

Mikko Kivelä

KEILANMUODOSTUS

Osana langatonta viestintää

KEILANMUODOSTUS

Osana langatonta viestintää

Mikko Kivelä
Opinnäytetyö
Syksy 2022
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, ohjelmistokehitys

Tekijä: Mikko Kivelä

Opinnäytetyön nimi: Keilanmuodostus

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Beamforming

Työn ohjaaja: Jukka Jauhiainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2022

Sivumäärä: 31

Tämä opinnäytetyö käsittelee keilanmuodostusta ja langatonta viestintää. Tavoitteena on, että siaan aikaisemmin perehtymätön lukija saisi peruskäsityksen aiheesta. Työssä mainitaan myös, kuinka viestinnän innovaatiot ja niiden kehittäjät ovat ajan saatossa vieneet alaa eteenpäin. Tarkoituksena ei kuitenkaan ole ollut pureutua aivan ensimmäisiin viestinnän keinoihin, joita ihmiset ovat käyttäneet jo tuhansia vuosia. Tieto- ja viestintäteknikan opinnäytetyöstä kun on kyse, niin historiaa käsitellään 1800-luvulta eli siitä, kun ensimmäisen kerran havaittiin sähkömagneettisten aaltojen olemassaolo. Siitä alkoi huikea innovaatioiden sarja, joka on johtanut 2020-luvun keinoihin viestiä salamannopeasti lähes mihin päin maailmaa tahansa.

Työn osana esitellään myös tukiasema ja mistä se koostuu. Antennista ja sen toiminnasta on erikseen oma lukunsa. Tässä luvussa mainitaan myös, kuinka keila muodostetaan ja kuinka sen muotoa voidaan säädellä tarkoitukseen sopivaksi. Työn viimeisillä sivuilla on tarkoitus että lukija saa peruskäsityksen siitä, mihin yli 150-vuotta kestänyt kehitystyö on meidät vienyt. Näitä varhaisia innovaatioita hyödynnetään vielä 5G -aikakaudellakin. Keilanmuodostaminen on tärkeä osa tämän päivän langattoman viestinnän ratkaisuja.

Työ on toteutettu hyödyntäen tutkinnon aikana karttunutta tietoa, minkä avulla on saatu perusajatus, kuinka aihetta tulisi lähestyä. Tietoa aiheesta on runsaasti saatavilla, työn edetessä suurin työ olikin sen valikoiminen. Tarkoituksena kuitenkin oli rajata aihetta siten, että aiheesta tietämättömällä olisi helppo saada yleiskuva aiheesta. Tämän vuoksi monimutkaisimpiin teknisiin asioihin ei pureuduta juuri lainkaan.

Asiasanat: keilanmuodostus, 5G, langaton viestintä

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	HISTORIAA	7
2.1	Nyqvistin laki	8
2.2	Hartleyn laki.....	8
2.3	Shannon–Hartleyn teoria.....	9
3	TUKIASEMA.....	11
4	ANTENNI.....	15
4.1	Antenni muodostaa keilan	17
4.2	Paneeliantenni.....	19
4.3	Keilan säätäminen.....	21
4.4	Signaalin modulointi	23
4.5	MIMO	24
5	KEILANMUODOSTUS NYT JA TULEVAISUUDESSA.....	27
6	YHTEENVETO	28
	LÄHTEET.....	29

SANASTO

4G	Neljäs sukupolvi
5G	Viides sukupolvi
6G	Kuudes sukupolvi
Bitti	Kyllä/Ei-päätös informaatio teknologiassa.
Db	Tehosuhteen yksikkö
Hz	Taajuuden yksikkö
IOT	Internet Of Things eli esineiden internet
Kanava	"Siirtotie" mitä pitkin informaatio siirtyy lähettäjältä vastaanottajalle.
LTE	Long Term Evolution, toinen nimitys 4G:stä
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, modulointi menetelmä
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
Solu	Yksittäisen tukiaseman vaikutusalue.

1 JOHDANTO

Tämä työ käsittelee keilanmuodostusta, mikä paremmin tunnetaan sen englanninkielisellä nimellä beamforming. Selvyyden vuoksi kuitenkin tässä työssä siitä käytetään suomenkielistä termiä. Asiaan liittyen käydään myös perusteita langattomasta viestinnästä.

Keilanmuodostuksen merkitys nykyisessä ja tulevaisuuden tiedonsiirrosta on kasvanut, koska käytössä olevien taajuuksien määrä on rajallinen. Tästä on tullut ongelma, koska käyttäjämäärät ovat suurena kasvussa, niinpä aikaisemmat taajuuden käytön tehostamismenetelmät eivät enää riitä. Lisäksi tänä päivänä tietoa pitäisi saada siirrettyä yhä nopeammin, suurempia määriä ja pienemmällä viiveellä. Tämän kaiken pitäisi tapahtua myös edullisesti ja energiatehokkaasti.

Kaikki alkoi sähkömagnetismin havaitsemisesta ja myöhemmin sen hyödyntämisestä langattomassa tiedonsiirrosta. Meidät tähän näkymättömään ja värähtelevään maailmaan johdattaneita henkilöitä esitellään opinnäytetyössä pintapuolisesti. Tämän jälkeen esitellään tukiasema ja syyt, minkä vuoksi niitä rakennetaan lisää kiihtyvällä vauhdilla. Lisäksi tietysti käsitellään sitä, mitä tukiasemat pitävät sisällään. Pehdytään hieman yleisesti antennin toimintaan ja sen lainalaisuuksiin. Lopuksi avataan hieman sitä, kuinka tätä teknologiaa hyödynnetään nykyajassa.

Tämän opinnäytetyön tavoite on kertoa asiaan perehtymättömälle lukijalle, kuinka ala on saanut alkunsa. Tietysti esitellään sen kehitystä 1800-luvulta aina tähän päivään saakka. Tavoitteena on myös kertoa, kuinka tieto liikkuu omasta älylaitteesta ympäri maailman salaman nopeasti. Tämän vuoksi teksti on pyritty pitämään mahdollisimman helposti lähestyttävänä.

2 HISTORIAA

Tämä tarina alkaa vuodesta 1865. Tänä vuonna yksi kaikkien aikojen suurimmista fyysikoista James Clerk Maxwell julkaisi teorian sähkömagneettisesta aaltoliikkeestä. Hän oli skotlantilainen fyysikko, joka osoitti muun muassa, että sähkö ja magnetismi ovat yksi ja sama asia eli sähkömagnetismi. Hän osoitti myös sen, että sähkömagneettinen voima etenee avaruudessa aaltolina valonnopeudella. Lisäksi hän kehitti sähkömagneettisia kenttiä kuvaavat yhtälöt, jotka kantavat hänen nimeään eli Maxwellin yhtälöt. (1.) Nämä olivat radion perusta ja niiden avulla pystyttiin myös tutkimaan muun muassa röntgen-, gamma- sekä infrapunasäteilyä.

Ensimmäisenä kuitenkin sähkömagneettisen säteilyn havainnollisti käytännössä Heinrich Hertz. Hän rakensi ensimmäisenä laitteen, joka tuotti radioaaltoja. Tämän vuoksi värähtelyn yksikkö sykli per sekunti Hz on nimetty hänen mukaansa. Hertzin työtä jatkoi muun muassa Aleksandr Popov sekä Guglielmo Marconi. Heistä ensimmäinen muodosti radioyhteyden kahden pisteen välille. Kuitenkin Marconi on saanut kunnian radion isänä, koska hän muun muassa muodosti pysyvän lennätinyhteyden Englannin ja Ranskan välille, tämä tapahtui vuonna 1899. Radion patentti kuuluu kuitenkin historian käännteiden seurauksena Nikola Teslalle, kun Yhdysvaltojen korkein oikeus sen hänelle palautti vuonna 1943 hänen kuolemansa jälkeen.(2.)



KUVA 1 Guglielmo Marconi käyttämässä langatonta lennätintä (3)

1920-luvun lopulla alkoi ilmestymään ensimmäisiä ideoita liittyen langattomaan tiedonsiirtoon. Nämä olivat Harry Nyqvistin sekä Ralph Hartleyn käsialaa. Nämä liittyivät lennättimellä tehtävään tiedonsiirtoon. Ne olivat läpimurtoideoita, mutta eivät kuitenkaan osana kattavaa teoriaa. Nämä

kuitenkin johtivat siihen että, 1940-luvulla Claude Shannon kehitti kanavakapasiteetin käsitteen ja teki teorian informaatiosta ja sen lähettämisestä. Tämä teoria perustui osin Nyquistin ja Hartleyn ideoihin. Kanavakapasiteetti tarkoittaa tiedon siirtonopeuden ylärajaa, jolla tieto siirtyy vielä luotettavasti tulon ja lähdön välillä. Käsitteenä se on keskeinen vielä nykyisten viestijärjestelmien kehityksessä. (4.)

2.1 Nyqvistin laki

Harry Nyquist oli ruotsalainen insinööri ja tohtori. Hän työskenteli muun muassa Bell Telephone Laboratoriesilla. Vuonna 1927 hän päätti, että itsenäisten pulssien määrä on rajoitettu kaksinkertaiseen kanavan kaistaleveyteen, jotka pystyttäisiin lähettämään lennätinkanavan kautta. Nyquist julkaisi tulokset osana artikkeliaan vuonna 1928. "Certain topics in Telegraph Transmission Theory" (4.) (Kaava 1.)

KAAVA 1. Nyquistin laki

$$f_p \leq 2B$$

f_p = pulssitaajuus, pulsseina per sekunti

B = kaistanleveys hertseinä

Signaalin todellinen siirtonopeus on aina Nyqvistin lauseesta saatua arvoa pienempi, koska siirto-
tiellä on aina kohinaa, säröä ja vaimennusta. Kohisevan linjan kapasiteetti saadaan Shannon–Hartleyn laista. (5.)

2.2 Hartleyn laki

Ralph Hartley oli yhdysvaltalainen tiedemies. Häntä pidetään yhtenä informaatioteorian luojista. Hän työskenteli muun muassa Western Electric Companyn sekä Bell Labsin tutkimuslaboratorioissa. Hänen tutkimusalaansa oli radioverkko Pohjois-Amerikan ja Euroopan välillä sekä radioviestintäkehittely (6.). Hartleyn laki määrittelee tavan, jolla määritellään tieto ja linjanopeus lu-

kuina. Hartley muotoili nämä vuonna 1928 teoksessaan "Transmission of Information" (6.). Teoksessa määritellään R bittiä sekunnissa, joka tunnetaan datasiirtonopeutena. Tiedon määrän yksikkö nimettiin ensin hänen mukaansa. Vasta myöhemmin Claude Shannon ehdotti käytettäväksi bittiä yksikkönä tiedon määrälle. (Kaava 2.) (7.)

KAAVA 2. Hartleyn laki

$$R = f_p \log_2(M),$$

R = datasiirtonopeus bit/s

f_p = pulssi taajuus

\log_2 = binäärinen logaritmi

M = pulssien enimmäismäärä

2.3 Shannon–Hartleyn teoria

Vuonna 1948 Claude Shannon julkaisi artikkelin "A Mathematical Theory of Communication", jossa tutkitaan tiedonsiirtämisen ongelmia (7.). Hän siis määritteli informaatioteorian perustana tiedon määrittämisen bitteinä. Tähän perustuen hän kehitti kokonaan uuden matematiikan haaran, jonka avulla informaation määrää voidaan laskea tarkasti. Näin syntyi lauseke, joka pohjautuu Hartleyn lakiin, jota Claude Shannon jatkojalosti. Shannon–Hartley teorialla saadaan selville kanavakapasiteetti, joka tarkoittaa teoreettista tiedonsiirtonopeuden ylärajaa alhaisella virhesuhteella. (Kaava 3.) (Kuva 2.)(8.)

KAAVA 3. Shannon–Hartley teoria

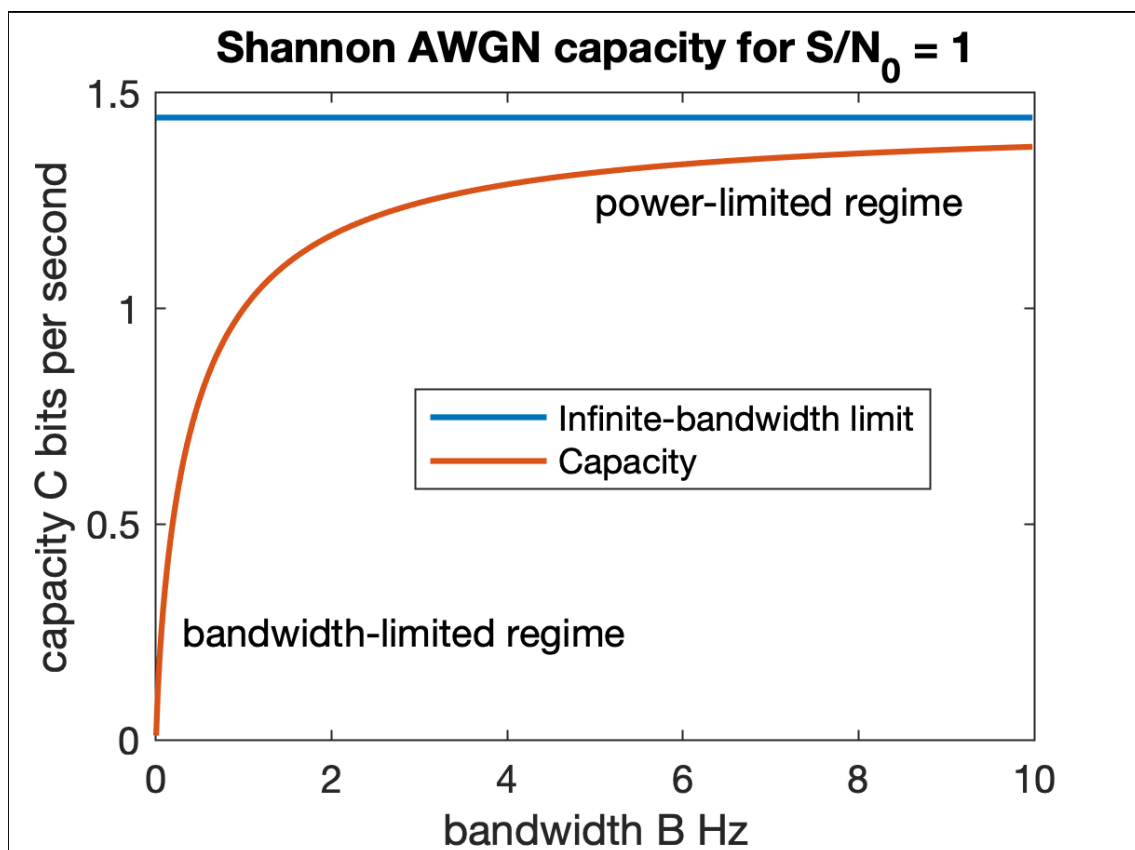
$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

C = kanavan kapasiteetti bitteinä sekunnissa

B = kanavan kaistaleveys hertseinä

S = vastaanotetun signaalin keskimääräinen teho kaistanleveydellä

N = kohinan ja häiriön keskimääräinen teho kaistanleveydellä mitattuna



KUVA 2. Kuvassa esimerkki Shannon–Hartleyn-lauseesta kuvaajana. Kuvaaja kertoo, kuinka virhesuhde kasvaa tiedonsiirtonopeuden lisääntyessä (8)

3 TUKIASEMA

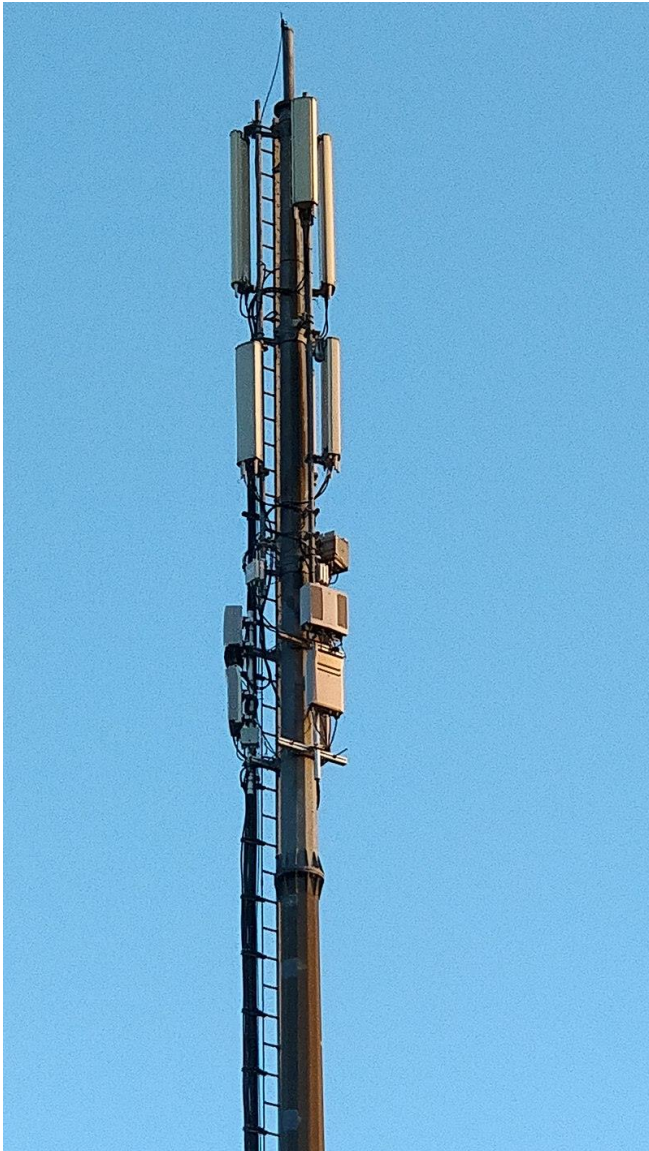
Tietoliikenneverkoksi kutsutaan maailman laajuista valokuidusta rakennettua verkostoa. Valokuitukaapeli kulkee maan sisällä muodostaen yhteyden ympäri maailman sijaitsevien tukiasemien ja palvelinkeskusten välille. Käyttäjä voi olla suoraan yhteydessä palvelinkeskukseen ja käyttää kiinteää valokuituyhteyttä esimerkiksi kotoa käsin.

Toinen vaihtoehto on olla langattomasti yhteydessä ilmarajapinnan kautta tukiasemaan, joka taas on kytketty valokuidulla tietoliikenneverkkoon. Tukiasema muodostaa soluja, joiden alueilla ovat käyttäjät ovat yhteydessä tukiasemaan. Käyttäjät voivat liikkua solusta toiseen, jolloin yhteys vaihtuu käyttäjän huomaamatta salamannopeasti. Vierekkäisten solujen täytyy kuitenkin olla eri taajuuksilla, jotta tämä siirtyminen toimisi saumattomasti. Tätä siirtymistä kutsutaan handoveriksi. Näin tukiasemien avulla on luotu langaton verkko. (Kuva 3.)



KUVA 3. Havainnollistava kuva tietoliikenneverkon solurakenteesta (9.)

Tukiasemia on erityyppisiä, esimerkiksi makrotukiasema ja mikrotukiasema. Makrotukiasemaa käytetään palveltaessa suurta aluetta ja tukiasemat sijoitetaan pääosin korkealle mastoihin. (Kuva 4.) Kaupungeissa näitä taas voi olla sijoiteltuna myös esimerkiksi talojen katoille.



KUVA 4. Langattoman verkon tukiasemia mastossa. Kuvassa mastoon kiinnitettynä radioita sekä paneeliantenneja (10)

Mikrosolutukiasemia taas voi löytää kaupungeista, katoilta tai talonseinistä. Lisäksi on olemassa pienempiä tukiasemia, joilla pyritään kattamaan haastavampia katvealueita esimerkiksi rakennusten sisällä. Tukiasemien määrä on kasvanut taajamissa. 5G-teknologian millimetrien mittaiset aallot

ovat alttiita häiriöille, ja myös niiden kantama on lyhyempi. Näin myös tukiaseman muodostamat solut ovat pienempiä, eli hyvän kattavuuden saavuttamiseksi niitä on oltava suurempi määrä. Tukiasemaksi voidaan myös kutsua kotiin sijoitettavaa modeemia, joka tarjoaa langattoman sisäverkon kodin laitteille.

Haja-asutusalueiden kattaminen tuottaa välillä operaattoreille ja tukiasema valmistajille haasteita. Esimerkiksi kun tukiasema täytyy sijoittaa kauas asutuksesta, ei siellä ole yleensä sähköverkkoa, josta tukiasema saisi tarvittavan sähkön. Kuvassa 5 on Soneran GSM-tukiasema Urho Kekkosen kansallispuistosta lähetä Sokostin huippua. Kuten kuvasta näkyy, virransaanti on toteutettu aurinkopaneelien avulla. (11.)



KUVA 5. Soneran tukiasema läheltä Sokostin huippua (11)

Karkeasti tukiasema koostuu systemimoduulista, radiosta ja antennista. Radio muodostaa antennin kautta keilan käyttäjän ja tukiaseman välille, jota myöten tieto liikkuu molempiin suuntiin. An-

tenni lähettää ja vastaanottaa signaalin siirtäen sen radiolle. Radiolta tämä tieto taas siirtyy systeemimoduulille, josta se taas lähtee eteenpäin kantaverkkoon. Sama tapahtuu päinvastoin, kun käyttäjälle on saapumassa tietoa kantaverkosta. Kantaverkosta tieto saapuu systeemimoduuliin, joka siirtää sen radiolle. Radio taas muodostaa antennia myöten keilan tukiaseman ja käyttäjän laitteen välille, josta se siirtyy käyttäjälle. Kuvassa 6 alhaalla on esimerkkejä tukiaseman eri osista, muun muassa antennieja, radiota ja myös osia systeemimoduulin sisältä, kuten esimerkiksi Baseband-kortti. Baseband käsittelee signaalin eli moduloi sen. Lisäksi kuvassa on myös muun muassa ASiR Smart HUB, joka lisää siirtokapasiteettia RRH-radiopään välillä.

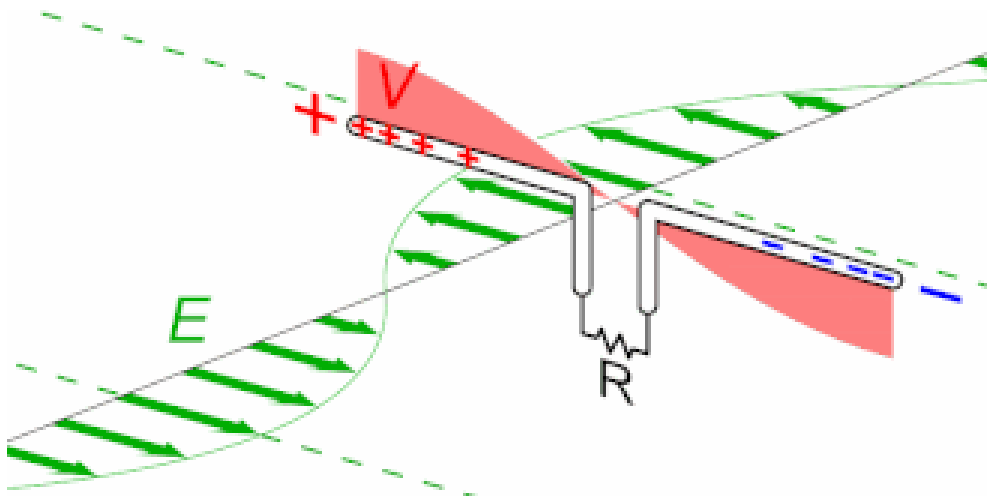


KUVA 6. Esimerkinä tukiaseman osia (12)

Laitteiden sijoittelu voi vaihdella hieman, esimerkiksi joissain tukiasemamalleissa radio voi sijaita korkealla mastossa antennin seurana. Joissain tapauksissa se taas sijaitsee alhaalla liitettynä systeemimoduuliin ja vastaanottaa antennilta tulevan signaalin valokuituapitkin.

4 ANTENNI

Antenni on tärkeä osa tukiasemaa. Se lähettää sekä vastaanottaa signaalin ja toimittaa sen radiolle. Kuvassa yksinkertainen puolidipoliantenni, joka koostuu kahdesta metallisauvasta, jotka on yhdistetty vastaanottimeen (kuva 7). Kuvassa vihreät nuolet edustavat radioaaltoja, jotka työntävät sauvojen elektroneja puolelta toiselle. Näin sauvojen päät latautuvat vuorotellen positiivisiksi ja negatiivisiksi. Koska antennin pituus on puolet aallonpituudesta, värähtelevä kenttä indusoi seisovia jänniteaaltoja. Värähtely siirtyy sauvoja myöten vastaanottimelle eli radiolle, joka sijaitsee sauvojen keskellä. (13.)

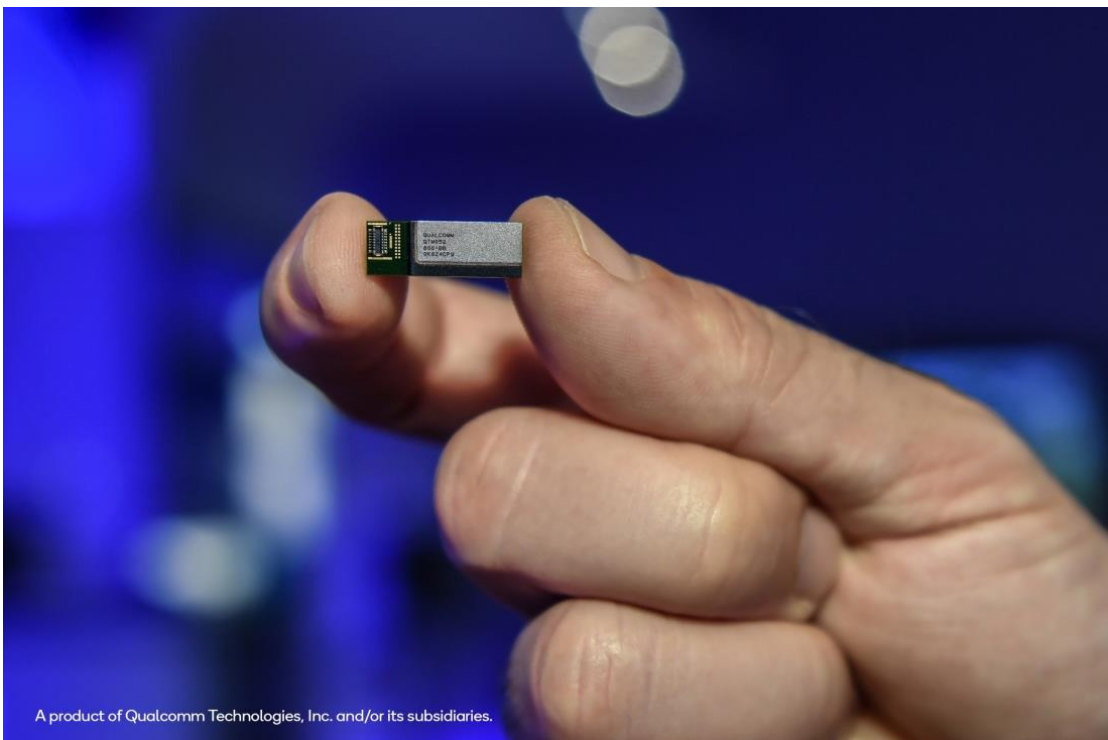


KUVA 7. Havainnekuva puolidipoliantennin toiminnasta (14)

Lähettävä antenni muuntaa lähettimeltä saapuvan suurtaajuisen vaihtosähkön sähkömagneettiseksi säteilyksi. Vastaanottavassa antennissa taas sähkömagneettinen säteily aiheuttaa sähkömotorisen voiman. Antenneja on monen tyyppisiä ja kokoisia. Koko voi vaihdella hehtaareista millimetreihin. Antennin koosta voi usein päätellä sen käyttötarkoituksen. Esimerkkinä Duga 3 -tutka-antenni Ukrainasta läheltä Chernobylin ydinvoimala aluetta (Kuva 8.) sekä puhelimesta käytettävä 5G-antenni (Kuva 9.).



KUVA 8. Duga 3 -tutka-antenni Ukrainassa, joka on esimerkki suuresta antennista (15)



KUVA 9. QTM052 5G-antenni, joka on esimerkki pienestä antennista (16)

4.1 Antenni muodostaa keilan

Jokainen antenni muodostaa jonkinlaisen keilan. Keilanmuodostuksesta puhuttaessa puhutaankin enemmän siitä, miten keilaa vahvistetaan ja kohdistetaan haluttuun suuntaan. Aihe on ajankohtainen, koska sen avulla voidaan parantaa kanavakapasiteetin tehokkuutta. Keilan muodostusta voidaan käyttää monenlaiseen eri tarkoitukseen, kuten antennityyppien erilaisuudesta voidaan päätellä. Antennin muoto määrittääkin paljon sitä, minkä muotoinen keila siitä muodostuu. Kuitenkin keilan vahvuudenmääritys ja suuntaus tehdään radiolla. On todettu, että langattoman tietoliikenneverkon tarpeisiin soveltuu parhaiten paneeliantenni. Se sisältää useita pienikokoisia antenneja, joilla ”älykäs” radio voi muodostaa samanaikaisesti useita keiloja eri suuntiin. Tämän vuoksi se onkin yleisesti käytössä tukiasemissa, koska sen vaikutus alueella voi olla useita kohteita, mihin keilaa tarvitsee vahvistaa.

Tietysti antennin sijoittelulla on suurimerkitys, koska fyysiset esteet vaikuttavat keilan muotoon. Tästä syystä antennit sijaitsevatkin yleensä mahdollisimman korkealla tukiasemamastojen huipuilla tai talojen katoilla. Sieltä ne taas on suunnattu alaviistoon. Tällä on pyritty siihen, että antennin keila muodostuisi mahdollisimman hyvin kohti käytettävää laitetta.

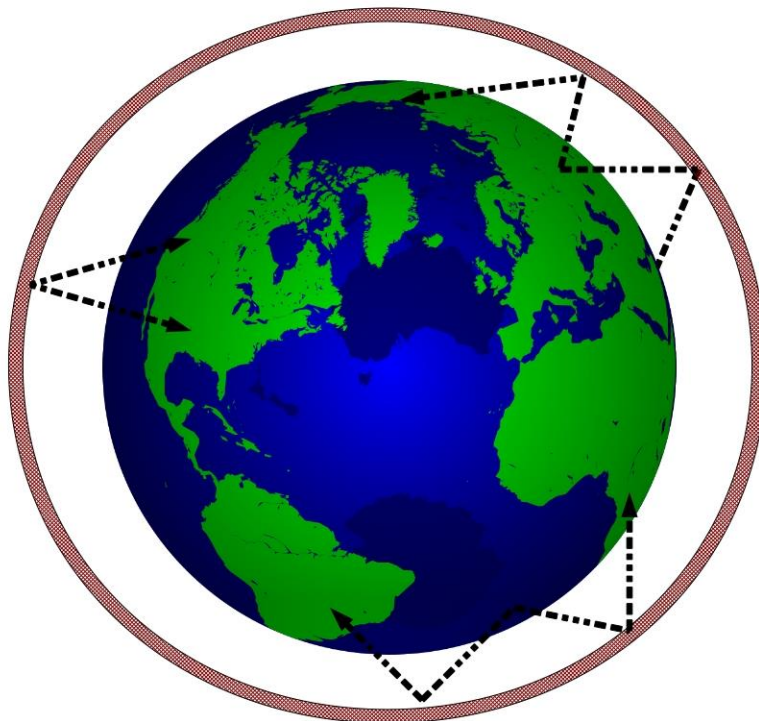
Tietoliikennetekniikassa vaatimukset ovat koventuneet huomattavasti viime vuosikymmeninä. Tietoa pitää pystyä siirtämään suuremmalla nopeudella ja suurempia määriä. IOT eli esineiden internet koostuu automaattisesti ohjattavista laitteista, jotka kommunikoivat keskenään ja lisäävät verkkojen kuormitusta yhä enemmän ja enemmän. Lisäksi tietoteknisten laitteiden määrä kasvaa todella vauhdilla. Suomesta esimerkiksi on varmasti vaikea löytää työikäistä henkilöä, jolla niin kutsuttua älypuhelinta ei ole käytössä. Useilta löytyy lisäksi muitakin laitteita, jotka ovat langattomassa yhteydessä verkkoon. Lisäksi käyttäjät lähettävät yhä suurempia tiedostoja toisilleen, esimerkiksi sosiaalisen median alustoilla. Kuvat ja videotiedostot vaativat todella paljon kaistaa, jotta ne siirtyisivät kohtuullisessa ajassa. Näihin vaatimuksiin on siis löydettävä ja on myös löytynyt ratkaisuja (17.).

Kasvava tiedonkäsittelynopeus tietokoneissa auttaa tässä ja on osa ratkaisua, mutta suurin pullonkaula onkin tänä päivänä ilmarajapinta. Valokuitua pitkin yhteydet kuitenkin ovat vakaita ja toimivat todella nopeasti, koska ne ovat suojassa maan alla. Vielä 2G- ja 3G-aikana näitä haasteita kyettiin ratkaisemaan kaistaa leventämällä sekä moduloimalla. Vasta uusimmissa LTE- ja 5G-tekniikoissa

on alettu hyödyntämään tehokkaammin keilanmuodostusta. Keilaa voidaan tarvittaessa vahvistaa ja suunnata sinne, missä sitä tarvitaan sillä hetkellä eniten.

Keilanmuodostustekniikoita on analogista, digitaalista sekä näiden yhdistelmää hybridikeilanmuodostusta. Analogisessa ja digitaalisessa on omat hyötynsä, analogisessa kattavuus ja digitaalisessa kapasiteetti sekä joustavuus. Ongelmana analogisessa taas on kapasiteetti ja digitaalisessa kallis hinta sekä suuri energiankulutus. Näiden ominaisuuksia yhdistämällä kehitettiin hybridikeilanmuodostus. Siinä on onnistuttu pienentämään virrankulutusta ja pääsemään spektrissä tehokkuudessa lähes digitaalisen keilanmuodostuksen tasolle. Spektrinen taloudellisuus parantaa kapasiteettia ja näin mahdollistaa suuremman tiedonsiirron useammalle käyttäjälle (18.).

LTE- ja 5G-tekniikoissa aallonpituus on todella lyhyt. Vertailun vuoksi radioaallon pituuksissa puhutaan jo metreistä. Esimerkiksi 100 MHz:n radioaalto on noin 3 metriä pitkä. Näiden todella pitkien aallonpituuksien ongelma tietoliikennetekniikassa on niin sanottu ”taivasaalto”-ilmiö (Kuva 10.). Se tarkoittaa, että signaali heijastuu takaisin kohti maata ionosfääristä, joka on ylemmän ilmakehän sähköisesti varautunut kerros.

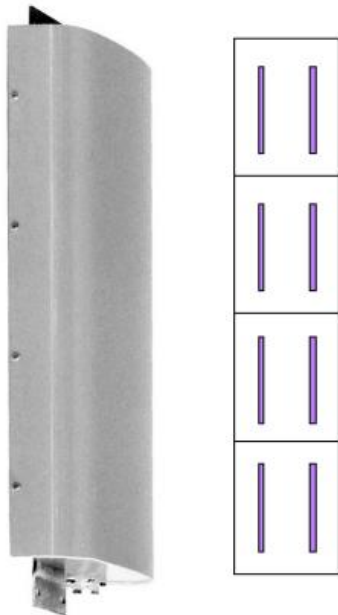


KUVA 10. Havainnekuva ”taivasaalto”-ilmiöstä (19)

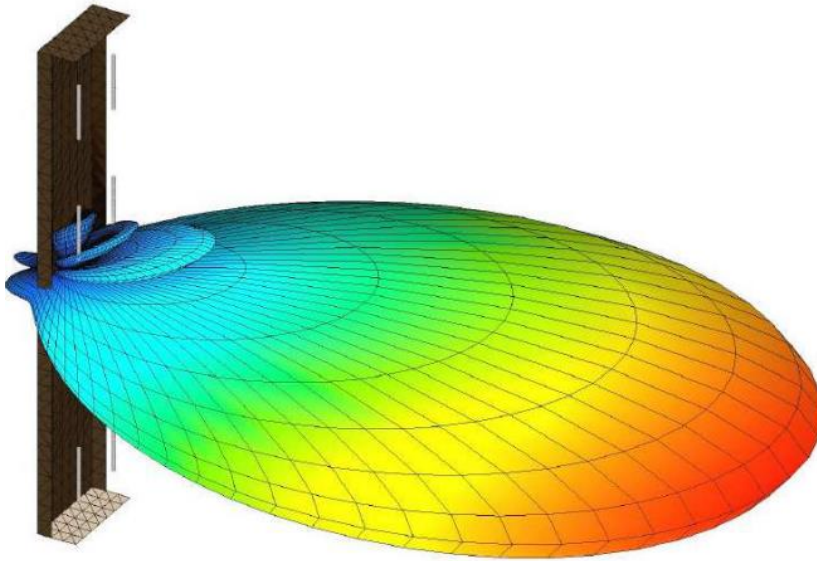
Tätäkin voidaan myös hyödyntää, koska maan kaarevuus ei rajoita sitä (19.). Esimerkiksi radioamatöörit käyttävät sitä viestiäkseen keskenään ympäri maailman. Tämä ilmiö toimii käytännössä alle 300 MHz:n taajuuksilla. Huonona puolena tässä on tietoliikenneverkon näkökulmasta, se että solujen kokoa on mahdoton hallita. Optimaalinen taajuusväli tietoliikenneverkolle on 300 – 3000 MHz. Yli 3000 MHz:n menevät taajuudet taas ovat todella alttiita häiriöille ja kantamakin pienenee (18.). Kuitenkin taajuuksien ollessa rajallinen luonnonvara nämäkin ollaan ottamassa käyttöön. Näitä taajuuksia on jo huutokaupattu Suomessa operaattoreille. Omat taajuusalueensa voittivat Elisa, DNA ja Telia (20.).

4.2 Paneeliantenni

Langattomat verkot toteutetaan yleisesti paneeliantennilla (Kuva 11.). Sen muoto voi hieman vaihdella riippuen sen valmistajasta. Uusimmissa paneeleissa antennit ovat ristikkäin 45 asteen kulmassa lomittain. Tämän kaltaisia antenneja voi nähdä tietoliikennemastojen huipulla sekä taajamissa talojen katoilla sekä seinissä. Alla myös kuva paneeliantennin muodostamasta keilasta (Kuva 12.).

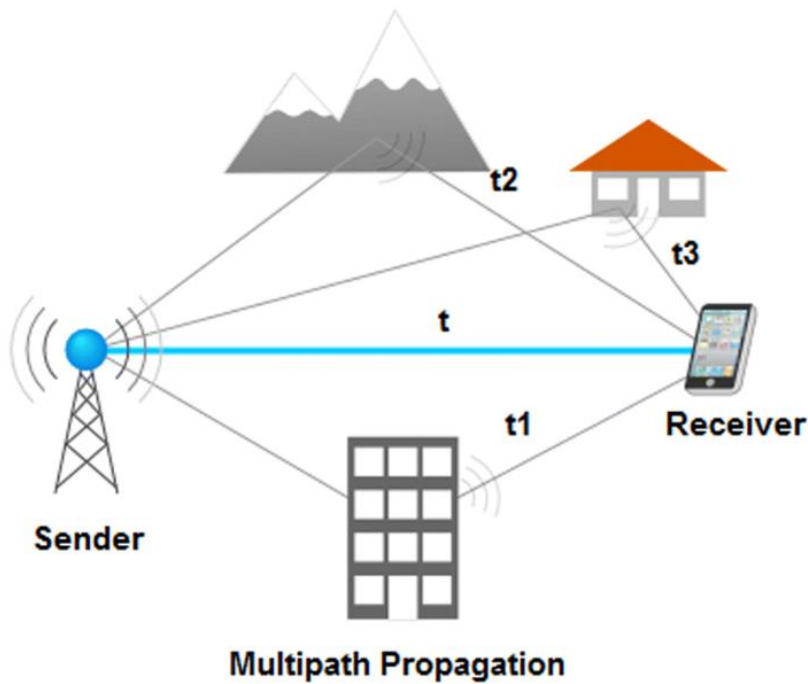


KUVA 11. Paneeliantenni (18)



KUVA 12. Havainnollistavakuva paneeliantennin muodostamasta keilasta. Kuvassa esimerkki siitä, kun yksi antennipari muodostaa keilan (18)

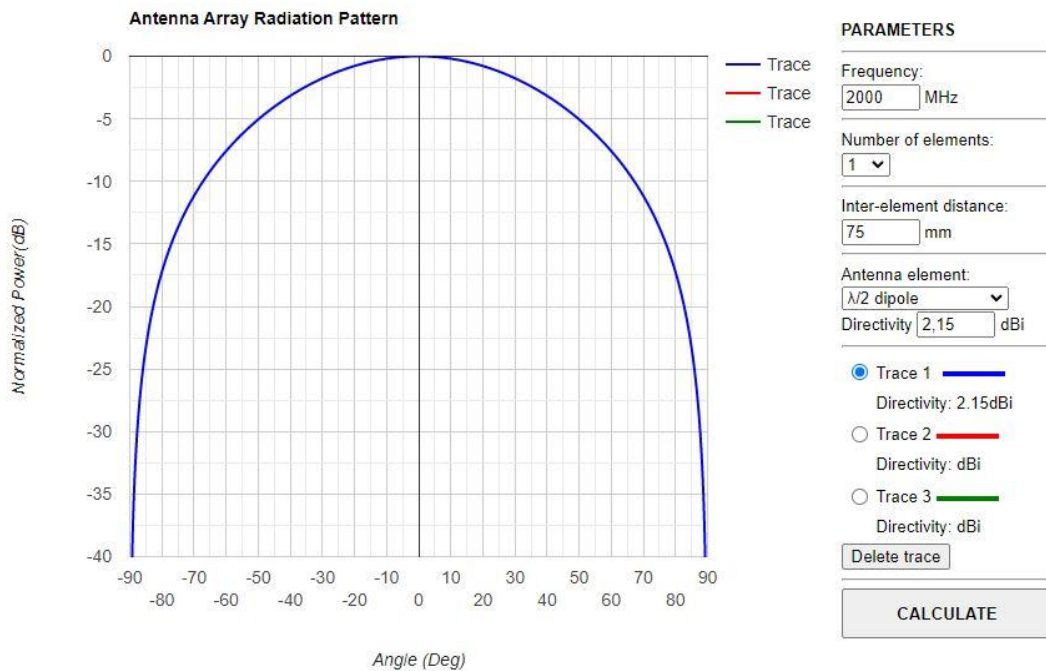
Signaali käyttää niin kutsuttua monitie-etenemistä. Etenkin asutuskeskuksissa on paljon rakennettua infrastruktuuria, josta signaali heijastuu. Näin päätelaitteeseen saapuu monta signaalia, jotka sitten yhdistetään ohjelmallisesti (Kuva 13.).



KUVA 13. Havainnekuva signaalin monitie-etenemisestä (21)

4.3 Keilan säätäminen

Antennin muodostamaa keilaa voidaan säädellä monella eri tapaa. Näistä yleisimmin käytettävät ovat tehon ja taajuuden muokkaaminen tarpeeseen sopivaksi. Alla esimerkki (Kuva 14.) yhden puolidipoliantennin muodostamasta keilasta.

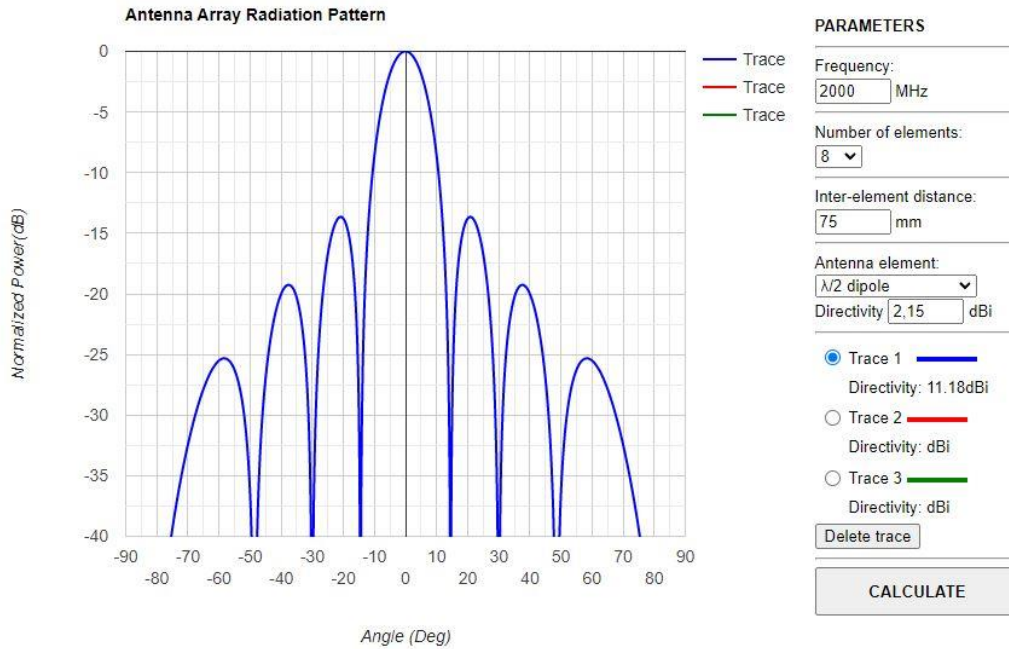


KUVA 14. Kuvassa esimerkki puolidipoliantennin muodostamasta keilasta (22)

Kytkemällä antennit rinnan voidaan säätää myös keilaa. Seuraavassa esimerkissä havaitaan, kuinka keila muuttuu, kun samanlaiset antennit kytketään rinnan. Kuvassa (Kuva 15.) kahdeksan antennia kytkettynä rinnan havaitaan, kuinka ne muodostavat yhden suuremman keilan. Kuvasta huomataan, kuinka sähkömagneettinen säteily käyttäytyy vuorovaikutuksessa.

Rinnan kytkettyjä antennia voidaan ohjata vaiheohjausjärjestelmän avulla. Riviin asennettuna antenniryhmän säteilykuviota voidaan muuttaa yhdessä ulottuvuudessa. Tasoon aseteltuna säteilykulmaa voidaan muuttaa taas kahdessa ulottuvuudessa. Näin voidaan muodostaa vaiheohjattu antenniryhmä, joka koostuu useasta antennielementistä. Sen säteilykuviota voidaan kääntää ohjaamalla sen vaihesiirtimiä. Vaihesiirtimet ohjaavat antennielementtien voimakkuutta siten, että keilaa

voidaan vahvistaa haluttuun suuntaan. Näin kuvion suunta ja vahvuus on säädeltävissä. Vastaanotossa taas voidaan vaimentaa häiriösignaaleja ja lisätä herkkyyttä tarvittaessa halutulla alueella. (Kuva 17.) (24.)

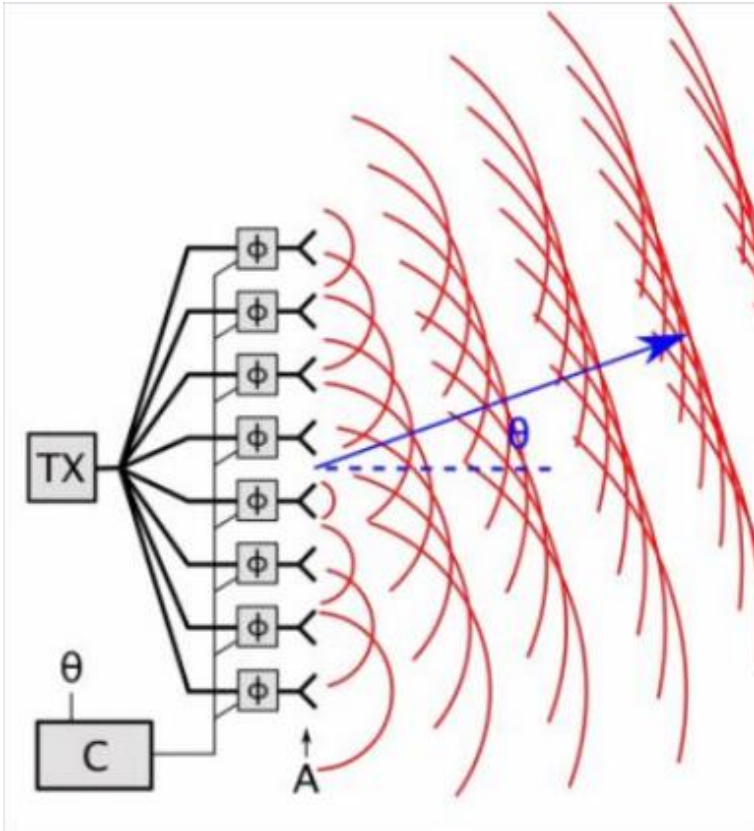


KUVA 15. Kahdeksan samanlaista antennia rinnankytkettynä (22)

Tätä hyödynnetään myös muilla aloilla, kuten ilmailussa. Alla esimerkkikuva rinnankytketyistä antenneista lentokentällä. Tällainen antennijärjestelmä on toiminut lentokentillä jo pitkään, auttaen lentokoneita laskeutumaan haastavissa olosuhteissa. (Kuva 16.)



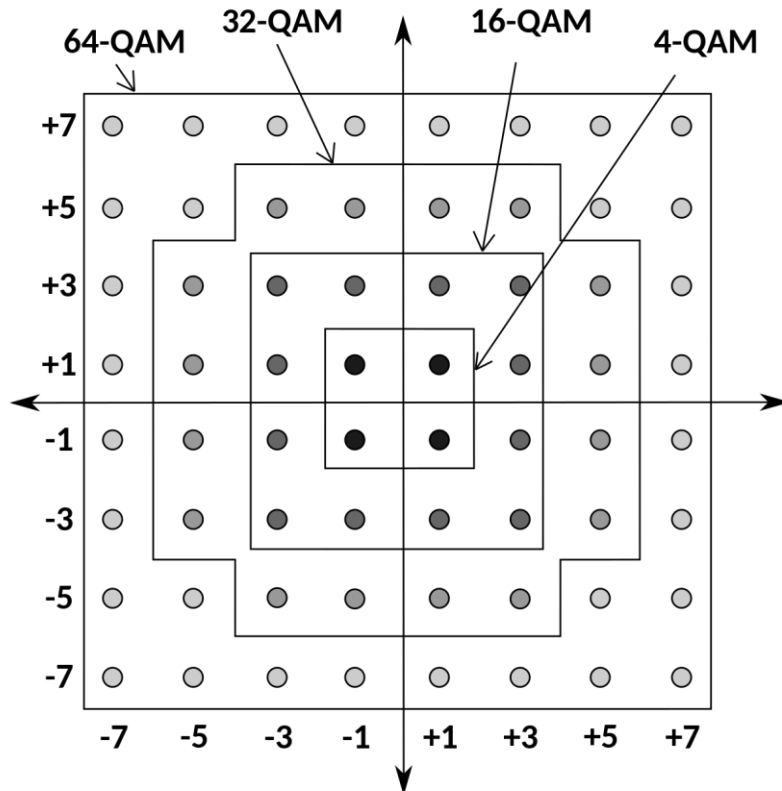
KUVA 16. Instrument Landing System (23)



KUVA 17. Näin säteilykuviota voidaan muuttaa ohjaamalla sen vaihesiirtimiä. Vaihesiirtimet ohjaavat antennielementtien voimakkuutta siten, että keilaa voidaan vahvistaa haluttuun suuntaan (24)

4.4 Signaalin modulointi

Modulaatio tarkoittaa signaalin muokkaamista toisella signaalilla. Tämä keino on ollut käytössä jo pitkään. Se kuitenkin on edelleen yksi tärkeistä menetelmistä, joilla parannetaan tehokkuutta taajuuksien käytössä. Modulointia on analogisia ja digitaalisia. Tietoliikenteessä käytetään digitaalista menetelmää, tarkemmin Quadrature Amplitude Modulationia, jonka lyhenne on QAM. Tässä menetelmässä yhdistyy vaihemodulaatio ja amplitudimodulaatio. Siinä usein koostetaan moduloimalla erikseen kahta keskenään 90 asteen vaiheensierrossa olevaa kantaaaltoa, jotka yhdistämällä tulee QAM-signaali. Modulaatiosymbolien määrä on usein jokin neljän potenssi (Kuva 18.). Esimerkiksi 256-QAM on tällä hetkellä käytössä 5G -tekniikassa. Tämä tarkoittaa 16 tasoa molemmissa haaroissa, joten siinä on 256 erilaista symbolia ja tämä tarkoittaa 8 bittiä informaatiota (26.).

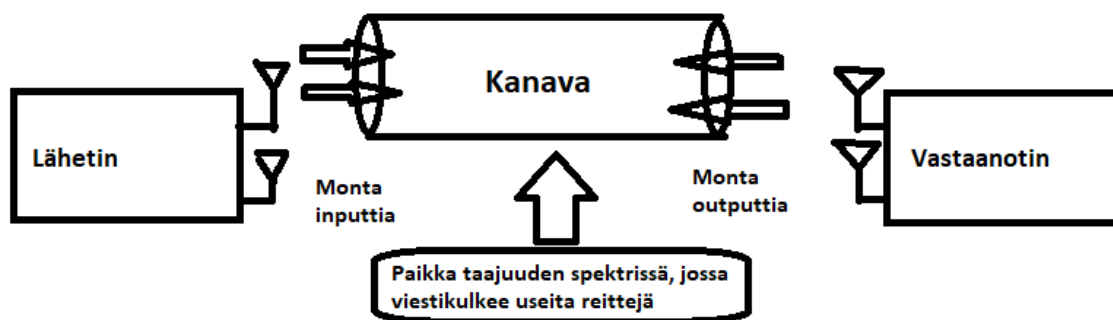


KUVA 18. Esimerkki suorakulmaisesta QAM modulaation konstellaatiosta (26)

4.5 MIMO

MIMOa edelsi muun muassa SISO eli yksi input ja yksi output. Tämä on käytössä FM radiossa edelleen. Tämän jälkeen käyttöön tuli SIMO ja MISO. SIMO tarkoittaa, että siinä on käytössä yksi input ja monta outputtia, MISO taas päinvastoin. Nämä olivat käytössä 2G- ja 3G-aikana. (27.)

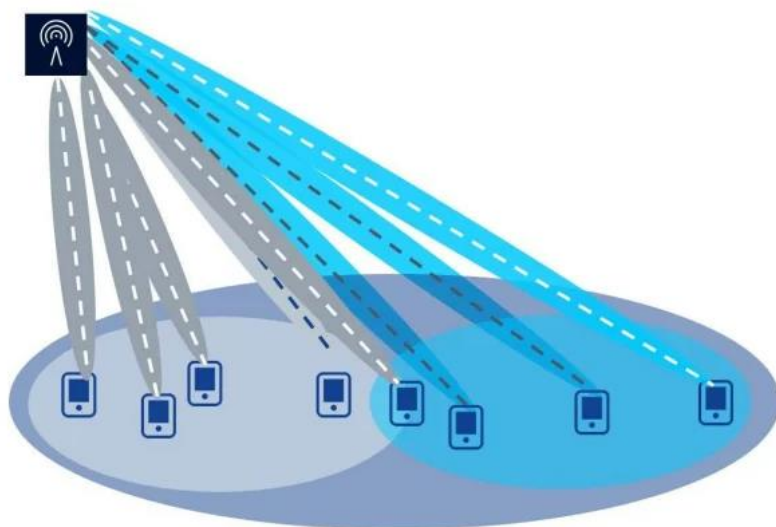
Jokaisella teleoperaattorilla on Suomessa käytössä oma taajuusalueensa, jonka se on aikanaan lunastanut käyttöönsä. Tämä rajoitettu taajuusalue pitäisi saada mahdollisimman tehokkaasti käyttöön. Vielä 2G- ja 3G-aikana taajuuskapasiteetin kasvattaminen pystyttiin toteuttamaan muun muassa käyttämällä suurempaa kaistanleveyttä ja suurempia modulaatiota. LTE- ja 5G-aikana näiden lisäksi on ryhdytty käyttämään yhä tehokkaampaa keilanmuodostusta. Lisäksi tässä auttaa MIMO (Kuva 19.).



KUVA 19. Havainne useasta inputista ja outputista

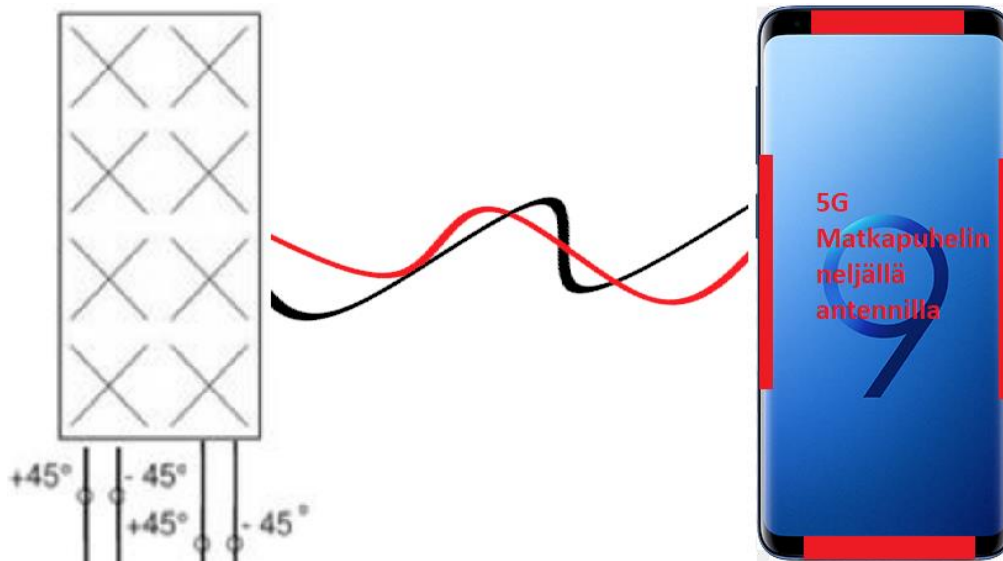
Massiivinen MIMO on tukiasematyyppi, jota käytetään tänä päivänä. (Kuva 20.) Se sisältää useita antennia, joiden avulla se pystyy palvelemaan suurta määrää asiakkaita samanaikaisesti ja samalla taajuudella. Tämä parantaa langattoman verkon tehokkuutta (bit/s/Hz) sekä energiatehokkuus paranee myös samaan aikaan. Lisäksi massiivinen MIMO parantaa signaalin vahvuutta. Antennien suuren määrän mahdollistamisen tukiaseman sisälle mahdollistaa se, että yksittäisen antennin koko on niin pieni, koska signaalin aallonpituus on niin lyhyt. Suuri antennien määrä tukiasemassa myös mahdollistaa keilanmuodostuksen hyödyntämisen tehokkaammin. Näin signaalia kohdennetaan tehokkaammin käyttäjää kohden niin tarvittaessa (27.).

5G Massive MIMO



KUVA 20. Havainnekuva massive MIMO:n toiminnasta (27)

Linjan tehokkuutta on myös tehostettu asettelemalla antennit X-muotoon, siten että napojen kulma on 45 astetta. Näin signaalit häiritsevät toisiaan mahdollisimman vähän. Näitä taas on asennettu rinnakkain, mutta etäisyys viereiseen on kuitenkin huomioitava. Tämä tulee ilmi Shannon – Hartley teoriasta (28.). Kuvassa on 4x4 MIMO (Kuva 21.) sen linjan tehokkuus on nelinkertainen SISOon verrattuna. Tämä vaatii myös, että vastaanottajalla on käytössään vähintään neljä antennia laitteessaan.



KUVA 21. Havainne kuinka ristikkäin olevista navoista signaali etenee 45 asteen kulmassa. Kuvassa antennit on sijoitettu virheellisesti lähes kiinni toisiinsa

5 KEILANMUODOSTUS NYT JA TULEVAISUUDESSA

5G on tällä hetkellä käytössä oleva langattoman tiedonsiirron sukupolvi. Se on ollut käytössä vasta muutaman vuoden. Eikä se vielä pysty hyödyntämään täyttä kapasiteettiaan. Kun 5G:tä suunniteltiin, sille annettiin kahdeksan vaatimusta. Nämä vaatimukset on koottu alan teollisuuden ja akateemisen maailman eri tutkimusaloitteiden yhdistämisestä. Ensimmäisenä tiedonsiirtonopeuden täytyisi olla 1–10 Gbit/s, sekä sen tulisi olla tavallisten käyttäjien saatavilla. Tämän vaatimuksen alarajan ylitse päästäänkin ihanneolosuhteissa jo nyt. Toisena vaatimuksena oli viiveen parantaminen alle yhteen millisekuntiin. Tähän ei vielä tässä vaiheessa olla päästy, vaikka viiveajat ovat pienentyneet kymmeniä millisekunteja edelliseen sukupolveen verrattuna. Kolmantena vaatimuksena kaistanleveys tulisi olla 1000-kertainen edelliseen 4G-tekniikkaan verrattuna. Lisäksi laitteita pitäisi saada yhdistettyä 10 – 100-kertainen määrä sekä samalla pienentää verkon energiankulutusta 90-prosenttia. Tietysti verkon kattavuus tulisi olla täydellinen ja saatavuuden pitäisi olla 99,99-prosenttia. 10 vuoden akunkesto pienitehoisille laitteille sisältyy myös 5G-verkolle asetettuihin vaatimuksiin. Kuitenkin 5G on vielä niin tuore asia, että sen kehitys on vielä kesken (27.).

