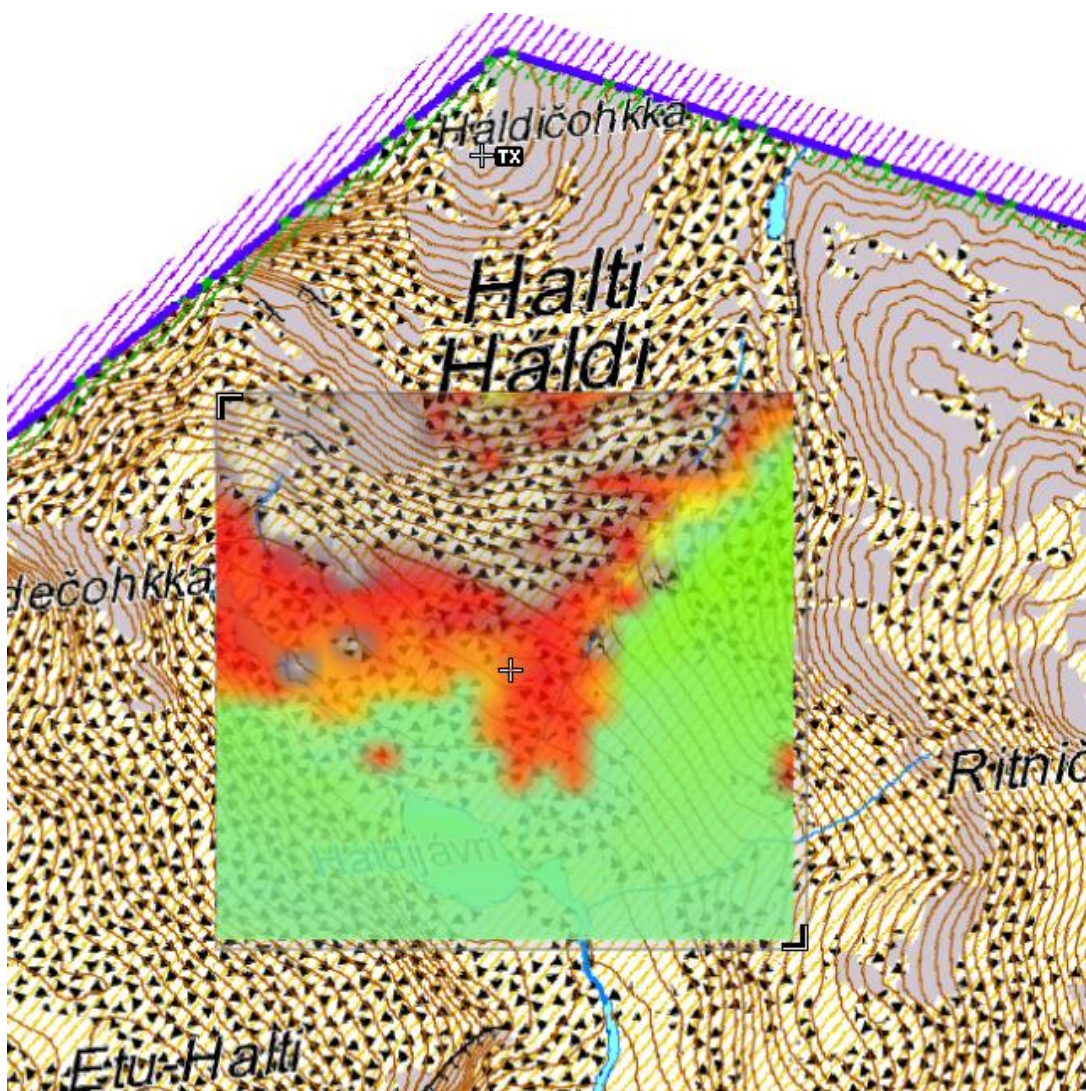


Karppinen Tuukka

Radiolähteyksen

etenemisvaimennuksen arvioiminen

Longley-Rice-mallilla



Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Kevät 2017



KAJAANIN
AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tiivistelmä

Tekijä: Karppinen Tuukka

Työn nimi: Radiolähetyksen etenemisvaimennuksen arvioiminen Longley-Rice-mallilla

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), tietotekniikka

Asiasanat: Longley-Rice, Irregular Terrain Model, Etenemisvaimennus, Radiotekniikka, VHF, UHF, SHF

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä radiolähetyksen etenemisvaimennusta arvioivaan Longley-Rice-malliin. Etenemisvaimennusta tutkittiin Bittium TAC WIN Radio Head -tuotesarjan taajuusalueilla 225–400 MHz ja 4,4–5 GHz. Työn alussa kerrataan radiotekniikan perusteita sekä radiolähetyksen etenemisvaimenemiseen vaikuttavia tekijöitä.

Työssä käydään läpi Longley-Rice-mallin teoriaa, parametrisointia ja toteutusta Linux-ympäristössä. Testaus toteutettiin vertaamalla Longley-Rice-mallin tuloksia Bittiumin kenttätesteistä saatuihin tuloksiin. Vaikka opinnäytetyö keskittyy Bittium TAC WIN Radio Head -tuotesarjaan, voidaan Longley-Rice-mallista tehtyjä huomiota hyödyntää muissakin systeemeissä.

Testaustulosten pohjalta havaittiin, että Longley-Rice-mallissa on monia ongelmia, jotka johtuvat erityisesti Suomen maastosta. Longley-Rice-mallia voidaan kuitenkin soveltaa käyttötarkoituksiin, jos mainitut virhetekijät otetaan huomioon etenemismallin arvojen tarkastelussa.

Abstract

Author: Karppinen Tuukka

Title of the Publication: Estimating Propagation Loss with Longley-Rice Model

Degree Title: Bachelor of Engineering, Information Technology Engineering

Keywords: Longley-Rice, Irregular Terrain Model, Propagation Loss, Radio Technology, VHF, UHF, SHF

The purpose of this thesis was to research propagation loss of radio transmission by using Longley-Rice model, focusing on the Bittium TAC WIN Radio Head product line. The thesis also brushes up on very basics of radio technology and lists factors that affect propagation loss.

The thesis details theory behind Longley-Rice model, its parameters and how the model was implemented in a Linux environment. Testing was carried out by comparing Longley-Rice results into earlier Bittium field tests. Although the thesis focuses on the Bittium TAC WIN Radio Head product line the Longley-Rice model findings can be applied into other systems as well.

Based on the test results it is found that Longley-Rice has many problems estimating propagation loss in Finnish environment. However, Longley-Rice model can be applied into intended use if listed error factors are taken into consideration when examining the values returned by Longley-Rice model.

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | RADIOTEKNIikka | 2 |
| 2.1 | Radioaalto | 2 |
| 2.2 | Radioaallon eteneminen | 3 |
| 2.2.1 | Radioaallon vaimeneminen | 4 |
| 2.2.2 | Radioaaltoon vaikuttavat ilmiöt | 5 |
| 2.2.3 | Vapaassa tilassa eteneminen | 6 |
| 2.3 | Vastaanotetun signaalin arvioiminen | 6 |
| 3 | BITTIUM TACTICAL WIRELESS IP NETWORK (TAC WIN) | 7 |
| 3.1 | Bittium TAC WIN Tactical Router | 7 |
| 3.2 | Bittium TAC WIN Radio Head | 7 |
| 4 | RADIOAALLON ETENEMISVAIMENNUKSEN ARVIOINTI | 9 |
| 4.1 | Vapaan tilan vaimeneminen | 9 |
| 4.2 | Epäsäännöllinen maasto | 10 |
| 4.3 | Metsän vaikutus | 11 |
| 4.4 | Sään vaikutus | 11 |
| 5 | SOVELTUVUUSSELVITYS ETENEMISVAIMENNUKSEN ARVIOIVALLE OHJELMISTOLLE SUOMEN MAASTOSSA | 12 |
| 5.1 | Toimintaperiaate | 12 |
| 5.2 | Käyttöliittymä | 13 |
| 5.3 | Laskenta | 13 |
| 6 | LONGLEY-RICE-TOTEUTUS | 14 |
| 6.1 | Parametrit | 14 |
| 6.1.1 | Frequency | 15 |
| 6.1.2 | Antenna height | 15 |
| 6.1.3 | Polarization | 15 |
| 6.1.4 | Dielectric constant | 15 |
| 6.1.5 | Surface conductivity | 17 |
| 6.1.6 | Surface refractivity | 17 |
| 6.1.7 | Climate | 18 |

| | | |
|-----|--|----|
| | 6.1.8 Confidence..... | 18 |
| | 6.1.9 Reliability..... | 19 |
| | 6.1.10 Elevation | 19 |
| 6.2 | Muut rajoitteet | 20 |
| 6.3 | Tulokset | 20 |
| 7 | LONGLEY-RICE-TESTAUS | 22 |
| 7.1 | Oletusarvot..... | 22 |
| 7.2 | Maastoprofiili..... | 23 |
| 7.3 | Raporttikaavio..... | 24 |
| 7.4 | Kenttätestikaavio | 25 |
| 7.5 | Alue 1: Kevät (2 päivää)..... | 26 |
| | 7.5.1 RH-I..... | 27 |
| | 7.5.2 RH-IV | 28 |
| 7.6 | Alue 2: Kesä (1 päivä) | 29 |
| 7.7 | Alue 3: Syksy (2 päivää)..... | 31 |
| | 7.7.1 RH-I..... | 32 |
| | 7.7.2 RH-IV | 33 |
| 7.8 | Alue 4: Talvi (4 päivää)..... | 34 |
| 8 | TESTITULOSTEN TARKASTELU..... | 37 |
| 8.1 | Virhearviointi | 37 |
| 8.2 | Kenttätestikaavioiden tarkastelu | 42 |
| 9 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 45 |
| 10 | JATKOTUTKIMUS | 46 |

LÄHTEET

Symboliluettelo

| | |
|---------|--|
| dBm | Decibel-Milliwatts |
| ITM | Irregular Terrain Model |
| LOS | Line-of-Sight |
| MANET | Mobile Ad Hoc Network |
| P2mP | Point-to-Multipoint |
| P2P | Point-to-Point |
| RH | Radio Head |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| Rx | Receiver |
| SHDSL | Single-Pair High-Speed Digital Subscriber Line |
| TAC WIN | Tactical Wireless IP Network |
| TR | Tactical Router |
| Tx | Transmitter |

1 JOHDANTO

Bittium Oyj on oululainen yritys, joka on erikoistunut turvallisten viestintä- ja liitettävyyssratkaisujen kehittämiseen. Sain harjoittelupaikan Bittiumin Kajaanin toimistolta syksyllä 2016. Opinnäytetyön aihe tuli luonnollisena jatkeena työtehtäville, joita suoritin harjoittelun aikana.

Työn tavoitteena on perehtyä radiolähetysten etenemisvaimennusta arvioivaan Longley-Rice-malliin, ja kuinka sitä voidaan hyödyntää Suomen maastossa. Longley-Rice-mallia käyttävän laskentaohjelmiston toteutuksen lähtökohtana ovat suomalainen avoin materiaali sekä muu avoin lähdekoodi.

Työssä keskitytään soveltamaan Longley-Rice-mallia Bittium TAC WIN Radio Head -tuotesarjan käyttämiin VHF-, UHF- ja SHF-taajuusalueisiin. Vaikka opinnäytetyössä keskitytään Bittium TAC WIN Radio Head -tuotesarjaan, voidaan tuloksia hyödyntää muissa vastaavissa systeemeissä.

Longley-Rice-mallia hyödyntävän laskentaohjelmiston tuloksia verrataan Bittiumin aiemmin Suomen luonnossa suoritettuihin kenttätestien tuloksiin. Kenttätestit on suoritettu vuosina 2016 ja 2017. Kenttätestien ajanjaksot kattavat kaikki neljä Suomen vuodenaikaa.

2 RADIOTEKNIikka

Radiotekniikalla käsitetään langatonta viestintää radioaaltojen avulla. Radio on menetelmä siirtää sähköenergiaa paikasta toiseen, ja prosessi voidaan jakaa kolmeen pääaskeleeseen: [1]

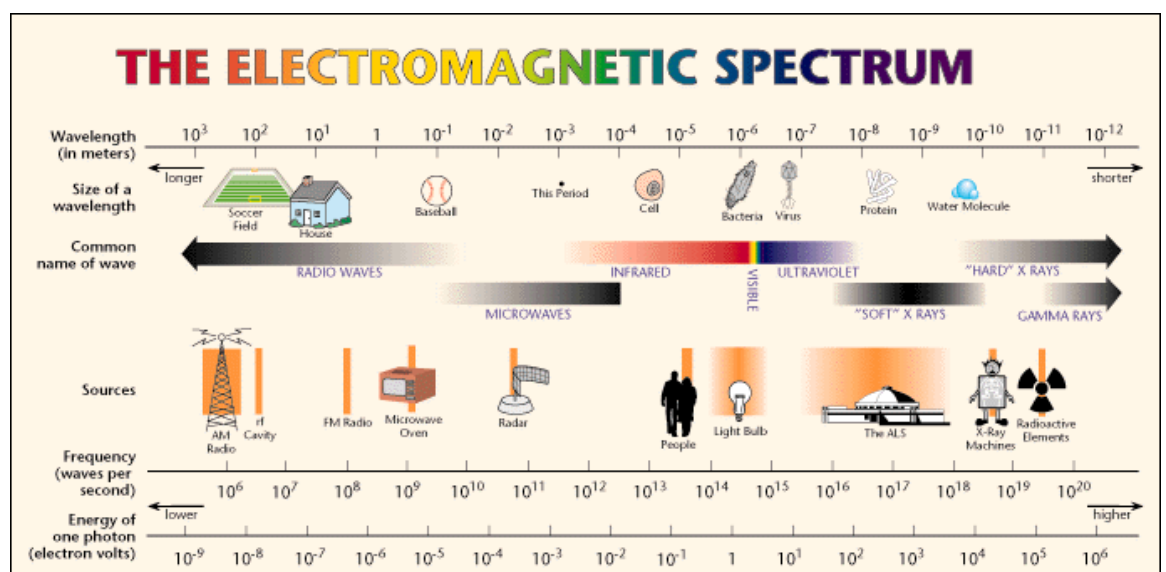
1. Lähetin muuntaa sähkövirran radioaalloiksi.
2. Radioaallot lähetetään ilmateitse päämäärää kohti.
3. Vastaanotin kerää radioaallot ja muuntaa ne takaisin sähkövirraksi.

Tässä luvussa käydään tiivistetysti tutkimusongelmaan liittyvää teoriaa radiotekniikasta.

2.1 Radioaalto

Sähkömagneettinen spektri kattaa kaikki sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueet. Spektrin osat jaotellaan niiden säteilyn taajuuden tai aallonpituuden mukaan. Radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä taajuusalueella 3 Hz–300 GHz. [2.]

Kuva 1. Sähkömagneettinen spektri [3].



Tässä työssä radioaallon eri taajuusalueita kuvaamaan käytetään Kansainvälisen televiestintäliiton (International Telecommunication Union) määrittämiä nimikkeitä.

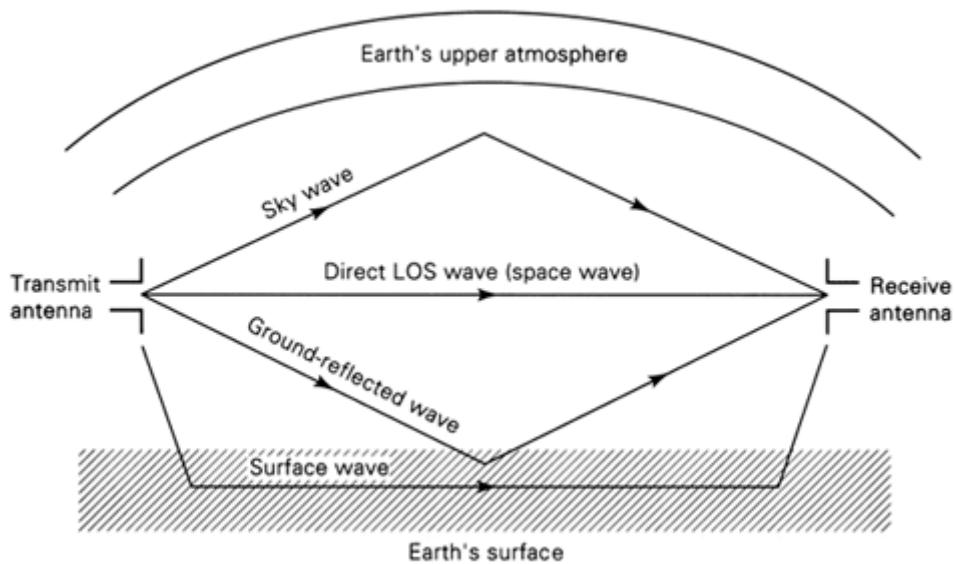
Taulukko 1. Kansainvälisen televiestintäliiton määrittelemät radiotaajuudet [2].

| Taajuus | Aallonpituus | Nimike | Lyhenne |
|---------------|--------------------|-----------------------------|---------|
| 3–30 Hz | 10^5 – 10^4 km | Extremely low frequency | ELF |
| 30–300 Hz | 10^4 – 10^3 km | Super low frequency | SLF |
| 300–3000 Hz | 10^3 –100 km | Ultra low frequency | ULF |
| 3–30 kHz | 100–10 km | Very low frequency | VLF |
| 30–300 kHz | 10–1 km | Low frequency | LF |
| 300 kHz–3 MHz | 1 km–100 m | Medium frequency | MF |
| 3–30 MHz | 100–10 m | High frequency | HF |
| 30–300 MHz | 10–1 m | Very high frequency | VHF |
| 300 MHz–3 GHz | 1 m–10 cm | Ultra high frequency | UHF |
| 3–30 GHz | 10–1 cm | Super high frequency | SHF |
| 30–300 GHz | 1 cm–1 mm | Extremely high frequency | EHF |
| 300 GHz–3 THz | 1 mm–0.1 mm | Tremendously high frequency | THF |

2.2 Radioaallon eteneminen

Radioaaltojen liikettä lähettimestä vastaanottimeen kutsutaan etenemiseksi. Yleisimmät radioaallon kantamaan vaikuttavat tekijät ovat antennin korkeus, antennin polarisaatio, antennin vahvistus, radioaallon taajuus, lähetysteho, maasto, kasvillisuus ja rakennukset.

Kuva 2. Sähkömagneettisen energian etenemistavat [4].



Olenaisiin etenemistapa tutkimusongelman kannalta on näköyhteysreittiä pitkin eteneminen. Tähän etenemistapaan vaikuttavat tekijät ovat suurin muuttuja radiolähetyksen laadussa, muun muassa taajuusalueilla VHF, UHF ja SHF, jotka vastaavat Bittium TAC WIN Radio Head -tuotesarjaa. [4,5.]

Ionosfääristä heijastuvien radioaaltojen huomioiminen ei ole mielekäästä niiden epäluotettavuuden takia, ja koska tutkitaan maksimissaan 30 kilometrin kantamia. Maasta heijastuvien radioaaltojen eteneminen on vaikuttavampi tekijä matalammilla taajuusalueilla, kuten LF ja MF. Pinta-aaltona etenemistä ei tyypillisesti esiinny VHF:ää suuremmilla taajuuksilla [6]. [5.]

2.2.1 Radioaallon vaimeneminen

Jotta radioiden välinen viestintä toimisi, signaalin, joka matkaa lähettimestä vastaanottimeen, täytyy olla riittävän voimakas. Edetessään signaalin taso laskee, josta käytetään termiä vaimeneminen tai etenemisvaimennus (Propagation Loss) [7, s.8]. Vaimennuksen aiheuttavat tekijät riippuvat signaalin taajuudesta. Esimerkiksi matalilla taajuuksilla metsän läpi matkaavan signaalin vaimennukseen vaikuttavat enemmän puiden rungot, kun taas korkeilla taajuuksilla (UHF) lehvästöllä on isompi vaikutus [8, s.114].

2.2.2 Radioaaltoon vaikuttavat ilmiöt

Lähettimen ja vastaanottimen ympäristössä sekä välimatalla on useita tekijöitä, jotka vaikuttavat siihen, kuinka radioaalto etenee vastaanottavaan antenniin.

Heijastumisessa (Reflection) radioaalto osuu heijastavaan pintaan ja kimpoaa siitä samassa kulmassa, kuin se siihen osuikin. Materiaalista riippuen aalto osittain heijastuu ja osittain etenee materiaalin läpi. Materiaalin läpi edenneen signaalin taso on vaimentunut. Heijastuneella aallolla on sama aallonpituus ja etenemisnopeus kuin tulevalla aallolla. [8, s.46, 9.]

Taitumisessa (Refraction) se osa radioaallostaa, joka ei heijastu tai siroa, muuttaa suuntaansa johtuen väliaineen muutoksesta. Esimerkiksi kun radioaalto kulkee ilmasta veteen, radioaalto hidastuu ja vaihtaa suuntaa kohti tiheämpää ainetta. [8, s.46, 10.]

Radioaalto **taipuu** (Diffraction) kohdatessaan terävän reunan, jos esteen koko ja radioaallon aallonpituus ovat sopivat. Tämä mahdollistaa radioaaltojen etenemisen suurtenkin kohteiden tai katvealueiden taakse. Mitä lyhyempi aallonpituus on, sitä vähemmän aalto taipuu. Taipuminen vaimentaa radiosignaalia enemmän kuin heijastuminen [11, s.15]. [8, s.47, 12.]

Absorptio (Absorption) on tila, jossa jokin asia ottaa sisäänsä toisen aineen. Sähkömagneettisen aallon kohdatessa materiaa aallon sähkö- ja magneettikentät ovat vuorovaikutuksessa materian atomien kanssa. Tällöin elektronit värähtelevät sähkömagneettisen kentän tahdissa, mikä kuluttaa aallon energiaa. Radioaallostaa absorboituu energiaa eniten silloin, kun radioaallon taajuus vastaa atomin tai molekyylin luontaista taajuutta. [8, s.45, 13.]

Sirontaa (Scatter) tapahtuu, kun radioaalto osuu esteeseen, jonka suuruus verrattuna radioaallon aallonpituuteen on pienempi [11, s.15]. Tämän seurauksena radioaalto heijastuu satunnaisesti ympäristöön. Tämä on eri ilmiö absorptiosta, heijastumisesta ja taitumisesta. [8, s.47, 14.]

2.2.3 Vapaassa tilassa eteneminen

Vapaassa tilassa etenemisellä tarkoitetaan optimaalista tilannetta, jossa signaali etenee vapaassa tilassa, esimerkiksi ilmassa, törmäämättä esteisiin, esimerkiksi rakennuksiin. Vaimenemista silti esiintyy etäisyyden kasvaessa, jolloin signaali leviää laajemmalle alueelle. [7, s.8, 15, s.12.]

2.3 Vastaanotetun signaalin arvioiminen

Kun arvioidaan vastaanotettua signaalia, ei pelkkä vaimenemisen laskeminen riitä. Mukaan täytyy ottaa antennivahvistukset sekä lähettimen teho. Vastaanotettua tehoa voidaan arvioida seuraavalla kaavalla: [16.]

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \quad (1)$$

P_r = Vastaanotettu teho (dBm)

P_t = Lähettimen teho (dBm)

G_t = Lähettimen antennivahvistus (dB)

G_r = Vastaanottimen antennivahvistus (dB)

L = Yhteenlaskettu vaimeneminen (dB)

Kun verrataan langattomien systeemien tehoa, ilmoitetaan tämä yleensä desibeleinä volttien sijaan. RSSI (Received Signal Strength Indicator) on laitteistoriippuvainen indikaattori, joka kertoo laaduttomalla arvolla vastaanotetun tehon. Vaikka kyseessä on laaduton arvo, yleensä RSSI ilmoitetaan dBm-arvolla. Mitä lähempänä RSSI-arvo on nollaa, sitä parempi signaalin laatu on. [17.]

3 BITTIUM TACTICAL WIRELESS IP NETWORK (TAC WIN)

Bittium Tactical Wireless IP Network on itsenäinen langaton laajakaistaverkko, joka voidaan käyttöönottaa nopeasti kenttäolosuhteissa. Riippuen antennikonfiguraatiosta, antennikorkeudesta ja taajuudesta laitteet voivat kattaa jopa 30 kilometrin etäisyyksiä. Verkko tukee useita verkkotopologioita: MANET, P2P ja P2mP. [18.]

Kuva 3. Bittium TAC WIN Tactical Router ja Bittium TAC WIN Radio Head I.



3.1 Bittium TAC WIN Tactical Router

Taktinen reititin tukee useita yhtäaikaista yhteyksiä, jotka voivat koostua langallisista (LAN/SHDSL/Valokuitu) ja langattomista yhteyksistä. Langattomat yhteydet luodaan Bittiumin kehittämällä radioyksiköillä. [19.]

3.2 Bittium TAC WIN Radio Head

Bittium TAC WIN Radio Head -tuotteet toimivat NATO-taajuusalueilla I, III ja IV. Taktiseen reitittimeen yhdistettävillä radioyksiköillä voidaan muodostaa yhteyksiä käyttötilanteen ja vaatimusten perusteella.

Taulukko 2. Bittium TAC WIN Radio Head taajuusalueet.

| | RH-I | RH-III | RH-IV |
|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| Kaistanleveys | 5 MHz | 5/10 MHz | 5/10/20 MHz |
| Taajuusalue | 225–400 MHz | 1350–2400 MHz | 4400–5000 MHz |
| | VHF/UHF | UHF | SHF |

RH-I ja RH-III tukevat esimerkiksi ympärisäteileviä laajakaista-antenneja, sopeutuvia mobiiliantenniratkaisuja ja suunta-antenneja. RH-IV sisältää integroidun suunta-antennin. [20-22.]

4 RADIOAALLON ETENEMISVAIMENNUKSEN ARVIOINTI

Radioaallon etenemismallit arvioivat keskiarvon signaalin vaimenemiselle, radioyksiköiden mielivaltaisella välillä. Vaimeneminen esitetään yleensä desibeleinä. Etenemismallit ovat kokeellisia matemaattisia kaavoja, joilla pyritään mallintamaan radioaaltojen käyttäytymistä ottaen huomioon radioaallon taajuus, ympäristö sekä radioyksiköiden etäisyys toisistaan. [23.]

4.1 Vapaan tilan vaimeneminen

Koska jopa 78 % Suomen pinta-alasta on metsää [24], vapaan tilan mallia päästään harvoin käyttämään sellaisenaan RH-yksiköiden kanssa. Näköyhteysreittiä etenevän radioaallon vapaan tilan vaimeneminen saadaan desibeleinä kaavasta: [25, 26, s.9]

$$L = 32,44 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (2)$$

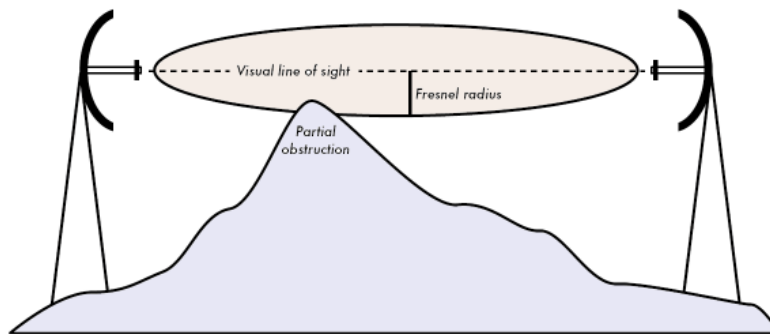
L = Etenemisvaimennus (dB)

f = Radioaallon taajuus (MHz)

d = Antennien etäisyys (km)

Radioaalto tarvitsee riittävästi vapaata tilaa edetäkseen vaimentumatta. Fresnelin vyöhyke on pyörähdysellipsoidi, jonka polttopisteet ovat radiolinkin antennien radiosäteilyn keskikohdat. Jos ensimmäinen Fresnelin vyöhyke on vapaana esteistä, voidaan etenemisvaimennus laskea käyttäen vapaan tilan kaavoja. Jos vyöhykkeellä on esteitä, käytettävät kaavat ovat kokemus- ja tapauskohtaisia.

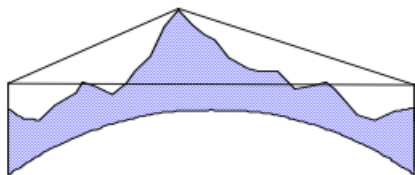
Kuva 4. Fresnelin vyöhyke on osaksi peittynyt, vaikka näköyhteys vaikuttaa esteettömältä [27].



4.2 Epäsäännöllinen maasto

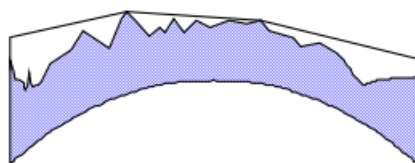
Yleisin tapa huomioida näköyhteysreitillä olevat esteet on niin sanottu veitsenterämalli (Knife Edge Propagation) [26, s.10]. Malli toimii parhaiten, kun radioaalto osuu selkeään esteeseen, kuten vuorenhuippuun tai rakennuksen reunaan.

Kuva 5. Esimerkki maastosta, jossa on yksittäinen veitsenterä (Single Knife Edge) [28].



Kun maastoa ei voida kuvata millään veitsenterämallin muunnoksella, puhutaan epäsäännöllisestä maastosta (Irregular Terrain).

Kuva 6. Esimerkki epäsäännöllisestä maastosta [28].



4.3 Metsän vaikutus

Metsät vaikuttavat langattomaan kommunikointiin huomattavasti ja aiheuttavat tiukkoja rajoitteita laitteiston ja radiolinkkien suunnitteluun. Täsmällinen radioaaltojen mallintaminen lehvistön läpi on kerännyt paljon huomiota sen sovelluksista moniin siviili- ja armeijatarpeisiin. [29-31.]

Verrattuna laajaperäisesti tutkittuun maanpäälliseen radioaallon etenemiseen, metsän lisääminen radiolinkin väliin lisää uuden muuttujan kuuluvuuden ennustamiseen. Metsät ovat satunnainen tekijä, joka lisää monia uusia radioaaltoon vaikuttavia hajaannuttajia, kuten lehtiä, oksia ja puunrunkoja. Puuston tai kasvuston huomioiminen signaalin etenemiseen vaatii käyttäjältä huomattavasti tietoa mallinnettavasta alueesta sekä suuria yleistyksiä tyydyttävän ennustustarkkuuden saavuttamiseksi.

Metsän vaikutus vaihtelee muun muassa seuraavien seikkojen mukaan:

- **Metsätyyppi**, esimerkiksi lehtimetsän etenemisvaimennus on suurempi kuin havumetsän [32, s.9].
- **Vuodenaika**, esimerkiksi talvella lehtimetsän etenemisvaimennus on 3-5 dB pienempi kuin kesällä [8, s.133].
- **Metsän kosteus**, märkä metsä vaimentaa radiosignaaleja enemmän kuin kuiva metsä [32, s.9].

4.4 Sään vaikutus

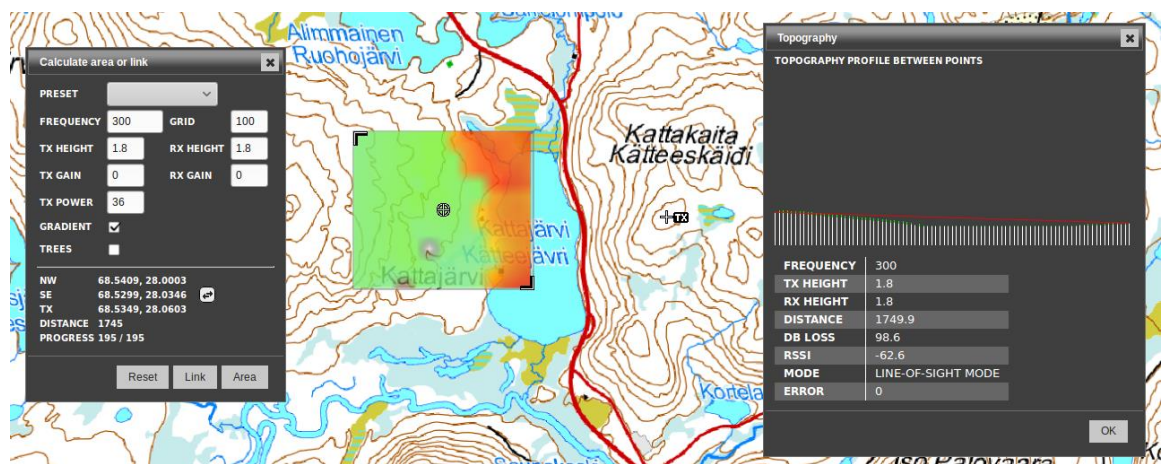
Signaalin voimakkuuteen yleisimmät vaikuttavat säätekijät ovat vesisade, lumisade, lumi ja sumu. UHF-alueella ja sitä pienemmillä taajuuksilla sää ei juuri vaikuta etenemisvaimennukseen. Sumu taas vaikuttaa vasta yli 10 GHz taajuuksilla. [8, s.115, 32, s.5.]

- **Sade** voidaan huomioida pitkillä etäisyyksillä, kun taajuus on yli gigahertsin. Esimerkiksi 16 mm/h rankkasade aiheuttaa 2 GHz taajuudella noin 0,3 dB vaimennuksen per kilometri. [8, s.115.]
- **Märkä lumi** ja **räntä** vaimentavat enemmän kuin vastaava sade. [8, s.115.]
- **Kuiva lumi** ja **jää** eivät aiheuta etenemisvaimennusta. [8, s.115.]

5 SOVELTUVUUSSELVITYS ETENEMISVAIMENNUKSEN ARVIOIVALLE OHJELMISTOLLE SUOMEN MAASTOSSA

Tässä luvussa on kuvattu soveltuvuus selvitys Longley-Rice-mallia hyödyntävälle ohjelmistolle, jolla voidaan arvioida radiolähetysten etenemisvaimennusta Suomessa. Ohjelmistossa hyödynnetään avoimen lähdekoodin toteutusta Longley-Rice-mallista sekä Suomen maastoa kuvaavaa avointa materiaalia.

Kuva 7. Esimerkki ohjelmiston käyttöliittymästä. Vasemmalla radiolinkin asetukset, keskellä aluelaskennan tulokset värikoodattuna ja oikealla linkkilaskennan tulokset.



5.1 Toimintaperiaate

Ohjelmiston käyttöliittymänä toimii tietokoneen selaimessa näkyvä interaktiivinen Suomen kartta. Karttaa painamalla käyttäjä voi tarkastella yksittäisten karttapisteiden maaston korkeuksia. Siirtämällä kartalla olevia radiomerkkejä ja syöttämällä radioiden asetukset käyttäjä voi laskea kahden radion välisen radiokanavan vaimennuksen ja laskennallisen signaalin voimakkuustason (RSSI). Lisäksi käyttäjälle avautuu ikkuna, jossa näytetään radioiden välinen maastoprofiili.

Taustalla toimii erillinen laskentaohjelmisto, johon käyttöliittymä luo yhteyden laskentaoperaatioita varten. Laskentaohjelmisto mahdollistaa käyttöliittymän nopean toiminnan ja aluelaskennan, jolla voidaan kartoittaa paras sijainti lähettimelle tai vastaanottimelle halutulla alueella.

5.2 Käyttöliittymä

Käyttöliittymä toteutettiin HTML-pohjaisena verkkosivuna. Interaktiivinen Suomen kartta koostuu Leaflet [33] avoimen lähdekoodin ohjelmistokirjastosta sekä Maanmittauslaitoksen maastokarttarasterista [34]. Maastokarttarasteri on koko Suomen kattava maastoa kuvaava aineisto. Sen keskeisimpiä kohderyhmiä ovat liikenneväyläverkosto, rakennukset ja rakenteet, nimistö, vesistöt, maankäyttö ja korkeussuhteet.

Maanmittauslaitoksen painettavissa maastokartoissa käytetään ETRS-TM35FIN-tasokoordinaatistoa [35,36], ja niistä valmistettavissa rasterikartoissa käytetään TM35-lehtijakoa [37,38]. Kaikki ohjelmistossa käytetty avoin materiaali myötäilee TM35-lehtijakoa.

5.3 Laskenta

Käyttäen määriteltyä etenemismallia laskentaohjelmisto laskee käyttöliittymältä saadut laskentakäskyt ja lähettää vastauksen takaisin. Laskentaohjelmisto toteutettiin erikseen käyttöliittymästä, jotta laskennat saatiin suoritettua käyttäen hyödyksi tietokoneen kaikkia resursseja.

Mahdollinen etenemismallin vaatima maastoprofiili saatiin Maanmittauslaitoksen korkeusmallista [39]. Korkeusmalli on koko Suomen kattava, maanpinnan korkeutta kuvaava malli. Käyttäjälle avautuvassa lopullisessa maastoprofiilissa näytetään myös yhteysvälillä oleva puusto. Puuston keskipituus saatiin Luonnonvarakeskuksen avoimesta materiaalista [40]. Puuston keskipituus on elävien puiden pohjapinta-alan mediaania vastaavan puun pituus, joka mitataan maastossa koealaan osuneilta metsä- ja kitumaan metsikkökuvioilta 1 desimetrin luokissa.

6 LONGLEY-RICE-TOTEUTUS

Longley-Rice-malli ennustaa troposfäärisen radiolähteyksen etenemisvaimennuksen epäsäännöllisen maaston yli. Malli tunnetaan myös nimellä Irregular Terrain Model. Longley-Rice-malli sisältää kaksi ennustusmallia: pisteestä pisteeseen-malli, joka vaatii maaston profiilin lähettimen ja vastaanottimen välillä, sekä alue-ennustusmalli, joka arvioi ympäristön vaikutuksen lähteykseen käyttämällä kokeellisia ja tilastollisia menetelmiä. Kummassakin ennustusmallissa lopputuloksena ennustetaan mediaani vaimeneminen desibeleinä.

Longley-Rice-malli johtaa juurensa 1960-luvun Amerikkaan, jolloin alettiin havahtua tietokoneiden mahdollisuuteen kohentaa radiosysteemien mallintamista julkiseen ja sotilaskäyttöön. Etenemismallin kehittäjinä toimivat Anita Longley, Phil Rice ja heidän kollegansa tutkimuslaitoksessa Central Radio Propagation Laboratory, nykyiseltä nimeltään Institute for Telecommunication Sciences. [41.]

Mallin vahvoja puolia ovat, että sitä voidaan soveltaa laajalle taajuuskaalalle ja jopa 2000 kilometrin etäisyyksille. Longley-Rice-mallin suurin haittapuoli on, että se ei ota huomioon metsiä tai lehivistöä. Rakennukset voidaan huomioida osana maastoprofiilia.

Longley-Rice-malli lisättiin soveltuvuus selvityksen ohjelmistoon käyttäen jo valmista avoimen lähdekoodin toteutusta [42,43]. Koodi pohjautuu alkuperäiseen Longley-Rice-malliin, mutta sisältää parannuksia laskennan nopeuttamiseksi [44].

6.1 Parametrit

Etenemismallin laskentaparametrit jaetaan järjestelmä-, ympäristö- ja tilastoparametreihin. Järjestelmäparametrit liittyvät radioasetelmaan ja laitteisiin. Ympäristöparametrit kuvailevat ympäristöä, jossa järjestelmä vaikuttaa. Tilastoparametreilla arvioidaan satunnaisia muuttujia, jotka voivat johtua käyttäjästä tai ympäristöstä.

6.1.1 Frequency

20 MHz–20 GHz

Longley-Rice-mallia voidaan soveltaa HF-, VHF-, UHF- ja SHF-taajuusalueilla. Taajuus ei ole iso osa laskentaa, ja hyvin usein yksi arvo palvelee laajaakin taajuuskaistaa [45, s.6].

6.1.2 Antenna height

0,5–3000 m

Lähettille sekä vastaanottimille asetetaan erikseen antennin korkeus. Antennin korkeus tarkoittaa radiosäteilyn keskikohtaa maanpinnan yläpuolella [45, s.7].

6.1.3 Polarization

Lähettimen sekä vastaanottimen polarisaatio on joko vaaka- tai pystypolarisoitunut. Oletetaan, että kummallakin antennilla on sama polarisaatio.

6.1.4 Dielectric constant

Suhteellinen permittiivisyys (Relative Permittivity) kertoo väliaineen (maaperän) permittiivisyyden suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen. Permittiivisyydellä kuvataan aineen kykyä varastoida ja kuluttaa sähkökentän energiaa. Permittiivisyyden kasvaessa johtavuus ja väliaineessa etenevän sähkömagneettisen aallon etenemisvaimennus kasvavat, jolloin myös häviöt kasvavat [46, s.64].

Taulukko 3. Suositellut arvot maaperän suhteelliselle permittiivisyydelle ja sähkönjohtavuudelle [45 s.9].

| | Relative Permittivity | Conductivity (Siemens per Meter) |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Average ground | 15 | 0,005 |
| Poor ground | 4 | 0,001 |
| Good ground | 25 | 0,020 |
| Fresh water | 81 | 0,010 |
| Sea water | 81 | 5,0 |

Taulukon 3 karu maasto (Poor Ground) tarkoittaa esimerkiksi kiviä tai hiekkaisia maastoja. Rikas maasto (Good Ground) taas tarkoittaa esimerkiksi savea, hiesua tai suota.

Taulukko 4. Esimerkkiarvoja mitattu Suomessa, Keski-Lapissa. Suhteellisen permittiivisyyden keskiarvo ja maaperän lämpötila kasvukausina 1995 ja 1996 [47].

| Study Site | Dielectric Constant | | Soil Temperature [°C] | | Hydraulic Conductivity [m/s] |
|--------------------------|---------------------|------|-----------------------|------|------------------------------|
| | 1995 | 1996 | 1995 | 1996 | |
| Ääلتövittikko | N/A | 26,3 | N/A | 6,53 | $1,69 \times 10^{-6}$ |
| Kuorajoki | N/A | 27,4 | N/A | 7,74 | $1,4 \times 10^{-6}$ |
| Poksaselkä | 18,9 | 17,9 | 7,57 | 6,53 | $5,2 \times 10^{-6}$ |
| Hanhilehto, north | 21,6 | 21,4 | 7,31 | 5,04 | $5,6 \times 10^{-6}$ |
| Vaalolehto | 28,7 | 25,5 | 7,40 | 6,43 | $1,76 \times 10^{-6}$ |
| Hanhilehto, south | 12,9 | 12,8 | 9,16 | 7,0 | $6,8 \times 10^{-5}$ |
| Liesi | 7,2 | 7,4 | 8,89 | 8,67 | $3,2 \times 10^{-4}$ |

6.1.5 Surface conductivity

Maaston sähkönjohtavuus (S/m) kuvaa väliaineen ominaisuutta kuljettaa sähkövarauksia. Mitä pienempi sähkönjohtavuus aineella on, sitä enemmän se vaimentaa radioaaltoja. Alle 50 MHz taajuuksilla sähkönjohtavuus on dominoiva, muulloin oikea suhteellinen permittivisyys on tärkeämpi [45, s.10]. Suositellut arvot löytyvät taulukosta 3.

6.1.6 Surface refractivity

250–540 N-units

Ilmakehän valontaitto-kyky määrittää radioaaltojen taipuvuuden. Ilmakehän valontaitto-kyky mallinnetaan maan kaarevuuden arvona seuraavan kaavan mukaan:

$$N_s = 179,3 \times \ln \left[\frac{1}{0,046665} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \right] \quad (3)$$

N_s = Maan kaarevuus (N-units)

K = Vaikuttava maan kaarevuuden kerroin; esimerkiksi 1.333 kerroin vastaa $\frac{4}{3}$ kertaa maan sädettä

Raja-arvot vastaavat maan kaarevuuden kerrointa väliltä 1.232–1.767. Suositeltu arvo tavallisen ilmakehän tarpeisiin on 301 N-units.

Taulukko 5. Suositellut arvot maan kaarevuudelle ilmaston mukaan [45, s.9].

| Climate | N _s (N-units) |
|---|--------------------------|
| Equatorial (Congo) | 360 |
| Continental Subtropical (Sudan) | 320 |
| Maritime Subtropical (West Coast of Africa) | 370 |
| Desert (Sahara) | 280 |
| Continental Temperate | 301 |
| Maritime Temperate, over land (United Kingdom and continental west coasts) | 320 |
| Maritime Temperate, over sea | 350 |

6.1.7 Climate

Etenemismalliin vaikuttavat ilmastot on luokiteltu seitsemään kategoriaan taulukossa 5. Alle 50 kilometrin matkoilla ilmakehällä on pieni vaikutus, jolloin suositellaan käytettäväksi mannermaista lauhkeaa (Continental Temperate) ilmastoa [45, s.10].

Mannermainen lauhkea ilmasto on yleinen isoille maamassoille lauhkealla vyöhykkeellä. Sitä mallinnetaan äärimmäisillä lämpötiloilla ja kausiluontoisilla muutoksilla radioaallon etenemiseen. Lauhkea rannikko (Maritime Temperate) on kuvaavampi keskileveyspiirin rannikkoalueilla, missä hallitsevat tuulet kuljettavat meri-ilmaa sisämaahan.

6.1.8 Confidence

0,1–99,9 %

Tilanteen muuttuvuus ottaa huomioon signaalin vahvuuteen vaikuttavat tekijät jotka johtuvat käyttäjästä. Esimerkiksi jos kymmenen ihmistä mittaisi täysin identtisen radiolinkin laadun, täysin samaan aikaan, löytyisi tuloksista silti eroavaisuuksia. Mittaajien väliltä löytyisi eroavaisuuksia kalibroinnissa, käyttäjän taitotasossa tai antennin suuntauksen huolellisuudessa. Jos tarkastellaan yksittäistä ennustetta,

oletetaan että näin monta prosenttia mittaajista, jotka tekevät vastaavan mittauksen identtisessä tilanteessa, saavat saman tai paremman tuloksen.

6.1.9 Reliability

0,1–99,9 %

Ajan muuttuvuus ottaa huomioon luonnon muuttujat, joita ei voida parametrisoida. Esimerkiksi jos mitataan saman signaalin vahvuutta samalla välillä vuorokauden ajan, esiintyy tuloksissa vaihtelevuutta. Jos luotettavuutta nostetaan, saatu tulos on pessimistisempi, koska halutaan varmistaa että tulos on saatavilla suuremman osan vuorokaudesta. Jos luotettavuutta lasketaan, saadaan optimistisempi tulos, mutta oletetaan että tulosta ei saada osaa ajasta.

6.1.10 Elevation

Kun käytetään Longley-Rice-mallin pisteestä pisteeseen laskentaa, tarvitaan antennien välinen maastoprofiili. Maastoprofiili pitää sisällään mitattujen maastopisteiden määrän, antennien välisen etäisyyden metreinä ja listan maastopisteiden korkeuksista metreinä.

Taulukko 6. Esimerkki kilometrin mittaisesta maastoprofiilista, jossa maastopisteet on annettu 50 metrin välein.

| | Arvo |
|--------------------------------|--|
| Maastopisteiden määrä | 20 |
| Etäisyys | 1000 |
| Maastopisteiden korkeus | 176, 174, 172, 170, 168, 170, 170, 170, 170, 170, 175, 180, 185, 182, 181, 180, 180, 180, 178, 178 |

6.2 Muut rajoitteet

Parametreissa listattujen rajojen lisäksi Longley-Rice-mallia koskevat myös seuraavat rajoitteet:

- Antennien välinen **etäisyys** täytyy olla väliltä 1–2000 kilometriä.
- **Horisontin korkeuskulman** (Horizon Elevation Angle) täytyy olla vähemmän kuin 200 mrad (noin 11,5 astetta) [45, s.77].

6.3 Tulokset

Sen lisäksi että Longley-Rice-malli palauttaa radiolinkin mediaani vaimenemisen desibeleinä, antaa se tietoa laskennan oikeellisuudesta ja mahdollisista virheistä.

Taulukko 7. Longley-Rice-mallin radioaallon etenemisen reittiä kuvaavat termit.

| Termi | Suomenno |
|-----------------------|-------------------------------|
| Line-of-Sight | Näkölinja |
| Single Horizon | Yksittäinen horisontti |
| Double Horizon | Kaksois-horisontti |
| Diffraction Dominant | Taipuminen hallitseva |
| Troposcatter Dominant | Troposfäärisironta hallitseva |

Longley-Rice-malli palauttaa kuvauksen radiaallon etenemistavasta taulukon 7 mukaisesti. Lisäksi malli arvioi sille annetut parametrit ja palauttaa virhearvon kriittisimmän virheen mukaan.

Taulukko 8. Longley-Rice-mallin virhearvot ja esimerkkitapauksia.

| Virhearvo | Kuvaus |
|------------------|---|
| 1 | Parametri on lähellä rajaa. |
| 2 | Mahdoton parametri, oletusarvo sijoitettu tilalle. |
| 3 | Sisäiset laskennat osoittavat että parametri on rajojen ulkopuolella. |
| 4 | Parametri rajojen ulkopuolella. |
| | Esimerkki |
| 1 | Syötetty taajuus 40 MHz on lähellä Longley-Rice-mallin alarajaa 20 MHz. |
| 2 | Syötetty ilmaston arvo -1 on mahdoton, sijoitetaan arvo 5 (Continental Temperature) ilmaston tilalle. |
| 3 | Syötettyjen arvojen pohjalta horisontin korkeuskulma on rajojen ulkopuolella. |
| 4 | Syötetty antennien välinen maastoprofiili kattaa vain 50 metrin matkan, mutta mallin etäisyyden alaraja on kilometri. |

7 LONGLEY-RICE-TESTAUS

Longley-Rice-mallin testaamisessa käytettiin Bittiumin mittaustuloksia useista eri kenttätesteistä. Mittaustulosten säilytysformaatti mahdollistaa testaamisen automatisoinnin, jolloin voidaan verrata laskentaohjelmistoa tuhansiin maastossa tehtyihin radiolinkkeihin. Lopputyön laajuudessa tarkasteltiin neljää eri nimeämätöntä aluetta, joilla kenttätetit on suoritettu vuosina 2016 ja 2017. Säätiotojen hakemiseen käytettiin Säähavaintoarkistoa [48], joka pohjautuu Ilmatieteen laitoksen avoimeen dataan. Tuloksien havainnollistamiseen käytettiin Matplotlib Python kirjastoa [49]. Kenttätesteistä löytyvien RH-III radiolinkkien vähyden takia keskitytään tuloksissa tarkastelemaan ainoastaan RH-I ja RH-IV radiolinkkejä.

7.1 Oletusarvot

Radiolinkin taajuus, radioiden GPS-koordinaatit, lähetysteho ja mitattu RSSI-arvo saadaan kenttätestien mittaustuloksista.

Taulukko 9. Testaamisessa käytetyt oletusarvot radioyksiköille.

| | RH-I | RH-IV |
|---------------------------|-------------|--------------|
| Antennin korkeus | 1,8 m | 22 m |
| Antennin vahvistus | 0 | 22 dB |

Oletetaan että lähettimen ja vastaanottimen antennin korkeus ja antennin vahvistus ovat taulukon 8 mukaiset.

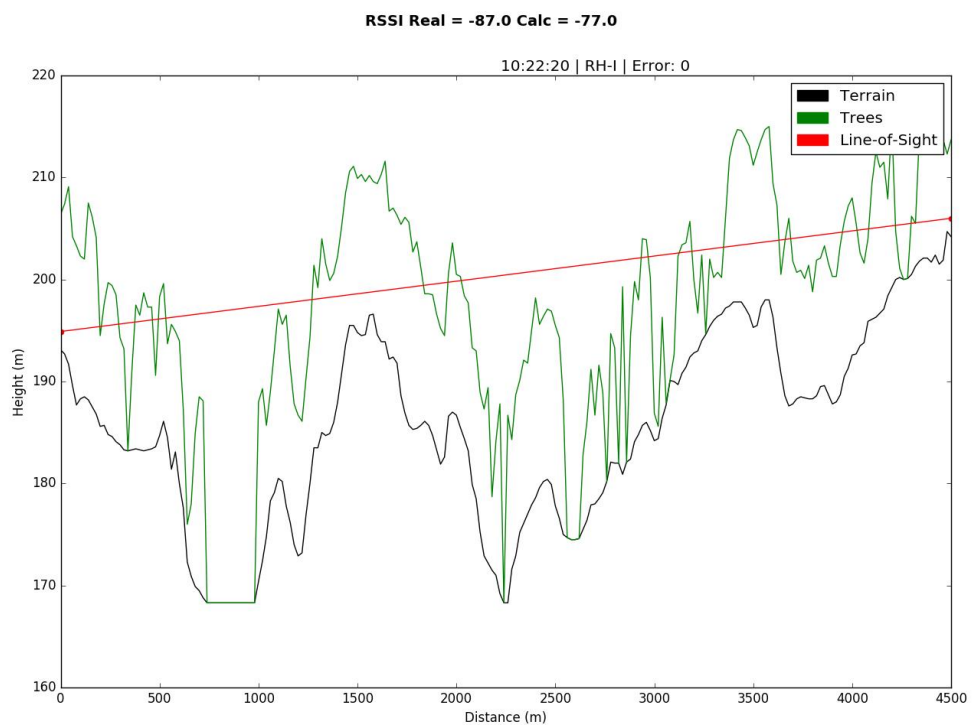
Taulukko 10. Testaamisessa käytetyt oletusarvot Longley-Rice-mallille.

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Polarization | Horizontal |
| Dielectric constant | 20 |
| Surface conductivity | 0,005 S/m |
| Surface refractivity | 301 N-units |
| Climate | Continental Temperate |

| | |
|--------------------|---|
| Confidence | 90 % |
| Reliability | 90 % |
| Elevation | Maastopisteet luettuna Maanmittauslaitoksen korkeusmallista 20 metrin välisinä askeleina. |

7.2 Maastoprofiili

Kuva 8. Esimerkki kenttätestin yksittäisen radiolinkin maastoprofiilista.

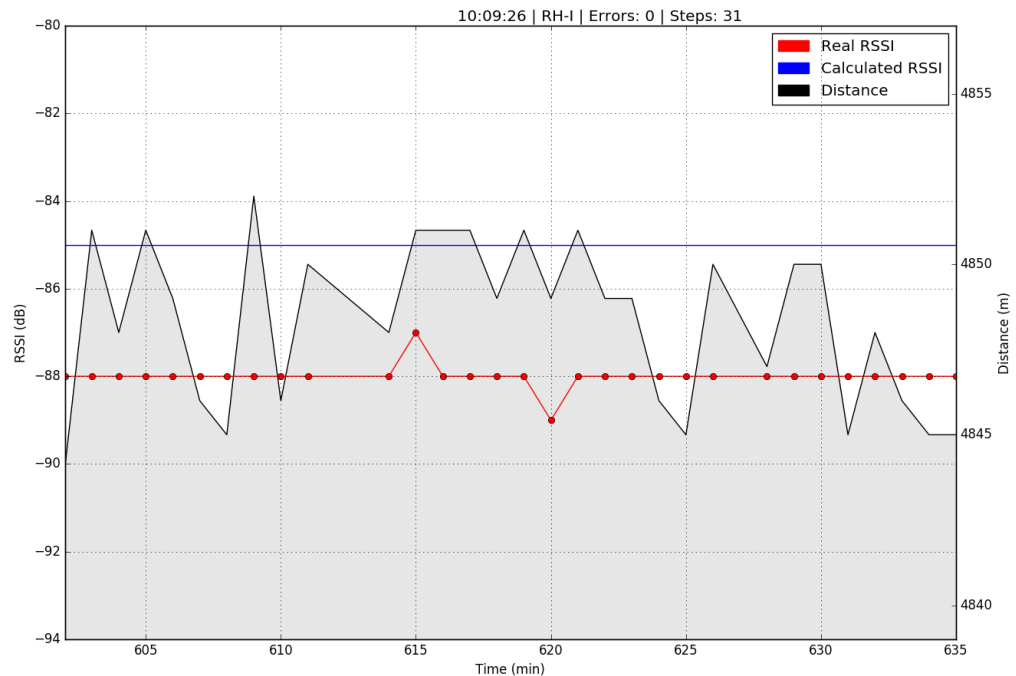


Kuva 8 on esimerkki automaatio työkalun piirtämästä maastoprofiilista. Kuvan otsikossa on radiolinkistä saatu mitattu sekä laskennallinen RSSI-arvo. Sitä alempana on tilannekuvan kellonaika, radioyksiköiden tyyppi, sekä kriittisimmän virheen arvo jonka Longley-Rice-malli palautti. Maastoprofiilin vasemmassa ja oikeassa laidassa ovat radiolinkin radioyksiköt, sekä näiden välille punaisella piirretty näköyhteys.

Kuvan 8 maastoprofiilista voidaan esimerkiksi tulkita, että noin 800 metrin päässä lähettimestä on ollut todennäköisesti järvi; täysin tasainen maasto jossa ei ole puustoa. Lisäksi iso ero mitatussa ja laskennallisessa RSSI-arvossa voidaan selittää sillä, että Longley-Rice-malli ei ota antennien välistä runsasta puustoa huomioon.

7.3 Raporttikaavio

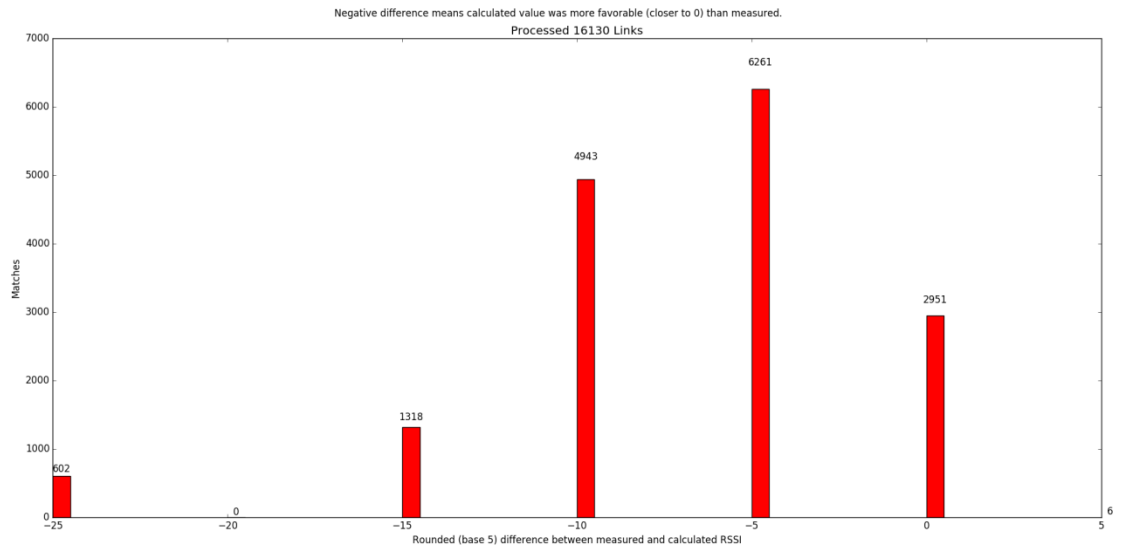
Kuva 9. Mitattu RSSI-arvo verrattuna laskennalliseen RSSI-arvoon radiolinkin elinkaaren ajan.



Kuva 9 on esimerkki tilannekatsauksesta joka on kertynyt erään RH-I radiolinkin välillä kenttätestin aikana. Kuva kattaa noin 32 minuutin ajanjakson. Radiolinkkien välinen etäisyys on kuvattu mustalla täytetyllä linjalla, mikä on ollut noin 4847 metriä radiolinkin elinkaaren ajan. Etäisyydessä on pientä vaihtelua todennäköisesti johtuen GPS koordinaattien epätarkkuudesta.

7.4 Kenttätestikaavio

Kuva 10. Esimerkki RH-I kenttätestikaaviosta.



Kuva 10 on esimerkki automaatio työkalun piirtämästä kaaviosta, jossa verrataan kenttätestin yhden päivän jokaisen radiolinkin mitattua RSSI-arvoa laskennalliseen RSSI-arvoon. Kuvan otsikossa on radiolinkkien määrä jota tutkittiin. Radiolinkkien määrällä tarkoitetaan jokaisen yksittäisen radiolinkin noin minuutin välistä tilannekatsausta. Esimerkiksi jos kahden radioyksikön välillä on radiolinkki 30 minuuttia, näkyy tämä 30 uutena tilannekatsauksena mittaustuloksissa. Kenttätestikaaviosta on suodatettu pois kaikki tulokset, joista Longley-Rice-malli palautti virhearvon 3 tai 4.

Mitatun ja laskennallisen RSSI-arvon ero on esitetty laskennallinen arvo vähennettynä mitatusta arvosta. Täten jos ero on negatiivinen, laskettu RSSI-arvo oli optimistisempi kuin mitattu RSSI-arvo. Jos ero on positiivinen, laskettu-RSSI arvo oli pessimistisempi kuin mitattu RSSI-arvo. Graafissa RSSI-arvojen erot on pyöristetty lähimpään 5-kantaan luettavuuden selkeyden vuoksi.

Taulukko 11. Esimerkkejä mitatun ja laskennallisen RSSI-arvon eron pyöristyksestä.

| Mitatun | Laskennallinen | Ero | Pyöristettynä |
|---------|----------------|--------------------------|---------------|
| -66,0 | -63,0 | $-66,0 - (-63,0) = -3,0$ | -5 |
| -70,0 | -72,4 | $-70,0 - (-72,4) = 2,4$ | 0 |

7.5 Alue 1: Kevät (2 päivää)

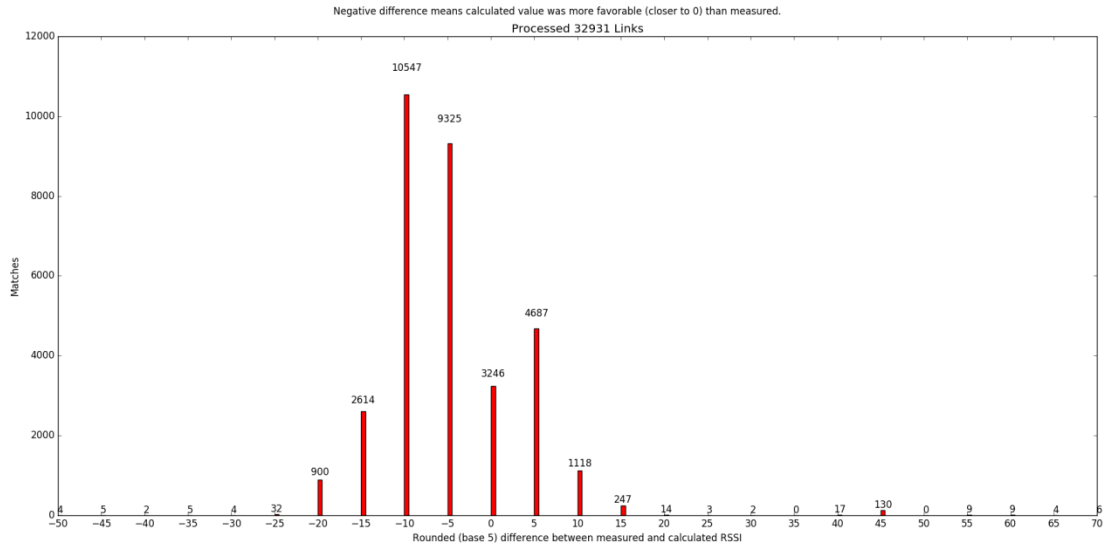
Saatujen maastoprofiilien mukaan, Keski-Suomessa sijaitsevan alueen maaston korkeus vaihtelee välillä 170–240 metriä merenpinnan yläpuolella. Ensimmäisen päivän keskilämpötila oli noin 12 °C eikä päivän aikana ilmennyt vesi- tai lumisadetta. Toisen päivän sää olosuhteet pysyivät samana.

Kuva 11. Esimerkki alue 1 maastoprofiilista.

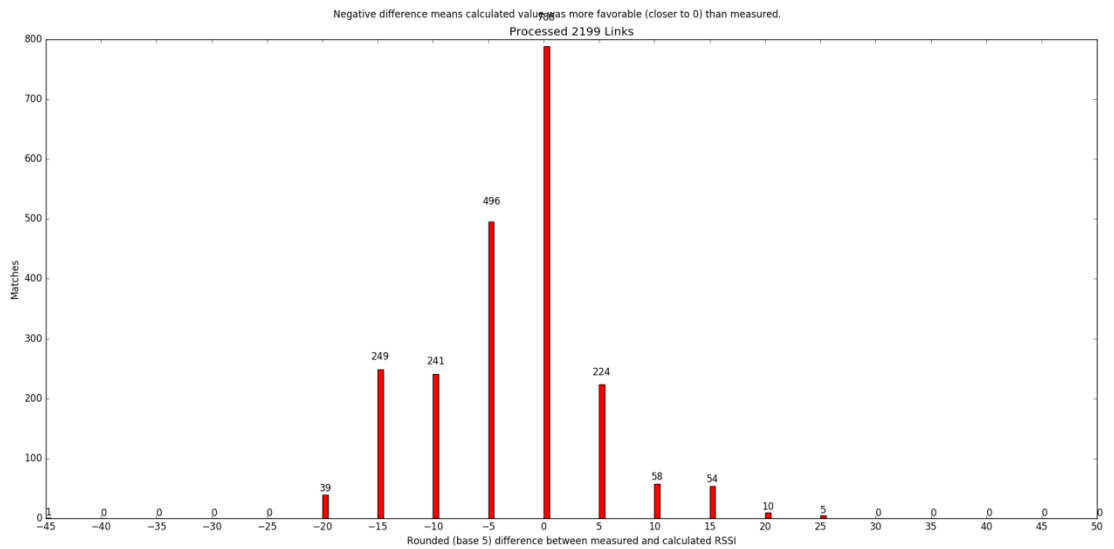


7.5.1 RH-I

Kuva 12. Alue 1: Päivä 1 RH-I kenttätestikaavio.

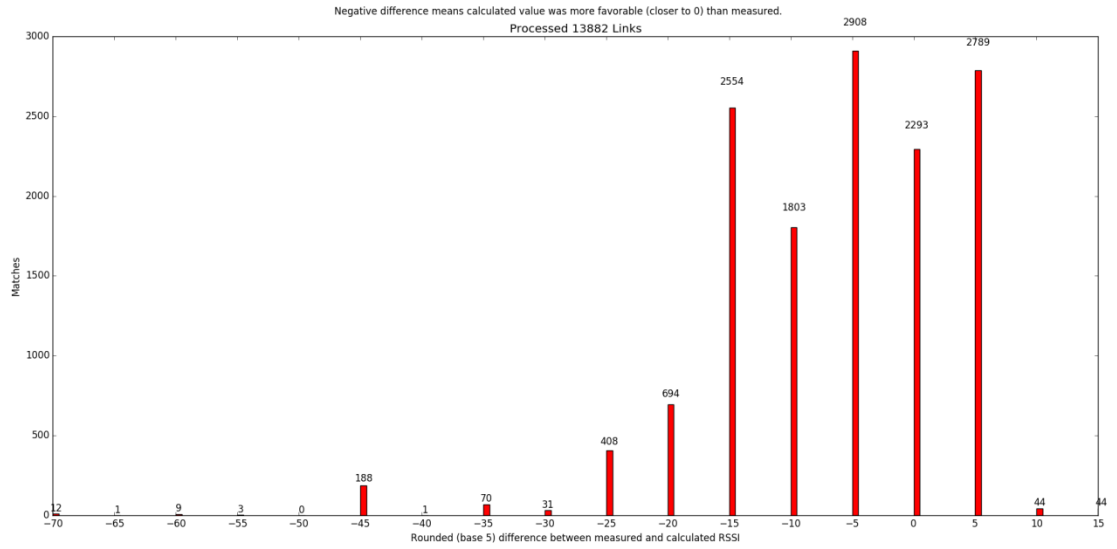


Kuva 13. Alue 1: Päivä 2 RH-I kenttätestikaavio.

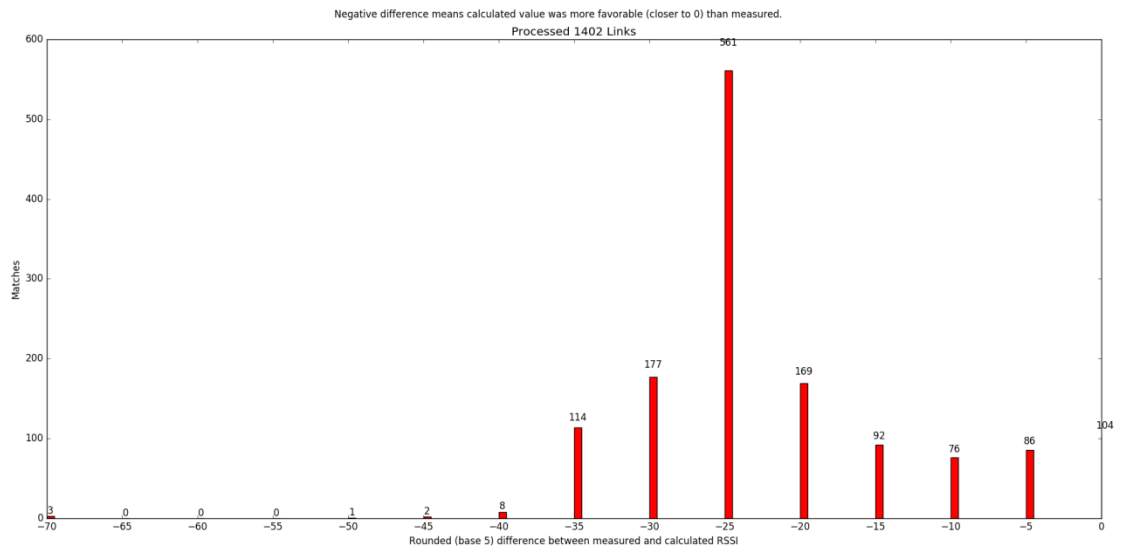


7.5.2 RH-IV

Kuva 14. Alue 1: Päivä 1 RH-IV kenttätestikaavio.



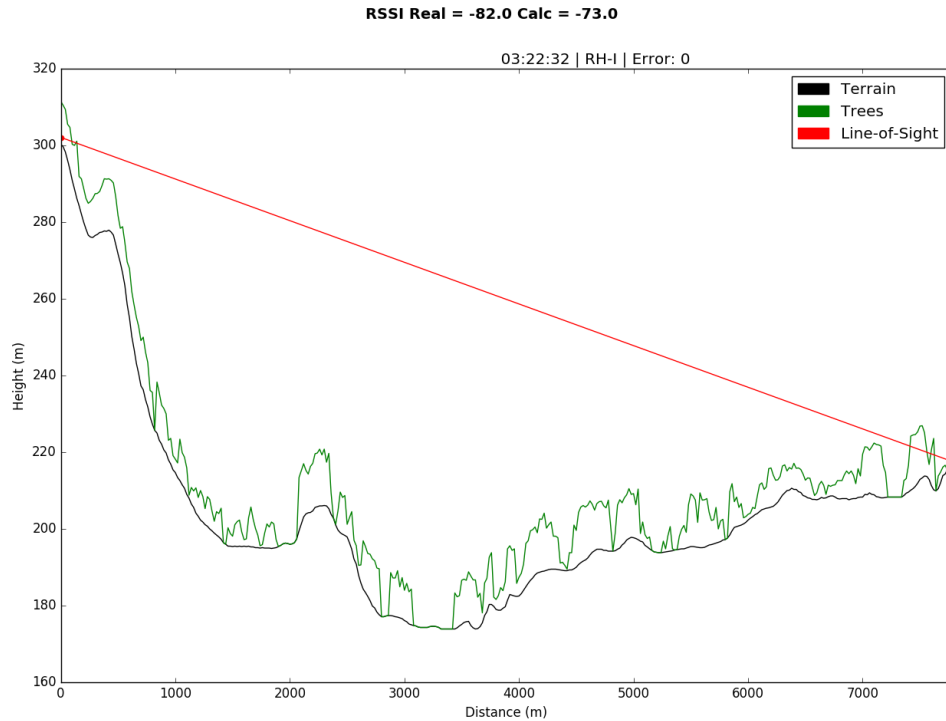
Kuva 15. Alue 1: Päivä 2 RH-IV kenttätestikaavio.



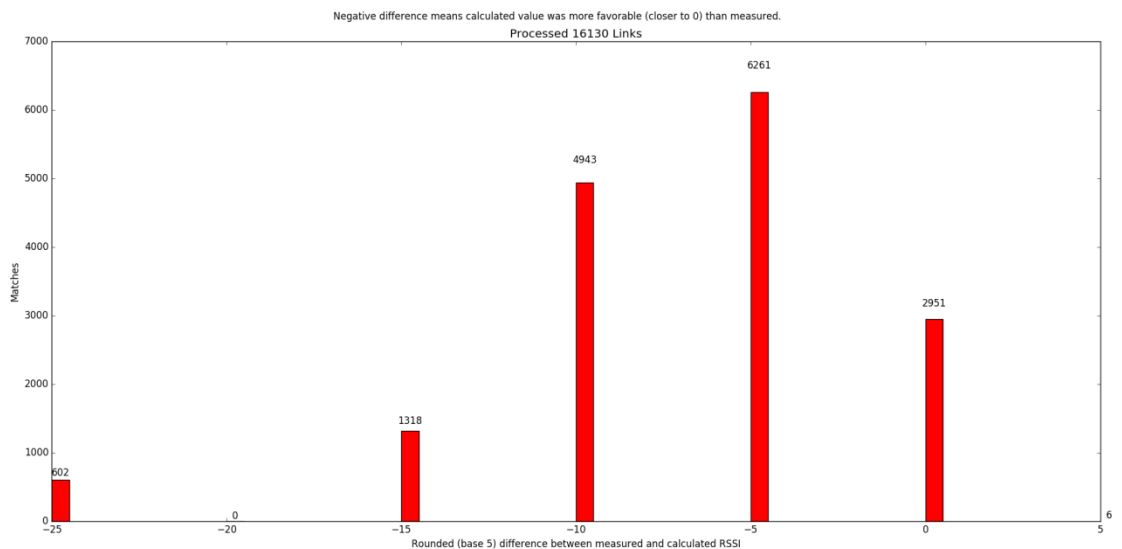
7.6 Alue 2: Kesä (1 päivä)

Saatujen maastoprofiilien mukaan, Pohjois-Suomessa sijaitsevan alueen maaston korkeus vaihtelee välillä 180–300 metriä merenpinnan yläpuolella. Päivän keskilämpötila oli noin 15 °C ja päivän aikana ilmeni noin 18 mm vesisadetta.

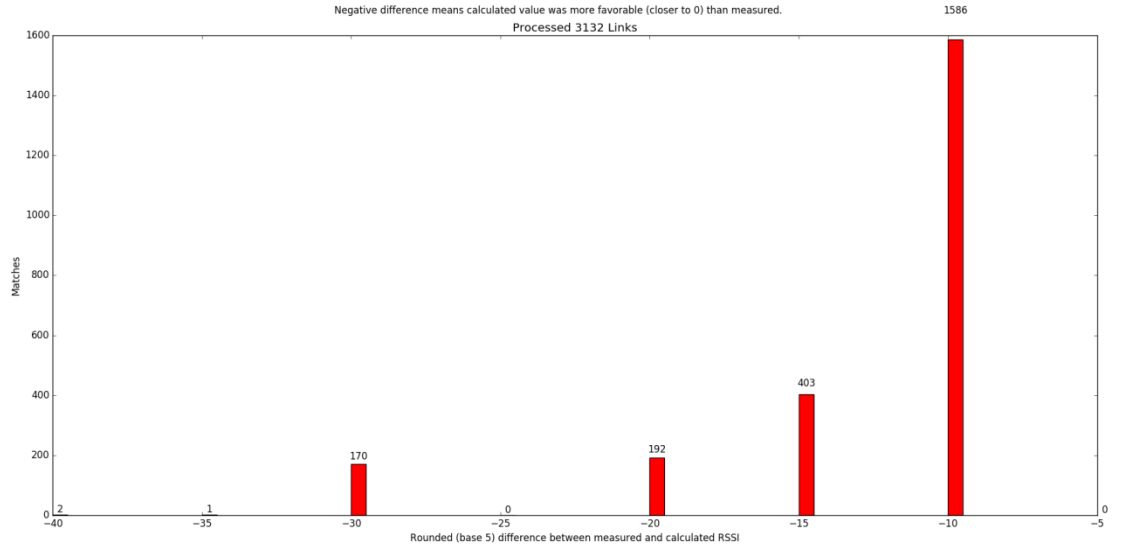
Kuva 16. Esimerkki alue 2 maastoprofilista.



Kuva 17. Alue 2: RH-I kenttätestikaavio.



Kuva 18. Alue 2: RH-IV kenttätestikaavio.



7.7 Alue 3: Syksy (2 päivää)

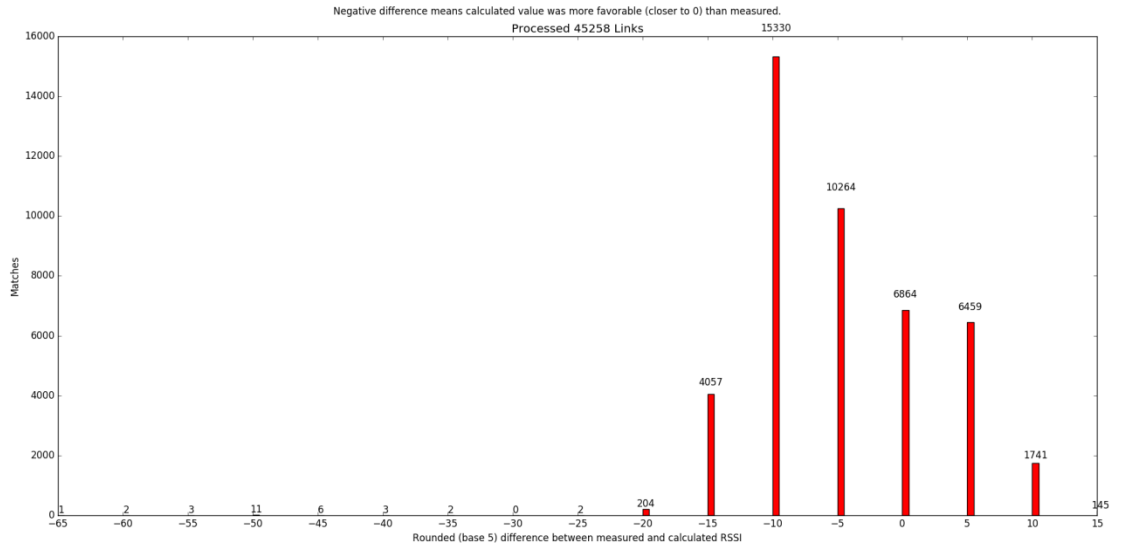
Saatujen maastoprofiilien mukaan, Keski-Suomessa sijaitsevan alueen maaston korkeus vaihtelee välillä 140–220 metriä merenpinnan yläpuolella. Ensimmäisen päivän keskilämpötila oli noin $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ eikä päivän aikana ilmennyt vesi- tai lumisadetta. Toisen päivän sääolosuhteet pysyivät samana.

Kuva 19. Esimerkki alue 3 maastoprofiilista.

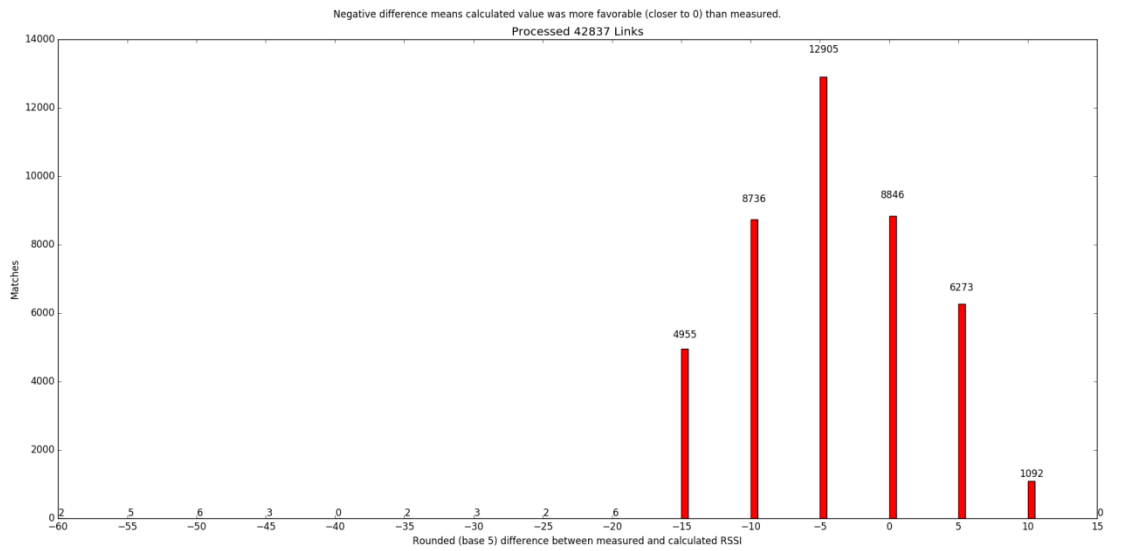


7.7.1 RH-I

Kuva 20. Alue 3: Päivä 1 RH-I kenttätestikaavio.

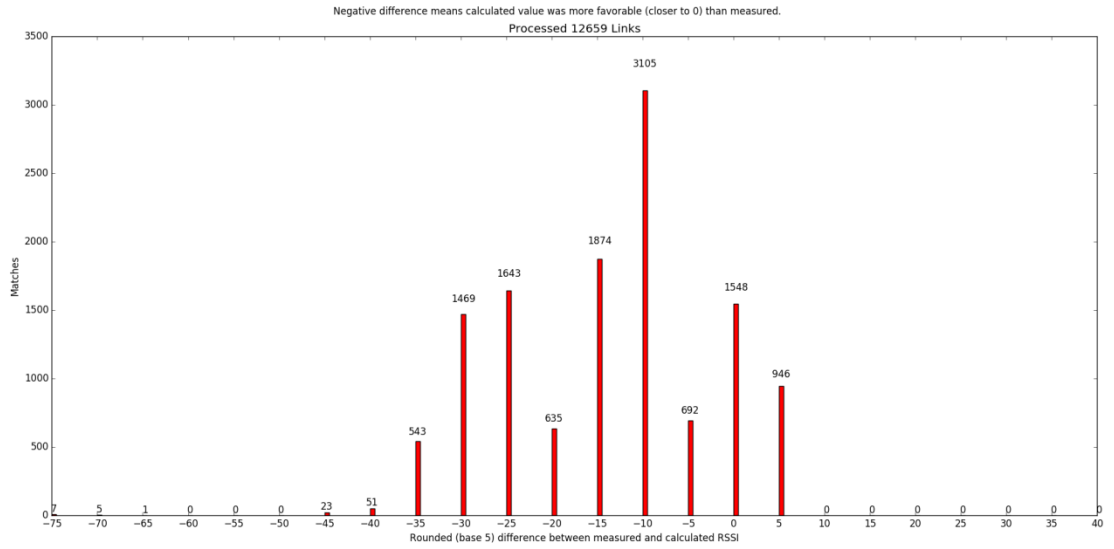


Kuva 21. Alue 3: Päivä 2 RH-I kenttätestikaavio.

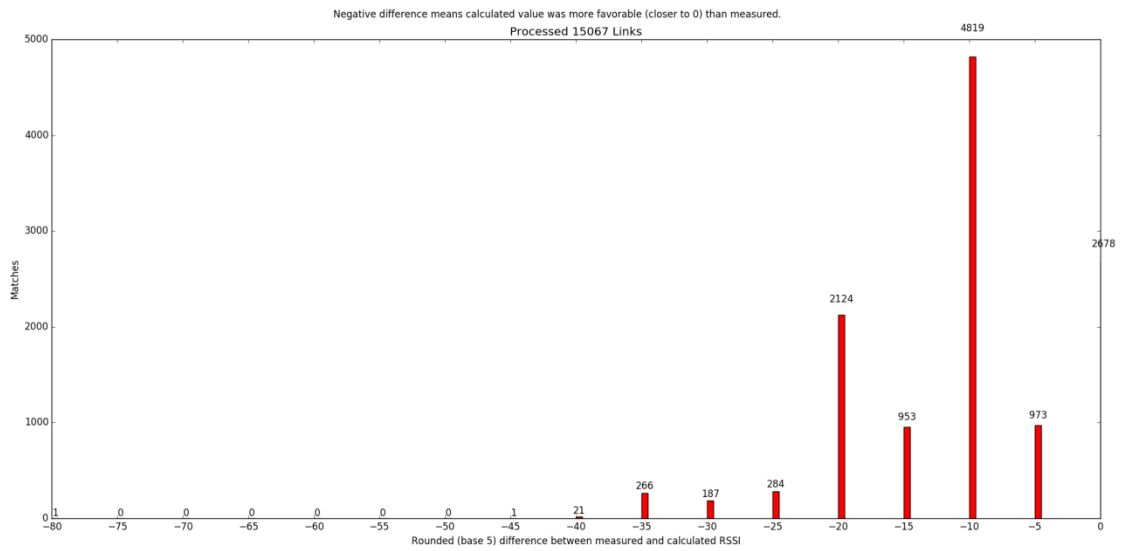


7.7.2 RH-IV

Kuva 22. Alue 3: Päivä 1 RH-IV kenttätestikaavio.



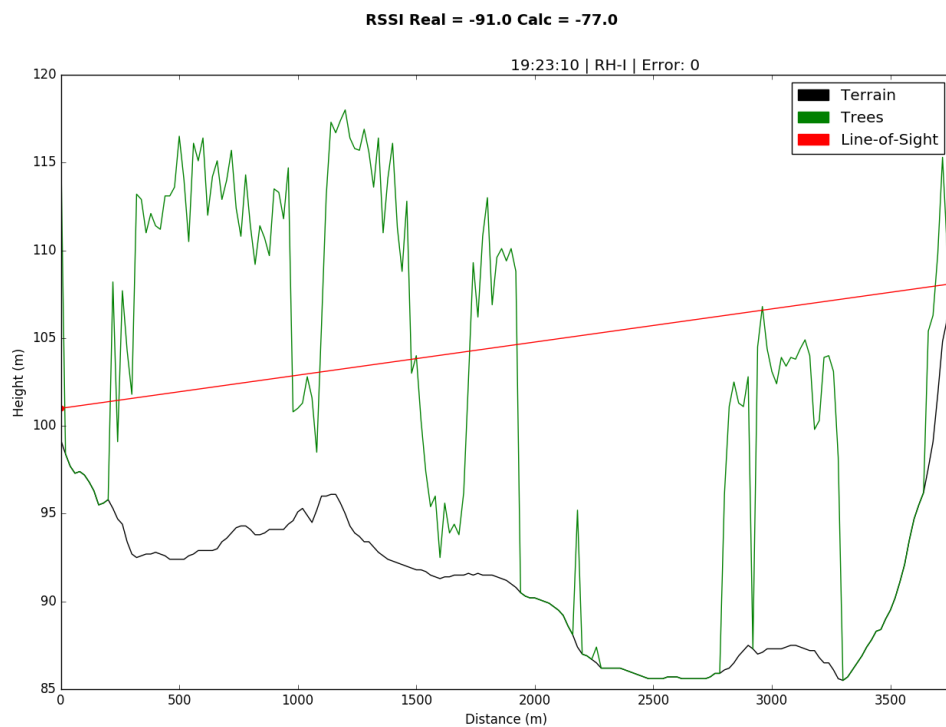
Kuva 23. Alue 3: Päivä 2 RH-IV kenttätestikaavio.



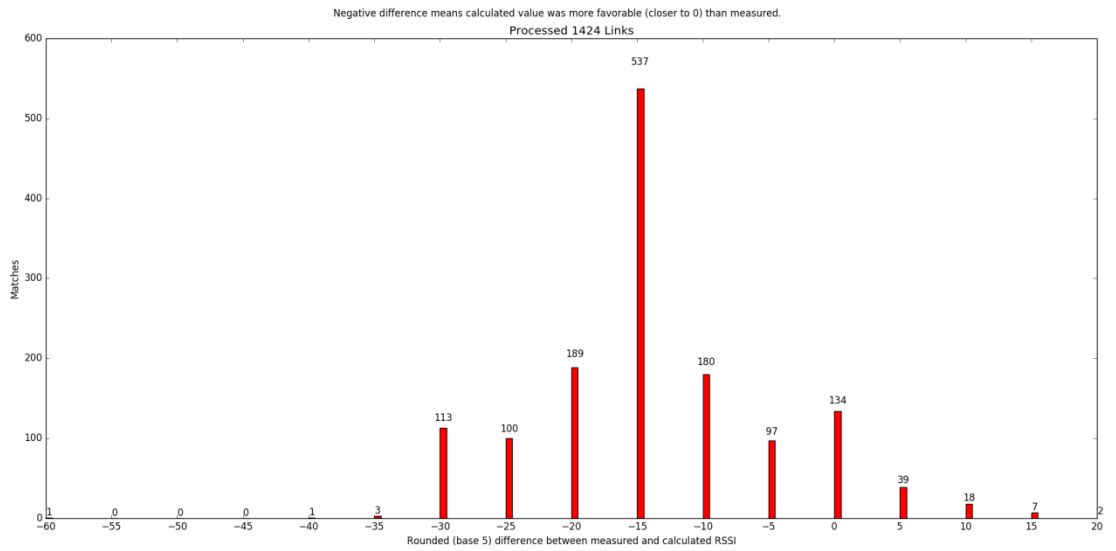
7.8 Alue 4: Talvi (4 päivää)

Saatujen maastoprofiilien mukaan, Etelä-Suomessa sijaitsevan alueen maaston korkeus vaihtelee välillä 80–135 metriä merenpinnan yläpuolella. RH-IV radiolinkkien vähäisyyden takia keskitytään tarkastelemaan ainoastaan RH-I radiolinkkejä. Ensimmäisen päivän keskilämpötila oli noin $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ eikä päivän aikana ilmennyt vesi- tai lumisadetta. Toisena ja kolmantena päivänä keskilämpötila oli noin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kunnes neljäntenä päivänä se oli noin $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lumen paksuus oli kenttätestin ajan noin 14 cm.

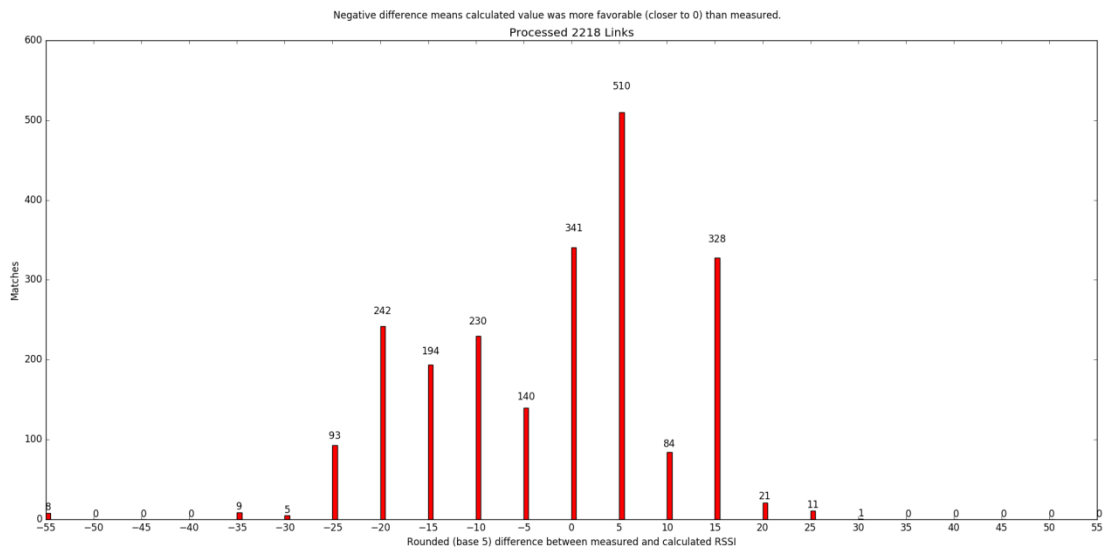
Kuva 24. Esimerkki alue 4 maastoprofiilista.



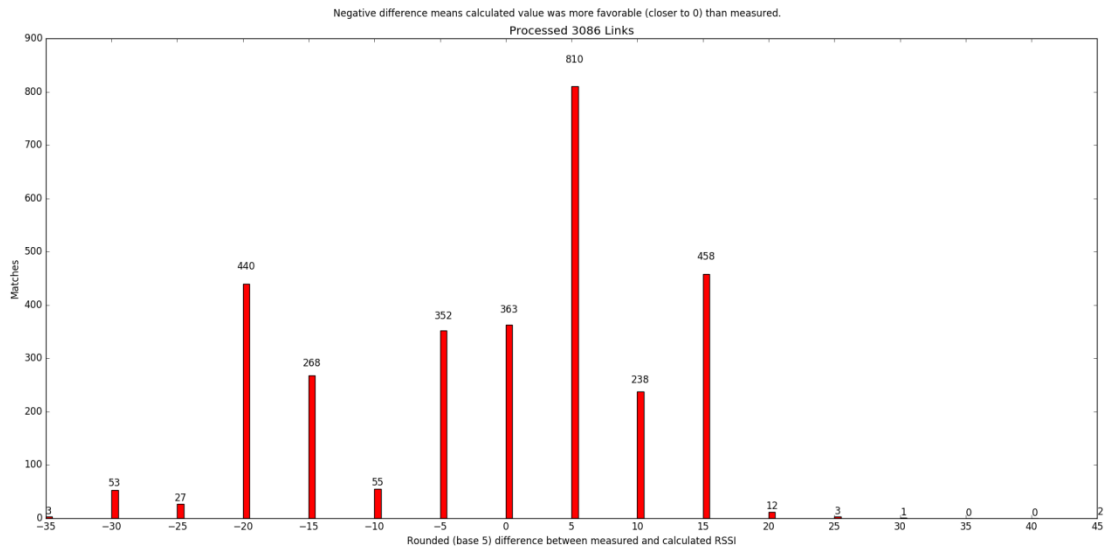
Kuva 25. Alue 4: Päivä 1 RH-I kenttätestikaavio.



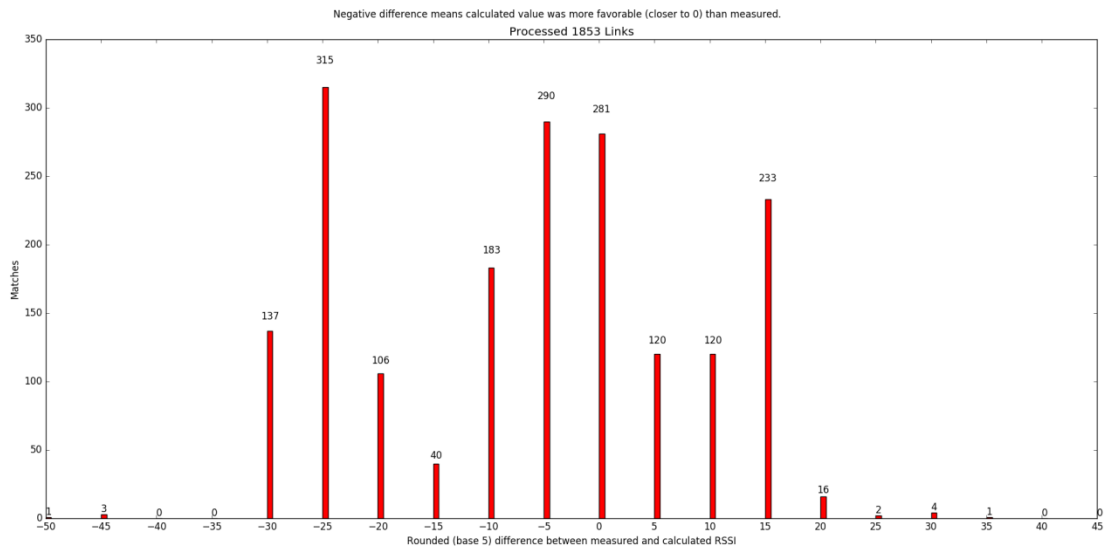
Kuva 26. Alue 4: Päivä 2 RH-I kenttätestikaavio.



Kuva 27. Alue 4: Päivä 3 RH-I kenttätestikaavio.



Kuva 28. Alue 4: Päivä 4 RH-I kenttätestikaavio.



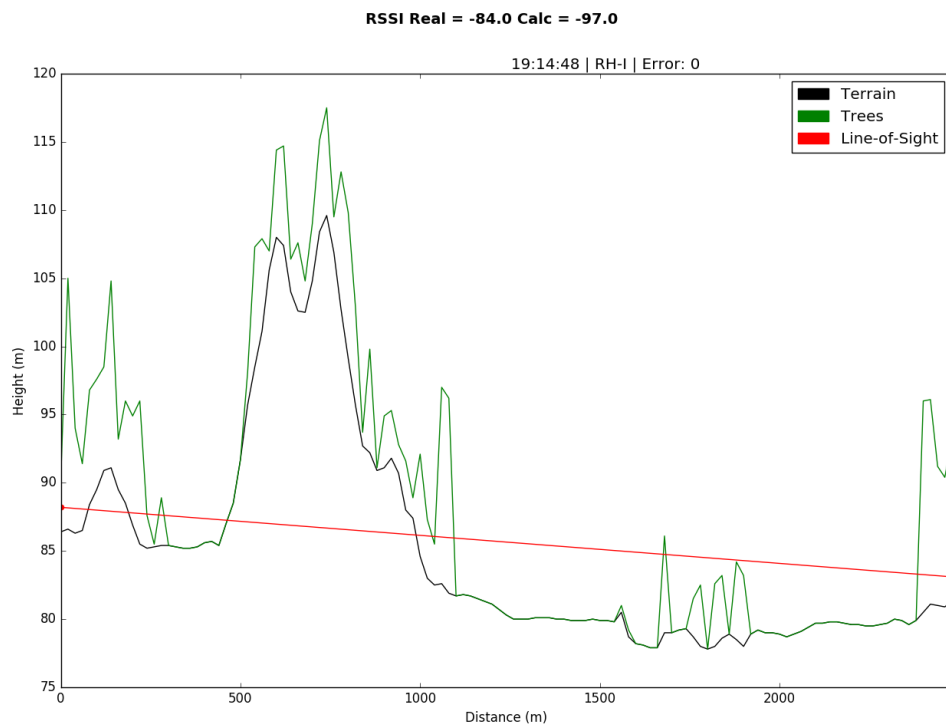
8 TESTITULOSTEN TARKASTELU

8.1 Virhearviointi

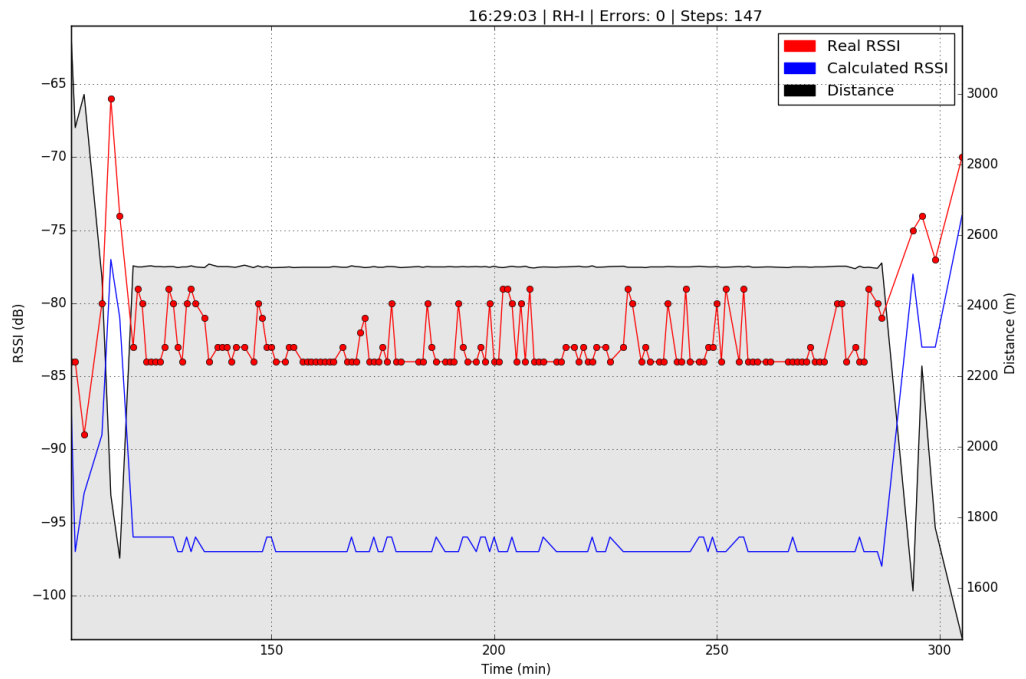
Jotta suuresta määrästä tietoa saataisiin systemaattisia tuloksia, on hyvä ensiksi käydä läpi kaikki virhetekijät jotka saattavat vääristää Longley-Rice-mallin tuloksia tai kenttätestikaavioita.

1. Maastoprofiili ei kerro koko totuutta maastosta.

Kuva 29. RH-I radiolinkki jossa laskennallinen RSSI-arvo on 13 dB huonompi.



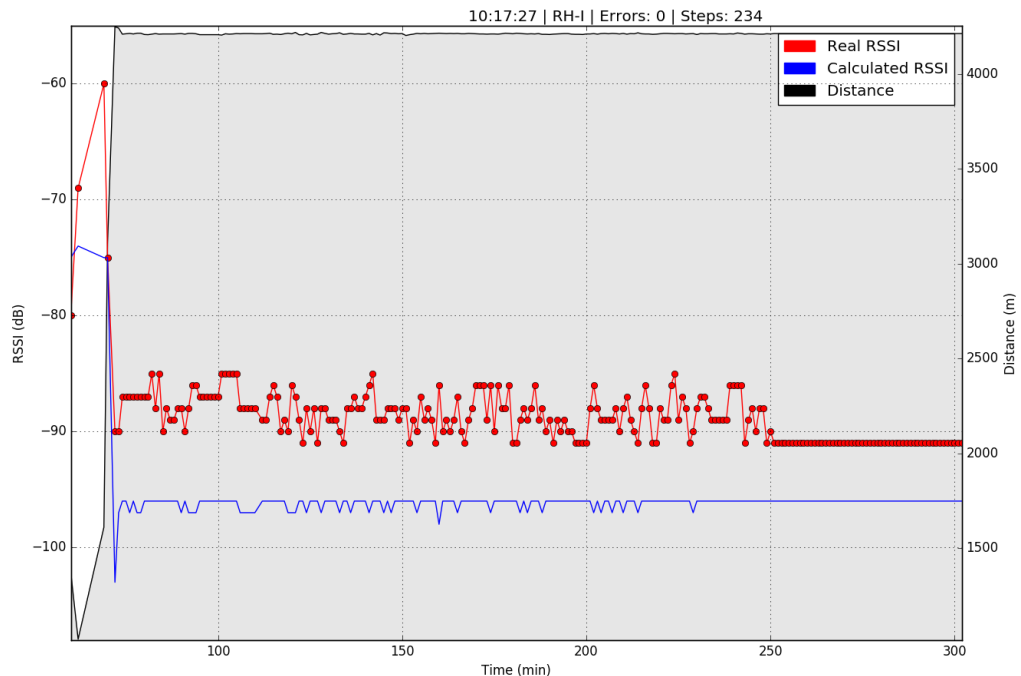
Kuva 30. Raporttikaavio jossa kuvan 29 maastoprofiili on vaikuttanut aikavälillä noin 130–290 min.



Vaikka kuvan 30 radiolinkissä on ollut paljonkin vaihtelua mitatussa RSSI-arvossa, ei se ole laskenut -84 dB alemmas määrättyä ajanjaksona. Käytetty 20 metrin askel maastoprofiilin kuvauksessa on tarpeeksi tiheä, että se ei piilota suuria korkeuseroja. Luonnossa saattaa olla äärimmäisiä tilanteita joissa radioaaltoon vaikuttavat ilmiöt, esimerkiksi taipuminen, mahdollistavat yhteyden muodostumisen.

2. Erityisesti RH-I radiolinkkien laskennalliset tulokset ovat herkkiä radioiden GPS-koordinaattien vaihtelulle.

Kuva 31. Esimerkki raporttikaaviosta jossa laskennallinen RSSI-arvo vaihtelee GPS-koordinaattien vaihtelun takia.



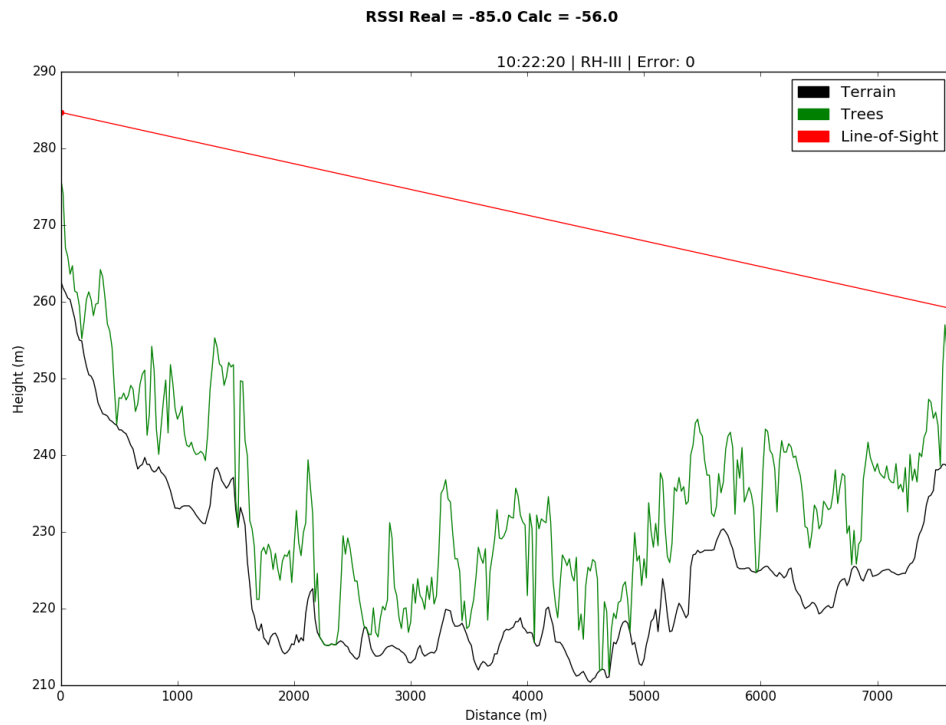
Kuvassa 31 radioyksiköt ovat todennäköisesti pysyneet paikoillaan läpi kenttätestin päästyään mittauspaikalle, mutta etäisyydessä näkyy pientä vaihtelua johtuen GPS-koordinaattien vaihtelusta. Muutamankin metrin vaihtelu koordinaateissa saattaa tuottaa erilaisen maastoprofiilin antennien välillä. Tämä näkyy kuvassa 1-2 dB heittona laskennallisessa RSSI-arvossa.

3. Longley-Rice-malli ei ota huomioon puustoa tai lehvistöä.

Suurin yksittäinen tekijä joka vaikuttaa RSSI-arvojen eroon, erityisesti RH-I radiolinkeissä jotka ovat suurimmaksi osaksi metsän sisällä. Metsän vaikutusta etenemiseen käytiin lyhyesti luvussa 4, mutta tämän lopputyön laajuudessa kattavaa vaikutusta ei pystytä tutkimaan.

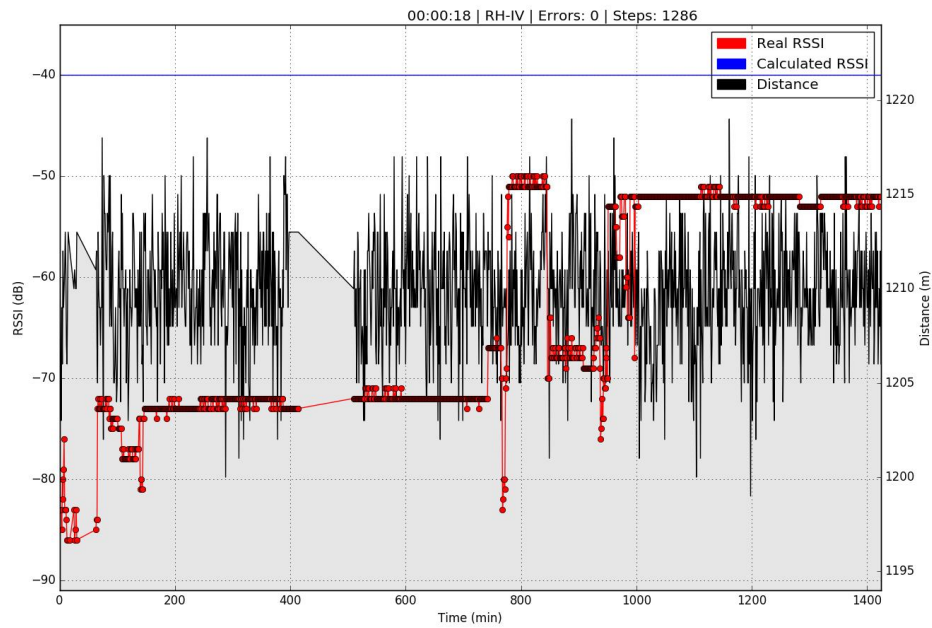
4. Antennin suuntauksesta tai tyypistä johtuvat eroavaisuudet.

Kuva 32. Esimerkki RH-III radiolinkistä jossa Fresnelin vyöhyke on melkein koskematon.



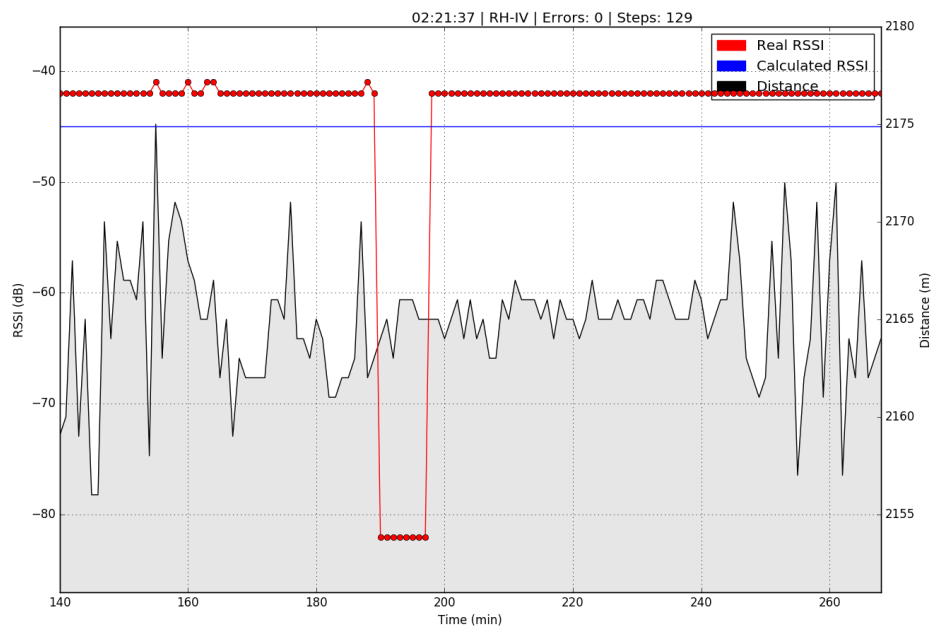
Longley-Rice ei ole palauttanut virhettä kuvan 32 laskennasta, mutta RSSI-arvojen välillä on 29 desibelin ero. Joko antenni on suunnattu väärin tai on käytetty esimerkiksi ympärisäteilevää antennia.

Kuva 33. Esimerkki huonosti suunnatusta RH-IV radiolinkistä.



5. Mahdolliset yksittäiset laiteviat tai hetkellinen este.

Kuva 34. Esimerkki määrittelemättömästä viasta noin 190 minuutin kohdalla.



Vaikka raporteista on suodatettu pois kaikki tulokset joista Longley-Rice-malli palauttaa virhearvon 3 tai 4, jättää tämä jäljelle joitain hetkellisiä virheitä mittaustulosten formaatissa. Nämä näkyvät kenttätestikaavioissa marginaalisina äärimmäistapauksina.

6. Maastodatan vanhentuminen.

Nykyinen puuston keskipituuden materiaali on vuodelta 2013. Materiaalin vanhentuminen ei suoranaisesti vaikuta Longley-Rice-mallin tuloksiin, mutta se saattaa antaa väärän kuvan maastoprofiilista joka käyttäjälle näytetään. Esimerkiksi uudet hakkuualueet saattavat näkyä profiilissa korkeana puustona.

7. Kenttätesteistä ei ole pidetty yksityiskohtaista lokikirjaa.

Täten ei voida olla varmoja onko yksittäisissä kenttätesteissä ilmennyt jotain ongelmia laitteistossa tai ohjelmistossa, joka tulisi ottaa huomioon mittaustuloksien käsittelyssä.

8.2 Kenttätestikaavioiden tarkastelu

Taulukko 12. Esitetyt kenttätestikaaviot summattuna.

| Radio | Mitatun ja laskennallisen RSSI-arvon ero | | | | | | | | | | | Linkkien määrä |
|----------------|--|------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|------|------|----------------|
| | -35 | -30 | -25 | -20 | -15 | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | |
| RH-I | 24 | 315 | 1173 | 2126 | 14272 | 40445 | 40130 | 23712 | 19122 | 4469 | 1472 | 147260 |
| RH-I % | - | 0,2 | 0,8 | 1,4 | 9,7 | 27,5 | 27,3 | 16,1 | 13,0 | 3,0 | 1,0 | |
| | 66,9 % | | | | | | | 16,1 % | 17,0 % | | | |
| RH-IV | 995 | 2034 | 2896 | 3814 | 5876 | 11389 | 4659 | 6623 | 3735 | 44 | 44 | 42109 |
| RH-IV % | 2,4 | 4,8 | 6,9 | 9,1 | 14,0 | 27,0 | 11,1 | 15,7 | 8,9 | 0,1 | 0,1 | |
| | 75,3 % | | | | | | | 15,7 % | 9,1 % | | | |

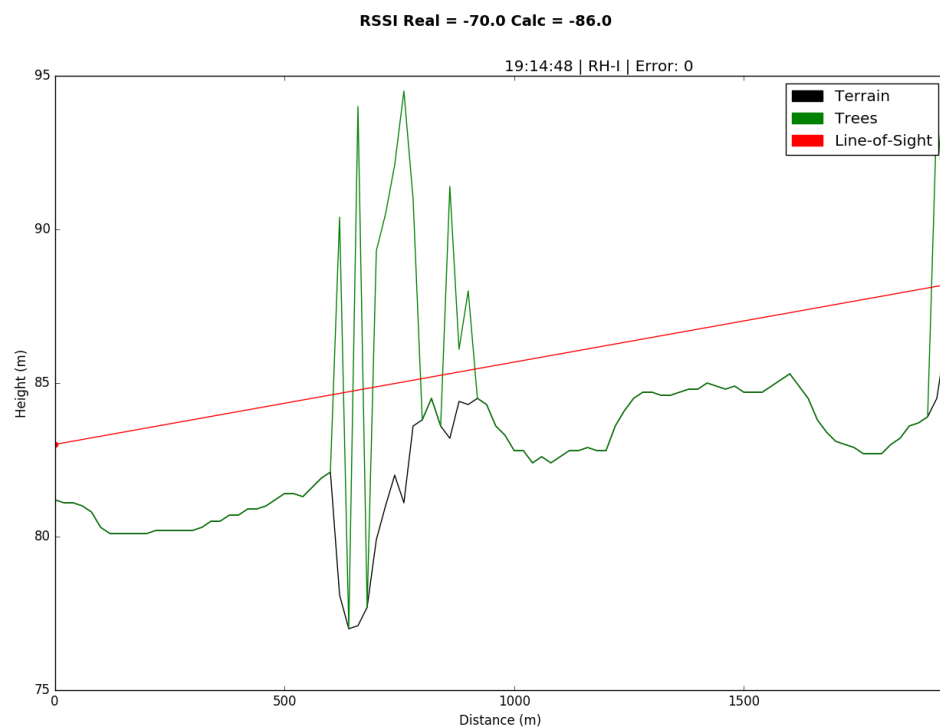
1. Suurimman osan ajasta Longley-Rice-malli arvioi radiolinkin parempilaatusena kuin todellinen yhteys tulee olemaan.

Tämä johtuu Longley-Rice-malliin liittyvistä syistä jotka on listattu virhearviointissa. RH-IV radiolinkeissä mitatun ja laskennallisen RSSI-arvon eron vaihtelu on RH-I radiolinkeistä suurempi. Kun käyttäjä arvioi RH-IV radiolinkeistä, on tärkeää että käyttäjä huomioi radiolinkin maastoprofiilin, eikä luota ainoastaan Longley-Rice-mallin palauttamiin tuloksiin.

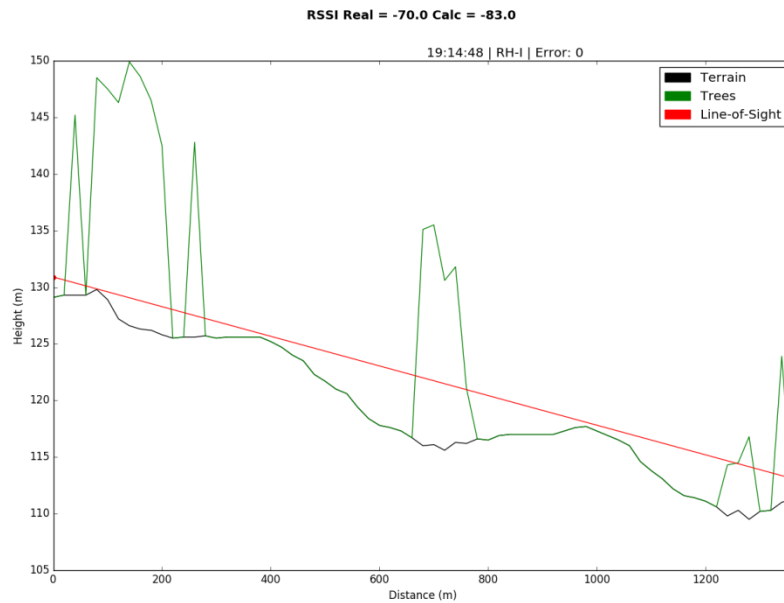
2. Mitä lähemmäksi mennään etäisyyden alarajaa, sitä enemmän esiintyy äärimmäisiä laskennallisia arvoja.

Koska RH-I radiolinkeistä käytetään enemmän lyhyen matkan yhteyksiin, esiintyy näiden tuloksissa enemmän lyhyen matkan äärimmäisiä laskennallisia arvoja.

Kuva 35. Esimerkki 1 RH-I radiolinkin suuresta erosta RSSI-arvojen välillä.

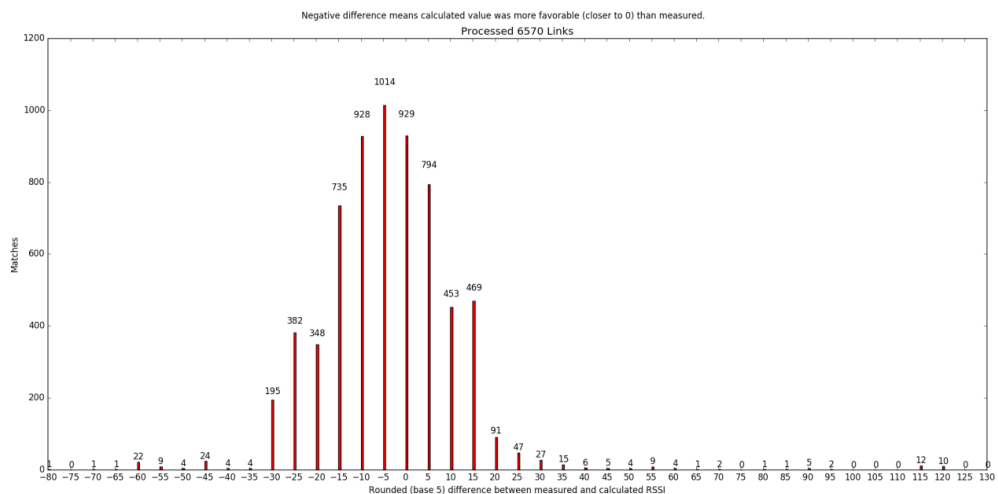


Kuva 36. Esimerkki 2 RH-I radiolinkin suuresta erosta RSSI-arvojen välillä.



3. Longley-Rice-mallin virhearvojen huomioimatta jättäminen aiheuttaa arvaamattomia tuloksia.

Kuva 37. Alue 4: Päivä 4 RH-I kenttätestikaavio josta ei ole suodatettu Longley-Rice-mallin virhearvoja 3 ja 4.



Kuva 28 ja kuva 37 esittävät samaa kenttätestikaaviota, mutta kuvasta 37 ei ole suodatettu pois Longley-Rice-mallin virhearvoja 3 ja 4. Kuvasta 28 on suodatettu pois 4717 tulosta verrattuna kuvaan 37. Kuvassa 37 esiintyy enemmän äärimmäisiä RSSI eroja.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Johtopäätökset koskevat 225–400 MHz (VHF, UHF) taajuusalueen suurimmaksi osaksi metsän sisäisiä RH-I radiolinkkejä, sekä 4400–5000 MHz (SHF) taajuusalueen metsän yläpuolella olevia RH-IV radiolinkkejä. Tarkastellaan myös ainoastaan alle 30 kilometrin kantamia.

On todennäköisempää, että Longley-Rice-malli arvioi radiolinkin parempilaatusena, kuin todellinen signaalin laatu tulee olemaan. Verrattuna mitattuun RSSI-arvoon, RH-IV radiolinkkien ennustetussa vaimenemisessa esiintyy enemmän vaihtelua, kuin RH-I radiolinkeissä, tehden RH-IV radiolinkkien kuuluvuudesta vaikeammin arvioitavia.

Longley-Rice virhearvojen 3 ja 4 huomioimatta jättäminen aiheuttaa epäluotettavia tuloksia. Kun laskennan parametrit lähestyvät Longley-Rice-mallin rajoituksia, esimerkiksi 1 kilometrin etäisyyden alarajaa, esiintyy ennustetussa vaimennuksessa jopa 30 dB eroja verrattuna mitattuun vaimennukseen.

Jos RSSI-arvo -80 dB oletetaan radiolinkin kuuluvuuden rajaksi, ja otetaan huomioon Longley-Rice mallin palauttamat virhearvot, voidaan seuraavia yleistyksiä soveltaa kenttäolosuhteissa:

- Jos RH-I radiolinkin ennustettu RSSI-arvo on -60 dB tai parempi, voidaan olla noin 99,0 % varmoja, että radioiden välinen yhteys tulee toimimaan.
- Jos RH-I radiolinkin ennustettu RSSI-arvo on noin -80 dB, voidaan olla noin 33,1 % varmoja, että radioiden välinen yhteys tulee toimimaan.
- Jos RH-IV radiolinkin ennustettu RSSI-arvo on -50 dB tai parempi, voidaan olla noin 97,7 % varmoja, että radioiden välinen yhteys tulee toimimaan.
- Jos RH-IV radiolinkin ennustettu RSSI-arvo on noin -80 dB, voidaan olla noin 24,6 % varmoja, että radioiden välinen yhteys tulee toimimaan.

Jos RH-IV radiolinkin ennustettu RSSI-arvo on välillä -50 dB ja -80 dB; joutuu käyttäjä arvioimaan radiolinkin laadun tapaus- ja kokemuksohaisesti ottaen huomioon antennien välisen maastoprofiilin, puuston, etäisyyden ja sään.

10 JATKOTUTKIMUS

ITWOM 3.0 (Irregular Terrain Model With Obstructions) on tekijän mukaan paranneltu Longley-Rice-malli, joka ottaa huomioon maastossa olevien esteiden korkeuden ja tiheyden [50]. Tutkimus joka vertasi vanhaa ja kyseessä olevaa Longley-Rice-mallia väittää, että alle 20 kilometrin matkoilla tarkkuus on parantunut jossain määrin, kun taas yli 40 kilometrin matkoilla mitatun ja laskennallisen arvon välillä on suuria eroja [51].

Digitaalinen taistelukenttä –teos tarjoaa kaavoja kasvillisuuden vaikutuksen huomioon ottamiseen [8, s.113]. Kaavat ottavat huomioon metsäalueen syvyyden ja radioaallon taajuuden. Kaavasta saadut tulokset voisi lisätä Longley-Rice-mallin tulosten ohelle.

LÄHTEET

1. Brown W. C., The History of Power Transmission by Radio Waves, 1984, [PDF]
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/1132833>>
2. Wikipedia, Radio spectrum, [WWW]
<https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum> (Luettu 15.02.2017)
3. Berkeley Lab, Electromagnetic Spectrum, [WWW]
<<http://www2.lbl.gov/MicroWorlds/ALSTool/EMSpec/EMSpec2.html>> (Luettu 15.02.2017)
4. Federal Communications Commission, Propagation Characterization, [WWW]
<<https://www.fcc.gov/general/propagation-characterization>> (Luettu 15.02.2017)
5. Wikipedia, Radio propagation, [WWW]
<https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_propagation> (Luettu 15.02.2017)
6. Janice Hendry, Roke Manor Research Ltd, Surface Waves: What are they? Why are they interesting?, 2009, [PDF]
<<http://www.armms.org/media/uploads/1259319847.pdf>> (Luettu 28.02.2017)
7. Mika-Petteri Haasiomäki, Ajomittaus matkaviestinverkoille, 2014, [PDF]
<<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014052810696>> (Luettu 13.02.2017)
8. Kosola Jyri, Digitaalinen taistelukenttä: Informaatioajan sotakoneen tekniikka, 2013, [PDF] <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-25-2503-4>> (Luettu 28.02.2017)
9. Wikipedia, Reflection (physics), [WWW]
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_(physics))> (Luettu 13.02.2017)
10. Wikipedia, Refraction, [WWW] <<https://en.wikipedia.org/wiki/Refraction>> (Luettu 13.02.2017)
11. Hanhela Ari, Antennidiversiteetin toteutus ja testaus 2,45 GHz:n radiomoduuliin, 2011, [PDF] <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201105259556>> (Luettu 13.02.2017)
12. Wikipedia, Diffraction, [WWW] <<https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction>> (Luettu 13.02.2017)

13. Wikipedia, Absorption (electromagnetic radiation), [WWW]
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_\(electromagnetic_radiation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_(electromagnetic_radiation))> (Luettu 13.02.2017)
14. Wikipedia, Scattering, [WWW] <<https://en.wikipedia.org/wiki/Scattering>> (Luettu 13.02.2017)
15. Immonen Nina, EMC-huoneen oven avauksen vaikutus signaalin voimakkuuteen lähiympäristössä, 2013, [PDF] <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013092415513>> (Luettu 13.02.2017)
16. Barry McLarnon, VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters, [WWW] <<https://www.tapr.org/ve3jf.dcc97.html>> (Luettu 28.02.2017)
17. Wikipedia, Received signal strength indication, [WWW]
<https://en.wikipedia.org/wiki/Received_signal_strength_indication> (Luettu 28.02.2017)
18. Bittium, Product overview, [WWW]
<https://www.bittium.com/products__services/defense/bittium_tactical_wireless_ip_network#product_overview> (Luettu 14.02.2017)
19. Bittium, Bittium TAC WIN Tactical Router, [WWW]
<https://www.bittium.com/products__services/defense/bittium_tactical_wireless_ip_network#bittium_tac_win_tactical_router_trade> (Luettu 14.02.2017)
20. Bittium, Bittium TAC WIN Radio Head I, [WWW]
<https://www.bittium.com/products__services/defense/bittium_tactical_wireless_ip_network#bittium_tac_win_radio_head_i_trade> (Luettu 14.02.2017)
21. Bittium, Bittium TAC WIN Radio Head III, [WWW]
<https://www.bittium.com/products__services/defense/bittium_tactical_wireless_ip_network#bittium_tac_win_radio_head_iii_trade> (Luettu 14.02.2017)
22. Bittium, Bittium TAC WIN Radio Head IV, [WWW]
<https://www.bittium.com/products__services/defense/bittium_tactical_wireless_ip_network#bittium_tac_win_radio_head_iv_trade> (Luettu 14.02.2017)

23. Archana J. P., Sharma Dinesh, Sharma Purnima K., Outdoor Propagation Path Loss Models: A Review, [PDF] <<http://www.ijser.org/researchpaper/Outdoor-Propagation-Path-Loss-Models-A-Review.pdf>>
24. Luonnonvarakeskus, Euroopan metsäisin maa, [WWW] <<http://www.metla.fi/suomen-metsat/>> (Luettu 24.02.2017)
25. International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.525-3: Calculation of free-space attenuation, 09/2016, [PDF] <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-3-201611-l/en>> (Luettu 16.02.2017)
26. Mikkonen Simo, Sotilassovelluksissa käytettävät vaimenemismallit VHF-taajuusalueella, 2015, [PDF] <<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201601081917>>
27. Virtual Institute of Applied Science, Fresnel Zone, [WWW] <http://www.vias.org/wirelessnetw/wndw_04_08b.html> (Luettu 15.02.2017)
28. National Spectrum Managers Association, Ohloss Path Loss Computation, 10.2017, [PDF] <<http://nsma.org/wp-content/uploads/2016/05/WG2-99-052.pdf>> (Luettu 24.02.2017)
29. Feinian Wang, Sarabandi K., TAP, A Physics-Based Statistical Model for Wave Propagation Through Foliage, 2007, [PDF] <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4120255>>
30. Yu Song Meng, Yee Hui Lee, Boon Chong Ng, TAP, Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands, 2009, [PDF] <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4909464>>
31. Alexandros Palaios, Kushwah Nagendra Singh, Petri Mähönen, Military Communications Conference, Propagation models for users crossing forest areas in central European forest environments, 2016, [PDF] <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7795414/>>
32. Villanen Lasse, Merenkulkulaitoksen tukiasemaympäristössä esiintyviä langattoman tiedonsiirron häiriölähteitä ja –mekanismeja sekä mahdollisuuksia niiltä suojautumiseen, 2009, [PDF] <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200911115366>>
33. Vladimir Agafonkin, Leaflet, [WWW] <<http://leafletjs.com/>> (Luettu 10.02.2017)

34. Maanmittauslaitos, Maastokartta, [WWW]
<<https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/>> (Luettu 24.07.2017)
35. Maanmittauslaitos, Tasokoordinaatisto, [WWW]
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaattikorkeusjarjestelmat/tasokoordinaatistot/tasokoordinaatisto>> (Luettu 13.02.2017)
36. Maanmittauslaitos, ETRS-TM35FIN, [WWW]
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaattikorkeusjarjestelmat/karttaprojektio-tasokoordinaatistot/tasokoordinaatistot/etrs>> (Luettu 13.02.2017)
37. Maanmittauslaitos, Suomi Finland UTM-lehtijako, 22.9.2003, [PDF]
<http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/UTM_lehtijakopdf.pdf> (Luettu 13.02.2017)
38. Maanmittauslaitos, Karttalehtijako TM35, [WWW]
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaattikorkeusjarjestelmat/karttalehtijako-tm35>> (Luettu 13.02.2017)
39. Maanmittauslaitos, Korkeusmalli, [WWW]
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/korkeusmalli-10-m>> (Luettu 13.02.2017)
40. Luonnonvarakeskus, Avoimien aineistojen tiedostopalvelu, [WWW]
<<http://kartta.metla.fi/>> (Luettu 01.03.2017)
41. Tietjen J. S., AP-M, Anita Longley's Legacy: The Longley-Rice Model - Still Going Strong After Almost 50 Years [Historical Corner], 2013, [PDF]
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/6586676>>
42. CloudRF, itm.cc, [WWW] <<https://github.com/Cloud-RF/Signal-Server/blob/master/models/itm.cc>> (Luettu 14.02.2017)
43. CloudRF, Signal Server, [WWW] <<https://github.com/Cloud-RF/Signal-Server>> (Luettu 13.02.2017)
44. CloudRF, Open Source, [WWW] <<https://cloudf.com/open%20source>> (Luettu 13.02.2017)

45. Hufford George Allen, Longley Anita G., Kissick William A., A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode, 1982, [PDF] <https://www.its.bldrdoc.gov/publications/download/82-100_ocr.pdf> (Luettu 01.02.2017)
46. Kari Jokela, Dosimetria, [PDF] <https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_3.pdf/7073f5f8-cfd2-4d4a-96fe-5ed556d58a14> (Luettu 01.03.2017)
47. Penttinen Sari, Electrical and hydraulic classification of forest till soils in central Lapland Finland, 2000
48. Säähavaintoarkisto, [WWW] <<http://suja.kapsi.fi/>> (Luettu 24.02.2017)
49. Matplotlib, [WWW] <<http://matplotlib.org/>> (Luettu 02.03.2017)
50. ITM with obstructions 3.0, [WWW] <<https://github.com/Cloud-RF/Signal-Server/blob/master/models/itwom3.0.cc>> (Luettu 06.03.2017)
51. Stylianos Kasampalis, Pavlos I. Lazaridis, Zaharias D. Zaharis, Aristotelis Bizopoulos, Spiridon Zetlas, John Cosmas, Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM broadcasting, 2013, [PDF] <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6618611/>>