

## 5. Mobiiliverkot ja langaton tiedonsiirto

Henkilökohtainen viestintä tapahtuu nykyisin pääosin kannettavilla tai oikeastaan kädessä pidettävillä laitteilla. Tämä vaatii radiotekniikan käyttöä ainakin päätelaitteen ja verkon välillä. Radiotie aiheuttaa monenlaisia haasteita, kuten radiokaistan rajallisuus, siirtoyhteyden laadun vaihtelut johtuen sekä ympäristön tilasta että muiden käyttäjien liikenteestä, vastaanottotehon hyvin alhainen taso ja muiden mahdollisuus vastaanottaa sama signaali.

Onhan se hämmästyttävää, että ruuhkaisessa kaupungin keskustassa sadat ellei tuhatnet kännykän käyttäjät voivat samanaikaisesti katsella videon pätkiä, selailla nettiä tai olla yhteydessä kavereihin monenlaisten sovellusten avulla. Tämä tilanne oli vielä ennen ensimmäisten digitaalisten verkkojen kehittämistä täysin utopistinen ajatus. Matkaviestintä oli vielä analogiseen aikaan 1990-luvun alussa varsin pientä liiketoimintaa eikä sen kehittämiseen käytetty kovin merkittäviä panostuksia (siis verrattuna moneen muuhun teknologiseen alaan). Mobiiliverkkojen digitalisointi muutti tilanteen täydellisesti: matkapuhelimesta ja matkaviestinpalveluista tuli parhaille toimijoille erittäin kannattavaa liiketoimintaa (kuten materiaalin toisessa luvussa on kuvattu). Suurten kehityspanosten ansiosta mobiili teknologia on kehittynyt huimasti viimeisen 20 vuoden aikana.

Tämän luvun tavoitteena on tarkastella keskeisimpiä teknologisia haasteita ja sitä, miten niitä on vuosikymmenien mittaan ratkaistu. Tämän osion keskeisimmät aiheet ovat:

1. Ilmakehän ominaisuudet siirtotienä
2. Solukoverkkojen toimintaperiaate
3. Solukoverkkojen kapasiteetti
4. Matkapuhelinverkkojen sukupolvet 1G:stä 5G:hen
5. Langattomat lähiverkot (Wi-Fi, WLAN)

Laskennallisina malleina käsitellään sekä yksittäisen radioyhteyden että solukoverkon mitoittamista.

### Johdanto

Sanastokeskuksen<sup>171</sup> määritelmän mukaan matkaviestintä on langatonta viestintää, jossa radioyhteyttä käytetään laajalla maantieteellisellä alueella liikkuvien telepätelaitteiden ja televerkon välillä. Tämä määritelmä vuodelta 2001 on tekninen ja loppuosaltaan jo

---

<sup>171</sup> TEPA – Sanastokeskus TSK:n termipankki, <http://www.tsk.fi/tepa/>

vanhahtava. Langaton viestintä (**wireless communication**) tarkoittaa sitä, että päätelaitteen ja kiinteän verkon välillä tiedonsiirtoon käytetään vapaasti eteneviä sähkömagneettisia aaltoja. Tällöin voidaan käyttää myös termiä mobiili (**mobile**). Kielitoimiston sanakirjan<sup>172</sup> mukaan mobiili on liikkuva, liikuteltava, siirrettävä ja sitä voidaan suomen kielessä käyttää adjektiivina. Sanastokeskus suosittelee sanan mobiili käyttöä yhdyssanojen alkuosana, esimerkiksi mobiililaite mieluummin kuin mobiili laite.

Mobiilisuutta pidetään nykyisin jo niin itsestään selvänä, että sitä ei välttämättä erikseen tarvitse korostaa. Olisi vaikeaa kuvitella älypuhelin, jota ei voisi liikutella. Lisäksi termi puhelin saattaa jäädä vähitellen pois käytöstä, kun päätelaitteita käytetään enimmäkseen muuhun kuin puheluihin – kännykkä on tässä suhteessa parempi termi. Toisaalta puhelin voi jäädä yleisnimeksi viittaamatta erityisesti puheluihin. Uudissanoja syntyy jatkuvasti tekniikan kehittyessä. Taulutietokone tai tabletti (**tablet**) on mobiilikäyttöön tarkoitettu pienikokoinen ja litteä kannettava tietokone, jossa on sormin käytettävä kosketusnäyttö, kun taas taulupuhelin (**phablet**) on älypuhelin, jossa on erityisen suurikokoinen kosketusnäyttö.<sup>173</sup> Laitetyyppien välistä rajaa on usein vaikea määritellä.

Verkkoon mobiiliyhteydellä liitettyjen päätelaitteiden määrä kasvaa räjähdysmäisesti. Verkossa voivat jo nyt olla kellosi ja autosi ja kohta myös anturit, jotka tarkkailevat veresi ominaisuuksia ja liikkuvia viruksia. Anturi voi ilmoittaa sykemittarille, että nyt kannattaisi hiljentää vauhtia, koska veressä on havaittu virus, samalla kun hoito-ohjeet tulevat näytölle ja auton navigaattori saa tiedon lähimmästä terveysasemasta siltä varalta, että tauti paheenee. Paljon mielenkiintoista on tapahtumassa, mutta kehitystyötä varten tarvitaan asiantuntijoita, jotka hallitsevat sekä sähkömagnetismin hienoudet että järjestelmätason suunnittelun ja rakentamisen periaatteet.

Tietoliikennetekniikka on täynnä lyhenteitä<sup>174</sup>, mobiiliverkot on tästä ehkä paras (tai pahin) esimerkki. Eräässä mobiiliverkkojen tekniikkaa käsittelevässä kirjassa<sup>175</sup> lyhenneluttelo sisältää 492 lyhennettä. Yhdellä sivulla on käytetty 21 eri lyhennettä yhteensä 56 kertaa. Jotkut lyhenteet ovat varmasti niin tarpeellisia, että asiantuntijan on syytä tietää mitä ne käytännössä merkitsevät. Muistaako sitten täsmälleen mistä sanoista lyhenne on muodostettu, on jossain määrin sivuasia. Ammatillisen pätevyyden osoittamiseen lyhenteet ovat kuitenkin usein hyödyllisiä; ainakin täydellinen osaamattomuus on epäilyttävää. Joka tapauksessa kannattaa varoa ylenmääräistä lyhenteiden käyttöä varsinkin tilanteissa, jossa kuulijat tai lukijat eivät ole alan insinöörejä.

---

<sup>172</sup> <http://www.kielitoimistonsanakirja.fi>

<sup>173</sup> Taulupuhelin näyttää jäävän esimerkiksi uudissanasta, joka ei koskaan vakiinnu yleiseen käyttöön.

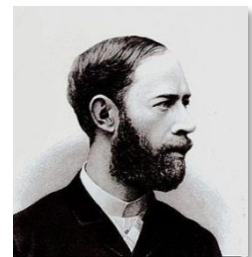
<sup>174</sup> Suositellen luettavaksi: *IANA Considerations for Three Letter Acronyms*, <https://tools.ietf.org/html/rfc5513>.

<sup>175</sup> Sauter, M. (2010). *From GSM to LTE: An introduction to mobile networks and mobile broadband*.

Teknisillä lyhenteillä on samantapainen tarkoitus kuin kasvien ja eläinten latinankielisillä nimillä. Lyhenteiden avulla voidaan viitata johonkin asiaan, joka on suhteellisen yksiselitteisesti määritelty. Jos käyttää lyhennettä GPRS, viittaa väistämättä kyseisen lyhenteen mukaiseen standardoituun verkkopalveluun. Sen sijaan jos asian ilmaisee sanoilla ”[general packet radio service](#)” lukija ei voi olla varma viitataan ko nimenomaan GPRS:ään vai yleisesti pakettipohjaisiin radioteitse toteutettavaan palveluun.<sup>176</sup>

## Historiaa

James Clerk Maxwell kehitti vuonna 1862 Maxwellin yhtälöt, jotka kuvaavat sähkö- ja magneettikenttien käyttäytymistä ja niiden vuorovaikutusta. Myöhemmin erinomaisen päteväksi osoittautunut teoria ei saanut alkuvaiheessa mitenkään yksimielistä hyväksyntää. Vasta kun Heinrich Hertz (oheisessa kuvassa) vuonna 1887 osoitti kokeellisesti, että radioaaltoja voidaan lähettää ja vastaanottaa ja että radioaallot etenevät valon nopeudella, teoria sai vahvistusta. Hertz ei ymmärtänyt kokeidensa tärkeyttä, vaan viitaten sähkön ominaisuuksia ratkaisevasti valottaneisiin kokeisiinsa hän totesi:<sup>177</sup>



"It's of no use whatsoever[...] this is just an experiment that proves Maestro Maxwell was right—we just have these mysterious electromagnetic waves that we cannot see with the naked eye. But they are there." Asked about the ramifications of his discoveries, Hertz replied, "Nothing, I guess."

Nyt tietysti tiedämme, että seuraamukset ovat olleet kauaskantoiset. Ilman sähkömagneettisten aaltojen teknistä hallintaa meillä ei olisi juuri mitään mitä nykyisin kutsumme informaatioteknologiaksi. Toisaalta on hyvä huomata, että puhelin oli toiminnassa ja kaupallisessa käytössä jo ennen Hertzin kokeita, vaikka ymmärrys sähköstä oli rajallista. Sen sijaan monimutkaisia radioteknisiä laitteita tuskin olisi pystytty kehittämään ilman riittävä teoreettista ja kokeellista pohjaa.

Käytännön radiotekniikan isänä pidetään usein italialaista sähköinsinööriä Guglielmo Marconia. Marconi oli insinöörityönsä lisäksi erinomainen suhdetoiminta- ja liikemies, joka avitti huomattavasti historiankirjoihin jäämistä. Marconi oli tekninen lahjakkuus, joka jo 20-vuotiaana teki kokeita langattomalla lennättimellä. Kuuluisaksi Marconi tuli kokeistaan, joissa hän pyrki välittämään sähkötystä Atlantin ylitse. Vuoden 1901 kokeiden tulokset

<sup>176</sup> Englannin kielellä usein tällaiset termit kirjoitetaan isoilla alkukirjaimilla. Käytäntö kuitenkin vaihtelee: CRC kirjoitetaan yleensä pienillä alkukirjaimilla, [cyclic redundancy check](#), sen sijaan LTE lähes aina isoilla alkukirjaimilla, [Long Term Evolution](#) ilmeisesti koska ”[long term evolution](#)” voisi viitata mihin tahansa aiheeseen.

<sup>177</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Hertz](http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz); [ramification](#) = seurannaisvaikutus.

jäivät epäselviksi, vaikka Marconi väittikin pystyneensä vastaanottamaan meren yli kulkeeneen radiosignaalin. Nyt kuitenkin tiedetään (mutta Marconi ei tiennyt) että tällainen pitkä matalataajuinen radioyhteys toimii yöllä huomattavasti paremmin kuin päivällä. Niinpä pidetäänkin melko epätodennäköisenä, että päiväsaikaan tehdyt kokeet olisivat voineet oikeasti toimia. Sen sijaan joulukuussa 1902 tehdyissä uusissa kokeissa radiosignaali saatiin varmistetusti siirrettyä Atlantin yli. Säännöllinen kaupallinen sähkötyspalvelu Atlantin yli alkoi vuonna 1907, joskin yhteyksien luotettavuudessa oli useiden vuosien ajan ongelmia. Erityisen merkittävää langaton tiedonsiirto oli laivojen kannalta. Kaupallinen radioliikenne laivoihin alkoi jo vuonna 1904.

Sähkötyksen jälkeen seuraava radiotekninen merkkipaalu oli yleisradiotoiminnan alkaminen. Tekniikan kehittyessä pystyttiin radioteitse välittämään myös ääntä. Olennainen tekijä oli tyhjiöputken kehitys: Sir John Ambrose Fleming kehitti vuonna 1904 tyhjiöputkeen perustuvan diodin. Eräs tyhjiöputken kehittäjistä oli suomalainen Eric Tigerstedt, jonka vuonna 1914 kehittämä triodi oli keskeinen osa elektronisia laitteita transistorin keksimiseen saakka.

Ensimmäisenä kaupallisena radioasemana pidetään Hollannin Haagissa marraskuussa 1919 aloittanutta asemaa. Seuraavan vuoden aikana radioasemia perustettiin ympäri maailmaa. Suomessa ensimmäiset radiolähetykset alkoivat 1923. Julkinen yleisradiotoiminta alkoi vuonna 1926, jolloin perustettiin valtion omistama O.Y. Suomen Yleisradio – A.B. Finlands Rundradio. Samoin kuin telepalvelut, yleisradiotoiminta oli pitkään useimmissa maissa valtion monopoli. Tärkein poikkeus oli Yhdysvallat, jossa radiolähetykset ovat perustuneet kaupalliseen (tosin tiukasti säädeltyyn) kilpailuun alusta saakka.<sup>178</sup> Yleisradiolla oli monopoli yleisradiotoimintaan vuoteen 1985 saakka, jolloin osa radiotaajuuksista jaettiin kaupallisille radioasemille.

Ensimmäisenä televisioesityksenä pidetään tilaisuutta, jossa John Baird demonstroi liikuvaa kuvaa Lontoossa tammikuussa 1926. Laite oli kuitenkin osittain mekaaninen ja kuvan laatu hyvin huono. Televisiotekniikkaa kehitettiin ympäri maailmaa, esimerkiksi Wikipedian artikkeli<sup>179</sup> mainitsee yhdysvaltalaisen keksijöiden lisäksi mm. venäläisen, saksalaisen, britin, japanilaisen, unkarilaisen ja meksikolaisen, jotka kaikki vaikuttivat television kehitykseen. Teknologia vakiintui vasta 1940-luvulla, kun USA:ssa päädyttiin 525 juovan järjestelmään ja Euroopassa 625 juovan järjestelmään (perustuen venäläisten kehittämään standardiin).

---

<sup>178</sup> T. Hazlettin kirja, *The Political Spectrum* (2017), osoittaa miten perusteellisesti politiikka on sotkeutunut TV- ja radiotoimintaan markkinatalousmaissa tekniikan alkuajoista lähtien.

<sup>179</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Television>

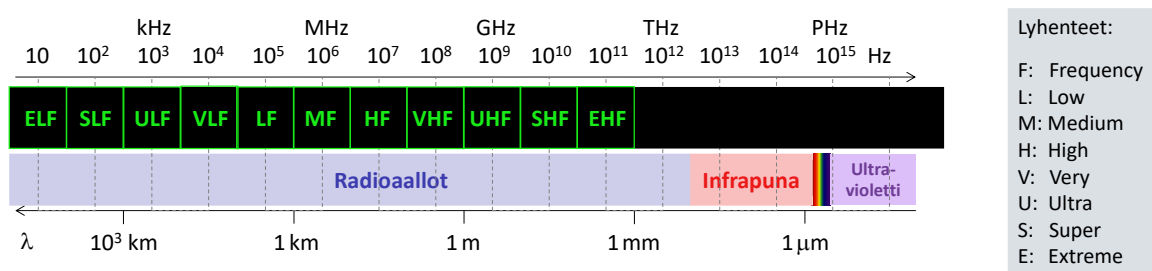
Säännölliset televisiolähetykset alkoivat Suomessa vuonna 1957, ei kuitenkaan Yleisradion lähetyksinä vaan Tekniikan Edistämissäätiön tukemana nimellä TES-TV. Yleisradio aloitti lähetyksensä seuraavan vuoden alussa. Tesvisio ja Tamvisio säilyivät itsenäisinä televisiokanavina vuoteen 1965 saakka, jolloin Yleisradio osti ne ja perusti toisen televisiokanavan. MTV toimi mainosrahoitteisena Yleisradion vuokralaisena vuoteen 1993 saakka, jolloin se siirtyi kokonaan omalle kanavalle. Television perusteknologia analogisine signaaleineen ja kuvaputkineen säilyi periaatteessa muuttumattomana 2000-luvun puolelle saakka. Digitaalisiin televisiolähetysiin siirryttiin Suomessa syyskuussa 2007. Nyt käynnissä on seuraava merkittävä muutos, eli televisio-ohjelmia ei enää katsota silloin kuin televisioyhtiöt päättävät, vaan jokainen voi katsoa melkein mitä haluaa juuri milloin ja missä haluaa Internetin kautta.

## Ilmakehä siirtotienä

Vaikka melko harva tietoliikennealan insinööri joutuu suoranaisesti tekemisiin radioteknisten ilmiöiden kanssa, eräät perusasiat on syytä kaikkien tuntea, kuten minkälaisia radioaaltoja ilmassa ja muissa väliaineissa jatkuvasti etenee eri suuntiin ja miten niitä voidaan hyödyntää eri tarkoituksiin.

### Radiotaajuudet

Kansainvälisen sopimuksen perusteella radiotaajuudet on jaettu alueisiin kuvan 5.1 mukaisesti. Käytännössä radiotaajuuksien katsotaan alkavan kolmesta kilohertsistä ja ulottuvan noin kolmeen terahertsiin. Tämän rajan yläpuolella alkaa infrapuna-alue. Kolmen kilohertsin rajan alapuolellakin on radioaaltoja, mutta niiden hyödyntäminen on käytännössä hankalaa. Sähköverkot säteilevät voimakkaasti taajuudella 50 (tai 60) hertsiä.

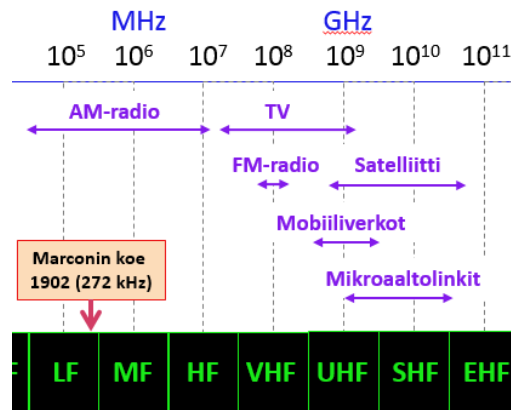


**Kuva 5.1.** Sähkömagneettisen säteilyn taajuusalueet ja aallonpituudet vapaassa tilassa.

Radiotaajuudet on jaettu erilaisten käyttäjäryhmien kesken. Suomessa niiden käyttöä valvoo Viestintävirasto.<sup>180</sup> Radiotaajuuksien jaossa noudatetaan muutamaa perussääntöä.

<sup>180</sup> Viestintäviraston taajuusjakotaulukko määrittelee taajuuksien sallitut käytöt välille 8,3 kHz – 275 GHz.  
[https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko\\_S\\_9.12.2016.pdf](https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko_S_9.12.2016.pdf)

Paljon informaatiota sisältävä lähetys tarvitsee laajan kaistan ja se kannattaa siirtää mahdollisimman korkealle taajuusalueelle. Vastaanotin on helpompi rakentaa laajakaistaiseksi, jos vastaanotettava kaistanleveys on pieni kantaallon taajuuteen verrattuna: 100 kHz:n levyistä lähetettä on helpompi vastaanottaa 100 MHz:n taajuusalueella kuin 1 MHz:n taajuusalueella.



**Kuva 5.2.** Taajuusalueiden käyttö tiedon siirtoon.

Käytetty taajuusalue vaikuttaa myös signaalin etenemiseen. FM-radiolähetyksessä käytettävät aallot (taajuus on noin 100 MHz, eli se sijaitsee siis VHF-alueella) vaativat lähes näköyhteyden, minkä vuoksi nykyisin käytettävillä 100-300 metrin korkuisilla mastoilla päästään noin 70 kilometrin yhteysetäisyyksiin. Matkapuhelimien käyttämät taajuudet ovat tyypillisesti 900, 1800 ja 2500 MHz. Näillä taajuuksilla luotettavien viestiyhteyksien takaamiseksi tukiasemia täytyy olla muutaman kilometrin välein. Paikannukseen käytetty GPS käyttää lähinnä 1575 MHz taajuutta.

Radiokaistoja on kolmen tyyppisiä:

- Radiotähtitieteen käyttöön varatut kaistat, joilla ei sallita lähetystoimintaa.
- Kaistat, jotka ovat vapaasti käytettävissä eräin rajoituksin, jotka koskevat erityisesti lähetystehoa. Näihin kuuluvat mm. ISM-taajuusalueet<sup>181</sup> ja jossain määrin tarkemmin säädellyt radioamatööri-kaistat. Esimerkiksi lähiverkoissa käytetty IEEE:n 802.11 käyttää ISM-kaistaa.<sup>182</sup>
- Luvanvaraiset kaistat, joiden käyttöä hallinnoivat kansalliset viranomaiset (esim. Suomessa Viestintävirasto<sup>183</sup> ja USA:ssa FCC<sup>184</sup>). Tietoliikenteen tapauksessa

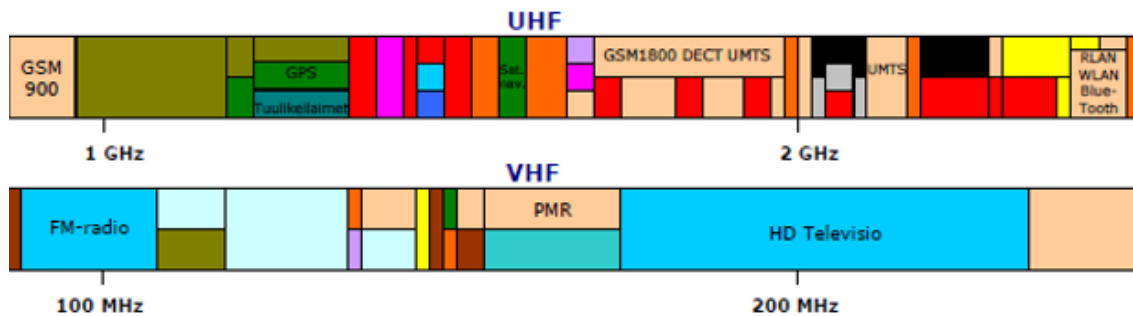
<sup>181</sup> ISM = Industrial, Scientific, and Medicine. Taajuusalueita on matalista (6,8 MHz) hyvin korkeisiin (244 GHz).

<sup>182</sup> Taajuusalueet 2,45 GHz ja 5,8 GHz.

<sup>183</sup> Viestintävirasto valvoo viestintämarkkinoiden ja palveluiden tilaa, <https://www.viestintavirasto.fi/>

<sup>184</sup> FCC = Federal Communications Commission, Yhdysvaltain telehallintovirasto, perustettu vuonna 1934.

käytettävissä olevat taajuuskaistat jaetaan verkko-operaattorien kesken. Kaistojen jaon periaatteista sovitaan alueellisesti tai jopa globaalisti.



**Kuva 5.3.** Radiotaajuuksien käyttö Suomessa muutamalla keskeisellä taajuusalueella.<sup>185</sup>

Radioteknisestä näkökulmasta merkittävin ero luvanvaraisen ja vapaan kaistan välillä on se, että luvanvarainen kaista on lähes vapaa ulkoisista häiriöistä. Kun kaista on yhden toimijan hallinnassa, toimija voi jakaa taajuuskaistan hallitusti eri käyttäjien ja tarpeiden välillä. Tämä mahdollistaa taatun palvelun laadun (QoS, *Quality of Service*) esimerkiksi puheluille samalla kun datayhteyksien nopeudet voivat vaihdella verkon kuormituksen mukaan. Lisäksi keskitetyllä resurssien hallinnalla voidaan periaatteessa tehostaa kaistan käyttöä verrattuna hajautettuun hallintaan (vertaa Ethernetin toimintaperiaate, luku 4).

Luvanvaraisella kaistalla lähetystehot voivat olla suuria, joka mahdollistaa suuren peittoalueen. Toisaalta suuret lähetystehot aiheuttavat enemmän häiriöitä viereisille taajuuskaistoille, jos signaalin suodatusta ei tehdä riittävän hyvin. Sen sijaan vapaalla kaistalla muiden käyttäjien signaalit voivat vaikuttaa olennaisesti taajuuskaistan käyttökelpoisuuteen. Tästä johtuen vapailla kaistoilla lähetystehoja rajoitetaan, mikä väistämättä pienentää solujen kokoa. Vapaa kaistan käyttö merkitsee myös sitä, että mitään laatutakuuta ei voida antaa. Saavutettava tiedonsiirtonopeus voi kuitenkin paikallisesti olla hyvin suuri.

### *Radioaallot ilmakehässä*

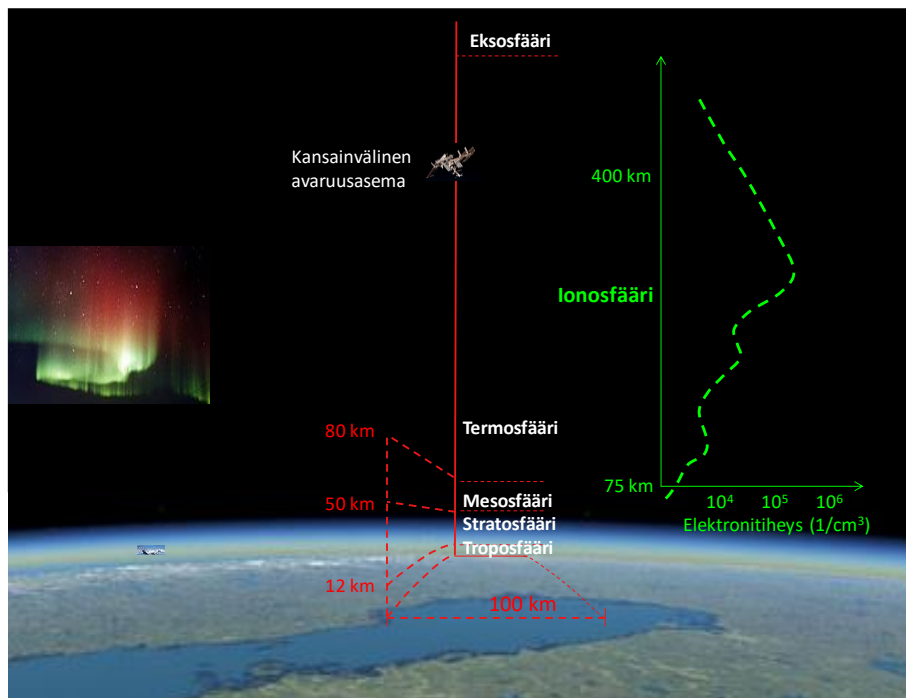
Kuvassa 5.4 on esitetty ilmakehän rakenne pääpiirteissään. Ilmakehän alin kerros, troposfääri, ulottuu noin kymmenen kilometrin korkeuteen. Troposfääri sisältää suurimman osa ilmakehän massasta ja lähes kaikki sääilmiöt tapahtuvat troposfäärissä. Stratosfääri ulottuu 50 kilometriin. Mesosfäärissä vallitsee jo lähes täydellinen tyhjiö. Ionosfääri on rinnakkainen termi ilmatieteellisille kerroksille (troposfääri, stratosfääri, jne.) kuvaten sähköisiä ominaisuuksia. Ionosfääri ulottuu suunnilleen 75 kilometristä jopa 1000 kilometriin. Ionosfääri sisältää auringon säteilyn ionisoimia atomeja, jotka heijastavat radioaaltoja.

<sup>185</sup> Kuva: [https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Radiotaajuuksien\\_kaytto.pdf](https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Radiotaajuuksien_kaytto.pdf). Lyhenteet: PMR = Public Mobile Radio, erillisradioverkko, DECT = Digital Enhanced Cordless Telecommunications, johdoton puhelinjärjestelmä, RLAN = Radio LAN. Värikoodeja: punainen = kiinteä liikenne, keltainen = radioamatööriliikenne, oranssi, harmaa ja musta = satelliitteihin liittyvä liikenne.



Matalalla lentävät satelliitit liikkuvat ionosfäärissä. Esimerkiksi kansainvälisen avaruusaseman etäisyys maan pinnasta on noin 360 km. GPS-satelliitit sijaitsevat noin 20 000 km korkeudessa. Tietoliikenteen ja television kannalta tärkein on geostationäärinen rata, joka sijaitsee 35 786 kilometrin korkeudella suoraan päiväntasaajan yläpuolella. Maasta katsottuna geostationäärisellä radalla sijaitseva satelliitti näyttää pysyvän paikallaan, koska satelliitti kiertää maata samalla kiertonopeudella kuin maa pyörii akselinsa ympäri. Puheyhteyteen satelliitin etäisyys aiheuttaa havaittavan viiveen, sillä edestakainen matka satelliittiin ja takaisin maan pinnalle vie noin 0,25 sekuntia.

Eritajuiset radioaallot käyttäytyvät ilmakehässä eri tavoin. Radioaallot suunnilleen 10 MHz:n alapuolella heijastuvat ilmakehästä takaisin maanpinnalle, jos säteilyn kulma maan pintaan nähden on riittävän pieni. Lisäksi ilmakehän epähomogeenisuudet aiheuttavat sirontaa (*scattering*). Sironta vaimentaa aina signaalia, mutta toisaalta sen avulla voidaan päästä radiohorisontin taakse. Sirontaa tapahtuu sekä troposfäärissä että ionosfäärissä. Koska jälkimmäisessä tapauksessa sironta syntyy huomattavasti korkeammalla, ionosfäärisironnalla saadaan pidempiä yhteyksiä kuin troposfäärisironnalla. Käytännössä troposfäärisironnalla päästään noin 500 kilometrin ja ionosfäärisironnalla noin 2000 kilometrin yhteyksiin.



Kuva 5.4. Maan ilmakehän rakenne.<sup>186</sup>

<sup>186</sup> Kuvan asteikon mittakaavassa geostationäärinen rata olisi noin 16 sivun verran ylöspäin.



Troposfäärisirontaa tapahtuu pääasiassa 0,3 - 10 GHz taajuusalueella. Ionosfäärissä sirontaa aiheuttavat ionosfäärin epätasaisuudet ja ilmakehään syöksyvien meteorien synnyttämät ionivanat. Käyttökelpoiset taajuudet osuvat välille 30 - 60 MHz. Alle 30 MHz:n taajuiset aallot voivat ilmakehän olosuhteista (eli radiokelistä) riippuen heijastua ionosfääristä. Heijastuksen hyvyteen vaikuttaa ionosfäärin tila, joka riippuu auringon aktiivisuudesta, vuorokauden- ja vuodenajasta ja maantieteellisestä sijainnista. Yöllä ionosfäärin alimmat kerrokset häviävät ja radioaallot pääsevät esteettä heijastumaan ionosfäärin ylimmistä kerroksista, joissa ionisaatio on voimakkainta. Tästä syystä esimerkiksi kaukaisten radioasemien kuuluvuus on parhaimmillaan yöaikaan.

Suurtaajuisilla radioaalloilla (> 10 GHz) ilmakehän absorptio ja sironta vaimentavat signaalia merkittävästi. Niin sanottu kirkkaan ilmakehän vaimennus aiheutuu hapen ja vesihöyryn molekyylien resonanssitaajuuksista. Hapella nämä taajuudet ovat 60 ja 119 GHz ja vesihöyryllä 22, 183 ja 325 GHz. Radioaalto vaimenee, sillä sen energia hupenee molekyylien virittämiseen. Sade ja sumu aiheuttavat pääasiassa sirontaa. Radioaallot polarisoivat sadepisaran molekyyliä, jolloin pisara käyttäytyy kuin pieni dipoliantenni ja säteilee kaikkiin suuntiin. Voimakas sade estää pitkät yhteydet yli 10 GHz:n taajuuksilla.

Maan pinnalla suoraa näköyhteysreitillä pitkin eteneminen on tärkein mekanismi yli 400 MHz:n taajuuksilla. Näköyhteysreitillä vastaanottavan aseman täytyy olla radiohorisontin yläpuolella. Aallon kaartumisen takia radiohorisontti on kauempana kuin geometrinen horisontti, eli näköyhteysreitti voi nimestään huolimatta ulottua suoraa näköyhteyttä kauemmas. Jos vastaanottaja on maanpinnalla, 320 metrin korkeudella oleva lähetys ulottuu noin 65 kilometrin päähän.<sup>187</sup> Näköyhteys on muita etenemistapoja luotettavampi ja ennustettavampi. Esimerkiksi satelliittilinkkiyhteydet ja matkapuhelinverkot (lukuun ottamatta alhaisimpia taajuusalueita) toimivat näköyhteydellä.

## Matkaviestinverkon perusominaisuudet

Matkaviestimien perusajatuksena on päästä eroon päätelaitteen sidonnaisuudesta yhteen fyysiseen paikkaan. Tämä tapahtuu radioyhteyden avulla eli päätelaitteena on radiopuhelin. Lisäksi verkossa tarvitaan tukiasemia, joihin päätelaitteet ovat yhteydessä. Tukiasemista eteenpäin puhelujen ja muun informaation välittäminen tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin kiinteässä verkossa niin kauan, kun päätelaite ei siirry tukiaseman alueelta toiselle. Solukoverkko (*cellular network*) koostuu siten soluista, joissa radiotien tiedonsiirtokapasiteetti jaetaan solun alueella sijaitsevien käyttäjien kesken. Solukoverkkoa kuvaavia ominaisuuksia ovat:

---

<sup>187</sup> Espoon radiomaston korkeus on 326 m.

- kaksisuuntainen tiedonsiirto verkon ja käyttäjän välillä,
- laaja maantieteellinen peittoalue,
- jatkuva mahdollisuus tiedonsiirtopalveluihin ja
- sujuva palvelu myös silloin kun käyttäjä siirtyy solusta toiseen.

Solukoverkot ovat siten luonteeltaan laajan alueen verkkoja (*Wide Area Network*, WAN), kun taas paikallisverkot (*Local Area Network*, LAN) tarjoavat yhteyksiä rajallisella alueella. Termi solukoverkko on luonteeltaan tekninen, matkaviestinverkko viittaa enemmän käyttäjän näkökulmaan – mobiiliverkko on ehkä jotain näiden väliltä. Matkaviestinverkon täytyy siten toisaalta olla hajautettuna ympäri koko sitä aluetta, jolla palvelua halutaan tarjota (tai toimiluvan ehtojen vuoksi vaaditaan tarjotavaksi) ja toisaalta siinä tarvitaan keskitetty osa, joka hoitaa käyttäjien tietojen hallinnan. Tukiasemia (kuvassa 5.5.) voidaan tarvita tuhansittain<sup>188</sup>, kun taas keskitetyn järjestelmän tulee pystyä hallitsemaan jopa kymmeniä miljoonia yhtäaikaista käyttäjiä.



**Kuva 5.5.** Tukiaseman antennit.<sup>189</sup>

### *Solukoverkkojen toiminta*

Solukoverkossa yhtä tukiasemaa voi samanaikaisesti käyttää useita päätelaitteita ja toisaalta yksi päätelaite saattaa sijaita useamman tukiaseman peittoalueen sisällä. Resurssin jako-ongelma voidaan siten jakaa kahteen osaan:

1. Yhden tukiaseman ongelma: Miten tukiaseman tarjoama kapasiteetti jaetaan mahdollisimman tehokkaasti useamman päätelaitteen välillä?
2. Useamman tukiaseman ongelma: Miten taajuuskaista jaetaan siten, että käyttäjien kokonaismäärä ja käyttäjien saama tiedonsiirtonopeus maksimoituu?

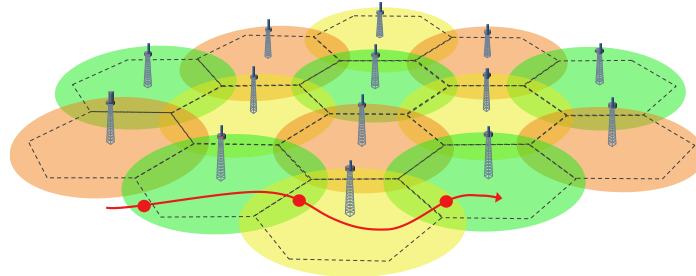
Ensimmäinen kysymys ratkaistaan käyttämällä erilaisia pääsynhallintamenetelmiä, joko eri taajuuksilla, eri aikoina tai eri koodeilla, tai näiden yhdistelmillä. Toisen kysymyksen ratkaisu perustuu siis solukoverkkoon, jossa tukiasemat toimintaympäristöineen muodostavat solukkoa muistuttavan rakenteen. Solu (*cell*) on samaa maantieteellistä aluetta palvelevan, tiettyyn tukiasemaan kuuluvan lähetin-vastaanotin-parin peittoalue.<sup>190</sup>

<sup>188</sup> Suomessa on yli 10000 tukiasemapaikkaa, Lausunto 24.4.2012, Tietoliikenteen ja tietotekniikan keskusliitto.

<sup>189</sup> Kuva: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/GSM\\_base\\_station\\_4.JPG/180px-GSM\\_base\\_station\\_4.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/GSM_base_station_4.JPG/180px-GSM_base_station_4.JPG)

<sup>190</sup> Sanastokeskuksen termipankki, <http://www.tsk.fi/tepa/fi/>

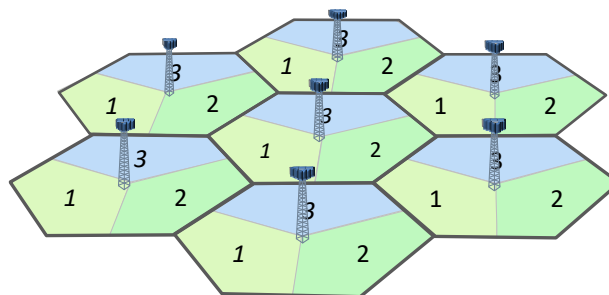
Solukverkon periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 5.6. Kuvassa on esitetty verkko, jossa käytetään kolmea eri taajuusaluetta (merkitty eri värein). Usein käytetään myös suurempaa määrää taajuusalueita (esimerkiksi 7), jolloin eri tukiasemien toisilleen aiheuttamat häiriöt pienentyvät.



**Kuva 5.6.** Solukverkon rakenne. Solut menevät osittain päällekkäin, joten vierekkäiset tukiasemat eivät voi käyttää samoja taajuuksia. Värit kuvaavat eri taajuuskaistoja, kun tukiasemat ovat ympärisäteileviä.

Kuten kuvassa 5.7 esitetään, taajuuksien käyttöä voidaan tehostaa suuntaavilla antenneilla. Kuvassa on esitetty tilanne, jossa kukin tukiasema lähettää kolmeen eri suuntaan eri taajuuskaistoilla siten että missä tahansa solujen raja-alueella viereisissä verkoissa käytetään aina eri taajuuskaistoja. Vaikka edelleenkin kukin taajuuskaista peittää vain yhden kolmasosan koko alueesta (vertaa kuvaan 5.6), niin tukiasemien lukumäärä voi joko olla pienempi (kun kokonaiskapasiteetti pidetään vakiona) tai verkon kokonaiskapasiteetti voi olla suurempi (kun tukiasemien lukumäärä pidetään vakiona). Tukiasemat ovat yhteydessä matkapuhelinkeskukseen, joita voi suuressa verkossa olla useita.

Kun puhelin siirtyy puhelun kestäessä tukiaseman kuuluvuusalueen ulkopuolelle, sen on kyettävä vaihtamaan toisen tukiaseman käyttämälle kanavalle tai puhelu katkeaa. Tätä siirtymistä solusta toiseen kutsutaan solunvaihdoksi tai yhteysvastuun vaihdoksi (**handover**). Matkapuhelimia, jotka suoriutuvat tällaisesta puhelua katkaisemattomasta solunvaihdosta, voidaan kutsua solukkopuhelimiksi (**cellular phone**)<sup>191</sup>.

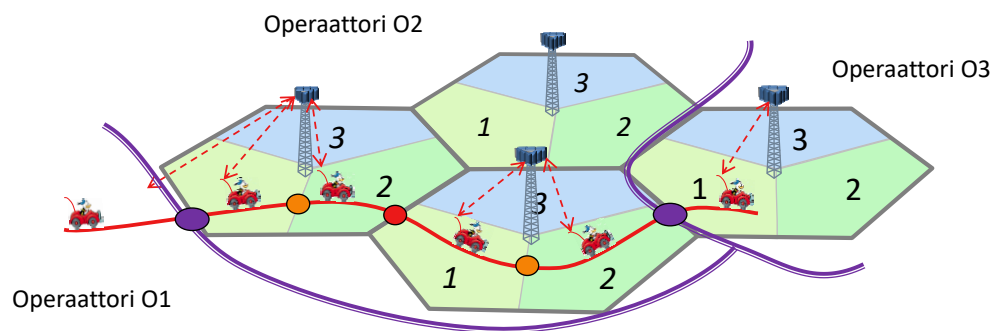


**Kuva 5.7.** Solukverkko jossa kukin tukiasema lähettää kolmeen eri suuntaan kolmella eri taajuuskaistalla siten että viereiset solut voivat käyttää samoja taajuuskaistoja.

<sup>191</sup> Solukkopuhelin ei terminä ole yleisessä käytössä toisin kuin englanninkielinen vastine **cellular phone**.

Solunvaihto tapahtuu matkapuhelinkeskuksen ohjauksessa (kuva 5.8). Kun puhelimen ja tukiaseman välinen signaali alkaa heiketä, keskus selvittää, kuuleeko jokin toinen tukiasema puhelimen paremmin. Kun paremmin kuuleva tukiasema löytyy, keskus käynnistää uudella tukiasemalla vapaan liikennekanavan ja kääntää puhelinta vaihtamaan uudelle kanavalle. Puhelu (tai datayhteys) jatkuu tämän jälkeen uudessa solussa.

Kuvassa 5.8 on esitetty kolme eri vaihtoa. Ensiksikin käyttäjä voi siirtyä kokonaan uuden verkko-operaattorin alueelle. Puhelu tai muu tiedonsiirto ei tällöin yleensä jatku katkoksetta, varsinkaan jos siirrytään maksullisesta palvelusta toiseen.<sup>192</sup> Toiseksi siirryttäessä solun alueelta toiselle tarvitaan tukiasemien välistä koordinoitua, jotta siirto sujuisi ilman havaittavaa katkosta palvelussa. Kolmanneksi päätelaite voi siirtyä yhden tukiaseman sisällä yhden suunta-antennin alueelta toiselle. Kaikissa näissä tapauksissa on mahdollista, että uudella alueella ei ole riittävästi vapaata kapasiteettia esimerkiksi puhelun jatkamiseen. Katkoksen todennäköisyys pyritään pitämään pienenä tehokkaan liikenteen hallinnan avulla.



**Kuva 5.8.** Tukiaseman vaihto: operaattorin vaihto (violetti), tukiaseman vaihto (punainen) ja suunta-antennin vaihto (oranssi).

Jotta puhelut voidaan välittää oikealle puhelinkeskukselle ja siitä eteenpäin oikealle tukiasemalle, verkko pitää kirjata siitä, missä päätelaitteet sijaitsevat. Tätä kutsutaan sijainnin seurannaksi. Matkaviestinverkossa jokaisella puhelimella on niin sanottu kotikeskus, johon välitetään tieto siitä, minkä tukiaseman alueella puhelin kulloinkin on. Puhelua muodostettaessa puhelu kulkee kotikeskuksen kautta, josta yhteys jatkuu oikealle tukiasemalle.

<sup>192</sup> Katkokseton tiedonsiirtokin on mahdollista päätelaitteen ohjaamana, jos päätelaite pystyy pitämään samanaikaisesti yhteyttä kahden tai useamman operaattorin verkkoon. Tämä koskee lähinnä datasiirtoa, joka ei vaadi taattua kaistaa.

Tekniset edellytykset matkapuhelinten yleistymiselle ovat olleet vasta muutaman vuosikymmenen ajan. Radiotietä käyttävässä puhelimessa tarvittava tekniikka on huomattavasti vaativampaa kuin lankapuhelimessa. Nykyisiä matkapuhelinverkon keskuksia olisi ollut mahdotonta toteuttaa esimerkiksi 1970-luvulla (tai edes 1980-luvulla) käytössä olleella tekniikalla. Mikropiiriteknologian kehittyminen on mahdollistanut pienet ja edulliset laitteet. Ensimmäiset NMT-verkon puhelimet 1980-luvun alkupuolella soveltuivat painonsa ja tehontarpeensa vuoksi lähinnä autopuhelimeksi, kuten kuvan 5.9 Nokia Mobira Talkman, joka painoi akkuineen kunnioitettavat 5,5 kg.<sup>193</sup>



**Kuva 5.9.** Nokia Mobira Talkman vuodelta 1985.

Erilaiset turvallisuuskysymykset ovat hyvin oleellisia matkapuhelinten yhteydessä. Näitä ovat mm. mahdollisuus salakuunnella puhelua, puhelinten väärinkäyttö ja sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamat terveysriskit. Palveluntarjoajan kannalta ensisijainen ongelma on luvattoman käyttäjän tekeytyminen maksavaksi tilaajaksi.

Terveysriskistä on varmuudella vaikea sanoa kuin, että riski ei ole suuri mutta vaikka pienehkön terveysriskin mahdollisuutta ei voida täysin sulkea poiskaan.<sup>194</sup> Erittymisen ongelmallisia ovat kännykät, joissa antenni on hankalassa paikassa eli aivan pään vieressä. Käsi- puhelimissa antennitehot ovat korkeintaan pari wattia ja yleensä selvästi alle yhden watin. Tällaiset tehot eivät riitä juurikaan lämmittämään kudoksia ellei vaikutus kohdistu paikallisesti hyvin pienelle alueelle.<sup>195</sup> Tietoliikenteessä käytettävät taajuudet ovat sen verran alhaisia, ettei säteily aiheuta ionisaatiota (toisin kuin röntgensäteily). Mahdolliset säteilyn terveydelle haitalliset ilmiöt perustuvat siten paikalliseen lämpövaikutukseen. Näitä vaikutuksia rajoittamaan on säädetty asetus, joka määrittelee, että paikallinen ominaisabsorptiokerto ei saa kehossa ylittää arvoa 2 W/kg.<sup>196</sup> Suurimpana riskinä pidetään hyvin paikallista lämpötilan nousua esimerkiksi aivoissa tai silmän linssissä.

Kännykästä sen käyttäjään kohdistuva säteilyteho on huomattavasti suurempi kuin tukiasemasta käyttäjään kohdistuva säteilyteho. Siten terveyden kannalta tukiaseman kannattaa olla mahdollisimman lähellä, jotta kännykän ei tarvitsisi käyttää suurta lähetystehoä.

<sup>193</sup> Tiedot ja kuva <http://nokiamuseum.com/view.php?model=Mobira%20Talkman>

<sup>194</sup> Koska käyttäjiä on ollut satoja miljoonia jo parin vuosikymmenen ajan, merkittävät riskit näkyisivät jo sairastuvuus- tilastoissa [http://www.stuk.fi/julkaisut/katsaukset/pdf/katsaus\\_matkapuhelimet\\_ja\\_tukiasemat.pdf](http://www.stuk.fi/julkaisut/katsaukset/pdf/katsaus_matkapuhelimet_ja_tukiasemat.pdf) tai uudempi rottatutkimus <https://boingboing.net/2018/02/05/rats-exposed-to-cell-phone-rad.html>

<sup>195</sup> Esimerkiksi GSM-puhelimen keskimääräinen säteilyteho on 0,25W.

<sup>196</sup> Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta, 294/2002, liite 5, <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2002/20020294>. Jos yhtä litraa vettä lämmitetään kahden watin teholla, niin vesi lämpenee yhden asteen noin 35 minuutissa. Suoran auringonpaisteen teho kesällä makuuasennossa on noin 4 W/kg laskettuna keskimäärin koko keholla, joten teho on paljon suurempi ihon pintakerroksella.

Siksi olisi loogista, jos käyttäjät haluaisivat verkon tukiasemat lähelle kotejaan ja työpaikkojaan, eikä kauas, niin kuin nyt usein tapahtuu. Matkapuhelinverkon tukiasemien tehot ovat kuitenkin sen verran suuria, ettei päättä kannata laittaa niiden eteen.<sup>197</sup>

### Vapaan tilan vaimennus ja radioyhteyden mitoitus

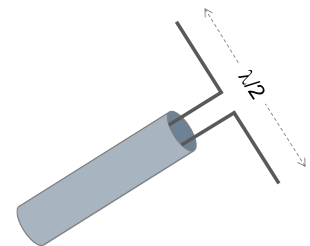
Periaatteessa Maxwellin yhtälöryhmä yhdessä reunaehtojen kanssa määrittää täysin radioaaltojen etenemisen. Reunaehdot ovat käytännön tapauksissa äärimmäisen monimutkaisia, koska niihin vaikuttavat mm. maanpinnan epätasaisuudet ja väliaineen muuttuvat ominaisuudet. Tämän vuoksi Maxwellin yhtälöitä ei yleensä käytetä radiotietoliikenteen mallintamiseen, vaan niiden sijaan käytetään yksinkertaisempia malleja kuvaamaan aaltojen etenemistä, taittumista, heijastumista ja absorptiota.

Tietoliikenteen kannalta olennainen tieto on se, miten radiokanava vaikuttaa lähetettyyn signaaliin. Yleensä on riittävää mallintaa kanava tilastollisena ilmiönä, jossa otetaan huomioon myös erilaiset korrelaatiot ajan ja paikan funktiona. Solukoverkkojen tapauksessa radiokanavien tyypilliset ominaisuudet tunnetaan varsin hyvin laajojen mittausten ansiosta. Tämä on tärkeää, sillä radiotaajuudet ovat kallis resurssi, joka on syytä käyttää mahdollisimman tehokkaasti hyödyksi.

Vapaassa tilassa vastaanotetun ja lähetetyn signaalin tehojen suhde on:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (5.1),$$

jossa  $G_T$  on lähtetimen tehovahvistus,  $G_R$  on vastaanottimen tehovahvistus,  $\lambda$  on käytetty aallonpituus ja  $r$  on etäisyys. Esimerkiksi dipoliantennin (oheisessa kuvassa puolialtodipoli) tehovahvistus verrattuna tasaisesti ympärisäteilevään antenniin on n. 1,64 (eli desibeliasteikolla 2,15 dB). Huomaa erityisesti, että kaavassa 5.1 tehovahvistukset ovat lineaarisella asteikolla, eivät siis desibeleinä.



Kuten kaavasta voidaan havaita, kun aallonpituus pienenee (eli taajuus kasvaa), niin hyötysuhde heikkenee. Tämä voidaan esittää logaritmisella asteikolla seuraavasti:

$$L = 32,44 + 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(r_{km}) \quad [dB] \quad (5.2)$$

$L$  on radiolinkin aiheuttama vaimennus desibeleissä, kun käytetty taajuus ( $f$ ) on esitetty MHz-asteikolla ja etäisyys ( $r$ ) kilometreissä.

<sup>197</sup> Makrosolujen tukiasemien turvaetäisyys on n. 10 m ja mikrosolujen tukiasemilla n. 30 cm.

<http://www.stuk.fi/aiheet/matkapuhelimet-ja-tukiasemat/matkapuhelinverkko/matkapuhelinverkon-toiminta-ja-tukiasemat>

Vapaan tilan vaimennus ei siis tarkoita sitä, että sähkömagneettisen säteilyn energia häviäisi tai absorboituisi johonkin vaan sitä, että etäisyyden kasvaessa energia jakautuu suuremmalle pinta-alalle. Pinta-ala kasvaa neliöllisesti etäisyyden funktiona. Miksi sitten vaimennus riippuu aallonpituudesta? Tämän ilmiön voi ajatella siten, että mitä pienempi aallonpituus sitä pienempi on ala, jolta antenni pystyy vastaanottamaan sähkömagneettisen säteilyn energiaa. Säteilyn kokonaisenergia tietyllä etäisyydellä ei siten riipu säteilyn aallonpituudesta, sen sijaan antennin vastaanottama energia riippuu aallonpituudesta. Pienillä aallonpituuksilla, joita käytetään esimerkiksi satelliittiyhteyksillä, tarvitaan käytännössä suuri antennivahvistus. Suureen antennivahvistukseen päästään lautasantennilla, silloin kun se on käytännössä mahdollinen.

Vastaanottotehot voivat olla hyvin pieniä. Lähetysteho 100 mW on desibeliasteikolla suhteessa milliwattiin ilmaistuna 20 dBm. Vastaanotetuksi tehoksi voi riittää -100 dBm, joka vastaa siis tehoa  $10^{-13} \text{ W} = 100 \text{ fW}$ .<sup>198</sup> Tällaiseen lopputulokseen päästään kaavan 5.3 mukaan esimerkiksi, jos lähetysteho on 100 mW, taajuus on 2,4 GHz ja etäisyys on 10 km. Käytännössä radioaallot eivät etene niin kuin vapaassa tilassa varsinkaan kaupunkiympäristössä: maksimietäisyys 2,4 GHz:n taajuudella on pikemminkin pari kilometriä kuin kymmenen kilometriä. Tarkempia laskelmia varten on kehitetty monimutkaisia kaavoja, jotka perustuvat todellisessa ympäristössä tehtyihin mittauksiin. Ero vapaan tilan vaimennukseen on niin suuri (useita kymmeniä desibelejä), ettei radioverkon mitoitus voida tehdä vapaan tilan kaavan perusteella juuri missään olosuhteissa edes kaupunkien ulkopuolella. Myös metsä aiheuttaa huomattavaa lisävaimennusta verrattuna vapaan tilan vaimennukseen.

### Esimerkki 5.3. Radioyhteyden mitoitus kaupunkialueella

Oletetaan, että eräällä kaupunkialueella radiotien vaimennus noudattaa kaavaa<sup>199</sup>

$$L^* = 46 + 26 \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 34 \log_{10}(r_{\text{km}}) \quad [\text{dB}] \quad (5.3)$$

Jos tukiaseman lähetysteho on 1 W, kuinka kaukana matkapuhelin voi korkeintaan olla, jotta signaalin voimakkuus olisi vähintään -100dBm kun taajuusalue on a) 900 MHz tai b) 2100 MHz. Entä mikä on tulos, jos tukiaseman lähetysteho onkin 10 W taajuusalueella c) 900 MHz ja d) 2100 MHz.

### Ratkaisu

Kaavasta 5.4 saadaan kääntämällä

$$r_{\text{km}} = 10^{(L^* - 46 - 26 \log_{10}(f_{\text{MHz}}))/34}$$

<sup>198</sup> Esimerkiksi: <http://www.antenna-theory.com/design/cellantenna.php>

<sup>199</sup> Tämä kaava vastaa suunnilleen ns. Hata-mallia kaupunkialueelle, kun tukiaseman antenni on 50 m korkeudella ja vastaanottajan antenni 1,5 m korkeudella, [https://en.wikipedia.org/wiki/Hata\\_model\\_for\\_urban\\_areas](https://en.wikipedia.org/wiki/Hata_model_for_urban_areas).



Nyt pitää olla tarkkana sen suhteen mikä on sallittu vaimennus, eli  $L^*$ . Kun lähetysteho on 1 W ja vastaanottoteho -100 dBm, niin sallittu vaimennus on 100 dB verrattuna 1 mW:n tehoon. Verrattuna yhteen wattiin sallittu vaimennus on siten  $100 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 130 \text{ dB}$ . Vastaavasti 10 W:n lähetysteholla sallittu vaimennus on 140 dB. Vastauksiksi saadaan soveltamalla kaavaa 5.4:

$$\text{a) } r = 10^{(130-46-26\log_{10}(900))/34} = 1,63 \text{ km}$$

$$\text{b) } r = 0,85 \text{ km}$$

$$\text{c) } r = 3,20 \text{ km}$$

$$\text{d) } r = 1,68 \text{ km}$$

Vapaan tilan kaavalla tulokset olisivat vastaavasti: a) 84 km, b) 36 km, c) 265 km ja d) 114 km.

### *Solukoverkon kapasiteetti*

Mobiiliverkon kapasiteettia voidaan mitata sillä, miten paljon tiedonsiirtokapasiteettia on käytettävissä pinta-alayksikköä kohden. Kapasiteetin yksikkönä voi tällöin olla esimerkiksi Gbit/s/km<sup>2</sup>. Tällä tavoin määritelty kapasiteetti riippuu olennaisesti neljän tekijän tulosta: spektrinen tehokkuus<sup>200</sup> × kaistanleveys × tukiasemien määrä pinta-alayksikköä kohti × sektorien määrä tukiasemaa kohti. Sektoreita voidaan lisätä suuntaavien antennien avulla kuten kuvassa 5.7 on esitetty. Tyypillisesti sektoreita on kolme.

Spektrinen tehokkuus määritellään tehollisena bittinopeutena käytettävissä olevaa kaistaa kohti eli sen yksikkö on bit/s/Hz, josta itse asiassa tulee yksikötön suure (koska Hz = 1/s). Aikanaan GSM/EDGE-datasiirron tehokkuus oli teoriassa 1,92 mutta käytännössä noin 1.<sup>201</sup> Kun kaista yhteyttä kohti oli 200 kHz, niin tyypillisesti saavutettiin 200 kbit/s nopeus. Vastaavasti 3G/HSPA spektrin tehokkuus on suunnilleen sama kuin EDGellä (eli 1), mutta yhdelle yhteydelle kaistaa on käytettävissä enemmän (5 MHz), jolloin bittinopeudet ovat vastaavasti suurempia. LTE:n teoreettinen spektritehokkuus on noin 4, mutta käytännössä tyypillisesti 1,5. Kun yhteyden kaista on 20 MHz, niin LTEllä päästään 30 Mbit/s nopeuteen. MIMO (**m**ultiple-**i**nput-**m**ultiple-**o**utput) –teknologian avulla päästää vielä suurempiin spektritehokkuuksiin, suotuisissa olosuhteissa jopa 30:een. Käytännössä LTE:llä päästäneen spektritehokkuuteen 6. 5G-teknologia mahdollistaa vielä korkeampia tehokkuuksia, mutta vasta käytäntö osoittaa minkälaiset luvut ovat todellisuudessa mahdollisia.

Verkon kapasiteettia voidaan siis lisätä myös ottamalla käyttöön uusia taajuualueita. Taajuualueiden allokointi on kuitenkin vaikea poliittinen kysymys, sillä taajuuksille on

<sup>200</sup> Spectral efficiency

<sup>201</sup> Laskelmissa esitetyt luvut perustuvat artikkeliin Rysavy, P. (2014) [Challenges and considerations in defining spectrum efficiency](#). Proceedings of the IEEE, 102(3), 386-392, sekä Wikipedian artikkeliin [Spectral Efficiency](#).

monia muitakin käyttökohteita kuten kuvasta 5.3 jo nähtiin. Muutokset taajuusalueiden käytössä vaativat vaikeita ja monimutkaisia päätöksiä, joissa eri tahojen intressit ovat usein ristiriidassa keskenään. Korkeammilla taajuuksilla on luonnostaan enemmän kaistaa käytettävissä (huomaa että alle 1 GHz:n alueella on kokonaisuudessaan kaistaa yhtä paljon kuin vaikkapa 10 ja 11 GHz:n välillä).

Korkeille taajuuksille siirryttäessä solukoko kutistuu väistämättä, sillä suurempitaajuinen säteily vaimenee nopeammin kuin matalataajuinen. Eli jos halutaan verkolle hyvä kattavuus, on käytettävä alhaista taajuusalueita (alimmillaan 450 MHz:n alue). Suuremmilla taajuuksilla (uusimman verkkotekniikan eli LTE:n tapauksessa käytössä on taajuuskaistoja 3,8 GHz asti) verkon kapasiteetti on suurempi, mutta täysin kattavaa verkkoa on hyvin vaikea rakentaa. Lisäksi kun käytettävä taajuus on korkea, kuuluvuus rakennusten sisällä on olennaisesti heikompi kuin ulkona, joka vaikeuttaa verkon suunnittelua ja peiton rakentamista erityisesti kaupunkialueilla.

Lopulta solukoon pienentäminen on helpoin tapa kasvattaa kapasiteettia pinta-alayksikköä kohti, silloin kun teknologia on määrätty ja käytettävä kaista on rajallinen. Solukkoperiaate mahdollistaa myös erikokoisten solujen yhtäaikaisen käytön. Tiheästi liikennöidyillä alueilla kuten kaupunkien keskustoissa käytetään pienempää solukokoa (piensoluverkko) ja haja-asutusalueilla suuria soluja (suursoluverkko). Kun näihin käytetään eri taajuusalueita, niin solut voivat sujuvasti toimia päällekkäin.

Mobiiliverkon kokonaiskapasiteetti riippuu kolmesta tekijästä: a) taajuuskaistasta (eli sääntelystä), b) spektritehokkuudesta (eli teknologian tasosta) ja c) tukiasemien määrästä (eli verkkoinvestointien määrästä). Operaattori voi siis vaikuttaa näihin kaikkiin a) osallistumalla taajuuskaistojen huutokauppoihin, b) valitsemalla kulloinkin tehokkaimman verkoteknologian ja c) tekemällä päätöksiä lisätä tukiasemien määrää.

### **Esimerkki 5.1.** Solukoverkon mitoitus

Pääkaupunkiseudulla asuu noin 1,2 miljoonaa henkilöä 1000 km<sup>2</sup> alueella. Yksinkertainen kysymys: Miten paljon tukiasemia tarvitaan täyttämään mobiilin internetin tiedonsiirtotarpeet?

#### **Ratkaisu**

Ratkaisu on periaatteessa yksinkertainen, kunhan tunnetaan käyttäjien tarpeet ja tukiasemien kapasiteetit (käytännössä verkon suunnittelu ja mitoitus on monimutkaisempaa). Ensiksi pitää olettaa jotain käyttäjien tarpeista. Voitaisiin olettaa tiedonsiirron kokonaismääräksi asukasta kohti kuu-kaudessa esimerkiksi 10 GB.<sup>202</sup> Toisaalta voimme tehdä myös oletuksen siitä minkälaisia nopeuksia

---

<sup>202</sup> Tämä vastaa nykyistä (2017) tilannetta Suomessa. Useimmissa muissa maissa määrä on korkeintaan pari GB/kk.

keskimääräinen käyttäjä tarvitsee ja kuinka suuri osa asiakkaista on aktiivisia kiiretunnin aikana. Seuraavat laskelmat on tehty kahdella erilaisella oletuksella:

1. Bittinopeus  $R = 1$  Mbit/s (eli varsin pieni nopeus).
2. Bittinopeus on  $R = 25$  Mbit/s (eli tyypillinen 4G-nopeus).

Lisäksi oletetaan kaksi vaihtoehtoa aktiivisuudelle kiiretunnin aikana:

- a. Aktiivisuus  $p = 1$  % eli yllä esitettyjä bittinopeuksia käytetään keskimäärin 36 sekuntia kiiretunnin aikana.
- b. Aktiivisuus  $p = 5$  % eli keskimäärin 3 minuuttia kiiretunnin aikana.

Näistä voidaan laskea keskimääräiset datamäärät kuukaudessa, kun tehdään joku oletus siitä, mikä on kiiretunnin osuus kokonaisliikenteestä, esimerkiksi  $q = 7$  %. Näiden perusteella voimme laskea datasiirron kokonaismäärän eri vaihtoehdoille seuraavasti:<sup>203</sup>

$$\text{Datamäärä} = \frac{3600 \cdot 30 \cdot pR \text{ [Mbit/s]}}{8 \cdot 1000 \cdot q} \text{ [GB]}$$

Datamäärät (gigatavuissa) kuukaudessa asukasta kohti ovat tällöin:

- 1a. 1,9 GB
- 1b. 9,6 GB
- 2a. 48 GB
- 2b. 241 GB

Nämä voivat vaikuttaa suurilta luvuilta ja viimeinen on oikeasti suuri datamäärä siirrettäväksi mobiiliverkon yli. Jos ennusteisiin on uskomista, niin on vain ajan kysymys, milloin datamäärät saavuttavat ylimmänkin tason.

Entä sitten tarvittavien tukiasemien määrä? Tätä varten tarvitsemme tietoa tukiasemien kapasiteetista ja siitä miten korkeaksi tukiaseman kuormitus voidaan keskimäärin nostaa, jotta palvelun laatu ja saatavuus pysyisivät riittävällä tasolla. Kapasiteetti riippuu mm. käytettävästä teknologiasta ja taajuuskaistan leveydestä. Voimme tehdä tässä melko karkean arvion, että jokaisella tukiasemalla on kuvan 5.7 mukaisesti kolme sektoria, joissa kullakin on kapasiteettia  $C = 150$  Mbit/s.

Sallittu keskimääräinen kuormitus on kysymys, johon ei ole aivan yksinkertaista (esimerkiksi Erlangin kaavan tyyppistä) vastausta. Keskimääräinen kuormitus vaihtelee sekä solujen välillä että ajan funktiona kiiretunnin aikana. Toisaalta, koska suurin osa verkon kuormituksesta tulee dataliikenteestä, joka sopeutuu varsin hyvin muuttuviin olosuhteisiin, tässä tapauksessa ei tarvita aivan yhtä paljon pelivaraa kuin perinteisissä puhelinverkoissa. Tehdään oletus, että keskimääräisen kiiretunnin aikainen kuormitus täytyy pitää alle  $\rho = 20$  prosentissa (suhteellisen alhainen lukuarvo johdetaan lähinnä solujen kuormitusten eroista). Tukiasemien kokonaismääräksi ( $M$ ) tulee tällöin:

<sup>203</sup> Kerroin 8 kaavassa tulee siis siitä, että yksiköt vaihdetaan biteistä tavuiksi.

$$M = \frac{pRN}{3C\rho} \quad (5.4)$$

jossa N on asukasmäärä, siis 1,2 miljoonaa. Tukiasemien määräksi saadaan eri vaihtoehdoilla:

$$1a. M = 134$$

$$1b. M = 667$$

$$2a. M = 3334$$

$$2b. M = 16667$$

Kaksi ensimmäistä ovat vielä täysin mahdollisia sekä teknisesti että kaupallisesti, kun ottaa huomioon, että käytännössä tukiasemat jakautuvat useamman, usein kolmen, operaattorin kesken. Ensimmäisessä kohdassa (1a) tarvittaisiin siis yksi tukiasema noin 7,5 neliökilometriä kohden, kun taas viimeisessä (2b) tarvitaan 17 tukiasemaa neliökilometrillä. Epätasaisesta kuormituksesta johtuen tiheimmin asutuilla alueilla tukiasemia pitäisi olla alle 100 metrin välein. Tämäkin on mahdollista toteuttaa, jos tukiaseman hinta laskee riittävän alhaiseksi ja tukiasemien sijoituspaikkoina käytetään esimerkiksi valaisinpylväitä.

## Sukupolvesta toiseen

### *Ensimmäiset sukupolvet: ARP ja NMT*

Ensimmäinen kaupallinen mobiilipalvelu oli AT&T:n MTS<sup>204</sup> vuonna 1949. Palvelu oli kallis ja verkon kapasiteetti hyvin rajallinen. Ensimmäinen matkapuhelinverkko Suomessa oli ARP (autoradiopuhelin), joka otettiin käyttöön 1971; sitä voi siten kutsua sukupolveksi nolla eli 0G. Sen toiminta oli nykyisiin verkkoihin verrattuna alkeellista. Matkapuhelimesta soittaessa puhelun alussa otettiin yhteys käsivälitteiseen keskukseseen, josta puhelu yhdistettiin haluttuun lankaverkon numeroon tai toiseen matkapuhelimeen. Puhelimet eivät osanneet vaihtaa taajuutta kesken puhelun, joten puhelimen siirtyessä tukiaseman kantaan ulkopuolelle puhelu katkesi.

ARP-verkko toimi 150 MHz:n taajuusalueella, jolla signaalin kantomatkka on useita kymmeniä kilometrejä. Häiriöiden estämiseksi samaa kanavaa käyttävien tukiasemien väliin täytyy tällöin jäädä 100 - 200 kilometrin suojavaiohyke. Tämä rajoitti verkon tilaajamäärän varsin pieneksi. Enimmillään verkossa oli runsaat 35 000 tilaajaa. Tilaajamäärästä huolehtivat taloudelliset realiteetit, sillä niin puhelimet kuin puhelutkin olivat kalliita. ARP-verkko toimi matalan taajuusalueen ja suuren solukoon ansiosta lähes koko Suomessa ja sitä käytettiin paljon varsinkin syrjäseuduilla. ARP-verkko suljettiin vuoden 2000 lopulla.

Astetta kehittyneempi NMT-verkko avattiin Suomessa 1982. NMT (**Nordic Mobile Telephone**) -järjestelmä oli pohjoismaiden telehallintojen yhdessä kehittämä ja ylläpitämä

<sup>204</sup> MTS = Mobile Telephone Service, [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_mobile\\_phones](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_mobile_phones)

palvelu.<sup>205</sup> Pohjoismaat kattanut NMT-verkko oli aikanaan maailman laajin yhtenäinen matkapuhelinjärjestelmä. Suomessa NMT-verkkoa operoi Posti- ja lennätinlaitos seuraajineen. NMT-järjestelmä käynnistyi kaikissa pohjoismaissa samalla 450 MHz taajuusalueella. NMT 450:n suosio kasvoi nopeasti ja pian kävi ilmeiseksi, ettei kaikkia halukkaita saada mahtumaan samaan verkkoon. Sen vuoksi 1980-luvun puolivälissä ruvettiin rakentamaan 900 MHz:n taajuusalueella toimivaa NMT 900 -verkkoa. Suomessa NMT 900 suljettiin vuoden 2000 lopussa, jolloin sen varaamat taajuudet vapautuivat GSM-verkon käyttöön. NMT 450 jatkoi toimintaansa vuoden 2002 loppuun.

NMT-verkko perustui analogiseen tekniikkaan radiotien osalta, sen sijaan kiinteän verkon osuus ja keskuksat olivat digitaalisia. NMT hallitsi sekä puhelinten sijainnin seurannan että solunvaihdon. Yksi NMT:n perusongelmista oli puhelujen salakuuntelun helppous. Tämä ongelma saatiin ratkaistua vasta digitaalitekniikan avulla.

### *Toinen sukupolvi: GSM*

GSM-lyhenne tuli alun perin sanoista *Groupe Speciale Mobile*, joka oli eurooppalaisen standardointijärjestön ETSIn<sup>206</sup> alatyöryhmä. Myöhemmin GSM liitettiin markkinoinnin kannalta paremmin sopivaan nimitykseen *Global System for Mobile communications*. GSM:n kehitystyön tavoitteena oli luoda vähintään Euroopan kattava matkapuhelinverkko siirryttäessä digitaalitekniikkaan, sillä analogiset matkapuhelinverkon olivat lähes joka maassa erilaisia, jolloin yhtä päätelaitetta saattoi käyttää vain yhdessä maassa. Oleelliset parannukset NMT-verkkoon verrattuna olivat:

- Puhelimen ja tukiaseman välillä yhteys on digitaalinen, jolloin yhteys voidaan salata tehokkaasti ja dataliikenteen välittäminen on olennaisesti helpompaa.
- GSM:ssä tilaajan identifiointi perustuu älykorttiin (SIM, *subscriber identity module*) eikä varsinaiseen puhelinlaitteeseen. SIM-kortti sisältää tilaajan kaikki oleelliset tiedot, joten käyttäjä ei ole sidottu yhteen puhelinlaitteeseen.

Tavoitteena oli saada GSM-palvelu toimintaan heinäkuussa 1991. Käytännössä GSM-palvelut käynnistyivät vasta vuoden 1992 lopulla, ensin 900 MHz:n taajuusalueella. Vuodesta 1998 alkaen otettiin käyttöön 1800 MHz:n alue, kun alempi taajuusalue alkoi täyttyä. GSM-puhelimien määrä kasvoi nopeasti: vuoden 1993 alussa Suomessa niitä oli vain pari tuhatta, vuotta myöhemmin kymmenen kertaa enemmän, keväällä 1996 niiden määrä lähestyi puolta miljoonaa ja vuoden 1998 alussa ylitettiin jo puolentoista miljoonan raja.

---

<sup>205</sup> NMT:n kehittäminen lähti käyntiin vuonna 1968, kun pohjoismaiset telelaitokset perustivat yhteistyöryhmä Nordiska Mobiltelefonigruppen.

<sup>206</sup> ETSI = *European Telecommunications Standards Institute*, on riippumaton, eurooppalainen telealan standardisointijärjestö (<http://www.etsi.org/>)

GSM-puhelinliittymien määrä ylitti kiinteän verkon liittymien määrän kesällä 1999. Jo vuonna 2004 matkapuhelinliittymien määrä pohjoismaissa ja eräissä muissa maissa ylitti asukasluvun.

Kannettavien tietokoneiden käyttäjille GSM tarjosi nopeuden 9,6 kbit/s, joka nykylaitteisiin ja sovelluksiin tottuneena kuulostaa kovin vaatimattomalta. Seuraava askel datasiirrossa oli GPRS (*General Packet Radio Service*), jolla pyrittiin suurempiin nopeuksiin ja tehokkaampaan verkon käyttöön pakettimuotoisen datasiirron avulla. GPRS:n nopeus nousi EDGE-tekniikan (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) avulla 384 kilobittiin sekunnissa.

GSM-puhelimen käyttäjä on suojattu verkkoliittymän väärinkäyttöä vastaan. Lisäksi GSM-verkossa on laiterekisteri-ominaisuus eli jokaisessa puhelimessa on 15 numeroa pitkä tunnus, IMEI-koodi.<sup>207</sup> Koodi tarkistetaan puhelua muodostettaessa, joten varastetun puhelimen käyttö on periaatteessa mahdollista estää. Valitettavasti samoja IMEI-koodeja voi verkossa olla useita eri syistä johtuen, joten koodi ei täydellisellä varmuudella identifioi yhtä laitetta. Puhelun salauksen kannalta GSM-tekniikka on oleellisesti parempi kuin edeltävät analogiset järjestelmät. GSM:n salakuuntelua varten löytyy laitteita, mutta salakuuntelu vaatii esivalmisteluja ja tietoa GSM-verkon teknisestä toteutuksesta. Yksittäisen henkilön joutuminen tämän tyyppisen hyökkäyksen kohteeksi on varsin epätodennäköistä.<sup>208</sup>

### *Kolmas sukupolvi: UMTS / 3G*

Hyppäys toisesta sukupolvesta (2G) kolmatta sukupolvea (3G) edustavaan UMTS:iin (*Universal Mobile Telecommunications System*) oli suuri niin verkkoja ylläpitäville operaattoreille kuin asiakkaillekin. Kysymys kuului: Mitä asiakkaat lopulta haluavat? Tarvitseeko käyttäjä todellakin videokuvan siirtoa tai kahta megabittiä sekunnissa taskuunsa? Nyt tiedämme, että tarvetta on aina riittänyt suuremmille nopeuksille, mutta 20 vuotta sitten tämä ei ollut lainkaan ilmeistä.

Britannia järjesti keväällä 2000 huutokaupan, jossa viisi 3G-toimilupaa myytiin yhteensä lähes 38 miljardin euron hintaan. Saksan valtio keräsi saman vuoden elokuussa omasta huutokaupastaan yli 50 miljardia euroa. Hintoja voidaan pitää korkein, mutta toisaalta matkapuhelinpalveluiden tarjoaminen on osoittautunut erittäin kannattavaksi liiketoiminnaksi niille operaattoreille, jotka ovat pystyneet hankkimaan riittävän suuren markkinaosuuden. Euroopan ensimmäinen UMTS-verkko otettiin käyttöön Man-saarella

---

<sup>207</sup> IMEI = *International Mobile station Equipment Identity*, 15 merkkiä pitkä matkapuhelimen laitetunnus. IMEI-koodia käytetään myös 3G- ja LTE-puhelimissa.

<sup>208</sup> Viestintävirasto (2011), GSM-matkapuhelinverkon viestintää on mahdollista salakuunnella – 3G- ja 4G-verkot ovat turvallisia, [https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2011/T\\_29.html](https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2011/T_29.html). Viranomaisten kannalta optimaalinen tilanne on se, että salakuuntelu on yksityisille tahoille hyvin vaikeaa, mutta viranomaisille mahdollista.

vuoden 2001 lopulla. Suomalaisista operaattoreista Radiolinja ja Sonera avasivat verkkonsa testikäyttöön vuoden 2001 alussa. Kaupallinen toiminta käynnistyi Suomessa vasta syksyllä 2004. Suomen 3G:n (ruotsalainen Tele2) toimilupa peruttiin kesäkuussa 2005, koska yhtiö ei täyttänyt toimilupaan sisältyvää rakentamisvelvoitetta. 3G-verkkoja on siten Suomessa rakennettu yhteensä kolme. Verkkojen nykyisiä omistajia ovat Elisa, Telia ja DNA.

3G:n datasiirtonopeudet ovat kasvaneet merkittävästi vuosien mittaan. Taulukossa 5.1 on esitetty muutamia kehitysvaiheita. Yksiselitteisin kehitysvaiheen kuvaus on 3GPP:n (3rd Generation Partnership Project) standardien julkaisunumero (release). 3GPP on usean standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio, joka perustettiin kehittämään kolmannen sukupolven matkapuhelinjärjestelmiä 1990-luvun lopulla. Ensimmäinen 3G-standardi (Release 99) julkaistiin vuonna 2000. Seuraava eli Release 4 julkaistiin 2001 ja siitä eteenpäin uusia versioita on julkaistu siten, että Release 12 julkaistiin maaliskuussa 2015.<sup>209</sup>

Ensimmäinen merkittävä kehityssaskel datasiirron kannalta oli HSPA (High Speed Packet Access). HSPA jakautuu kahteen osaan eli 1) tiedonsiirtoon verkosta päätelaitteeseen eli HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ja 2) tiedonsiirtoon päätelaitteesta verkkoon eli HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access). Useimpien sovellusten kannalta kapasiteetti alaspäin (käyttäjälle) on huomattavasti tärkeämpi kuin kapasiteetti ylöspäin (verkkoon<sup>210</sup>). Niinpä HSDPA julkaistiin kolme vuotta ennen HSUPA:ta. Seuraava vaihe eli HSPA+ tekniikka mahdollisti noin kaksinkertaiset datansiirtonopeudet.

**Taulukko 5.1.** Solukkoverkkojen teknologioiden kehitystä 3G:stä 5G:hen.<sup>211</sup>

	UMTS / WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE	LTE-A	5G tavoite
3GPP release vuosi	99 2000	6 2005	7 2008	8 2009	10 2011	14 2017
Max bittinopeus alaspäin (Mbit/s)	0,384	14,4	28	42	150	10 000
Max bittinopeus ylöspäin	0,128	5,7	11	11	75	1 000
Edestakainen viive	150 ms	60 ms	35 ms	~10 ms	~10 ms	~1 ms

<sup>209</sup> 3GPP, <http://www.3gpp.org/specifications/67-releases>

<sup>210</sup> Verkkoteknologian kielenkäytössä käyttäjä on verkon alapuolella, mutta voisi tämän ajatella toisinkin päin.

<sup>211</sup> Numeroarvot riippuvat siitä tarkoitetaanko teoreettisia nopeuksia vai kaupallisissa verkoissa mitattuja arvoja. Lähteinä M. Sauter (2011): *From GSM to LTE - An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*; <http://www.4gamericas.org/>, Wikipedia [http://en.wikipedia.org/wiki/LTE\\_%28telecommunication%29](http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_%28telecommunication%29), [http://en.wikipedia.org/wiki/High\\_Speed\\_Packet\\_Access](http://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_Packet_Access)), Pham Nhu Hai (2013), *Introduction to LTE and LTE-Advanced*, ITU Radiocommunication Bureau.



### *Neljäs sukupolvi: 4G & LTE*

Verkkojen kehitys ei lopu johonkin sukupolveen vaan aina kehitetään uusia. Luonnollinen jatko 3G:lle on tietysti 4G ja sitten seuraavaksi 5G. Vuoden 2015 alussa tilanne oli, että 4G:tä käytetään uusimpien puhelimien ja verkkopalveluiden markkinointiin ja 5G:tä uusien tutkimusohjelmien nimissä ja tutkimussuunnitelmissa. Mitä siis tarkoittaa 4G, jos HSPA lasketaan 3G tai 3.5G-tekniologiaksi? Näyttää siltä, että mitään virallista, tarkkaa 4G-määritelmää ei ole eikä varmaan tulekaan.<sup>212</sup> Sen sijaan on olemassa erilaisia radioteknisiä ratkaisuja ja erilaisia verkkoarkkitehtuuriratkaisuja, jotka johtavat erilaisiin teoreettisiin bittinopeuksiin ja erilaisiin kaupallisissa verkoissa toteutuvien palveluiden laatuominaisuuksiin. Kun nopeus verkosta päätelaitteeseen on vähintään 50 Mbit/s, voidaan käyttää nimitystä 4G.

Ensimmäinen standardi, josta käytetään nimitystä LTE (**Long Term Evolution**) on Release 8 vuodelta 2009. LTE-tekniikan tavoitteena on ollut kasvattaa datan siirtonopeuksia, lyhentää viiveitä, parantaa palveluita ja vähentää kuluja. LTE on ensimmäinen matkaviestintekniikka, jossa radioliikenne tukiasemasta päätelaitteeseen on toteutettu erilaisella radiotekniikalla kuin radioliikenne päätelaitteesta tukiasemaan. LTE:ssä verkon arkkitehtuuria on yksinkertaistettu, mikä lyhentää viiveitä tiedonsiirrossa ja vähentää operaattorien kustannuksia. LTE:ssä on mahdollista luoda maantieteellisesti suurikokoisia soluja (yli 100 km) ja tiedonsiirto on mahdollista nopeasti liikkuvissa ajoneuvoissa (jopa 350 km/h).

### *Viides sukupolvi: 5G ja tulevaisuus*

Seuraavan sukupolven eli 5G:n tavoitteet ovat entistäkin kunnianhimoisempia. Käyttäjille pyritään tarjoamaan parhaimmillaan jopa 10 Gbit/s nopeuksia ja taattuna nopeutenaikin useita satoja megabittejä sekunnissa. Samanaikaisesti viive pyritään puristamaan noin 1 ms tasolle. Mutta onko tämä kaikki todella tarpeen? Jos ja kun nykyisillä teknologioilla voidaan tarjota yli 100 Mbit/s latausnopeuksia<sup>213</sup>, niin mitkä ovat perusteet kehittää suurin ponnistuksin täysi uutta teknologiaa?<sup>214</sup>

Pelkkä siirtonopeuksien kasvattaminen ei ehkä ole riittävä peruste, sillä on vaikea kuvitella, että mobiililaitteissa tarvittaisiin merkittävästi yli 20 Mbit/s nopeuksia ainakaan nykyisillä sovelluksilla. Suhteellisen pienellä näytöllä jo 8 Mbit/s nopeus riittää erittäin hyvä-

---

<sup>212</sup> 4G:n määritelmästä ja sen käyttämisestä markkinointiin on riideltä oikeudessa asti. Markkinaoikeus: Dnro 128/13/M1, 29.4.2013 ja Dnro 298/13/M1, 20.8.2013.

<sup>213</sup> Netradar-mittaus 27.12.2017 Otaniemessä tuotti 66 Mbit/s latausnopeuden, 42 Mbit/s lähetyksenopeuden ja 53 ms viiveen. Nämä lukemat riittävät käytännössä lähes minkä tahansa nykyisen sovelluksen tiedonsiirtoon.

<sup>214</sup> Katso esimerkiksi: M. Matinmikko, M. Latva-aho, Mikro-operaattorit vauhdittavat, [https://issuu.com/uusiteknologia.fi/docs/1\\_2016](https://issuu.com/uusiteknologia.fi/docs/1_2016), s. 20-24 (tosin tällaiset arviot vanhenevat nopeasti).

laatuisen videokuvaan. Toki jos siirtonopeus on hyvin suuri, nettisivut latautuvat nopeammin. Eräs vaihtoehto olisi, että nykyisiä 4G-verkkoja täydennettäisiin paikallisilla Wi-Fi-verkoilla (joista enemmän myöhemmin tässä luvussa). 4G-tekniikalla tuotettaisiin kattava palvelu laajalla alueella ja niissä paikoissa, missä 4G-verkot eivät riittäisi tyydyttämään lisääntyvää kysyntää, rakennettaisiin lisäkapasiteettia Wi-Fi-tekniikalla. Vuoden 2018 lopulla näyttää siltä, että 5G-tekniologian kehittämiselle on varsin laajamittainen tuki. Tärkeimmät perusteet ovat:

- Uudet kehitteillä olevat sovellukset, esimerkiksi ne jotka käyttävät virtuaalitodellisuutta (**virtual reality**, VR), vaativat entistä enemmän tiedonsiirtokapasiteettia.
- Nykyisessä muodossaan Wi-Fi-verkot ovat tehokkaita, kun vastaanotin on paikallaan, mutta huomattavasti heikommin, kun käyttäjä on liikkeellä. Autonopeuksilla (esim. 50 km/h) siirtonopeudet jäävät varsin pieniksi.
- Monet erikoissovellukset, esimerkiksi teollisuusympäristöissä tai automatisoidussa liikenneympäristössä vaativat ominaisuuksia, joita nykyisillä tekniikoilla on vaikea toteuttaa, koskien yhteyksien luotettavuutta ja sallittuja viiveitä.
- Monin paikoin 4G-tekniikalla toteutettavat verkot eivät enää tarjoa riittävää kapasiteettia käytettävissä olevilla taajuusalueilla. Tällöin on pakko siirtyä korkeammille taajuuksille, jolloin radiotekniikka on suunniteltava uudestaan.

Eräs ehdotettu ja tutkimustyön alla oleva ratkaisu on sijoittaa tukiasemia lyhtypylväisiin. Koska lyhtypylväistä on näköyhteys (!) kadulla kulkeviin ihmisiin ja autoihin, on mahdollista käyttää hyvin korkeita (yli 10 GHz) taajuusalueita, joilla saavutetaan erittäin suuri kapasiteetti. Toisaalta toteutuksen haasteet ovat merkittäviä, esimerkiksi antennit ovat suuntaavia, joten päätelaitteessa on pakko olla useita antennia, joista kullakin ajan hetkellä valitaan paras tai parhaat. 5G-tekniologian kehittämisessä riittää töitä vielä pitkään—emmekä voi vielä tietää, mitä uusia tarpeita ja palveluita samalla syntyy.

### **Esimerkki 5.2.** Tukiasemaverkon mitoitus

Arvioi tarvittava tukiasemien määrä ja keskietäisyys toisistaan, kun 1100 km<sup>2</sup> alueella asuu 7.2 miljoonaa ihmistä (= Hong Kong), kun

- a) On vain matkapuhelinliikennettä siten että keskimääräinen asukas puhuu 15 minuuttia päivässä ja puheen vaatima bittinopeus on 12 kbit/s suuntaansa.
- b) Lisäksi on dataliikennettä siten että keskimäärin asukas käyttää datasiirtoon 1 GB kuukaudessa.
- c) Edellisten lisäksi 1 prosentti asukkaista käyttää datayhteyttä nopeudella 25 Mbit/s koko kiiretunnin ajan.

Yhdessä tukiasemassa oletetaan olevan 3 sektoria, joiden jokaisen kapasiteetti on 150 Mbit/s, kapasiteetti on jaettava kahteen suuntaan (puhelimesta verkkoon ja verkosta puhelimeen). Ota huomioon myös kiiretunnin osuus kokonaisliikenteestä ja kuormituksen vaihteluista (solujen välillä ja eri päivinä) johtuva keskimääräinen sallittava kuormitustaso.

### **Ratkaisu** <sup>215</sup>

Kohta a.

Tässä tarvitsee tehdä oletus kiiretunnin osuudesta kokonaisliikenteestä; käytetään arvoa 7 %. Tällöin kiiretunnin aikana yksi asukas puhuu  $15 \cdot 0,07 = 1,05$  minuuttia. