

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

TETRA-, WLAN-, JA WIMAX-TEKNIIKAT ALVI-JOUKKOJEN KÄYTÖSSÄ

Pro gradu

Kadetti
Juha Kohonen

Kadettikurssi 89
Viestilinja

Helmikuu 2006

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi 89. Kadettikurssi	Linja Viestilinja	
Tekijä Kadetti Juha Kohonen		
Tutkielman nimi TETRA-, WLAN- ja WIMAX-tekniikat ALVI-joukkojen käytössä		
Oppiaine, johon työ liittyy Tekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MpKK:n kirjasto)	
Aika Helmikuu 2006	Tekstisivuja 72	Liitesivuja 20
TIIVISTELMÄ <p>Tutkimuksen tarkoituksena oli kartoittaa ALVI-joukkojen kaluston käyttöperiaatteita ja tutkittavien tekniikoiden käyttömahdollisuuksia ALVI-ympäristössä. Aihetta tutkittiin, koska tekniikan kehitys johtamisjärjestelmien osalta on valtavaa ja vaatimukset järjestelmille ovat myös kasvussa. Päättökysymyksenä oli: Miten TETRA-, WLAN- ja WiMAX-tekniikat soveltuvat käytettäväksi ALVI-ympäristössä? Tutkimus menetelminä käytettiin asiakirjatutkimusta ja sen perusteella tapahtuvaa loogista päättelyä. Lisäksi tutkimusmenetelmänä käytettiin simulaatiota. Tutkimuksessa havaittiin tekniikoiden osalta suuria eroja soveltuvuuden suhteen. TETRA-järjestelmää kannattanee päivittää, mutta se soveltunee jatkossakin vain mobiilipalveluiden tarjoamiseen. WLAN-tekniikan käyttömahdollisuudet ovat rajalliset, joka johtuu tekniikalla saavutettavasta lyhyestä kantamasta. WiMAX-tekniikka soveltunee useaan käyttötarkoitukseen. WiMAX-tekniikkaa voitane käyttää linkkikalustona, mutta Mini-Link-kaluston korvaaminen lienee tarpeellista vain, jos WiMAX-tekniikalla saavutetaan selkeästi tarpeellista etua, kuten esimerkiksi pitempi kantama tai suurempi tiedonsiirtonopeus.</p>		
Avainsanat TETRA, WLAN, WIMAX, ALVI		

TETRA-, WLAN- JA WIMAX TEKNIIKAT ALVI-JOUKKOJEN KÄYTÖSSÄ

1 JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen taustaa	1
1.2 Tutkimuksen kuvaus	2
1.2.1 Tutkimuksen rakenne	4
1.2.2 Tutkimuksen rajaus	5
1.3 Tutkimusmenetelmät	6
2 ALUEELLISET VIESTIJOUKOT	8
2.1 Alueellisten viestijoukkojen käyttöperiaatteet	8
2.2 Alueellinen viestijärjestelmä	9
2.2.1 Tukijärjestelmät	9
2.2.2 XDM-400	10
2.2.3 Mini-Link E	11
2.2.4 Kaukovalokaapeli	12
2.3 Esimerkkejä ALVI-järjestelmän käyttömahdollisuuksista	12
2.4 Johtopäätökset	13
3 TETRA-TEKNIikka	13
3.1 TETRA-standardi	14
3.1.1 TETRA-tekniikka	15
3.1.2 TETRA-standardin mukainen kerrosrakenne	16
3.1.2.1 Fyysinen kerros	16
3.1.2.2 Linkkikerros	17
3.1.2.3 Verkkokerros	18
3.1.3 TETRA-verkon palvelut	19
3.1.3.1 Peruspalvelut	20
3.1.3.2 IP-pakettidata	21
3.1.3.3 Lisäpalvelut	21
3.1.4 Suorakanavatoiminne	22
3.2 TEDS-palvelut	23
3.3 VIRVE-verkko	23

3.4 Johtopäätökset	24
4 WLAN-TEKNIikka	25
4.1 IEEE 802.11-standardi	25
4.1.1 Verkkoarkkitehtuuri	25
4.1.1.1 Itsenäinen peruspalveluryhmä	26
4.1.1.2 Infrastruktuuri BSS-verkko	26
4.1.1.3 Laajennettu palveluryhmä	27
4.1.2 Palvelut	28
4.1.2.1 Asemapalvelut	28
4.1.2.2 Jakelujärjestelmäpalvelut	28
4.1.2.3 Palveluiden väliset riippuvuudet	29
4.1.3 MAC-kerros	30
4.1.4 Fyysinen kerros	32
4.2 Esimerkki WLAN-tekniikalla toteutetusta verkosta	32
4.3 Johtopäätökset	34
5 WIMAX-TEKNIikka	35
5.1 WiMAX-Standardi	36
5.2 WiMAX-tekniikassa hyödynnetyt tekniikat	36
5.2.1 Ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä	38
5.2.2 Adaptiivinen modulaatio	40
5.3 Esimerkki WiMAX-tekniikalla toteutetusta verkosta	43
5.4 Johtopäätökset	44
6 TULOKSET	45
6.1 Toimintaympäristöön kohdistuvat uhat	45
6.1.1 Elektronisen sodankäynnin uhka	46
6.1.1.1 Elektroninen tiedustelu	47
6.1.1.2 Elektroninen häirintä	47
6.2 Linkkiyhteyksien toteuttaminen	48
6.2.1 Linkkiyhteyksien toimivuus normaaliolosuhteissa	50
6.2.2 Linkkiyhteyksien tiedusteltavuus	52

6.2.3 Linkkiyhteyksien toimivuus häirinnän vaikutuksen alla	54
6.2.4 Johtopäätökset	60
6.3 Esikunnan yhteyksien toteuttaminen	60
6.3.1 Edut ja haitat	61
6.3.1.1 Toteutus TETRA-tekniikalla	62
6.3.1.2 Toteutus WLAN-tekniikalla	62
6.3.1.3 Toteutus WiMAX-tekniikalla	63
6.3.2 Esikunnan yhteys-simulaatio	63
6.3.2.1 Esikunnan yhteyksien tiedusteltavuus	66
6.3.2.2 Esikunnan yhteyksien toimivuus häirinnän vaikutuksen alla	66
6.3.3 Johtopäätökset	70
7 POHDINTA	71

TETRA-, WLAN- JA WIMAX TEKNIIKAT ALVI-JOUKKOJEN KÄYTÖSSÄ

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

Tässä tutkimuksessa tutkitaan TETRA-, WLAN- ja WiMAX-tekniikoiden käyttöä ALVI ympäristössä. TETRA (Terrestrial Trunked Radio) on ETSI:n (European Telecommunications Standards Institute) määrittämä radioverkkostandardi, joka on tarkoitettu käytettäväksi erityisesti erillisverkoissa joko viranomaisten tai muiden käyttäjäryhmien kommunikaatiovälineenä. WLAN (Wireless Local Area Network) on kansainvälisen sähkö- ja elektroniikkainsinöörien yhteisjärjestön IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) julkaisema lähiverkkostandardi, joka on tarkoitettu sekä yksityiskäyttäjien että yritysten käyttöön. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) on yleinen nimitys, joka yhdistetään IEEE:n standardisarjaan 802.16. WiMAX-tekniikka on langaton laajakaistatekniikka, joka on tarkoitettu ensisijaisesti operaattorikäyttöön. WiMAX-tekniikkaa koskevat tutkimukset ovat käynnissä ja sen soveltuvuutta tutkitaan myös sotilaskäyttöön.

Alueelliset viestijoukot (ALVI) perustettiin maanpuolustusalueen viestijoukoiksi. Tähän oli syynä kunkin maanpuolustusalueen erityiset tarpeet viestijoukkojen käytölle ja kehitykselle. Tämä johtunee pitkälti kunkin maanpuolustusalueen infrastruktuurista ja olosuhteista, kuten esimerkiksi siitä onko joukkojen käytön painopiste asutuskeskusalueella vai perinteisessä metsämaastossa. Perinteisesti joukot oli sijoitettu pääesikunnan alaisuuteen, mutta koska pääesikunnan roolia haluttiin madaltaa, päätettiin joukot perustaa maanpuolustusalueen alaisuuteen. Päätäntävaltaa siirrettiin pääesikunnalta maanpuolustusalueille.

Alueellisten viestijoukkojen kouluttaminen aloitettiin vuonna 2000, tosin henkilökunnan koulutus aloitettiin pari vuotta aikaisemmin. Alueellisten viestijoukkojen tehtävänä on luoda maanpuolustusalueen tarvitsemat viesti- ja tietoliikenneyhteydet johtamiinsa alajohtoportaisiin. Yhteydet muodostetaan kiinteän televerkon välityksellä.

Kalustona siirtoverkkoon alueellisilla viestijoukoilla on Mini-Link E-sarjan kalusto sekä kaukovalokaapeli. Nykyisellä kuitutekniikalla kyetään siirtämään suuria määriä tietoa suurilla nopeuksilla. Nykyisellä linkkikalustolla taas ei kyetä niin suuriin siirtomääriin ja –nopeuksiin kuin kuitutekniikalla. Mini-Link E-sarjan kalusto on COTS (Commercial Off-The-Shelf) tuote, mutta se on osoittautunut käyttökelpoiseksi myös kenttäkäyttöön.

Telekommunikaatioalalla tapahtuva kehitys on nopeaa ja sitä ohjaa pääosin siviilisektori. Vanhoja ja uusia tekniikoita voidaan yhdistellä monipuolisesti ja ne toimivat hyvin yhdessä. Uusia tekniikoita voidaan ottaa käyttöön ja vanhoja voidaan poistaa, vaihtaa tai modifioida. Hyvän yhteentoimivuuden ansiosta kokonaisuus ei kuitenkaan vaarannu. Lähitulevaisuudessa kiinteiden televerkkojen runko tulee perustumaan pitkälti kuituyhteyksiin. Kuituyhteys tulee olemaan joka taajamassa ja joissain määrin runkoverkkoa voidaan täydentää radioyhteyksin esimerkiksi haja-asutusalueilla [23].

Tulevaisuudessa kommunikaatiostrukturi perustuu pitkälle kehitettyyn Internetiin, jolla on yhteinen tehokas runkoverkko, jonka alla on suuri määrä erilaisia fyysisiä verkkoja, joissa käytetään erilaisia tekniikoita. Tätä aliverkkojen tekniikkaa korvataan suurella nopeudella voimakkaan kilpailun vallitessa [23].

Liityntäverkkojen kehitys on menossa kohti suurempia siirtonopeuksia. Kuinka suuri siirtonopeustarve on, riippuu tarjottavien palveluiden kehityksestä [24]. Langattomien verkkojen siirtonopeudet ovat kasvaneet paljon viime aikoina. Tämä johtuu kasvaneesta tiedonsiirtotarpeesta. Nykyään taistelukentällekin tuodaan IP-pohjaisia sovelluksia ja perinteinen puheenvälitys on vähenemässä. Siviilisektorilla on paljon erilaisia ratkaisuja liityntäverkon toteutukseen ja uusia tekniikoita kehitetään jatkuvasti. Uudet langattomat tiedonsiirtoratkaisut tarjoavat uusia mahdollisuuksia toteuttaa eri verkkoja. Näitä langattomia verkkoja on myös mahdollista hyödyntää sotilaallisessa käytössä.

1.2 Tutkimuksen kuvaus

Tutkimuksessa aihetta lähestytään logiikan näkökulmasta. Tutkimuksessa pyritään todistamaan ja näyttämään toteen asioita. Tutkimuksessa käytetään lähestymistapana kvalitatiivista tapaa, jota tosin pyritään täydentämään kvantitatiivisin keinoin. Tutkimuksen tuloksia luodessa käytetään tutkimusmenetelmänä skenaarioiden analysointia, joka tapahtuu jokseenkin teoreettisella tasolla ollen näin enemmänkin kvalitatiivista. Tutkimuksessa

käytetään tutkimusmenetelmänä kuitenkin myös simulaatiota, joka taas pohjautuu enemmän tilastolliseen laskentaan ollen näin enemmänkin kvantitatiivista. Tutkimuksessa pyritään käyttämään kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia menetelmiä rinnakkain. Kvantitatiivisin keinoin pyritään todistamaan ja täydentämään kvalitatiivisia tuloksia.

Tutkimus on tarkoitukseltaan kartoittava. Sen tehtävänä on selvittää tekniikoiden käyttöä ympäristössä, jossa niitä ei käytetä. Tutkimuksessa on myös tarkoituksena etsiä uusia näkökulmia aihealueeseen.

Tutkimuksessa on tarkoitus kartoittaa ALVI-järjestelmän nykytilannetta. Tutkimuksessa on myös tehtävänä kartoittaa tutkittavia tekniikoita tarvittavissa määrin. Lisäksi tutkimuksessa on tarkoituksena kartoittaa ja arvioida eri tekniikoiden käyttömahdollisuuksia ALVI-ympäristössä.

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

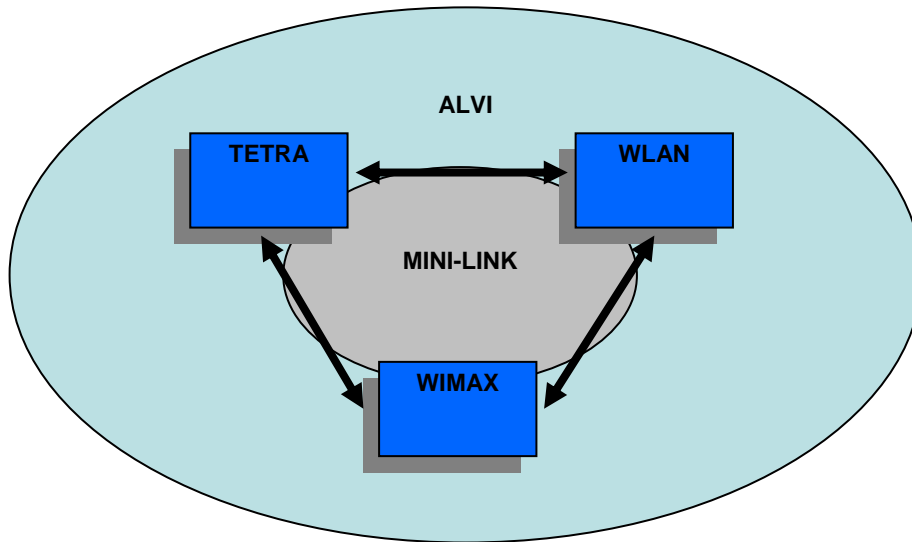
Pääkysymys:

Miten TETRA-, WLAN- ja WiMAX-tekniikat sovetuvat käytettäväksi ALVI-ympäristössä?

Alakysymykset:

1. Mikä on ALVI-joukkojen nykytilanne?
2. Mitä käsiteltävät standardit sisältää ja miten tekniikat toteutetaan?
3. Mitä käyttötarkoituksia tekniikoilla voi olla ALVI-ympäristössä?
4. Mitä uhkia järjestelmiin kohdistuu?
5. Miten tekniikat vastaavat tarpeisiin ja haasteisiin ALVI-ympäristössä?

Kuvassa 1.1 on esitetty työn viitekehys. Tutkimusympäristönä on ALVI-ympäristö, joten se on vuorovaikutuksessa kaikkien tutkittavien tekniikoiden, sekä tietenkin myös Mini-Link E-sarjan kaluston kanssa. TETRA-, WLAN- ja WiMAX-tekniikoiden käyttömahdollisuuksiin vaikuttaa ALVI-ympäristö erityispiirteinen. Lisäksi tekniikoiden käyttöä tulee tarkastella rinnakkain Mini-Link järjestelmän kanssa. Tarkoituksena on tutkia miten Mini-Link kalustoa on käytetty ja voidaanko tutkittavia tekniikoita käyttää samoihin käyttötarkoituksiin.



Kuva 1.1 Työn viitekehys

1.2.1 Tutkimuksen rakenne

Tutkimus on jaettu seitsemään lukuun. Tutkimuksen alussa lukija johdatellaan aihealueeseen, jonka jälkeen esitellään alueelliset viestijoukot sekä tutkittavat tekniikat. Tutkimuksen lopussa esitetään tulokset ja pohditaan tuloksien sekä työn onnistumista.

Ensimmäinen luku johdattelee aihealueeseen. Luvussa käydään läpi tutkimuksen taustaa, kerrotaan tutkimuksen tavoite ja tutkimusongelmat. Luvussa on esitelty myös tutkimuksen rakenne ja rajaukset sekä tutkimusmenetelmät. Luvun tarkoitus on osoittaa lukijalle tutkittavan aiheen ajankohtaisuus ja tarpeellisuus sekä kertoa lyhyesti miten työ on tehty.

Luvussa kaksi on esitelty alueelliset viestijoukot. Alueellisista viestijoukoista on kerrottu tehtävät ja yleiset käyttöperiaatteet. Luvussa esitellään myös alueellinen viestijärjestelmä. Luvun lopussa on esitelty alueellisen viestijärjestelmän käyttömahdollisuuksia sekä johtopäätökset. Lähteinä luvussa on käytetty aikaisempia tutkimuksia sekä muuta puolustusvoimien tuottamaa materiaalia.

Luvussa kolme esitellään TETRA-tekniikka. TETRA-tekniikasta on kerrottu sen yleinen toimintaperiaate. Luvussa esitellään TETRA-standardi sekä TETRA-tekniikan mukainen kerrosrakenne. Lisäksi luvussa on esitelty TETRA-tekniikan tarjoamat palvelut sekä suorakanavatoiminne. Luvun lopussa on esitelty TETRA-tekniikkaa VIRVE-verkon käytössä sekä johtopäätökset. Päälähteenä luvussa on käytetty Ilkka Korkiamäen kirjaa: TETRA-tekniikan sotilaalliset käyttömahdollisuudet.

Luvussa neljä esitellään WLAN-tekniikka. Luvussa esitellään lyhyesti WLAN-tekniikkaa koskeva standardi. Luvussa esitellään myös WLAN-tekniikan verkkoarkkitehtuuri ja palvelut sekä niiden väliset riippuvuudet. Lisäksi luvussa on esitelty MAC- ja fyysinen kerros. Luvun lopussa esitellään johtopäätökset. Päälähteenä luvussa on käytetty Marko Ahvenaisen diplomityötä: Langattomien Lähiverkkojen Turvallisuus, sekä standardeja.

Luvussa viisi esitellään WiMAX-tekniikka. Luvussa esitellään lyhyesti WiMAX-tekniikka ja sitä koskeva standardi. Luvussa esitellään myös WiMAX-tekniikassa hyödynnetyt tekniikat: ortogonaalinen taajuuskanavointi ja adaptiivinen modulointi. Luvun lopussa esitellään johtopäätökset. Lähteenä luvussa on käytetty standardeja sekä eri laitevalmistajien dokumentaatioita.

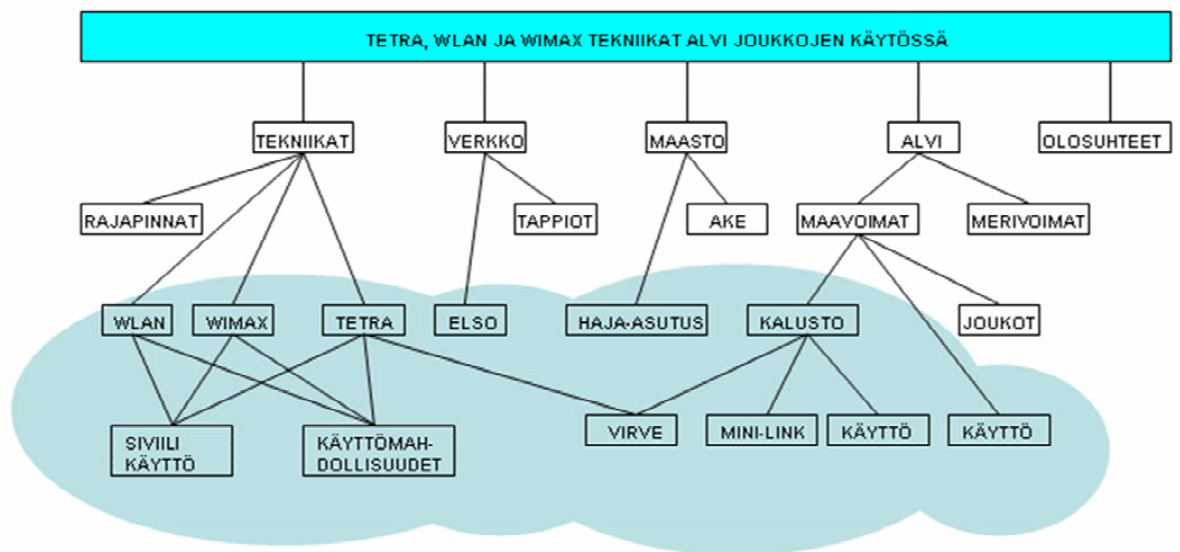
Luvussa kuusi esitellään tutkimuksen tulokset. Luvussa on tarkoituksena vastata tutkimusongelmiin valittuja tutkimusmenetelmiä käyttäen. Painopisteenä on johtopäätösten tekeminen tulosten perusteella. Lähteenä luvussa käytetään aikaisempia tutkimuksen lukuja sekä Puolustusvoimien tuottamaa kirjallisuutta.

Luvussa seitsemän pohditaan työn tuloksia ja onnistumista. Luvussa on myös tarkoituksena arvioida, onnistuttiinko tutkimusongelmat ratkaisemaan ja millä tasolla. Lisäksi arvioidaan lisäkö työ tietoa ja voidaanko mahdollista tietoa hyödyntää mitenkään.

1.2.2 Tutkimuksen rajaus

Rajaukset koskevat lähinnä toimintaympäristöä. Toimintaympäristöstä on tarkoitus käsitellä liityntäverkon toteutusta siirtotien näkökulmasta. Tämä tarkoittaa sitä, että työssä ei paneuduta niinkään teknisiin yksityiskohtiin vaan olettamuksena on, että eri tekniikat kytetään liittämään nykyiseen järjestelmään. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että tutkitaan linkki- tai kuituyhteyttä tai muuta radioyhteyttä. Tämä rajaus on tehty sen vuoksi, koska tutkittava aihe laajenisi muuten liikaa. Toimintaympäristössä käsitellään maastollisesti tavallista metsämaastoa ja asutuskeskusympäristö rajataan pois. Rajaus tehdään sen vuoksi, että asutuskeskusympäristö luo paljon uusia tekijöitä aiheeseen laajentaen sitä liikaa. Verkon kannalta ei paneuduta taistelunkestävyyteen fyysisessä mielessä, vaan ELSO:n kannalta. Tämä johtuu siitä, että verkkojen fyysistä kestävyyttä ja tappionsietokykyä on jo tutkittu, eikä siltä saralta ole odotettavissa näillä kriteereillä mitään uutta tietoa. Verkkojen osalta tarkastelussa käsitellään lähinnä vain fyysistä kerrosta, eikä siinä paneuduta niinkään eri verkkokerrosten ratkaisuihin. Tämä rajaus on tehty sen vuoksi, ettei aihe laajenisi liikaa.

ALVI-ympäristön osalta käsitellään vain maavoimien ALVI-joukkoja. Tämä rajaus on luonnollinen jo tutkijan maavoimalinja-taustasta johtuen, jonka johdosta työ palvelisi myös tekijää mahdollisimman hyvin. Rajaus on aiheellinen johtuen myös muiden linjojen erityispiirteistä, jotka laajentaisivat aihetta liikaa. Kuvassa 1.2 on esitetty aiheen rajaus relevanssipuuna. Yläkäsitteenä relevanssipuussa on tutkimuksen otsikko. Alempana on esitetty aihetta koskevia käsitteitä, jotka on jaettu edelleen käsitteisiin. Tutkimuksessa keskitytään harmaalla rajatun alueen sisäpuoleen. Harmaa alue sisältää myös aiheen keskeisimmät käsitteet.



Kuva 1.2 Tutkimuksen rajaus relevanssipuuna

1.3 Tutkimusmenetelmät

Päätutkimusmenetelmänä tutkimuksessa käytetään kirjallisuus- ja asiakirjatutkimusta. Kirjallisena lähteenä käytetään tutkittavien tekniikoiden osalta standardeja. Standardeista saatavaa tietoa täydennetään muulla kirjallisuudella ja laitevalmistajien dokumentaatioilla. ALVI-joukkoja tutkittaessa lähteenä käytetään puolestaan aikaisempia tutkimuksia ja muuta puolustusvoimien tuottamaa materiaalia. Asiakirjatutkimuksen tietojen pohjalta pohditaan ja tehdään loogista päättelyä.

Asiakirjatutkimuksen pohjalta tehdään skenaarioita eri ratkaisuihin ja pohditaan eri ratkaisuiden toimivuutta. Skenaariot ovat niin sanotusti valkoisen kartan skenaarioita, eli niitä ei ole sidottu tiettyyn maastoon tai tilanteeseen.

Tutkimuksessa käytetään menetelmänä myös simulaatiota, jota sovelletaan tietyissä skenaarioissa. Simulaatiot toteutetaan Warfare-ohjelmalla. Warfare on ATDI:n ohjelma jota voidaan hyödyntää VHF-verkkojen, radiolinkkiverkkojen ja tutkatoiminnan suunnittelussa. Ohjelmaa voidaan käyttää myös radio- ja signaalitiedustelun sekä radiohäirinnän simuloimisessa. Warfare-ohjelma käyttää karttamateriaalia hyväkseen, joten työskentely saadaan sidottua tilanteeseen. Warfare-ohjelmaa hyväksikäyttämällä voidaan esimerkiksi mallintaa jokaisen tukiaseman peittoalue annetuilla parametreilla. Näin saadaan maastoon sidottu tieto siitä miten tukiasemat palvelevat tilaajia ja miten ne reagoivat häirintään.

2 ALUEELLISET VIESTIJOUKOT

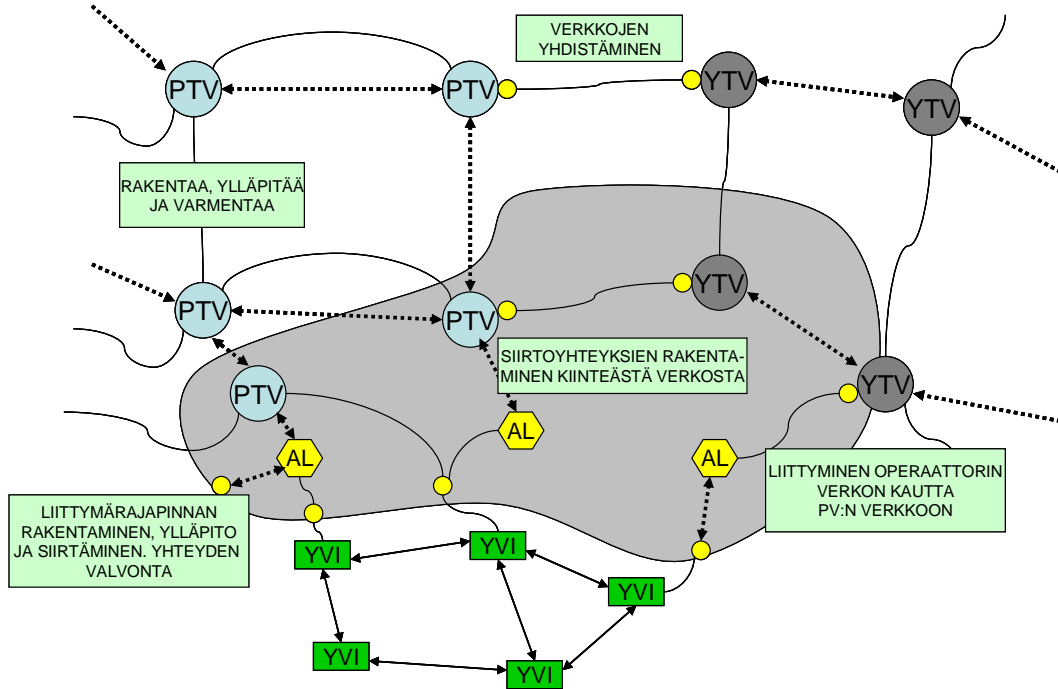
Alueelliset viestijoukot (ALVI) toimivat maanpuolustusalueen viestijoukkona. Maanpuolustusalueen viestitoimintaan kuuluu: tietotekniikka-alan organisointi Puolustusvoimissa, maanpuolustusalueen tietotekniikka-alan organisaatio ja tehtävät, tietotekniikka-alan joukot, alueellisten viestijoukkojen materiaali, VK (T) ja VkeskK (T). VK (T):n tehtävä on liityntäverkon rakentaminen alajohtoportaille Puolustusvoimien televerkosta (PTV). VkeskK (T):n tehtävä on esikuntien ja johtamispaikkojen yhteyksien rakentaminen. Alueellisten viestijoukkojen käytön painopiste on Strategisen Iskun Ennalta Ehkäisy ja Torjunta (SIETO) vaiheessa [2].

2.1 Alueellisten viestijoukkojen käyttöperiaatteet

Alueelliset viestijoukot ovat maanpuolustusalueiden johdossa olevia viestijoukkoja, jotka vastaavat puolustusvoimien televerkon rakentamisesta, ylläpidosta ja valvonnasta. Niiden tehtävänä on rakentaa ja ylläpitää alueellisten johtoportaiden johtamispaikkojen yhteyksiä ja tietotekniikkapalveluita, varmentaa ja korjata kiinteän televerkon yhteyksiä ja tarjota kiinteän televerkon liityntäpisteitä alajohtoportaille [26].

Siirryttäessä uuteen johtamis- ja hallintojärjestelmään vuonna 2008, muodostetaan Pääesikunnan johtoon uusi johtamisjärjestelmäalan organisaatio, joka vastaa yhteisen integroidun tiedustelu-, valvonta- ja johtamisverkon ylläpidosta, tärkeimpien johtoportaiden ja joukkojen liittämistä verkkoon sekä yhteiskäyttöisten johtamisjärjestelmien toiminnasta. Pääosa maanpuolustusalueiden johdossa olevista alueellisista viestijoukoista keskitetään yhteiseen johtoon tuottamaan kaikille puolustushaaroille ja toimialoille palveluita sekä liityntäpisteitä [26].

Alueellisten viestijoukkojen tehtävät ovat: rakentaa, ylläpitää ja varmentaa Puolustusvoimien televerkot, yhdistää Puolustusvoimien ja yleisen televerkon verkot, siirtoyhteyksien rakentaminen kiinteästä verkosta, liittyminen operaattorin verkon kautta Puolustusvoimien verkkoon ja liittymärajoituksen rakentaminen, ylläpito ja siirtäminen sekä yhteyden valvonta [2]. Alueellisten viestijoukkojen käyttöperiaate on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Alueellisten viestijoukkojen käyttöperiaate

2.2 Alueellinen viestijärjestelmä

Alueellinen viestijärjestelmä (ALVI) on viestijärjestelmä, jolla luodaan kiinteän televerkon liityntäpiste taisteleville joukoille. Järjestelmällä luodaan liityntäverkko, jota voidaan käyttää puheen- ja datansiirtoon [26]. Järjestelmän kalustoon kuuluvat: järjestelmäkaappi, SDH-solmu, siirrettävä linkkimasto, järjestelmäkontti, kaukovalokaapeli, Minilink-kalusto sekä liityntälaitteet. Tässä luvussa kalusto jaetaan tiedonsiirtojärjestelmiin ja tukijärjestelmiin. Tiedonsiirtojärjestelmillä käsitetään tässä työssä SDH-solmu, Mini-Link-kalusto, liityntälaitteet ja kaukovalokaapeli. Tukijärjestelmiä ovat siirrettävä linkkimasto, järjestelmäkaappi, järjestelmäkontti ja kaukovalokaapelin levitys- ja kelauslaite.

2.2.1 Tukijärjestelmät

Siirrettävä linkkimasto on tarkoitettu Minilink-radioiden mastokalustoksi. Maston avulla saadaan kaksi Minilink-säteilijää nostettua 20 metrin korkeuteen. Laite on Transmast Oy:n valmistama teleskooppipuominen hinattava laite. Voimanlähteenä laitteessa on sähkömoottorin käyttämä hydraulikoneisto [26]. Kuvassa 2.2 on siirrettävä linkkimasto kuljetuskunnossa.



Kuva 2.2 Siirrettävä linkkimasto

Järjestelmäkontti on tarkoitettu alueellisille viestijoukoille viestilaitetilaksi. Kontti sähköistetään siirrettävän linkkimaston voimakoneella ja sitä voidaan siirtää kuorma-auton lavalla. Kontti sisältää järjestelmäkaapin [26].

Järjestelmäkaappi on EMP-suojattu säilytys- ja kuljetustila Minilink E-sarjan alapään yksiköille sekä XDM-400 keskukselle tai TETRA-tukiasemalle. Järjestelmäkaapin varusteisiin kuuluu: kytkentärajapinnat, ristikytkentäkenttä, tasasuuntaaja, Minilink, kuparimodeemi, akusto sekä XDM-400-solmu tai TETRA-tukiasema. Järjestelmäkaappi sisältää myös paljon komponentteja kuten esimerkiksi: kaapelointiyksikkö, suodattimet UHF-tukiasemayksikkö, V.35 sync.-modeemit ja SDH-kaukovalokaapeliyksikkö [26]. Kuvassa 2.3 on järjestelmäkaappi.



**Kuva 2.3
Järjestelmäkaappi**

2.2.2 XDM-400

XDM-400 on SDH-tekniikkaa hyödyntävä alueellisen viestijärjestelmän solmu, jonka avulla voidaan reitittää siirtoteitä STM-4 tasolle asti. Solmun avulla voidaan myös purkaa suurempia siirtokehyksiä kanavatasolle asti. XDM-400 varusteisiin kuuluu kaksi sähkönsyöttöyksikköä ja kehikon tuuletusyksikkö [26]. Kuvassa 2.4 on XDM-400.



Kuva 2.4 XDM-400

2.2.3 Mini-Link E

Puolustusvoimilla on käytössä Ericsson Minilink E-sarjan kalusto seuraavin kokoonpanoin:

- Ulko-osa: Radioyksikkö RAU2 ja 0.6m antennimoduli
- Sisäosa: AMM 2U liitännämodulikehikko
MMU 4X2/8 Mb modeemiyksikkö
SMU xx kanavointiyksikkö
SAU Exp2 huoltopääteyksikkö



Kuva 2.5 RAU2 ja 0.6m antennimoduli

Ulko-osa on kapasiteettiriippumaton ja sisäosa on taajuusriippumaton. AMM 2U liitännämodulikehikkoon voidaan liittää yhteensä kaksi MMU modeemiyksikköä, SMU kanavointiyksikkö sekä SAU huoltopääteyksikkö. RAU2 radioyksikössä käytetään 12.75 – 13.25 GHz toimintataajuutta ja sen siirtokapasiteetti on 2-34 Mb. Radioyksikön duplex-väli on 266 MHz (A/B). Lähetyteho on -7 - +18 dBm (0,2 mW – 0,067 W) Kuvassa 2.5 on Minilink E-sarjan radioyksikkö RAU2 ja 0.6 m antennimoduli. MMU modeemiyksiköllä voidaan siirtää neljä 2Mb-kanavaa tai yksi 8Mb-kanava. Pääsääntöisesti Puolustusvoimissa kuitenkin siirretään 2Mb PCM-kanavia Puolustusvoimien televerkosta tai yleisestä televerkosta yhtymän viestiverkkoon (YVI). SAU huoltopääteyksikköön voidaan kytkeä analoginen huoltopuhelin ja siinä on myös liitännät hallintaverkon rakentamista varten. SAU-yksikköä käytetään ulkoisten hälytysten ja ohjauspisteiden välitykseen [18].

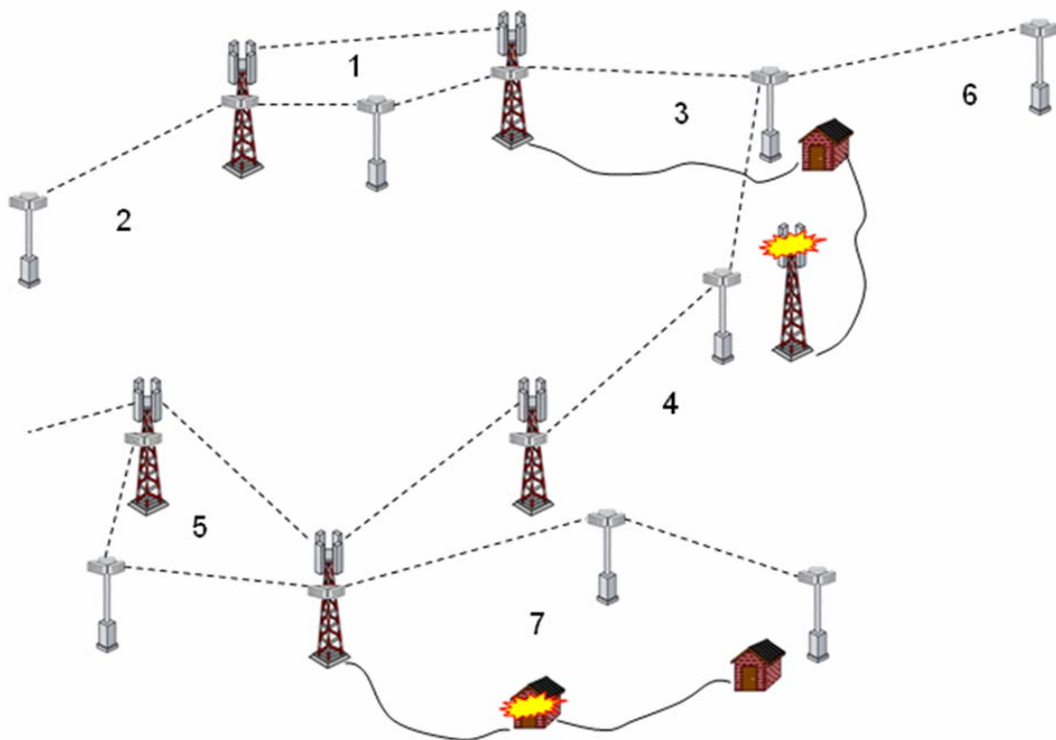
Mini-Link E-sarjan RAU2 radioyksikkö toimii SHF-taajuusalueella (Super High Frequency) 13 - 18 GHz. SHF –taajuusalue ulottuu 3 – 30 GHz:iin. Tätä taajuusaluetta kutsutaan myös mikroaalto-alueeksi johtuen aallon pituudesta joka on tällä alueella 10 – 1 cm. Mikroaaltolinkkejä käytetään mm. kiinteiden televerkkojen radiolinkkeinä. Tällä taajuusalueella radioaallon eteneminen perustuu puhtaasti näköyhteysreittiin (LOS, Line Of Sight). Aallonpituuden ollessa näin lyhyt maanpintaa ei voida katsoa tasaisesti heijastavaksi pinnaksi. Tästä johtuen radioaalto ei heijastu, vaan siroaa pinnan epätasaisuuksista. Näin ollen interferenssiongelmat ovat vähäisempiä kuin UHF- ja VHF-alueilla [14].

2.2.4 Kaukovalokaapeli

Kaukovalokaapeliannos sisältää vesistö- ja kaukovalokaapeliyhteyden rakentamiseen tarvittavan kaluston. Valokaapelia pystytään tarvittaessa jatkamaan kenttäolosuhteissa. Kaukovalokaapeli on yksimuotokuitua (TRMRMU 2*SMS). Vaimennus on 0,28/0,43 dB/km. Kenttävalokaapelissa on Pro Beamin linsiliittimet [26].

2.3 Esimerkkejä järjestelmän käyttömahdollisuuksista

Mikroaaltolinkkejä ja kaukovalokaapeleita voidaan käyttää linkkiyhteyksien varmentamiseen, rakentamiseen, silmukointiin tai korvaamiseen. Kuvassa 2.6 on esimerkkejä sekä mikroaaltolinkkien että kaukovalokaapeleiden käyttömahdollisuuksista. 1. PTV:n linkkiyhteyden varmentaminen, 2. yhteyden rakentaminen PTV:sta, 3. PTV:n linkkiyhteyden silmukoiminen tai varmentaminen teleyrityksen viestiasemalta, 4. PTV:n tuhoutuneen yhteyden korjaaminen, 5. PTV:n silmukoiminen, 6. yhteyden rakentaminen teleyrityksen viestiasemalta ja 7. PTV:n tuhoutuneen viestiaseman korvaamiseen. Lisäksi järjestelmää voidaan käyttää siirrettävän verkon silmukoimiseen ja siirrettävän verkon linkkiyhteyden varmentamiseen [2].



Kuva 2.6 Mikroaaltolinkkien käyttömahdollisuuksia ALVI-ympäristössä

2.4 Johtopäätökset

Alueelliset viestijoukot ovat suhteellisen uusia viestijoukkoja. Alueellisten viestijoukkojen keskeinen kalusto perustuu pitkälti kaupallisiin tuotteisiin kuten esimerkiksi Mini-Link-kalusto. Nykyään yhteysvälit toteutetaan mikroaaltolinkeillä ja kaukovalokaapeilla. Kaukovalokaapeli on tiedonsiirto-ominaisuuksiltaan erittäin hyvä vaihtoehto, koska sillä saavutetaan suuria tiedonsiirtonopeuksia pienillä virheillä, eikä se myöskään ole herkkä elektroniselle sodankäynnille. Toisaalta taas sen rakentaminen on hitaampaa kuin linkkijänteen rakentaminen, eikä sen rakentaminen ole muutenkaan kannattavaa kaikkiin paikkoihin. Mini-Link-mikroaaltolinkin tiedonsiirtonopeus on 2-34 Mb, joka on tällä hetkellä riittävä. Tiedonsiirtokapasiteetin tarve on kuitenkin kasvanut paljon viime aikoina ja on myös todennäköistä, että sen tarve kasvaa myös taistelukentällä. Mini-Link mikroaaltolinkki toimii SHF-taajuusalueella ja vaatii siten lähes välttämättä suoran näköyhteyden toimiakseen. Kaukovalokaapelin korvaaminen langattomilla tekniikoilla olisi järkevää, jos se nopeuttaisi yhteyden muodostamista ratkaisevasti ja se olisi tilanteen kannalta tärkeää. Mini-Link kaluston korvaaminen toisella tekniikalla olisi järkevää, jos sillä saavutettaisiin merkittävää etua kuten esimerkiksi suurempi tiedonsiirtonopeus tai epäherkempi taajuusalue. Jos esimerkiksi toimitaan alhaisemmilla taajuusalueilla, suora näköyhteys ei ole välttämätön. Alhaisemman taajuusalueen käytöstä voi tosin seurata muita haittoja yhteyden kannalta.

3 TETRA-TEKNIikka

TETRA-tekniikka on standardisoitu tekniikka, jolla on tarkoitus toteuttaa suljettu ja suojattu verkko, joka on tarkoitettu ammattilais- ja viranomaiskäyttöön. Tekniikka tarjoaa organisaatioiden viestiliikenteessään tarvitsemat erityisominaisuudet esim. ryhmäpuhelut, puhelujen priorisointi, datansiirto ja hätäpuhelut. TETRA-tekniikka ja sen käyttö perustuu täysin TETRA-standardeihin, jotka on määritelty ETSI:n toimesta. Tästä syystä eri laitevalmistajien laitteet soveltuvat eri lailla eri käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi jonkin laitevalmistajan laitteet voivat olla fyysisesti kestävämpiä ja helppokäyttöisempiä, mutta koska toimitaan standardin mukaan, niin laitteet ovat täysin yhteensopivia. Kuvassa 3.1 on NOKIAN TETRA-päätelaitteita.



Kuva 3.1 Tetra päätelaitteita

3.1 TETRA-standardi

TETRA on digitaalisesti toimiva radiostandardi joka on kehitetty yhdessä Euroopan Unionin, laitevalmistajien, käyttäjien, operaattoreiden ja asiantuntijoiden kanssa. Standardia alettiin valmistella 1980-luvun loppupuolella. Vuonna 1990 ETSI pyysi eri laitevalmistajia ehdottamaan ratkaisuja TETRA-tekniikaksi. Vuonna 1991 ETSI:ssä päätettiin ehdotusten pohjalta tulevan tekniikan rakenne ja tämän jälkeen alettiin tehdä varsinaista standardisointi työtä. Vuonna 1995 julkaistiin TETRA-standardin ensimmäinen versio. Lyhenne TETRA muodostui ennen sanoista Trans-European Trunked Radio, mutta nimeä päätettiin muuttaa koska Euroopan ulkopuolella oltiin myös kiinnostuneita TETRA-tekniikasta. TETRA-tekniikka vaikuttaa tekevän suuren läpimurron monissa eurooppalaisissa maissa ja sen arvioidaan olevan dominoivassa asemassa ammattilais- ja viranomaiskäytön keskuudessa 10-15 vuoden perspektiivillä [23].

TETRA-standardissa on määritelty kaksi verkkotyyppiä, jotka käyttävät samaa radorajapintaa. Nämä verkkotyypit eivät ole toistensa kanssa yhteensopivia fyysisellä kerroksella, mutta ne ovat täysin yhteensopivia verkkokerroksella. Verkkotyypit ovat TETRA Voice + Data ja TETRA Packet Data Optimized. TETRA Voice + Data kykenee yhdistettyihin puhe- ja datasiirtopalveluihin. TETRA Packet Data Optimized tarjoaa vain pakettivälitteiset datasiirtopalvelut. Nykyiset TETRA-verkot toteutetaan TETRA Voice + Data (V+D) standardin mukaisesti. TETRA Packet Data Optimized on enemmänkin lähtökohtana tulevaisuuden TETRA-ratkaisuille. TETRA-standardeissa on määritelty toiminnallisia rajapintoja, joista radioverkko koostuu. Muu toteutus, kuten verkon infrastruktuuri, jätetään laitevalmistajien vapaasti määritettäväksi [12]. TETRA-standardeissa määritetyt rajapinnat ovat esitetty taulukossa 3.1.

Lyhenne	Merkitys
AI (Air-Interface)	Ilmarajapinta järjestelmän infrastruktuurin ja radioiden välillä
PEI (Peripheral Equipment Interface)	Oheislaiterajapinta datalaitteiden liittämiseksi radioihin
ISI (Inter System Interface)	Kahden eri TETRA-verkon välinen rajapinta
DMO (Direct Mode Operation)	Suorakanavarajapinta ilman verkkoa tapahtuvaa radioiden välistä liikennöintiä varten
NMSI (Network Management System Interface)	Verkonhallintarajapinta verkon käytönohjaukseen ja hallintaan
LSI (Line Station)	Lankaliittymän rajapinta
GW (Gateway Interface)	Yhdyskäytävärajapinta TETRA-verkon liittämiseksi ulkoisiin verkkoihin

Taulukko 3.1 Tetra-standardin rajapinnat

3.1.1 TETRA-tekniikka

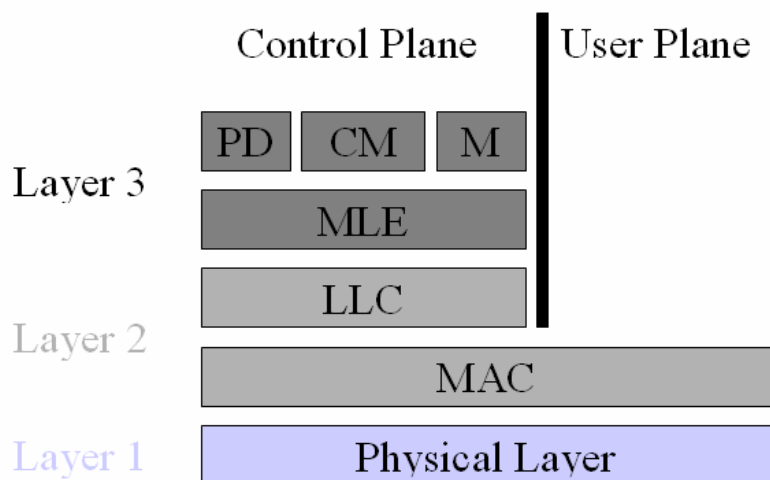
TETRA-järjestelmä on täysin digitaalinen ja se tarjoaa korkealuokkaisen äänenlaadun sekä monipuoliset datansiirto-ominaisuudet. TETRA-järjestelmässä puhelun muodostumiseen kuluu aikaa vain noin 300 ms, kun esimerkiksi GSM-tekniikalta tähän kuluu noin 5 s. TETRA-radioverkoissa käytetään niin sanottua Trunking-tekniikkaa, missä radioverkon käyttäjät eivät ole sidottuja tiettyyn radiokanavaan, vaan järjestelmä ohjaa puhelun vapaaseen aikaväliin kunkin puheluun tarvittavan tukiaseman kanavaryhmään. TETRA-teknologia on suunniteltu mahdollistamaan eri käyttäjien tarpeet, missä samaa radioverkkoa voidaan jakaa virtuaalisiksi käyttäjäryhmäkohtaisiksi verkoiksi. TETRA-standardissa määritellään erilaisia trunking-menetelmiä, joista operaattorit tai laitevalmistajat voivat tarpeittensa mukaan valita implementoitavia versioita. Message trunking on kanavanvarausmenetelmä, jossa sama kanava varataan pysyvästi yhden puhelun keston ajaksi. Kyseinen puhelu voi sisältää useita tapahtumia, kuten esimerkiksi puhekoskettimen painalluksia. Transmission trunking on kanavanvarausmenetelmä, jossa kanava varataan jokaista eri liikennetapahtumaa varten erikseen, vaikka kyseessä olisi vain yksi puhelu. Kanava varataan ja puretaan jokaisen puhekoskettimen painamisen ja vapauttamisen yhteydessä. Quasi-transmission trunking on

kanavanvarausmenetelmä, joka toimii muuten kuten transmission trunking, mutta kanavan varauksen purkamisessa on aikaviive, joka voidaan määrittää tarpeiden mukaan [12].

TETRA-verkko jakautuu useisiin eri sijaintialueisiin LA (Location Area). Sijaintialue voi muodostua yhdestä tai useammasta solusta (Cell). Sijaintialue on määritelty kiinteästi järjestelmään. Rekisteröitymisalue voi muodostua 1-8 sijaintialueesta. Järjestelmä määrittelee nämä tilaajaradiolle. Radio rekisteröityy yksiselitteisesti verkkoon, kun se kytketään päälle tai se vaihtaa sijaintia ja siten rekisteröitymisaluetta. Rekisteröityminen voi olla myös välitön, jolloin pyyntö tilaajaradiolta tulkitaan rekisteröitymiseksi [12].

3.1.2 TETRA-standardin mukainen kerrosrakenne

TETRA-standardin mukainen kerrosrakenne koostuu fyysisestä tasosta, linkkikerroksesta ja verkkokerroksesta. Kerroksien lisäksi rakenne jaetaan kahteen tasoon käyttäjätaso U-plane (User Plane) ja ohjaustaso C-plane (Control Plane) [12]. Kuvassa 3.2 on esitetty TETRA-standardin mukainen kerrosrakenne.



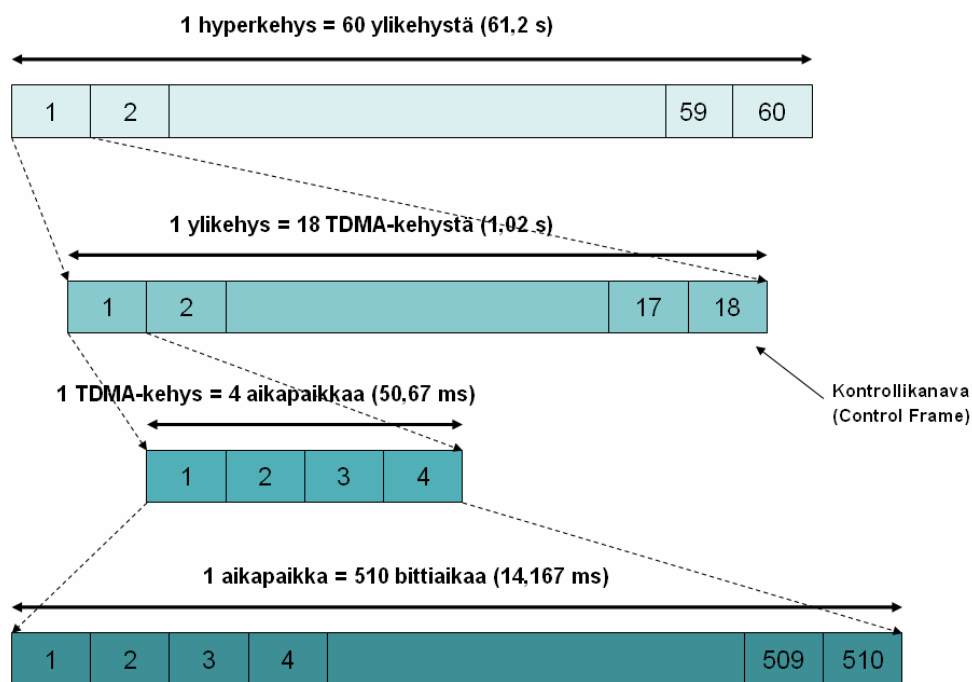
Kuva 3.2 TETRA-standardin mukainen kerrosrakenne

3.1.2.1 Fyysinen kerros

TETRA-tekniikan tukiasemien liikennöinti tapahtuu kantoaallolla, joka muodostuu 10 MHz:n taajuusvälillä toimivasta taajuusparista (uplink ja downlink). TETRA-tekniikan käyttämä aikajakoinen moniliittymäteknikka (TDMA, Time Division Multiple Access) sisältää yhdessä 25 kHz:n 4 kehyksessä yhteensä neljä liikennöintikanavaa. Yhden aikavälin maksimi siirtonopeus datasiirrossa on 7,2 kbit/s ja kaikkia neljää aikaväliä voidaan käyttää yhdessä,

joten yhden käyttäjän maksimisiirtonopeudeksi saadaan 28,8 kbit/s. TDMA-kehysten kanavat jaetaan liikenne- ja kontrollikanaviin. Kunkin tukiaseman kantoaalloista pääkantoaalto sisältää pääohjauskanavan (MCCH, Main Control Channel) [12].

TETRA-tekniikan kehys muodostuu 510 bitistä. 18 TDMA-kehystä muodostaa ylikehyksen (multiframe) ja 60 ylikehystä hyperkehysten (hyperframe). Ylikehyksen kehyksissä 1-17 siirretään puhetta tai dataa. Kehys 18 on varattu ainoastaan ohjaustiedon välittämiseen [12]. Kuvassa 3.3 on esitetty TETRA-tekniikan kehysrakente.



Kuva 3.3 TETRA:n kehysrakente

3.1.2.2 Linkkikerros

Linkkikerros (DLC, Data Link Control) jaetaan loogisesti kolmeen osaan alempaan MAC-kerrokseen (Media Access Control), ylempään MAC-kerrokseen sekä LLC-kerrokseen (Logical Link Control). Tärkeimmät loogiset kanavat linkkikerroksella ovat CCCH-kanava (Common Control Channel), ACCH-kanava (Assosiated Control Channel) ja BNCH-kanava (Broadcast Network Channel) [12].

CCCH-kanavaa käytetään päätelaitteiden ohjaamiseen. CCCH-kanava sisältää edelleen MCCH-kanavan (Main Control Channel) ja SCCH-kanavan (Secondary Control Channel). MCCH-kanava käyttää kantoaallon ensimmäistä aikapaikkaa kaikissa kehyksissä 1-18 ja ohjaa yleisesti kaikkia päätelaitteita. SCCH-kanava jakautuu edelleen kahteen kanavaan, jotka

ovat Common SCCH-kanava, joka toimii verkkoon kirjautuneiden päätelaitteiden ohjauskanavana, sekä Assigned SCCH-kanava, joka toimii yhteyskohtaisena ohjauskanavana [12].

ACCH-kanava (Associated Control Channel) on piirikytkentäisen liikenteen kaksisuuntainen signalointikanava. Kanava sisältää kolme alikanavaa FACCH-kanavan (Fast Associated Control Channel), SACCH-kanavan (Slow Associated Control Channel) ja STCH-kanavan (Stealing Channel). SACCH-kanava käyttää kehystä 18 päätelaitteiden ohjaamiseen. Kiireelliset ohjauskomennot kehyksillä 1-17 annetaan päätelaitteille käyttäen FACCH-kanavaa. Sitä ei kuitenkaan voida käyttää enää puhelun muodostuksen jälkeen, kun kanavat muuttuvat liikennekanaviksi (TCH, Traffic Channel). STCH-kanavaa käytetään yhteyden aikana kiireelliseen signalointiin esimerkiksi solunvaihdon yhteydessä [12].

BNCH-kanavaa (Broadcast Network Channel) käytetään vain päätelaitteen suuntaan tapahtuvassa liikenteessä. Tällä kanavalla tukiasema ohjaa päätelaitteen synkronoitumista verkkoon ja antaa muuta tarvittavaa tietoa tukiasemasta päätelaitteille.

3.1.2.3 Verkkokerros

Verkkokerros jaetaan kolmeen loogiseen kokonaisuuteen, jotka ovat liikkumisen hallinta (MM, Mobility Management), piirikytketty moodi (CMCE, Circuit Mode Call Entity) ja pakettidata (PD, Packet Data). Pakettidata sisältää yhteydettömän pakettidatan (CLNS, Connectionless Network Service) ja yhteydellisen pakettidatan (CONS, Connection Oriented Network Service) [12].

TETRA-tekniikassa verkon toiminnan kannalta tärkeä verkkokerroksen toiminto on solun valinta ja uudelleenvalinta. Standardissa ei määritellä tarkkoja käytäntöjä, vaan ne riippuvat implementoinnista. Standardissa määritellään kategoriat, joita solun uudelleenvalinnassa voi käyttää [12]. Taulukossa 3.2 on esitetty TETRA-standardissa määritetyt solunvalinnan kategoriat.

Kategoria	Merkitys
Ei-ilmoitettu	MS (Mobile Station) ei ole liittynään piirikytkettyyn puheluun.
Ei-kuulutettu	MS on liittynään piirikytkettyyn puheluun, mutta sillä ei ole tilaisuutta informoida verkkoa aikomuksistaan etsiä toista

	tukiasemaa.
Kuulutettu tyyppi 3	MS on liittyneenä piirikytkettyyn puheluun, mutta sillä on silti tilaisuus informoida verkkoa aikomuksistaan etsiä toista tukiasemaa (esimerkiksi kuunnellessaan ryhmäpuhelun aikana).
Kuulutettu tyyppi 2	MS on liittyneenä puheluun, informoi palveleva tukiasema MS:ää aikomuksistaan etsiä uusi tukiasema. Uuden tukiaseman kanssa MS aloittaa neuvottelut suoraan pääohjauskanavan kautta (MCCH).
Kuulutettu tyyppi 1	MS on liittyneenä puheluun, informoi palveleva tukiasema MS:ää aikomuksistaan etsiä MS:lle uusi tukiasema. Tässä tapauksessa tukiasema neuvottelee MS:lle uuden tukiaseman verkon kautta.

Taulukko 3.2 TETRA-standardissa määritetyt solunvalinnan kategoriat

Standardeissa määritellään myös erilaisia kynnysarvoja, joita voidaan käyttää valittaessa solua uudelleen [12]. Taulukossa 3.3 on esitetty TETRA-standardissa määritetyt kynnysarvot valittaessa solua uudelleen.

Kynnysarvo	Merkitys
Hyvä verkon palvelutaso	MS:llä ei ole oikeutta vaihtaa solua.
Kohtalainen verkon palvelutaso	MS voi halutessaan vaihtaa solua.
Huono verkon palvelutaso	MS joutuu vaihtamaan solua, mikäli löytää paremman alueen.

Taulukko 3.3 TETRA-standardissa määritetyt kynnysarvot valittaessa solua uudelleen

3.1.3 TETRA-verkon palvelut

TETRA-standardi jakaa verkon palvelut peruspalveluihin ja lisäpalveluihin. Peruspalvelut jaetaan edelleen telepalveluihin ja verkkopalveluihin. Peruspalvelut koskevat puheen- ja datansiirtoa. Lisäpalvelut taas liittyvät peruspalveluiden käyttöön. Lisäpalveluita ei voida käyttää yksinään, vaan niitä voidaan käyttää vain peruspalveluiden yhteydessä.

3.1.3.1 Peruspalvelut

Peruspalvelut jaetaan telepalveluihin ja verkkopalveluihin. Telepalvelut voivat olla joko selväkielistä tai salattua puhetta. Näitä ovat: yksittäispuhelu (Individuall call), ryhmäpuhelu (Group call), kuitattu ryhmäpuhelu (Acknowledged group call) ja yhteislähetyspuhelu (Broadcast call).

Verkkopalvelut ovat datan kuljetuspalveluita, jotka voidaan toteuttaa seuraavina puheluina: yksittäispuhelu, ryhmäpuhelu, kuitattu ryhmäpuhelu tai yhteislähetyspuhelu. Puhelut voidaan toteuttaa piirikytketyllä moodilla, yhteydellisellä pakettidatalla ja yhteydettömällä pakettidatalla [12]. Datan siirtonopeudet piirikytketyssä moodissa eri suojausasteilla ja virheenkorjauksilla on esitetty taulukossa 3.4.

Aikavälien määrä	1	2	3	4
Suojaamaton data	7,2	14,4	21,6	28,8
Suojattu data, matala suojausaste	4,8	9,6	14,4	19,2
Suojattu data, korkea suojausaste	2,4	4,8	7,2	9,6

Taulukko 3.4 Datan siirtonopeudet piirikytketyssä moodissa (kbit/s)

Lisäksi on olemassa lyhytsanomapalvelut, jotka ovat datapalveluita. Ne voivat olla vapaasti käyttäjän määriteltäviä (lyhytsanomamat) tai etukäteen määriteltäviä (tilaviestit). Piirikytketty data voi olla suojaamatonta tai varustettuna kevyellä tai vahvalla virheenkorjauksella, joka vaikuttaa siirtonopeuteen edellä olevan luettelon mukaisesti [12].

TETRA-tekniikassa pakettidatapalvelut jaetaan yhteydelliseen ja yhteydettömään pakettidatapalveluun. Yhteydellinen pakettidatapalvelu (CONP, Connection Oriented Network Protocol) on X.25 standardin mukainen palvelu. Yhteydettömästä pakettidatapalvelusta (CLNP, Connectionless Network Protocol) on TETRA-tekniikassa olemassa oma versionsa (SCLNP, TETRA Specific Connectionless Network Protocol). SCLNP-protokolla tarjoaa CLNP-protokollaa enemmän palveluita. Tiedonsiirrossa on mahdollista kuitenkin käyttää myös standardin ISO 8473 mukaista yhteydetöntä verkkoprotokollaa. Yhteydetöntä verkkoprotokollaa voidaan käyttää suoraan TETRA-tekniikan linkkikerroksen päällä tai välissä olevan yhteydellisen kerroksen (CONP) kanssa [12].

Myös IP-protokollaa (Internet Protocol) voidaan käyttää TETRA-tekniikassa. IP-protokollaa voidaan käyttää yhteydettömän pakettidatan kanssa, mutta se vaatii muutosprotokollan käyttöä SCLNP-protokollan ja IP-protokollan välillä. Toinen tapa on käyttää IP-protokollaa yhteydellisessä verkkoprotokollassa X.25 yhteyden päällä [12].

3.1.3.2 IP-pakettidata

TETRA-tekniikassa IP-pakettidata toteutetaan pitkälti samalla tavalla kuin esimerkiksi GPRS:llä GSM-tekniikassa. TETRA-tekniikassa yhden aikavälin maksimisiirtonopeus on 7.2 kbit/s, josta jää 2.5-3.5 kbit/s sovelluksen käytettäväksi. Tämä riittää esimerkiksi WAP-sovelluksille. Jos käytetään kaikkia neljää aikaväliä voidaan saavuttaa 28.8 kbit/s bruttosiirtonopeus, kuten taulukosta 3.4 voidaan nähdä. Tästä siirtonopeudesta jää sovelluksille käytettäväksi noin 9 kbit/s. Tällä saadaan siirrettyä jo esimerkiksi jonkinlaista video-kuvaa. TETRA-tekniikalla ei kuitenkaan saavuteta niin suuria siirtonopeuksia kuin esimerkiksi GPRS-tekniikalla. IP-pakettidatan käytössä on myös haittapuolia, jos sitä käytetään yhtä aikaa puheen kanssa. Esimerkiksi etuoikeutettu puheliikenne saattaa katkaista datan siirron [21].

3.1.3.3 Lisäpalvelut

TETRA-standardi määrittelee lisäpalveluita, jotka ovat sekä ryhmäliikenne- että yksilöpuhelusuuntuneita. Näistä jälkimmäiset vastaavat pitkälti yleisten televerkkojen lisäpalveluja ja tilaajatoiminteita. Lisäpalveluita voidaan käyttää vain peruspalvelujen yhteydessä, ei yksinään [12]. TETRA-standardin tärkeimmät viranomaisliikenteen lisäpalvelut on esitetty taulukossa 3.5.

Lyhenne	Merkitys
CAD (Call Authorised by Dispatcher)	Päivystäjän välittämä puhelu
AS (Area Selection)	Kutsualueen valinta
AP (Access Priority)	Etuoikeus kutsukanavalle
PC (Priority Call)	Etuoikeus puhetielle
LE (Late Entry)	Jälkeenpäin liittyminen ryhmään
PPC (Pre-emptive Priority Call)	Alta purkava etuoikeus
DL (Discrete Listening)	Liikenteen kuuntelu

AL (Ambience Listening)	Radion taustakuuntelu
DGNA (Dynamic Group Number Assignment)	Dynaaminen ryhmän ohjelmointi radioon

Taulukko 3.5 TETRA-standardin tärkeimmät viranomaisliikenteen lisäpalvelut

3.1.4 Suorakanavatoiminne

TETRA-tekniikassa on olemassa suorakanavatoiminne (DMO, Direct Mode Operation). Sitä käytetään tilanteissa, jossa lähettäjällä ja vastaanottajalla on yhteys keskenään ilman verkon kytkentä- ja hallintajärjestelmää. Tällä tavalla liikennöidessä puhelimien toiminta muistuttaa perinteisten radiopuhelimien toimintaa, jossa radiot toimivat samalla taajuudella saaden yhteyden painamalla puhekosketinta. Suorakanavatoiminne on tarkoitettu käytettäväksi tilanteissa jossa käyttäjä on tukiasemaverkon tavoittamattomissa. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi käyttäjän ollessa rakennuksissa, tunneleissa tai haja-asutusalueilla. Muita tilanteita, joissa suorakanavatoiminteen käyttö voisi olla tarpeellista, ovat esimerkiksi verkon käyttökatkokset tai ylikuormittumiset [12].

Käyttäjän kannalta DMO- ja TMO-toiminteen välillä on myös ero taajuuksien käytössä. TMO-tilassa järjestelmä antaa päätelaitteen ja tukiaseman välille vapaat taajuudet. Tässä tilassa käyttäjän ei tarvitse ottaa kantaa käytettäviin taajuuksiin. DMO-tilassa käytetään yhtä kiinteää taajuutta, jonka täytyy olla käyttäjällä etukäteen tiedossa ja ohjelmoituna päätelaitteeseen [5].

Vapaiden taajuuksien löytäminen DMO-tilaa varten on ongelmallista järjestelmän kannalta. Vapaita taajuuksia on harvassa TETRA:n käyttämällä taajuusalueilla. Siksi on esitetty että TETRA:n käyttämien taajuuksien eteen asetettaisiin kansainvälisesti taajuuksia DMO:lle. Tällä voitaisiin välttää päällekkäisyyksiä muun TETRA-järjestelmän kanssa [5].

DMO:n protokollapinossa alimpana on fyysinen kerros (Physical layer; DM Air Interface 1). Sen tehtävänä on muodostaa ilmarajapinta lähettäjän ja vastaanottajan välille. Seuraavana on (DLL, Data Link Layer), jonka tehtävät jakautuvat käyttäjä- ja järjestelmäosaan (U-Plane ja C-Plane). U-Plane vastaa osoitteettomasta piirikytketystä puheesta ja datasta. C-Plane vastaa signaloinnin siirrosta radioiden välillä osoitetietojen perusteella. Ylimpänä kerroksena on DMCC-kerros (Direct Mode Call Control entity). DMCC-kerroksen tehtävä on valvoa puheluiden muodostumista ja ylläpitää niitä sekä tarjota palveluja [5].

DMO tarjoaa peruspalvelut (bearer services), käyttäjäpalvelut (teleservices), ja järjestelmäpalvelut (intrinsic services). Peruspalvelut ovat palveluita jotka mahdollistavat tiedonsiirron lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Peruspalveluiden tehtävä on luoda siirtotie datalle. Käyttäjäpalvelut mahdollistavat käyttäjän ja radioihin kytkettyjen päätelaitteiden pääsyn TETRA-tekniikan tarjoamiin palveluihin. Käyttäjäpalvelut käyttävät peruspalveluiden luomaa siirtotietä [5].

3.2 TEDS-palvelut

ETSI määrittelee uutta ilmarajapinta-laajennusta TETRA-standardiin. Se koskee TETRA-tekniikan parannettua datapalvelua (TEDS, TETRA Enhanced Data Service). Tällä parannetulla datapalvelulla voidaan saavuttaa jopa 30-150 kilobitin siirtonopeus sekunnissa, joka on kymmenkertainen verrattuna pakettidatan siirtonopeuteen usealla aikavälillä (multi-slot packet data). TEDS-palveluissa käytetään mm. vaihe-eroamplitudimodulaatiota (QAM, Quadrature Amplitude modulation), joka esitellään tarkemmin luvussa viisi. TEDS-palvelut vaatii kuitenkin huomattavasti enemmän kapasiteettia radiotiellä kuin TETRA-tekniikan perinteiset palvelut, joten TEDS-palveluita käytettäessä kanta-aalloit varataan ainoastaan datansiirtoon, eikä niitä siten voida käyttää yhtä aikaa puheen siirtoon [22]. Laitevalmistajista ainakin NOKIA on visioinut TEDS-tekniikan käyttöä TETRA-tekniikassa.

TEDS-palveluilla ei voida toteuttaa yhtä pitkiä yhteysvälejä suurilla tiedonsiirtonopeuksilla kuin TETRA-tekniikan perinteisillä palveluilla. Suurin tiedonsiirtonopeus on saavutettavissa vain rajoitetun kantaman puitteissa, vaikkakin pienemmät nopeudet ovat saavutettavissa kaikilla etäisyyksillä. TEDS-palveluita käytettäessä tekniikka osaa valita adaptiivisesti käytettävän siirtonopeuden. TEDS-palvelut vaativat enemmän kaistanleveyttä radiotiellä kuin perinteiset palvelut. TEDS palvelut vaativat 50-150 kHz kaistanleveyden, kun taas perinteisesti TETRA-tekniikka vaatii 25 kHz. Näin laajaa taajuusalueetta ei voida käyttää nykyisillä taajuuksilla, mutta 50 kHz vaihtoehtoa voitaisiin käyttää. Koko kaistanleveyttä voitaisiin hyödyntää jollain toisella taajuusalueella kuin mitä TETRA-tekniikka tällä hetkellä käyttää. Nykyiset TETRA-verkot voitaisiin päivittää käyttämään TEDS-palveluita 50 kHz:n kaistanleveydellä [21].

3.3 VIRVE-verkko

VIRVE-verkko (VIRanomaisVERkko) on TETRA-standardin mukainen Nokian infrastruktuurilla toteutettu radioverkko eri viranomaisten ja julkishallinnon organisaatioiden

käyttöön [12]. VIRVE-verkon käyttäjiä ovat mm. Poliisi, Palo- ja pelastuspalvelut, sosiaali- ja terveystalvet, Tulli, Rajavartiolaitos, Puolustusvoimat, Tielaitos, Merenkulkulaitos sekä Ilmailulaitos [28]. VIRVE-verkko on maailman ensimmäinen koko maan kattava TETRA-tekniikkaan perustuva viranomaisverkko. VIRVE-verkon tarkoitus on tehostaa viranomaisten välistä viestintää kaikissa olosuhteissa [27].

VIRVE-verkko on ollut Suomen Erillisverkko Oy:n omistuksessa vuoden 2004 alusta. VIRVE-verkko kattaa koko maan ja verkossa on yli 26 000 liittymää [27]. VIRVE-verkko koostuu 15:sta kytkimestä ja 1200:sta tukiasemasta [15]. VIRVE-verkko tarjoaa kattavasti ominaisuuksia käyttäjille. Ryhmäliikenteessä on käytössä mm. seuraavat ominaisuudet: VIRVE-verkkoon voidaan luoda kokonaan uusia puheryhmiä tai muodostaa niitä olemassa olevista puheryhmistä, eri puheryhmiä voidaan muodostaa erikseen tai yhdessä, käyttäjä voi osallistua valitsemaansa ryhmäpuheluun, järjestelmä huolehtii siitä, että vain yksi keskustelija voi puhua kerrallaan lisäksi käyttäjä voi kuulua samanaikaisesti useaan eri puheryhmään. Muita tarjottavia ominaisuuksia ovat mm. paikannus ja suorakanavatoiminne [27].

3.4 Johtopäätökset

TETRA-tekniikkaa käytetään ALVI-ympäristössä johtamiseen. TETRA-tekniikalla on myös mahdollista siirtää dataa jopa IP-muodossa, mutta TETRA-tekniikka kärsii pienistä tiedonsiirtonopeuksista. TETRA-tekniikkaa ei ole suunniteltu siirtämään suuria määriä dataa, vaan se on suunniteltu puheen- ja tarvittavaan datansiirtoon. Koska yleinen kehityssuunta tiedonsiirrossa on kuitenkin menossa kokoajan suurempiin siirtonopeuksiin, niin TETRA-standardisoinnissakin on reagoitu tähän. TETRA-standardin laajennus, joka koskee datansiirtoa nostaa kaivattua siirtonopeutta, mutta edelleenkin puhutaan mobiilipalveluiden toteutuksiin riittävästä siirtonopeuksista. TETRA-tekniikan suhde siirtonopeuksiin ja yhteysvälien pituuteen on samaa luokkaa kuin muissakin radioverkoissa. Suurilla siirtonopeuksilla yhteysvälit lyhenevät. TETRA-tekniikalla toteutettaessa verkkoa ei välttämättä tarvitse rakentaa fyysisesti, vaan voidaan käyttää valmiita tukiasemia.

VIRVE-verkko on koko maan kattava verkko. Koska VIRVE-verkon infrastruktuuri on valmiina, sen hyödyntäminen on järkevää. Vaikka VIRVE-verkko on kattava, niin sitä saattaa olla tarve varmentaa. VIRVE-verkko on toteutettu tukiasematyyppisesti, jossa tukiasemat saattavat muodostua kriittisiksi pisteiksi. TETRA-verkossa tukiaseman peittoalue on kymmeniä kilometrejä maastosta ja olosuhteista riippuen. Jos TETRA-tekniikkaa käytetään datansiirtoon suurilla siirtonopeuksilla, niin saavutettava yhteysväli saattaa olla lyhyehkö.

Tukiasema on tyypillisesti ympärisäteilevä, joka ei välttämättä ole paras vaihtoehto joka tilanteessa.

4 WLAN-TEKNIikka

Langattomien lähiverkkojen (WLAN, Wireless Local Area Network) toteuttamiselle on olemassa useita eri vaihtoehtoja. Markkinoilla on tarjolla mm. seuraavia tekniikoita: HiperLAN, HomeRF, Bluetooth ja IEEE 802.11-standardin mukaiset laitteet. Näistä IEEE 802.11-standardin mukaiset laitteet ovat yleistyneet suosituimmaksi vaihtoehdoksi. ETSIn HiperLAN on varteenotettavin kilpailija IEEE 802.11-standardille, koska se kykenee kilpailukykyisiin suoritusarvoihin. HomeRF-tekniikka on kärsinyt pienistä siirtonopeuksista ja Bluetooth-tekniikka taas lyhyestä kantamastaan. Työssä käsitellään IEEE 802.11-standardin mukaista WLAN-tekniikkaa.

4.1 IEEE 802.11-standardi

IEEE 802.11-standardi sisältää MAC (Medium Access Control) ja fyysisen (PHY, PHYSical) tasojen määrittelyt langattomille lähiverkoille (WLAN). Ensimmäinen versio standardista julkaistiin vuonna 1997. Tavoitteena oli määrittellä kilpailukykyinen vaihtoehto lähiverkkojen (LAN, Local Area Network) toteuttamiselle ilman johdinyhteyksiä. Standardin mukaisia laitteita on ollut markkinoilla vuodesta 1998. Uusia lisäosia standardiin ratifioidaan jatkuvasti vastaamaan muuttuneita tarpeita [1].

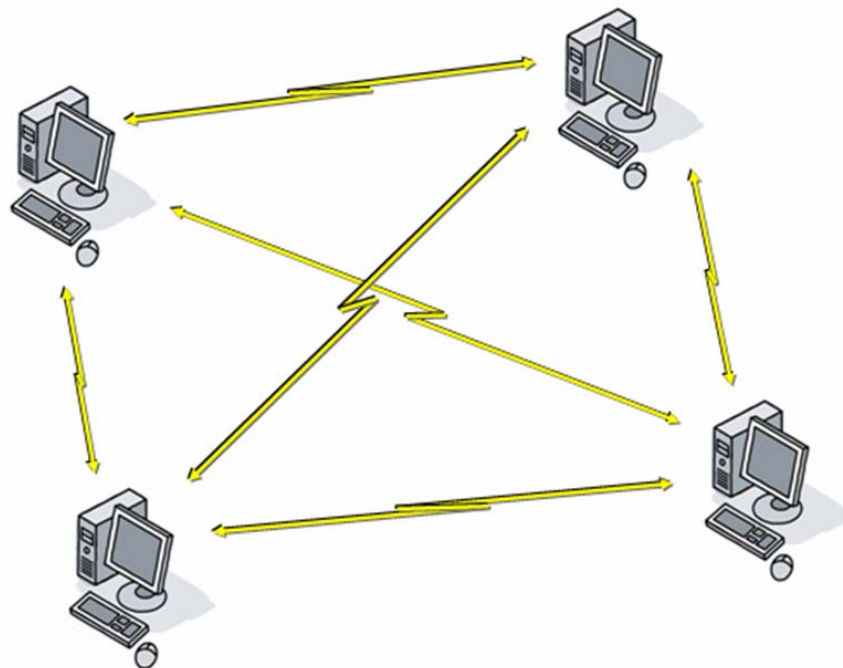
4.1.1 Verkkoarkkitehtuuri

IEEE 802.11-standardissa verkot koostuvat peruspalveluryhmistä (BSS, Basic Service Set). BSS on joukko verkon laitteita jotka keskustelevat toistensa kanssa, joko suoraan tai AP:n (Access Point) välityksellä. AP on langattoman verkon rajalla toimiva laite, joka johtaa langatonta verkkoa ja huolehtii yhteyksistä verkon ulkopuolelle. Langattomat lähiverkot muodostaa yleensä useat peruspalveluryhmät, jotka ovat yhteydessä toisiinsa jakelujärjestelmän (DS, Distribution System) kautta. IEEE 802.11-standardissa ei määritellä jakelujärjestelmää, vaan ainoastaan palvelut joita sen tulee tukea. Langattomat lähiverkot erotellaan toisistaan palveluryhmätunnuksilla (SSID, Service Set Identifier), joka on käyttäjän määriteltävissä oleva verkon nimi, joka yhdistää samaan langattomaan lähiverkkoon kuuluvia laitteita [1].

IEEE 802.11-standardissa määritellään kolme mahdollista verkkotopologiaa, jotka ovat itsenäinen peruspalveluryhmä (IBSS, Independent Basic Service Set), infrastruktuuri peruspalveluryhmä (BSS, Basic Service Set) ja laajennettu palveluryhmä (ESS, Extended Service Set)

4.1.1.1 Itsenäinen peruspalveluryhmä

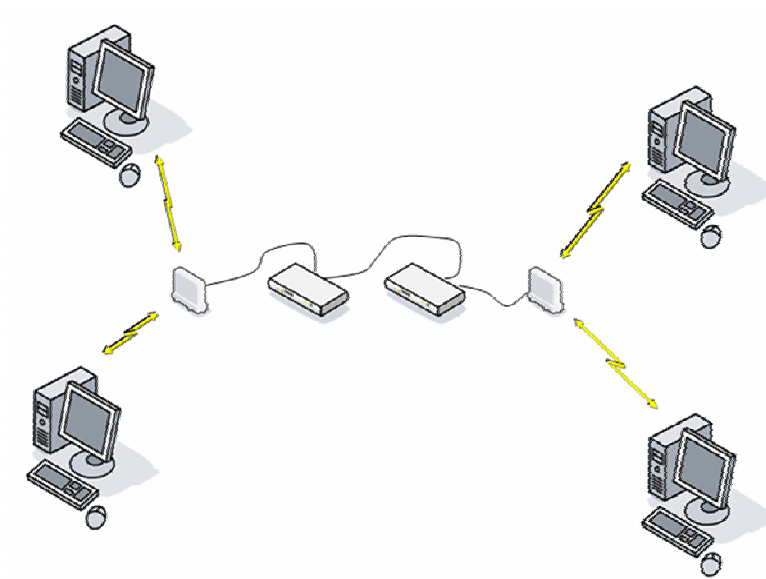
Itsenäinen peruspalveluryhmä (IBSS) on yksinkertaisin IEEE 802.11-standardin mukainen verkko, jota kutsutaan myös Ad-Hoc-verkoksi. Tässä verkossa on oltava vähintään kaksi päätelaitetta, jotka kommunikoivat keskenään. Liikenne tapahtuu verkon sisällä, yhteyttä ei ole ulkopuolisiin verkkoihin tai palveluihin. IBSS-verkossa ei ole Access Pointia (AP), vaan pelkkiä päätelaitteita [7]. Kuvassa 4.1 on havainnoitu liikenne itsenäisen peruspalveluryhmän sisällä.



Kuva 4.1 Itsenäisen peruspalveluryhmän (IBSS) verkkotopologia

4.1.1.2 Infrastruktuuri BSS-verkko

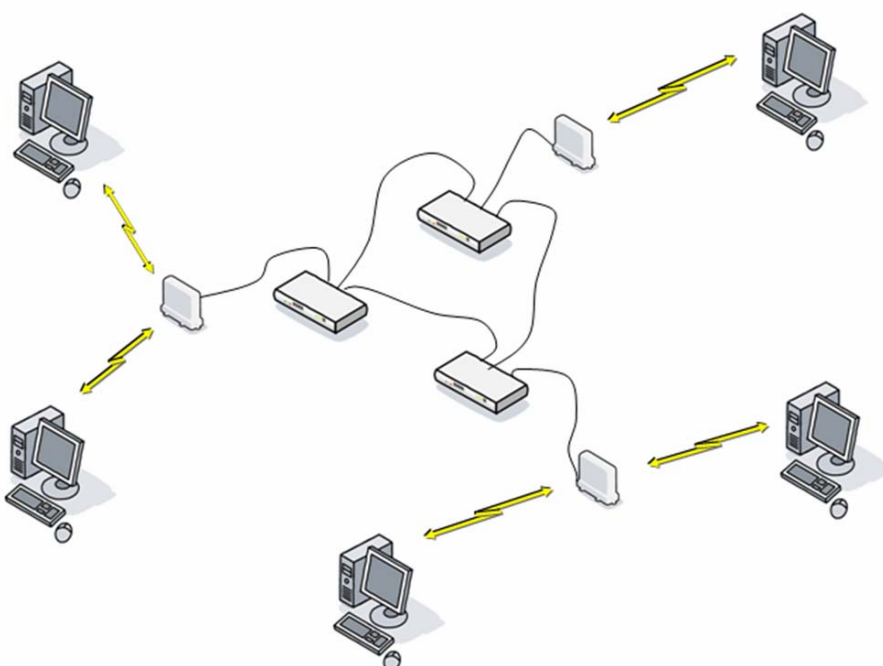
Infrastruktuuri BSS-verkossa (BSS) on oltava vähintään yksi Access Point (AP), jonka kanssa verkon kaikki päätelaitteet kommunikoivat. Access Point huolehtii päätelaitteiden yhteyksistä toisiinsa sekä verkon ulkopuolelle jakelujärjestelmän (DS) kautta. Jakelujärjestelmää (DS) käytetään yhdistämään eri BSS-verkkoja toisiinsa sekä langaton lähiverkko osaksi lankaverkkoa [7]. Kuvassa 4.2 on esitetty infrastruktuuri BSS-verkon verkkotopologia.



Kuva 4.2 Infrastruktuuri BSS-verkon (BSS) topologia

4.1.1.3 Laajennettu palveluryhmä

Laajennettu palveluryhmä (ESS) koostuu vähintään kahdesta infrastruktuuri BSS-verkosta, jotka muodostavat loogisen kokonaisuuden jakelujärjestelmän (DS) avulla. Laajennettu palveluryhmä (ESS) toimii samoin kuin yksi yhtenäinen infrastruktuuri BSS-verkko. Päätelaitteet voivat siirtyä laajennetussa palveluryhmässä yhdestä peruspalveluryhmästä toiseen [7]. Kuvassa 4.3 on esitetty laajennetun palveluryhmän verkkotopologia.



Kuva 4.3 Laajennettu palveluryhmä-verkon (ESS) topologia

4.1.2 Palvelut

IEEE 802.11-standardissa määritellään palveluita, jotka liittyvät arkkitehtuurin eri komponentteihin ja joita MAC (Medium Access Control)-taso käyttää. Palvelut on jaettu kahteen palveluryhmään käyttötarkoituksensa mukaan asemapalveluihin (SS, Station Services) ja jakelujärjestelmäpalveluihin (DSS, Distribution System Services).

4.1.2.1 Asemapalvelut

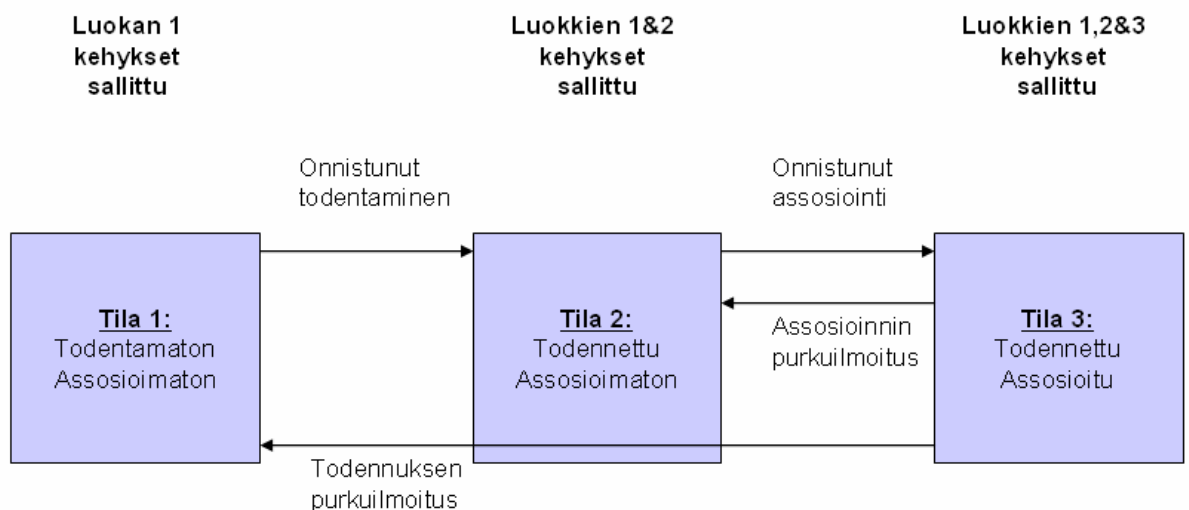
Jokaisen päätelaitteen ja Access pointin on tarjottava standardin määrittelemät neljä asemapalvelua, jotka ovat MSDU-toimitus (MAC Service Data Unit), yksityisyys, todentaminen ja todennuksen purku. MSDU-toimitus on palvelu, jonka tehtävänä on taata luotettava tiedonsiirto langattoman yhteyden ylitse. Muiden palveluiden tehtävä on tukea tämän palvelun suorittamista. Yksityisyyspalvelun tarkoitus on suojata langattomassa verkossa kulkevaa liikennettä. Yksityisyyspalvelu toteutetaan WEP-salauksen (Wired Equivalent Privacy) avulla. Todentamispalvelun tarkoituksena on rajoittaa verkkoon pääsyä. Todentamisessa käytetään kahta vaihtoehtoa avointa todentamista ja jaetun avaimen todentamista. Vain todennettu päätelaite voi liikennöidä verkossa. Avoimessa todentamisessa verkossa voi liikennöidä kaikki päätelaitteet identiteettinsä toimittamisen jälkeen. Jaetun avaimen todentamisessa verkossa voi liikennöidä salaisen avaimen tuntevat päätelaitteet. Todennuksen purkua käytetään vallitsevien todennusten päättämiseen [1].

4.1.2.2 Jakelujärjestelmäpalvelut

Standardissa määritellään jakelujärjestelmälle viisi palvelua, joita sen pitää tukea. Nämä ovat assosiointi, uudelleenassosiointi, assosioinnin purku, jakelu ja integrointi. Assosiointipalvelu mahdollistaa päätelaitteen kommunikoinnin jakelujärjestelmän suuntaan. Assosioinnissa päätelaite liitetään tiettyyn Access pointtiin ja jakelujärjestelmälle tarjotaan tarvittavat tiedot päätelaitteen tavoittamiseksi. Päätelaite voi olla assosioituneena vain yhteen Access pointtiin kerrallaan. Uudelleenassosiointia käytetään muuttamaan jo assosioituneen päätelaitteen tietoja. Tämä mahdollistaa päätelaitteen siirtymisen toiseen Access pointtiin. Assosioinnin purkua käytetään vallitsevan assosioinnin purkuun. Jakelupalvelua käytetään liikenteen lähettämisessä jakelujärjestelmään. Palvelu tarjoaa jakelujärjestelmälle tarvittavat tiedot liikenteen ohjaamiseksi oikeaan osoitteeseen. Integrointipalvelua käytetään liikennöidessä jakelujärjestelmän ja IEEE 802.11-standardista poikkeavan verkon kesken. Palvelu muuttaa 802.11-kehukset sopivaan muotoon tiedonsiirtoa varten [1].

4.1.2.3 Palveluiden väliset riippuvuudet

Jokainen päätelaite ylläpitää tietoja muista laitteista, joiden kanssa se kommunikoi suoraan. Näitä tietoja ovat assosioinnin tila ja todennuksen tila. Eri tiloja on kolme: 1. Todentamaton/Assosioimaton, 2. Todennettu/Assosioimaton ja 3. Todennettu/Assosioitu. Ensimmäisestä tilasta siirrytään toiseen kun laite on onnistuneesti todentanut itsensä. Kolmanteen tilaan laite pääsee onnistuneen assosioitumisen jälkeen. Alhaisempiin tiloihin siirtyminen tapahtuu todennuksen ja assosioinnin purku-ilmoituksilla [7]. Kuvassa 4.4 on esitetty palveluiden ja tilakoneen väliset riippuvuudet.



Kuva 4.4 Palveluiden ja tilakoneen väliset riippuvuudet

Laitteen on mahdollista lähettää ja vastaanottaa tilan sallimia kehyksiä. Kehyksien eri luokilla rajoitetaan todentamattomien ja assosioimattomien laitteiden kykyä liikennöidä verkossa. Kehykset on jaettu kolmeen eri luokkaan 1, 2 & 3, jotka jakautuvat tyyppin mukaan ohjaukseen, hallintaan ja dataan. Hallintapaketteja käytetään yhteyden muodostamiseen päätelaitteiden ja access pointtien välille ja ohjauspaketteja liikenteen siirtoon liittyvään kommunikointiin [7]. Taulukossa 4.1 on esitetty IEEE 802.11 –standardin mukaiset kehykset.

Luokka	Tyyppi	Alityyppi
1	Ohjaus	Lähetyspyyntö (RTS)
1	Ohjaus	Vapaa lähettämään (CTS)
1	Ohjaus	Kuittaus (ACK)
1	Ohjaus	Kilpailuvapaa loppuu
1	Ohjaus	Kilpailuvapaa loppuu + ACK
1	Hallinta	Probe pyyntö/vastaus
1	Hallinta	Majakka (beacon)
1	Hallinta	Todennus
1	Hallinta	Todennuksen purku
1	Hallinta	Ilmoitus liikenteen ilmaisu viesti (ATIM)
1	Data	Data (päätelaitteiden välillä)
2	Hallinta	Assosiointipyyntö/vastaus
2	Hallinta	Uudelleenassosiointipyyntö/vastaus
2	Hallinta	Assosioinnin purku
3	Ohjaus	Tehonsäästökysele
3	Hallinta	Todennuksen purku
3	Data	Data (Jakelujärjestelmien välillä)

Taulukko 4.1 IEEE 802.11-standardin mukaiset kehykset

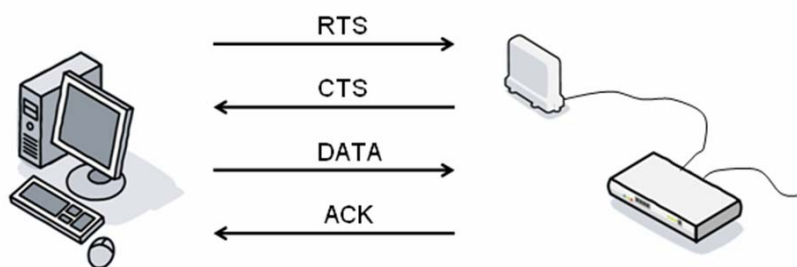
4.1.3 Medium Access Control

MAC-kerroksen tärkein tehtävä on taata luotettava MSDU-pakettien välitys langattoman yhteyden ylitse. MAC-kerros huolehtii myös verkkoon pääsystä ja verkossa liikkuvan tiedon luottamuksellisuudesta.

IEEE 802.11-standardissa määritellään langattomien medioiden käyttämiseen CSMA/CA-protokolla (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Sillä pyritään välttämään lähetysten törmäykset. CSMA/CA-protokollan mukaisesti laite kuuntelee kanavaa ennen lähetystä havaitakseen jo käynnissä olevat lähetykset. Kanavan ollessa varattu laite odottaa satunnaisen ajan ennen kuin yrittää uudelleen. Satunnaisen ajan tarkoituksena on välttää törmäyksiä tapauksissa joissa useampi laite odottaa kanavan vapautumista [1].

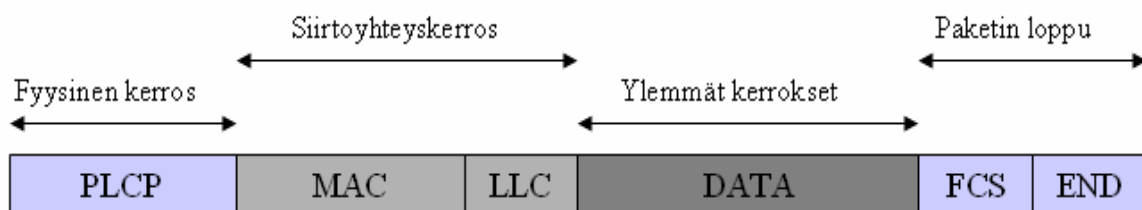
Langattoman median käytössä hyödynnetään hajautettua koordinoitufunktiota (DCF, Distributed Coordination Function). Sen toiminta perustuu välittömään kuittaukseen. Viestin

vastaanottanut laite lähettää välittömästi kiittauksen (ACK, acknowledgement) viestin lähittäneelle laitteelle, jotta tämä tietää viestin saapuneen onnistuneesti perille. Jos kiittauksia ei tule, laite lähettää viestin uudelleen. Langattomassa verkossa kaikki laitteet eivät välttämättä kuule toisiaan. BSS-verkossa riittää että laite kommunikoi Access pointin kanssa. Tämän takia on mahdollista että piilossa oleva laite lähettää vaikka toinen laite tulkitsee median vapaaksi. Tällaisen tilanteen välttämiseksi standardi määrittää hajautettuun koordinaatiofunktioon kiittausten lisäksi lähetysoyhtymisiin perustuvan menetelmän. Päätelaitteen pyrkimässä lähettämään se lähettää Access pointille lähetysoyhtymän (RTS, Request To Send), johon Access point vastaa median ollessa vapaa, vapaa lähettämään viestillä (CTS, Clear To Send). Näin kaikki verkon laitteet saavat tiedon tulevasta lähetyksestä ja median varauksesta. CTS –viestissä kerrotaan kuka lähettää ja kauan lähetyksen kestä [1]. Kuvassa 4.5 on esitetty laitteiden kättelyprosessi.



Kuva 4.5 Laitteiden kättelyprosessi

IEEE 802.11b –standardin mukaiset kehykset ovat monimutkaisempia kuin lankaverkoissa. Jaettu dynaaminen media aiheuttaa omia vaatimuksia ja luotettavan yhteyden luominen luo lisäedellytyksiä protokollalle [1]. Datapaketin alussa on fyysisen kerroksen konvergenssimenetelmä (PLCP, Physical Layer Convergence Protocol), joka sisältää radiokanavan valmistelua varten alustusosan (preamble) ja fyysisen kehyksen. Siirtoyhteyserroksessa on MAC-otsikko ja valinnainen looginen linkkihallintaosa (LLC, Logical Link Control) [7]. Kuvassa 4.6 on esitetty IEEE 802.11b-standardin mukainen paketin rakenne.



Kuva 4.6 IEEE 802.11b -paketin rakenne

MAC-otsikossa on kehyksenhallintaosa, joka määrittelee minkälainen kehys on kyseessä, ja kehyksen keston pituuden. Lisäksi otsikossa on neljä osoitetta ja järjestysnumero pakettien hallintaa varten. Dataosuuden jälkeen on paketin lopusta ilmoittava osuus, jossa on kehyksen tarkistusnumero (FCS, Frame Check Sequence) ja lopetusmerkit [7]. Kuvassa 4.7 on esitetty MAC-otsikko.

Kehyksen hallinta 2 tavua	Keston ID 2 tavua	Osoite 1 6 tavua	Osoite 2 6 tavua	Osoite 3 6 tavua	Järjestysnumero 2 tavua	Osoite 4 6 tavua
------------------------------	----------------------	---------------------	---------------------	---------------------	----------------------------	---------------------

Kuva 4.7 IEEE 802.11b-standardin mukainen MAC-otsikko

4.1.4 Fyysinen kerros

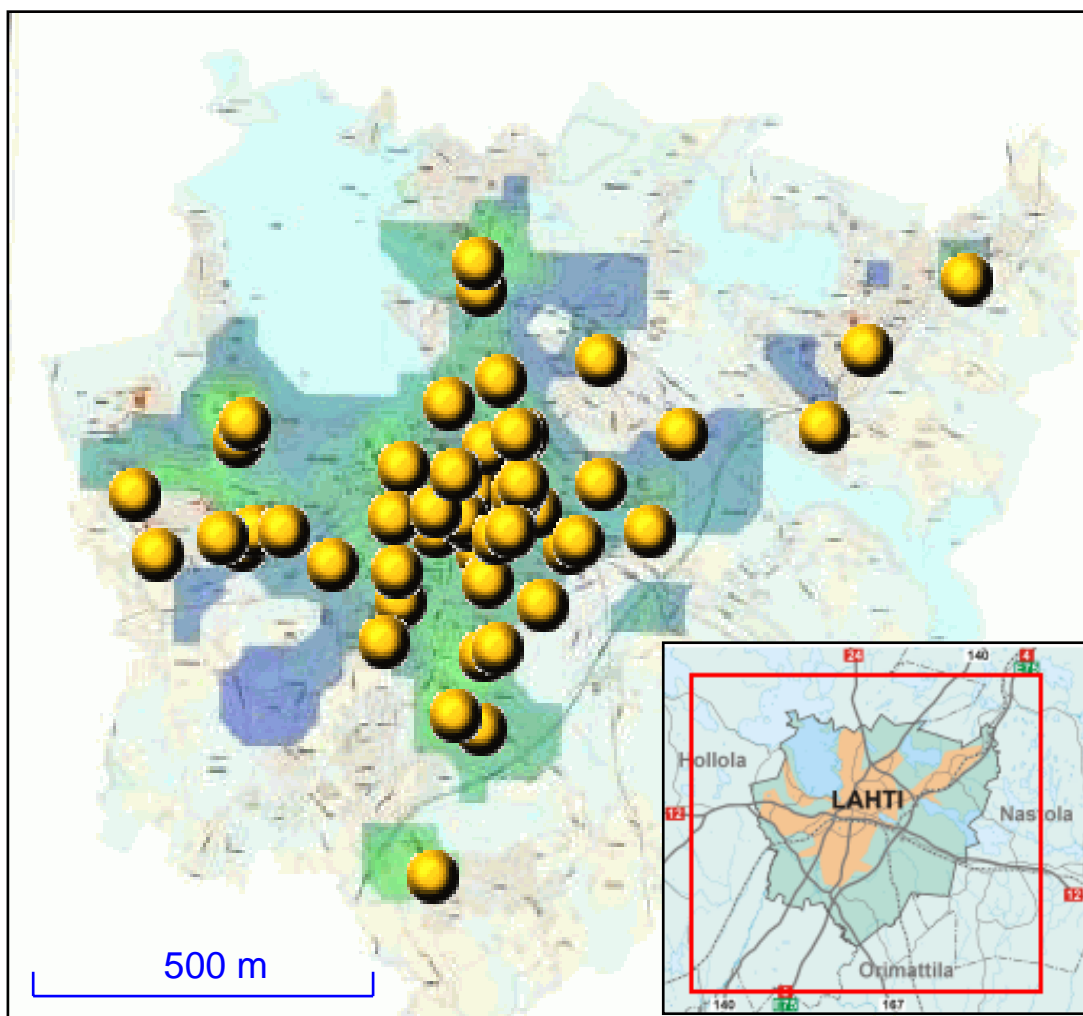
Fyysisen kerroksen tehtävä on tarjota MAC-kerrokselle palveluita, jotta yhteistoiminta jaetun langattoman median kanssa onnistuu. Fyysinen kerros huolehtii langattoman median varausten havaitsemisesta ja liikenteen lähettämisestä sekä vastaanottamisesta. Standardissa määritellään kolme vaihtoehtoa fyysiselle kerrokselle, jotka ovat taajuushyppelvä hajaspektri (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum), suorasekvenssi hajaspektri (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum) ja infrapuna (IR, InfraRed). Taajuushyppelvä hajaspektri ja suorasekvenssi hajaspektri toimivat 2,4 GHz lisensioimattomalla taajuusalueella. Kaikki vaihtoehdot tarjoavat 1 ja 2Mbps nopeuksia. Standardia on kuitenkin laajennettu määrittelemällä lisää fyysisen kerroksen vaihtoehtoja, jotka tarjoavat suurempia nopeuksia. IEEE 802.11a toimii 5 GHz taajuudella ja tarjoaa monikanta-aaltomodulointia (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplex) käyttäen nopeuksia aina 54 Mbps asti [1].

4.2 Esimerkki WLAN-tekniikalla toteutetusta verkosta

Mastonet on hanke, jossa Lahden kaupunkiin pyritään luomaan suhteellisen kattava langaton Internet-verkko. Verkko on tarkoitettu ensisijaisesti käytettäväksi mobiili-päätelaitteilla, silloin kun lankayhteyttä ei ole saatavilla. Verkko on toteutettu käyttäen WLAN-tekniikkaa. Verkko alkoi Salpausselän urheilukeskukseen urheilukilpailuvieraita varten rakennetulla verkolla ja jatkui kaupungin kouluille rakennetuilla verkoilla. Lopulta siihen yhdistettiin myös kaupunkinkonserniin kuuluvan Lahti Energian tytäryhtiö Suomen 4G:n kaupallinen verkko.

Syksyllä 2005 verkko laajeni vapaasti käytettävänä myös Lahden kaupunginkirjasto-
maakuntakirjastoon sekä kulttuurikeskuksena toimivaan Sibeliustaloon [16].

Verkko on toteutettu käyttäen sekä IEEE 802.11b- että IEEE 802.11g-standardin mukaisia tukiasemia. Verkossa on yhteensä noin 20 tukiasemaa, joista valta osa on tyyppiä Orinoco AP 1000 eli Lucent Wave Point II. Tukiasemat ovat sijoitettu pääosin rakennuksiin. Näillä kahdella kymmenellä tukiasemalla saadaan toteutettua suhteellisen kattava langaton verkko keskikokoiseen kaupunkiin [16]. Kuvassa 4.8 on esitetty tukiasemien sijoittelu Lahden kaupungin alueella. Kuvassa keltainen pallo osoittaa tukiaseman paikkaa ja sinisellä ja vihreällä värillä esitetään verkon peittoalueet. WLAN-tukiasemien tiheys alueella selittyy pitkälti vaativilla kaupunkiolosuhteilla, jossa rakennukset aiheuttavat esteitä ja häiriöitä sähkömagneettiselle säteilylle. Toinen merkittävä tekijä lienee käyttäjien suuri määrä alueella.



Kuva 4.8 WLAN-tukiasemien sijoittelu ja verkon peittoalueet Lahden kaupungin alueella

4.3 Johtopäätökset

WLAN-tekniikka on yleistynyt paljon viime aikoina. Nykyään esimerkiksi pääkaupunkiseudun alueella on tuhansia langattomia verkkoja joista osa on yritysten ja osa yksityisten omistamia. Suosituin WLAN-tekniikka on IEEE 802.11-standardiin perustuva tekniikka. Standardisoinnista ja kaupallisuudesta johtuen verkkoja toteutetaan eri tavoin. Yksittäisiä verkkoja voidaan modifioida, lisätä tai poistaa ilman, että se vaikuttaa kokonaisuuteen. Vanhaa ja uutta tekniikkaa voidaan sekoittaa keskenään melko esteettä.

IEEE 802.11-standardi tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet toteuttaa verkkotopologia. Esimerkiksi Ad-Hoc-tyyppisen verkon toteutus mahdollisuus on erityisen hyvä piirre, tekniikkaa käytettäessä sotilaallisissa sovelluksissa. Standardissa käytetään 2.4 - 5 GHz taajuusalueita, joista 2.4 GHz on toistaiseksi käytössä oleva vaihtoehto Suomessa, koska 5 GHz taajuusalueen käyttö on luvanvaraista. Nämä taajuusalueet eivät välttämättä vaadi suoraa näköyhteyttä yhteysvälillä, ja liikennöinti onnistuu ainakin kevyiden seinärakenteiden läpi. Siirtonopeus IEEE 802.11-standardin mukaisesti toteutetuissa laitteissa on 1 - 54 Mbit/s. Siirtonopeuden suhde etäisyyteen on kuitenkin samaa luokkaa kuin muissakin radioverkoissa. Tämä tarkoittaa sitä, että siirtonopeus laskee yhteysvälin kasvaessa. Yleisesti puhutaan 11 Mbit/s siirtonopeudesta joidenkin satojen metrien etäisyydellä. Siirtonopeuteen vaikuttava merkittävä tekijä on siirtotien ja -kapasiteetin jakaminen käyttäjien kesken. Verkko voidaan toteuttaa ympärisäteilevillä- tai suunta-antenneilla. Yleensä kuitenkin pienien peittoalueiden verkot toteutetaan ympärisäteilevällä antennilla.

WLAN-tekniikkaa etuja käytettäessä ALVI-ympäristössä ovat mm. verkon nopea rakentaminen, suuret siirtonopeudet, verkkotopologia vaihtoehdot, eri laitteiden yhteensopivuus sekä verkon muokkaus mahdollisuudet. WLAN-tekniikan huomattava etu on myös sen yleisyys, etenkin taajama-alueilla. Koska WLAN-verkkoja on paljon käytössä, niin yksittäisen verkon löytäminen kaiken muun liikenteen seasta on hankalaa. WLAN-tekniikat heikkouksia ovat mm. herkkyys sähkömagneettisille häiriöille, lyhyehköt yhteysetäisyydet, jaettu siirtotie käyttäjien kesken ja alhainen suojaustaso. Parhaiten WLAN-tekniikka soveltunee lyhyehköille yhteysetäisyyksille, jossa on tärkeää suuri siirtonopeus, eikä liikenteen salaaminen ole kovinkaan tärkeää. Verkkoa tulisi myös varmentaa useammalla tukiasemalla, että verkkoon saataisiin tappionsietokykyä. Tämä kuitenkin toteutunee luonnostaan, jos tekniikalla on tarkoitus toteuttaa satoja metrejä halkaisijaltaan oleva verkko.

5 WiMAX-TEKNIikka

WiMAX-tekniikka (Worldwide Interoperability for Microwave Access) on langaton laajakaistatekniikka, joka on tarkoitettu ensisijaisesti operaattorikäyttöön. Sillä on mahdollista tarjota suhteellisen nopea langaton yhteys suhteellisen pitkällä kantamalla. Sen tavoitteena on tällä hetkellä kaupallisella puolella tarjota laajakaistainen langaton yhteys paikkoihin, joihin kuparilangan tai valokaapelin rakentaminen on hankalaa tai epätaloudellista. Suurin kohderyhmä näyttäisi olevan haja-asutusalueet, joihin ei ole mahdollista saada ADSL-tekniikkaa (Asymmetric Digital Subscriber Line). Mahdollisia käyttökohteita ovat myös tilapäiset ja liikkuvat yhteydet, joita ovat esimerkiksi uudisrakennustyömaat ja veneilijät. WiMAX-tekniikka soveltuu hyvin operaattorikäyttöön, koska suuri osa taajuuksista on luvanvaraisia. WiMAX-tekniikan pohjana olevat IEEE 802.16-sarjan standardit sallivat käytettäväksi lukuisia taajuusalueita, joista suurin osa on eri puolilla maailmaa operaattorikäyttöön varattuja [6].

WLAN-tekniikassa työasemat ovat tasavertaisia ja kilpailevat samasta jaetusta radiotiestä. WiMAX-tekniikalla sen sijaan voidaan kanavajakoa säätämällä toisaalta rajoittaa, toisaalta taata tietty kaista yksittäiselle käyttäjälle. Myös lähetysviivettä on mahdollista kontrolloida. Parhaimmillaan WiMAX-tekniikka kykenee samaan kuin kuparikaapeliyhteys ISDN-tekniikalla, jolla saadaan kahden megabitin siirtonopeudella kulkemaan 30 rinnakkaista puhelua. WiMAX-tekniikassa yhteyden nopeuden ja etäisyyden suhde on pääpiirteissään samanlainen kuin muissakin langattomissa yhteystavoissa, eli etäisyyden kasvaessa yhteys hidastuu. Eri laitevalmistajat esittävät erilaisia lukuja tässä yhteydessä toisten korostaessa maksimietäisyyttä, taas toisten korostaessa maksiminopeutta. Toista ominaisuutta voidaan kuitenkin kasvattaa pudottamalla toista. Nopeuteen vaikuttaa myös käytössä olevan kokonaiskapasiteetin jako käyttäjien kesken [6]. Yksi tukiasema voi tarjota noin 75 Mbit/s nopeuden, joka jaetaan solun käyttäjien kesken. Nopeuden on arvioitu riittävän tarpeeksi nopeiden yhteyksien tarjoamiseksi useille kymmenille yrityksille ja sadoille kotitalouksille.

WiMAX-tekniikassa yhteen tukiasemaan voidaan liittää useita antennoja, kapeakeilaisia suunta-antenneja kuitenkin enemmän kuin leveäkeilaisia antennoja. Yhden antennin peittoalueelle voidaan laskea mahtuvan noin 40 normaalikäyttäjää. WiMAX-tekniikka sopii myös runkoyhteyksien toteuttamiseen. Verkon etäisimmät tukiasemat voivat olla yhteydessä runkoverkkoon ilmateitse kapeakeilaisilla suunta-antenneilla. Tilaajalaitteet kehittyvät nopeasti tekniikan myötä. Ensimmäiset ratkaisut vaativat kuitenkin lähestulkoon suoran näköyhteyden, välissä saa korkeintaan olla puiden latvoja, muttei kuitenkaan sankkaa metsää.

Toisessa vaiheessa tähdätään verkkopäätteiden integroitujen sisäantennien käyttöön, jossa signaali kulkee ainakin kevyiden ulkoseinien läpi. Kolmannessa vaiheessa WiMAX-tekniikka olisi integroituna kannettavan työaseman emolevyille, jolloin langaton yhteys olisi käytettävissä missä ja milloin vain. Ainakin Intel, joka on WiMAX-tekniikan aktiivisimpia puolestapuhujia, on visioinut tällaista. Intelin laitevalmistajien käyttöön julkaisema Rosedale-siru on kuitenkin tarkoitettu kiinteisiin yhteyksiin, mutta liikkuvuuden takaava standardin versio valmistunee lähiaikoina. Tällä hetkellä liikkuvuus on sitä, että siirtymisen jälkeen yhteys on muodostettava uudelleen [6].

5.1 WiMAX-Standardi

Oikeus WiMAX-nimen käyttöön syntyy vasta kun laite on saanut WiMAX-foorumin hyväksymän sertifiointin. WiMAX-foorumi on laitevalmistajien perustama yhteenliittymä, jonka tehtävänä on varmistaa IEEE 802.16-laitteiden standardinmukaisuus ja ristiin-toimivuus. IEEE 802.16-standardin kehitystyö alkoi vuonna 1998 ja alkuperäinen IEEE 802.16-standardi julkaistiin huhtikuussa 2002. Nykyään standardista on ehditty kehittää jo useita versioita [11].

IEEE 802.16 kattoi fyysisen kerroksen määritykset lukuisille erillisille taajuusalueille väliltä 10-66 gigahertsiä. Nämä taajuudet sopivat parhaiten suoralla näköyhteydellä toimivien kiinteiden linkkien käyttöön. IEEE 802.16a toi mukanaan lisää modulaatiotekniikoita ja laajensi taajuusalueita 2-11 gigahertsin väliselle taajuusalueelle. Uusin hyväksytty versio on IEEE 802.16-2004 ja se yhdisti standardiin tehdyt tarkennukset ja laajennukset IEEE 802.16d:hen asti. Tämä versio toimii tulevan wimax-sertifiointin pohjana. IEEE 802.16e on laajennus IEEE 802.11-standardiin. Se koskee vain kahden ja kuuden gigahertsin välisiä taajuusalueita ja tuo mukanaan tuen liikkuville päätelaitteille [11]. Tällä hetkellä suurin kiinnostus kohdistuu kolmeen taajuusalueeseen. Näistä 5,8 GHz ja 2,5 GHz taajuuksia käytetään Yhdysvalloissa ja 3,5 GHz taajuutta esimerkiksi Euroopassa. Viimeksi mainittua taajuutta tullaan käyttämään myös Suomessa toteutettaviin WiMAX-ratkaisuihin.

5.2 WiMAX-tekniikassa hyödynnetyt tekniikat

WiMAX-tekniikka yhdistää monia viime aikoina käyttöön tulleita edistyksellisiä tekniikoita. Perusratkaisuna on 256-kanavainen ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ja sen monikäyttäjäversio (OFDMA, OFD Multiple Access). Käytettävissä on 256 apukantaaaltoa, joista 192 siirtää rinnakkain tietoa.

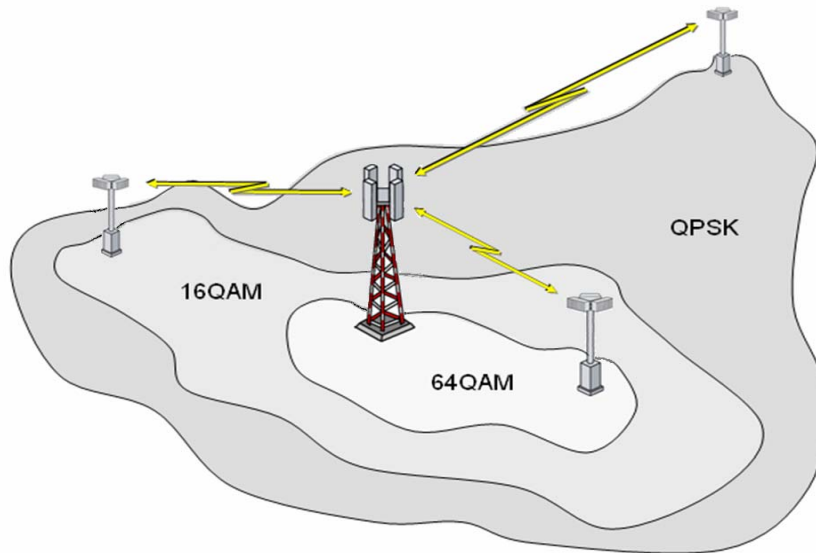
Näitä apukantoaaltoja yhdistelemällä voidaan muodostaa alikanavia, joiden kaistanleveys voi vaihdella 1,25 ja 20 megahertsin välillä. Tällä voidaan taata eri käyttäjille erilaiset maksimisiirtonopeudet [8].

Toinen käytettävistä tekniikoista on mukautuva modulaatio. Kantoaallon mahdollisia modulointitapoja ovat binäärivaihevainnus ja vaihe-eroavainnus (BPSK ja QPSK, Binary ja Quadrature Phase Shift Keying) sekä enemmän bittejä symboliin mahduttavat, mutta häiriölle herkemät 16QAM ja 64QAM vaihe-eroamplitudimodulaatiot (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) [8]. Taulukossa 5.1 on esitetty WiMAX-tekniikan mukautuvan fyysisenkerroksen maksiminopeudet eri modulointi ja koodaustavoilla.

Modulointi	QPSK	QPSK	16QAM	16QAM	64QAM	64QAM
Koodaus	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
1,75 MHz	1,04	2,18	2,91	4,36	5,94	6,55
3,5 MHz	2,08	4,37	5,82	8,73	11,88	13,09
7,0 MHz	4,15	8,73	11,64	17,45	23,75	26,18
10,0 MHz	8,31	12,47	16,63	24,94	33,25	37,40
20,0 MHz	16,62	24,94	33,25	49,87	66,49	74,81

Taulukko 5.1 WiMAX-tekniikan mukautuva fyysinen kerros, maksiminopeudet (megabitteinä sekunnissa) eri modulointi ja koodaustavoilla

Koska radioyhteyden laatu vaihtelee heijastuksista ja esteistä riippuen kullakin kantoaallolla, WiMAX-tekniikka voi valita eri kantoalloille parhaan käytettävän modulointitekniikan. Lähinnä tukiasemaa olevat käyttäjät voivat käyttää liikennöintiin 64QAM:ia, hiukan kauempana olevat 16QAM:ia, ja etäisimmät QPSK:ta tai BPSK:ta. Tämä ei kuitenkaan näy käyttäjälle, vaan WiMAX-tekniikka osaa valita automaattisesti käytettävän modulointitekniikan vallitsevien olosuhteiden mukaan. Muita hienouksia ovat adaptiiviset antennijärjestelmät ja moniantennijärjestelmät, joiden avulla voidaan suunnata lähetykeiloja tiettyjen tilaajien suuntaan ja kompensoida radioaaltojen heijastuksia suoran näköyhteyden puuttuessa. Kyseessä ovat kuitenkin standardin valinnaiset ominaisuudet [9]. Kuvassa 5.1 on esitetty WiMAX modulointitavan valinta.



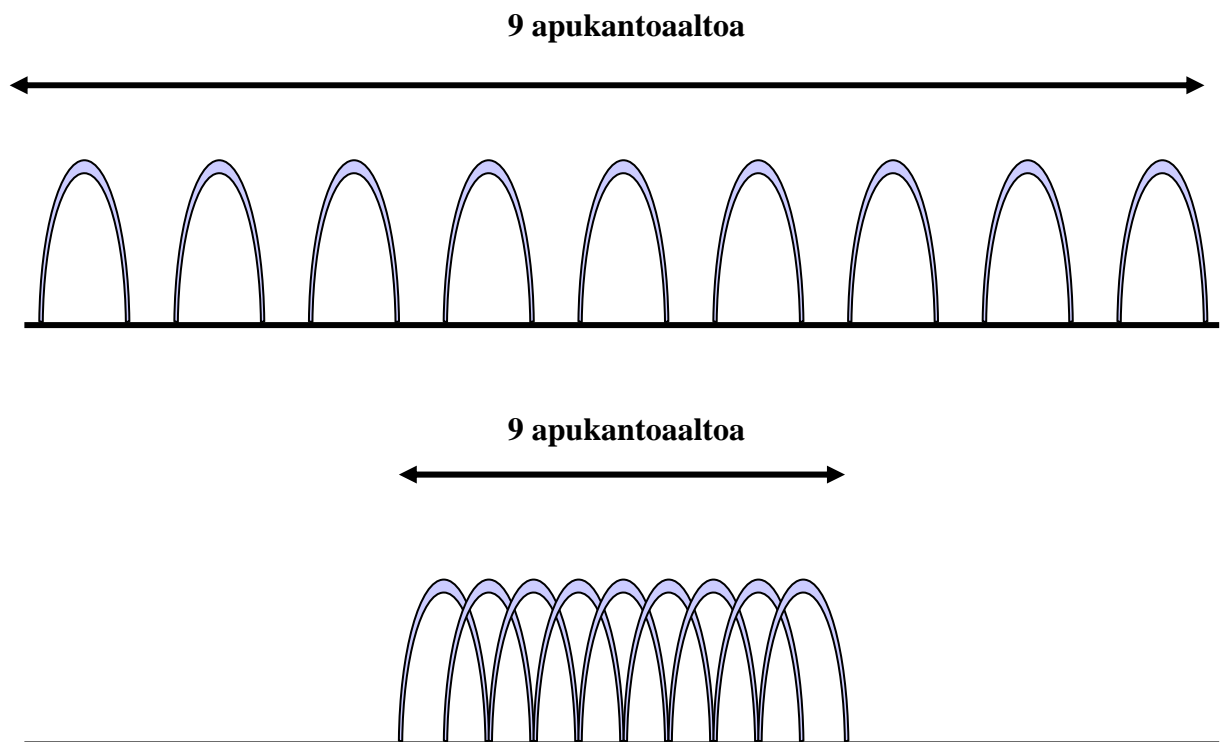
Kuva 5.1 Wimax-tekniikka valitsee automaattisesti käytettävän modulointitekniikan olosuhteiden mukaan

5.2.1 Ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä

Ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä (OFDM) on lähetystekniikka joka on hiljattain havaittu erinomaiseksi tavaksi kaksisuuntaiseen langattomaan tiedonsiirtoon suurilla nopeuksilla. Tekniikan historia ulottuu 1960 luvulle asti, mutta siitä on tullut suosittua vasta viime aikoina, koska piirit jotka kykenevät suorittamaan tarvittavat digitaaliset operaatiot riittävän nopeasti, ovat tulleet saataville. Ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä pakkaa tehokkaasti useat moduloidut kantoaallot tiiviisti yhteen kaventaen vaadittua kaistanleveyttä, pitäen kuitenkin moduloidut signaalit eri vaiheissa estäen näin niiden sekaantumisen toisiinsa. Nykyään Ortogonaalista taajuusjakojärjestelmää käytetään mm. ADSL–tekniikassa samoin kuin langattomissa tekniikoissa kuten IEEE 802.11 a/g ja IEEE 802.16. Sitä käytetään myös langattoman äänen ja kuvan lähettämisessä [10].

Ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä perustuu taajuusjakojärjestelmään (FDM, Frequency Division Multiplexing), joka käyttää useita taajuuksia lähettääkseen yhtä aikaa useita signaaleja rinnakkain. Jokaisella signaalilla on oma taajuusalueensa (apukantoaalto) joka moduloidaan datalla. Jokaisella apukantoaallolla on oma suoja-alue varmistamaan etteivät apukantoaallot mene päällekkäin. Nämä apukantoaallot demoduloidaan sittemmin vastaanottimessa käyttäen suodattimia erottelemaan alueet toisistaan. Ortogonaalinen taajuusjakojärjestelmä on samankaltainen kuin FDM, mutta se on kuitenkin paljon tehokkaampi taajuusspektrin käytössä. Tämä johtuu ortogonaalisen taajuusjakojärjestelmän tavasta sijoittaa apukantoaallot paljon lähemmäs toisiaan. Käytännössä se sijoittaa ne niin lähelle, että ne itse asiassa menevät päällekkäin. Tämä on mahdollista käyttämällä

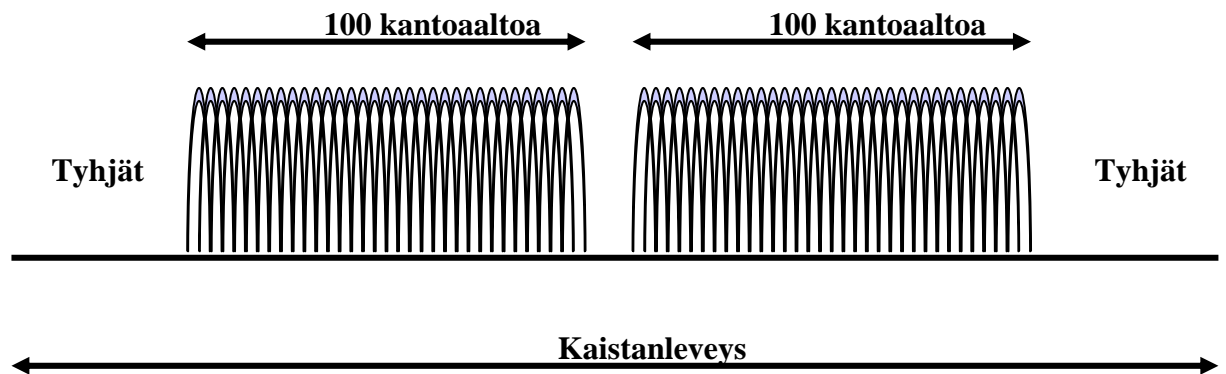
ortogonaalisia taajuuksia, joka tarkoittaa että ne ovat matemaattisesti vastakkaisia. Tämä mahdollistaa jokaisen apukantoaallon menemisen päällekkäin toisen kanssa ilman, että ne kuitenkin sekaantuvat toistensa kanssa. Tämän tavan käytön vaikutus näkyy kaistanleveyden tarpeen kaventumisessa, koska apukantoaaltojen suoja-alueet poistetaan ja annetaan apukantoaaltojen mennä päällekkäin. Jotta signaalin demodulointi olisi mahdollista tarvitaan diskreetti Fourier-muunnos (DFT, Discrete Fourier Transform). Nopea Fourier-muunnos (FFT, Fast Fourier Transform) -sirut ovat kaupallisesti saatavilla, mikä tekee tästä suhteellisen helpon toimenpiteen [10]. Kuvassa 5.2 on esitetty 9 apukantoaaltoa tavallisella ja ortogonaalisella taajuusjakojärjestelmällä.



Kuva 5.2 Ylhäällä taajuusjakojärjestelmä-tekniikalla 9 apukantoaaltoa suodatuksella sekä alempana ortogonaalisella taajuusjakojärjestelmä-tekniikalla 9 apukantoaaltoa

Yksinkertaisimmillaan jokainen datankantoaalto voi ilmaista kahta tilaa jotka ovat päällä tai pois. Yleensä kuitenkin joko vaiheavainnus (PSK, Phase Shift Keying) tai vaihe-ero amplitudimodulaatio (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) –tekniikoita käytetään kasvattamaan datan siirtokapasiteettia. Kuten myös tässä tapauksessa, datavirta jaetaan n (192) kappaleeksi rinnakkaisiksi datavirroiksi, joista jokainen toimii $1/n$ ($1/192$) nopeudella alkuperäisestä nopeudesta. Jokainen datavirta kartoitetaan yksilölliselle datakantoaallolle ja moduloidaan käyttäen joko vaiheavainnus tai vaihe-eroamplitudimodulaatiotekniikkaa. Ohjaukantoaalto tarjoaa suosituksen taajuusalueen minimoimiseksi ja vaiheen vaihdoista lähetyksen ajaksi samalla kun tyhjät kantoaallot sallivat suojataajuuksien ja pääkantoaallon

(DC carrier, center frequency) toiminnan [10]. Kuvassa 5.3 on 256 OFDM kantoaaltoa, joista 192 on datalle, 8 on ohjaukselle ja 56 on tyhjää.



Kuva 5.3 OFDM 256 kantoaallolla

Ortogonaalisen taajuusjakojärjestelmän moniliittymä (OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access) sallii joitakin kantoaaltoja määrättäväksi muiden käyttäjien käyttöön. Esimerkiksi kantoaallot 1, 3 ja 7 voidaan määrätä käyttäjälle A ja kantoaallot 2, 5 ja 9 käyttäjälle B. Nämä kantoaaltojen ryhmät tunnetaan alikanavina. Skaalattava OFDMA käyttää pienempiä FFT-kokoja nostamaan suorituskykyä (tehokkaasti) matalamman taajuuskaistan kanavilla. Tämä pätee IEEE 802.16-2004-standardissa joka voi nyt tuottaa FFT-kokoja 2048:sta 128:aan käsitellen kanavan kaistanleveyksiä 1.25-20 MHz:iin. Tämä mahdollistaa kantoaallon kannanleveyden pysyä vakiona riippumatta kaistanleveydestä. Tämä vähentää monimutkaisuutta mahdollistaen samalla suuremman FFT:n kasvattamaan suorituskykyä leveillä kanavilla [10].

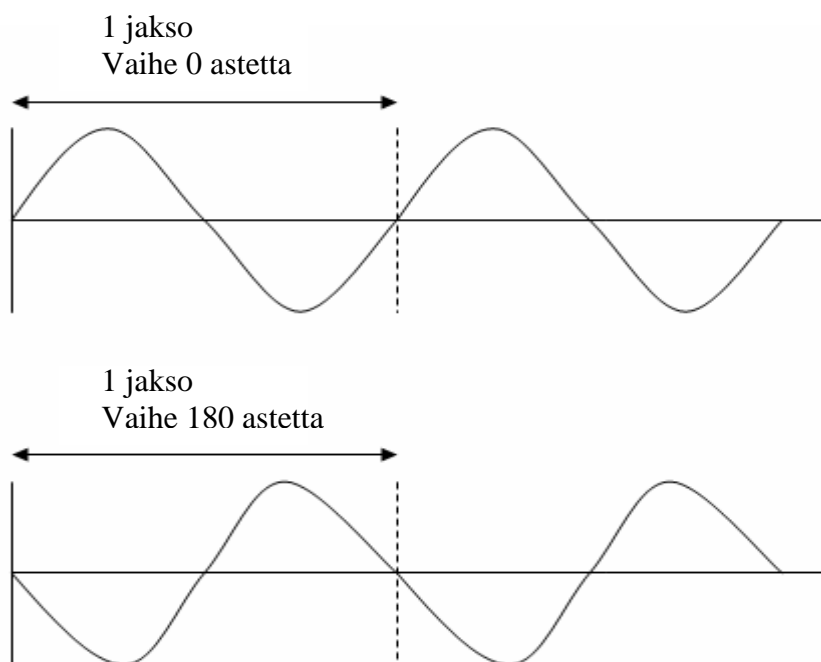
Yksi OFDM-modulaation hyödyistä on sen sietokyky monitie-etenemiselle, joka johtuu heijastuneista signaaleista. Monitie-etenemisen aiheuttamasta häiriöstä ja taajuusvalinnaisesta häipymisestä OFDM selviää käyttämällä hyväkseen taajuuskaistansa luonnetta. Tämä tekee OFDM:sta ihanteellisen ratkaisun langattoman ympäristön vaativiin olosuhteisiin [10].

5.2.2 Adaptiivinen modulaatio

Useissa tietoliikennejärjestelmissä käytetään nykyään digitaalista modulaatiota, kuten esimerkiksi vaihe-eroavainnusta (QPSK, Quadrature phase shift keying) ja vaihe-ero amplitudimodulaatiota (QAM, quadrature amplitude modulation). Modulaatioita käytetään digitaalisessa tiedonsiirrossa kapasiteetin ja nopeuden kasvattamiseen. Nämä modulaatiotekniikat ovat monen järjestelmän tietoliikenteen perustana, kuten esimerkiksi kaapelimodeemin, DSL-modeemin ja WiMAX-tekniikan [9].

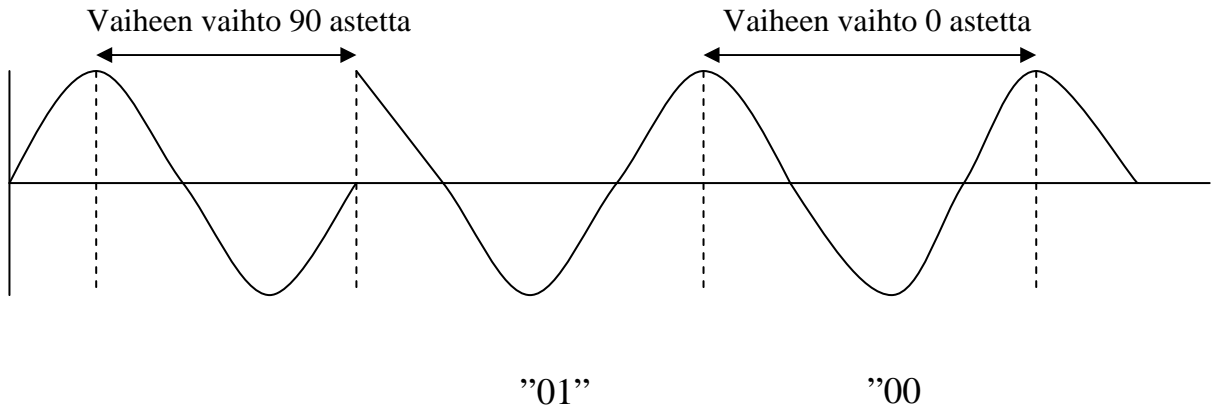
Kantoaalto on sähkömagneettinen aalto, joka on siniaaltomuodossa. Modulaatio on prosessi, jossa kantaallolla ilmaistaan viesti tai digitaalinen signaali. On olemassa kolme perustapaa moduloida; amplitudi, taajuus ja vaihevainnus. Amplitudimodulaatiossa signaalin voimaa joko nostetaan tai lasketaan riippuen siitä kumpaa arvoa (1 tai 0) halutaan ilmaista. Tätä tapaa käytetään mm. AM radiossa. Taajuusmodulaatiossa taajuutta muutetaan digitaalisen signaalin mukaan. Tätä tapaa käytetään mm. FM radiossa [9].

Vaihemodulaatio (PSK, phase shift keying) vaihtaa aallon vaihetta digitaalisen viestin mukaan. Binäärivaihemodulaatiossa (BPSK, Binary Phase Shift Keying) jokainen merkki voi ilmaista kahta tilaa 1 tai 0. Vaiheittain nämä ovat $0 = 0$ ja $180 = 1$. Aalto vaihdetaan puolella jaksolla tai 180 asteella. Vastaanotin voi siten tunnistaa tämän vaihdon ilmaisten joko digitaalisen arvon 0 tai 1 [9]. Kuvassa 5.4 on esitetty vaihemodulaation vaiheet siniaaltoon nähden.



Kuva 5.4 Vaihemodulaation vaiheet siniaaltoon nähden

Vaihe-eromodulaatio (QPSK) lisää vaihemodulaatioon (PSK) kaksi vaihetta: 90 ja 270 astetta. Nyt kyetään lähettämään kaksi merkkiä bittiä kohden. Taulukossa 5.2 on esitetty bittien suhde vaiheeseen vaihe-eromodulaatiossa. Jokaisen symbolin vaihe on verrattain rinnastettavissa edelliseen merkkiin; jos muutosta ei ole ilmaistaan bitit 00, jos vaihetta muutetaan 180 astetta ilmaistaan bitit 11 [9]. Kuvassa 5.5 on esitetty vaihe-eromodulaation vaiheen vaihdos.

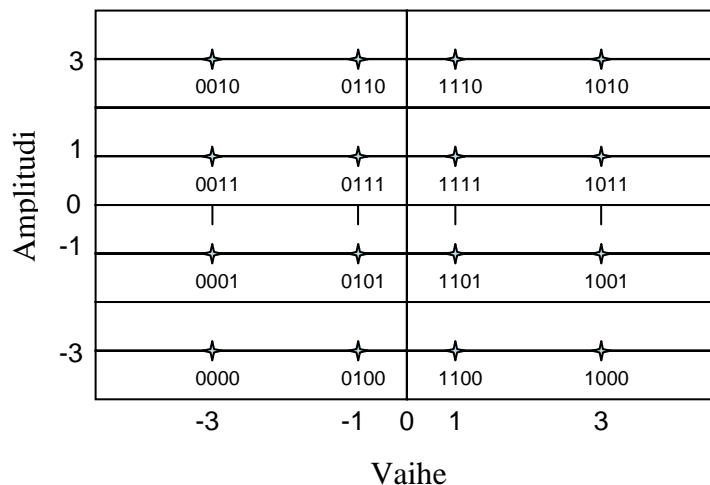


Kuva 5.5 Vaihe-eromodulaatiolla vaiheen vaihto

Merkki	Vaiheen ero
00	0 astetta
01	90 astetta
11	180 astetta
10	270 astetta

Taulukko 5.2 Vaihe-eromodulaation symbolit vaiheeseen nähden

Amplitudi- ja vaihemodulaatio voidaan yhdistää vaihe-eroamplitudimodulaatioksi, jossa sekä vaihetta että amplitudia muutetaan. Vastaanotin ottaa signaalin vastaan ja demoduloi sen takaisin datavirraksi. Kuvassa 5.6 on esitetty 16-QAM, jossa jokainen merkki voi nyt ilmaista neljä bittiä kahden sijaan kuten vaihe-eromodulaatiossa. Tähtien kohdalta voi lukea mitä arvoa bitteinä ilmaistaan eri amplitudin ja vaiheen variaatioilla. Esimerkiksi amplitudin ollessa 1 ja vaiheen ollessa 90 astetta (1), ilmaistaan bitteinä arvoa 1111.



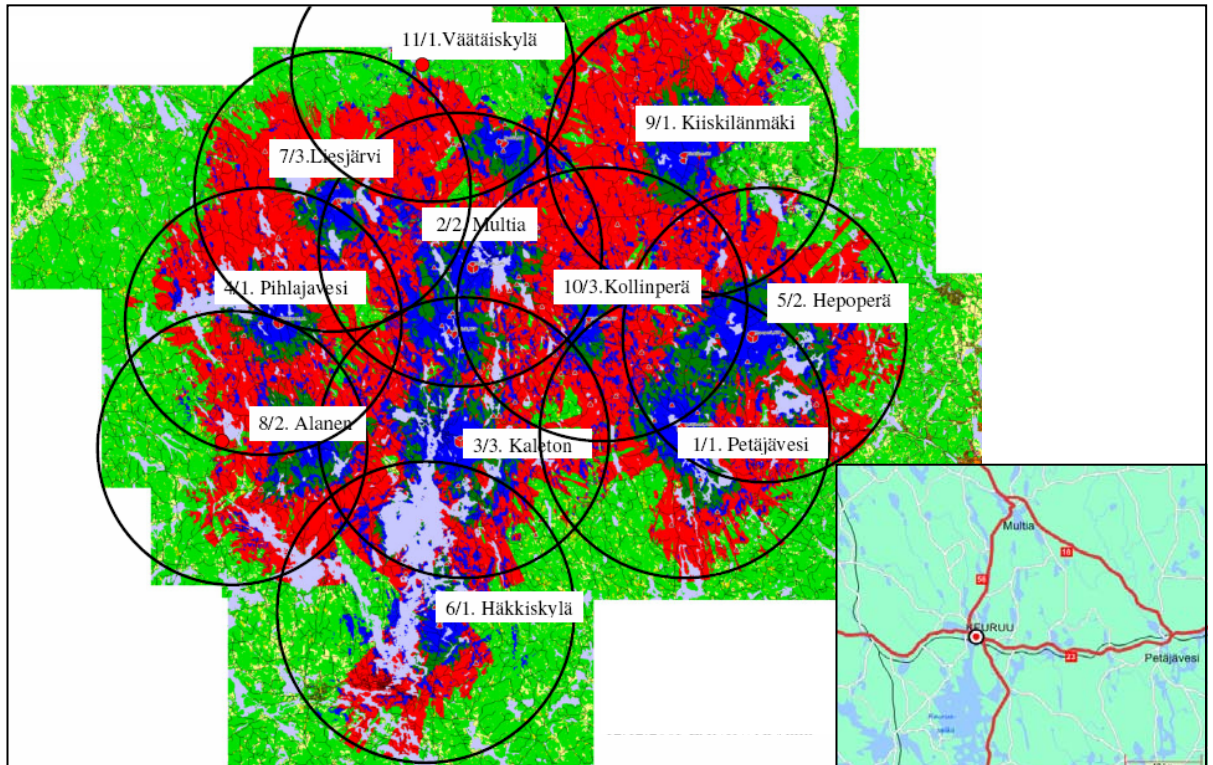
Kuva 5.6 Vaihe-eroamplitudimodulaation vaiheen ja amplitudin suhde bittejä ilmaistaessa

Käytettäessä eri modulointitapoja voidaan tiedonsiirtokapasiteettia nostaa. Käytettäessä esimerkiksi vaihe-eroamplitudimodulaatiota on kuitenkin huomioitava, että vaaditaan parempaa signaalikohinasuhdetta sekä pienempää bittivirhesuhdetta sen vuoksi, että tekniikka toimisi oikein.

5.3 Esimerkki WiMAX-tekniikalla toteutetusta verkosta

Verkko-operaattori LAN&WAN tuottaa langattomia laajakaistapalveluja yhteistyössä Keuruun kaupungin, Multian ja Petäjaveden kuntien kanssa. Tällä ns. Multipoint-alueella LAN&WAN-operaattori tarjoaa Internetpalveluita. Multipoint-verko on toteutettu käyttämällä WiMAX-tekniikkaa 3,5 GHz taajuusalueella. Multipoint-hankkeen tavoitteena on saattaa taajamien ulkopuoliset kylät tietoteknisesti tasa-arvoiseen asemaan taajamien kanssa. Multipoint-verkon avulla voidaan tuoda laajakaistayhteys sellaisille alueille, jonne langallisen laajakaistan rakentaminen ei ole kannattavaa.

Verkon avulla tullaan saavuttamaan 90 – 100 % alueen talouksista. Laajakaista-verkkoon tulee alussa liittymään 20 – 30 % haja-asutusalueen talouksista ja tavoitteena on saada 1000 liittujää verkkoon. Multipoint-verkko on toteutettu ympärisäteilevillä MacroMax-tukiasemilla. Verkossa oli vuoden 2005 loppuun mennessä 11 tukiasemaa joiden keskimääräinen peittoalue oli 13 km tukiasemaa kohden. Tukiaseman suorituskyvyksi on kuitenkin ilmoitettu yli 15 km. Koekäytön aikana etäisin liittujä oli noin 14 km päässä tukiasemasta. Ilman näköyhteyttä verkossa on kuitenkin saavutettu hyvä yhteys 17,2 km etäisyydeltä. Koekäytön aikana liittymien nopeudet vaihtelivat 200 kbit/s – 1,8 Mbit/s. Palveluntarjoaja lupaa kuitenkin yli 20 km yhteysvälejä, mutta tämä vaatii jo suoran näköyhteyden. Myös suurempia siirtonopeuksia luvataan aina 10 Mbit/s saakka. Kuvassa 5.7 on esitetty Multipoinverkon tukiasemien sijoittelu ja peittoalueet. Tukiaseman kohdalla olevan ympyrän halkaisija on noin 13 km [20].



Kuva 5.7 Multipoint-verkon tukiasemat ja peittoalueet

5.4 Johtopäätökset

WiMAX-tekniikka on varsin uusi langaton tekniikka, jonka standardisointi elää jatkuvasti. Siitä on tullut kuitenkin hyvin suosittu tapa toteuttaa langaton verkko. WiMAX-tekniikalla toteutettuja verkkoja on Suomessa jo toistakymmentä, mutta valta osa on vielä koekäyttöasteella. Uusia WiMAX-tekniikalla toteutettuja verkkoja kuitenkin kaavaillaan. Erityisesti haja-asutusalueille rakennettavat Internet-verkot, näyttäisivät olevan toteutettavissa hyvin WiMAX-tekniikalla. Koska WiMAX-tekniikka on suhteellisen uutta, niin käyttökokemuksia ei ole erityisen kattavasti vielä Suomessa. IEEE 802.16e-standardi on mahdollistanut 3,5 GHz taajuusalueen käytön ja ilman suoraa näköyhteyttä on saavutettavissa varsin pitkiä yhteysvälejä. Yli 20 km yhteysväleissä tulisi olla kuitenkin suora näköyhteys. Yhden tukiaseman peittoalue ympärisäteilevällä antennilla on varsin hyvä ja voitaneen puhua kymmenestä kilometristä ja kymmenestä megabitistä sekunnissa. WiMAX-tekniikan heikkouksia lienee toistaiseksi sen ominaisuudet toimia liikkeessä. IEEE 802.11e-standardissa on tuki liikkuville päätelaitteille, mutta asia ei liene vielä täysin ongelmaton. ALVI-ympäristössä WiMAX-tekniikan etuja ovat suuri tiedonsiirtokapasiteetti, pitkät yhteysvälytykset ja adaptiivinen modulointi. WiMAX-tekniikan mahdollinen heikkous liikkeen suhteen ei muodostu välttämättä kriittiseksi ALVI-ympäristön käyttökohteissa.

6 TULOKSET

Skenaarioiden teolla ja analysoinnilla on tarkoitus pohtia tekniikoiden soveltuvuutta eri tilanteisiin. Aluksi tarkastellaan toimintaympäristöön kohdistuvia uhkia. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan eri skenaarioita. Työn mukaisiin skenaarioihin ollaan päädytty pohtimalla mihin tarkoituksiin tekniikat voisivat soveltua toimintaympäristössä. Työssä on esitelty vain kaksi skenaariota joihin tekniikoita voisi käyttää, mutta toki muitakin käyttökohteita tekniikoille löytyy.

6.1 Toimintaympäristöön kohdistuvat uhat

Valtakuntaan kohdistuvat uhat ovat alueellinen kriisi, poliittinen ja sotilaallinen painostus, strateginen isku ja laajamittainen hyökkäys. Alueellinen kriisi on tilanne, jossa maan rajojen ulkopuolella syntyvä kriisi ulottaa tai uhkaa ulottaa vaikutuksensa Suomeen. Alueellisessa kriisissä ongelma syntyy, jos maamme vedetään mukaan kriisin osapuoleksi tai sen vaikutuksen kohteeksi. Poliittisen ja sotilaallisen painostuksen aikana voi tapahtua tuholaistoimintaa. Sen kohteita voi olla esimerkiksi televerkkojen mastot, antennit ja telelaitetilat, sähköjakeluverkon siirtojohdot ja muuntoasemat. Poliittisen ja sotilaallisen painostuksen aikana myös tietosodankäynnin toimet lisääntyvät, joissa kohteiksi voi joutua koko yhteiskunnan tietotekniset järjestelmät [29].

Strategisessa iskussa vihollinen kohdistaa voimakkaan asevaikutuksen mm. johtamispaikkoihin, energiahuoltoon, tiedonsiirtojärjestelmiin, liikekannallepanon kriittisiin kohteisiin sekä taistelujoukkoihin ja asejärjestelmiin. Iskuihin vastustaja käyttää ilmavoimia, ohjuksia ja tykistöä sekä johtamissodankäynnin menetelmiä. Myös erikoisjoukkojen iskut ovat mahdollisia. Laajamittaisessa hyökkäyksessä joukot on ehditty perustaa ja ryhmittää toiminta-alueelle. Hyökkäys alkaa todennäköisesti erikoisjoukkojen ja ilmavoimien iskuilla johtamisjärjestelmää vastaan. Tähän liittyy voimakas elektroninen vaikuttaminen. Taisteluja käydään yhtä aikaa rintamassa ja syvyydessä [29].

Ryhmittymisen aikana vastustaja pyrkii selvittämään joukkojen ryhmittymisalueet mm. elektronisella tiedustelulla. Taistelujen aikana vihollinen kohdistaa tiedustelun ja vaikutuksen erityisesti mm. johtamispaikkoja ja viestikeskuksia vastaan. Tähän vastustaja käyttää elektronisen sodankäynnin yksiköitään. Vastustaja pyrkii selvittämään viestiverkkojen rakenteen ja tuhoamaan niiden solmukohdat [29].

6.1.1 Elektronisen sodankäynnin uhka

Sähkömagneettisen spektrin hallinta on kriittinen taistelutekijä. Puolustautuminen vastustajan hyökkäyksiltä edellyttää omien tiedustelu-, valvonta-, johtamis- ja asejärjestelmien suojaamista. Aina kun toimitaan liikkeessä tai syvyydessä, joudutaan toiminta perustamaan tiedon siirtämiseen sähkömagneettisen spektrin kautta. Koska sekä puolustajan, että hyökkääjän toiminta perustuu hyvin pitkälti sähkömagneettisen spektrin hyväksikäyttöön, spektrin kokonaishallinnasta on tullut yksi taistelun kriittisistä tekijöistä [25].

Elektroninen sodankäynti (ELSO) jakautuu elektroniseen tukeen, elektroniseen vaikuttamiseen ja elektroniseen suojautumiseen. Elektroniseen sodankäyntiin liittyy myös elektronisen tiedustelun muodossa signaalitiedustelu, jota ei kuitenkaan yleensä lueta osaksi elektronista sodankäyntiä, vaan osaksi strategista tiedustelua. Elektronisen sodankäynnin menetelmiä käytetään lähes kaikissa taistelukentän järjestelmissä ainakin elektronisen suojautumisen muodossa, vaikka ne eivät elektronisen sodankäynnin järjestelmiä olisikaan [13].

Elektroninen tuki on elektronisen sodankäynnin keskeisin elementti. Elektroninen tuki jaetaan edelleen operatiiviseen elektroniseen tiedusteluun ja valvontaan, elektroniseen maalinosoitukseen ja elektroniseen uhkavaroitukseen. Elektronisen tuen sensoreilla havaitaan taistelukentällä aktiiviset lähettimet, kuten esimerkiksi radiolaitteet. Paikantamalla lähettimet voidaan muodostaa tilannekuvaa niin omista kuin vihollisen joukoista. Tilannekuvan perusteella voidaan arvioida vihollisen tulevaa toimintaa tai tietoja voidaan käyttää esimerkiksi tulenkäyttöön [13]. Elektronisen tuen kannalta työssä on tärkeintä keskittyä elektroniseen tiedusteluun.

Elektronisella vaikuttamisella tarkoitetaan hyökkäyksellisiä toimenpiteitä, joilla pyritään vaikuttamaan vastustajan toimintakykyyn vaikuttamalla sen elektronisiin järjestelmiin. Elektroninen vaikuttaminen jaetaan edelleen elektroniseen häirintään, elektroniseen harhauttamiseen ja elektroniseen lamauttamiseen. Elektronisella vaikuttamisella voidaan myös pyrkiä ohjaamaan vastustajan sähkömagneettisen spektrin käyttöä esimerkiksi helpottamaan elektronista tiedustelua [13]. Elektronisen vaikuttamisen kannalta työssä keskitytään elektroniseen häirintään.

6.1.1.1 Elektroninen tiedustelu

Elektronisella tiedustelulla ja valvonnalla tarkoitetaan vastustajan ja omien joukkojen sensori-, navigointi- ja viestijärjestelmiin kohdistuvaa tiedustelua ja valvontaa. Tämän tarkoituksena on luoda tilannekuvaa, joka muodostetaan havaitsemalla, paikantamalla ja tunnistamalla aktiivisia lähettämiä. Aktiivisten lähettimien havaitseminen on yleensä mahdollista kauempaa kuin mikä niiden oma kantama on. Elektronisen tuen kantamaa rajoittavista tekijöistä tärkein on radiohorisontti. Radioaallon taipumisesta johtuen radiohorisontti on kauempana kuin näkyvä horisontti [13].

Viestiliikennettä voidaan kuunnella, jos haku- ja kuuntelulaitteet ja kohdeviestijärjestelmä sen sallivat. Perinteisten radiokalustojen kuuntelu on varsin yksinkertaista, mutta myös salatun liikenteen kuunteleminen on mahdollista. Yksinkertaisesti salatut tai salausalgoritmin heikkouksia sisältävät lähetteet on mahdollista kuunnella reaaliajassa. Täysin varmoja salausjärjestelmiä ei toisaalta ole olemassakaan, vaan kaikki liikenne on kuunneltavissa, jos vain käytetään riittävästi aikaa ja resursseja. Elektronisessa sodankäynnissä toiminta on kuitenkin yleensä lähes reaaliaikaista, joten viestiliikenteen sisällön selvittäminen saattaa olla toissijaista. Yleensä riittää että kohde paikannetaan ja tunnistetaan, eikä salauksen purku ole näin ollen tarpeellista [13].

Paikantaminen tapahtuu kahdella tai useammalla suuntimolla. Paikantamisen tarkkuus on yleensä muutaman prosentin luokkaa mittausetäisyydestä. Tarkin tulos saavutetaan kun suuntimat ovat mahdollisimman suorassa kulmassa toisiinsa nähden. Mittausetäisyyden kasvaessa signaali heikkenee, jonka vuoksi suuntimot pyritään sijoittamaan mahdollisimman eteen. Myös maasto aiheuttaa vaimennusta, jonka vuoksi suuntimot pyritään sijoittamaan myös mahdollisimman korkealle [13].

6.1.1.2 Elektroninen häirintä

Elektronisella häirinnällä tarkoitetaan vastustajan sähkömagneettisen spektrin hyödyntämisen vaikeuttamista tai estämistä. Luonteeltaan elektroninen häirintä voi olla estävää tai harhauttavaa. Estävällä häirinnällä pyritään vaikeuttamaan vastustajan tiedon saantia sähkömagneettiselta spektriltä. Käytännössä tämä näkyy yhteysvälin etäisyyden lyhenemisenä, joka voi lyhentyä jopa murto-osaan normaalista [13].

Johtamisjärjestelmää häiritäessä pyritään vaikuttamaan vastustajan toimintaan katkaisemalla sen johtamisyhteydet. Harhauttavalla häirinnällä pyritään saada vastustaja tekemään vääriä johtopäätöksiä joukkojen ja laitteiden sijainnista. Häirintä voidaan jakaa myös tuki- ja omasuojahäirintään, jolla tarkoitetaan suojattavan kohteen suhdetta häirintään. Tukihäirinnässä häirintäjärjestelmällä suojataan jotakin muuta järjestelmää kuten esimerkiksi asejärjestelmää. Tukihäirintä voidaan jakaa edelleen tausta-, saatto- ja lähihäirintään [13].

Taustahäirinnällä tarkoitetaan operaatioalueella toimivaa häirintää, jolla tuetaan operaation suorittamista. Taustahäirintä tapahtuu yleensä omien joukkojen selustasta tai omassa hallinnassa olevasta ilmatilasta. Pitkän häirintämatkan vuoksi joudutaan käyttämään suuritehoisia ja -kokoisia häirintälähtimiä. Taustahäirintä suoritetaan yleensä ilmasta, koska ilmassa signaali ei vaimene niin paljon kuin maan tasossa [13].

Saattohäirinnällä tarkoitetaan häirintää, joka suoritetaan hyökkävään osaston mukana liikkuvalla järjestelmällä. Saattohäirinnän tarkoituksena on suojata hyökkävää osastoa vastustajan asevaikutukselta. Saattohäirintä paljastaa osaston, mutta se estää vastustajan järjestelmien käytön sitä vastaan [13].

Lähihäirinnällä tarkoitetaan häirintää, jossa häirintälähtetin saatetaan häiritävän kohteen läheisyyteen. Lyhyt häirintäetäisyys mahdollistaa tehokkaan häirinnän pienillä häirintätehoilla. Häirintälähtetin voidaan toimittaa kohdealueelle esimerkiksi tykistön ja raketinheittimistön kantoammuksilla tai siroteilla. Lähihäirintälähtetin voi olla asennettuna myös lennokkiin [13].

6.2 Linkkiyhteyksien toteuttaminen

Linkkiyhteyksiä toteutettaessa tekniikoista mielenkiinto kohdistuu WiMAX-tekniikkaan. WiMAX-tekniikka tuntuisi olevan ainoa tutkittavista tekniikoista, joka soveltuu linkki käyttöön. Skenaariossa alueelle on sijoitettu seitsemän mikroaaltolinkkiä karttatiedustelun perusteella. Kartasta on tiedusteltu linkkien asemapaikoiksi soveltuvia korkeita maastonkohtia, mutta muita vaatimuksia ei ole otettu huomioon. Skenaariota ei ole sidottu tilanteeseen, vaan verkko on muodostettu pelkästään maaston perusteella. Seitsemän mikroaaltolinkin kesken jokaisesta on luotu muihin linkkijänne, joita on siten kokonaisuudessaan 21 kpl. Simulaatiossa linkkijänneet luodaan Mini-Link E- ja WiMAX-tekniikoilla. Tämän jälkeen vertaillaan jänneiden toimivuutta normaali olosuhteissa ja häirinnän vaikutuksen alla, sekä tarkastellaan linkkiyhteyksien tiedusteltavuutta.

Linkkiyhteys­simulaatiot on tehty Warfare-ohjelmalla Microwave-moodissa. Radioyhteyslaskenta on aina tilastollista ja täysin oikeaa vastausta ei voi saada kuin sattumalta, mutta simulointi antaa suuntaa antavan tuloksen. Kalustoparametreinä on käytetty Mini-Link E-kaluston osalta Viesti- ja Sähkö­teknisen Koulun valmiiksi luomia parametrejä, jotka perustuvat ehkä joiltain osin asiantuntijoiden valistuneisiin arviointeihin. Lähety­stehona Mini-Link E-kalustolla käytetään suurinta mahdollista arvoa, joka on 18 dBm. Antennina käytetään Parabol 699-4-antennia, jonka vahvistuksena käytetään 36 dBi. Antenni on hyvin suuntaava ja takakeilaa ei ole käytännössä katsoen lainkaan. Antennin suuntaku­vio on esitetty liitteessä 1. Siirtonopeutena on käytetty suurinta mahdollista suoritusarvoa. Taulukossa 6.1 on esitetty Mini-Link E-kaluston parametrit.

Lähety­steho	18dBm
Antennivahvistus	36dBi
Häviöt (tx, rx)	2dB, 2dB
Taajuus	13000 MHz
Kaistanleveys	2000kHz
Vastaanoton kynnysarvo	-84 (BER 10-6) / -88 (BER 10-3)
KTBF (kohinateho, vastaanottimen herkkyys)	-107dBm
Signaalityyppi	Radiocom
Modulaatiolaji	QPSK
Siirtonopeus	8 Mbit/s
Maston korkeus	20 m
Yleisin polarisaatio	pysty

Taulukko 6.1 Parmetrit Mini-Link E-teknikalla

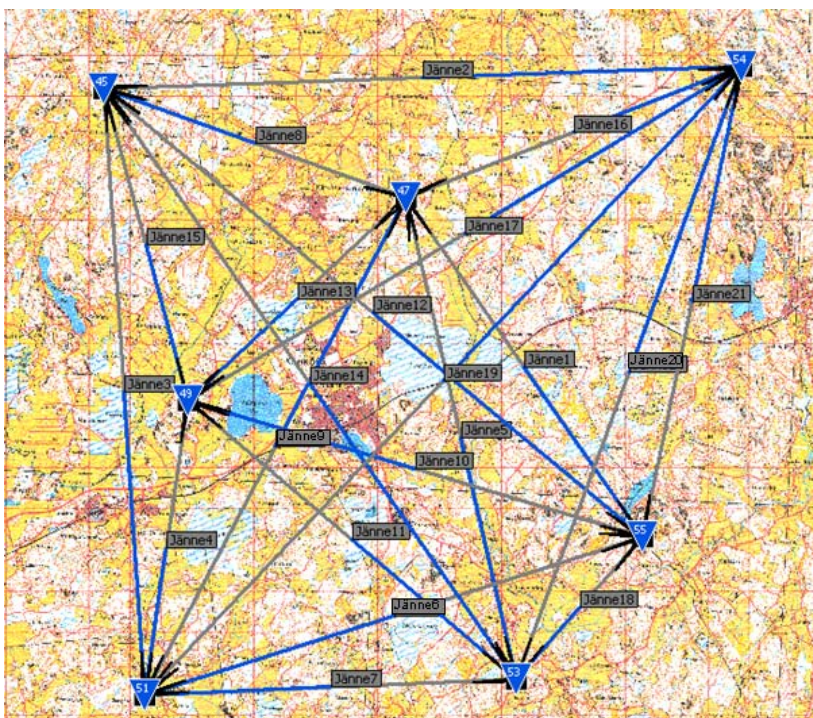
WiMAX-teknikan osalta parametreinä käytetään lähtökohtaisesti MacroMax-tukiaseman suoritusarvoja. Suoritusarvot on otettu laitevalmistajan dokumentaatioista [3]. Lähety­stehoina käytetään suurinta mahdollista arvoa. Antennina käytetään Parabol-699-4-antennia, jonka vahvistuksena käytetään 36 dBi. Antennin suuntaku­vio on sama kuin Mini-Link E-kalustolla. Modulaatiotavaksi on valittu 16QAM. Kaistanleveydeksi on valittu 3,5 MHz ja siirtonopeudeksi 8,73 Mbit/s. Vastaanottimen herkkyys on varsin hyvä, mutta tutkimuksessa käytetyissä laitevalmistajan dokumentaatioissa ei ole ilmoitettu vastaanoton kynnysarvoja. Vastaanoton kynnysarvot perustuvat siis tutkijan omaan arvioon. Arviossa on huomioitu käytetty kaistanleveys, siirtonopeus sekä koodaus- ja modulointitapa. Taulukossa 6.2 on esitetty WiMAX-kaluston parametrit.

Lähetysteho	37dBm
Antennivahvistus	36dBi
Häviöt (tx, rx)	2dB, 2dB
Taajuus	3500 MHz
Kaistanleveys	3500kHz
Vastaanoton kynnysarvo	-86 (BER 10-6) / -90 (BER 10-3)
KTBF (kohinateho, vastaanottimen herkkyys)	-115dBm
Signaalityyppi	Radiocom
Modulaatiolaji	16QAM
Siirtonopeus	8,73 Mbit/s
Maston korkeus	20 m
Yleisin polarisaatio	pysty

Taulukko 6.2 Linkkiyhteyden parametrit WiMAX-tekniikalla

6.2.1 Linkkiyhteyksien toimivuus normaali olosuhteissa

Sekä Mini-Link E-, että WiMAX-kalustolla luodaan samanlainen verkko. Olosuhteet ovat molemmissa verkoissa samat. Häirinnän vaikutusta ei ole simuloitu. Kuvassa 6.1 on verkonkuva jota käytetään kaikissa linkkiyhteyksien simulaatioissa. Kuvassa kärjellä oleva sininen kolmio osoittaa linkkiaseman paikan. Jänne on kuvattu puoliksi sinisellä ja puoliksi harmaalla viivalla. Jänteen järjestysnumero on kuvassa harmaassa laatikossa jänneviivan puolivälissä. Taulukossa 6.3 on lueteltu linkkijänteet ja tekniikoiden toimivuus normaali olosuhteissa. Liitteessä 2 on tarkat maastoprofiilit yhteysväleiltä.



Kuva 6.1 Linkkiyhteyksien verkonkuva

Linkkijänne	Yhteysväli (km)	Mini-Link E	WiMAX
Jänne1	10	Toimii	Toimii
Jänne2	15,4	Ei toimi	Toimii
Jänne3	14,7	Ei toimi	Toimii
Jänne4	7,2	Toimii	Toimii
Jänne5	12	Toimii	Toimii
Jänne6	12,6	Toimii	Toimii
Jänne7	9	Toimii	Toimii
Jänne8	7,8	Toimii	Toimii
Jänne9	13,6	Toimii	Toimii
Jänne10	11,5	Toimii	Toimii
Jänne11	10,5	Toimii	Toimii
Jänne12	17	Toimii	Toimii
Jänne13	7,2	Toimii	Toimii
Jänne14	17,5	Ei toimi	Toimii
Jänne15	8	Toimii	Toimii
Jänne16	8,7	Toimii	Toimii
Jänne17	15,6	Toimii	Toimii
Jänne18	4,7	Toimii	Toimii
Jänne19	21	Ei toimi	Toimii
Jänne20	15,8	Toimii	Toimii
Jänne21	11,6	Toimii	Toimii

Taulukko 6.3 Linkkijänteet ja tekniikoiden toimivuus normaali olosuhteissa

Mini-Link E-kalustolla neljä yhteysväliä ei toiminut. Kaikissa tapauksissa yhteysvälillä oli selviä maastoesteitä ja suoraa näköyhteyttä ei ollut. WiMAX-kalustolla kaikki yhteysvälit toimivat. Nämä erot kalustojen välillä arvioitiin johtuvan pitkälti WiMAX-kaluston alhaisemmasta taajuusalueesta, vastaanottimen herkkyydestä ja suuremmista lähetystehoista. WiMAX-kalustolla käytettiin alhaisempaa taajuutta, jolloin signaali etenee erilailla ja aiheuttaa eri tavalla häiriöitä hyötysignaaliin. Vastaanottimen herkkyys oli WiMAX-kalustolla myös hieman parempi, joten heikompikin signaali voitaisiin vastaanottaa. Suurin ero oli kuitenkin lähetystehoissa joissa oli peräti 19 dBm:n ero. Linkkijänteitä 2, 3, 14 ja 19, jotka eivät toimineet Mini-Link E-kalustolla, päätettiin tutkia tarkemmin.

Tarkastellaan jäniteitä 2, 3, 14 ja 19. Vaihdetään tiettyjä parametrejä kalustojen kesken ristiin ja tarkastellaan yhteysvälien toimivuutta. Muuttuvat tekijät ovat teho, vastaanottimen herkkyys ja taajuus. WiMAX-kalustolla käytettiin 18 dBm tehoja, 13000 MHz taajuutta ja -107 dBm vastaanottimen herkkyyttä. Mini-Link E-kalustolla käytettiin 37 dBm tehoja, 3500 MHz taajuutta ja -115 dBm vastaanottimen herkkyyttä. Taulukossa 6.4 on esitetty tekniikoiden toimivuus eri yhteysväleillä uusilla parametreillä.

Yhteysväli	Parametri	Mini-Link E	WiMAX
Jänne2	Teho	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Taajuus	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Vastaanottimen herkkyys	Ei toimi (ei muutosta)	Toimii (ei muutosta)
Jänne3	Teho	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Taajuus	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Vastaanottimen herkkyys	Ei toimi (ei muutosta)	Toimii (ei muutosta)
Jänne14	Teho	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Taajuus	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Vastaanottimen herkkyys	Ei toimi (ei muutosta)	Toimii (ei muutosta)
Jänne19	Teho	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Taajuus	Toimii (muutos)	Toimii (ei muutosta)
	Vastaanottimen herkkyys	Ei toimi (ei muutosta)	Toimii (ei muutosta)

Taulukossa 6.4 Linkkiyhteyksien toimivuus ristikkäisillä parametreillä

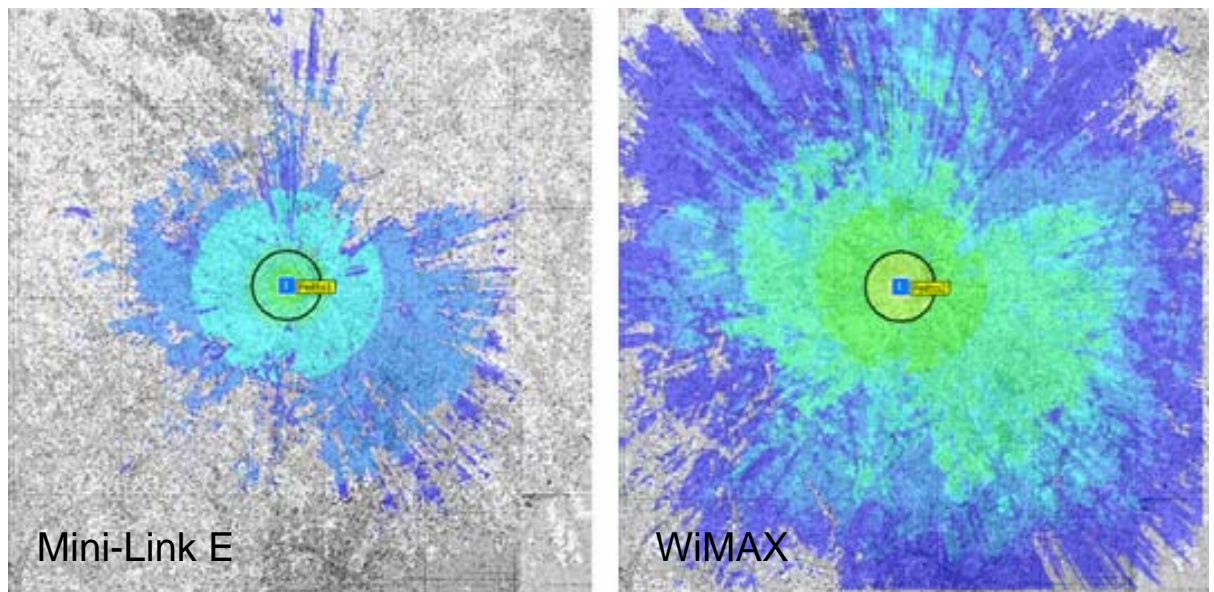
Taulukosta nähdään, että ratkaisevat tekijät erojen suhteen olivat teho ja taajuus. Jo toisen muuttaminen riitti Mini-Link E-kalustolla yhteyden muodostamiseksi. Taas WiMAX-kalustolla toisen muuttaminen ei vaikuttanut yhteyden toimivuuteen. Vastaanottimien herkkyysien erot eivät nähtävästi ole merkittävän suuria, ja siitä johtuen sen muuttaminen ei vaikuttanut yhteyden muodostumiseen.

6.2.2 Linkkiyhteyksien tiedusteltavuus

Tiedusteltavuutta simuloitiin siten, että kummallakin kalustolla sijoitettiin linkkiasema samaan paikkaan, jonka jälkeen laskettiin asemien peittoalueet. Antennina käytettiin

molemmissa tapauksissa ympärisäteilevää antennia, mutta muuten parametrit olivat taulukoiden 6.1 ja 6.2 mukaiset. Peittoalueet laskettiin ympärisäteilevällä antennilla siksi, että saadaan peittoalue laskettua jokaiseen suuntaan ja siten pienennettyä maastosta johtuvia eroja. Sekä tiedusteluaseman että linkkiaseman antennin korkeudeksi asetettiin 20 m, joten peittoaluetta laskiessa antennin korkeudeksi asetettiin 40 m (20 m + 20 m).

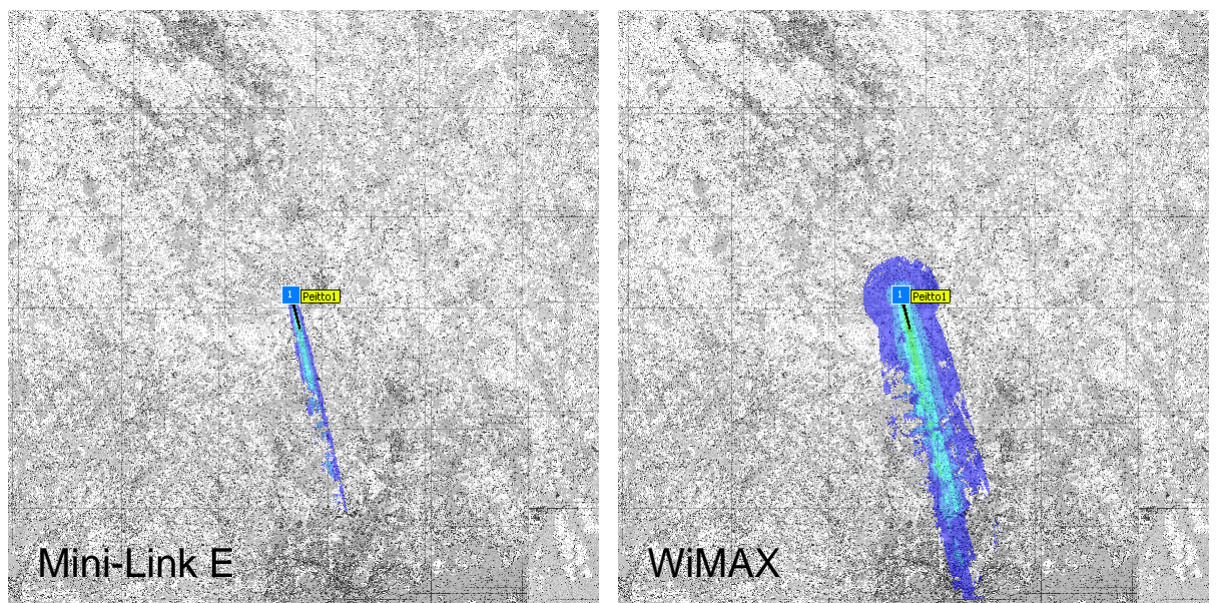
Tiedusteluetäisyyttä ilmasta tiedusteltaessa ei ole pohdittu erittäin pitkän tiedusteluetäisyyden vuoksi. Peittoalueen laskennan kynnyksarvoksi asetettiin -93 dBm. Tämä arvo on signaalin voimakkuus joka tässä tapauksessa havaittaisiin, mutta todellisuudessa myös heikompi signaali voitaisiin havaita. Peittoalueiden laskennalla oli kuitenkin tarkoitus verrata eri tekniikoiden suhteita toisiinsa, eikä niinkään pyrkiä saamaan tarkkaa tulosta tiedusteluetäisyydestä. Tämä päätös tehtiin sen vuoksi, koska tiedusteluetäisyyden vaikuttaa monta eri tekijää mm. kalusto ja tiedusteluvastaanottimen antennin korkeus. Kuvassa 6.2 on peittoalueet eri tekniikoilla. Kuvat ovat kooltaan noin 100 * 100 km. Kuvissa vihreät ja siniset alueet osoittavat missä signaali on mahdollista vastaanottaa. Vihreällä alueella signaali on voimakkain ja sinisellä heikoin.



Kuva 6.2 Tiedusteltavuuden peittoalueet Mini-Link E- ja WiMAX-kalustoilla

Kuvasta nähdään että WiMAX-kalustolla signaali on tiedusteltavissa huomattavasti kauempaa kuin Mini-Link E-kalustolla. Erot tiedusteluetäisyydessä johtuvat samoista tekijöistä joista erot syntyivät yhteyden toimivuudessaakin. Lähetystehot ja -taajuus ovat ratkaisevassa asemassa. Täytyy kuitenkin huomioida että peittoalueet laskettiin ympärisäteilevällä antennilla ja todellinen peittoalue on huomattavasti pienempi. Jos käytetään Parabol-699-4 antennia, jonka keilan avauskulma on Mini-Link E-kalustolla kolme astetta ja WiMAX-

kalustolla viisi astetta nähdään mikä todellinen peittoalue on. Molemmilla tekniikoilla on käytetty samaa antennin suuntaa, asemapaikkaa ja signaalin havaitsemisen kynnsarvoa. Kuvassa 6.3 on kummankin tekniikan peittoalueet suunta-antenneilla. Kuvista voidaan nähdä, että todellinen peittoalue on Mini-Link E-kalustolla huomattavasti pienempi. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi käytetyistä tehoista. Kuvista voidaan nähdä mm. se, että Mini-Link E-kalustolla ei muodostu huomattavaa takakeilaa, kun taas WiMAX-kalustolla se on selkeästi erotettavissa. Myös suunta-antennien keilan avauskulmat muodostivat eroa, vaikka ero on vain kaksi astetta. Mini-Link E-kalustolla keila on erittäin kapea, jonka vuoksi sen peittoalue on pieni.



Kuva 6.3 Linkkiyhteyden tiedusteltavuuden peittoalueet suunta-antenneilla

6.2.3 Linkkiyhteyksien toimivuus häirinnän vaikutuksen alla

Häirinnän vaikutusta tutkitaan ilmasta ja maasta tapahtuvalla häirinnällä. Häirintää tarkastellaan kolmen eri häirintälajin näkökulmasta, jotka ovat: taustahäirintä, saattohäirintä ja lähihäirintä. Linkkiyhteydet on toteutettu samoilla parametreillä kuin aikaisemmatkin linkkijänteet. Antennina on käytetty suuntaavia antennoja. Häirintälähtimissä on käytetty ympärisäteileviä antennoja sekä samoja taajuuksia kuin linkeissä. Taulukossa 6.5 on lueteltu simuloitavat häirintälajit. Häirintälajien arvot on valittu siten, että ne ovat simulaation kannalta järkevästi toteutettavissa. Todellisuudessa arvot voisivat olla paljon suurempiakin.

Häirintälaji	Etäisyys	Korkeus	Teho
Taustahäirintä, ilmasta	n. 70 km	1000 m	500 W
Saattohäirintä, ilmasta	n. 30 km	300 m	500 W
Saattohäirintä, maasta	n. 30 km	20 m	2000 W
Lähihäirintä, maasta	n. 1 km	1 m	10 W
Lähihäirintä, ilmasta	n. 1-5 km	300 m	10 W

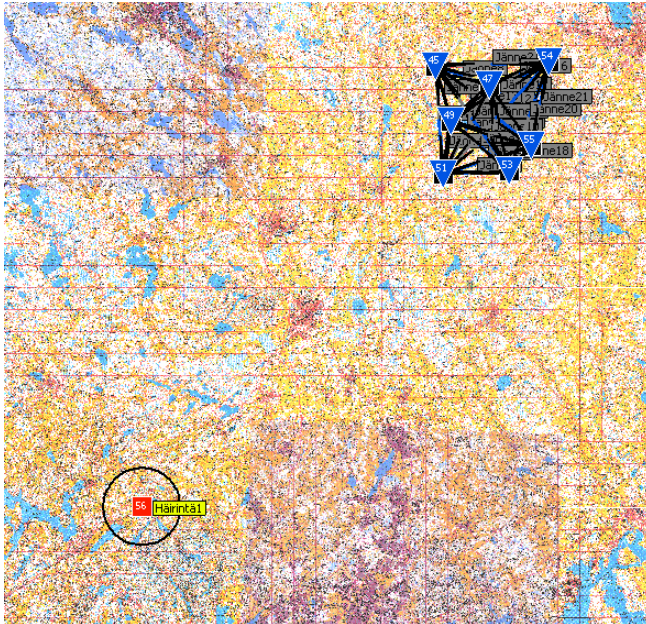
Taulukko 6.5 Linkkiyhteyden häirintätavat

Häirintälähtetimen parametrit valitaan simulaatioissa häirittävän järjestelmän mukaan. Esimerkiksi häirintälähtetimen taajuutena käytetään samaa taajuutta kuin häirittävässä yhteydessä. Häirintälähtetimillä pyritään häiritsemään koko kaistanleveyttä jota linkkiyhteys käyttää. Taulukossa 6.6 on esitetty häirintälähtetimen parametrit.

Lähetysteho	2000, 500 tai 10 W
Antennivahvistus	0dB
Häviöt (tx, rx)	0dB, 0dB
Taajuus	13000 MHz / 3500 MHz
Kaistanleveys	2000kHz / 3500kHz
Yleisin polarisaatio	pysty

Taulukko 6.6 Linkkiyhteyden häirintälähtetimen parametrit

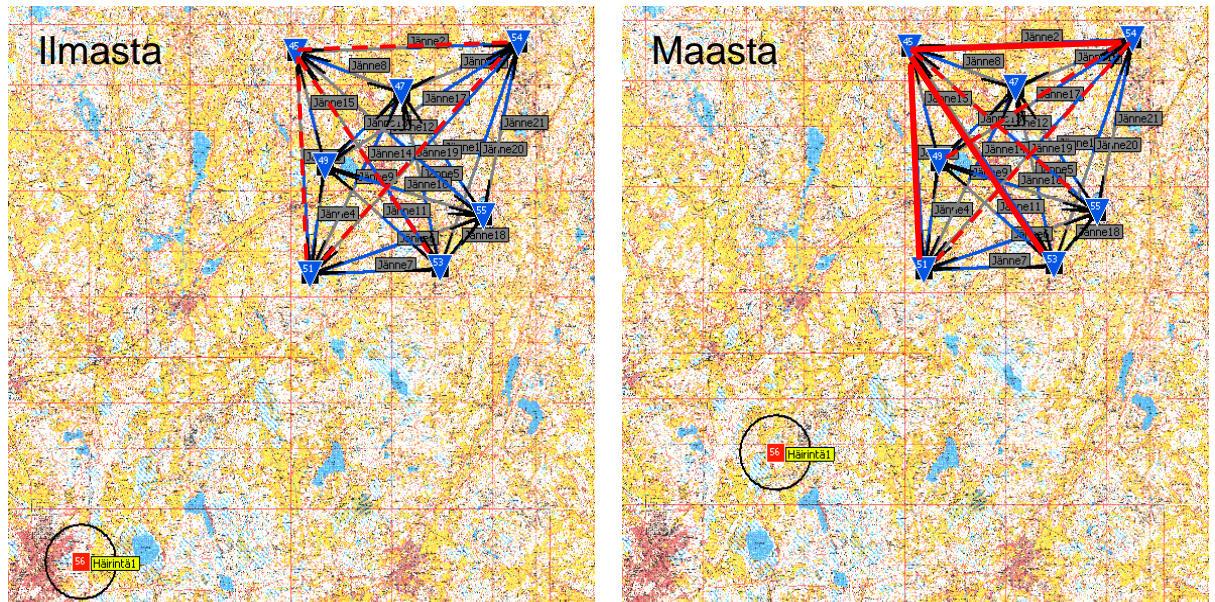
Linkkiyhteydet ovat muodostettu samalla tavalla kuin aikaisemmassakin simulaatiossa normaali olosuhteissa. Häirintälähtetimet on sijoitettu samaan paikkaan sekä Mini-Link E- ja WiMAX-kalustolla toteutettuja linkkiyhteyksiä tutkittaessa. Yhteyksien toimivuutta häirinnän alla tutkittaessa on tarkasteltu keskinäisinterferenssi-arvoa (C/I). C/I-arvolla ilmaistaan signaalien interferenssisuhdetta. Esimerkiksi tarkasteltaessa kuvitteellista jännettä, jonka hyötysignaalin voimakkuus on -50 dBm ja häirintäsignaalin voimakkuus on -104 dBm, saadaan keskinäisinterferenssiksi 54 dB ($-50 \text{ dB} - (-104 \text{ dB}) = 54 \text{ dB}$). Keskinäisinterferenssissä suurempi arvo on parempi. Kuvassa 6.4 on esitetty taustahäirintäsimulaation periaate. Kuvassa kärjellään olevat siniset kolmiot ovat linkkiasemia ja punainen neliö on häirintälähtetin.



Kuva 6.4 Linkkiyhteyden taustahäirintä simulaatio

Häirintälähettimen etäisyys linkkiyhteyksistä on noin 70 km. Yhteyksiä häiritään ilmasta 1000 m korkeudesta 500 W teholla. Taustahäirinnällä ei onnistuttu häiritsemään yhtään yhteyttä siinä määrin, että yhteys ei olisi toiminut. Tämä johtunee käytettävistä taajuusalueista, jotka eivät mahdollistane häirintää näin kaukaa. Myös linkeissä käytetyt voimakkaasti suuntaavat antennit heikentävät häirinnän vaikutusta voimakkaasti. Taustahäirinnän tarkoitus ei yleensä olekaan häiritä yhteyksiä, vaan esimerkiksi sensoreita.

Saattohäirinnät simuloidaan samalla tavalla kuin taustahäirintä-simulaatio. Parametrit ovat muuten samat, mutta häirintä tapahtuu ilmasta 300 metrin ja maasta 20 metrin korkeudesta. Etäisyyttä häirintälähettimestä yhteysväleihin ilmasta häirittäessä on keskimäärin 30 km ja maasta 25 km. Häirintäteho on ilmasta 500 ja maasta 2000 W. Kuvassa 6.5 on esitetty saattohäirintä ilmasta-simulaatio. Kuvan selitteet ovat samat kuin edellä. Lisäksi punaisella katkoviivalla osoitettu yhteysväliä joita häiritään jonkin verran ja yhtenäisellä punaisella viivalla yhteysväliä jotka eivät häirinnän vuoksi toimi.



Kuva 6.5 Linkkiyhteyden saattohäirintä-simulaatio

Taulukossa 6.7 on lueteltu häirinnän vaikutus yhteysväleihin. Taulukossa on ilmoitettu häirinnän ja hyöty-yhteyden keskinäisinterferenssi-arvo. Raja-arvoksi keskinäisinterferenssille joka häiritsee jonkin verran on valittu 20 dB. Tämän tyyppisellä häirinnällä tarkoitetaan sellaista häirintää, jonka johdosta yhteyteen muodostuu häiriöitä, mutta joka ei kokonaisuudessa haittaa merkittävästi yhteyden toimivuutta. Raja-arvoksi jossa keskinäisinterferenssin katsotaan häiritsevän liikaa yhteyttä sen toimivuuden kannalta on valittu 10 dB. Taulukossa 6.7 lihavoinnilla on korostettu linkkiyhteydet joita häiritään jonkin verran. Punaisella värillä ja lihavoinnilla on korostettu linkkiyhteydet jotka eivät häirinnän vuoksi toimi.

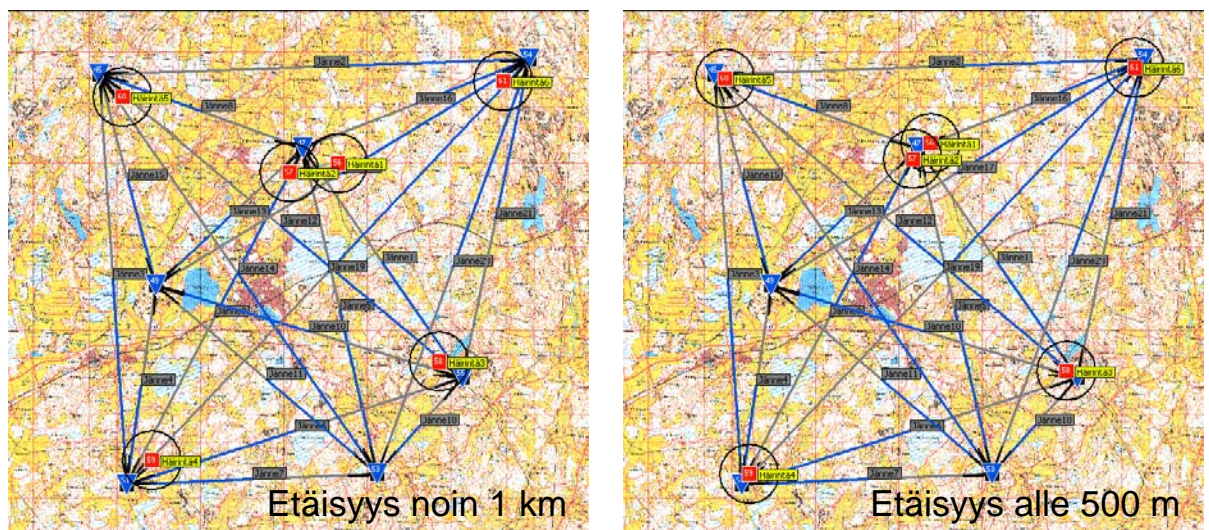
Yhteysväli	Saattohäirintä ilmasta, C/I (dB)		Saattohäirintä maasta, C/I (dB)	
	Mini-Link E	WiMAX	Mini-Link E	WiMAX
Jänne1	48	68	38	57
Jänne2	19	43	9	33
Jänne3	20	43	7	31
Jänne4	41	62	29	49
Jänne5	47	65	36	55
Jänne6	37	56	25	43
Jänne7	45	64	32	51
Jänne8	36	59	26	48
Jänne9	44	62	42	58
Jänne10	47	66	36	55
Jänne11	47	65	35	54
Jänne12	30	52	20	42
Jänne13	36	55	26	45
Jänne14	19	43	9	33
Jänne15	48	67	36	55

Jänne16	49	69	39	58
Jänne17	32	53	20	42
Jänne18	38	55	31	48
Jänne19	13	37	11	33
Jänne20	43	62	32	51
Jänne21	47	65	36	54

Taulukko 6.7 Linkkiyhteyden taustahäirinnän vaikutus yhteysväleihin

Taulukosta voidaan nähdä, että ilmasta häiritäessä Mini-Link E-kalustolla neljään linkkiyhteyteen muodostui jonkin verran häiriöitä. Maasta häiritessä Mini-Link E-kalustolla kolmeen linkkiyhteyteen muodostui jonkin verran häiriöitä ja kolme linkkiyhteyttä ei häiriöistä johtuen toiminut. WiMAX-kalustolla yhtään linkkiyhteyttä ei onnistuttu häiritsemään riittävästi. Tämä johtuu WiMAX-kaluston suuremmasta lähetystehosta, joka oli huomattavan paljon suurempi suhteessa häirintäsignaaliin.

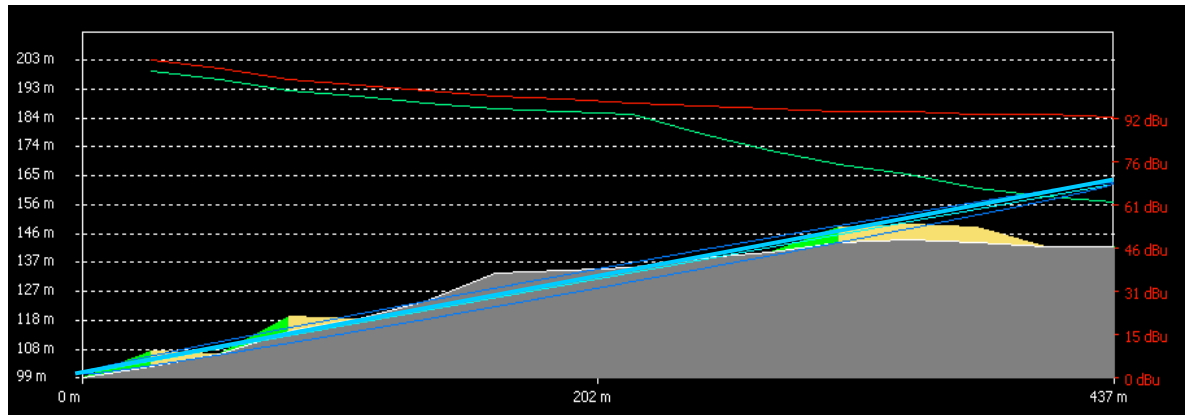
Ensimmäisessä lähihäirintä-simulaatiossa linkkiasemien läheisyyteen sijoitettiin kuusi lähihäirintälähetintä. Lähihäirintälähettiminä simuloitiin tykistö- rakentinheitinlevitteisiä lähihäirintälähettimiä. Lähihäirintälähettimen toiminta korkeus oli yksi metri. Antennina käytettiin ympärisäteilevää antennia ja lähetystehona 10 W. Kuvassa 6.5 on esitetty lähihäirintälähettimien sijoittelu linkkiyhteyksiin nähden.



Kuva 6.5 Linkkiyhteyden lähihäirintä maasta

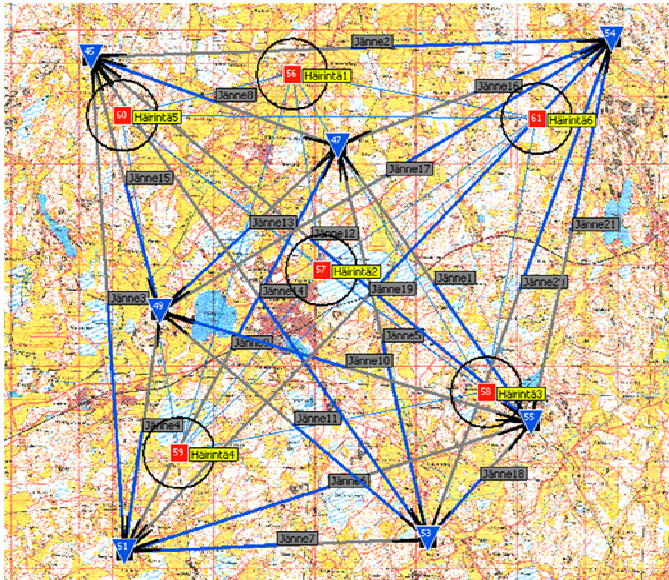
Ensiksi lähihäirintälähettimet sijoitettiin noin yhden kilometrin etäisyydelle linkkiasemista, mutta merkittävää vaikutusta ei saavutettu. Tämän jälkeen lähihäirintälähettimet sijoitettiin alle 500 metrin etäisyydelle linkkiasemista, mutta edelleenkin ei saavutettu merkittävää vaikutusta. Tämän arvioitiin johtuvan suurimmaksi osaksi linkkien korkeasta taajuusalueesta ja lähihäirintälähettimien matalista sijoituskorkeuksista. Korkea taajuusalue jolla toimittiin

vaatii lähes suoran näköyhteyden toimiakseen. Suoraa näköyhteyttä ei kuitenkaan simulaatiossa saavutettu, koska lähihäirintälähetin simuloitiin toimimaan vain vähän maanpintaa korkeammalla. Kuvassa 6.6 on esimerkki lähihäirintälähtetimen ja linkkiaseman välisestä yhteysvälistä. Sininen viiva kuvaa suoraa näköyhteyttä ja harmaa alue kuvaa maanpintaa.



Kuva 6.6 Lähihäirintälähtetimen ja linkkiaseman yhteysväli

Toisessa lähihäirintä-simulaatiossa simuloitiin lähihäirintää ilmasta. Lähihäirintä ilmasta simuloitiin toteuttavaksi lennokilla. Lennokin korkeudeksi valittiin 300 metriä ja häirintätehoksi 10 W. Antennina lähihäirinnässä käytettiin ympärisäteilevää antennia. Etäisyydet häirintälähtetimen ja linkkiasemien välillä olivat 1-5 km. Vaikka lähihäirintälähtetimet sijoitettiin lennokkeihin, jotka toimivat korkealla, niin häirinnällä ei silti saavutettu vaikutusta linkkiyhteyksiin. Koska maastoesteitä ei tällä kertaa yhteysvälistä ollut, niin päädyttiin siihen, että tämä johtui linkkien voimakkaasti suuntaavista antennista. Antennien keilat ovat linkeillä niin pieniä, että vaikka lennokka sijoitettiin suoraan linkkien yhteysvälille, niin merkittävää häirintää ei kyetty saavuttamaan. Merkittävää vaikutusta saavutettiin vasta, kun lähihäirintälähetin sijoitettiin linkkijänteelle noin 20 metrin korkeuteen. Käytännössä lennokeita ei kuitenkaan tällä korkeudella käytetä. Kuvassa 6.7 on esitetty lennökkien sijoittelu linkkiasemiin nähden. Kuvassa häirintälähtetimet ovat punaisia neliöitä.



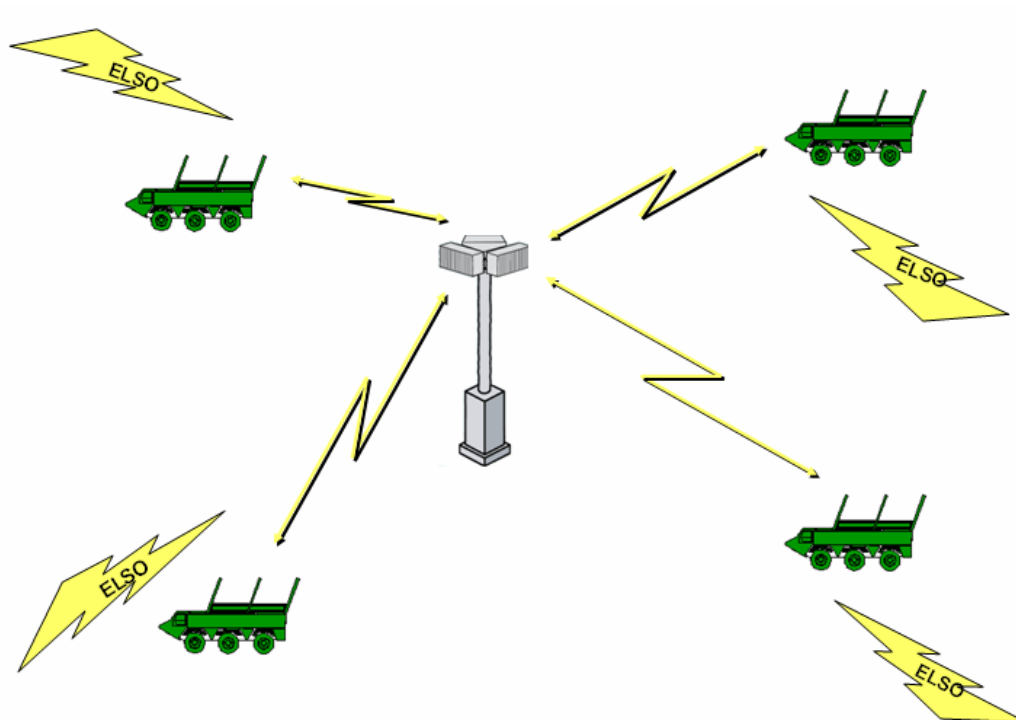
Kuva 6.7 Linkkiyhteyden lähihäirintä ilmasta

6.2.4 Johtopäätökset

Linkkiyhteyksiä toteutettaessa Mini-Link E- ja WiMAX-kalustolla ratkaisevimaksi tekijäksi muodostui lähetysteho. WiMAX-kalustolla käytetystä suuremmasta lähetystehosta oli merkittävä hyöty linkkiyhteyden toimivuuden ja häirinnänsietokyvyn kannalta. Myös WiMAX-kalustolla käytetystä alhaisemmasta taajuusalueesta oli hyötyä yhteyden toimivuuden ja häirinnänsietokyvyn kannalta. Jo toinen näistä ominaisuuksista riittää parantamaan yhteysvälin toimivuutta. Tämän vuoksi WiMAX-kalusto suoriutui huomattavasti paremmin näillä osa-alueilla. Ainoa alue jossa Mini-Link E-kalusto oli parempi, oli tiedusteltavuus. Tässäkin asiassa erot olivat selkeitä, mutta erot tiedusteltavuudessa ei välttämättä muodostu ratkaiseviksi tekijöiksi tekniikoiden käytettävyyden kannalta. Molemmat järjestelmät sietivät suhteellisen hyvin häirintää ja ainoa tapa häiritä yhteyksiä tuntuu olevan suhteellisen läheltä toteutettu saattohäirintä. Mini-Link-yhteyden korvaaminen WiMAX-tekniikalla on edullista, jos on tarvetta pitemmille yhteysväleille tai suuremmalle tiedonsiirtokapasiteetille.

6.3 Esikunnan yhteyksien toteuttaminen

Yhtymän esikunta on yleensä hajautettu alueelle, jonka koko on noin 500-1000 m * 500-1000 m. Esikunnan sisäiset yhteydet toteutetaan joko kupari- tai kuitukaapeliyhteyksin. Yhteyksien rakentaminen kestää jonkin aikaa joukkojen saapumisesta alueelle. Esikunnan toimintavalmiutta voitaisiin nopeuttaa toteuttamalla sen tarvitsemat yhteydet langattomalla tiedonsiirtotekniikalla. Kuvassa 6.8 on esitetty skenaario miten tämä voitaisiin toteuttaa.



Kuva 6.8 Yhtymän esikunnan yhteydet

Esikunnan toimiessa hajautetusti optimaalisin vaihtoehto olisi sijoittaa langattoman siirtoverkon tukiasema keskelle ryhmitystä. Täten jokaisen liittäjän välimatka tukiasemaan olisi mahdollisimman lyhyt. Tämä takaisi jokaiselle liittäjälle teoreettisesti voimakkaimman mahdollisen signaalin, joka taas takaisi yhteyden laadun. Käytännössä kuitenkin maasto rajoittaa ja asettaa vaatimuksia tukiaseman sijoittamiselle. Tämän tapaisessa verkossa on käytettävä ympärisäteilevää antennia.

6.3.1 Edut ja haitat

Langattoman siirtoverkon käytön etuja olisi sen nopea toimintavalmiuden saavuttaminen. Teoriassa, jos tukiasema on kyetty pystyttämään alueelle etukäteen ja järjestelmä kyetty konfiguroimaan, järjestelmä olisi jo toimintavalmiina esikunnan saapuessa alueelle. Tämän jälkeen järjestelmä voidaan ottaa käyttöön vain kytkemällä tehot päälle. Langaton verkko pystynee myös käsittelemään hajaryhmituksen sisällä tapahtuvia liittäjien siirtymisiä paremmin kuin kaapeliyhteydet. Esikunnan alueella on perinteisesti paljon kaapelia, jotka ovat jokseenkin herkkiä tappioille.

Langattoman siirtoverkon käytön haittoja olisivat sen tiedusteltavuus ja herkkyys häirinnälle. Jos tiedonsiirto siirretään kaapelimedialta langattomalle medialle, niin ongelmaksi muodostuu

radiotien herkkyys ELSO:lle. Jos käytetään skenaarion mukaista ympärisäteilevää tukiasemaa, niin tiedustelu ja häirintä on mahdollista toteuttaa teoriassa joka suunnasta ainakin joillekin yhteysväleille. Käytännössä tähän kuitenkin vaikuttaa myös maasto. Häirinnän sietokyky siis ratkaisee hyvinkin pitkälti järjestelmän toimivuuden häirinnän vaikutuksen alla. Langattoman verkon tiedustelu kyetään toteuttamaan tukiaseman kantaman puitteissa. Riippuu siis käytettävistä tehoista, antennityypistä sekä antennin korkeudesta, kuinka kaukaa verkko voidaan tiedustella. Langattomia medioita käytettäessä siirtotielle ei voi tuottaa fyysisiä tappioita.

6.3.1.1 Toteutus TETRA-tekniikalla

TETRA-tekniikalla kyetään toteuttamaan hyvin tukiasema-ajattelun mukainen verkko, jos käytetään TETRA-tukiasemaa. Tukiaseman kapasiteetti on riittävä esikunnan tarpeisiin nähden. Tekniikasta johtuen yhteyden laatu saataneen riittävän hyväksi tiedonsiirtoa ajatellen. TETRA-tekniikalla tiedonsiirto voidaan salata tiettyyn asteeseen saakka ja saavuttaa siten jonkinasteista suojausta tiedustelua vastaan. TETRA-tekniikka kykenee käsittelemään hyvin liikettä, eikä yhteyden laatu kärsi siitä. TETRA-tekniikka kykenee liikkuviin yhteyksiin, mutta se ei ole skenaariossa kovinkaan merkittävä tekijä.

TETRA-tekniikalla toteutettuna liittyjälle tarjottava tiedonsiirtokapasiteetti saattaa kuitenkin jäädä riittämättömäksi. TETRA-tekniikan salaustas perustuu avoimiin standardeihin, eikä sitä siten voida katsoa täysin turvalliseksi. Tukiasemaa käytettäessä tiedusteluetaisyys on kohtuullisen suuri johtuen käytetyistä tehoista.

6.3.1.2 Toteutus WLAN-tekniikalla

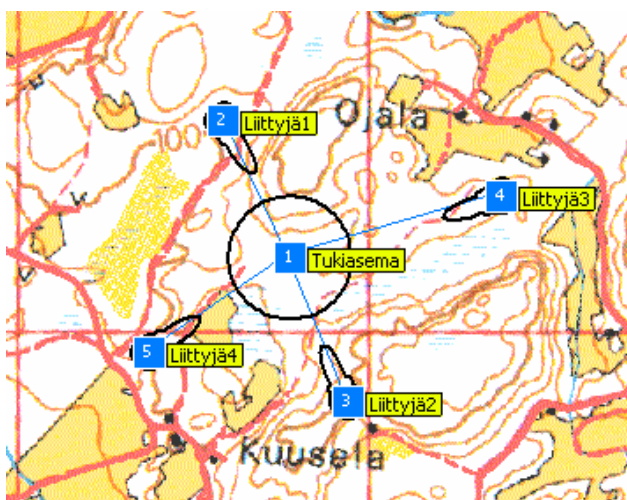
WLAN-tekniikalla kyetään toteuttamaan tukiasema ajattelun mukainen verkko. Tässä ajattelu mallissa Access point toimisi tukiasemana. Tilaajat liittyisivät Access pointiin omilla päätelaitteillaan. Tiedonsiirtokapasiteetti kyettäneen saamaan esikunnan tarpeisiin nähden riittäväksi. Tekniikalla kyetään saamaan kevyt tietosuoja tiedustelua vastaan. Tekniikan suhteellisen alhaisista lähetystehoista johtuen tiedusteluetaisyys ei kuitenkaan ole kovinkaan pitkä. Tekniikka kykenee käsittelemään myös liikettä, joskaan se ei ole erityisen tärkeä ominaisuus skenaariossa.

6.3.1.3 Toteutus WiMAX-tekniikalla

WiMAX-tekniikalla kyetään myös toteuttamaan tukiasema-ajattelun mukainen verkko. Tiedonsiirtokapasiteetti on riittävä esikunnan tarpeisiin. Koska käytettävää kaistanleveyttä voidaan jakaa ja käyttöä rajoittaa, voidaan myös tärkeimpien yhteyksien toimivuus ja tiedonsiirtokapasiteetti taata. WiMAX-tekniikka on kuitenkin herkkä esteille korkeasta taajuusalueesta johtuen. Tämä saattaa muodostua ongelmaksi, koska yhteysvälillä ei saisi olla kovinkaan paljon edes puustoa. Tekniikka on myös herkkä liikkeelle ja yhteys saattaa purkautua liikkeen aikana. Tämä ei kuitenkaan ole kriittinen ongelma koska esikunta toimii paikallaan. WiMAX-tekniikassa käytetyt lähetystehot ovat suhteellisen suuret ja tästä johtuen tiedusteluetaisyys on suhteellisen pitkä.

6.3.2 Esikunnan yhteys-simulaatio

Yhtymän esikunnan tietoliikenneyhteyksien muodostamiseen soveltuneet kaikki tutkittavat tekniikat. Simulaatioissa esikunta on hajautettu noin 1 km * 1 km alueelle. Simulaatioissa luodaan esikunnan sisäinen verkko, joka on toimintaperiaatteeltaan tukiasematyypinen. Tämän jälkeen tutkitaan yhteyksien toimivuutta normaali olosuhteissa ja häirinnän vaikutuksen alla. Verkossa on yksi tukiasema ja neljä liittynyttä. Tukiasema on ympärisäteilevä, mutta se on toteutettu usealla, jonkin verran suuntavalla antennilla. Liittynyt käyttävät suuntaavia antennia. Verkko luodaan samalla tavalla jokaisella tekniikalla. Kuvassa 6.9 on esikunnan tietoliikenneverkon kuva. Karttaruudun koko on 1 km * 1 km. Sininen neliö kuvaa tukiasemaa ja tilaajia.



Kuva 6.9 Esikunnan tietoliikenneverkko

Liittyjien etäisyydet tukiasemaan vaihtelee noin 400–600 metrin välillä. Ensimmäisellä liittyjällä etäisyyttä tukiasemaan on noin 400, toisella noin 450, kolmannella noin 600 ja neljännellä noin 500 metriä. Tukiasema-antennit on sijoitettu 20 m korkeuteen. Liittyjien antennit on sijoitettu 2 m korkeuteen. Liitteessä 3 on esitetty yhteysvälien profiilit.

Simulaatioissa simuloidaan TETRA-, WLAN- ja WiMAX-tekniikoilla esikunnan tietoliikenneverkko. Kalustoparametrit perustuu kaupallisten tuotteiden parametreihin. Tiedot on saatu pääsääntöisesti laitevalmistajien dokumentaatioista. Joiltain osin parametrejä on kuitenkin täydennetty tutkijan omilla arvioilla, koska teknillisistä selosteista ei löytynyt kaikkea tietoa.

TETRA-tekniikan osalta kalustoparametrit perustuu Motorolan TETRA-laitteisiin. Tukiaseman parametreinä käytetään MBTS 1.1 Dimetra-tukiaseman parametrejä [17]. Liityntälaitteen parametreinä käytetään MTP850-päätelaitteen parametrejä [19]. Tukiasema toteutetaan kolmella lievästi suuntavalla antennilla. Tukiaseman antennien keilan avauskulma on noin 100 astetta ja antennit on sijoitettu 120 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Liittyjät käyttävät suuntaavaa antennia, jonka vahvistus on 20 dB. Käytettyjen antennien suuntakuviot on esitetty liitteessä 1. Taulukossa 6.8 on esitetty TETRA-tekniikan kalustoparametrit. Jos sarakkeessa on useampi arvo, pois lukien vastaanoton kynnsarvo-sarake, niin ensimmäinen arvo on tukiaseman arvo.

Lähetysteho	40dBm / 20dBm
Antennivahvistus	3dBi / 20dBi
Häviöt (tx, rx)	2dB, 2dB
Taajuus	390 MHz
Kaistanleveys	100 kHz
Vastaanoton kynnsarvo	-86 (BER 10-6) / -90 (BER 10-3)
KTBF (kohinateho, vastaanottimen herkkyys)	-115dBm / -105dBm
Signaalityyppi	Radiocom
Modulaatiolaji	DQPSK
Siirtonopeus	28.8 kbit/s
Maston korkeus	20 m / 2 m
Yleisin polarisaatio	pysty

Taulukko 6.8 Esikunnan yhteyksien parametrit TETRA-kalustolla

WLAN-tekniikan osalta kalustoparametrit perustuu Cisco Aironet WLAN Adapter 350-laitteen parametreihin [4]. Lähetystehoksi on valittu 15dBm, joka kokeiden perusteella osoittautui tehoksi, jolla simulaatioissa saavutettiin realistinen kantama. Tukiasema toteutetaan samalla tavalla kuin muissakin tekniikoissa kolmella lievästi suuntaavalla antennilla. Liittyjät käyttävät myös suuntaavia antennia samalla tavalla kuin muillakin

tekniikoilla. Liityntälaitteen ja tukiaseman parametrit ovat samat. Antennityyppinä käytetään Parabol-699-4-antennia. Taulukossa 6.9 on WLAN-tekniikan kalustoparametrit.

Lähetysteho	15dBm
Antennivahvistus	3dBi / 20dBi
Häviöt (tx, rx)	2dB, 2dB
Taajuus	2400 MHz
Kaistanleveys	2000kHz
Vastaanoton kynnysarvo	-80 (BER 10-6) / -84 (BER 10-3)
KTBF (kohinateho, vastaanottimen herkkyys)	-91dBm
Signaalityyppi	Radiocom
Modulaatiolaji	QPSK
Siirtonopeus	2 Mbit/s
Maston korkeus	20 m / 2 m
Yleisin polarisaatio	pysty

Taulukko 6.9 Esikunnan yhteyksien parametrit WLAN- kalustolla

WiMAX-tekniikan osalta kalustoparametrit perustuu Airspan AS.MAX-tuotesarjaan. Tukiaseman parametreinä käytetään MacroMAX-tukiaseman parametrejä [3]. Liityntälaitteen parametreinä käytetään ProST-aseman parametrejä. ProST-asema soveltuu sekä ulko- että sisäkäyttöön. Tukiasema toteutetaan samalla tavalla kuin muissakin tekniikoissa kolmella lievästi suuntaavalla antennilla. Liittyjät käyttävät myös suuntaavia antennia samalla tavalla kuin muillakin tekniikoilla. Taulukossa 6.10 on esitetty WiMAX-tekniikan kalustoparametrit. Jos sarakkeessa on useampi arvo, pois lukien vastaanoton kynnysarvo-sarake, niin ensimmäinen arvo on tukiaseman arvo.

Lähetysteho	37dBm / 23dBm
Antennivahvistus	3dBi / 20dBi
Häviöt (tx, rx)	2dB, 2dB
Taajuus	3500 MHz
Kaistanleveys	3500kHz
Vastaanoton kynnysarvo	-86 (BER 10-6) / -90 (BER 10-3)
KTBF (kohinateho, vastaanottimen herkkyys)	-115dBm / -98dBm
Signaalityyppi	Radiocom
Modulaatiolaji	16QAM
Siirtonopeus	8,73 Mbit/s
Maston korkeus	20 m / 2 m
Yleisin polarisaatio	pysty

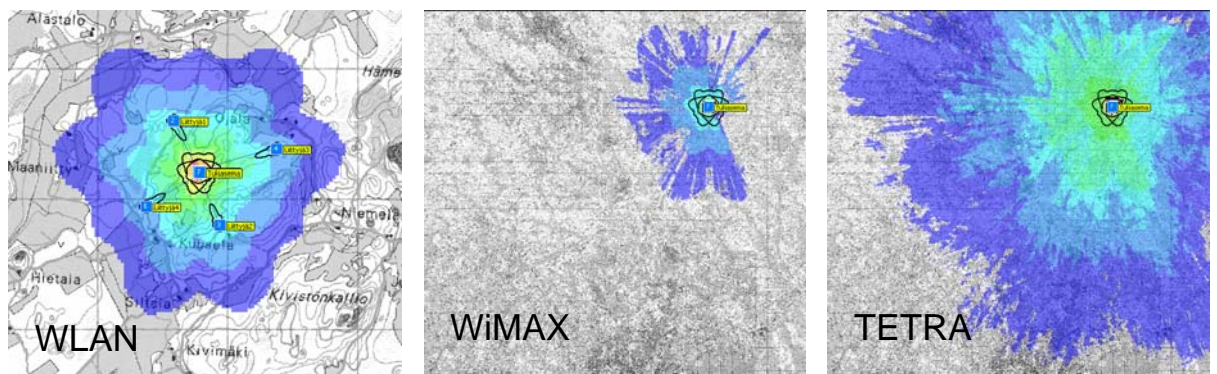
Taulukko 6.10 Esikunnan yhteyksien parametrit WiMAX-kalustolla

Koska tukiasemassa käytetään kolmea suunta-antennia ja ohjelmassa ei tätä salli, niin tukiasemaksi täytyy laittaa kolme radioasemaa. Ohjelma myös laskee yhteysvälit molempiin suuntiin, joten esimerkiksi kahden aseman välille muodostuu kaksi yhteyttä. Toteutettaessa

yhteysvälejä verkkoon muodostui näin ollen 8 yhteysväliä. Kahdesta tukiaseman antennista muodostui yhteydet yhteen tilaajaan ja yhdestä tukiaseman antennista muodostui yhteys kahteen tilaajaan.

6.3.2.1 Esikunnan yhteyksien tiedusteltavuus

Tiedusteltavuus simuloitiin siten, että laskettiin tukiasemien ja liittyjien peittoalueet. Kalustoparametrejä ei ole muutettu miltään osin. Tiedusteluaseman antennin korkeudeksi valittiin 20 m. Tämän vuoksi jokaisen aseman antenninkorkeuteen lisättiin 20 m. Tukiaseman antennin korkeus oli siis 40 m (20 m + 20 m) ja liittyjien 22 m (2 m + 20 m). Peittoalueen laskennan kynnsarvoksi, joka oli samalla havaittavan signaalin heikoin arvo, asetettiin -93 dBm. Kuvassa 6.10 on tiedusteltavuuden peittoalueet eri tekniikoilla. WLAN-kalustolla kuva on pienemmässä mittakaavassa jossa karttapohjan ruudun koko on 1 km* 1 km. Muilla tekniikoilla karttaruudun koko on noin 100 km * 100 km.



Kuva 6.10 Tiedusteltavuus eri tekniikoilla

Liittyjien tiedusteltavuuden peittoalueet jäivät kaikissa tapauksissa tukiaseman peittoalueen alle. WLAN-tekniikalla tiedusteltavuuden peittoalue on todella pieni johtuen pienistä lähetystehoista. TETRA- ja WiMAX-tekniikoiden välillä syntyneet erot johtuivat suurimmaksi osaksi taajuusalueista. Lähetystehoissa oli myös eroa 3 dBm, mutta se ei ollut yhtä merkittävä tekijä kuin käytetty taajuusalue.

6.3.2.2 Esikunnan yhteyksien toimivuus häirinnän vaikutuksen alla

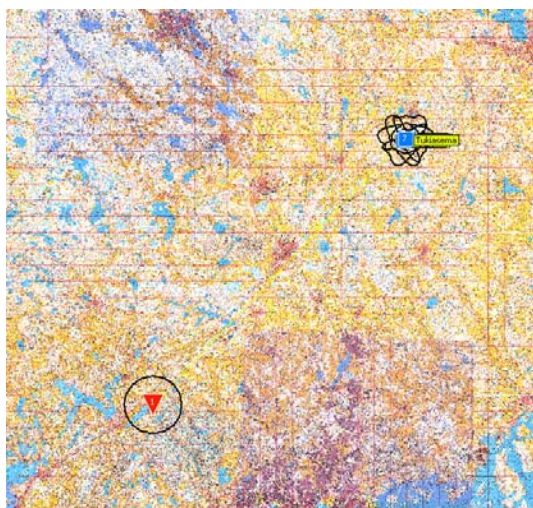
Häirinnän vaikutusta tutkittiin kolmen eri häirintälajin näkökulmasta, jotka olivat: taustahäirintä, saattohäirintä ja lähihäirintä. Tutkittavien tekniikoiden parametrit on mainittu edellä. Häirintä-simulaatioissa toteutettiin niin sanotusti pahin mahdollinen vaihtoehto. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikutus kohdistettiin juuri oikealle taajuudelle ja kaistanleveydelle.

Häirintälähetimissä käytettiin ympärisäteileviä antenneja sekä samoja taajuuksia kuin hyöty-yhteyksissä. Muuten häirintä-simulaatiot toteutettiin samalla tavalla kuin linkkiyhteyksimulaatiot. Taulukossa 6.5 on lueteltu simuloitavat häirintälajit. Häirintälähetimien parametrit valittiin simulaatioissa häirittävän järjestelmän mukaan. Häirinnällä pyrittiin vaikuttamaan koko hyöty-yhteyden kaistanleveyteen. Taulukossa 6.11 on esitetty häirintälähettimen parametrit.

Lähetysteho	2000, 500 tai 10 W
Antennivahvistus	0dBi
Häviöt (tx, rx)	0dB, 0dB
Taajuus	390 MHz / 2400 MHz / 3500 MHz
Kaistanleveys	100 kHz / 2000kHz / 3500kHz
Yleisin polarisaatio	pysty

Taulukko 6.11 Esikunnan yhteyksien häirintälähettimen parametrit

Simulaatiot toteutettiin Point-moodissa, jossa jokainen radioasema asetetaan erikseen. Tämän jälkeen ohjelma laskee kaikki mahdolliset yhteydet radioasemien välillä. Häirintää tarkasteltaessa ohjelma ilmoittaa suoraan toimiiko yhteys vai ei. Esikunnan tietoliikennesimulaatioissa häirinnän vaikutusta tarkasteltiin radioyhteyksien toimivuudella. Simulaatioissa muodostettiin esikunnan tietoliikenneverkko, jota häirittiin taulukon 6.5 mukaisesti. Kuvassa 6.11 on esitetty taustahäirintä-simulaatio. Kuvassa sininen neliö osoittaa verkon paikan ja punainen kärkikolmio häirintälähettimen paikan.



Kuva 6.11 Esikunnan yhteyksien taustahäirintä

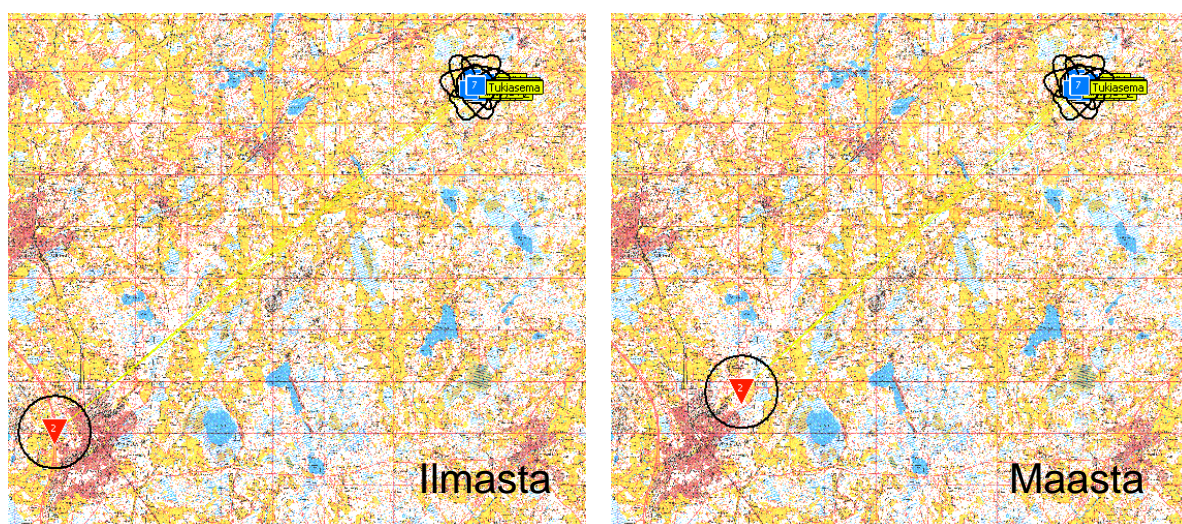
Etäisyyttä häirintälähettimen ja verkon välillä oli noin 70 km. Häirintälähetin asetettiin 1000 metrin korkeuteen ja häirintätehoksi asetettiin 500 W. Häirintälähetimessä käytettiin ympärisäteilevää antennia. Taustahäirinnällä kyettiin vaikuttamaan vain WLAN-tekniikalla

toteutetun verkon yhteen yhteysväliin. Tämä johtui WLAN-tekniikan huomattavasti alhaisemmasta lähetystehoista verrattuna muihin tekniikoihin. Verkko oli toteutettu WLAN-tekniikalla kannalta pitkillä yhteysväleillä, kun taas muiden tekniikoiden kannalta yhteysvälit olivat lyhyitä. Taustahäirintä häiritsi WLAN-tekniikalla toteutetun verkon toimivuutta jonkin verran. Taulukossa 6.12 on lueteltu eri tekniikoiden toimivuus taustahäirinnän vaikutuksen alla.

	TETRA	WLAN	WiMAX
Yhteydet	8 kpl	8 kpl	8 kpl
Häirityt yhteydet	0 kpl	1 kpl	0 kpl
Toimivat yhteydet	8 kpl	7 kpl	8 kpl

Taulukko 6.12 Esikunnan yhteydet taustahäirinnän vaikutuksen alla

Saattohäirintä-simulaatiossa häirinnän vaikutusta tutkittiin ilmasta ja maasta toteutettuna. Ilmasta häirittäessä etäisyys häirintälähtimestä verkkoon oli noin 30 km. Häirintälähtin asetettiin 300 m korkeuteen ja häirintätehoksi asetettiin 500 W. Häirintälähtimessä käytettiin ympärisäteilevää antennia. Maasta häirittäessä etäisyys häirintälähtimestä verkkoon oli noin 25 km. Häirintälähtimen antenni asetettiin 20 m korkeuteen ja häirintätehoksi asetettiin 2000 W. Kuvassa 6.12 on esitetty saattohäirintä-simulaatio. Sininen neliö osoittaa verkon paikan ja punainen kärkekolmio häirintälähtimen paikan.



Kuva 6.12 Esikunnan yhteyksien saattohäirintä

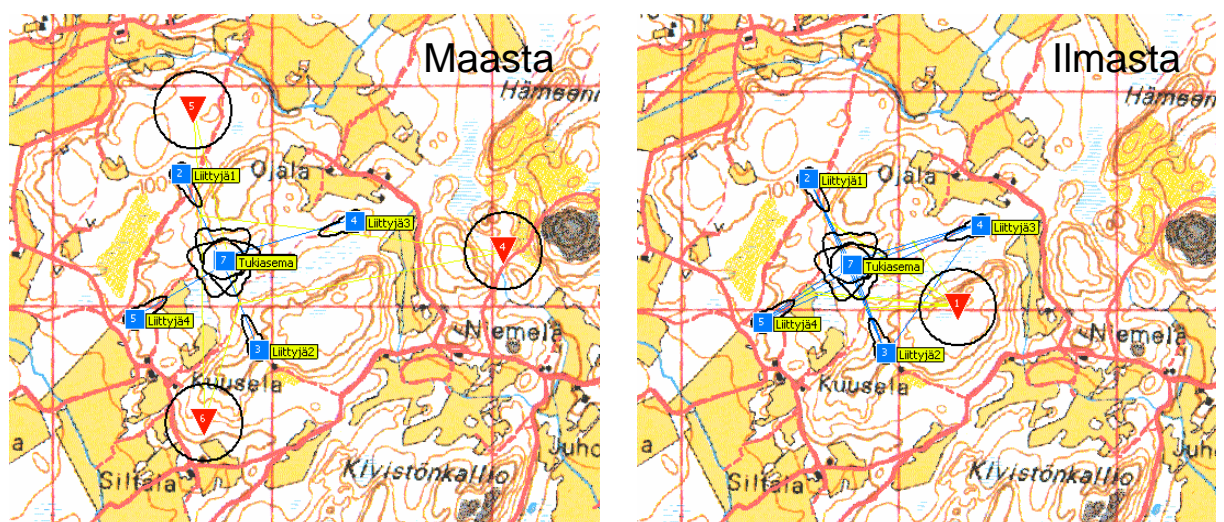
Saattohäirinnällä ei TETRA- ja WiMAX-tekniikoita ei kyetty häiritsemään edelleenkään, kun taas WLAN-tekniikalla verkko oli kärsinyt jo merkittävän suuret tappiot. Saattohäirinnällä

kyettiin lamauttamaan WLAN-tekniikalla toteutettu verkko. Taulukossa 6.13 on lueteltu yhteysvälien toimivuus saattohäirinnän vaikutuksen alla.

Häirintälaji		TETRA	WLAN	WiMAX
Saattohäirintä ilmasta	Yhteydet	8 kpl	8 kpl	8 kpl
	Häirityt yhteydet	0 kpl	5 kpl	0 kpl
	Toimivat Yhteydet	8 kpl	3 kpl	8 kpl
Saattohäirintä maasta	Yhteydet	8 kpl	8 kpl	8 kpl
	Häirityt yhteydet	0 kpl	4 kpl	0 kpl
	Toimivat Yhteydet	8 kpl	4 kpl	8 kpl

Taulukko 6.13 Esikunnan yhteyksien toimivuus saattohäirinnän vaikutuksen alla

Lähihäirintä-simulaatiossa simuloitiin tykistö- ja raketinheitinlevitteisien sekä lennokkiin asennettujen lähihäirintälähettimien vaikutusta. Lähihäirintälähettimet sijoitettiin verkon ympärille alle 1000 m etäisyydelle. Maasta häiritessä käytettiin kolmea häirintälähetintä, mutta ilmasta häiritessä käytettiin vain yhtä. Tykistö- ja raketinheitinlevitteisen lähihäirintälähettimen häirintäteho on 10 W ja korkeus 1 m. Lennokkiin asennettun lähihäirintälähettimen häirintäteho on 10 W ja korkeus 300 m. Kuvassa 6.13 on esitetty lähihäirintä-simulaatio. Siniset neliöt osoittavat radioasemien paikat ja punaiset kärkikolmiot häirintälähettimien paikat.



Kuva 6.13 Esikunnan yhteyksien lähihäirintä

Maasta lähihäiritessä ei kyetty edelleenkaan vaikuttamaan TETRA- ja WiMAX-yhteyksiin. Tämä johtui tekniikoiden yhteysetaisyyten nähden suurista lähetystehoista ja

lähihäirintälähettimien signaalin voimakkaasta vaimenemisesta. Tämä johtui häirintälähettimien sijoittelusta matalalle, joka aiheutti maastollisia esteitä yhteysvälille. WLAN-tekniikalla toteutettu verkko kyettiin lamauttamaan jo maasta lähes täysin. Ilmasta häirittäessä kaikki WLAN-yhteydet saatiin lamautettua. Tämä johtui vapaasta tilasta häirinnän ja verkon välillä ja WLAN-tekniikan alhaisista lähetystehoista. TETRA- ja WiMAX-tekniikoilla toteutettu verkko saatiin myös lamautettua. TETRA-tekniikka sietä hieman paremmin häirinnän. Tämä saattoi johtua pienestä erosta lähetystehoissa sekä käytetystä taajuusalueesta. TETRA-tekniikan toimintataajuusalueilla monitie-etenemisestä on hyötyä, kun taas WiMAX-tekniikalla hyötyä ei juurikaan ole. Taulukossa 6.14 on lueteltu lähihäirinnän vaikutus tietoliikenneyhteyksiin.

Häirintälaji		TETRA	WLAN	WiMAX
Lähihäirintä maasta	Yhteydet	8 kpl	8 kpl	8 kpl
	Häirityt yhteydet	0 kpl	2 kpl	0 kpl
	Toimivat Yhteydet	8 kpl	6 kpl	8 kpl
Lähihäirintä ilmasta	Yhteydet	8 kpl	8 kpl	8 kpl
	Häirityt yhteydet	3 kpl	8 kpl	4 kpl
	Toimivat Yhteydet	5 kpl	0 kpl	4 kpl

Taulukko 6.14 Esikunnan yhteydet lähihäirinnän vaikutuksen alla

6.3.3 Johtopäätökset

Esikunnan yhteyksien toteutukseen käytettynä tekniikoiden soveltuvuuksissa oli selviä eroja. Erot muodostuivat lähinnä käytettyjen taajuuksien, lähetystehojen ja tiedonsiirtokapasiteettien johdosta. Kaikilla tekniikoilla kyettäisiin joka tapauksessa kuitenkin toteuttamaan skenaarion mukainen verkko. Kokonaisuudessaan WiMAX-tekniikka tuntuisi olevan paras vaihtoehto verkon toteutus ratkaisuksi. TETRA-tekniikka sietää parhaiten häirintää, mutta se kärsii pienestä tiedonsiirtonopeudesta. TETRA-tukiasema on myös tiedusteltavissa hyvin pitkän matkan päästä, mutta jos käytetään valmiin infrastruktuurin tukiasemaa ei tiedusteltavuuden merkitys ole kovinkaan suuri. TETRA-tekniikan selkeä etu on VIRVE-verkon valmis infrastruktuuri. WLAN-tekniikalla tiedonsiirtonopeus on riittävä, mutta pienten lähetystehojen vuoksi yhteys on erittäin herkkä häiriöille. WLAN-tukiaseman tiedusteluetäisyys on niin lyhyt, että voidaan katsoa sen olevan tiedustelemattomissa. WiMAX-tekniikan tiedonsiirtokapasiteetti on riittävä ja se sietää hyvin häirintää näin lyhyillä

yhteysetäisyyksillä. WiMAX-tekniikan tiedusteltavuus on kohtalaista luokkaa ja maasta tekniikkaa ei kyetä tiedustelemaan merkittävän kaukaa.

7 POHDINTA

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka tutkimusongelmien ratkaisu onnistui, mitä rajoituksia liittyi tutkimusmenetelmään, miten tutkimus lisäsi tietoa tutkittavalla alueella, missä määrin tulokset ovat yleistettävissä sekä millaisia jatkotutkimushaasteita tutkimus on tuottanut.

Tutkimuksessa tutkimusongelmien ratkaiseminen aloitettiin alaongelmista. Ensin työssä perehdyttiin toimintaympäristöön ja nykyisiin ratkaisuihin, sekä tehtiin johtopäätöksiä toimintaympäristöstä. Tämän jälkeen perehdyttiin eri tekniikoihin ja niillä toteutettuihin ratkaisuihin, sekä tehtiin johtopäätöksiä. Näin pyrittiin muodostamaan kokonaiskuva siitä miten tekniikoita voitaisiin ALVI-ympäristössä käyttää. Tämän jälkeen kartoitettiin mitä uhkia toimintaympäristössä voisi tekniikoihin kohdistua. Tämän oli tarkoitus luoda pohjaa tekniikoiden käytettävyyden arviointiin ja simulointiin. Luvussa kuusi luotiin kaksi skenaariota joissa tekniikoita voitaisiin käyttää. Tämän jälkeen tekniikoiden soveltuvuutta skenaarioiden mukaisiin käyttötarkoituksiin arvioitiin ja tuloksia vahvennettiin Warfare-ohjelmalla ajetuilla simulaatioilla. Tämän jälkeen kirjattiin tulokset ylös ja tehtiin johtopäätöksiä. Tällä pyrittiin pääongelman ratkaisuun. Pääongelma osoittautui kuitenkin edelleen hieman laajaksi ja ongelman ratkaisu jäi jokseenkin yleiselle tasolle.

Tutkimusmenetelmiin liittyvät rajoitukset koskivat lähinnä simulaatioita. Simulaatioissa kalustoparametrien valinta perustui pitkälti laitevalmistajien dokumentaatioihin, joista ei kaikkia parametrejä löytynyt. Antenneina käytettiin ohjelmasta löytyviä antenniparametrejä jotka eivät välttämättä vastaa todellisuudessa käytettävien kalustoparametrien arvoja. Simulaatio osoittautui kuitenkin hyväksi tavaksi tutkia sähkömagneettisen säteilyn ilmiöitä ja simulaatioilla saatiin jonkinlainen tilastollinen arvio tekniikoiden soveltuvuudesta skenaarioihin.

Tutkimus onnistui jossain määrin tuottamaan lisää tietoa tutkittavalle alueelle. Tässä oli kuitenkin melko suuria eroja tekniikoiden kesken, johtuen aikaisemmasta tutkimuksesta. Parhaiten onnistuttiin WiMAX-tekniikan osalta, koska aikaisempaa tutkimusta ei kovinkaan paljoa ole. Täytyy kuitenkin muistaa, että tulokset perustuvat tilastollisuuksiin ja jokseenkin valistuneisiin arvioihin. Tämän vuoksi tuloksia täytyy tarkastella kriittisesti. Tutkimuksessa onnistuttiin kuitenkin tuomaan uusia näkökulmia aiheeseen.

Tutkimuksen tulokset ovat jokseenkin yleistettävissä mutta, koska tekniikan toimivuus riippuu mm. laite ratkaisuista, ei tuloksia voida täysin yleistää. Tulokset on myös tuotettu suhteellisen pienellä otannalla, joka lisää niiden virhemarginaalia.

Tutkimuksen tekemisen yhteydessä havaittiin joitain tarpeita jatkotutkimukselle. TETRA-tekniikan osalta tulisi tutkia järjestelmän päivittämismahdollisuuksia ja sillä mahdollisesti saavutettavia etuja ja uusia käyttömahdollisuuksia. Jos olemassa olevan järjestelmän suorituskykyä voisi nostaa, tulisi tutkia onko se kannattavaa ja tarpeellista. WiMAX-tekniikan osalta tulisi tutkia saavutetaanko tekniikalla liikkuvuutta, vai toimiiko kalusto vain linkkiyhteys-tyyppisesti.

LÄHTEET

- [1] Ahvenainen M, Langattomien Lähiverkkojen Turvallisuus, Diplomityö, 2003
- [2] Alueelliset viestijoukot, opetusmoniste, Viesti Rykmentti, Viesti- ja sähkötekniikkakoulu, Riihimäki
- [3] AS.MAX, A Complete Range of WiMAX Solutions
www.airspan.com, viitattu 21.2.2006
- [4] Cisco Aironet Wireless LAN Adapters Hardware Installation Guide,
www.cisco.com, viitattu 21.2.2006
- [5] Heinänen Jukka, TETRA-tekniikan käyttö pohjoismaisessa Prikaatissa, Pro Gradu, Maanpuolustuskorkeakoulu, Santahamina, 2003
- [6] Hämäläinen Pertti, WiMAX tiettömän taipaleen laajakaista, Tietokone, huhtikuu/2005
- [7] International Standard ISO/IEC 8802-11:2005(E), Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 2005
- [8] IEEE Standard 802.16™/Conformance03-2004, Part 3: Radio Conformance Tests (RCT) for 10–66 GHz WirelessMAN-SC™ Air Interface, 2004
- [9] Intel, Adaptive Modulation (QPSK, QAM)
www.intel.com, viitattu 21.2.2006
- [10] Intel, Orthogonal Frequency Division Multiplexing
www.intel.com, viitattu 21.2.2006
- [11] IEEE 802.16a Standard and WiMAX, Igniting Broadband Wireless Access, White Paper
www.wimaxforum.org, viitattu 21.2.2006

- [12] Korkiamäki Ilkka, TETRA järjestelmän sotilaalliset käyttömahdollisuudet, Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, Oy Edita Ab, Helsinki, 2001
- [13] Kosola Jyri, Jokinen Janne, Elektroninen sodankäynti osa 1 – taistelun viides dimensio, Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan Laitos, Edita Prima Oy, Helsinki, 2004
- [14] Kosola Jyri, Solante Tero, Digitaalinen taistelukenttä informaatioajan sotakoneen tekniikka, Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, Edita Prima Oy, Helsinki, 2003
- [15] Laakso-Kuivalainen Päivi, Overview of TETRA and its Services and Facilities, www.tetramou.com, viitattu 21.2.2006
- [16] Mastonet, www.mastonet.fi, viitattu 21.2.2006
- [17] MBTS 1.1 Dimetra Base Station, www.motorola.com, viitattu 21.2.2006
- [18] Minilink™ E PV:n käytössä, Viesti Rykmentti, Riihimäki
- [19] MTP850 Specifications, www.motorola.com, viitattu 21.2.2006
- [20] Multipoint-verkko, www.multipoint.fi, viitattu 21.2.2006
- [21] NOKIA TETRA Touch 4 – 2004, Nokia TETRA customer newsletter, www.nokia.com, viitattu 21.2.2006
- [22] NOKIA, The fundamentals of TETRA data, Press Backgrounder, November 2004, www.nokia.com, viitattu 21.2.2006

- [23] Teknisen kehityksen suuntalinjat, Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, Edita Oyj, Helsinki, 2002
- [24] Teknologian kehitys, Sotatekninen arvio ja ennuste 2020, osa 1, Pääesikunta Sotatalousosasto, Edita Prima Oy, Helsinki, 2004
- [25] Teknologian kehitys, Sotatekninen arvio ja ennuste 2020, osa 2, Pääesikunta Sotatalousosasto, Edita Prima Oy, Helsinki, 2004
- [26] Viestimies 2005, Viestiupseeriyhdistys r.y., RT-Print Oy, Pieksämäki, 2005
- [27] VIRVE Uutiset, Syyskuu 2005, Suomen Erillisverkot Oy, www.virve.com, viitattu 21.2.2006
- [28] Viranomaisradioverkon (VIRVE) käyttöön oikeutetut tahot, Esitys, Suomen Erillisverkot Oy, 2004, www.virve.com, viitattu 21.2.2006
- [29] Yhtymän Viestitoimintaopas, Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, Ykkös-Offset Oy, Vaasa, 2001, **VIRANOMAISKÄYTTÖ**

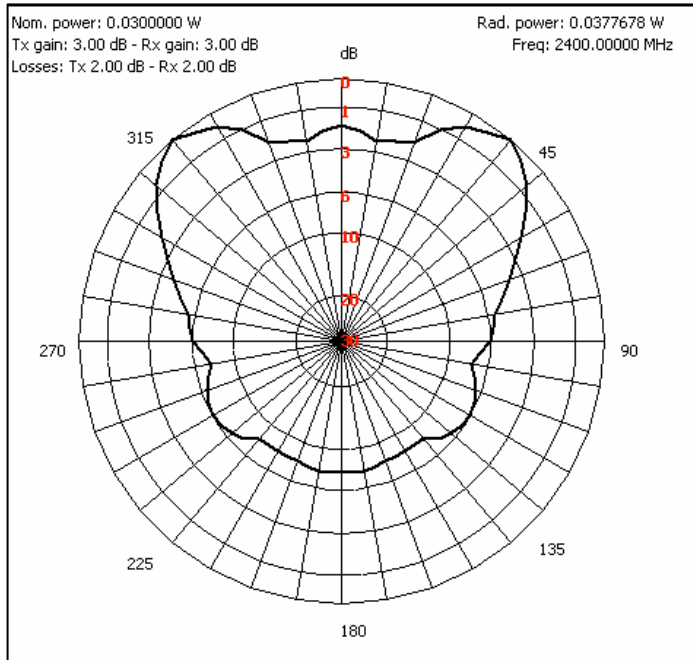
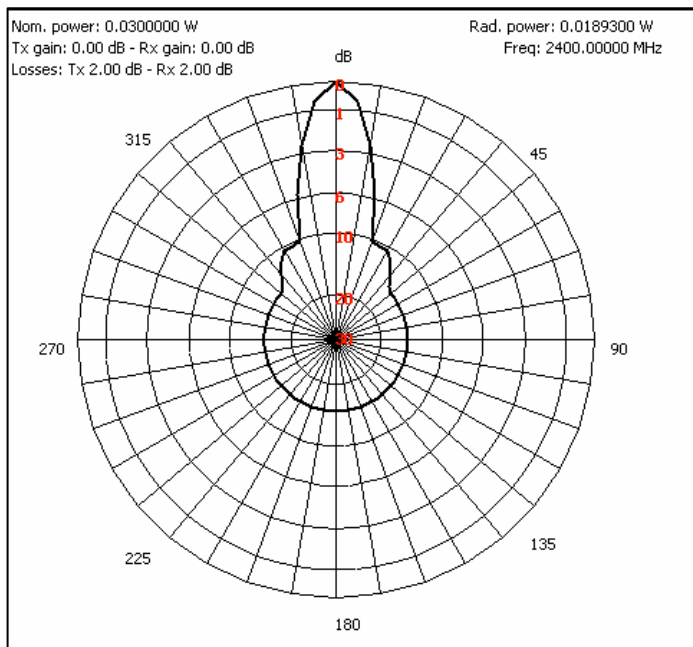
LIITTEET

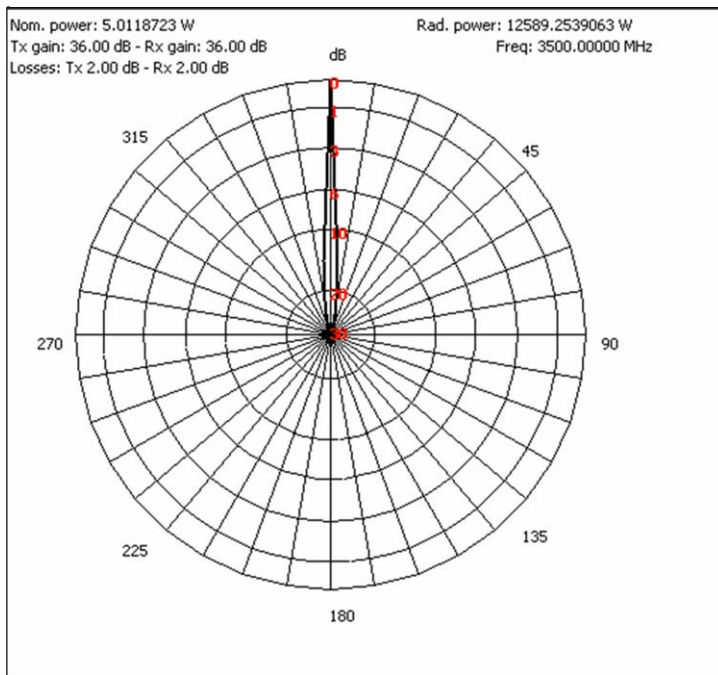
- Liite 1 Antennien suuntakuviot

- Liite 2 Linkkiyhteysvälien maastoprofiilit

- Liite 3 Esikunnan yhteysvälien maastoprofiilit

- Liite 4 Esikunnan yhteyksien häirinnän tehot

ANTENNIEN SUUNTAKUVIOT**Esikunnan tukiaseman antennin suuntakuvio****Esikunnan liittjän antennin suuntakuvio**

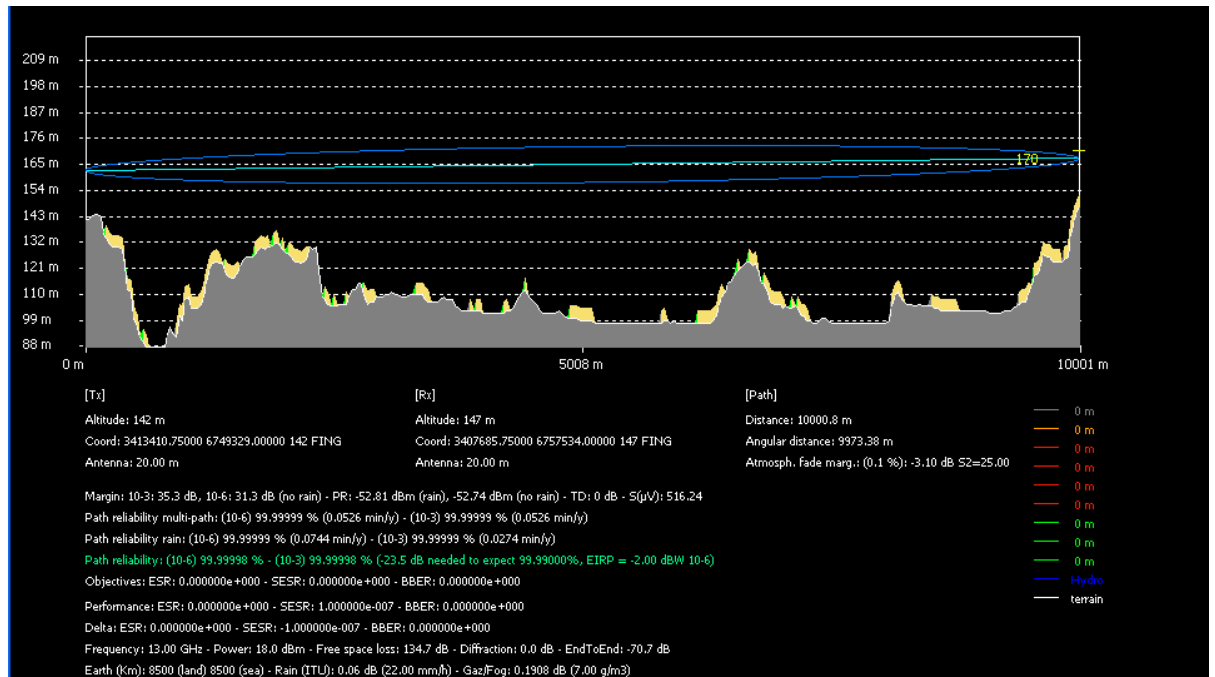


Linkkiyhteyden antennin suuntakuvi

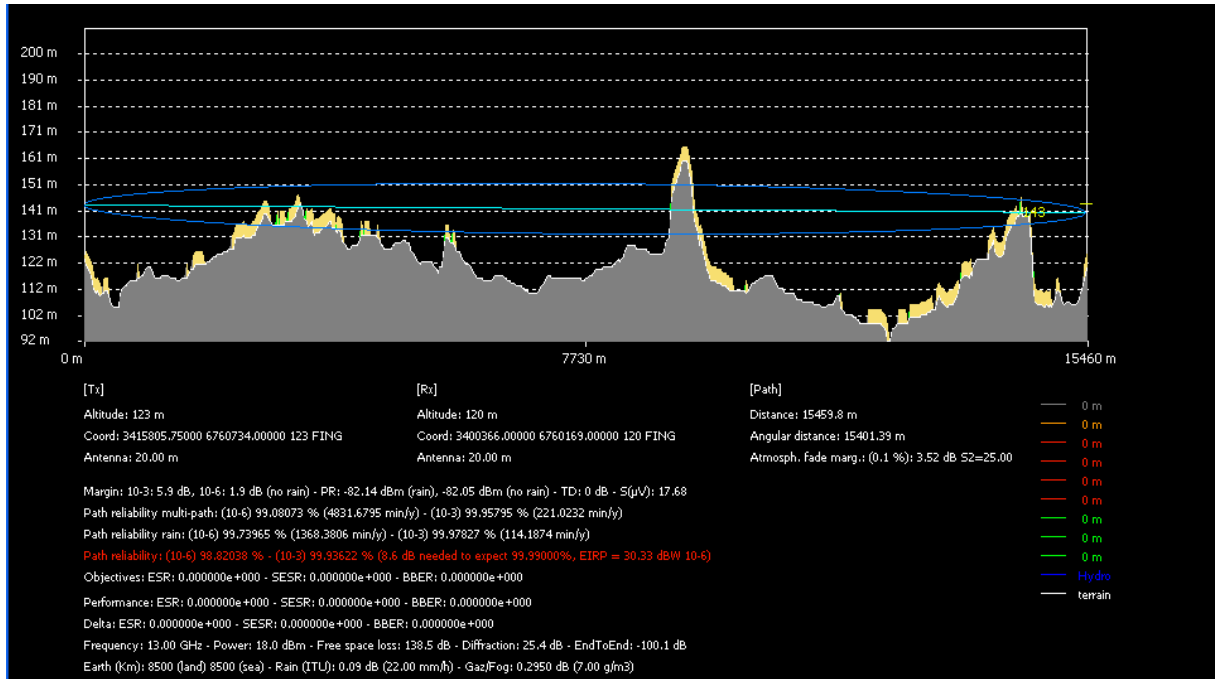
LINKKIYHTEYSVÄLIEN MAASTOPROFIILIT

- Suora viiva on optinen yhteys
- Fresnelin 1. vyöhyke on sininen
- Maastoprofiili näkyy kuvassa harmaana
- Puusto näkyy maaston pinnalla korkeudesta kertovilla väreillä

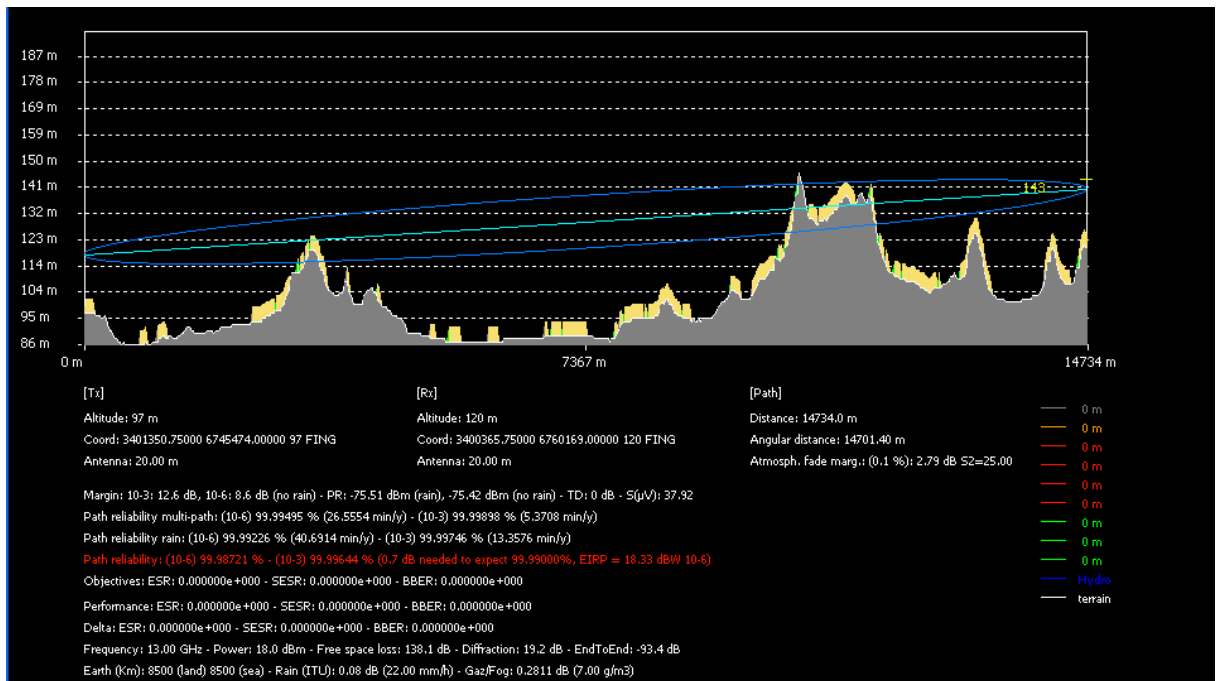
Jänne1



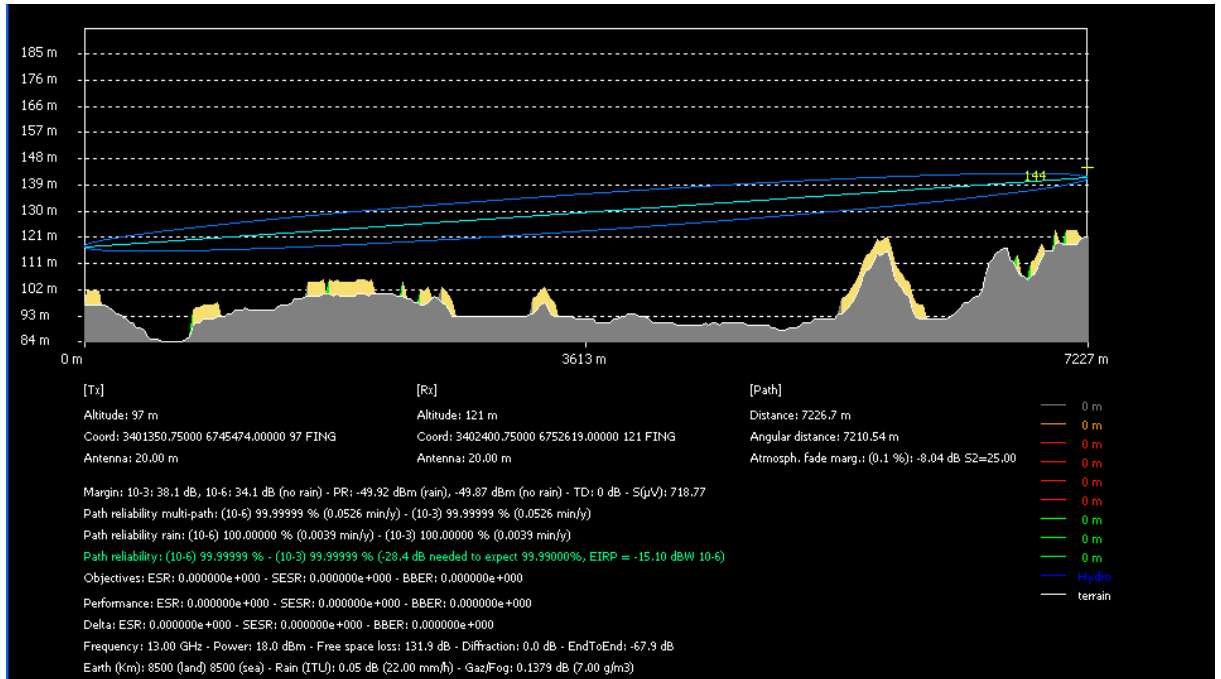
Jänne2



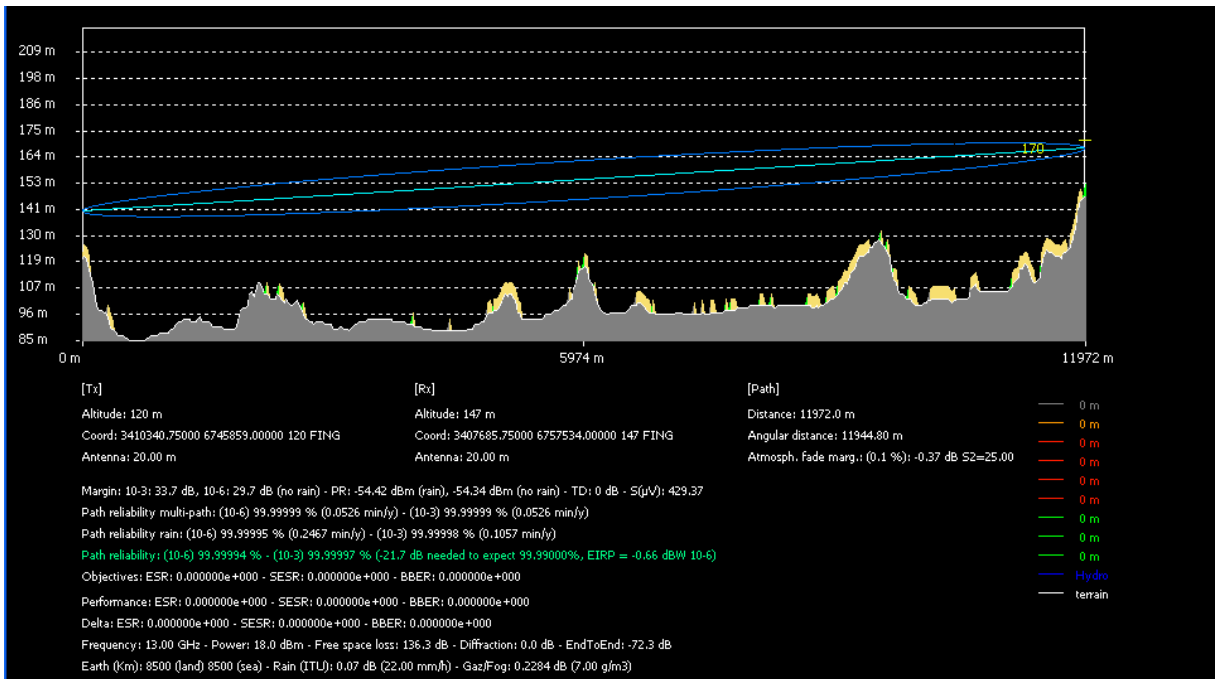
Jänne3



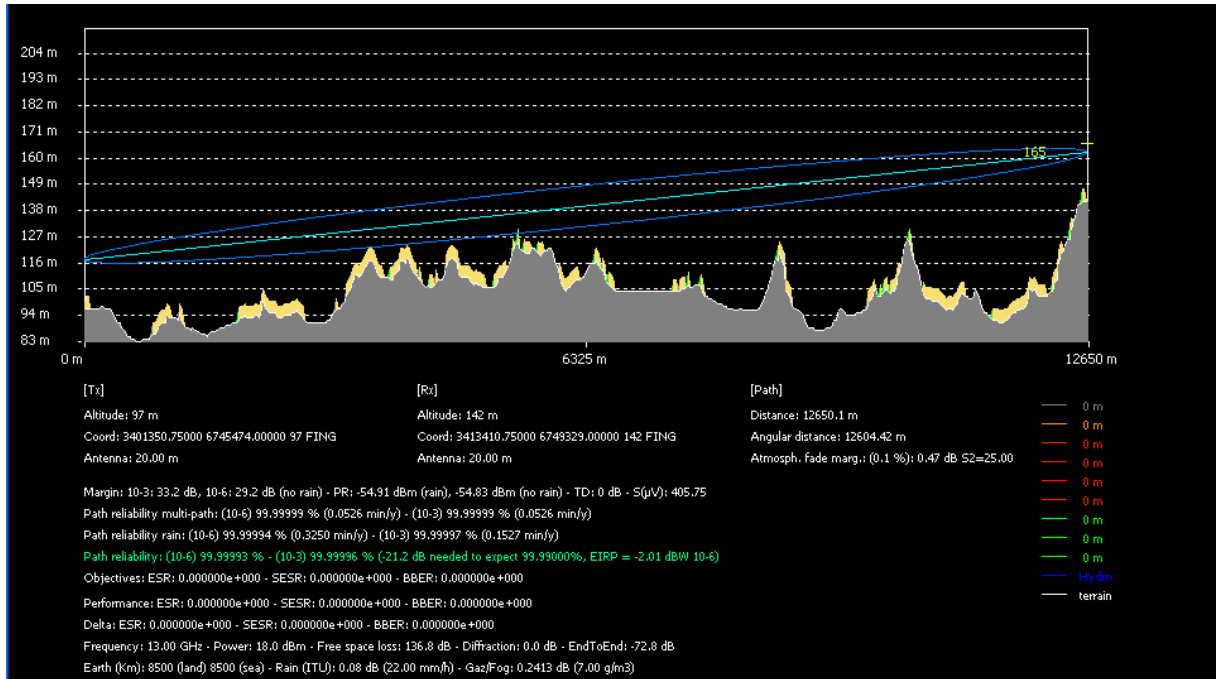
Jänne 4



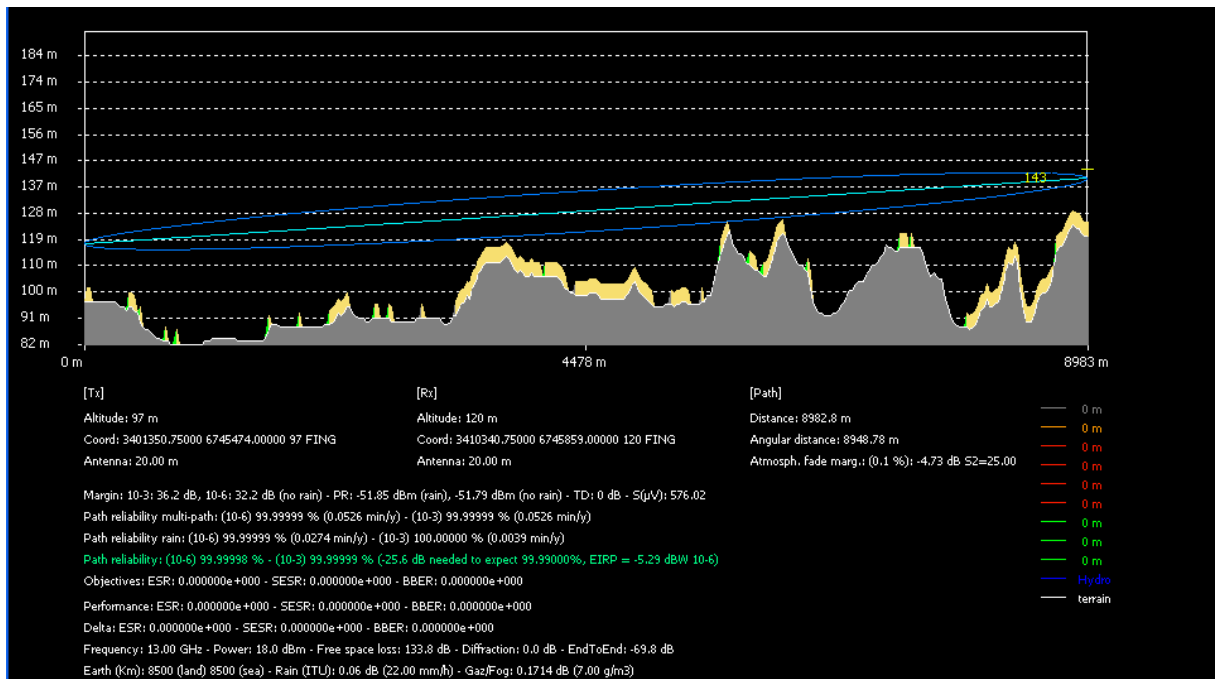
Jänne5



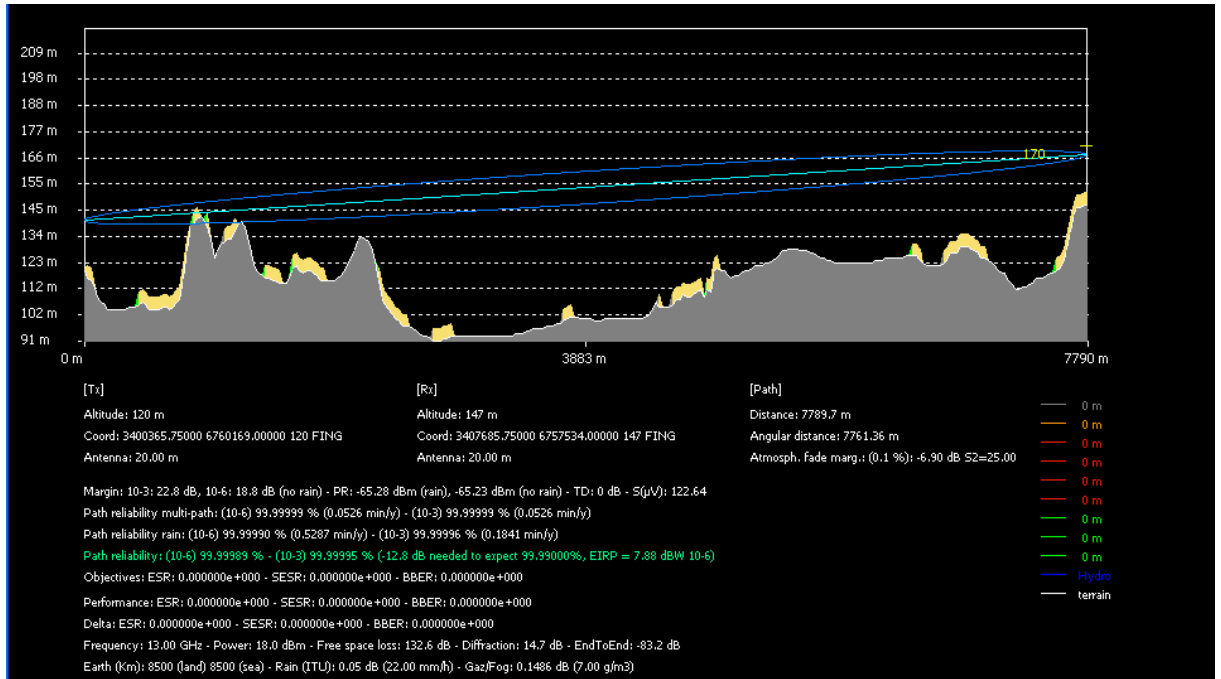
Jänne6



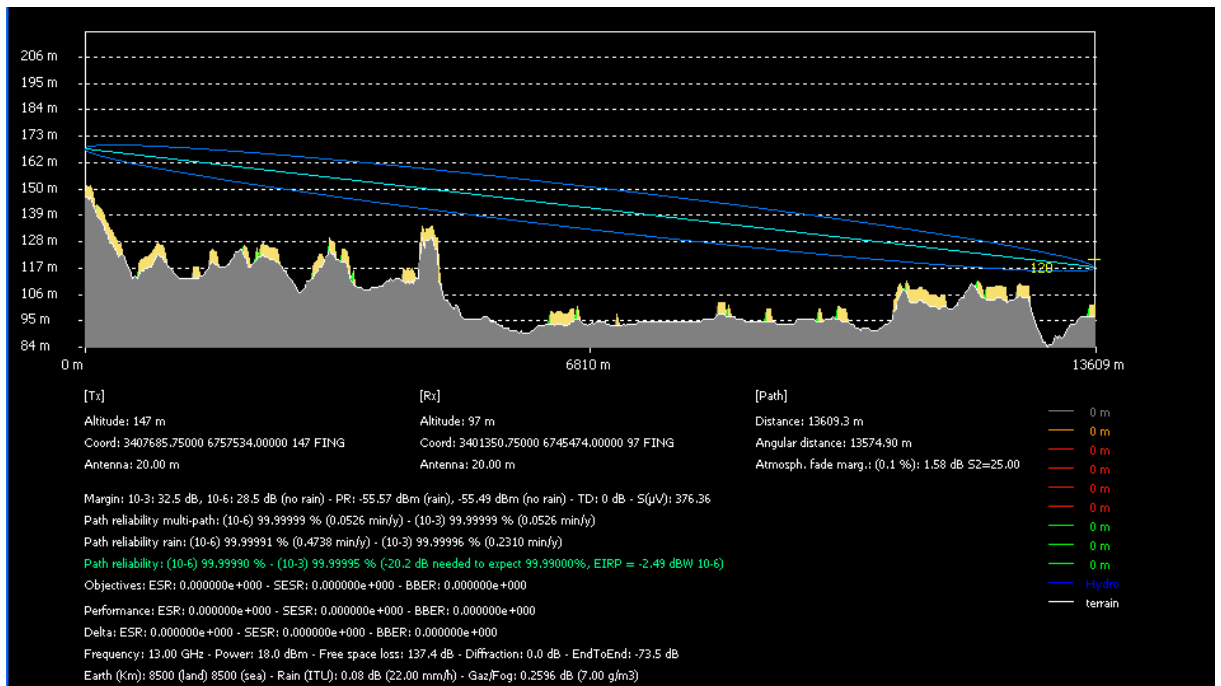
Jänne7



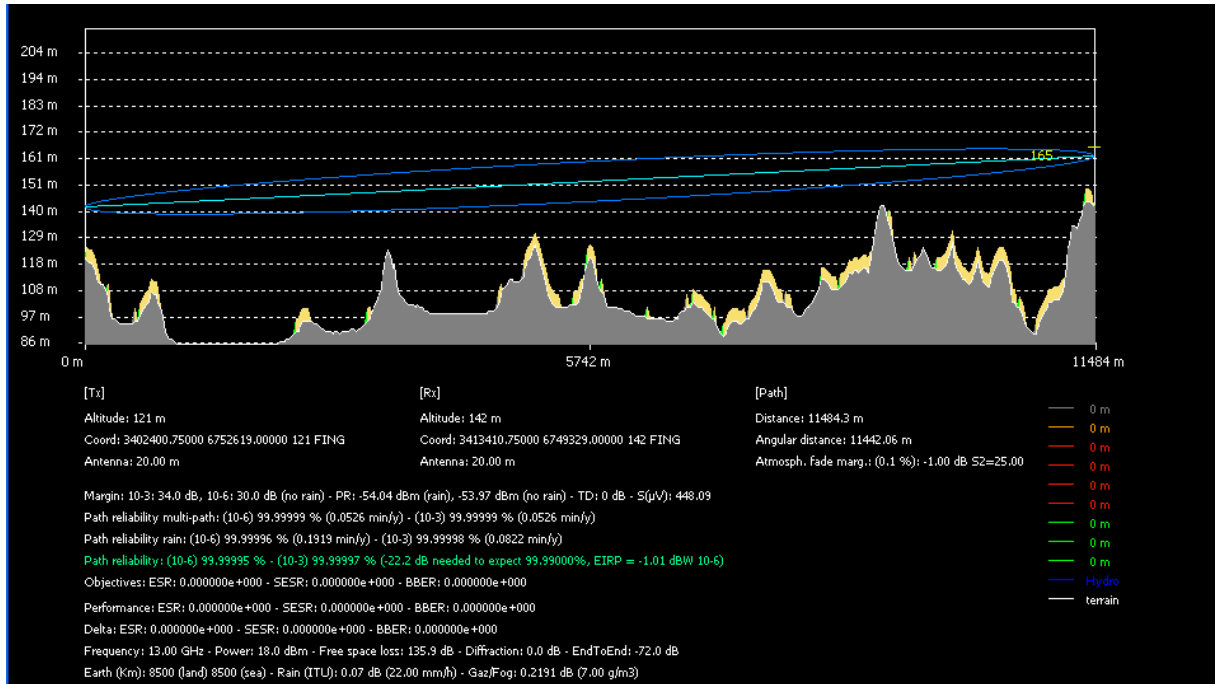
Jänne8



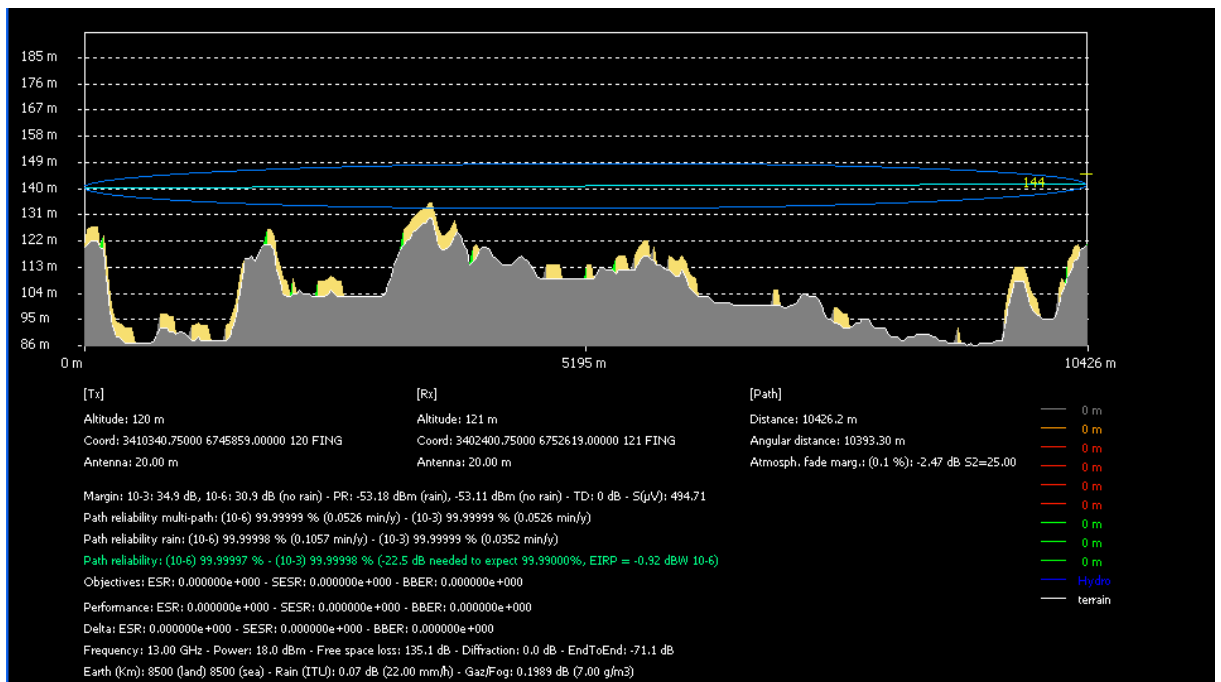
Jänne9



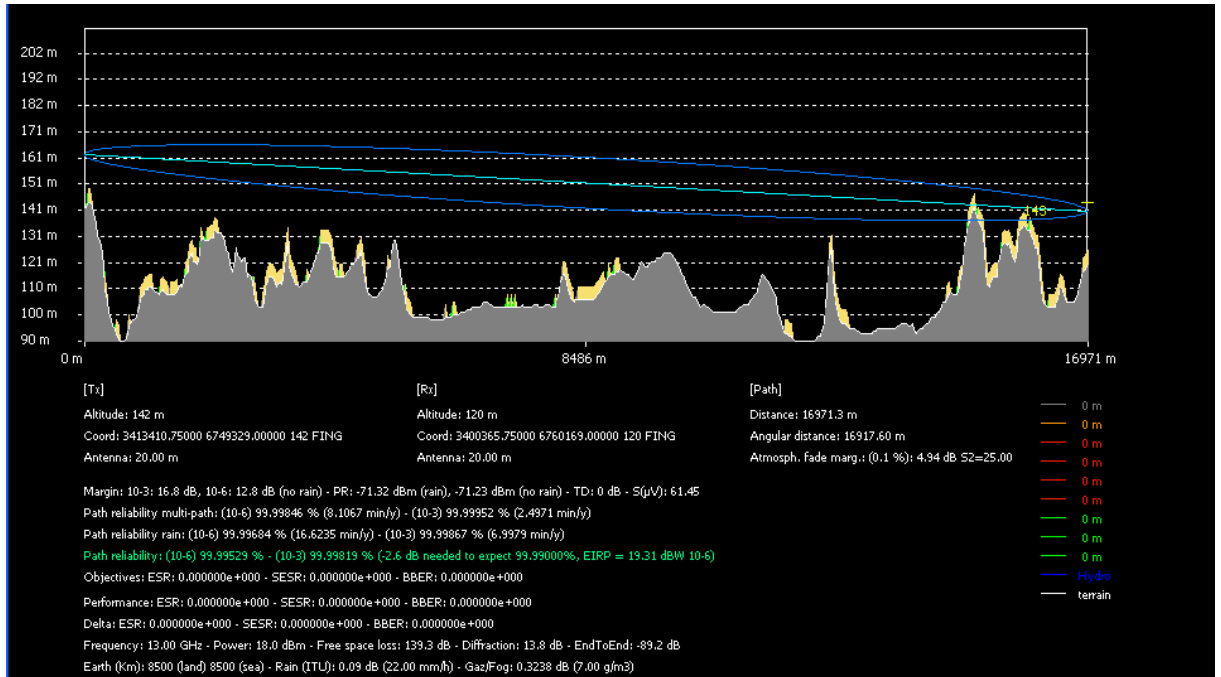
Jänne10



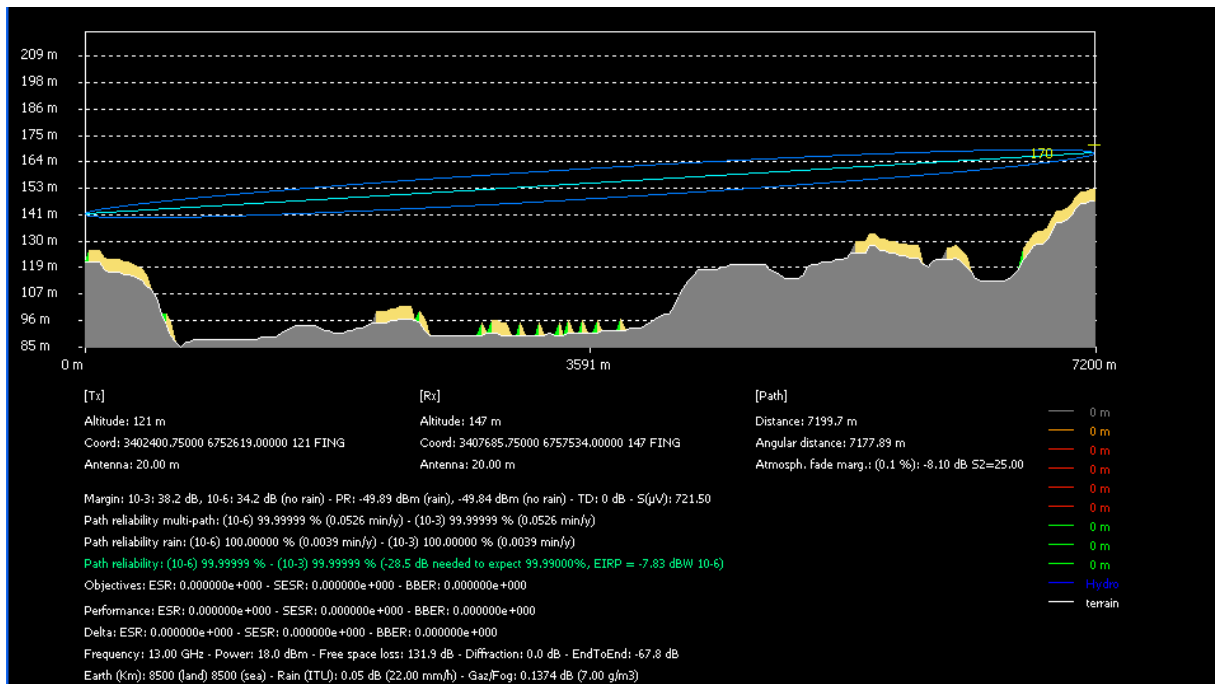
Jänne11



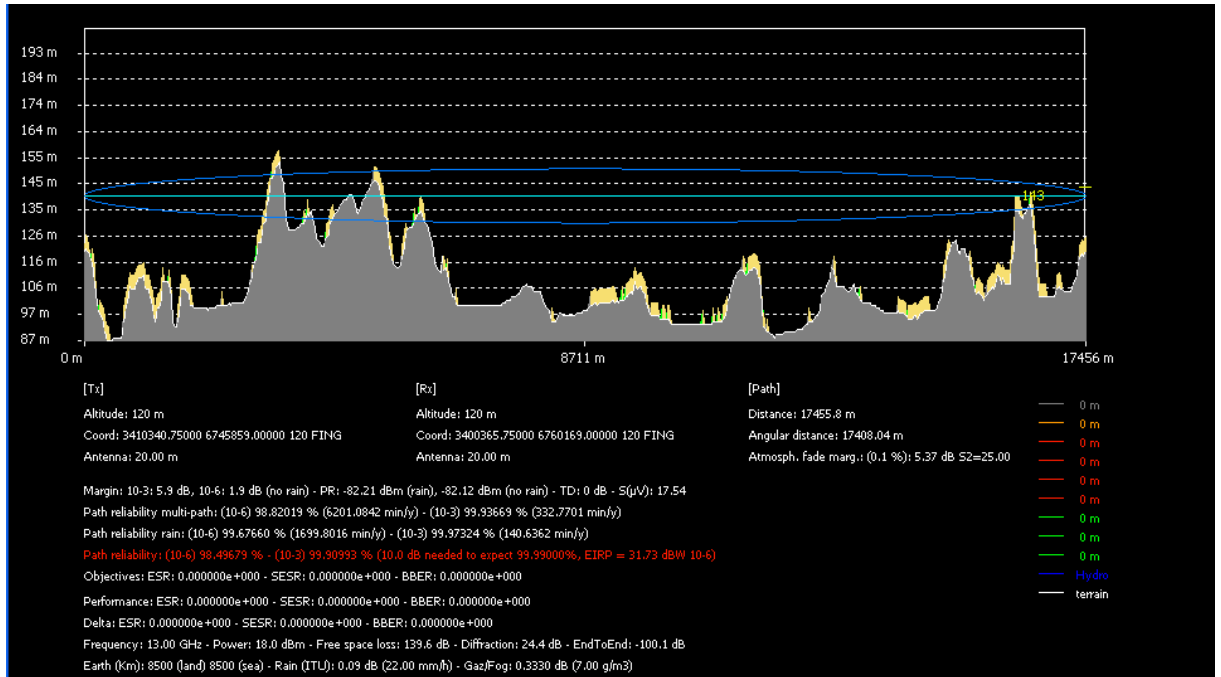
Jänne12



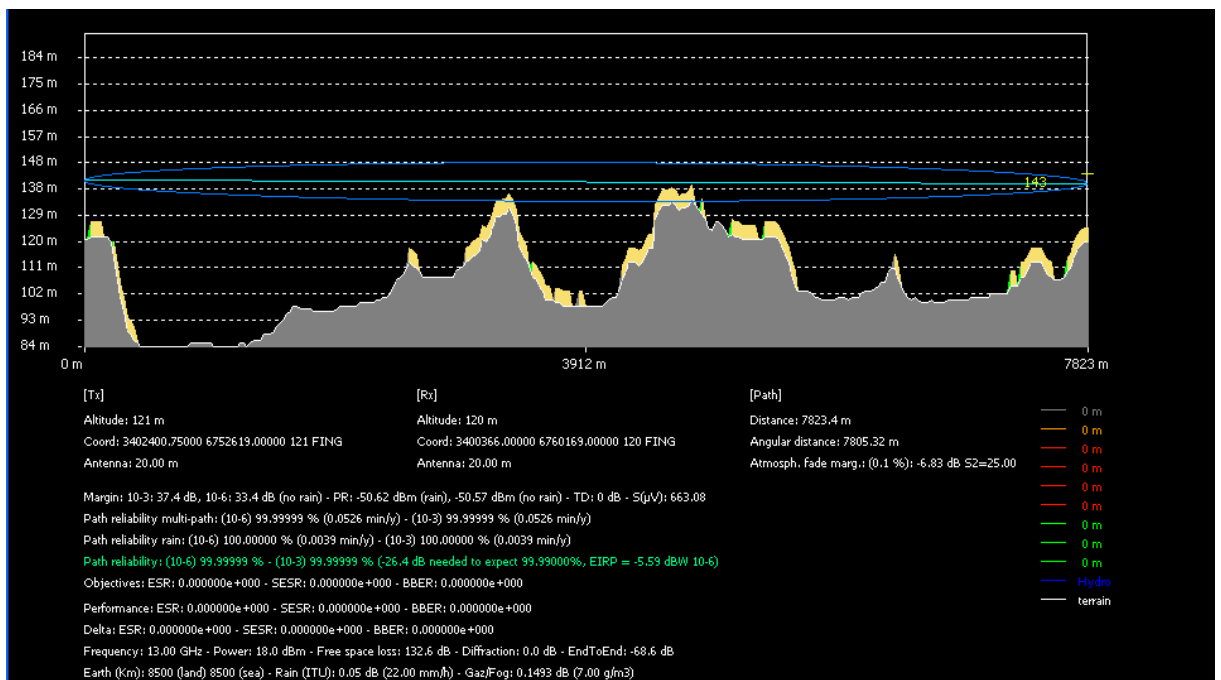
Jänne13



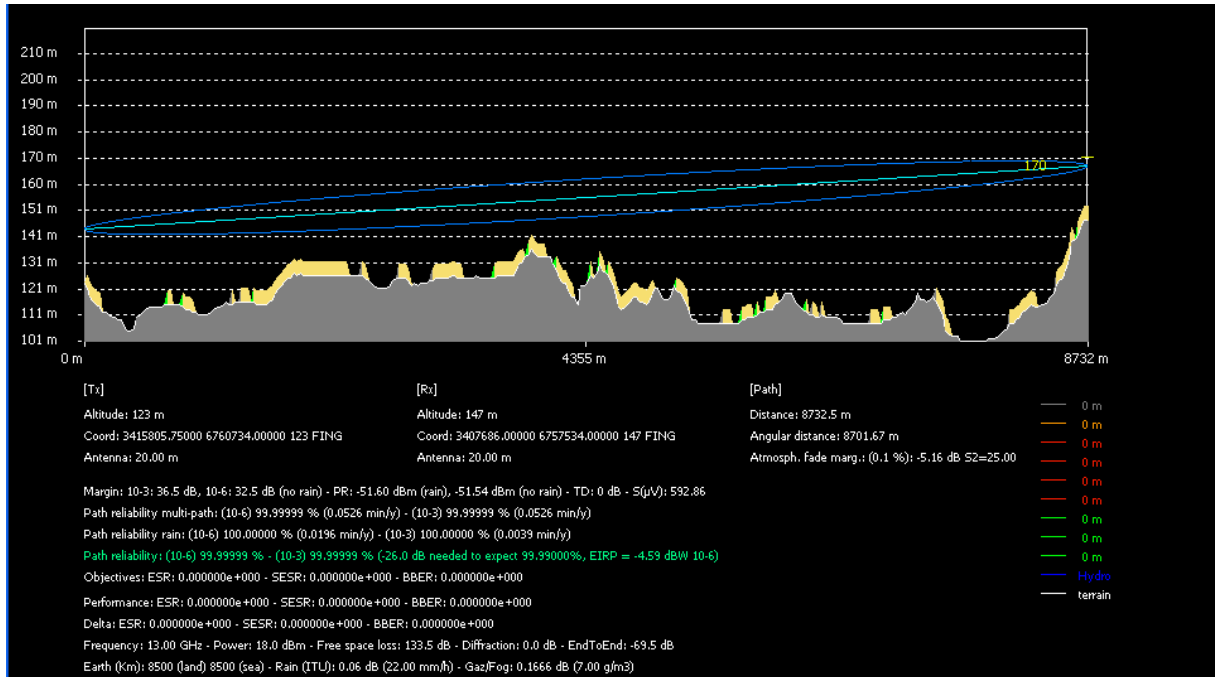
Jänne14



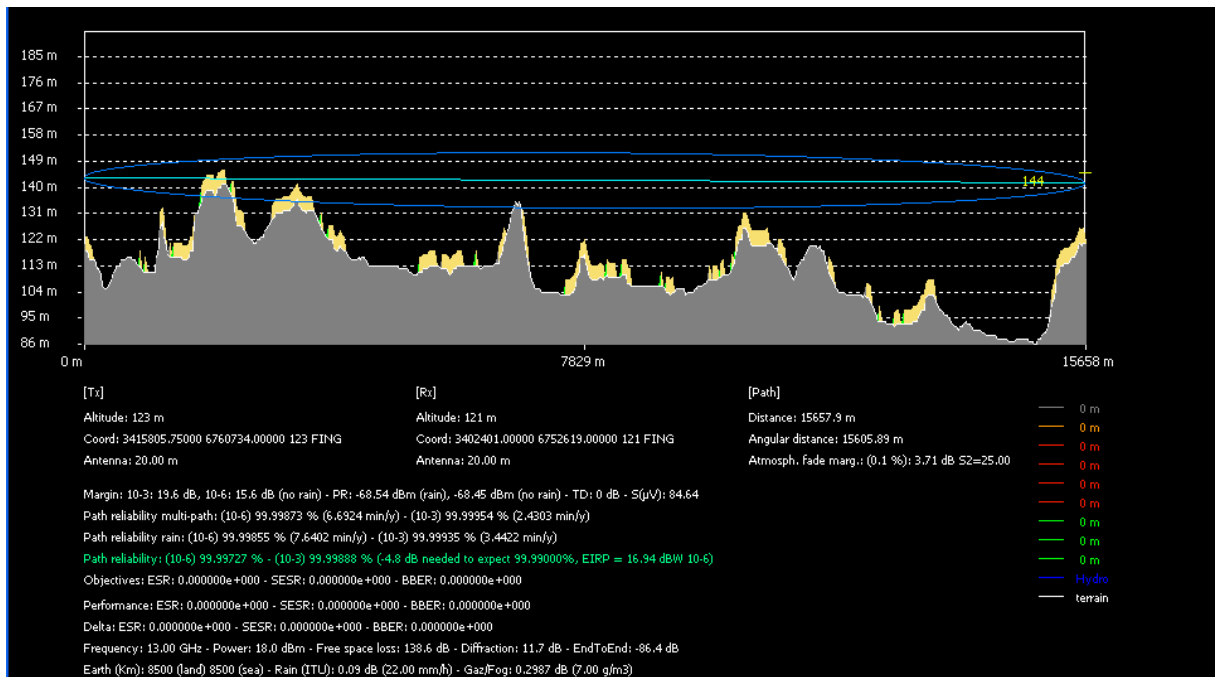
Jänne15



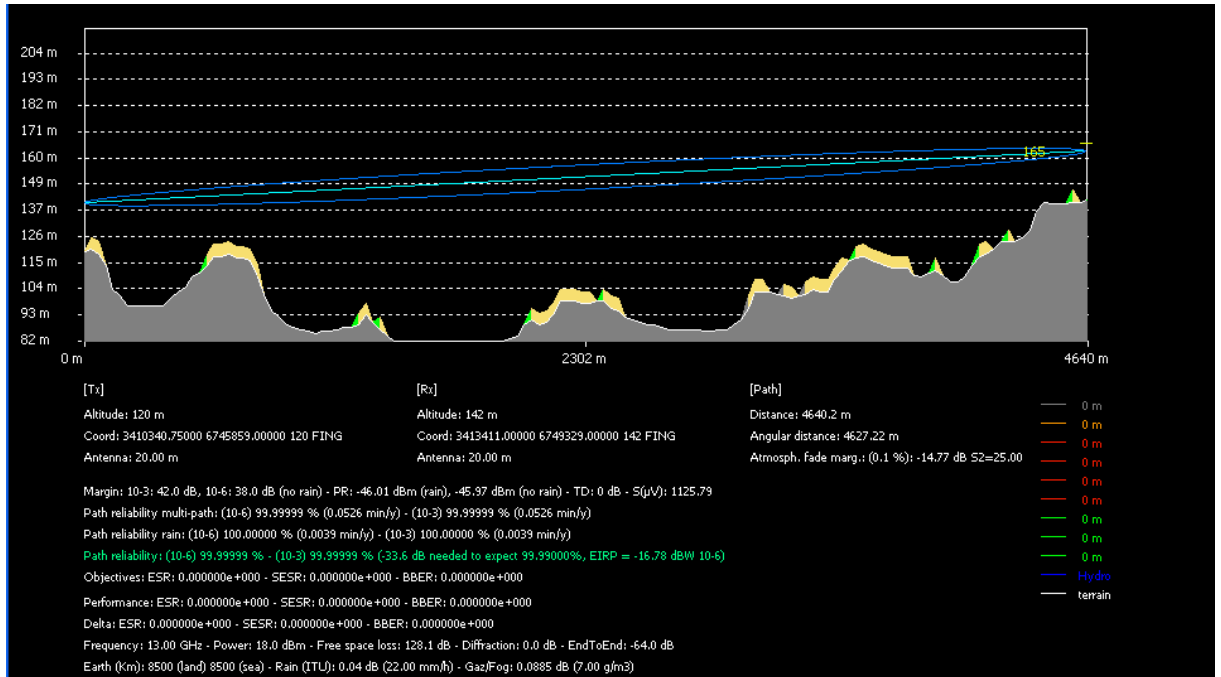
Jänne16



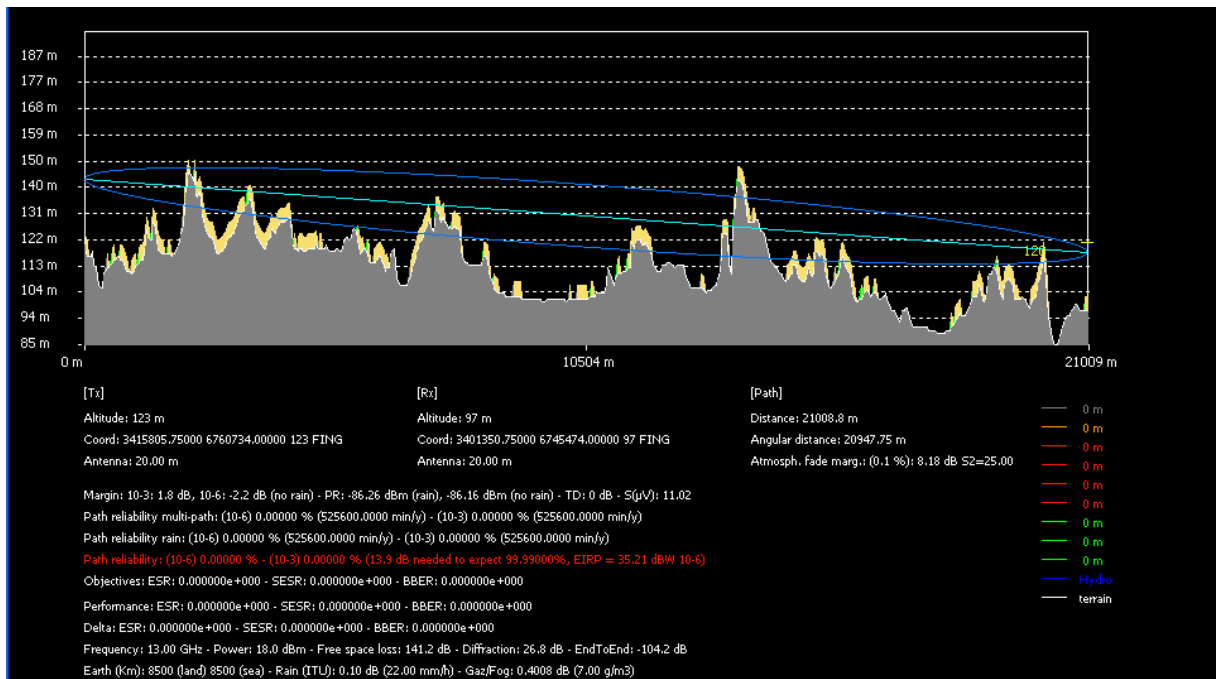
Jänne17



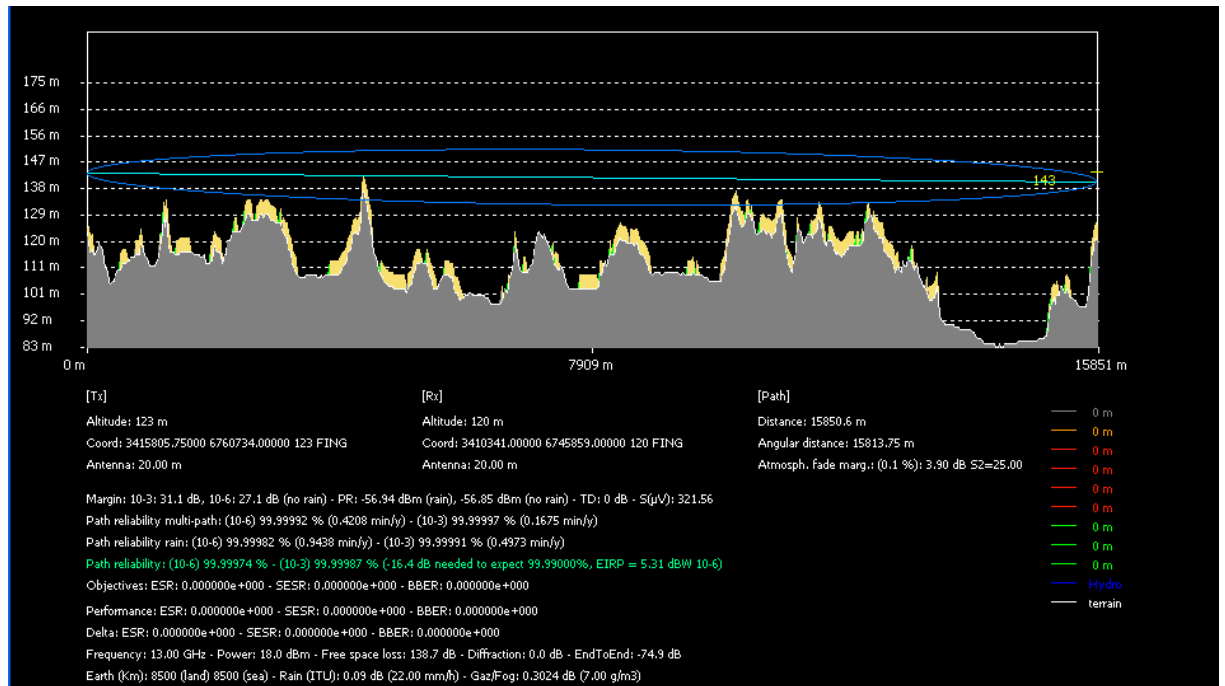
Jänne18



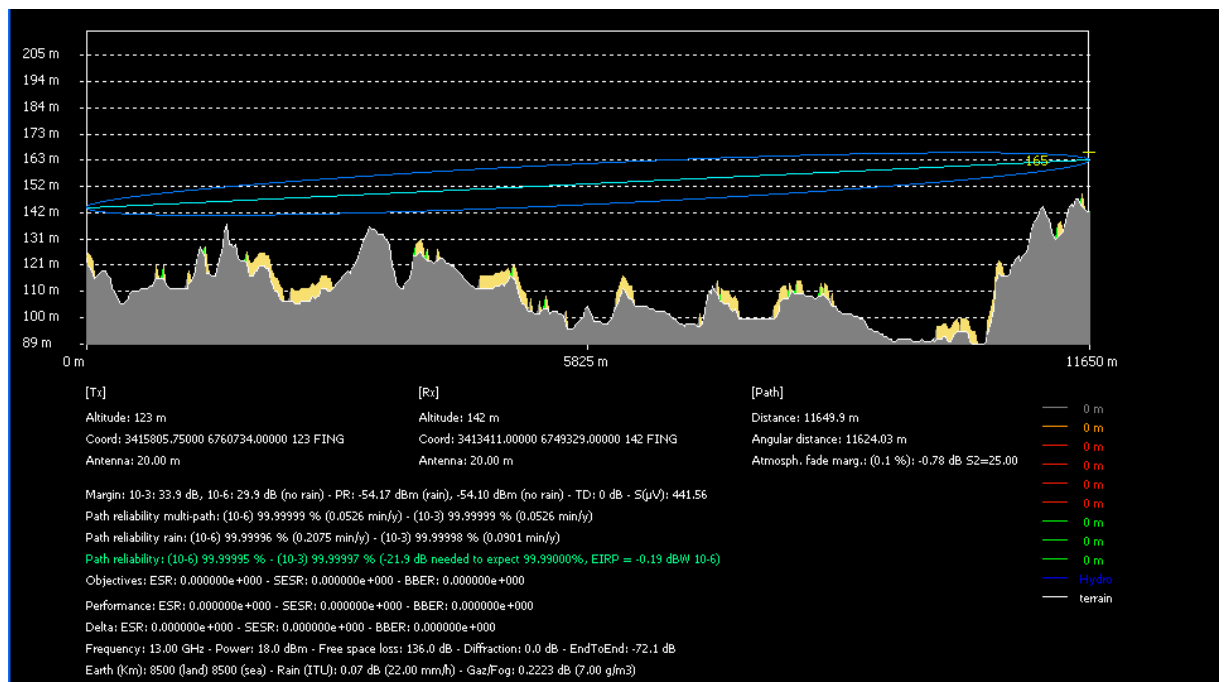
Jänne19



Jänne20

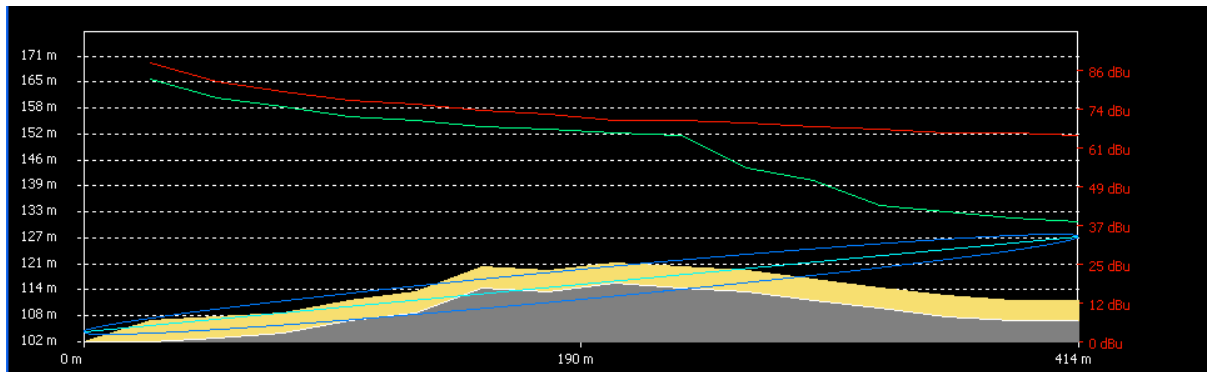


Jänne21

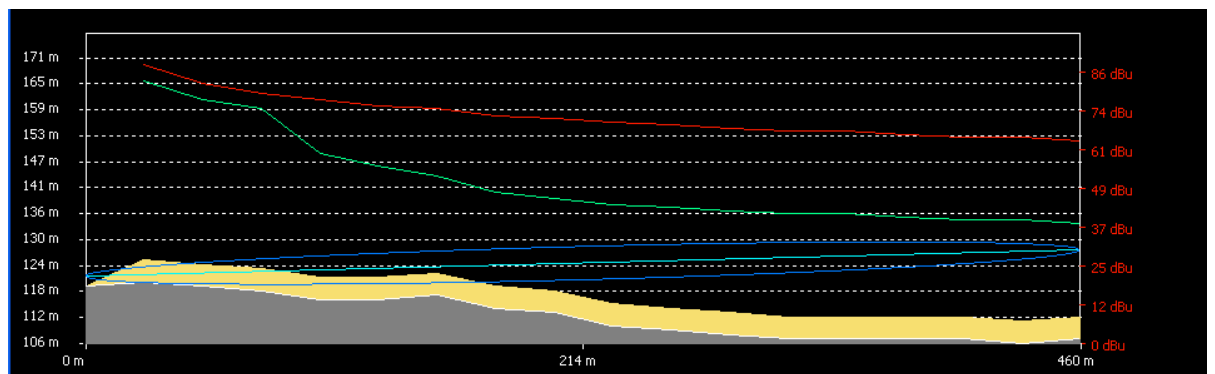


ESIKUNNAN YHTEYKSIEN MAASTOPROFIILIT

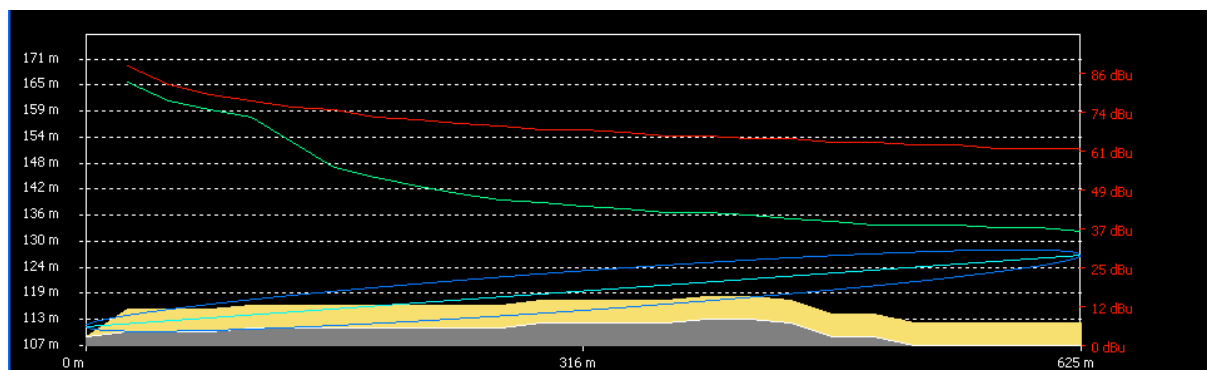
Liittyjä1 – Tukiasema



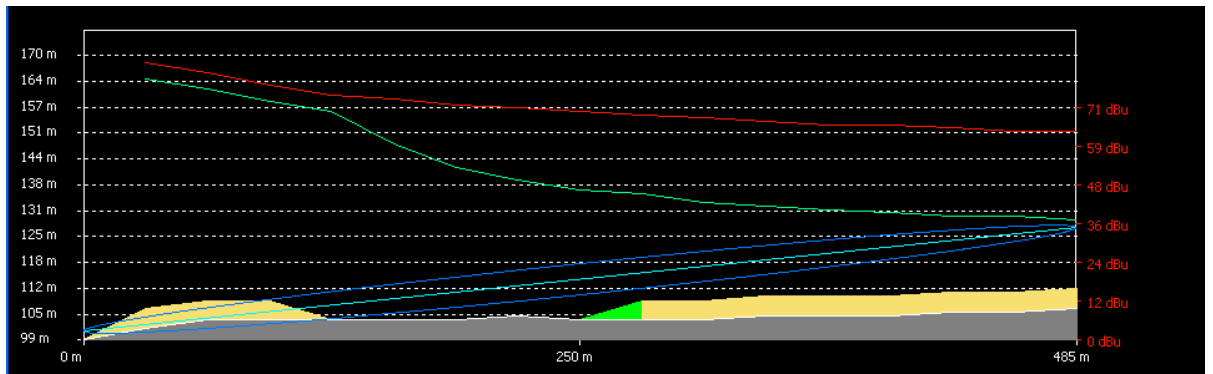
Liittyjä2 – Tukiasema



Liittyjä3 - Tukiasema



Liityjä4 – Tukiasema



ESIKUNNAN YHTEYKSIEN HÄIRINNÄN TEHOT**TETRA-tekniikka**

Taustahäirintä

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0001 - J/S: -36.3 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0001 - J/S: -26.6 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: -27.2 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: -24.9 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0001 - J/S: -18.8 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0001 - J/S: -38.9 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0001 - J/S: -36.3 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0001 - J/S: -34.1 dB - Efficient power: 397.164 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Saattohäirintä ilmasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0002 - J/S: -29.5 dB - Efficient power: 434.639 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0002 - J/S: -18.6 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0002 - J/S: -19.5 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0002 - J/S: -17.1 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0002 - J/S: -11.9 dB - Efficient power: 438.694 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0002 - J/S: -32.2 dB - Efficient power: 437.44 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0002 - J/S: -28.2 dB - Efficient power: 436.459 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0002 - J/S: -27.2 dB - Efficient power: 433.339 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Saattohäirintä maasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0003 - J/S: -28.3 dB - Efficient power: 1921.6 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0003 - J/S: -18.4 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0003 - J/S: -19.2 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0003 - J/S: -16.8 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0003 - J/S: -11.4 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0003 - J/S: -31.8 dB - Efficient power: 1938.02 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0003 - J/S: -26.1 dB - Efficient power: 1928.1 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0003 - J/S: -26.7 dB - Efficient power: 1918.73 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Lähihäirintä maasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0004 - J/S: -39.3 dB - Efficient power: 9.4722 W
 Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0005 - J/S: -20.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0006 - J/S: -33.0 dB - Efficient power: 9.76053 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0004 - J/S: -27.0 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0005 - J/S: -16.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0006 - J/S: -25.1 dB - Efficient power: 7.94328 W

Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: -22.3 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0005 - J/S: -21.6 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0006 - J/S: -22.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: -20.0 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0005 - J/S: -19.3 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0006 - J/S: -19.8 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0004 - J/S: -26.3 dB - Efficient power: 8.36693 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0005 - J/S: -18.6 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0006 - J/S: -16.3 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0004 - J/S: -37.3 dB - Efficient power: 8.85874 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0005 - J/S: -26.5 dB - Efficient power: 8.8127 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0006 - J/S: -24.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0004 - J/S: -26.8 dB - Efficient power: 9.81628 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0005 - J/S: -26.1 dB - Efficient power: 9.85805 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0006 - J/S: -32.6 dB - Efficient power: 9.44862 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0004 - J/S: -35.9 dB - Efficient power: 9.31372 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0005 - J/S: -32.8 dB - Efficient power: 8.86193 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0006 - J/S: -26.5 dB - Efficient power: 8.91316 W
 TOTAL LINK(s): 8- TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Lähihäirintä ilmasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0001 - J/S: -18.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0001 - J/S: -1.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: 1.6 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: 3.9 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0001 - J/S: 1.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0001 - J/S: -22.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0001 - J/S: -20.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0001 - J/S: -14.8 dB - Efficient power: 7.94328 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 3

WLAN-tekniikka

Taustahäirintä

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0001 - J/S: -8.2 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0001 - J/S: -4.6 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: -5.4 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: -3.3 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0001 - J/S: 3.1 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0001 - J/S: -12.6 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0001 - J/S: -11.6 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0001 - J/S: -6.1 dB - Efficient power: 397.164 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 1

Saattohäirintä ilmasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0002 - J/S: -1.5 dB - Efficient power: 434.639 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0002 - J/S: 3.5 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0002 - J/S: 2.5 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0002 - J/S: 4.7 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0002 - J/S: 10.2 dB - Efficient power: 438.694 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0002 - J/S: -6.1 dB - Efficient power: 437.44 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0002 - J/S: -2.9 dB - Efficient power: 436.459 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0002 - J/S: 0.7 dB - Efficient power: 433.339 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 5

Saattohäirintä maasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0003 - J/S: -3.2 dB - Efficient power: 1921.6 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0003 - J/S: 2.5 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0003 - J/S: 1.5 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0003 - J/S: 3.6 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0003 - J/S: 9.1 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0003 - J/S: -7.3 dB - Efficient power: 1938.02 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0003 - J/S: -1.8 dB - Efficient power: 1928.1 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0003 - J/S: -1.8 dB - Efficient power: 1918.73 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 4

Lähihäirintä maasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0004 - J/S: -14.8 dB - Efficient power: 9.4722 W
 Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0005 - J/S: 4.0 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0006 - J/S: -8.4 dB - Efficient power: 9.76053 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0004 - J/S: -12.2 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0005 - J/S: -1.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0006 - J/S: -10.4 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: -7.7 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0005 - J/S: -6.8 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0006 - J/S: -7.6 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: -5.6 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0005 - J/S: -4.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0006 - J/S: -5.5 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0004 - J/S: -11.6 dB - Efficient power: 8.36693 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0005 - J/S: -3.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0006 - J/S: -1.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0004 - J/S: -12.9 dB - Efficient power: 8.85874 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0005 - J/S: -2.2 dB - Efficient power: 8.8127 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0006 - J/S: 0.3 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0004 - J/S: -2.6 dB - Efficient power: 9.81628 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0005 - J/S: -1.8 dB - Efficient power: 9.85805 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0006 - J/S: -8.4 dB - Efficient power: 9.44862 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0004 - J/S: -11.5 dB - Efficient power: 9.31372 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0005 - J/S: -8.4 dB - Efficient power: 8.86193 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0006 - J/S: -2.0 dB - Efficient power: 8.91316 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 2

Lähihäirintä ilmasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0004 - J/S: 5.4 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0004 - J/S: 14.5 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: 19.0 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: 21.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0004 - J/S: 15.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0004 - J/S: 2.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0004 - J/S: 4.3 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0004 - J/S: 13.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 8

WiMAX-tekniikka

Taustahäirintä

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0001 - J/S: -28.1 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0001 - J/S: -21.3 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: -22.1 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: -20.0 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0001 - J/S: -13.6 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0001 - J/S: -32.7 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0001 - J/S: -31.9 dB - Efficient power: 397.164 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0001 - J/S: -26.0 dB - Efficient power: 397.164 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Saattohäirintä ilmasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0002 - J/S: -21.4 dB - Efficient power: 434.639 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0002 - J/S: -13.2 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0002 - J/S: -14.2 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0002 - J/S: -12.0 dB - Efficient power: 438.69 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0002 - J/S: -6.5 dB - Efficient power: 438.694 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0002 - J/S: -26.3 dB - Efficient power: 437.44 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0002 - J/S: -23.2 dB - Efficient power: 436.459 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0002 - J/S: -19.2 dB - Efficient power: 433.339 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Saattohäirintä maasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0003 - J/S: -23.4 dB - Efficient power: 1921.6 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0003 - J/S: -14.7 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0003 - J/S: -15.7 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0003 - J/S: -13.5 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0003 - J/S: -8.1 dB - Efficient power: 1943.69 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0003 - J/S: -27.6 dB - Efficient power: 1938.02 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0003 - J/S: -22.1 dB - Efficient power: 1928.1 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0003 - J/S: -22.1 dB - Efficient power: 1918.73 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Lähihäirintä maasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0004 - J/S: -35.0 dB - Efficient power: 9.4722 W
 Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0005 - J/S: -16.3 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0006 - J/S: -28.7 dB - Efficient power: 9.76053 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0004 - J/S: -30.5 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0005 - J/S: -19.5 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0006 - J/S: -28.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: -26.0 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0005 - J/S: -25.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0006 - J/S: -25.9 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0004 - J/S: -23.9 dB - Efficient power: 8.39565 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0005 - J/S: -23.0 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0006 - J/S: -23.8 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0004 - J/S: -29.9 dB - Efficient power: 8.36693 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0005 - J/S: -22.0 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0006 - J/S: -20.0 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0004 - J/S: -33.2 dB - Efficient power: 8.85874 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0005 - J/S: -22.4 dB - Efficient power: 8.8127 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0006 - J/S: -19.9 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0004 - J/S: -22.9 dB - Efficient power: 9.81628 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0005 - J/S: -22.1 dB - Efficient power: 9.85805 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0006 - J/S: -28.7 dB - Efficient power: 9.44862 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0004 - J/S: -31.8 dB - Efficient power: 9.31372 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0005 - J/S: -28.7 dB - Efficient power: 8.86193 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0006 - J/S: -22.3 dB - Efficient power: 8.91316 W

TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 0

Lähihäirintä ilmasta

Tx 0001 -> Rx 0002 <- Jammer 0001 - J/S: -15.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0002 -> Rx 0001 <- Jammer 0001 - J/S: 3.9 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0003 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: 7.1 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0004 -> Rx 0006 <- Jammer 0001 - J/S: 9.2 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0005 -> Rx 0007 <- Jammer 0001 - J/S: 6.8 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0003 <- Jammer 0001 - J/S: -19.7 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0006 -> Rx 0004 <- Jammer 0001 - J/S: -17.9 dB - Efficient power: 7.94328 W
 Tx 0007 -> Rx 0005 <- Jammer 0001 - J/S: -11.5 dB - Efficient power: 7.94328 W
 TOTAL LINK(s): 8 - TOTAL LINK(s) JAMMED: 4