Vaikka 5G ei ole vielä saavuttanut täyttä potentiaaliaan, niin 6G-suunnitelmat ovat jo käynnissä. Se on tarkoitus ottaa käyttöön vuonna 2030. Tulevaisuuteen on tietenkin mahdoton nähdä ja näin tietää, millaisilla uusilla innovaatioilla tulevia vaatimuksia ratkaistaan. Haastattelemieni alan asiantuntijoiden mukaan keilanmuodostus tulee olemaan avainroolissa 6G:tä kehitettäessä. Ensimmäisiä 6G -kehitysaskelaita on kuitenkin jo nähty, kun LG esitteli tiedonsiirtoa korkealla terahertsitaajuudella 320 metrin välimatkalla. 6G:n standardoinnin odotetaan etenevän noin vuoteen 2025 mennessä (30.).

6 YHTEENVETO

Tästä voi yhteenvedona todeta, että ihminen on kekseliäs eläin. Vielä 200 vuotta sitten näkymätön värähtelevä maailma oli täysin tuntematon, kun tänä päivänä sen avulla kuljetetaan tietoa ympäri maailman ja salamannopeasti. Tähän pisteeseen ei ole päästy itsestään, vaan tämä on tietysti vaatinut monien poikkeuksellisten yksilöiden havaintoja ja yhteistyötä. Kaikkia näitä neroja ei tässä valitettavasti mainita, vaikka jokainen alaa eteenpäin vienyt ansaitsisi ihan oman esittelynsä. Tämän opinnäytetyön aiheena on keilanmuodostus, jota jollain tasolla on langattoman viestinnän alkuajoista lähtien on tehty. Nykyajan tiedonsiirrossa keilan vahvistamisesta ja suuntaamisesta on tullut entistä merkityksellisempää. Tämän vuoksi vanha aihe on nyt ajankohtainen.

Olen vasta aloittanut työt alalla testaajana. Testaamani ohjelmistot liittyvät tukiasemiin ja niiden ominaisuuksiin. Tämän työn tekeminen on auttanut hahmottamaan kokonaisuutta alalta. Tietysti on ollut myös silmiä avaavaa huomata, kuinka paljon ja verrattain lyhyessä ajassa langaton viestintä on kehittynyt. Opinnäytetyön kirjoittaminen on kannustanut perehtymään asiaan lisää ja vienyt syvälle aiheeseen, jossa on lähes loputtomasti opittavaa. Tarkoituksena on ollut kirjoittaa tämä työ sillä ajatuksella, että jos joku alalle pyrkivä tai muuten vain alasta kiinnostunut sattuisi tämän lukemaan, niin tästä innostuisi opiskelemaan asiaa lisää. Tämän vuoksi teksti on pyritty pitämään mahdollisimman helposti ymmärrettävänä.

LÄHTEET

1. James Clerk Maxwell. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://fi.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell. Hakupäivä: 30.8.2022
2. Launiainen, Petri 2019, 22 - 31. Värähtelevä maailma: langattoman viestinnän lyhyt historia. Hakupäivä 10.9.2022. Nextory. Vaatii käyttöoikeuden.
3. Guglielmo Marconi. 2022. Wikipedia Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/76/Guglielmo_Marconi_1901_wireless_signal.jpg/2560px-Guglielmo_Marconi_1901_wireless_signal.jpg Hakupäivä 20.9.2022
4. Nyquist Rate. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist_rate. Hakupäivä 25.8.2022.
5. Perusteoriaa signaaleista 2009 OAMK Saatavissa: http://www.tekniikka.oamk.fi/tl-lab/tietoliikennejarjestelmat/Digitalisen_tiedonsiirron_perusteet/Digitaalisen_tiedonsiirron_perusteet_perusteoriaa_signaaleista_s2009.pdf Hakupäivä: 11.10.2022
6. Ralph Hartley. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Ralph_Hartley. Hakupäivä: 10.10.2022
7. Claude Shannon. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://fi.wikipedia.org/wiki/Claude_Shannon. Hakupäivä: 10.10.2022
8. Shannon – Hartley -theorem. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Shannon%E2%80%93Hartley_theorem. Hakupäivä 25.8.2022.
9. Lahti, Timo. 2021. 4G Mobiiliverkon testatus rakennuksissa. Tampereen yliopisto. Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. Diplomityö. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/130449/LahtiTimo.pdf?sequence=2&isAllowed=y> Hakupäivä 20.9.2022
10. Matkapuhelinverkko. 2022. Wikipedia. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Matkapuhelinverkko>. Hakupäivä 20.9.2022
11. Tukiasema 2022. Wikipedia. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Tukiasema>. Hakupäivä 27.8.2022
12. AirScale Radio Access. 2022. Nokia. Saatavissa: <https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/>. Hakupäivä 20.9.2022
13. Antenni. 2022. Wikipedia. Saatavissa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_\(radio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_(radio)). Hakupäivä 25.8.2022
14. Dipole antenna. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_antenna. Hakupäivä 20.9.2022

15. Duga radar. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ae/DUGA_Radar_Array_near_Chernobyl%2C_Ukraine_2014.jpg/1280px-DUGA_Radar_Array_near_Chernobyl%2C_Ukraine_2014.jpg. Hakupäivä 20.9.2022
16. Qualcomm announces first mmWave 5G antennas for mobile devices. 2018. Techspot. Saatavissa: <https://www.techspot.com/news/75617-qualcomm-announces-first-mmwave-5g-antennas-mobile-devices.html>. Hakupäivä 20.9.2022
17. Ericsson Mobility Report. 2020. Ericsson Saatavissa: <https://www.ericsson.com/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2020/november-2020-ericsson-mobility-report.pdf>. Hakupäivä: 10.10.2022
18. Hämäläinen, Jyri. 2007. Cellular Network Planning and Optimization Part IV: Antennas. Teknillinen korkeakoulu. Saatavissa: http://www.comlab.hut.fi/studies/3275/Cellular_network_planning_and_optimization_part4.pdf. Hakupäivä 25.8.2022
19. Skywave. 2022. Wikipedia. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Skywave>. Hakupäivä. 25.8.2022
20. Elisa, Telia ja DNA saivat odotetusti taajuudet 5G-huutokaupassa. 2018. Inderes. Saatavissa: <https://www.inderes.fi/fi/uutiset/elisa-telia-ja-dna-saivat-odotetusti-taajuudet-5g-huutokaupassa>. Hakupäivä 10.10.2022
21. Multipath Propagation. 2022. Researchgate.net Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-a-multipath-propagation-due-to-environment_fig1_332958767. Hakupäivä 20.9.2022
22. Antenna array calculator. 2022. Saatavissa: <http://antennaarraycalculator.blogspot.com/p/calculator.html>. Hakupäivä 20.9.2022
23. ILS goes live at Gold Coast Airport. 2019. Kuvakaappaus. Saatavissa: <https://www.goldcoastairport.com.au/latest-news/ils-goes-live-at-gold-coast-airport>. Hakupäivä 20.9.2022
24. Antenna array. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_array. Hakupäivä 25.8.2022
25. Traficom. 2018. Radiotaajuudet ja niiden käyttö. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/radiotaajuudet-ja-niiden-kaytto>. Hakupäivä 23.9.2022
26. Quadrature amplitude modulation. 2022. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation. Hakupäivä: 29.9.2022
27. Ruohoniemi, Miikka. 2019. Millimetriaallot 5G-tekniologiassa. Jyväskylän yliopisto. Informaatioteknologian tiedekunta. Tietotekniikan kandidaatintutkielma. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/64032/1/URN:NBN:fi:juu-201905172659.pdf>. Hakupäivä: 13.9.2022

28. Shannon C. E. 1948. A Mathematical Theory of Communication. Harvard. Saatavissa: <https://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf> Hakupäivä: 10.10.2022
29. MT-TECH.FI 2020. Telia on aloittanut Nokian uusimman sukupolven tukiasemien asennukset Saatavissa: <https://mt-tech.fi/telia-on-aloittanut-nokian-uusimman-sukupolven-tukiasemien-asennukset/> Hakupäivä: 20.9.2022
30. Mobiili.fi 2022. 6G-kehitys ottaa ensiaskeliaan: LG esitteli tiedonsiirtoa korkealla terahertsitaajuudella nyt jo 320 metrin välimatkalla. Saatavissa: <https://mobiili.fi/2022/09/14/6g-kehitys-ottaa-ensiaskeliaan-lg-esitteli-tiedonsiirtoa-korkealla-terahertsitaajuudella-nyt-jo-320-metrin-valimatkalla/> Hakupäivä: 4.10.2022