



Maija Äikäs

Signaali-kohinasuhde langattomissa mikrofonijärjestelmissä

Langattomien mikrofonijärjestelmien antennien sijoittamisen merkitys käytettävissä olevaan taajuusalueeseen.

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Medianomi

Esitys- ja teatteritekniikka

Opinnäytetyö

18.5.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Maija Äikäs
Otsikko:	Signaali-kohinasuhde langattomissa mikrofonijärjestelmissä
Sivumäärä:	67 sivua
Aika:	18. toukokuuta 2024
Tutkinto:	Medianomi
Tutkinto-ohjelma:	Esitys- ja teatteritekniikka
Ohjaaja:	Lehtori Timo Hiekkanen

Työn teoriaosuudessa on käsitelty radioaaltojen käyttäytymistä sekä langattomien mikrofonien signaali-kohinasuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimusosuudessa on selvitetty lähettävän ja vastaanottavan antennin sijoittamisen merkitystä vastaanottimen havaitsemaan ja käytettävissä olevaan taajuusalueeseen erilaisilla etäisyyksillä sekä lähettimien määrillä.

Tutkimus toteutettiin suuressa studiotilassa, jossa lähettävän antennin positiota on vaihdettu suhteessa vastaanottavaan antenniin. Tutkimuksen mukaan antennien suuntakuvioita hyödyntämällä saavutetaan parhaillaan matalampi pohjakohina ja vähennetään intermodulaatiota tehokkaammin kuin vain antennien välimatkaa kasvattamalla.

Tuloksista voi olla hyötyä kelle tahansa langattomien mikrofonien kanssa työskentelevälle. Antennien tietoisella sijoittamisella ympäristön tekijät huomioiden vältetään häiriöitä omassa käytössä olevilla laitteilla eikä aiheuteta haittaa muille samalla alueella toimiville langattomille järjestelmille.

Avainsanat: Radioaalto, Sähkömagneettinen säteily, Langaton mikrofoni, Antenni

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Maija Äikäs
Title: Signal to noise ratio in wireless microphone systems
Number of Pages: 67 pages
Date: 18 May 2024

Degree: Bachelor's degree
Degree Programme: Live Performance Engineering
Instructor: Timo Hiekkänen, Senior Lecturer

Purpose and objective of this work has been to find relevant methods for optimal antenna placement in wireless microphone systems. While the demand for wireless channels continues to grow, it is imperative that the user of the system knows how they work and how to avoid interference and attenuation or losses in the radio signal.

Research methods included comparing the placement of transmitting and receiving antennas on various distances by scanning the frequency spectrum with the receiving antenna. The impact of varying channel counts in transmitting systems on the spectrum available for additional wireless channels has also been evaluated in accordance to the distances.

It has been found to be more efficient to arrange antennas according to their directivity patterns to reduce intermodulation and noise floor, than just by increasing the distance between the two antennas.

This work can be beneficial for anyone that works with wireless microphone systems. Being mindful about the antenna placement in the environment can decrease interference from other systems and will avoid causing harm to any other systems nearby.

Keywords: Radio wave, Electromagnetic radiation, Wireless microphone, Antenna

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tiedon siirto radioaalloilla	2
2.1	Radioaaltojen ominaisuudet	5
2.1.1	Radioaaltojen etenemismuodot	8
2.1.2	Radioaallon eteneminen ilmatilassa	9
2.2	Modulaatiotekniikat	13
2.2.1	Analogisen signaalin modulaatiotavat	14
2.2.2	Digitaalisen signaalin modulaatiotavat	17
2.3	Häiriölähteet	20
3	Langattomat mikrofonit	22
3.1	Langattomat mikrofonijärjestelmät	22
3.2	Analogiset ja digitaaliset langattomat mikrofonit	24
3.3	Antennit langattomissa mikrofonijärjestelmissä	26
3.3.1	Antennityypit	27
3.3.2	Antennien ominaisuudet	30
3.4	Häiriöt langattomissa mikrofoneissa	34
3.5	Mikrofonijärjestelmien käyttö	36
3.5.1	Lainsäädäntö	37
3.5.2	Lähetysteho	39
3.5.3	Taajuudet ja koordinointi	41
4	Käytännön sovellukset	43
4.1	Tutkimusjärjestelmä	43
4.2	Antennit samassa telineessä	46
4.3	Antennit vierekkäin tai peräkkäin	50
4.4	Lähettävä antenni edessä erilaisilla etäisyyksillä	54
4.5	Lähettävä antenni takana ja sivulla erilaisilla etäisyyksillä	58
5	Johtopäätökset	61
6	Pohdinta	63
	Lähteet	65

1 Johdanto

Tapahtumat sekä tekniset ratkaisut tapahtumissa ovat kehittyneet valtavasti viime vuosikymmenten aikana. On tärkeää ymmärtää työvälineiden toimintaperiaatteet, jotta työskentely on sujuvaa ja vältetään tietämättömyydestä johtuvat käyttäjälähtöiset virheet, jotka hidastavat tai haittaavat koko työryhmän toimintaa. Langattomien mikrofonien käyttövirheet ja häiriöt kuuluvat nopeasti myös yleisölle esimerkiksi signaalin katkeamisena tai kovaäänisenä kohinana.

Langattomat mikrofonit antavat esiintyjälle mahdollisuuden liikkua lavalla ja sen ympäristössä vapaasti. Yhä useammat artistit haluavat käydä lavan etulaidalla tai yleisön seassa esiintymisen aikana. Ennen langattomien mikrofonien käyttöä mikrofonin kaapelin pituus on rajoittanut artistin liikkumista esiintymisen aikana. Pitkä kaapeli kiertyy, menee solmuun ja takertuu sekä laulajan, bändin ja yleisön jalkoihin että lavan rakenteisiin. Tällaisesta voi aiheutua mikrofonin tai kaapelin rikkoutuminen ja henkilövahinkoja, kun artisti tai yleisö kompastuu kaapeliin.

Ensimmäiset analogiset langattomat mikrofonit ovat olleet esityskäytössä jo 1960-luvulla. Digitaalisia järjestelmiä on kehitetty analogisten järjestelmien rinnalle 1990-luvulta lähtien, kun tietoliikenneverkkojen kehitys on alkanut. Digitaalisten järjestelmien edut ovat paremmassa äänenlaadussa, mutta niillä on analogisia järjestelmiä pidempi viiveaika, eli latenssi, joka muodostuu signaalin prosessoinnista.

Langattomia mikrofoneja käytetään nykyisin lähes kaikissa tapahtumissa, ja ääniteknikoiden täytyy hallita usein suuria langattomia kanavamääriä kerrallaan. Suurissa tapahtumissa tarvitaan lähes poikkeuksetta erillinen koordinointi tapahtumassa käytettäviä langattomia taajuuksia varten, mutta koordinoinnista ei ole apua, jos järjestelmää ei käytetä asianmukaisesti.

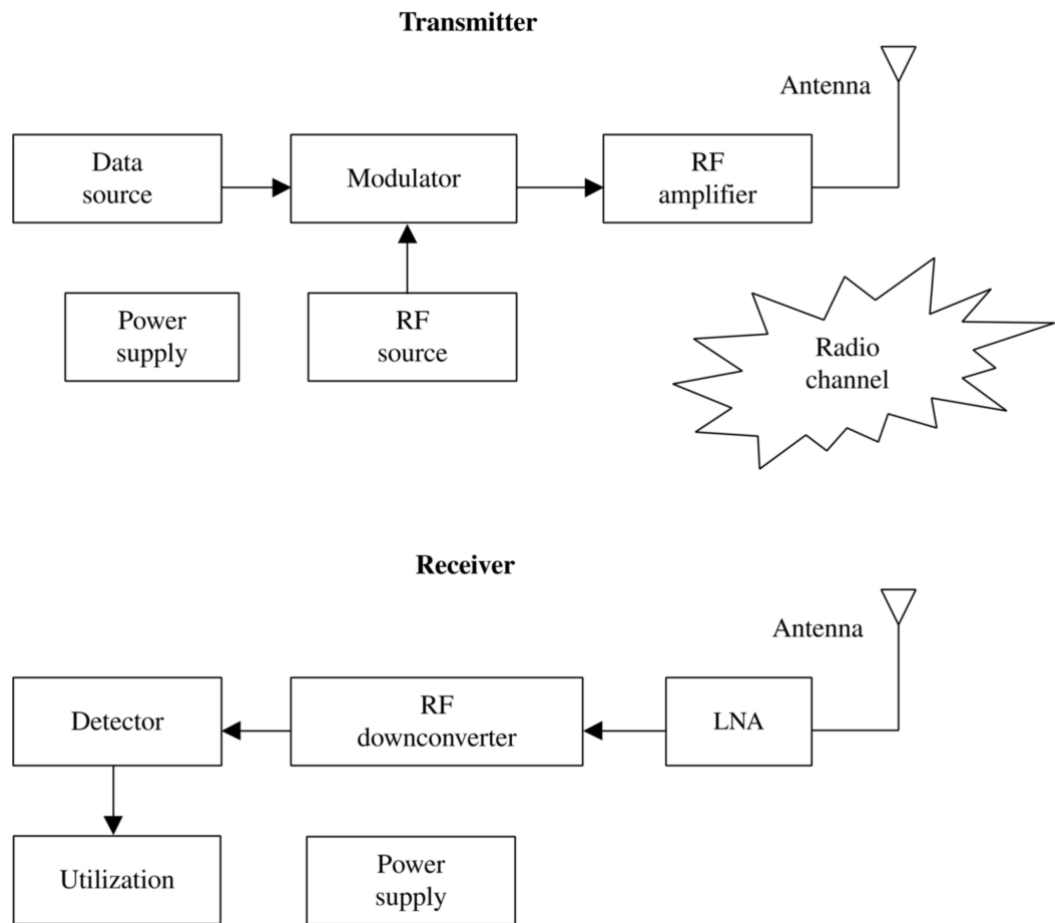
Tässä työssä käsitellään langattomia tiedonsiirtotekniikoita, ammattimaiseen käyttöön tarkoitettuja langattomia mikrofonijärjestelmiä sekä niiden käyttöä esitysteknisissä toteutuksissa. Työhön on sisällytetty empiiristä tutkimusta lähettävien ja vastaanottavien antennien sijoittelusta muun laitteiston yhteydessä. Usein lavan sivussa sijaitsevien antennien asettelulla voidaan helposti vaikuttaa järjestelmän toimintaan ja optimoida radiosignaalin signaali-kohinasuhde, eli SNR (signal to noise ratio), sillä antennien lokalisointi on vapaampaa, kuin esimerkiksi esiintyvään henkilöön kiinnitettävän antennin (esimerkiksi mikrofoni­lähetin) sijainnin optimointi. Pyrin esittämään joitain hyviä käytäntöjä langattomien mikrofoni­järjestelmien käyttöön ja hallintaan valmistajien ohjeiden, työn tutkimusosan sekä omien kokemusteni perusteella.

2 Tiedon siirto radioaalloilla

Radioteknologia on yksi tiedonsiirtoteknologian merkittävimmistä keksinnöistä, joka perustuu sähkömagneettisen aaltoliikkeen etenemiseen tilassa. Ensimmäinen audiosignaalin siirto radioaalloilla tapahtui jo 1800-luvun lopulla, kun italialainen fyysikko Tomaso Guglielmo Marconi kehitti radion. Nykypäivänä lähes kaikki ammatti- ja kotikäytössä olevat tekniset laitteet käyttävät radioteknologiaa tiedonsiirrossa. Vaikka radioteknologiaa kehitetään koko ajan, tiedonsiirron toimintaperiaatteet ovat pohjimmiltaan edelleen samat kuin Marconin radiossa. (Faruque 2017.)

Tiedonsiirto radioaalloilla tapahtuu muuntamalla lähetettävä signaali sähköiseen muotoon ja moduloimalla se kantaaltoon, joka lähetetään antennista ilmatilaan. Sama prosessi tapahtuu käänteisessä järjestyksessä vastaanottavissa laitteissa. Kantaallolla tarkoitetaan korkeataajuisia sinimuotoista sähkömagneettista aaltoa. Modulaatio on prosessi, jossa muokataan kantaallon ominaisuuksia moduloitavan signaalin mukaisesti. (Faruque 2017.)

Kaikki radioteknologiaa hyödyntävät järjestelmät koostuvat lähettimestä ja vastaanottimesta sekä näihin kuuluvista lähettävästä ja vastaanottavasta antennista (Kuva 1).



Kuva 1. Kaavio signaalin kulusta radiolähettimessä ja -vastaanottimessa (Bensky 2019).

Kuvassa ylemmät laatikot kuvaavat lähetintä (transmitter). Vastaavasti alemmat laatikot kuvaavat vastaanotinta (receiver). Radiosignaali kulkee lähettimen ja vastaanottimen antennien (antenna) välillä. (Bensky 2019.)

Sähkömagneettista säteilyä tuottavat muun muassa TV-asetat, elektroniikka, aurinko, valaisimet ja lääkäreiden käyttämät röntgenlaitteet. Radioaalloiksi kutsutaan sähkömagneettisen säteilyn spektrin matalimpia taajuuksia. Yleisesti alle GHz:n taajuuksisista aalloista käytetään yleisnimitystä *radioaallot* ja suunnilleen 1 – 30 GHz:n taajuuksia kutsutaan *mikroaalloiksi*. Taulukossa 1 on listattu tiedonsiirrossa käytettävät taajuudet. (Lehto & Räisänen 2006.)

Taulukko 1. Tiedonsiirrossa käytettävät taajuusalueet (Lehto & Räsänen 2006, taulukko 1.1).

VL	Very Low Frequencies	3-30 kHz
LF	Low Frequencies	30-300 kHz
MF	Medium Frequencies	300 – 3000 kHz
HF	High Frequencies	3 – 30 MHz
VHF	Very High Frequencies	30 – 300 MHz
UHF	Ultra High Frequencies	300 – 3000 MHz
SHF	Super High Frequencies	3 -30 GHz
EHF	Extremely High Frequencies	30 – 300 GHz
Alimillimetriaallot		300 – 3000 GHz

Langattomat mikrofonit käyttävät VHF- ja UHF-taajuusalueita. Radiotaajuuksien käyttöä on pyritty koordinoimaan maailmanlaajuisesti määrittelemällä yleiskäyttöalueita, joilla radiolaitteiden käyttö tapahtuu omalla vastuulla. Käyttöalueet vaihtelevat alueittain, ja Suomessa vapaasti käytettävät taajuusalueet ja niiden käyttöön liittyvä muu lainsäädäntö löytyy Traficom sivuilta. Radiotaajuuksien käyttöä Suomessa käsitellään tarkemmin luvussa 3.5.

Radioliikenteelle käytettävissä olevat taajuusalueet rajoittavat mahdollisten lähetysten määrää niiden kuuluvuusalueella. Yksittäisten kantoaaltojen käyttö mahdollistaa tiedonsiirron yhdellä taajuudella koko spektrin leveyden sijaan. Modulaatiotavasta riippuen yksi radiolähetys tarvitsee tietyn levyisen kaistan taajuusalueelta lähetystaajuuden molemmin puolin, minkä vuoksi lähetyksiä ei saada toimimaan samalla kuuluvuusalueella rajattomasti. (Riitamaa 2008.)

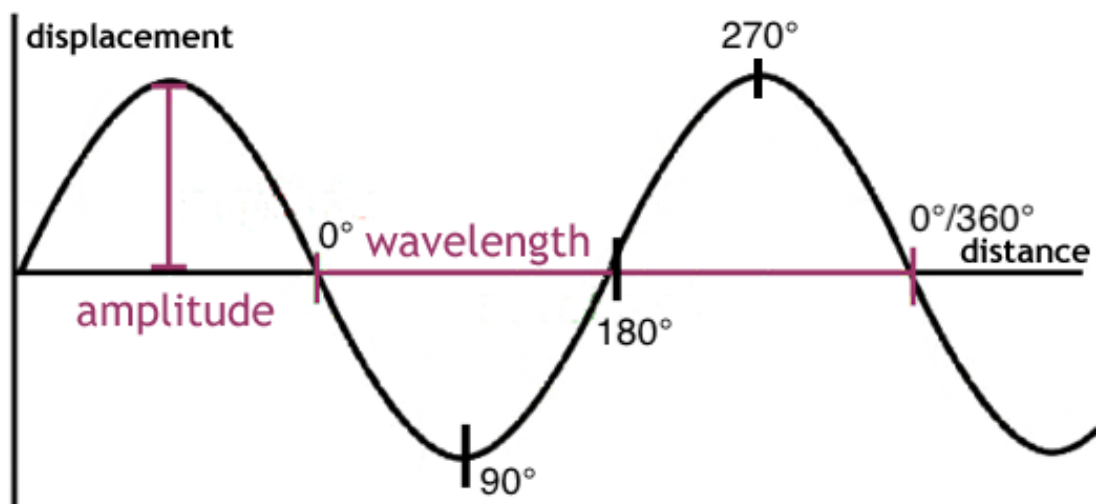
Signaalin siirron kannalta on tärkeää, että siirrettävä signaali erottuu vastaanottavalle antennille selkeästi muusta havaittavasta elektromagneettisesta säteilystä eli muista ilmakehässä liikkuvista radioaalloista. Tällaista säteilyä voi olla esimerkiksi samalla taajuusalueella lähettävät televisioasemat, puhelinmastot ja -tukiasemat, muut langattomat laitteet tai pohjakohina. Jos signaali ei erotu tarpeeksi hyvin muusta säteilystä, havaitaan häiriöitä tai menetetään vastaanotettava signaali kokonaan.

Radiosignaalin kuuluvuutta ja voimakkuutta voidaan ilmaista signaali-kohinasuhteen avulla. (MacIntosh 2021.)

Ilmakehässä liikkuvien radiosignaalien määrä kasvaa jatkuvasti teknologian kehittyessä, ja tiedonsiirron tehokkuutta on pyritty optimoimaan kehittämällä monimutkaisempia modulaatiotekniikoita. Kehittyneiden modulaatiotekniikoiden myötä laitteiden käyttämä kaistanleveys on kaventunut, ja vapaita taajuusalueita voidaan käyttää tehokkaammin. (Puurunen 2012.)

2.1 Radioaaltojen ominaisuudet

Radioaallolla on samat ominaisuudet kuin kaikella aaltoliikkeellä: aallonpituus, taajuus, amplitudi sekä etenemisnopeus. Radioaallot etenevät valonnopeudella (3×10^8 m/s) tyhjiössä, ja tätä nopeutta voidaan soveltaa myös aallon etenemiseen ilmassa, sillä ilma ei hidasta etenemistä merkittävästi. Radioaallon materian läpäisykyky määrittyy suhteessa aallonpituuteen: pidemmät aallonpituudet läpäisevät materiaaleja paremmin kuin lyhyet. Aallonpituus on fyysinen matka, jonka aikana aallon vaihe on muuttunut 360° . Havainnollistavasta kuvasta (ks. Kuva 2) aallonpituus voitaisiin mitata esimerkiksi aallon kahden peräkkäisen harjakohdan välinä. (Lanne 2018.)



Kuva 2. Aaltoliikkeen ominaisuudet: amplitudi (amplitude), aallonpituus (wavelength) ja vaihe (phase).

Aaltoliikkeen taajuus on sekunnin aikana mitattujen värähtelykertojen määrä, eli kuinka monta aallonpituutta aalto etenee sekunnin aikana. Taajuuden yksikkö on hertsi ja 1 Hz vastaa yhtä mitattua aallonpituutta per sekunti. Amplitudilla ilmaistaan aaltoliikkeen voimakkuutta. (Aaltomuoto i.a.)

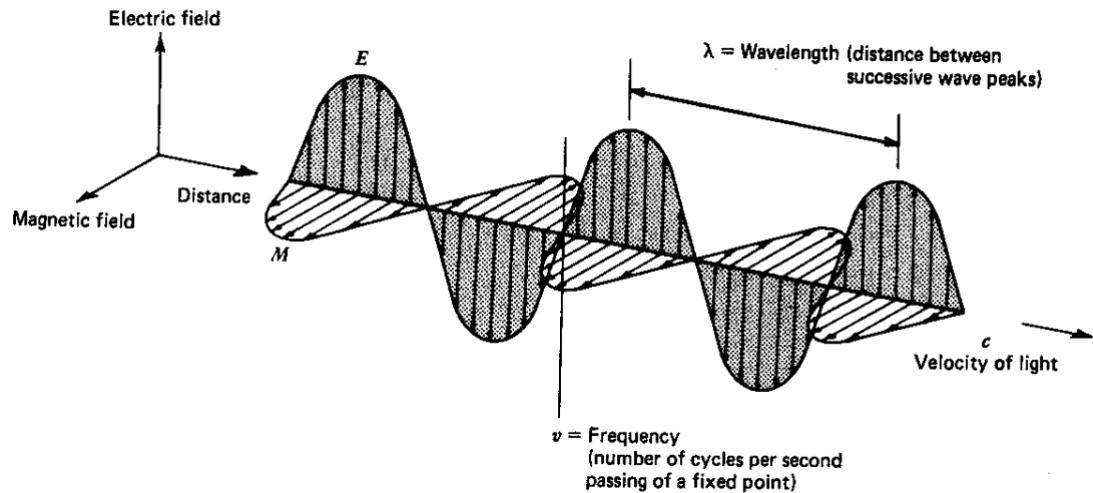
Radioaallon lähetysteho ilmaistaan watteina ja signaalin voimakkuus desibeleinä (dB). Myöhemmin tässä työssä radiosignaalien voimakkuutta kuvataan desibelimilliwatteina (dBm), joka on signaalin absoluuttinen taso suhteessa milliwattiin. (Virtamäki 2016, 11.)

Radioaaltojen taajuus on käänteisesti verrannollinen aallonpituuteen. Aallonpituuden suhdetta taajuuteen ja etenemisnopeuteen voidaan kuvata seuraavalla kaavalla:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

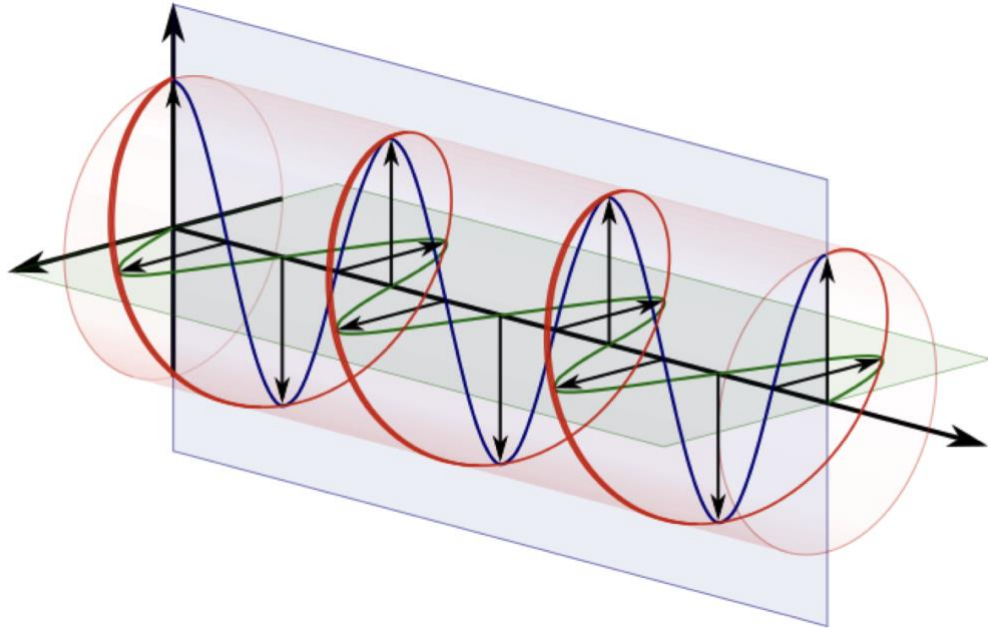
Kaava 1. Yhtälö aallonpituuden (λ) suhteesta etenemisnopeuteen (c) ja taajuuteen (f) (Puurunen 2012).

Sähkömagneettinen aalto koostuu sähköisestä vaihtojännitteestä ja sen synnyttämästä saman vaiheisesta magneettisesta kentästä, jotka ovat 90 asteen kulmassa keskenään ja suhteessa aallon kulkusuuntaan (ks. Kuva 3). Aallon polarisaatio määrittyy sähköisen kentän mukaisesti. Polarisaatio on suunta, jossa aaltoliike tapahtuu suhteessa etenemissuuntaan. (Tsokos 2014, 159, 167.)



Kuva 3. Sähkömagneettisella aallolla on sähkö- (electric field) ja magneettikenttä (magnetic field). Kentät ovat saman vaiheisia ja värähtelevät 90° toisistaan ja suhteessa aallon kulkusuuntaan (distance). (Aalto i.a.)

