerralla. Tarkkuutta saadaan parannettua kun käytetään useampia lukijoita eli vertailukohteita mitattavaan kohteeseen nähden. Mittauksia suoritettiin vain kahden pisteen välillä, jolloin vaihtelevuutta esiintyi yllättävän paljon. Kun Jennic-järjestelmällä paikannetaan, keskimääräisen paikkaestimaatin laskemiseen käytetään vähintään kolmea päätelaitetta paikannettavan kohteen etäisyyden mittaukseen. Pelkkien etäisyysmittauksien perusteella ei siis vielä voi täysin sanoa, kuinka tarkan paikannusjärjestelmän laitteistolla saa toteutettua.

Järjestelmälle on järkevää asettaa tiettyjä raja-arvoja, joiden sisällä etäisyysmittauksien on oltava onnistuneen mittauksen aikaan saamiseksi. Vaikka mittauksia suoritettaessa olosuhteet olisivat ihanteelliset, esiintyy tuloksissa niin paljon vaihtelevuutta, ettei ilman mittausalgoritmien kehittämistä

voi saada luotettavia tuloksia aikaan tasaisesti ja jatkuvasti. Raja-arvojen avulla etäisyystulokset saadaan pysymään haluttujen rajojen sisällä. Raja-arvoa voitaisiin säätää sen tarpeen mukaan, kuinka tarkkoja mittauksia järjestelmällä on saatava aikaan. Mittauksien suorittamiseen kuluu näin ollen kuitenkin kauemmin aikaa, koska merkittävä osa etäisyysmittauksista sijoittuu vaihtelevasti joko liian lyhyeksi tai pitkäksi.

Testimittauksia olisi voinut suorittaa lisäksi eri korkeuseroilla, jolloin tutkimustyöstä olisi saanut laajemman ja lopullisesta etäisyyden tarkkuudesta kokonaisvaltaisemman kuvan. Tutkimustyössä jäi siis testaamatta paljon kehitysympäristöstä, mutta suuntaa antava etäisyyden tarkkuus saatiin kuitenkin selville.

9 POHDINTA

Työn aihe oli erittäin kiinnostava, koska WPAN-tekniikalla toteutetut sovellukset ja laitteet kehittyvät vauhdilla ja uusia käyttötarkoituksia laitteille kehitetään jatkuvasti. WPAN-verkkoja hyödynnetään hyvin erilaisissa ja monenlaisissa tehtävissä jo nykypäivänä ja niiden merkitys ja vastuualueet tulevat kehittymään ja korostumaan tulevaisuudessa hyvin paljon. Uusia menetelmiä ja tekniikoita kehitettäessä pyritään käyttämään hyödyksi vanhojen radiotekniikoiden ja -standardien parhaimmat ominaisuudet sekä puolet. Useiden verkkotekniikoiden yhdistyessä nousee tietoturvan merkitys ja häiriön sietokyky hyvin merkittävään osaan tulevaisuuden innovaatioita kehitettäessä. Eri tekniikoilla on jokaisella omat erityispiirteensä ja hyvät sekä heikot puolensa riippuen vaatimuksista sekä tarpeista.

Kehityssuunta on muodostumassa siihen suuntaan, että kehitetään valmis kehitysympäristö, johon on valmiiksi rakennettu ja kehitetty standardin asettamat perusvaatimukset. Asiakkaan ei näin tarvitse huolehtia muusta kuin omien ratkaisujen kehittämisestä ja keskittää järjestelmän suunnittelu käyttökohteen määrittelyyn. Asiakkaalle voitaisiin tarjota lisäksi erilaisia sovelluksia joten kehitysympäristöä voitaisiin käyttää useassa eri käyttötarkoituksessa.

Työn alussa suunnittelema aikataulukutus ei pitänyt ihan paikkansa. Työn viivästymiseen vaikutti monta eri seikkaa, kuten ylimääräisten mittausten suorittaminen. Merkittävänä osa-alueena työn etenemiseen vaikutti se, että opinnäytetyö suoritettiin osittain kesän aikana, jolloin suoritin opinnäytetyötä hyvin omatoimisesti, eikä ohjaavia opettajia ollut silloin saatavilla. Tämän vuoksi osa etäisyysmittauksista piti suorittaa uudestaan, jotta mittauksien luotettavuudesta saataisiin mahdollisimman tarkka kuva. Kesän lopulla loukkaantuminen viivästi myös hieman opinnäytetyön valmistumista ja söi motivaatiota, mutta ajatukset pyörivät kuitenkin koko ajan työn etenemisessä.

Vaadittavien suoritusten aikaan saaminen oli prioriteetiltaan hyvin korkealla koko työn suorituksen ajan.

Työ osoittautui melko lailla yhtä vaativaksi ja monipuoliseksi kuin alussa sen ajattelin olevankin. Mittauksia suoritettaessa tekisin monia asioita eri tavalla ja tekemällä sitä oppii. Lisätutkimuksia, ylimääräisiä testauksia ja kehitystyötä järjestelmä vaatii vielä paljon lisää toimivan ja luotettavan järjestelmän aikaan saamiseksi. Tässä työssä aikaan saadut tiedot ja esiselvitykset varmasti helpottavat kuitenkin lopullista käyttökohteen toteutusta. Kokonaisuudessaan työn kuvaan nähden olen tyytyväinen aikaan saamiini tuloksiin.

LÄHTEET

1. Jennic IEEE 802.15.4 Wireless Networks User Guide. 2010. Saatavissa: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-UG-3024-IEEE802.15.4-1v1.pdf. Hakupäivä 15.6.2010.
2. JN5148 Evaluation Kit. 2010. Saatavissa: http://www.jennic.com/products/development_kits/jn5148_evaluation_kit. Hakupäivä 1.5.2010
3. Jennic JN5148-EK010 ZigBee PRO Evaluation Kit User Guide. 2010. Saatavissa: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-UG-3062-JN5148-EK010-User-Guide.pdf. Hakupäivä 2.6.2010
4. Jennic Data Sheet: JN5148-001. 2010. Saatavissa: http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-DS-JN5148-1v4.pdf. Hakupäivä 10.6.2010
5. ZigBee Essential Facts and Features. 2007. Saatavissa: <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/files/html/module1/module1-3.htm>. Hakupäivä 2.9.2010.
6. Jennic IEEE 802.15.4 Application Development Reference Manual. 2010. Saatavissa: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-RM-2024-IEEE802.15.4-App-Dev-2v0.pdf. Hakupäivä 21.6.2010.
7. ZigBee. 2010. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/ZigBee>. Hakupäivä 14.6.2010.
8. ZigBee FAQ. 2010. Saatavissa: <http://www.zigbee.org/About/FAQ.aspx>. Hakupäivä 8.9.2010.

9. Time-of-Flight Ranging Demo. 2010. Saatavissa <http://www.jennic.com/support/> -sivustolta pyytämällä. Hakupäivä 17.6.2010

10. Jennic Time-of-Flight API User Guide. 2010. Saatavissa <http://www.jennic.com/support/> -sivustolta pyytämällä. Hakupäivä 17.6.2010