Sähkömagneettiset aallot polarisoituvat lineaarisesti tai pyöreästi, lähettävän antennin mukaisesti. Sähköinen jännite värähtelee ilmakehässä poikittaisesti aallon kulkusuuntaan nähden. Lineaariset aallot värähtelevät yhdessä suunnassa (sinisellä ja vihreällä, ks. Kuva 4), kun ympyräpolarisoituneet aallot värähtelevät kiertäen kulkusuunnan mukaisen akselin ympäri oikealle tai vasemmalle (punaisella, ks. Kuva 4). (Lanne 2018.)



Kuva 4. Lineaarisesti polarisoituvat aallot sinisellä ja vihreällä sekä pyöreästi oikealle polarisoituva aalto punaisella (Färm 2022).

2.1.1 Radioaaltojen etenemismuodot

Radioaallot voivat edetä ilmatilassa pinta-aaltoina, ionosfääriaaltoina, troposfääriaaltoina tai avaruusaaltoina lyhyitä suorita reittejä pitkin näköyhteyden etäisyydellä (Bensky 2019, luku 2).

Pinta-aallot ovat vertikaalisten antennien tuottamia pystypolarisoituneita aaltoja, jotka syntyvät, kun lähettävä sekä vastaanottava antenni ovat lähellä maan pintaa. Vain pidemmät aallonpituudet noin muutamaan megahertsiin asti etenevät pinta-aaltoina, jotka ovat sähköisesti sitoutuneet maan tai meren pintaan. (Bensky 2019, luku 2.)

Ionosfääristä heijastuvia radioaaltoja, eli taivasaaltoja, hyödynnetään kommunikaatiossa pitkällä etäisyyksillä. Ilmakehässä olevat ionisoituneet kaasumolekyylit heijastavat radioaaltoja erityisesti 300-3000 kHz:n taajuusalueella. (Pulkkinen 2019.) Näiden heijastumien eteneminen riippuu paljon sääolosuhteista, sijainnista, kellonajasta ja vuodenaikasta maan pinnalla. Tällaiset ionosfääristä heijastuvat radioaallot harvoin häiritsevät lähietäisyydellä

käytettäviä langattomia kommunikaatiovälineitä, kuten langattomia mikrofoneja. (Bensky 2019, luku 2.) Troposfääristä heijastuvien radioaaltojen eteneminen on myös erittäin riippuvaista sääolosuhteista. Troposfääristä heijastuvat yli 30 MHz:n taajuuksiset aallot, jotka muutoin kantaisivat vain näköyhteyden etäisyydellä olevalle vastaanottimelle. Otollisten sääolosuhteiden myötä tällaiset aallot voivat heijastuksien kautta kulkeutua jopa satojen kilometrien päähän. (Pulkinen 2019.)

2.1.2 Radioaallon eteneminen ilmatilassa

Jatkuvasti laajetessaan sähkömagneettinen aalto heikkenee suhteessa etäisyyden neliöön. Heikkenemiseen vaikuttaa muun muassa lähetysantennissa toteutettu suuntakuvio sekä aaltojen etenemisreiteille osuvat esteet.

Radioaaltojen kantomatkaan sekä materiaalien läpäisykykyyn vaikuttavat taajuus ja lähetysteho. UHF-taajuusalueen radioaallot voivat kantaa vapaassa ilmatilassa jopa kilometrejä, mutta läpäisevät huonosti fyysisiä esteitä, kuten seiniä tai maaston muotoja. VHF-taajuudet läpäisevät materiaaleja hieman paremmin, mutta vaimenevat edelleen merkittävästi raskaiden materiaalien osuessa lähettävän ja vastaanottavan antennin väliin. (Pulkinen 2019.)

Signaalin vaimeneminen vapaassa tilassa voidaan laskea kaavan 2 mukaan, jossa d on etäisyys, jolle vaimenema halutaan laskea, ja λ on signaalin kantoaallon aallonpituus.

$$N = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Kaava 2. Radioaallon vaimeneminen desibeleinä vapaassa tilassa (Bensky 2019).

Käytännössä kaikki lyhyellä matkalla ja pienemmillä lähetystehoilla tapahtuva signaalin siirto radioaalloilla perustuu signaalin etenemiseen suoraa sekä heijastuneita reittejä pitkin lähettävän ja vastaanottavan antennin välillä. Vastaanotettu signaali on lähes aina suoran signaalin ja matkan varrella

olevista materiaaleista sekä esteistä syntyneiden heijastumien summa. (Bensky 2019.)

Lähttimen ja vastaanottimen välillä tapahtuva todellinen siirtohäviö riippuu antennin suuntaavuudesta ja tilasta, jossa signaali etenee. Todellisen siirtohäviön laskeminen kaavojen avulla on hyvin vaikeaa, ellei mahdotonta, mutta siirtohäviö tilassa voidaan arvioida lyhyen referenssietäisyyden d_0 ja eksponentin n avulla. (Bensky 2019.)

$$PL = PL(d_0) \left(\frac{d}{d_0}\right)^n = \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{d}{d_0}\right)^n$$

Kaava 3. Siirtohäviö tilassa suhteessa eksponenttiin n . (Bensky 2019).

Vapaassa tilassa eksponentti n on kaksi, jolloin kaava 3 vastaa kaavaa 2. Lyhyen kantaman radiolaitteet ovat harvoin käytössä vapaassa tilassa ja taulukossa 2 on listattuna eksponentin arvo erilaisille ympäristöille. Eksponentti esittää ympäröivän tilan suhdetta signaalin vaimenemiseen etäisyydellä. (Bensky 2019.)

Taulukko 2. Eksponentin n arvo erilaisissa ympäristöissä (Bensky 2019, taulukko 2.1).

Ympäristö	Eksponentti n (Path gain exponent)
Vapaa tila	2
Avoin tila (pidemmällä etäisyyksillä)	4
Puhelut kaupunkiympäristössä	2.7–4
Suora näköyhteys rakennuksen sisällä	1.6–1.8
Esteellinen ympäristö rakennuksen sisällä	4–6

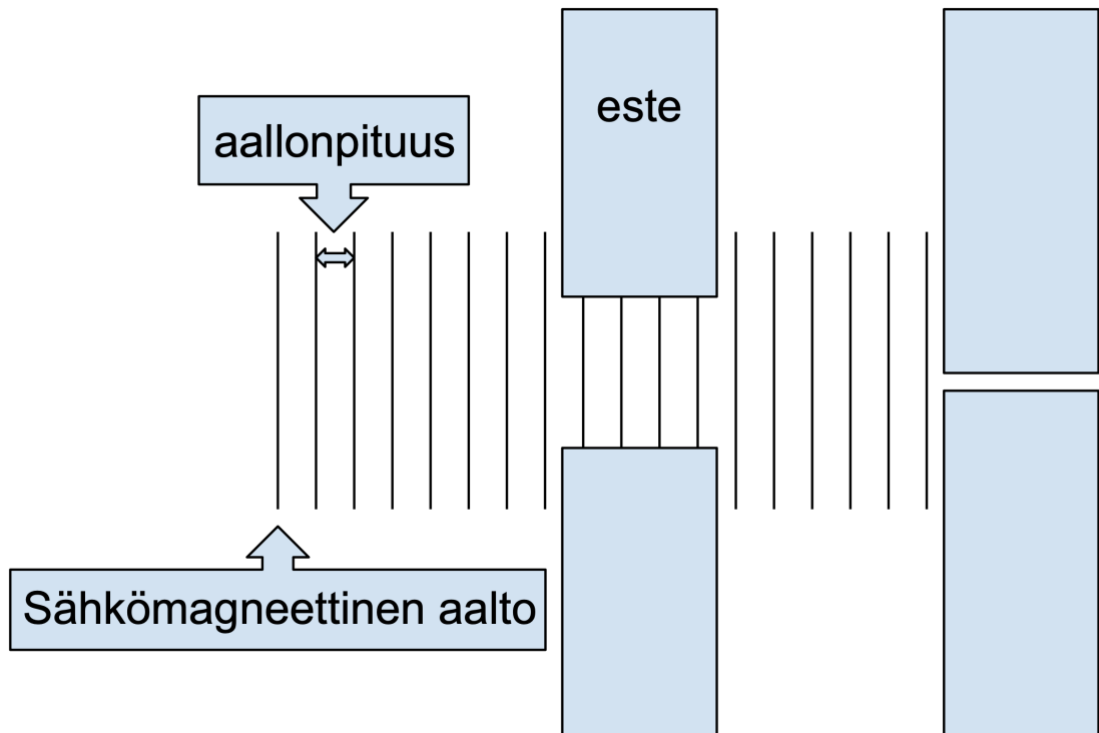
Kun langattoman järjestelmän käyttökohde ja siirtohäviö ovat tiedossa, voidaan laskea järjestelmän toimivuuden kannalta pienin mahdollinen lähetystehon arvo desibeleinä kaavan 4 mukaan. Tätä pienemmän lähetystehon signaalit eivät toimi kyseisessä tilassa luotettavasti. (Bensky 2019, luku 2.6.)

$$EIRP_{dB} = PL_{dB} - G_{r_{dB}} + P_{r_{min}} + M$$

Kaava 4. Tarvittava vähimmäislähetysteho suhteessa siirtohäviöön (Bensky 2019, luku 2.6).

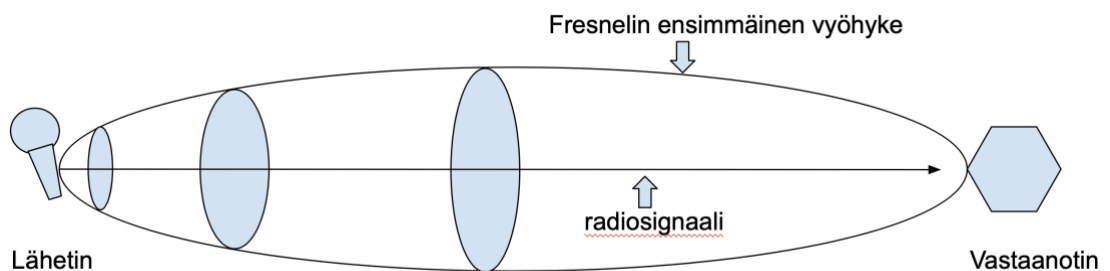
Kaavassa 4 PL_{dB} on siirtohäviö desibeleinä (path loss), $G_{r_{dB}}$ on vastaanottavan antennin vahvistus desibeleinä (receiver antenna gain), $P_{r_{min}}$ on vastaanottimen herkkyys (receiver sensitivity) ja M on linkin marginaali (link margin). Koska kaikkia arvoja ei aina tiedetä halutulla tarkkuudella, positiivinen linkin marginaaliarvo lisätään vähimmäistehon laskukaavaan, jotta vähimmäisteho on riittävä radiolinkin ylläpitämiseen. (Bensky 2019, luku 2.6.) Lyhyen matkan langattomissa järjestelmissä nyrkkisääntönä toimii esimerkiksi kolmen desibelin linkin marginaali, mutta joillekin järjestelmille voi olla tarve määrittellä järjestelmän toimintaan sopivampi linkin marginaali (Cheung i.a.).

Esteen vaikutus radiosignaalin etenemiseen riippuu esteen koosta ja materiaalin tiheydestä. Tiheydeltään suuret materiaalit, kuten metallit, hidastavat ja heijastavat radioaaltoja tehokkaasti. Signaalin aallonpituutta suuremmat esteet, kuten seinät, estävät tai vaimentavat signaalin etenemistä tehokkaasti materiaalista riippuen. Jos materiaaliltaan tiheässä esteessä on reikiä, kuten verkkoaita, signaalin läpäisykyky riippuu aallonpituuden suhteesta aukon kokoon. Jos aallonpituus on suurempi, kuin esteessä oleva aukko, ei signaali pääse etenemään vapaasti ja vaimenemissuhde riippuu materiaalin tiheydestä. (Vear 2014, 6.)



Kuva 5. Sähkömagneettinen aalto etenee vain aallonpituutta suurempien aukkojen lävitse.

Kuvitteelliset suoran näköyhteyden etenemisreitit lähettimen ja vastaanottimen välillä rajoittuvat alueisiin, joita kutsutaan Fresnelin vyöhykkeiksi. Fresnelin vyöhykkeet ovat samankeskisiä elliptisiä vyöhykkeitä suoran näköyhteyden lyhimmän reitin ympärillä. Vyöhykkeet ovat laajimmillaan lähettimen ja vastaanottimen etäisyyden puolivälissä. (Bensky 2019.)



Kuva 6. Fresnelin ensimmäinen vyöhyke lähettimen ja vastaanottimen välillä.

Radioaallon etenemisen arviointiin voidaan soveltaa vapaan tilan etenemisen laskukaavoja, jos ensimmäinen Fresnelin vyöhyke on esteetön (Puurunen 2012). Este, joka on ensimmäisen Fresnelin vyöhykkeen ulkopuolella, ei

aiheuta merkittävää diffraktiohäviötä. Ensimmäisen vyöhykkeen alueella sijaitsevat esteet vaikuttavat signaalin etenemiseen, ja ne on huomioitava laskennassa. Noin 55% säteen etäisyydestä suoran näköyhteyden ympärillä Fresnelin ensimmäisellä vyöhykkeellä on hyvä pitää esteettömänä merkittävien signaalihäviöiden välttämiseksi. (Bensky 2019.)

$$r = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Kaava 5. Fresnelin ensimmäisen vyöhykkeen laskukaava (Bensky 2019).

Fresnelin ensimmäisen vyöhykkeen koko voidaan laskea halutusta kohdasta suoran näköyhteyden reitillä kaavan 5 avulla, jossa r on vyöhykkeen säde metreinä, λ on aallonpituus metreinä, d_1 on etäisyys lähettimestä metreinä ja d_2 on etäisyys vastaanottimesta metreinä.

2.2 Modulaatiotekniikat

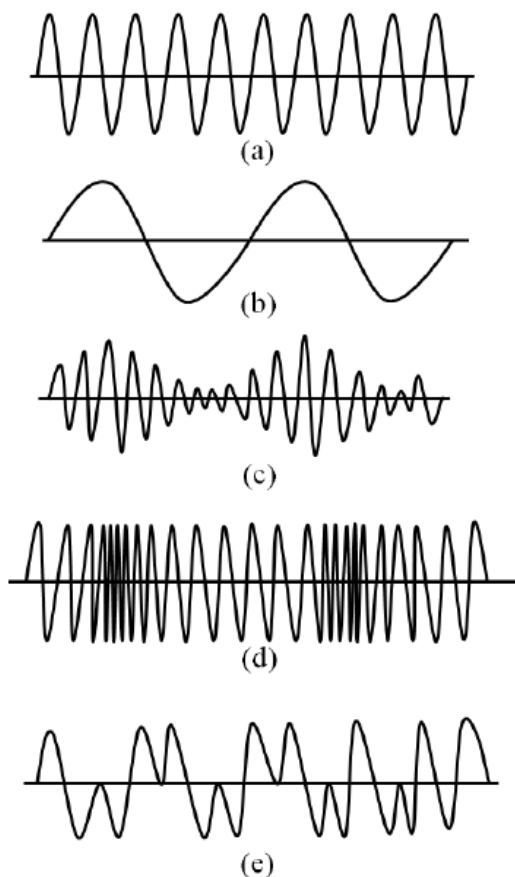
Kun siirrettävän informaation määrä ja yhteyden nopeuden vaatimukset kasvavat jatkuvasti on muodostunut tarve kehittää ja optimoida myös erilaisia tiedonsiirron tekniikoita. Signaalin muuntaminen suoraan sähkömagneettiseen muotoon olisi käytettävän taajuusalueen suhteen epätehokasta ja lähetyksiä mahtuisi saman kantamatkan alueelle vain muutama. Jotta käytettävissä olevalle taajuusalueelle mahtuisi mahdollisimman monta radiolähetystä yhtäaikaisesti, siirrettävä informaatio liitetään yhteen korkeataajuiseen radioaaltoon eli kantaaaltoon moduloimalla. Kantaallon kaistanleveys on itsessään aina nolla. Radiosignaalin tarvitsema taajuusalue määrittyy lähetettävän signaalin kaistanleveyden sekä modulaatiotekniikan mukaan. (Faruque 2017.)

Modulaatio on tärkeä vaihe langattomassa informaation siirrossa. Siirrettävä informaatio voi olla analogisessa tai digitaalisessa muodossa ja kantaalto,

johon siirrettävä informaatio moduloidaan, on korkeataajuinen siniaalto. Modulaatioprosessissa lähettävän laitteen elektroniikka (oskillaattori) synnyttää suuritaajuisen sähkömagneettisen aallon, jonka kolmea perusominaisuutta, amplitudia, taajuutta ja vaihetta, muutetaan siirrettävän signaalin mukaisesti. Olemassa olevat modulaatiotavat voidaan jakaa kahteen ryhmään: analogisten sekä digitaalisten signaalien modulointiin. (Faruque 2017; Lehto & Räsänen 2006, 7.)

2.2.1 Analogisen signaalin modulaatiotavat

Analogisen signaalin moduloitintyyppiä ovat amplitudimodulaatio (AM), taajuusmodulaatio (FM) ja vaihemodulaatio (PM) (kuva 7).

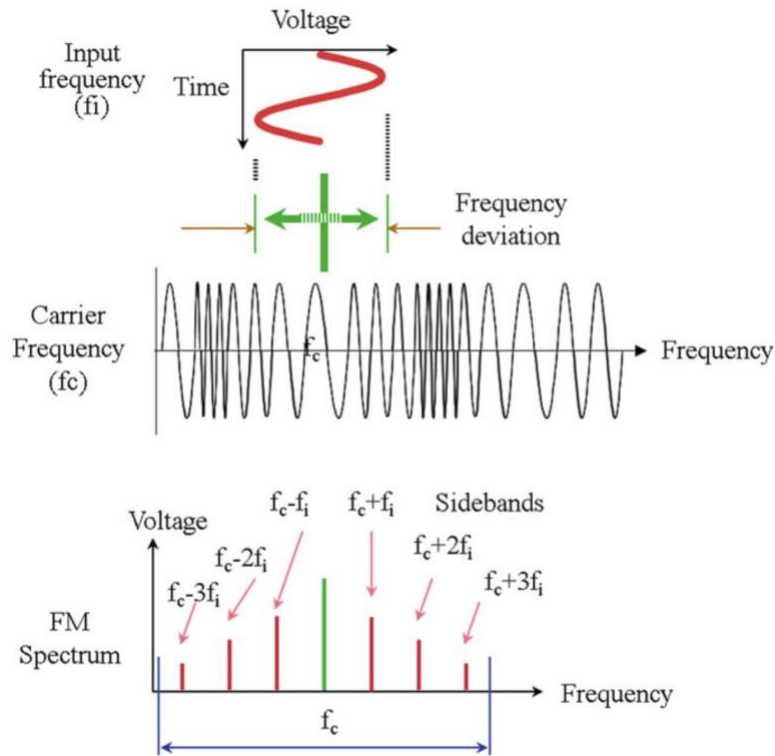


Kuva 7. Kolme modulaation perustyyppiä, jossa a: kantaalto, b: moduloitava signaali, c: AM-signaali, d: FM-signaali, e: PM-signaali (Cho i.a.).

Amplitudimodulaatiossa muutetaan kanta-aallon amplitudia lähetettävän signaalin mukaisesti. Kanta-aallon molemmille puolille syntyy ylempi ja alempi sivukaista, joiden taajuudet ovat kanta-aallon taajuus \pm modulaatiosignaalin taajuus. AM-signaalin kaistanleveys on ylempään ja alemman sivukaistan väli ja voidaan laskea kertomalla modulaatiosignaalin taajuus kahdella.

Amplitudimoduloitu signaali jakaa lähetystehon kahdelle sivukaistalle, jotka kumpikin sisältävät saman informaation, sekä kanta-aallolle, joka ei sisällä informaatiota. AM-signaali ei siten ole tehokas lähetystehon jakautumisen tai taajuuskaistan käytön suhteen ja on erityisen herkkä signaalin vaimenemiselle. Amplitudimodulaatiosta on kehitetty SSB (Single Side Band) -versio, jossa kanta-aallon viereen muodostuu vain yksi sivukaista, joka sisältää siirrettävän informaation ja on siten hieman tehokkaampi tekniikka lähetystehon ja kaistanleveyden suhteen. (Faruque 2017.)

Taajuusmoduloiduilla signaaleilla on parempi signaali-kohinasuhde kuin AM-signaaleilla, mutta ne käyttävät laajemman osan taajuuskaistasta (Faruque 2017.).

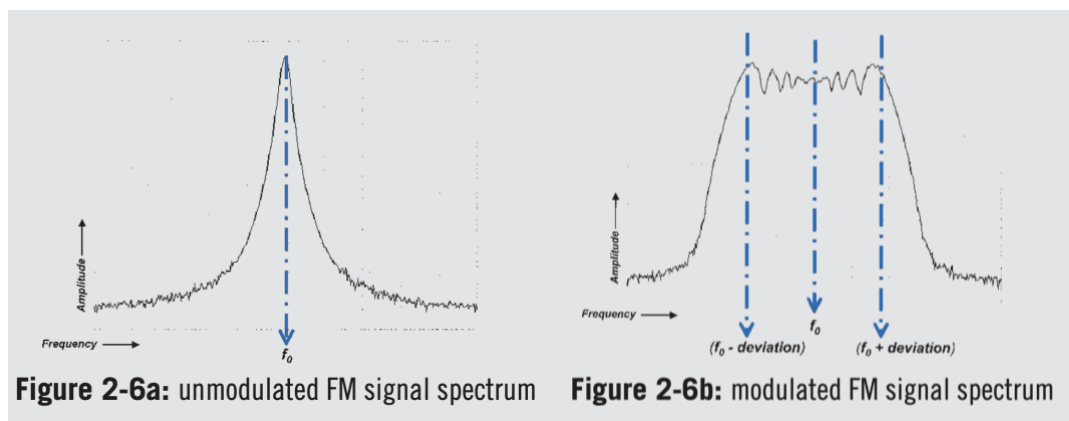


Kuva 8. Kantoaallon taajuuden muuttuessa modulaatiosignaalin mukaan. Taajuusmoduloidulle radiosignaalin muodostuu ääretön määrä sivukaistoja (Sideband) (Faruque 2017.).

Taajuusmoduloidun signaalin kaistanleveys määrittyy siirrettävän signaalin taajuuden ja amplitudin mukaan. Kantoaaltoa moduloidaan laitteelle valitun taajuuden, eli keskitaajuuden molemmille puolille. Signaalin tarvitsema kaistanleveys määritellään Carsonin kaavalla (kaava 6) , jossa $\beta = \Delta f / f_m$, eli modulaatioindeksi, Δf on taajuuden vaihteluväli ja f_m on korkein modulaatiosignaalin taajuus.

$$FM BW = 2f_m (1 + \beta)$$

Kaava 6. Kaava FM-signaalin kaistanleveyden määrittämiseen (Faruque 2017).



Kuva 9 Kanta-aallon (f_0) kaistanleveys (vasemmalla) ja taajuusmoduloidun signaalin kaistanleveys (oikealla). (Vear 2014.)

Vaihemoduloidussa signaalissa taajuus ja amplitudi pysyvät vakiona ja modulaatio-signaali esitetään vaiheen muutoksina. Vaihemoduloidun signaalin etuja on muun muassa kapeampi taajuuskaista kuin taajuusmoduloidulla signaalilla. Vaihemodulaatiota käytetään lähinnä digitaalisen signaalin siirron modulaatiotekniikoissa. (Faruque 2017.)

2.2.2 Digitaalisen signaalin modulaatiotavat

Digitaalinen signaali koostuu kahdesta numerosta, 1 ja 0, eli biteistä. Digitaalista signaalia moduloidessa kanta-aallon ominaisuuksia muokataan esittämään jompaakumpaa bittiä. Digitaalisen signaalin modulaatiotapoja ovat muun muassa *shift keying* (SK) -tekniikat sekä monimutkaisemmat modulaatiotekniikat, kuten QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ja COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), jotka perustuvat analogisen signaalin modulaatiotekniikoihin. Kaikki digitaaliset langattomat radiolaitteet käyttävät näitä tai erilaisia sovelluksia näistä tekniikoista. (Faruque 2017.)

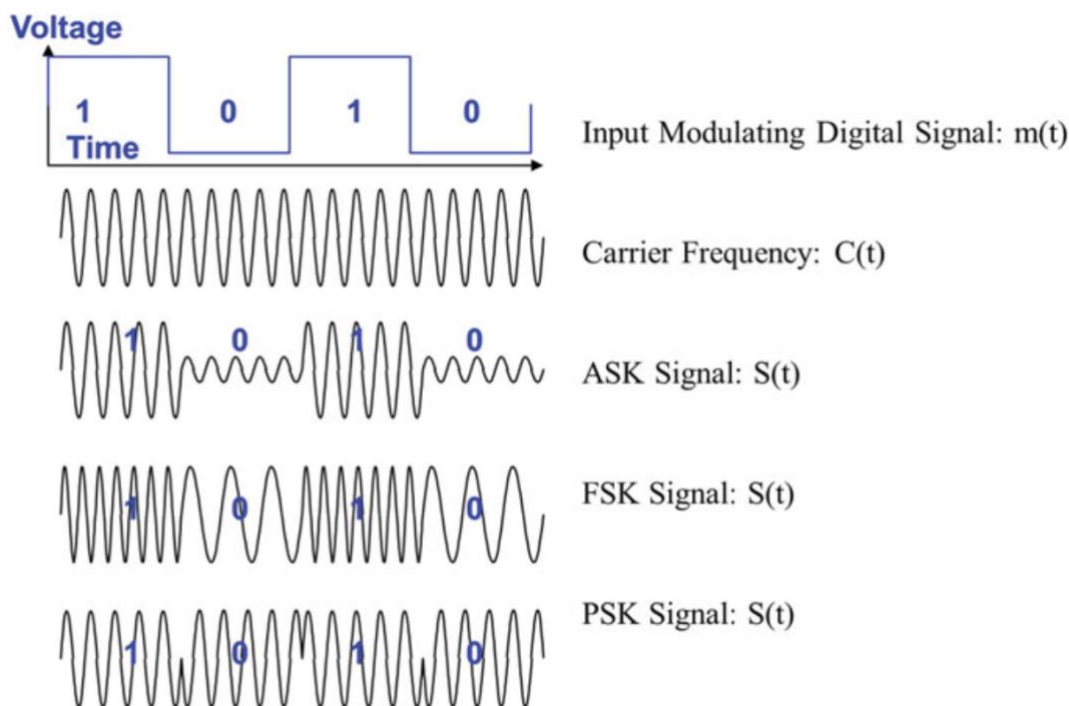


Fig. 1.4 Modulation by digital signal

Kuva 10. Digitaalisen signaalin perus modulaatiotavat (Faruque 2017).

ASK-signaali muodostuu amplitudimodulaation tapaan kanta-aallon amplitudin vaihtelusta. ASK-metodilla muodostetulle signaalille on määritetty jokin amplitudin arvo, jota voimakkaampi signaali esittää bittiarvoa 1, ja arvon alittava signaali esittää bittiarvoa 0. Yleensä nämä arvot ovat: signaali havaitaan = 1, signaalia ei havaita = 0. ASK-modulaatiota kutsutaan myös *on-off keying* (OOK) -tekniikaksi. ASK-signaalin kaistanleveys määrittyy samaan tapaan kuin AM-signaalin. (Faruque 2017.)

FSK (myös binary FSK eli BFSK) -signaali muodostetaan samaan tapaan, kuin FM-signaali. FSK-signaalin kaistanleveys on kapeampi kuin FM-signaalin, sillä kanta-aaltoa moduloidaan yhdelle suuremmalle taajuudelle ja yhdelle pienemmälle taajuudelle, jotka esittävät kahta bittiarvoa 1 ja 0. FSK-signaalin taajuuskaista määrittyy kaavan 7 mukaan, jossa f = kanta-aallon taajuus ja Δf = taajuuspoikkeama. FSK-signaalin taajuuspoikkeama riippuu modulaatiosignaalin bittinopeudesta. (Faruque 2017.)

$$\cdot \text{Binary } 0 = f + \Delta f$$

$$\cdot \text{Binary } 1 = f - \Delta f$$

Kaava 7. FSK-signaalin kaistanleveys (Faruque 2017.)

PSK moduloidun radiosignaalin vaihe muuttuu 0° ja 180° välillä modulaatiosignaalin mukaan. Tällaisen signaalin kaistanleveys on sama kuin ASK-signaalilla. (Faruque 2017; Lehto & Räsänen 2005.)

QPSK-modulointi on versio PSK-moduloinnista. QPSK-moduloinnissa vaihetta muutetaan 90° asteen osissa ja kukin osa vastaa kahta bittiä. Kantoaalto jaetaan ensin kahteen, joista toista viivästetään 90° asteen verran eli $\frac{1}{4}$ aallonpituudesta. Tämän jälkeen näitä kahta signaalia muutetaan vuorotellen 180° asteen verran, jolloin moduloitu radiosignaali vaihtelee neljän vaiheasteen välillä. Koska digitaalisessa signaalissa mahdollisia bittiarvoja on kaksi, neljällä mahdollisella vaihearvolla voidaan esittää kaksi bittiä kutakin vaihearvoa kohden. Vaiheen lisäksi voidaan yhtäaikaisesti moduloida kantoaallon amplitudia, millä saadaan aikaiseksi modulaatiojärjestelmä, jossa jokainen mahdollinen vaiheen ja amplitudin yhdistelmän arvo esittää useita bittejä. (Lehto & Räsänen 2005.)

Mitä useampaa bittiä yksi moduloitu arvo esittää, sitä kapeampi kaistanleveys saavutetaan ja sitä tehokkaampi laite on kaistanleveyden käytön suhteen. (Vear 2014.)

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) -tekniikassa moduloidaan signaalin vaiheen lisäksi amplitudia. Se mahdollistaa nopeamman datan siirron sekä kapeamman taajuuskaistan käytön. 16, 32 ja 64-QAM tarjoavat paremman hyötysuhteen ja suuremman datanopeuden, mutta ovat alttiimpia häiriöille ja vaativat monimutkaisemman laitteiston sekä signaalinkäsittelyn. (Bensky 2019.)

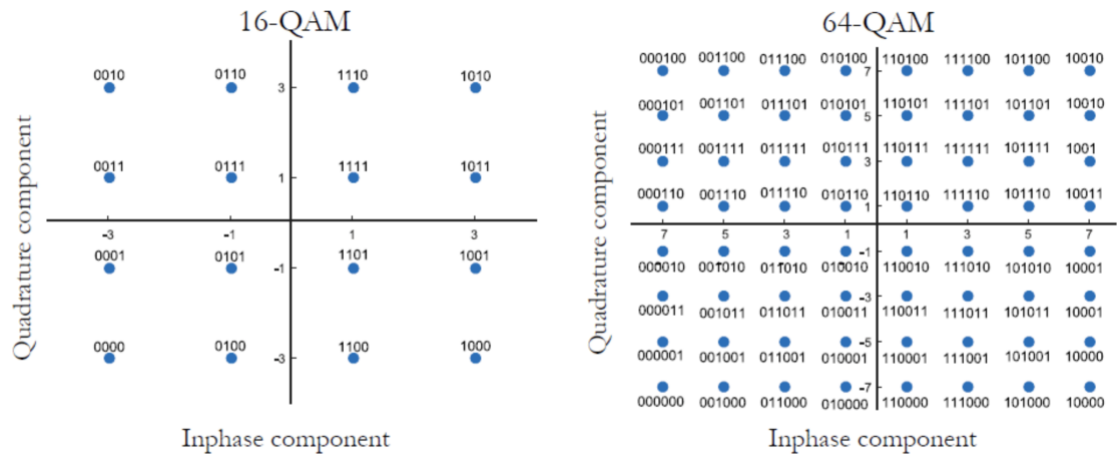


Figure 1: Signal space constellations for 16-QAM and 64-QAM

Kuva 11. 16-QAM ja 64-QAM modulaatiotekniikoissa vaiheen ja amplitudin muodostamat mahdolliset arvot ja niiden esittämät bittimäärät (Gaussianwaves.com i.a.).

COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) puolestaan on monikantainen modulaatiotekniikka, joka jakaa signaalin useisiin pienempiin taajuuskaistoihin ja lähettää ne samanaikaisesti. COFDM tarjoaa erinomaisen häiriönsietokyvyn ja mahdollistaa nopean datansiirron monimutkaisissa ympäristöissä. (Bensky 2019.)

2.3 Häiriölähteet

Signaalilla on aina pohjakohinataso riippumatta signaalin alkuperästä tai siirtotavasta. Pohjakohinaksi kutsutaan koko spektrin leveydellä havaittavaa kohinaa. Radiosignaalin pohjakohina koostuu tilassa liikkuvan elektromagneettisen säteilyn lisäksi maapallon ilmakehässä tapahtuvista salamaniskuista, lämpösäteilystä sekä muiden lähellä sijaitsevien laitteiden muodostamasta säteilystä. Lisäksi signaaliketjun fyysiset elementit, kuten erilaiset komponentit, piirit ja kaapelit, lisäävät pohjakohinaa niiden ominaisuuksista ja signaaliketjun pituudesta riippuen. (MacIntosh 2021.)

Maasta ja rakenteista aiheutuneet heijastukset voivat aiheuttaa häiriöitä etenevän signaalin vastaanottimessa. Jokainen heijastuskerta kääntää aallon

polarisaatiota 180° , jolloin heijastuneet aallot voivat johtaa negatiiviseen tai positiiviseen summautumiseen ja jopa 40–50 dB:n signaalin vaimenemaan yhdessä suoraa reittiä vastaanottimelle saapuvan signaalin kanssa. Epätasaiset pinnat lähettimen läheisyydessä eivät saa aikaan suoraa heijastusta, mutta rikkovat siihen osuvan signaalin useaan eri suuntaan. (Bensky 2019.)

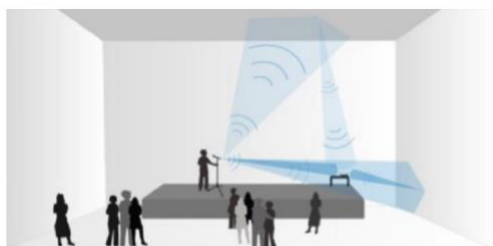


Fig. 2: Typical reflections of the transmit signal on its way to the receiver

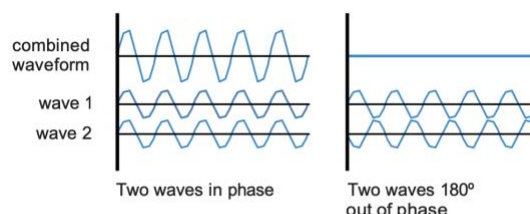


Fig. 3: Superposition of sine waves

Kuva 12. Radiosignaalin monitie-eteneminen lähettimeltä vastaanottimelle (Sennheiser i.a.).

Monikanavaisissa langattomissa järjestelmissä, joissa laitteita käytetään lähellä toisiaan, intermodulaatio on yksi merkittävimmistä häiriöiden aiheuttajista.

Intermodulaatiolla tarkoitetaan kahden tai useamman tarpeeksi voimakkaan eri taajuuksisen radiosignaalin summaa, mikä aiheuttaa harmonista vääristymää laitteiden elektroniikassa. Yksinkertaisesti intermodulaatiotuotteet muodostuvat taajuuksien summista ja kerrannaisista sekä niiden summista ja kerrannaisista. Intermodulaatiosta aiheutuville ongelmille välttyään huolellisella taajuuskoordinoinnilla ja järjestelmäsuunnittelulla. (Eargle 2004.)

Häiriöt ja ongelmat voivat olla myös taajuuskaistariippuvaisia. Langattomien mikrofoni-järjestelmien käyttämisestä VHF- ja UHF-taajuuskaistoista VHF-alueen matalammat taajuudet ovat herkempiä intermodulaatiosta aiheutuville häiriöille, ja pohjakohina matalammilla taajuusalueilla on voimakkaampaa. VHF-alueella täytyy ottaa huomioon myös suhteessa kauempana toimivat lähetykset ja häiriölähteet, sillä pidemmät aallonpituudet kulkeutuvat kauemmas ja läpäisevät esteitä paremmin kuin UHF-alueen lyhyemmän aallonpituuden radioaallot. (Riitamaa 2008.)

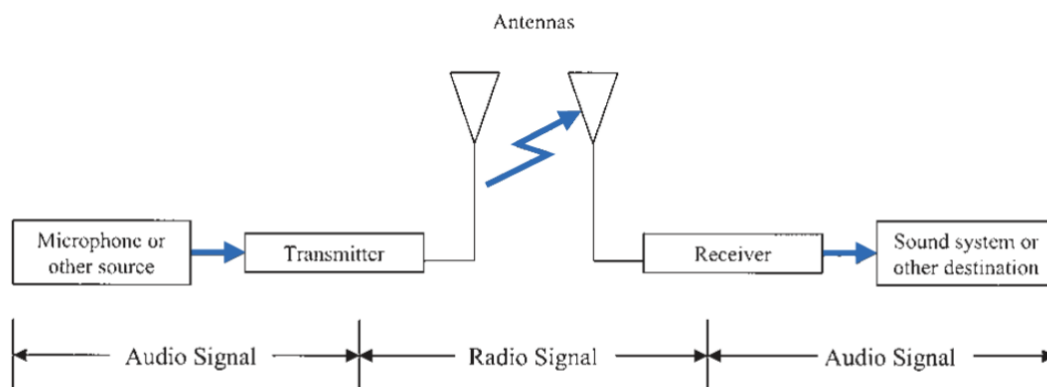
3 Langattomat mikrofonit

Lyhyen kantaman radioviestinnän laitteet toimivat matalammalla teholla noin 100 mW:iin asti, ja laitteiden toimintamatka rajoittuu satoihin metreihin. Järjestelmissä käytetään usein pieniä ympärisäteileviä antennoja, ja valmistaja on rajoittanut tuotteen käytettävissä olevaa taajuusaluetta vastaamaan myyntialueen säädöksiä ja yhteiskäyttöalueen taajuuksia. (Bensky 2019.)

Langattomien mikrofonien toimintaa voidaan tarkastella signaali-kohinasuhteen eli SNR-arvon (Signal-to-Noise Ratio) avulla, jonka yksikkö on desibeli (dB). Laadukkaassa langattomassa mikrofonissa on valmiiksi korkea SNR-arvo, eli laitteen kohinataso on hyvin matala suhteessa vahvistettuun audiosignaaliin. Langattomissa järjestelmissä täytyy ottaa huomioon radiosignaalin SNR-arvo, sillä erityisesti analogiset langattomat mikrofonit sekä korvamonitorointilaitteet ovat herkkiä radiosignaalin mukana vastaanotetulle kohinalle ja häiriöille sekä erilaisten esteiden ja materiaalien aiheuttamalle signaalin vaimenemiselle. (RF Venue i.a.)

3.1 Langattomat mikrofonijärjestelmät

Langaton mikrofonijärjestelmä koostuu lähettimestä, lähettävästä ja vastaanottavasta antennista sekä mahdollisesti antennin kaapelista ja vahvistimesta. Suurissa järjestelmissä kytketään antennijakaja (antenna splitter) antennin ja vastaanottimien väliin.



Kuva 13. Langaton mikrofonijärjestelmä (Vear 2014).

Langattomat mikrofonilähettimet ovat pääasiassa kädessä pidettäviä kapulamikrofoneja, joissa lähetin on rakennettu mikrofonin rungon sisään, tai taskulähettimiä, joissa on kaapelimainen neljäsosa aallonpituuden antenni. Lähettimet toimivat paristoilla tai akuilla, ja laadukkaan ammattikäyttöön tarkoitetun laitteen toiminta-aika on useita tunteja ja reilusti pidempi, kuin esimerkiksi kuluttajakäyttöön suunnatuissa laitteissa. (MacIntosh 2021.)

Vastaanottavat antennit ovat neljäsosa aallonpituuden tai puolikkaan aallonpituuden ympärisäteileviä antennieja tai suuntaavia antennieja. Heliksi-antenneja käytetään useammin lähettävänä kuin vastaanottavina antennieina. Puolikkaan aallonpituuden antennit voidaan kytkeä vastaanottimiin koaksiaalikaapelilla, jonka impedanssi on mahdollisimman lähellä muiden järjestelmän osien impedanssia. Lähes kaikkien modernien langattomien mikrofonien antennikaapeliksi sopii 50 Ω :n koaksiaalikaapeli. (Riitamaa 2008.)

Esityskäyttöön tarkoitetun langattoman mikrofonin vastaanotin on laitemallista riippuen 1–4-kanavainen. Lähes kaikki modernit vastaanottimet tukevat antennidiversiteettiä, eli signaali vastaanotetaan kahdella tai useammalla antennilla samanaikaisesti. Vastaanotin demoduloi antennilta saapuvan signaalin ja siirtää sen kanavalle osoitetusta ulostuloportista joko analogisena tai digitaalisena audiosignaalin edelleen muulle äänijärjestelmälle. Vastaanottimella on muutamia asetuksia, jotka vaikuttavat merkittävästi

mikrofonilta saapuvan signaalin havaitsemiseen, kuten squelch tai joissain vastaanottimissa pilottiäni. (Färm 2022.)

Squelch-asetus on käyttäjän asettama arvo, jonka mukaan vastaanotin vaimentaa ulostuloportin, mikäli kyseisellä kanavalla ei havaita tarpeeksi voimakasta radiosignaalia. Kehittyneemmät langattomat mikrofonit käyttävät vaimennuksen kynnysarvon sijaan pilottiäni-ominaisuutta. Lähetin lisää audiosignaalin kantoaallon rinnalle toisen signaalin, joka indikoi vastaanottimelle lähettimeltä saapuvaa audiosignaalia. Pilottiäänien mukana lähetetään usein myös muuta informaatiota esimerkiksi paristoissa tai akussa jäljellä olevasta varauksen määrästä. (Färm 2022.)

3.2 Analogiset ja digitaaliset langattomat mikrofonit

Koska tilassa etenevä kantaalto on analoginen, digitaalisen ja analogisen signaalin erot liittyvät enemmän lähetettävän signaalin prosessointiin sekä modulaatiotapaan. Digitaaliset järjestelmät mahdollistavat suuremman dynamiikka- ja taajuusalueen sekä paremman SNR-arvon suhteessa analogisiin järjestelmiin, mutta vakaan ja laadukkaan signaalin saavuttamiseksi vaaditaan paljon kehittyntä tekniikkaa muun muassa bittihäviöiden kompensointiin. (Vear 2014.)

Analogisissa langattomissa mikrofoneissa audiosignaali täytyy kompressoida ennen modulaatiota, jotta hiljaisemmat äänet erottuisivat ja välittyisivät myös vastaanottavassa päässä pohjakohinasta. Tämä operaatio nostaa signaalin kohinatasoa joko staattisesti tai dynaamisesti. Modernimmat analogiset langattomat mikrofonit käyttävät dynaamista kompressointia, jolloin kompression määrä riippuu signaalin dynamiikasta. Lähettimessä audiosignaalin korkeita taajuuksia korostetaan ja koko signaali kompressoidaan modulaatioprosessin optimoimiseksi. Vastaanottimessa signaali dekompressoidaan ja korkeiden taajuuksien korostus vähennetään, jolloin vastaanotetun audion dynamiikka sekä taajuusvaste vastaavat alkuperäistä signaalia. (Bensky 2019)

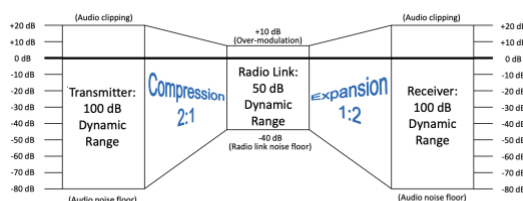


Figure 2-5a: compander (2:1, fixed rate)

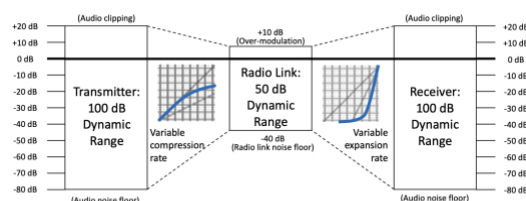


Figure 2-5b: compander (variable)

Kuva 14. Audiosignaalin kompressointi ja ekspandointi analogisissa langattomissa mikrofoneissa. Vasemmalla staattinen ja oikealla dynaaminen menetelmä. (Vear 2014.)

Digitaalisissa langattomissa mikrofoneissa bittimuotoista audiosignaalia ei tarvitse kompressoida tai muuten käsitellä modulaatiota varten, ja siksi digitaalisissa langattomissa mikrofoneissa on usein parempi taajuusvaste ja suurempi dynamiikka-alue kuin analogisissa mikrofoneissa suhteessa signaalin pohjakohinaan. Modulaatiotekniikasta riippuen digitaaliset mikrofonit varaavat myös kapeamman kaistan taajuusalueelta kuin analogiset. (DPA microphones i.a.) Digitaalisten langattomien mikrofonien heikkouksiin kuuluu latenssi, joka varsinkin vanhemmissa laitteissa on merkittävästi suurempi kuin analogisissa järjestelmissä. Latenssi muodostuu digitaalisesta signaalin prosessoinnista, kuten A/D-muunnoksesta ja äänisignaalin koodauksen muodostamisesta. (Vear 2014.)

Taajuuskoordinoinnin kannalta Analogiset langattomat mikrofonit tarvitsevat kantoaallon ympäriltä leveämmän kaistan toimiakseen. Kompressoimalla signaalia, eli pienentämällä signaalin dynaamista vaihtelua, saadaan kaistanleveyttä kavennettua, mutta taajuusvaihtelu kantoaallossa on aina suurempaa verrattuna digitaaliseen signaaliin. Ideaalisti analoginen langaton mikrofoni ei moduloi signaalia $\pm 75\text{kHz}$ laajemmalla alalla kantoaallostaa. (DPA microphones i.a.) Säädöksien mukaan langaton mikrofoni ei saa käyttää 200kHz leveämpää kaistaa taajuusalueesta (Sennheiser i.a.).

3.3 Antennit langattomissa mikrofonijärjestelmissä

Markkinoilla on paljon erilaisia langattomia mikrofonijärjestelmiä ja niihin tarkoitettuja antennia. Variaation myötä myös käyttötarkoituksia ja käyttötapoja on monia ja käyttäjän täytyy olla tietoinen antennien ominaisuuksista.

Antenni on anturi, joka muuttaa johdinta pitkin siirtyvän signaalin sähköisestä jännitevaihtelusta sähkömagneettiseksi aaltoliikkeeksi eli radioaaltoiksi antennia ympäröivään ilmatilaan tai toisin päin. Antennin elementtien pituus määrittää antennin kattaman taajuusalueen. On signaalin välittämisen kannalta tärkeää käyttää laitteen taajuusalueelle sopivan mitaista antennia. (Färm 2022.)

Antennit jakautuvat aktiivisiin ja passiivisiin antenneihin. Passiivisia antennia voidaan käyttää sekä vastaanottavina että lähettävinä, aktiiviset antennit on usein tehty ominaisuuksiltaan vain vastaanottaviksi. Aktiivisissa antennissa on sisäänrakennettu vahvistin, joka vahvistaa signaalia, kun se etenee antennilta vastaanottavalle laitteelle. Vahvistin tarvitsee toimiakseen virtaa ja aktiivisia antennia voidaan käyttää vain sellaisten laitteiden kanssa, joiden antenniporteista lähtee myös vahvistimen tarvitseva käyttövirta. Aktiivisten antennien vahvistimissa on usein mahdollisuus valita haluttu vahvistusteho ja antennia voidaan käyttää myös passiivisessa tilassa. Aktiivisen antennin käytössä kannattaa huomioida, että antenni tarvitsee toimiakseen käyttövirran myös passiivisessa tilassa. (Färm 2022; Vear 2014.)

Langattomissa mikrofoneissa lähettävä antenni on usein sisäänrakennettu laitteeseen, kuten esimerkiksi kädessä pidettävissä mikrofoneissa. (Vear 2014.)

Yleisiä langattomissa mikrofonijärjestelmissä käytettäviä antennityyppejä ovat:

- $\frac{1}{4}$ ja $\frac{1}{2}$ aallonpituuden ympärisäteilevä antenni, tunnetaan myös nimellä monopoli ja "piiska-antenni".
- Dipoliantenni

- Laajan taajuusalueen ympärisäteilevä, eli omniantenni.
- LPDA, eli Log-Periodic Dipole Array -antenni. Kutsutaan myös "lapa-antenniksi".
- Pyöreästi polarisoiva antenni tai heliksiantenni.

(Shure i.a.)

3.3.1 Antennityypit

Monopoli antennit ovat $\frac{1}{4}$ aallonpituuden mittaisia. Tällaisten antennien säteilykenttä muodostuu tasaisesti pituuden ympäri ja on heikoimmillaan antennin kärjissä. $\frac{1}{4}$ aallonpituuden antennit käyttävät usein laitteen runkoa osana antenna, jonka takia tällaisia antennia ei ole suositeltavaa käyttää kytkentäpaneelien, antennijakajien tai summaavien laitteiden kanssa. Tällaisia antennia tavataan usein taskulähettimissä ja -vastaanottimissa sekä lähtötason laitteissa. (Shure i.a.)

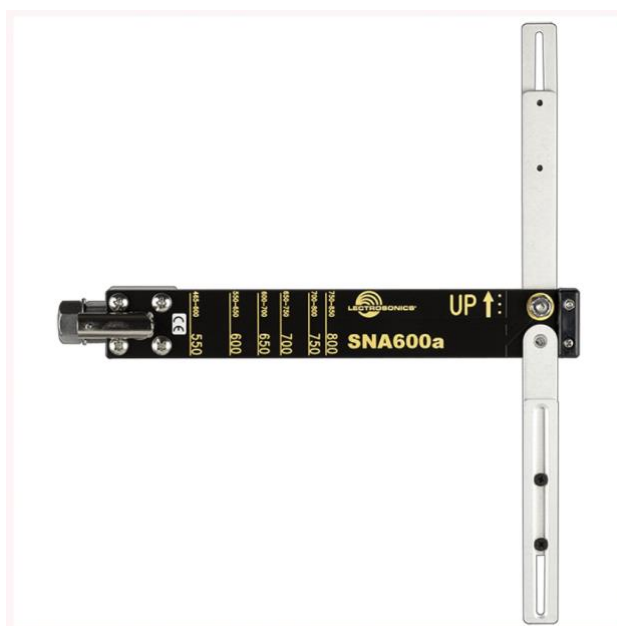


1/4 wave and 1/2 wave antennas: UHF range

Kuva 15. UHF-taajuusalueen $\frac{1}{4}$ (vasemmalla) ja $\frac{1}{2}$ (keskellä) aallonpituuden mittaiset antennit kiinni laitteissa (Shure i.a.).

Dipoli antenni, eli $\frac{1}{2}$ aallonpituuden antenni koostuu kahdesta $\frac{1}{4}$ aallonpituuden mittaisesta erotetusta osasta, joiden ansiosta voidaan teoriassa saavuttaa kolme desibeliä suurempi vastaanotettu signaali, kuin monopoli antennilla, mutta suuntaavuus on suhteessa sama. Antennin taajuusvastetta on mahdollista

laajentaa suurentamalla antennin läpimittaa (halkaisijaa) tai käyttämällä kartiomaisia elementtejä sylinterimäisen langan sijaan. (Vear 2014.)



Kuva 16. Lectrosonicsin dipoliantenni (Mediatrade i.a.).

LPD-antennit (log periodic dipole array) koostuvat joukosta dipoliantenneja, joiden pituudet ja välimatkat toisiinsa vaihtelevat antennirakenteessa, jolloin antennin taajuusvaste on laajempi. LPD-antennin taajuusalue määrittyy lyhyimmän ja pisimmän elementin mukaan, joiden pituus on puolet taajuusalueen ylimmän ja alimman taajuuden aallonpituudesta. Pidemmällä antennilla, joka koostuu useammasta elementistä, saavutetaan laajempi taajuusalue ja rajaavampi suuntakuvio. Lapa-antennien suuntaavuus on usein 120 asteen luokkaa ja signaali on antennin edessä 6–8 dB vahvempi. (Vear 2014.)



Kuva 17. Shuren passiivinen LPDA-antenni (Shure.com i.a.).

Pyöreästi polarisoivista antenneista yleisin on heliksiantenni, jonka elementtiosa on asetettu kierteelle kiinni maatasoon antennin rakenteen sisälle. Kierteisellä antennielementillä saadaan aikaan jatkuvasti kulkusuunnan akselin ympäri polarisoituva, eli ”pyörivä”, radiosignaali, joka vähentää polarisaatioeroista aiheutuvaa signaalin vaimenemista jopa 20 desibeliä. Pyöreästi polarisoivat antennit ovat yhteensopivia kaikissa suunnissa lineaarisesti polarisoituneiden antennien kanssa ja ovat siksi suosittuja esimerkiksi korvamonitorointijärjestelmissä. Pyöreästi polarisoivilla antenneilla on laaja taajuusvaste ja erittäin kapea suuntaavuus. (Shure i.a.) (RF Venue i.a; Lehto & Räsänen 2005.)



Kuva 18. Shuren heliksiantenni, jossa antennielementin kierteet ovat näkyvissä (Shure i.a.).

Lisäksi on olemassa useita muita antennityyppejä, kuten liuska-antennit (patch antenna), jotka asennetaan esimerkiksi laitteen pintaan. Liuska-antennit ovat helposti integroitavissa erilaisiin laitteisiin pienen kokonsa ja edullisen hintansa myötä, mutta ovat kapeakaistaisia ja hyötysuhde on huono. Tällaisia antennejä käytetään laajasti muun muassa puhelimissa sekä intercom-laitteissa, jotka operoivat UHF-taajuusalueen yläpuolella. (Lehto & Räisänen 2005.) Pidemmän matkan radiolinkeissä käytetään voimakkaasti suuntaavia jänneantenneja. Käyttökohteita ovat esimerkiksi puhelinverkon ja televisioasemien mastojen radiolinkit. (Puurunen 2012.)

3.3.2 Antennien ominaisuudet

Antennin elementtien pituus määrittää taajuusalueen, jolla antenni pystyy lähettämään ja vastaanottamaan signaalia. Elementin pituuden täytyy vastata halutun signaalin taajuuden aallonpituutta tarpeeksi suurella suhteella, jotta lähetys tai vastaanotto on mahdollista. Antennielementin pituus voi olla suunnilleen $\frac{1}{4}$ tai $\frac{1}{2}$ aallon pituudesta, riippuen antennin tyypistä. $\frac{1}{4}$ aallonpituuden antennit ja antennielementit tarvitsevat maatasen (ground plane), joka toimii osana antennia. Maataso voi muodostua esimerkiksi vastaanottavan laitteen rungosta. Laajakaistaiset antennit koostuvat useista $\frac{1}{2}$

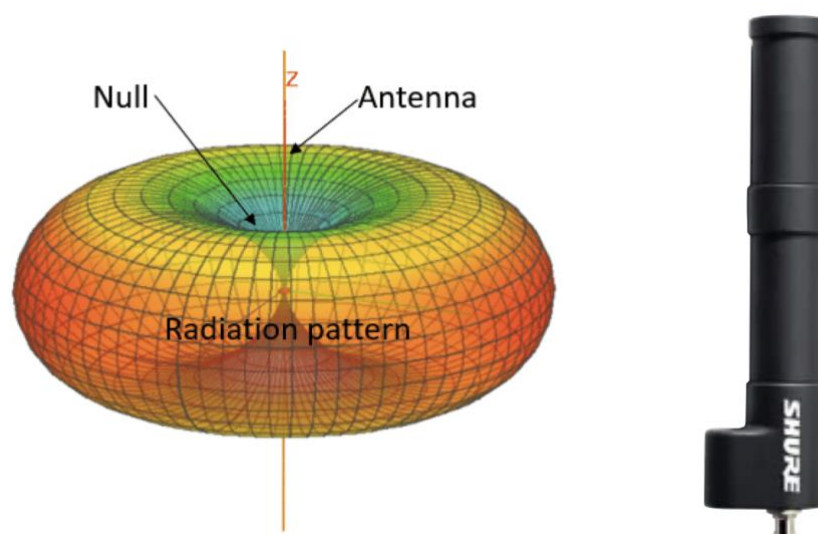
aallonpituuden elementeistä, jotka mahdollistavat signaalin lähetyksen ja vastaanoton laajalla taajuusalueella. (Bensky 2019.)

Antennilla on aina suuntakuvio ja polarisaatio, jotka vaikuttavat antennin kykyyn havaita radiosignaali. Suuntakuvio on antennin lähettämän säteilyn suunta tai suunta, josta antenni vastaanottaa säteilyä tehokkaimmin. Suuntaavuutta verrataan usein teoreettiseen isotrooppiseen antenniin, joka säteilee kolmiulotteisessa maailmassa tasaisesti kaikkiin suuntiin. Isotrooppisen antennin suuntaavuus arvo olisi 1 tai 0 kun puolikkaan aallonpituuden dipoliantennin suuntaavuus on 1.64 tai 2.15. (Bensky 2019.)

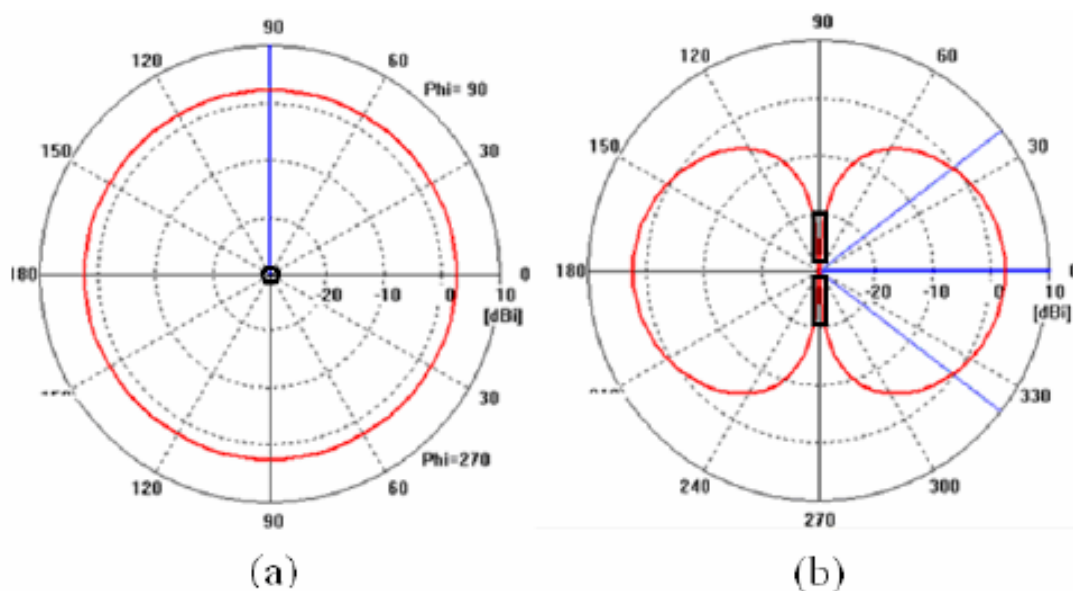
Polarisaatiosuunta tarkoittaa antennin lähettämän tai vastaanottaman säteilyn värähtelysuuntaa. Jos radioaallon polarisaation suunta on eri kuin antennin, signaali voi vaimentua useita kymmeniä desibelejä polarisaatioerosta johtuvan suodattumisen yhteydessä. Polarisaation muutosten vuoksi vastaanottavien laitteiden kanssa hyödynnetään usein antennidiversiteettiä, eli useamman vastaanottavan antennin käyttöä erilaisessa asennuskulmassa ja/tai positiossa samalla vastaanottimella, kun käytössä on lineaarisesti polaarisia antennia. (Färm 2022, 25.) Riippuen siitä miten päin antenni tuottaa sähkökenttäänsä, voidaan sitä kutsua **pysty-, vaaka- ja pyöreästi polarisoituneeksi** antenniksi. (Vear 2014.) Suuri osa langattomissa mikrofonijärjestelmissä käytettävistä antenneista ovat pituutensa suuntaisesti pystypolarisoituneita. Pystysuunnassa polarisoitujen radioaaltojen vaihe ja heijastusten määrä maasta riippuu enemmän aallon tulokulmasta kuin horisontaalisesti polarisoitujen aaltojen. Pystysuunnassa polaariset antennit ovat myös käytännöllisempiä tapahtumissa joissa antenni täytyy sijoittaa kiinni esiintyjään. Mikrofonien ja taskulähetimien antennit ovat suurimman osan ajasta pystyasennossa ja vastaanottavien antennien polarisaation täytyy olla saman suuntainen, jotta signaali voidaan vastaanottaa. (Bensky 2019.)

Antennit jakautuvat yleisesti omni, eli ympärisäteileviin, ja suuntaaviin antenneihin. Antennien suuntaavuus ilmoitetaan astelukuina tai säteilykuviona.

Yleisimmät säteilykuviot langattomien mikrofonijärjestelmien antenneilla ovat omni- ja kardioidi.



Kuva 19. Omni-suuntakuvioiden monopoli- tai dipoliantennin (z) suuntakuvioiden (radiation pattern) vasemmalla (Färm 2022, 18) ja laajan taajuusalueen omniantenni (oikealla) (Tapia, Sigismondi i.a.).



Kuva 20. dipoliantennin suuntakuvioiden horisontaalisesti (a, vasemmalla) ja vertikaalisesti (b, oikealla) (Ghiotto i.a.).

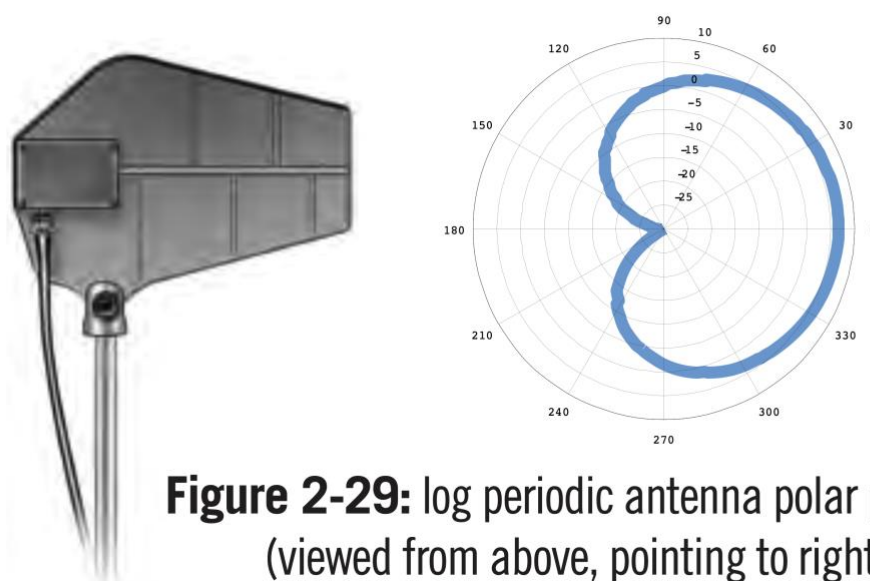
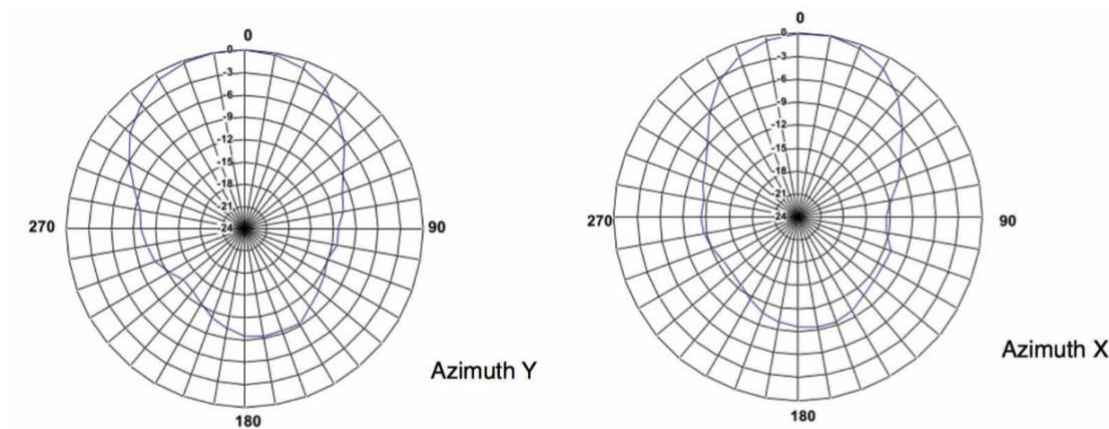


Figure 2-29: log periodic antenna polar pattern
(viewed from above, pointing to right)

Kuva 21. LPDA-antennin suuntakuvio horisontaalisesti yläpuolelta katsottuna (Vear 2014).

Yleisesti laitevalmistajat ilmoittavat langattomien mikrofonijärjestelmien antenneille vain yhden asteluvun suuntaavuudelle, joka vastaa horisontaalisen akselin säteilykentän suuntaavuutta, jonka jälkeen signaali vaimenee antennilla enemmän kuin 3 desibeliä. RF Venue antenneille on poikkeuksellisesti ilmoitettu myös vertikaalinen avautumiskulma. Esimerkiksi pyöreästi polarisoivan CP Beam -antennin suuntaavuus on x-akselilla 63° ja y-akselilla 70° . (RF Venue i.a.)



Kuva 22. RF Venuen pyöreästi polarisoivan CP Beam antennin suuntakuviot vertikaalisesti (Azimuth Y) ja horisontaalisesti (Azimuth X) (RF Venue i.a.).

3.4 Häiriöt langattomissa mikrofoneissa

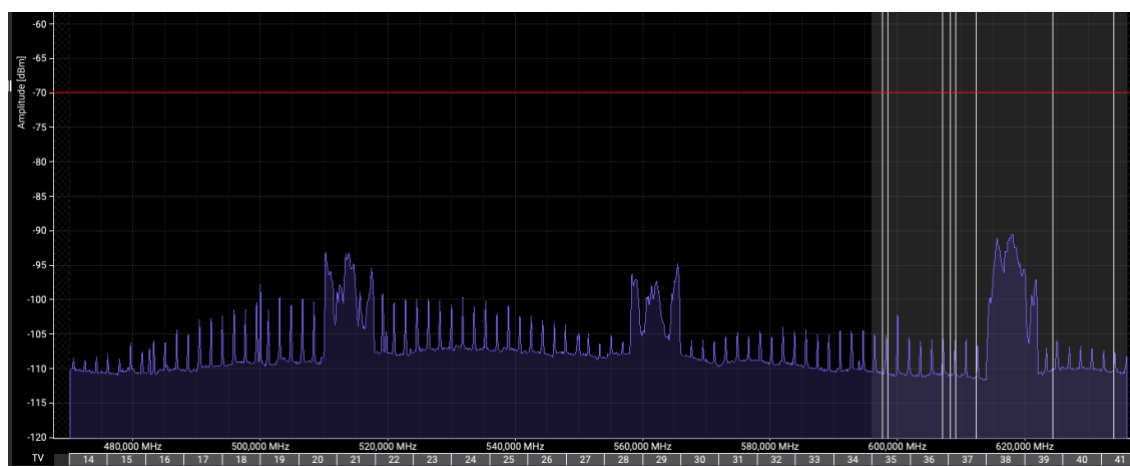
Koska radiosignaalit ovat ilmatilassa etenevää energiaa, vastaanotin näkee kaiken sille asetetulla taajuudella olevan säteilyn. Esimerkiksi jos mikrofoniin lähettämän signaalin lisäksi samalla taajuudella on muuta radioliikennettä, jonka vastaanotin havaitsee suunnilleen samalla voimakkuudella kuin mikrofoniin signaalin, ei vastaanotin pysty erottamaan signaaleja toisistaan. Tällaisia häiriöitä on mahdollista välttää järjestelmän optimoinnilla sekä taajuuskoordinoinnilla. (Vear 2014.)

Ennakoitaviin ja muuttumattomiin häiriöihin kuuluvat muun muassa paikalliset televisiokanavat ja muut tiedossa olevat langattomat laitteet ympäristössä, kuten esiintyvien artistien langattomat mikrofoniin ja korvamonitorointijärjestelmät sekä paikalla olevat videoseinät tai muut mahdollisesti häiriötä aiheuttavat laitteet.

Suurin häiriötekijä langattomille mikrofoniinjärjestelmille on laitteiden keskinäinen intermodulaatio. Kun lähettäjiä ja vastaanottimia on lähekkäin enemmän kuin yksi, taajuusalueelle muodostuu intermodulaatiotuotteita joiden voimakkuus riippuu vaikuttavien signaalien voimakkuudesta. Mitä enemmän laitteita on lähekkäin, sitä enemmän havaitaan intermodulaatiotuotteita. (Vear 2014.)

Lähettävä ja vastaanottava antenni on asetettava tarpeeksi kauas toisistaan, sillä lähettävä signaali voi ylikuormittaa lähellä olevan vastaanottimen. Joissain vastaanottimissa on PAD-toiminto, joka laskee antennin signaalin vahvistusta, jos signaalin voimakkuus ylittää järjestelmän sietokyvyn. Joissain tapauksissa tämä voi aiheuttaa häiriötä signaalin vastaanotossa ja järjestelmän oikeanlaisessa toiminnassa. (Vear 2014.) Esimerkiksi korvamonitorin vastaanotin voi havaita vieressä olevan mikrofonin signaalin ja päästää sen läpi valkoisena kohinana, jos signaali on tarpeeksi voimakas ja vaikka laitteet toimisivat omilla taajuuksillaan. Voimakas radiosignaali voi siis vuotaa toisille taajuuksille vastaanottimella elektroniikan ylikuormittuessa. (Tapia, Sigimondi i.a.)

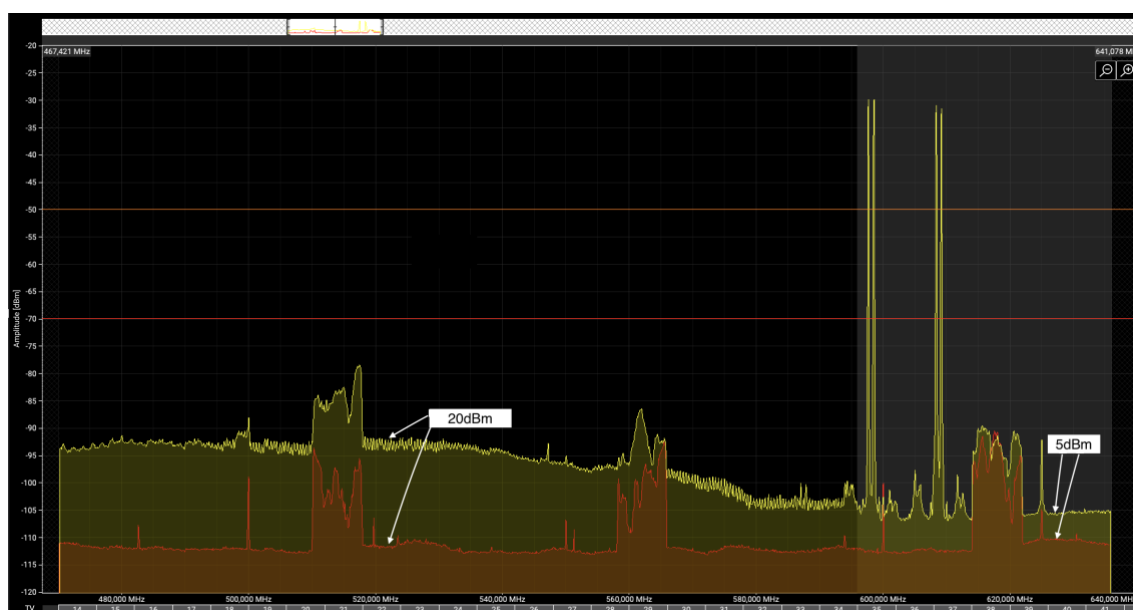
Laitteiden keskinäistä häiriötä voi muodostua myös järjestelmän sisäisesti. Lähekkäin olevat antennit tai laitteet voivat aiheuttaa häiriötä toistensa elektroniikassa. Järjestelmän sisäisiä häiriötä voi ehkäistä esimerkiksi hyvin suojatuilla kaapeleilla, antennijakajilla ja -summaajilla sekä pidentämällä laitteiden keskinäistä välimatkaa. (Vear 2014.)



Kuva 23. Skannaus Shuren AD4D vastaanottimella ja viallisella Shuren UA874WB aktiivisella LPDA-tyyppisellä antennilla.

Taajuusalueen skannaus käyttökohteessa kannattaa tehdä aina langattomien mikrofonien vastaanottimella ja sen kanssa käytössä olevalla antennilla, kun laitteet on asemoitu pysyville paikoilleen. Näin saadaan paras mahdollinen

käsitys vastaanottava laitteen havaitsemasta muusta liikenteestä sekä käytössä olevasta taajuusalueesta. Lisäksi havaitaan mahdolliset vialliset laitteet signaali ketjussa. Esimerkiksi aktiivisen antennin viallinen virtalähde voi aiheuttaa häiriö ”piikkejä” koko käytettävän spektrin alueelle, vaikka on kykenevä vastaanottamaan radiosignaalia muuten normaalisti (ks. Kuva 23). Kuvassa skannauksen pohjakohinataso ja TV-kanavat näyttävät normaalilta, mutta koko taajuusalueella on tasaisin välimatkoin kapean kaistanleveyden häiriölähteitä.



Kuva 24. Kannettavan tietokoneen aiheuttama kohinatason nousu (keltaisella) verrattuna pohjaskannaukseen (punaisella).

Yllä olevassa skannauksessa vastaanottavan laitteen päällä oleva tietokone on aiheuttanut lämmön ja koneen sisältämän elektroniikan muodostaman magneettikentän seurauksena voimakkaan pohjakohinan nousun. Kohinataso on noussut noin 20 dBm taajuusalueen alemmalla puoliskolla. Alueen korkeammilla taajuuksilla ero on noin 5 dBm.

3.5 Mikrofonijärjestelmien käyttö

Langattomia laitteita ja järjestelmiä on kaikkialla ja erityisesti tapahtumissa järjestelmän hallinnalla, koordinoinnilla ja monitoroinnilla voidaan varmistaa järjestelmän luotettavuus ja toiminta halutulla tavalla.

3.5.1 Lainsäädäntö

Lähtökohtaisesti kaikki esityskäytössä olevat mikrofonit lukeutuvat luvasta vapaisiin radiolaitteisiin. Laitevalmistajat tuovat markkinoille vain kunkin alueen määräysten mukaisia laitteita, joten paikallisesti hankittu langaton laite toimii vain kyseisen alueen luvasta vapailla taajuuksilla ja sallitulla lähetysteholla. Ei ole harvinaista, että maailmalla kiertävillä esiintyjillä on käytössä laitteita, jotka toimivat myös luvasta vapaiden taajuusalueiden ulkopuolella tai korkeammalla lähetysteholla. Tällaisten laitteiden käyttö vaatii operoivalta taholta tarkkuutta, ettei paikallisia määräyksiä rikota. Myös vanhat laitteet voivat toimia taajuusalueilla, jotka on myöhemmin poistettu luvasta vapaasta käytöstä, joten perityn ja käytettynä ostetun laitteen käyttäjän täytyy olla tietoinen ajantasaisesta lainsäädännöstä.

”Mikrofoni on luvasta vapaa, jos se toimii vain luvasta vapautetuilla taajuuksilla. Mikrofonin käyttäjä saa valita toimintataajuuden, mutta taajuuden pitää olla väliltä 174–195 MHz, 216–225 MHz, 470–694 MHz, 823–832 MHz, 863–865 MHz tai 1785–1804,8 MHz. Keskitajuuden valinnassa on huomioitava mikrofonin kanavanleveys siten, että koko kanava pysyy edellä mainittujen taajuusalueiden sisällä.” (Traficom i.a.)

Langattomat mikrofonit

Langattomien mikrofonien eli radiomikrofonien käyttöön on osoitettu seuraavat taajuusalueet:

174–195 MHz (VHF)	Käyttö luvasta vapaata
216–225 MHz (VHF)	Käyttö luvasta vapaata
470–694 MHz (TV-UHF)	Käyttö luvasta vapaata
823–832 MHz (UHF)	Käyttö luvasta vapaata
863–865 MHz (UHF)	Käyttö luvasta vapaata
1785–1804,8 MHz (UHF)	Käyttö luvasta vapaata

Kuva 25. Langattomien mikrofonien käytölle sallitut taajuusalueet (Traficom i.a.).

Suomessa luvasta vapaille langattomille mikrofoneille käytössä oleva kaista 470–694 MHz on Suomessa ensisijaisesti televisiotoiminnan käytössä, eikä langattomien mikrofonien käytöstä saa aiheutua haittaa televisiovastaanotolle. Vapaita taajuuksia voi hakea Traficomin mikrofonitaajuuksien hakupalvelusta, mutta varmin tapa löytää vapaa taajuus langattomalle laitteelle, on tehdä skannaus käyttökohteessa. (Traficom i.a.)

Langattomissa mikrofonijärjestelmissä ilman erikoislupaa sallittu lähetysteho on suhteellisen matala (50mW), mutta usein riittävä esimerkiksi esiintymiskäyttöön, jossa matka lähettimen ja vastaanottimen välillä harvoin ylittää muutamaa kymmentä metriä.

3.5.2 Lähetysteho

Lähetysteho ja antennien mahdollinen vahvistus määräytyy ympäristön olosuhteiden mukaan. Usein pienemmällä lähetysteholla ja pienemmällä antennivahvistuksella saavutetaan parempi signaali-kohinasuhde kuin signaalia vahvistamalla sekä vähennetään intermodulaatiosta aiheutuvia häiriöitä. (Hannula & Rasilainen & Viikari 2015.) Tarve suuremmalle lähetysteholle ja / tai antennin vahvistukselle voi syntyä, jos langattoman mikrofonin täytyy toimia pidemmän matkan päässä vastaanottimelta tai ympäristössä on paljon häiriötekijöitä, joista mikrofonin signaalin täytyy erottua. Pitkillä välimatkoilla signaalin kuuluvuuden voi varmistaa liittämällä järjestelmään useampia antennia ja viemällä osan kauemmas tarvittavalla kuuluvuusalueella. (Vear 2014.)

Usean antennin järjestelmää kutsutaan diversiteettijärjestelmäksi. Usein diversiteettijärjestelmissä käytetään kahta vastaanottavaa antennia yhtäaikaaisesti signaalin polarisaatiosta aiheutuvien muutosten välttämiseksi. Shuren Axient Digital 4Q -järjestelmään on mahdollista liittää neljä vastaanottavaa antennia yhtäaikaisesti mikä mahdollistaa antennien sijoittamisen laajemmalle alueelle ja järjestelmän toiminta-alueen laajentamisen. Antennit tulee asettaa vähintään $\frac{1}{4}$ aallonpituuden välimatkan päähän toisistaan, jotta diversiteetti syntyy. (Vear 2014.) Radioaaltojen huonon materiaalien läpäisykyvyn takia langattomissa mikrofonijärjestelmissä kannattaa pyrkiä asettamaan antennit niin että lähettävällä ja vastaanottavilla antennilla on näköyhteys toisiinsa toimintavarmuuden takaamiseksi. (Eargle 2005.)

Antennin vahvistimen asetuksissa kannattaa huomioida kaapelin pituus, jos antennit sijoitetaan erilleen vastaanottimesta. Laitevalmistajilta löytyy

suosituksia signaalin vahvistukseen kaapelityypin ja pituuden mukaan (ks. kuva 26).

Recommend Gain Settings

Use the following chart as a guideline for setting gain based on cable type where the distance from the antenna to the transmitter is greater than 100 feet.

NOTE: For installations where the antenna is less than 75 feet from the transmitter, lower the gain setting one step.

Cable Length	Gain Setting (based on cable type)			
	RG58*	RG8X	RG213/RG8	Low-loss RG8/RG213**
10' (3 m)	0	0	0	0
25' (8 m)	+6*	0	0	0
50' (15 m)	*	+6	+6	0
100' (30 m)	*	+12	+6	+6

* RG58 cable has high signal loss and is not recommended for cable runs greater than 10 feet
 ** Low-loss RG8/RG213 cables include Times Microwave Systems LMR400 and Belden 9913 or 7810A

Find More Information Online

For more information, visit <http://www.shure.com>

Kuva 26. Shuren UA874WB aktiiviselle suunta-antennille suosittelemat vahvistusarvot kaapelityypin ja -pituuden mukaan (Shure i.a.).

Kaapelien lisäksi myös antennijakajat aiheuttavat signaaliin häviötä. Passiivinen signaalin jakaminen vaimentaa signaalia kolme desibeliä jokaisella jakokerralla ja on syytä käyttää aktiivista antennijakajaa, jos käytössä on enemmän kuin kaksi vastaanotinta. (Vear 2014.)

Langattomissa vastaanottimissa on squelch- arvo, joka määrittää kuinka voimakkaan signaalin vastaanotin päästää läpi ulostuloportista äänisignaalina. Vastaanotin sulkee kanavan ulostulon, kun vastaanotettu signaali alittaa kynnsarvon. Jos kynnsarvo on asetettu olosuhteisiin nähden liian matalalle tai se on pois päältä, vastaanotin päästää sen havaitsemat muut signaalit tai pohjakohinan läpi valkoisena kohinana. Squelch-arvon ollessa liian korkea järjestelmän potentiaalinen kantomatkka pienenee ja haluttu signaali katkeaa herkemmin vaihe-erojen ja vaimenemisen vuoksi. Squelch-arvoon vaikuttaa lähetysteho ja etäisyys, jolla järjestelmä toimii. Näiden muuttuessa voi olla tarve muuttaa myös squelch asetusta. Monissa langattomissa mikrofoneissa käyttäjän säädettävä squelch-asetus on korvattu pilottiäänellä. Pilottiääni on erillinen signaali josta vastaanotin tunnistaa lähettimeltä tulevan signaalin ja päästää lähetyksen järjestelmästä läpi. (Färm 2022.)

3.5.3 Taajuudet ja koordinointi

Langattomassa mikrofoni-järjestelmässä jokaiselle kanavalle on määriteltävä oma taajuus, joka on vapaa muusta radioliikenteestä, jos niitä halutaan käyttää samanaikaisesti. Järjestelmästä riippuen taajuudet täytyy asettaa vähintään 300kHz – 1.5MHz etäisyydelle toisistaan, riippuen käytettävän vastaanottimen selektiivisyydestä ja lähetyksen kaistanleveydestä. Vastaanottimen selektiivisyys tarkoittaa laitteen kykyä erottaa vierekkäiset taajuudet toisistaan. (Vear 2014.)

Laitteilla on taajuusalue (frequency range), joka rajaa matalimman ja korkeimman mahdollisen kanavalle asetettavan taajuuden. Laitteiden taajuusalue on usein ilmoitettu tunnuskoodeilla, joita vastaavien taajuusalueiden tiedot löytyvät laitevalmistajien sivuilta. (Vear 2014.)

Vastaanottimessa on suodatin (front-end), joka rajaa vastaanottimen havaitsemaa taajuusaluetta kanavalle asetetun taajuuden ympäriltä noin 20 MHz laitteesta riippuen. Suodatin rajoittaa muilta taajuusalueilta vastaanottimelle saapuvia häiriöitä. Joissain laitteissa suodatinta ei voi säätää, jolloin suodatin on koko laitteen kattaman taajuuskaistan levyinen. (Vear 2014.)

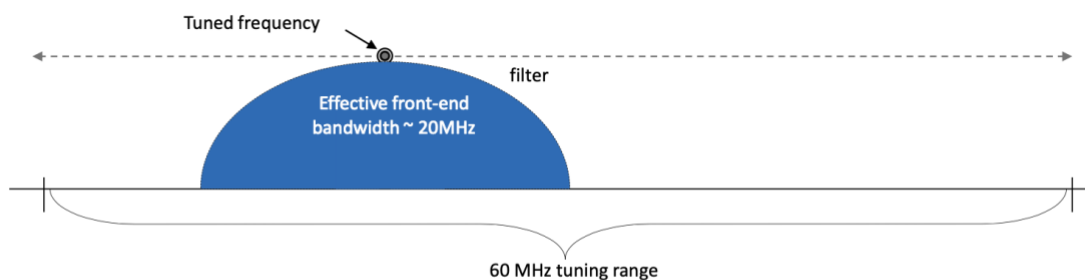


Figure 2-11: track tuning front-end filter

Kuva 27. Vastaanottimen taajuusaluesuodatin (Vear 2014).

Järjestelmän toimivuuden kannalta laitteiden taajuuksien täytyy olla keskenään yhteensopivia. Intermodulaation määrä kasvaa eksponentiaalisesti taajuuksien

lisääntyessä ja taajuudet on määriteltävä niin, etteivät intermodulaatiotuotteet osu minkään kanavan kanssa samalle taajuudelle. (Vear 2014.)

Kahden samalla alueella vaikuttavan kanavan intermodulaatiotuotteet on helppo laskea eikä kumpaakaan kanavaa ole mahdollista asettaa vahingossa intermodulaatiotuotteen kanssa samalle taajuudelle. Kolmen kanavan intermodulaatiotuotteiden laskeminen on jo haastavampaa ja häiriöt intermodulaation vuoksi ovat mahdollisia. (Vear 2014.)

Mitä enemmän kanavia samalla alueella on käytössä sitä enemmän muodostuu myös intermodulaatiota ja vapaiden yhteensopivien taajuuksien laskeminen muuttuu monimutkaisemmaksi. Käyttäjän ei tarvitse laskea taajuuksia itse laskimella, vaan laitteissa on valmiina ryhmiä, joiden taajuudet ovat keskenään yhteensopivia. Kyseiseen tarkoitukseen on kehitetty myös ohjelmistoja, jotka laskevat yhteensopivat taajuudet skannauksen ja laitteiden tarvitseman kaistanleveyden perusteella. Skannauksen voi tehdä vastaanottimella tai erillisellä skannerilla. (Vear 2014.)

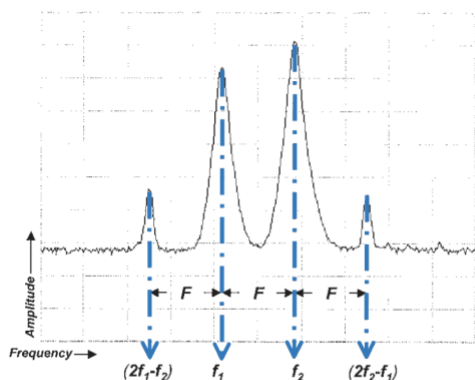


Figure 3-5: two-transmitter intermodulation

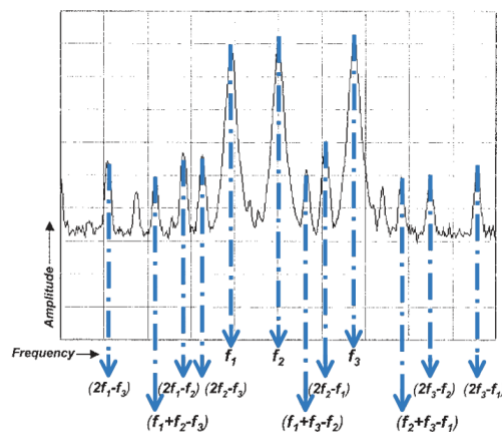


Figure 3-6: three-transmitter intermodulation

Kuva 28. Kahden (vasemmalla) ja kolmen (oikealla) radiotaajuuden (f_1 , f_2 ja f_3) keskinäiset intermodulaatiotuotteet (Vear 2014).

4 Käytännön sovellukset

Käytännön sovellukset koskevat langattomien mikrofonijärjestelmien antenneja ja tarkemmin niiden sijoittelua. Taajuusalueen skannausten avulla on tarkoitus tutkia antennien sijoittelun merkitystä radiosignaalin signaali-kohinasuhteeseen langattomissa mikrofonijärjestelmissä. Aiheesta on jo paljon tutkimustyötä useilta eri tekniikan aloilta ja tässä työssä on koottu perustietoa tapahtuma-alan langattomien mikrofonijärjestelmien käytön tueksi.

4.1 Tutkimusjärjestelmä

Kuten edellisistä luvuista käy ilmi, langattoman mikrofonin radiosignaalin signaali-kohinasuhteeseen vaikuttavat muun muassa mikrofonin tyyppi (analoginen vs. digitaalinen), modulaatiotekniikka, antennien suuntakuviot ja polarisaatio, lähetysteho, signaalin vahvistus, ympäristö sekä muiden samalla alueella toimivien radiosignaalien määrä. Taajuusalueesta otettujen skannausten avulla pyrin arvioimaan langattomien järjestelmien kanavamäärien suhdetta lähettävien ja vastaanottavien antennien optimaaliseen sijoittamiseen järjestelmän kiinteiden laitteiden yhteydessä. Tutkimuksessa lähettävien laitteiden signaalit ovat häiriösignaaleja vastaanottaville laitteille ja järjestelmien vaikutus toisiinsa halutaan minimoida. Tutkimusasetelma vastaa tilannetta, jossa langattomien mikrofonien vastaanottimet sekä langattomien korvamonitorilaitteiden lähettimet on sijoitettu vierekkäin esiintymislavan sivutilaan. Jotta antennien sijoittelun vaikutusta käytettävissä olevaan taajuusalueeseen voidaan arvioida, skannauksia on tehty erilaisilla lähettävien kanavien määrillä sekä antennien välisillä etäisyyksillä.

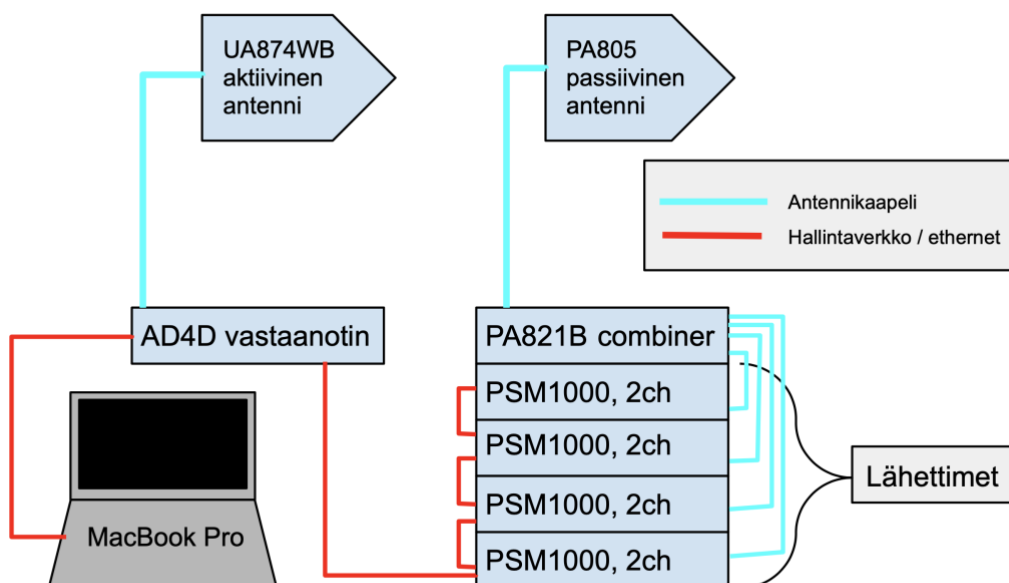
Skannaamalla taajuusaluetta vastaanottavalla laitteella on tutkittu lähettävän ja vastaanottavan antennin etäisyyden vaikutusta vastaanottavan antennin havaitsemaan taajuusalueeseen mittausten yksinkertaistamiseksi ja tutkimuksen rajaamiseksi. Lähettävänä antennina käytettiin Shuren passiivista kardioidi-suuntakuviosta antennia ja vastaanottavana antennina Shuren aktiivista kardioidi-suuntakuviosta antennia passiivisella +0dB vahvistuksella.

Pohjaskannaus on otettu vertailun vuoksi myös G56 taajuusalueen Shuren puolikkaan aallonpituuden omniantennilla. Antennien valintaan vaikutti suuresti saatavuus, mutta skannauksissa käytetyt antennit sekä järjestelmä vastaavat tapahtumissa käytettäviä järjestelmiä.

Antennien välimatka on mitattu antennin ruuvi kiinnityksen kohdalta / telineen jalan keskeltä. Antennien elementtien välimatka on siis todellisuudessa lyhyempi kuin mitattu välimatka, kun antennit ovat peräkkäin. Tutkimuksessa käytetyt skannaukset on otettu noin 5x10m kokoisessa tilassa, jonka seinien materiaali heijastaa jonkin verran radioaaltoja.

Taulukko 3. Tutkimuksessa käytetty laitteisto.

Laitemalli	Lukumäärä
Shure PSM1000, K10E-taajuusalueella	4
Shure PA805 passive directional cardioid antenna.	1
Shure PA821B PSM combiner	1
Shure Axient Digital AD4D, G56-taajuusalueella	1
Shure UA874WB active directional cardioid antenna	1
Low loss antenna cable, 10m	2
Apple MacBook Pro, Shure Wireless Workbench software	1

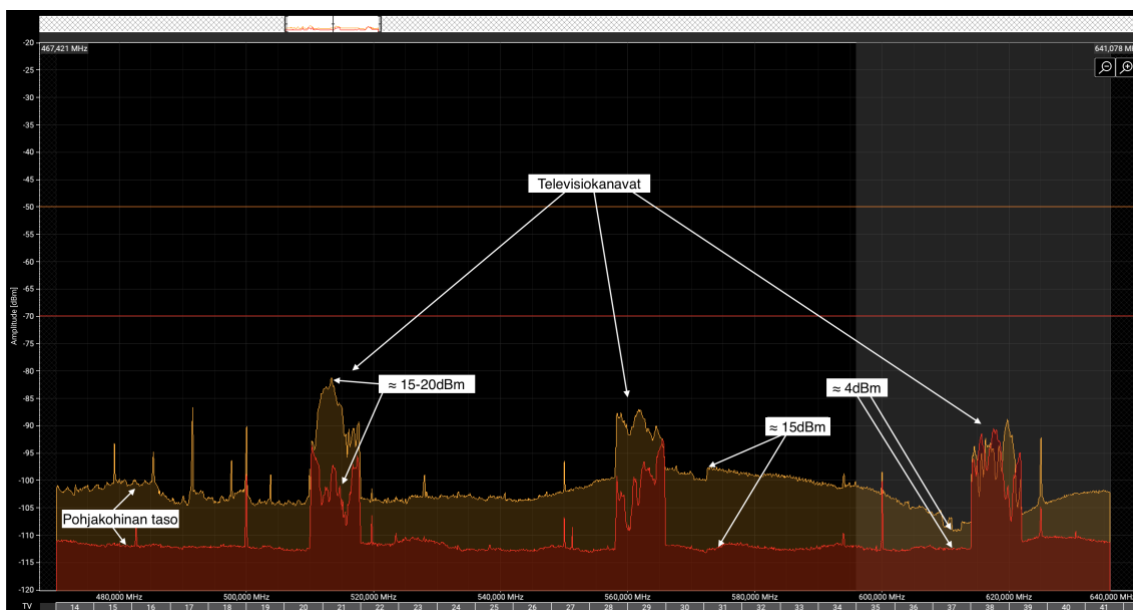


Kuva 29. Järjestelmäkaavio tutkimuksessa käytetystä laitteistosta.



Kuva 30. Tutkimusjärjestelmä. Tietokone ja vastaanotin (vasemmalla) ja lähettimet (oikealla).

Tilasta on ensin otettu käytettävien taajuuksien koordinoitua varten pohjaskannaus aktiivisella suunta-antennilla sekä $\frac{1}{2}$ aallonpituuden omiantennilla. Kuvassa 31 näkyy selkeästi kolme digitaalista televisiokanavaa sekä yksittäisiä radiosignaaleja mahdollisesti viereiseltä lentokentältä.



Kuva 31. Pohjaskannaus Shuren UA874WB suunta-antennilla (punainen) ja Shuren omni-antennilla (oranssi).

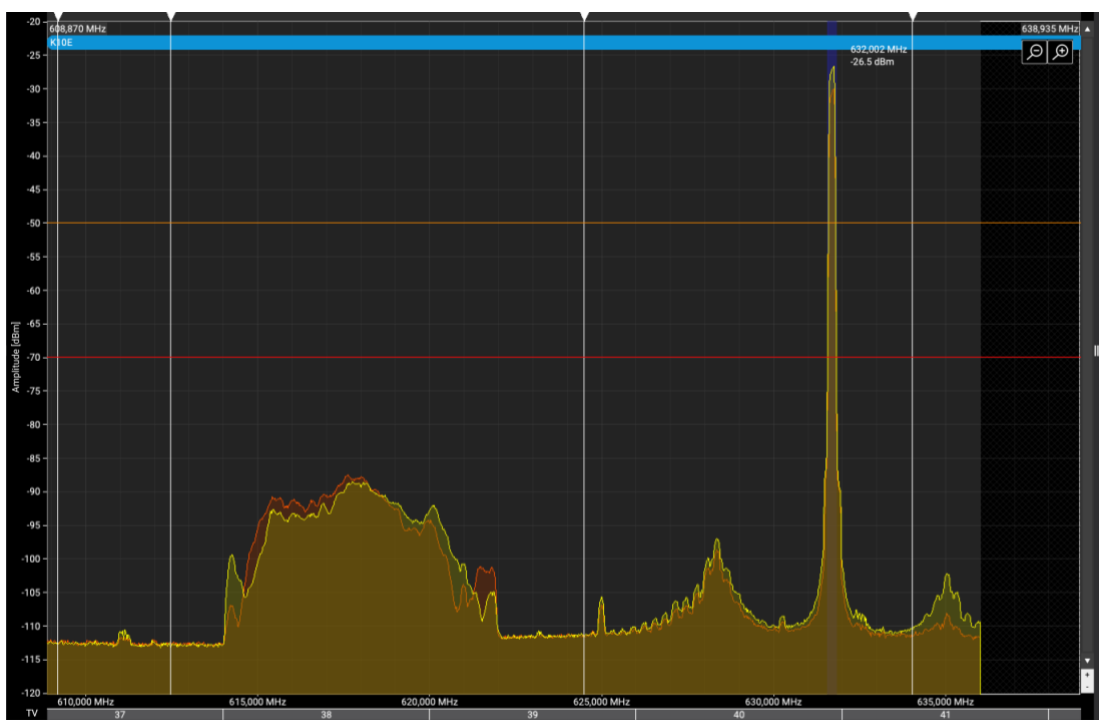
Piiska-antennin pohjakohina on keskimäärin 10 dBm voimakkaampi kuin suunta-antennilla, ja osa yksittäisistä suunta-antennille näkyvistä signaaleista katoaa pohjakohinan alle. Suunta-antennilla on skannausten perusteella parempi signaali-kohinasuhde.

4.2 Antennit samassa telineessä

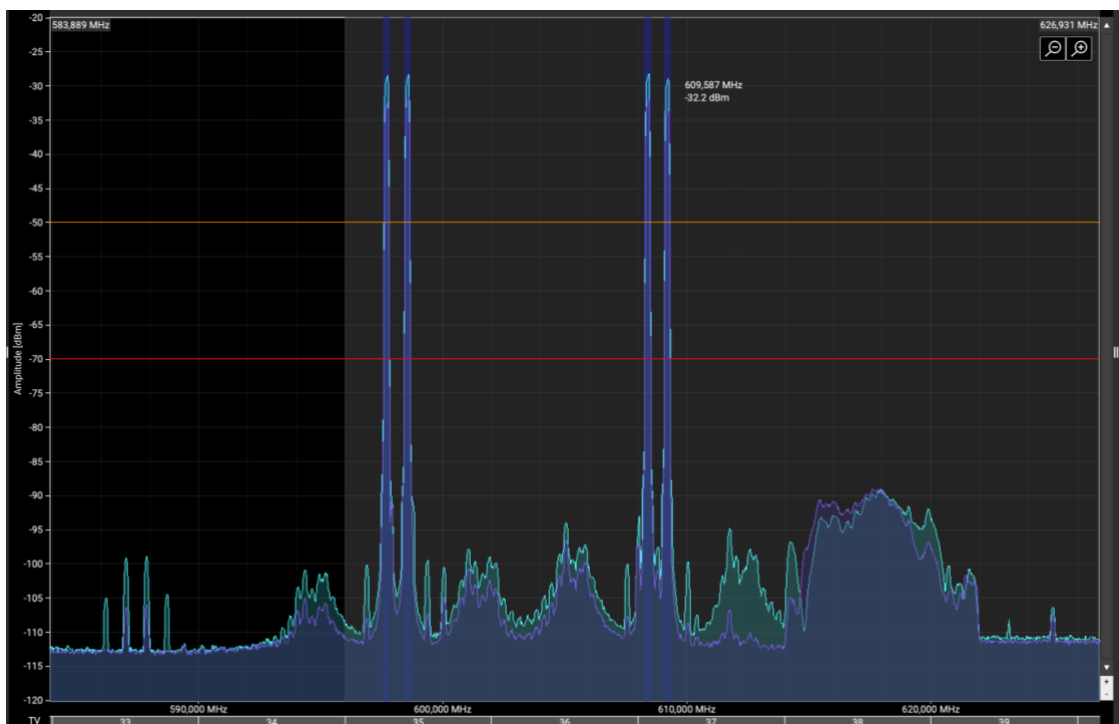
Skannauksia on vertailtu kanavamäärä kerrallaan, kun lähettävä antenni on samassa telineessä samoin päin sekä ylösalaisin suhteessa vastaanottavaan anteeniin. Seuraavat skannaukset on otettu yhden, neljän ja kahdeksan korvamonitorikanavan kanssa.



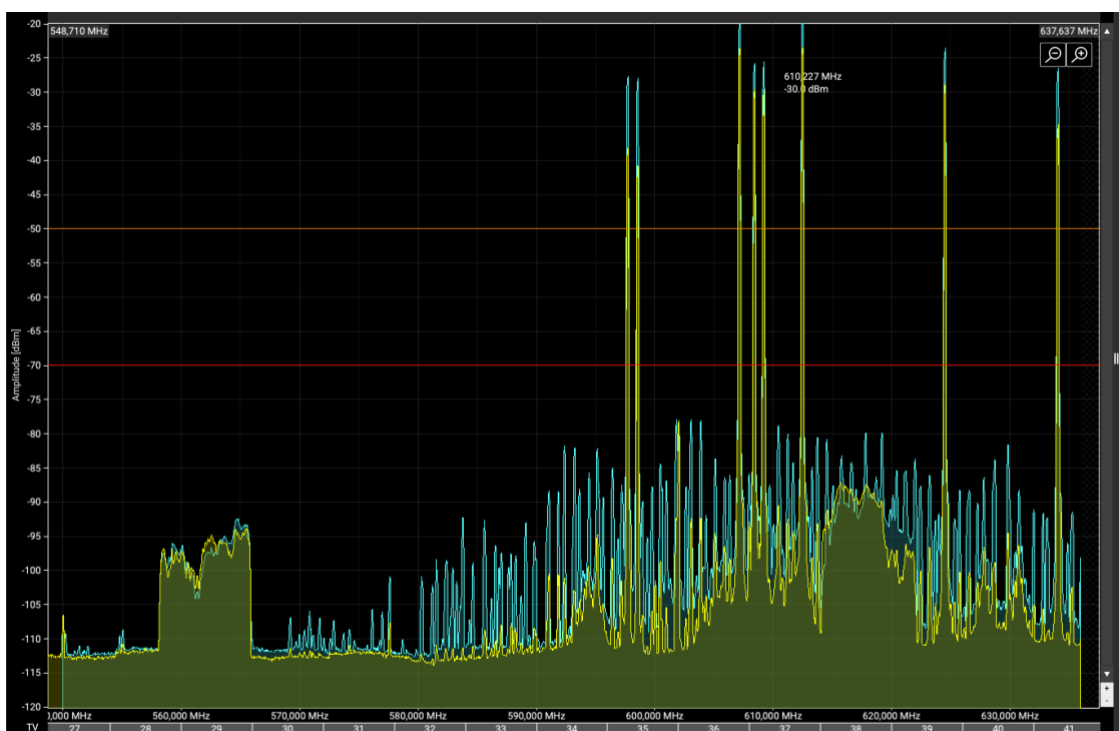
Kuva 32. Antennit samassa telineessä samoin päin (vasemmalla) ja lähettävä antenni ylösalaisin (oikealla).



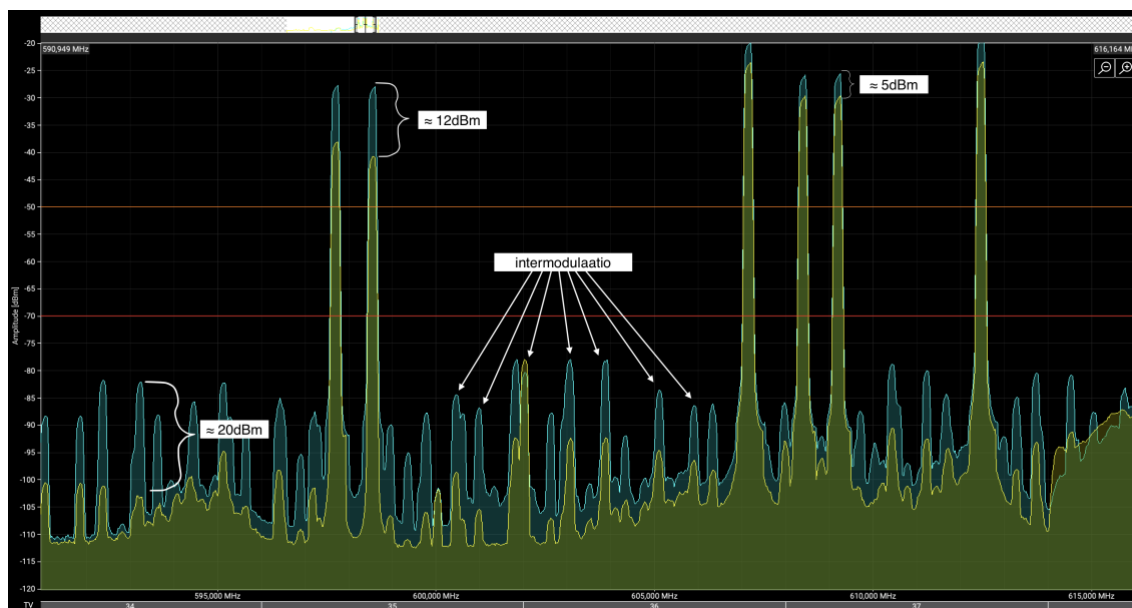
Kuva 33. Yksi kanava, antennit vierekkäin samassa telineessä. Antennit samoin päin (oranssi) ja ylösalaisin (punainen).



Kuva 34. Neljä kanavaa, antennit vierekkäin samassa telineessä. Antennit samoin päin (turkoosi) ja ylösalaisin (tummansininen).



Kuva 35. Kahdeksan kanavaa, antennit vierekkäin samassa telineessä. Antennit samoin päin (turkoosi) ja ylösalaisin (keltainen).



Kuva 36. Intermodulaatiotaajuuudet ja signaalin voimakkuuden erot antennien ollessa samassa telineessä vierekkäin samoin päin (turkoosi) ja lähettävä antenni ylösalaisin (keltainen).

Intermodulaation voimakkuudessa havaitaan suunnilleen 5–20 dBm:n ero asettamalla toinen antenni ylösalaisin. Suurempien kanavamäärien järjestelmissä toisen antennin kääntäminen voi auttaa hieman voimakkaan intermodulaation hallitsemisessa, mutta muilla menetelmillä päästään yhtä helposti parempaan lopputulokseen.

Kuvissa 33–36 lähettävä ja vastaanottava antenni ovat samassa telineessä vierekkäin noin 20 senttimetrin päässä toisistaan. Skannauksessa keltaisella antennit ovat olleet pystysuunnassa ja punaisella lähettävä antenni on ollut telineessä ylösalaisin. Kuvista havaitaan, että lähettävän ja vastaanottavan antennin sijoittaminen samaan telineeseen lähelle toisiaan aiheuttaa paljon intermodulaatiota. Sijoittamalla toinen antenni ylösalaisin vähennetään intermodulaation voimakkuutta muutamia desibelejä ja intermodulaatiotuotteita muodostuu jonkin verran vähemmän.

Suuntaavia antennejä käytettäessä voidaan olettaa, että antennit vaikuttavat eniten toisiinsa ollessaan vierekkäin, jossa kummankin antennin suuntakuviot on

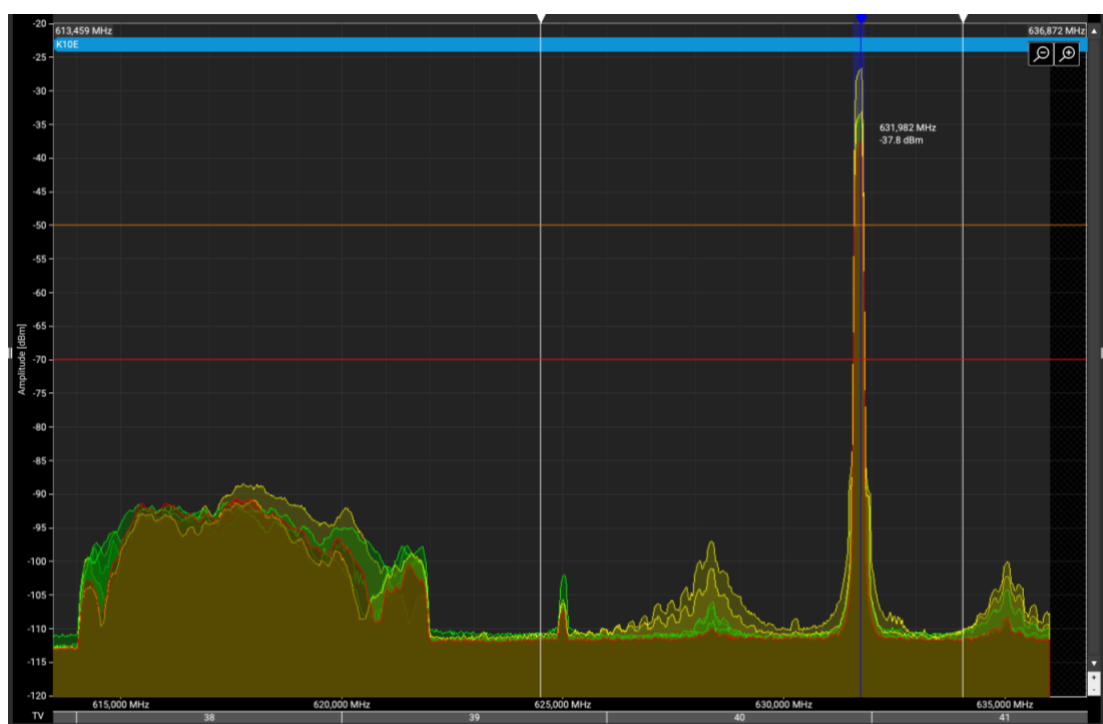
suhteellisen voimakas toistensa suuntaan. Tällainen antennien asettelu ei ole optimaalinen järjestelmän toiminnan kannalta.

4.3 Antennit vierekkäin tai peräkkäin

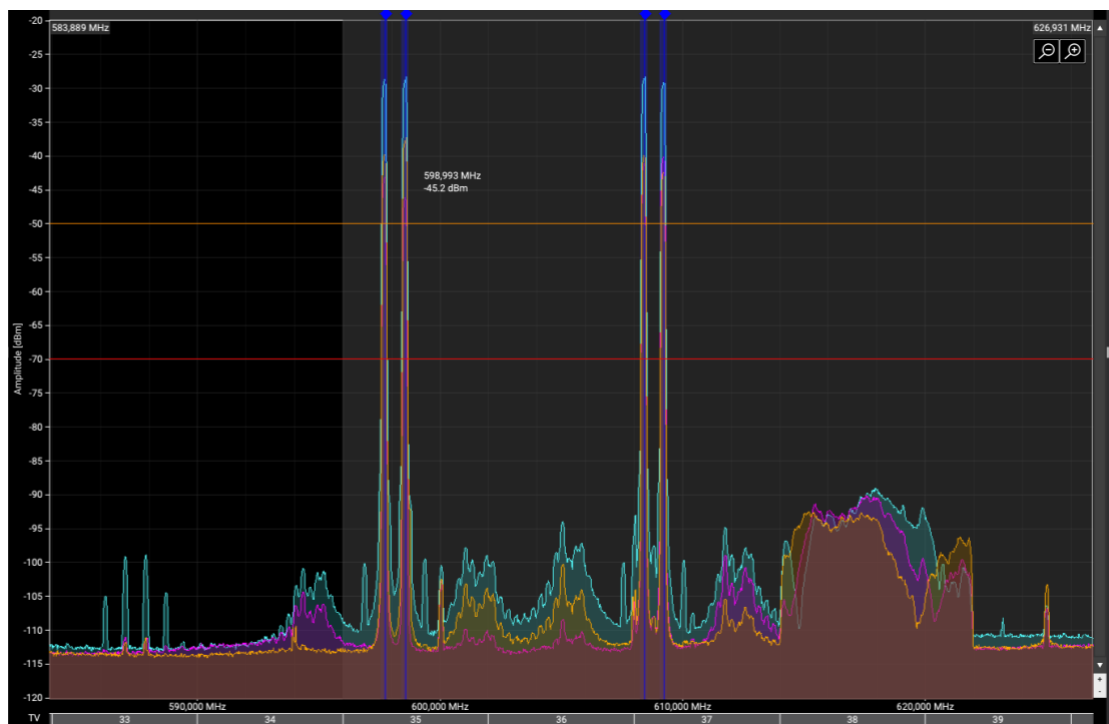
Seuraavissa kuvissa vertaillaan antennien vierekkäin ja peräkkäin sijoittamista.



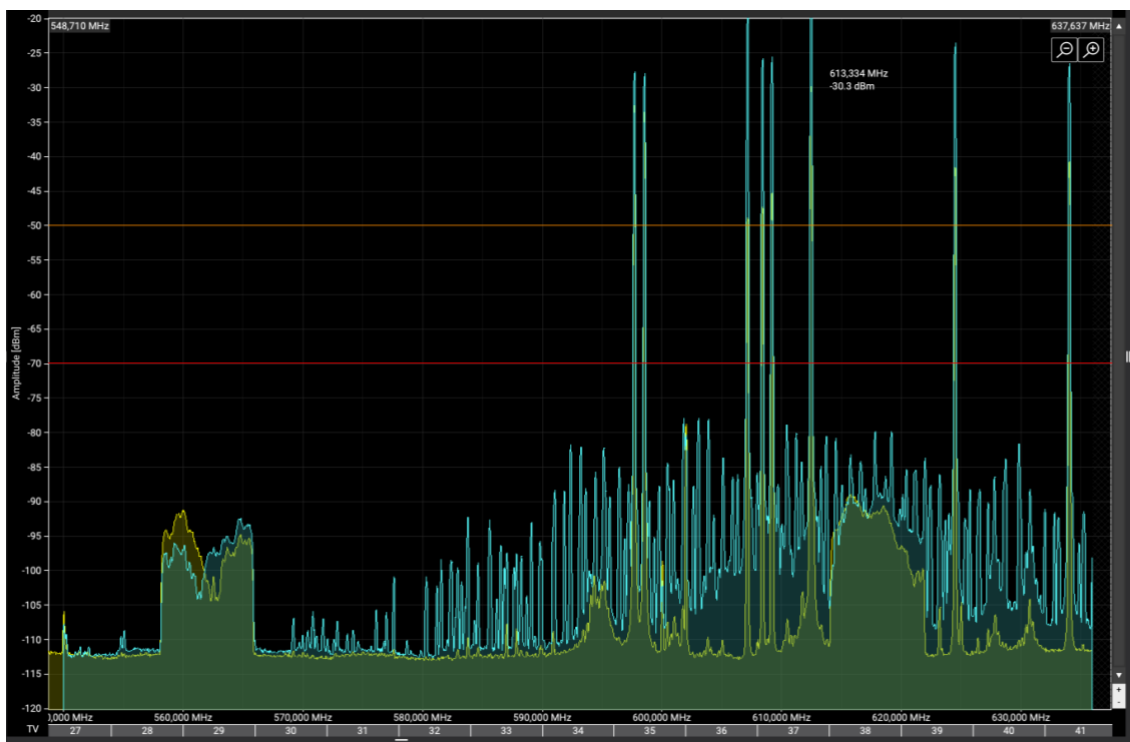
Kuva 37. Lähettävä antenni vastaanottavan edessä (vasemmalla) ja takana (oikealla).



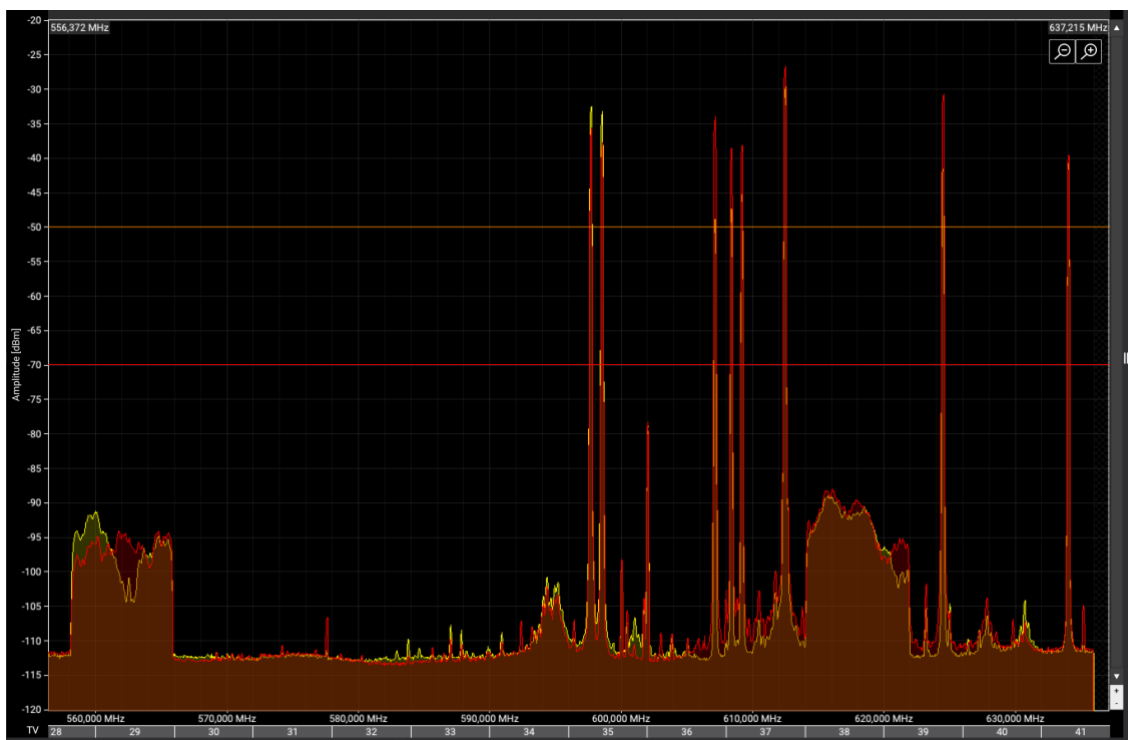
Kuva 38. Yksi kanava, lähettävä antenni noin puolen metrin etäisyydellä vastaanottavan antennin edessä (vihreä), sivulla (keltainen) ja takana (oranssi).



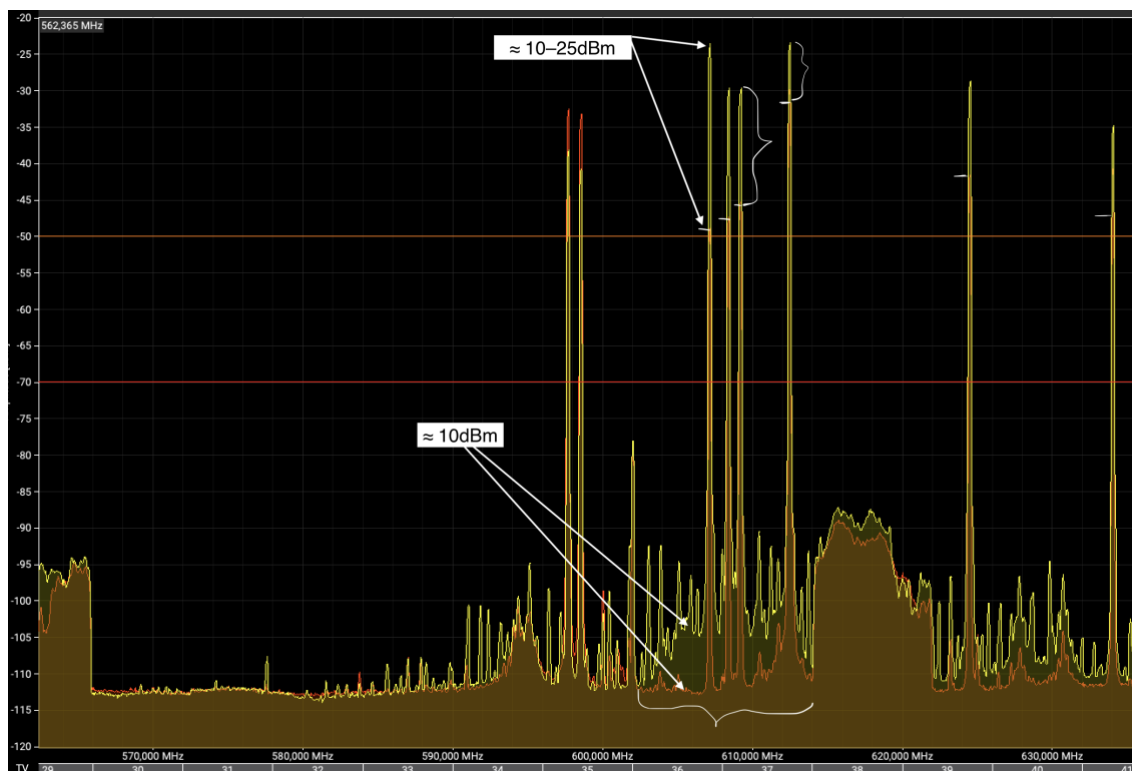
Kuva 39. Neljä kanavaa, lähetävä antenni noin puolen metrin etäisyydellä vastaanottavan antennin edessä (oranssi), sivulla (turkoosi) ja takana (punainen / pinkki).



Kuva 40. Kahdeksan kanavaa noin puolen metrin etäisyydellä toisistaan. Antennit vierekkäin (turkoosi), lähettävä antenni vastaanottavan antennin edessä (keltainen).



Kuva 41. Kahdeksan kanavaa, antennit puolen metrin etäisyydellä toisistaan. Lähettävä antenni vastaanottavan antennin edessä (keltainen) ja takana (punainen).

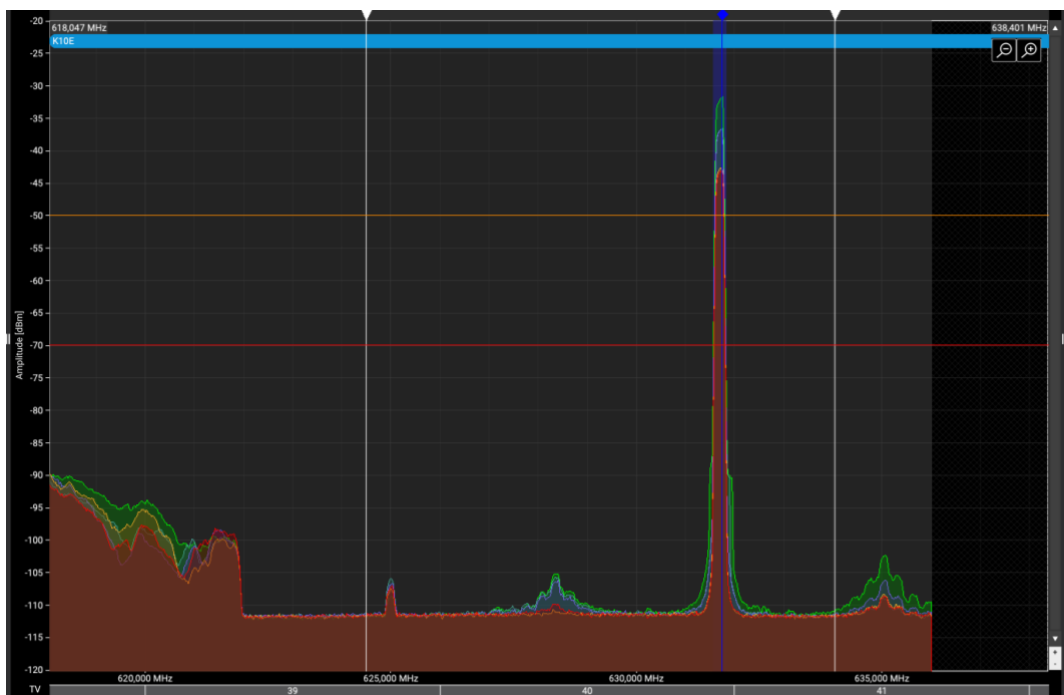


Kuva 42. Kahdeksan kanavaa, antennit puolen metrin etäisyydellä toisistaan. Lähettävä antenni vastaanottavan vieressä ylösalaisin (keltainen) ja edessä (punainen).

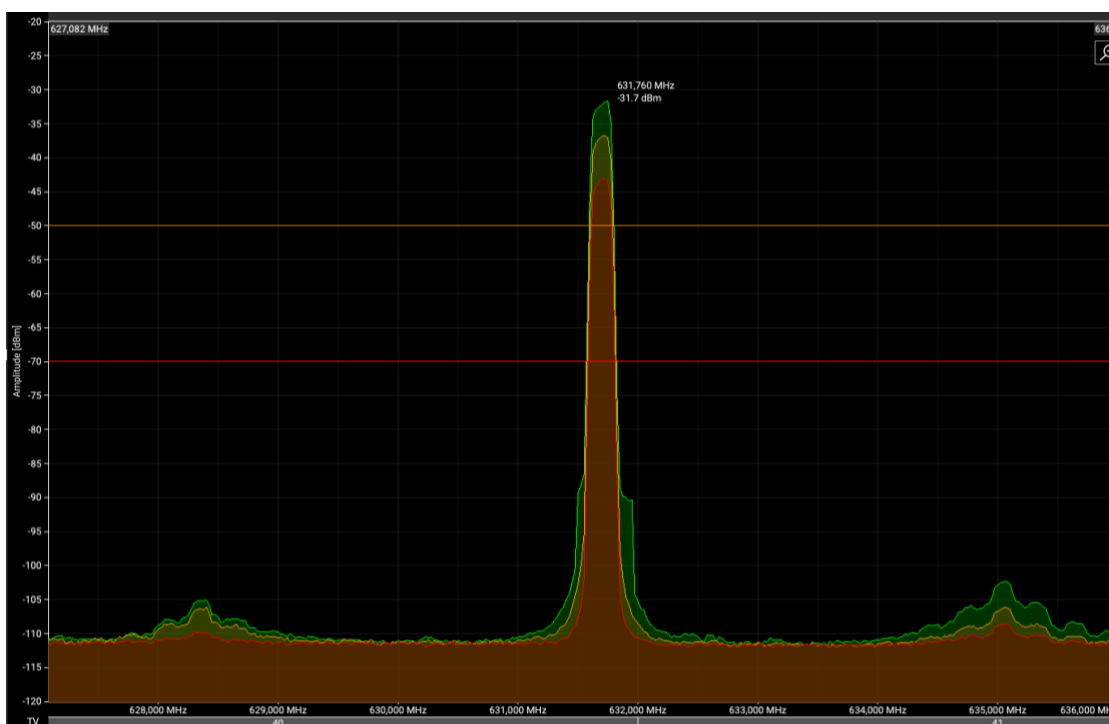
Kuvissa nähdään, että intermodulaatiota syntyy selkeästi vähemmän, kun antennit on sijoitettu peräkkäin verrattain vierekkäin. Suurin syy tähän on antennien suuntakuvio. Kumpikin skannauksissa käytetyistä antenneista on suuntaava kardioidi-kuvioinen antenni, joten kummallakin antennilla radiosignaalit vaimenevat voimakkaasti antennin takana. Huomion arvoista on myös noin kymmenen desibelin ero kohinatasossa sillä alueella, jolla kanavien taajuudet ovat verrattain lähellä toisiaan.

4.4 Lähettävä antenni edessä erilaisilla etäisyyksillä

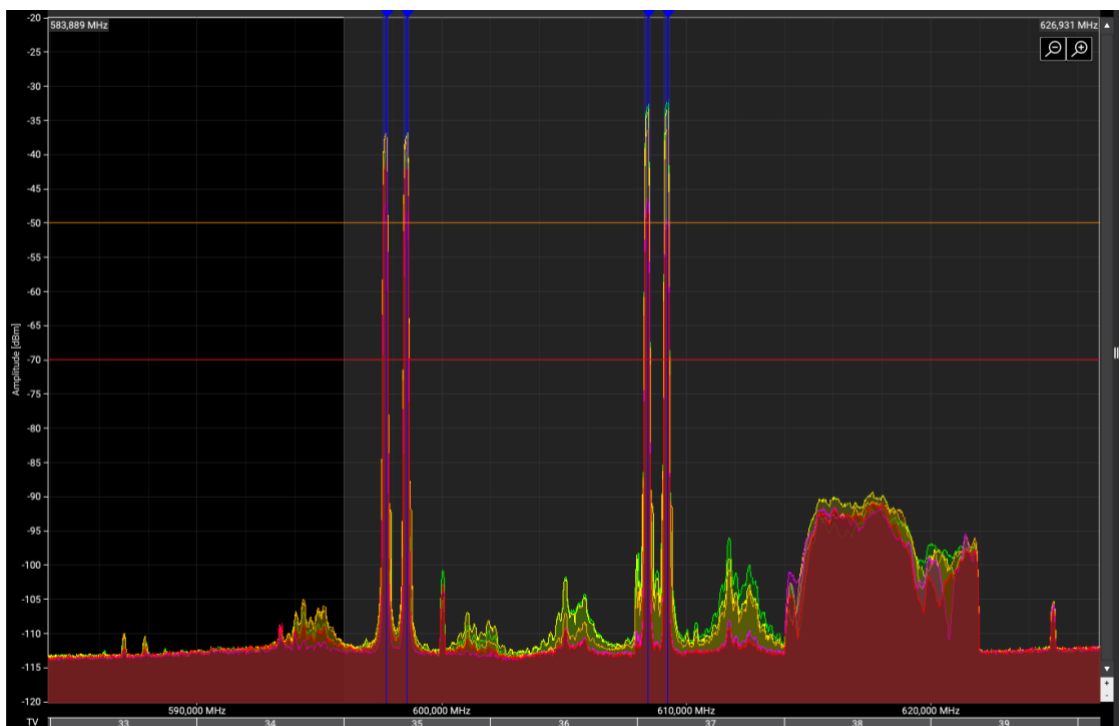
Seuraavilla skannauksilla vertaillaan erilaisten etäisyyksien vaikutusta vastaanottimeen, kun lähettävä antenni on vastaanottavan antennin edessä.



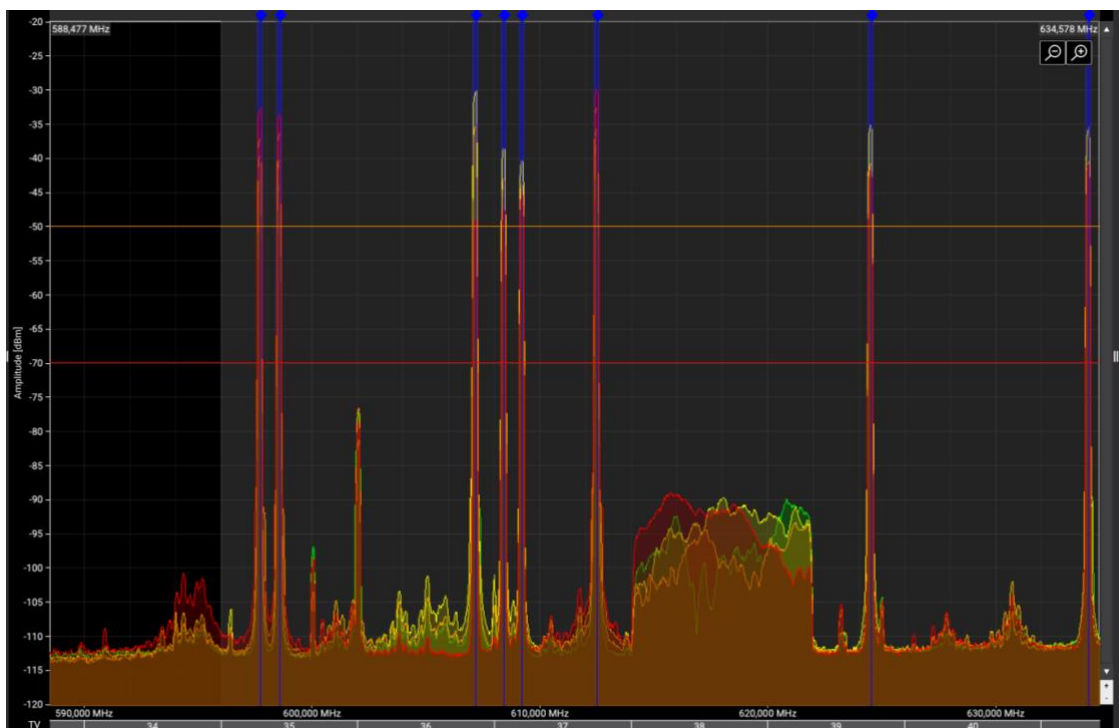
Kuva 43. Yksi kanava metrin (vihreä), 1,5 metrin (sininen), kahden metrin (violetti), kolmen metrin (oranssi) ja neljän metrin (punainen) etäisyydellä vastaanottavan antennin edessä.



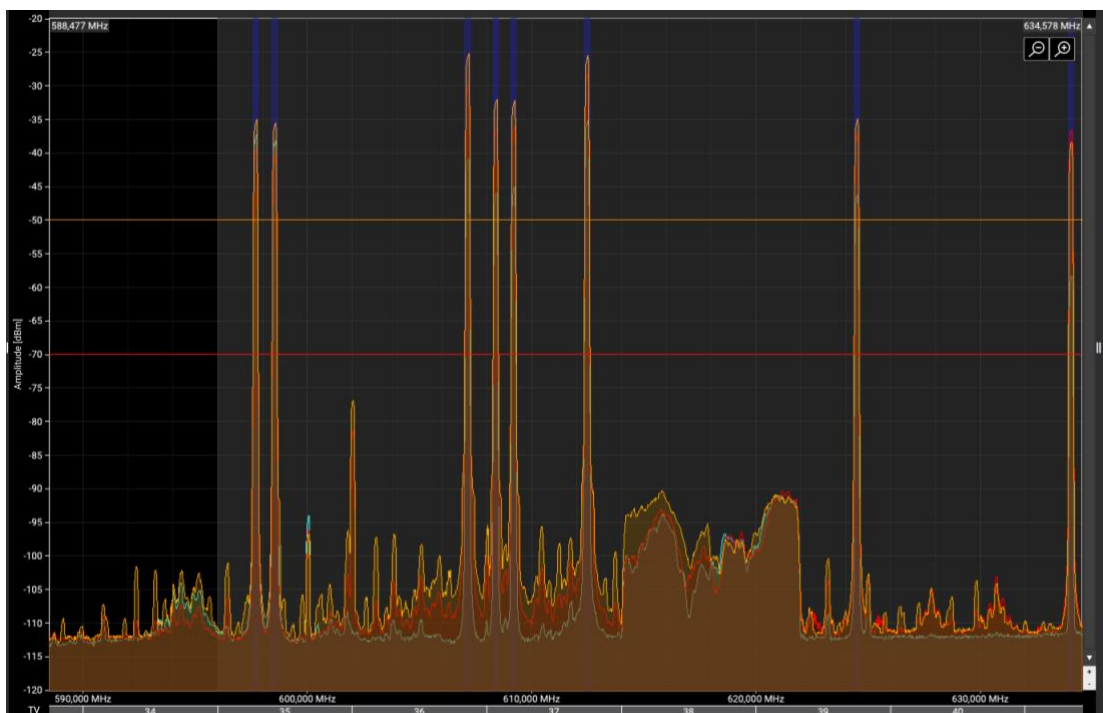
Kuva 44. Antenni metrin (vihreä), kahden metrin (oranssi) ja neljän metrin (punainen) etäisyydellä vastaanottavan antennin edessä. Signaali vaimenee noin 6dBm etäisyyden kaksinkertaistuessaa.



Kuva 45. Neljä kanavaa vastaanottavan antennin edessä metrin (vihreä), 1,5 metrin (keltainen), kahden metrin (oranssi), kolmen metrin (pinkki) ja neljän metrin (punainen) etäisyyksillä.



Kuva 46. Kahdeksan kanavaa vastaanottavan antennin edessä puolen metrin (punainen), metrin (oranssi), 1,5 metrin (keltainen) ja kahden metrin (vihreä) etäisyyksillä.



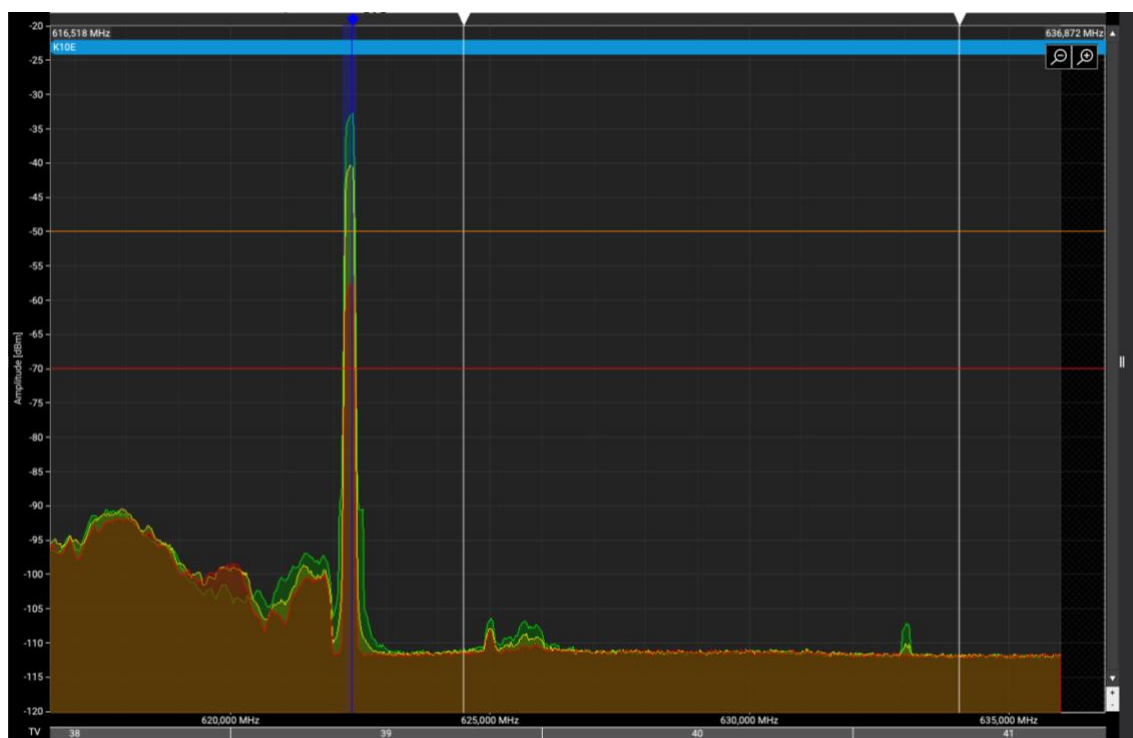
Kuva 47. Kahdeksan kanavaa vastaanottavan antennin edessä kolmen metrin (oranssi), neljän metrin (punainen) ja viiden metrin (sininen) etäisyyksillä.

Yhden ja neljän lähettävän kanavan skannauksissa toteutui intermodulaation määrän laskeva trendi etäisyyden kasvaessa. Lähettävän antennin ollessa vastaanottavan antennin edessä intermodulaatiotaajuudet vaimenivat noin 12 dB kolmen metrin etäisyydellä, kun lähetyssignaalit vaimenivat 5–30 dB vastaanottavalla antennilla.

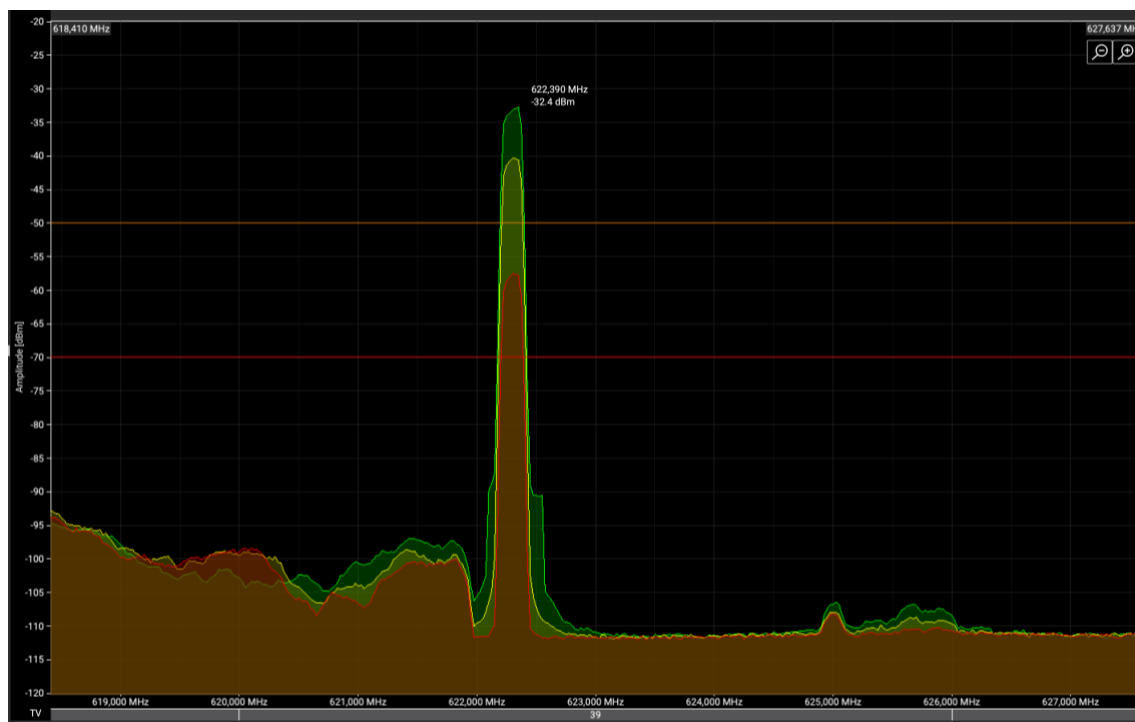
Kahdeksan kanavan skannauksissa intermodulaatiota syntyy selkeästi enemmän yhden ja neljän metrin välillä kuin puolen metrin tai viiden metrin etäisyyksillä (ks. Kuvat 46 ja 47).

4.5 Lähettävä antenni takana ja sivulla erilaisilla etäisyyksillä

Seuraavilla skannauksilla vertaillaan antennien sijoittelua erilaisilla etäisyyksillä, kun lähettävä antenni on vastaanottavan takana tai sivulla.

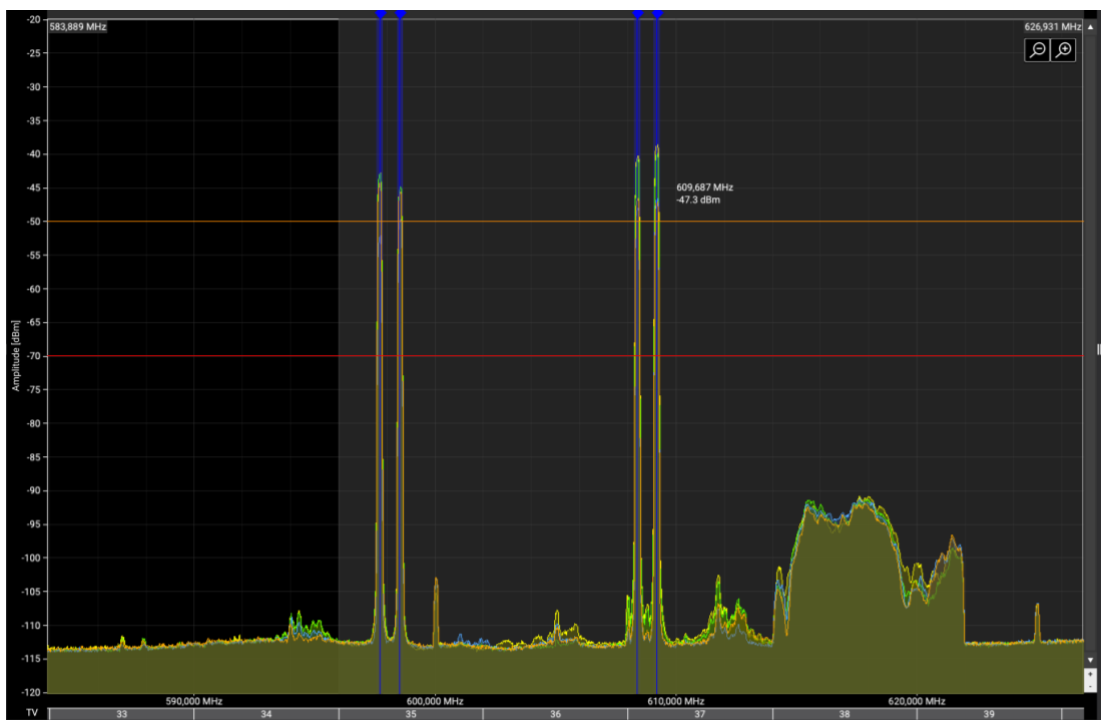


Kuva 48. Yksi kanava metrin (vihreä), 1,5 metrin (keltainen) ja kahden metrin (punainen) etäisyyksillä vastaanottavan antennin takana.

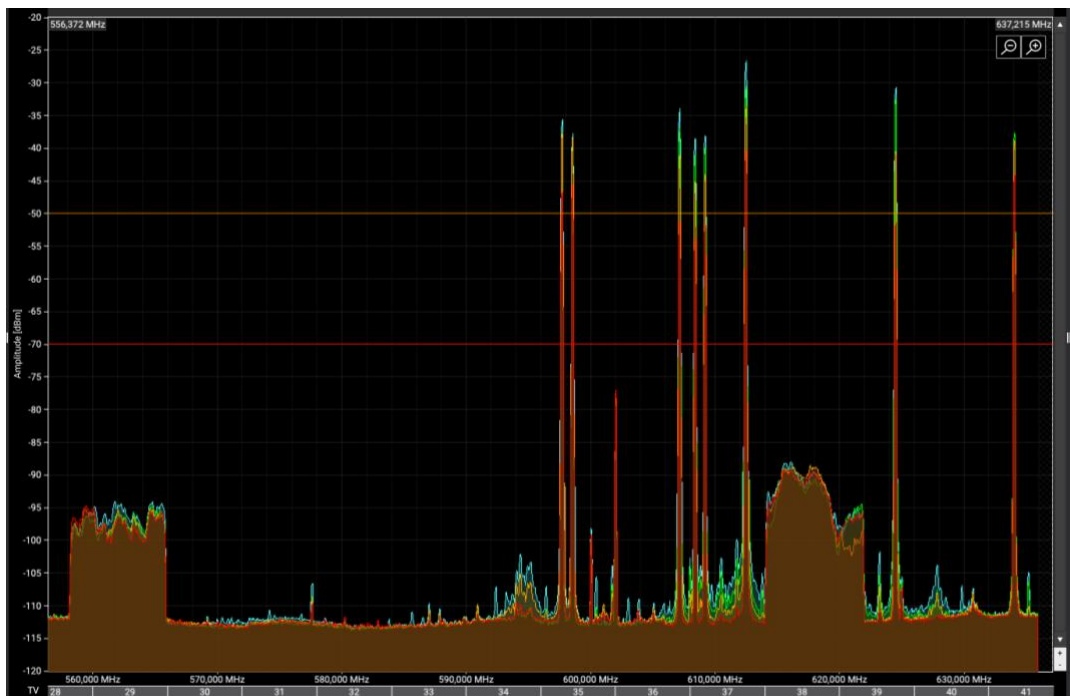


Kuva 49. Signaalin voimakkuus metrin (vihreä), 1,5 metrin (keltainen) ja kahden metrin (punainen) etäisyydellä vastaanottavan antennin takana.

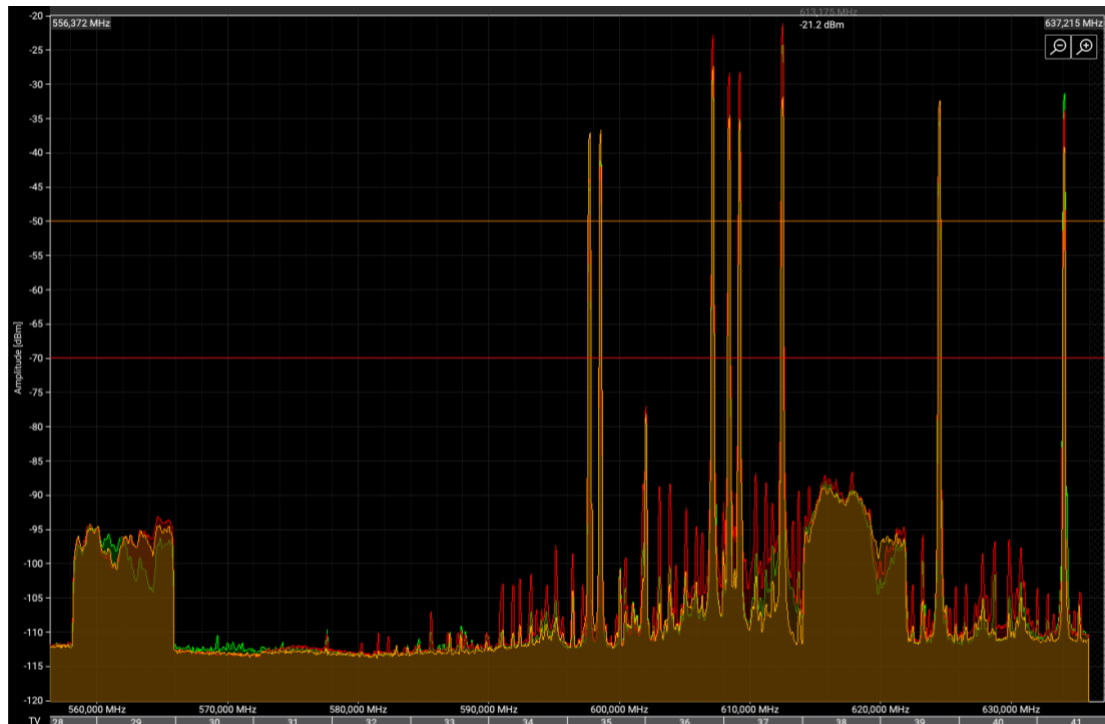
Yksi kanava ei yksin muodosta intermodulaatiota lähettävän antennin ollessa vastaanottavan antennin takana. Yhden ja kahden metrin etäisyyksien ero signaalin voimakkuudessa on noin 25 desibeliä.



Kuva 50. Neljä kanavaa vastaanottavan antennin takana metrin (oranssi), 1,5 metrin (keltainen), kahden metrin (vihreä) ja kolmen metrin (sininen) etäisyyksillä.



Kuva 51. Kahdeksan kanavaa vastaanottavan antennin takana puolen metrin (vaaleansininen), metrin (vihreä), 1,5 metrin (oranssi) ja kolmen metrin (punainen) etäisyyksillä.



Kuva 52. kahdeksan kanavaa vastaanottavan antennin sivulla metrin (vihreä) 1,5 metrin (punainen) ja kahden metrin (oranssi) etäisyydellä.

Takaa otetuissa skannauksissa intermodulaatiota syntyi selkeästi vähemmän kaikilla etäisyyksillä myös suurempien kanavamäärien järjestelmissä. Pohjakohinan taso ei noussut merkittävästi millään kaistoilla skannatusta taajuusalueesta (ks. Kuva 50–51). Myös lähettimien signaalien voimakkuudessa on havaittavissa selkeä vaimeneminen lineaarisesti etäisyyden lisääntyessä (ks. Kuva 49).

Sivusuunnassa intermodulaatiota syntyy vähemmän vasta kahden metrin välimatkalla antennien välillä (ks. kuva 52).

5 Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella lähettävän ja vastaanottavan antennin etäisyydellä on merkitystä käytettävissä olevaan taajuuskaistan sitä enemmän mitä suurempi langattoman järjestelmän kanavamäärä on.

Mitä useampia signaaleja antenni lähettää sitä enemmän lähietäisyydellä sijaitsevalla vastaanottavalla järjestelmällä muodostuu signaaleista aiheutuvaa intermodulaatiota. Lisäksi pohjakohinan taso nousee huomattavasti niillä alueilla, joille kanavat keskittyvät. Intermodulaation määrä ja korkea pohjakohina voivat rajoittaa taajuusalueelle mahtuvien signaalikaistojen määrää. Jos langattomia kanavia täytyy mahduttaa suuria määriä samalle taajuusalueelle, voidaan joidenkin kanavien taajuudet laskea sellaisille alueille joilla on korkeampi pohjakohina. Korkeampi pohjakohinan taso kuitenkin laskee radiosignaalin signaali-kohinasuhdetta ja vaimentuessaan signaali voi katketa kohinatason ollessa signaalia voimakkaampi.

Lähettävät ja vastaanottavat antennit on lähtökohtaisesti hyvä sijoittaa reilusti erilleen, ettei lähettävällä antennilla vahingossa ylikuormita vastaanottavan laitteen elektroniikkaa. Etäisyyden lisäksi on tärkeä huomioida myös antennien suuntakuviot. Tässä työssä tehdyn tutkimuksen perusteella kaksi suuntaavaa antennia voidaan sijoittaa peräkkäin verrattain lähelle toisiaan, kun antennit osoittavat samaan suuntaan. Antennien sijoittaminen peräkkäin vähentää syntyvää intermodulaatiota tehokkaammin kuin antennien etäisyyden lisääminen sivuttaisessa suunnassa. Monien suosima tapa kääntää toinen antenneista ylösalaisin, kun lähettävä ja vastaanottava antenni on sijoitettu samaan telineeseen erotettuna noin 30 cm:n puomilla, ei vähentänyt intermodulaatiota läheskään yhtä tehokkaasti kuin antennien sijoittaminen samalla etäisyydellä peräkkäin (ks. Kuva 42).

Jos toinen antenneista on suuntaavuudeltaan ympärisäteilevä se kannattaa sijoittaa suuntaavan antennin taakse, jossa suuntaavan antennin kenttä on heikoin. Kahden ympärisäteilevän antennin järjestelmissä intermodulaation syntymistä voi ehkäistä lähinnä lisäämällä etäisyyttä lähettävän ja vastaanottavan antennin välillä.

Kuvassa 47 kolmen metrin etäisyydellä otetussa skannauksessa näkyvä selkeästi voimakkaampi intermodulaatio muihin skannauksiin verrattuna voisi johtua signaalien heijastumisesta ja summautumisesta seinistä sekä rakenteista

tilassa, jossa skannaukset on tehty. Ilmiö voimistui skannauksissa, joissa lähettävä antenni oli sijoitettu lähemmäksi vastakkaista seinää, jonka suuntaan antennit osoittivat.

6 Pohdinta

Tapahtumissa digitaalisten langattomien mikrofonien audiosignaalin kohinatasoon vaikuttaa langattoman laitteen valinnan lisäksi muun äänijärjestelmän äänenlaatu. Suurimmat ongelmat langattomien mikrofonien tapahtumakäytössä kohdataan epävakaaan RF-signaalin sekä häiriöiden muodossa. Siksi käyttäjän on tärkeä hallita hyvät radiolaitteiden käytön periaatteet sekä käytössä olevan laitteiston ominaisuudet.

Teoriaosuudessa esitettyjen tietojen sekä tutkimusosuuden perusteella langattoman järjestelmän toiminnan voi varmistaa käyttäjänä vaivattomimmin huolehtimalla riittävästä signaali-kohinasuhteesta radiosignaalin suhteessa. Radiosignaalin optimaaliseen etenemiseen lähettävän ja vastaanottavan antennin välillä vaikuttaa merkittävästi antennien sijainti suhteessa ympäristöön. Huomioon otettavia tekijöitä ovat ympäristön fyysiset esteet, muut langattomat järjestelmät sekä mahdollisesti häiriöitä aiheuttavat elektroniset laitteet.

Tutkimus on toteutettu suhteellisen pienessä tilassa verrattuna langattomien mikrofonijärjestelmien yleisempiin käyttöympäristöihin, mutta järjestelmän toimintaan vaikuttavat fyysiset ilmiöt ovat samat kaikissa ympäristöissä. Tutkimusasetelmaan verrattuna esimerkiksi esteistä vapaalla kentällä heijastuksista aiheutuvaa summutumista tapahtuisi vähemmän, mutta antennien suuntakuvion vaikutus signaalien etenemiseen ja havaitsemiseen näkyisi tilasta aiheutuvien heijastuksien puuttuessa myös selkeämmin.

Antennien sijoittaminen ympäristön tekijöiden mukaisesti ja kunkin antennin suuntakuviota hyödyntäen vältetään useita ongelmia, joihin olisi muuten vaikea reagoida tai vaikuttaa. Tapahtumissa langattomien järjestelmien käyttöalue on usein suhteellisen pieni ja järjestelmien lähettävät sekä vastaanottavat antennit

joudutaan sijoittamaan lähes pakosta vähintään muutaman metrin etäisyydelle toisistaan. Lisäksi samalla alueella saattaa toimia useita muita järjestelmiä yhtäaikaisesti, joilla kaikilla on omat lähettävät ja vastaanottavat antennit ja kaikkien tarvittavien taajuuksien mahduttaminen samalle taajuusalueelle voi olla hankalaa. Tutkimuksen perusteella tällaisissa tilanteissa olisi hyödyllisintä pyrkiä sijoittamaan antennit niiden suuntakuvioita ajatellen sen sijaan että intermodulaation muodostumista järjestelmien välillä yritettäisiin vähentää lisäämällä antennien välimatkaa toisiinsa. Lyhyen toimintamatkan järjestelmissä hyvin sijoitetulla antennilla on näköyhteys niihin antenneihin, joiden välillä radiosignaalin halutaan välittyvän, eikä se aiheuta häiriötä muille järjestelmille tai poimi häiriötä ympäristöstä.

Lähteet

Aaltomuoto. i.a. Verkkosivu.

<https://aaltomuoto.wordpress.com/aani/aanitekniikan-perusteet/2-aanen-ominaisuuksia/> (viitattu 3.5.2024).

Bensky, Alan 2019. Short-range wireless communication (kolmas painos). E-kirja. United Kingdom: Elsevier Inc.

<https://learning.oreilly.com/library/view/short-range-wireless-communication/9780128154069/B9780128154052099930.xhtml> (viitattu 18.5.2024).

Cheung, Kar-Ming i.a. Verkkosivu. The Role of margin in link design and optimization. California, Jet Propulsion Laboratory.

https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/15-0025_A1b.pdf (viitattu 18.5.2024).

DPA microphones. i.a. Digital wireless and mics – it's digital so why bother.

<https://www.dpamicrophones.com/mic-university/digital-wireless-and-mics> (viitattu 8.11.2023).

Eargle, John 2012. The Microphone Book, 2nd Edition. United States: Focal Press, Elsevier.

Faruque, Saleh 2017. Radio Frequency Modulation Made Easy. PDF. Springer International Publishing AG Switzerland. <https://link-springer.com.ezproxy.metropolia.fi/book/10.1007/978-3-319-41202-3> (viitattu 18.5.2024).

Färm, Ville 2022. Langattomien radiojärjestelmien perusteet elokuva- ja TV-tuotannoissa. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786308/Farm_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y (viitattu 18.5.2024).

Hannula, Jari-Matti; Rasilainen, Kimmo; Viikari, Ville 2015. Characterization of transponder antennas using intermodulation response. IEEE transactions on antennas and propagation, volume 63, issue 6.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7063213/authors#authors> (viitattu 18.5.2024).

Lanne, Mikko 2018. HF-taajuusalueen antennitekniikka. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/159027/Lanne_Mikko.pdf?sequence=1&isAllowed=y (viitattu 3.5.2024).

Lehto, Arto; Räisänen, Antti 2006. RF- ja Mikroaaltotekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy.

MacIntosh, Iain 2021. Radioviestinnän perusteet langattomien mikrofoni-järjestelmien käyttäjille. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Elokuva ja televisio ala.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/502310/MacIntosh_Iain.pdf?sequence=2&isAllowed=y (viitattu 5.4.2024).

Pulkkinen, Lauri-Pekka Johannes 2019. Radioaaltojen etenemismuodot Suomen kolmella kansainvälisellä yleisradioalueella. Opinnäytetyö. Lapin Ammattikorkeakoulu, Tekniikan ja liikenteen ala.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166572/opinnaytetyo%20radioaaltojen%20etenemisesta.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (viitattu 5.4.2024).

Puurunen, Jari 2012. Radiolinkin suorituskyvyn mittaukset. Opinnäytetyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Tietotekniikan koulutusohjelma.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48488/Puurunen_Jari.pdf?sequence=1 (viitattu 5.4.2024).

RF Venue. i.a. Improve Microphone Signal-to-Noise Ratio, Improve Your Life. Verkkosivu. <https://www.rfvenue.com/blog/2014/12/14/signal-to-noise> (viitattu 28.4.2024).

RF Venue. i.a. Verkkosivu. <https://www.rfvenue.com/blog/2014/12/15/why-helical-antennas-give-better-wireless-in-ear-monitor-reception> (viitattu 19.4.2024).

Riitamaa, Kaisa 2008. Analogisten langattomien mikrofoni-järjestelmien vahvuudet ja yleisimmät ongelmat esityskäytössä. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, Viestinnän koulutusohjelma.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/10508/Riitamaa.Kaisa.pdf?sequence=2> (viitattu 5.4.2024).

Sennheiser. i.a. Videotallenne. <https://www.sennheiser.com/en-fi/learn/seminars/wireless-microphones> (viitattu 5.3.2024).

Sennheiser. i.a. The evolution of wireless innovation. osa yksi. PDF. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.sennheiser.com/globalassets/digizuite/42202-en-the-evolution-of-wireless-innovation-part-1.pdf&ved=2ahUKEwi-t4zHofKFAxVbKBAlHXdcAPoQFnoECA8QAQ&usq=AOvVaw2i8_iCf89JVt-g1tZkYQms (viitattu 3.5.2024).

Shure. i.a. All about wireless: antenna types and characteristics. Verkkosivu. <https://www.shure.com/en-US/performance-production/louder/all-about-wireless-antenna-types-and-characteristics> (viitattu 28.4.2024).

Tapia, Crispin; Sigismondi, Gino i.a. Verkkosivu. https://content-files.shure.com/Pubs/wireless-antenna-setup-guide/us_pro_antenna_setup_ea.pdf (viitattu 19.4.2024).

Traficom. i.a. Langattomien kameroiden, videolinkkien ja mikrofoni-järjestelmien taajuudet. Verkkosivu. <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/radioluvat-ja->

[taajuudet/langattomien-kameroiden-videolinkkien-ja-mikrofonien-taajuudet](#) (viitattu 8.4.2024).

Tsokos, K. A. 2014. Physics for the IB Diploma Sixth Edition. UK: Cambridge University Press.

Vear, Tim 2014. Selection and operation of wireless microphone systems. PDF. Shure. https://content-files.shure.com/Pubs/selection-and-operation-of-wireless-microphone-systems/selection_and_operation_of_wireless_microphone_systems_english.pdf (viitattu 3.5.2024).

Virtamäki, Pekka 2016. Matkakeskuksen verkko. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, tekniikan ala. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/112915/Virtamaki_Pekka.pdf;jsessionid=FFB9CBF65BB1ECA0A429E4D3A8096349?sequence=1 (viitattu 3.5.2024).

Kuvat ovat itse tehtyjä tai näytönkaappauksia tutkimuksessa käytetystä ohjelmistosta ellei muuta mainita.

Kuva 1. Bensky, A. 2019. Short-range wireless communication (kolmas painos). E-kirja. United Kingdom: Elsevier Inc. <https://learning.oreilly.com/library/view/short-range-wireless-communication/9780128154069/B9780128154052099930.xhtml> (viitattu 3.5.2024).

Kuva 3. Aalto. i.a. <https://foto.aalto.fi/opetus/350/k01/luento1/sms.html> (viitattu 8.4.2024).

Kuva 4. Färm, V. 2022. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786308/Farm_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y (viitattu 8.4.2024).

Kuva 7. Cho, Jin-Ho i.a. https://www.researchgate.net/figure/Simple-example-of-the-modulated-signal-With-using-analog-modulation-system-the-super_fig3_221917772 (viitattu 28.4.2024).

Kuva 8, 10. Faruque, S. 2017. Radio Frequency Modulation Made Easy. PDF. Springer International Publishing AG Switzerland. <https://link-springer-com.ezproxy.metropolia.fi/book/10.1007/978-3-319-41202-3> (viitattu 3.5.2024).

Kuva 9, 13, 14, 21, 27 ja 28. Vear, T. 2014. Selection and operation of wireless microphone systems. PDF. Shure. https://content-files.shure.com/Pubs/selection-and-operation-of-wireless-microphone-systems/selection_and_operation_of_wireless_microphone_systems_english.pdf (viitattu 3.5.2024).

Kuva 11. Gaussian waves. i.a. Verkkosivu.

<https://www.gaussianwaves.com/2012/10/qam-modulation-simulation-matlab-python/> (viitattu 28.4.2024).

Kuva 12. Sennheiser. i.a. The evolution of wireless innovation. osa yksi.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.sennheiser.com/globalassets/digizuite/42202-en-the-evolution-of-wireless-innovation-part-1.pdf&ved=2ahUKEwi-t4zHofKFAXVbKBAIHXdAPoQFnoECA8QAQ&usq=AOvVaw2i8_iCf89JVt-g1tZkYQms (viitattu 3.5.2024).

Kuva15. Shure. i.a. [https://service.shure.com/Service/s/article/antenna-](https://service.shure.com/Service/s/article/antenna-types?language=en_US&_gl=1*17d0r57*_gcl_au*MTU4NDg3Nzg3MS4xNzEzNTM3NDE2*_ga*NTI5ODE4NzY3LjE3MTM1Mzc0MTY.*_ga_DB3CR9SF0C*MTCxMzUzNzQxNS4xLjAuMTcxMzUzNzQxNi41OS4wLjA)

[types?language=en_US&_gl=1*17d0r57*_gcl_au*MTU4NDg3Nzg3MS4xNzEzNTM3NDE2*_ga*NTI5ODE4NzY3LjE3MTM1Mzc0MTY.*_ga_DB3CR9SF0C*MTCxMzUzNzQxNS4xLjAuMTcxMzUzNzQxNi41OS4wLjA](https://service.shure.com/Service/s/article/antenna-types?language=en_US&_gl=1*17d0r57*_gcl_au*MTU4NDg3Nzg3MS4xNzEzNTM3NDE2*_ga*NTI5ODE4NzY3LjE3MTM1Mzc0MTY.*_ga_DB3CR9SF0C*MTCxMzUzNzQxNS4xLjAuMTcxMzUzNzQxNi41OS4wLjA) (viitattu 19.4.2024).

Kuva 16. Mediatrade. i.a. [https://mediatrade.fi/tuote/uhf-dipole-antenna-folding-w-dc-blckng-cap-](https://mediatrade.fi/tuote/uhf-dipole-antenna-folding-w-dc-blckng-cap-470/?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMlXMKzzMbOhQMVbVaRBR1lvQLIEAQYBiABEgIf8PD_BwE)

[470/?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMlXMKzzMbOhQMVbVaRBR1lvQLIEAQYBiABEgIf8PD_BwE](https://mediatrade.fi/tuote/uhf-dipole-antenna-folding-w-dc-blckng-cap-470/?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMlXMKzzMbOhQMVbVaRBR1lvQLIEAQYBiABEgIf8PD_BwE) (viitattu 3.5.24).

Kuva 17. Shure. i.a. [https://www.shure.com/en-](https://www.shure.com/en-US/products/accessories/pa805?variant=PA805SWB)

[US/products/accessories/pa805?variant=PA805SWB](https://www.shure.com/en-US/products/accessories/pa805?variant=PA805SWB) (viitattu 19.4.24).

Kuva 18. Shure. i.a. [https://www.shure.com/en-US/products/accessories/ha-](https://www.shure.com/en-US/products/accessories/ha-8089?variant=HA-8089)

[8089?variant=HA-8089](https://www.shure.com/en-US/products/accessories/ha-8089?variant=HA-8089) (viitattu 19.4.24).

Kuva 19. Färm, V. 2022. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786308/Farm_Ville.pdf?sequenc](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786308/Farm_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

[e=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786308/Farm_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y) (viitattu 8.4.2024). Tapia, C. Sigismondi, G. i.a. Verkkosivu.

[https://content-files.shure.com/Pubs/wireless-antenna-setup-](https://content-files.shure.com/Pubs/wireless-antenna-setup-guide/us_pro_antenna_setup_ea.pdf)

[guide/us_pro_antenna_setup_ea.pdf](https://content-files.shure.com/Pubs/wireless-antenna-setup-guide/us_pro_antenna_setup_ea.pdf) (viitattu 19.4.2024).

Kuva 20. Ghiotto, Anthony i.a. [https://www.researchgate.net/figure/Radiation-](https://www.researchgate.net/figure/Radiation-pattern-of-a-dipole-in-the-plans-a-horizontal-and-b-vertical_fig1_281946793)

[pattern-of-a-dipole-in-the-plans-a-horizontal-and-b-vertical_fig1_281946793](https://www.researchgate.net/figure/Radiation-pattern-of-a-dipole-in-the-plans-a-horizontal-and-b-vertical_fig1_281946793)

(viitattu 18.5.2024).

Kuva 22. RF Venue. i.a.

[https://cdn2.hubspot.net/hubfs/316692/Spec%20Sheets/CP%20Beam%20Spec](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/316692/Spec%20Sheets/CP%20Beam%20Specifications.pdf)

[ifications.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/316692/Spec%20Sheets/CP%20Beam%20Specifications.pdf) (viitattu 21.4.2024).

Kuva 25. Traficom. i.a. Langattomien kameroiden, videolinkkien ja mikrofonien

taajuudet. [https://www.traficom.fi/fi/viestinta/radioluvat-ja-](https://www.traficom.fi/fi/viestinta/radioluvat-ja-taajuudet/langattomien-kameroiden-videolinkkien-ja-mikrofonien-taajuudet)

[taajuudet/langattomien-kameroiden-videolinkkien-ja-mikrofonien-taajuudet](https://www.traficom.fi/fi/viestinta/radioluvat-ja-taajuudet/langattomien-kameroiden-videolinkkien-ja-mikrofonien-taajuudet)

(viitattu 8.4.2024).

Kuva 26. Shure. i.a. <https://www.shure.com/en-US/docs/guide/UA874V> (viitattu

3.5.2024).

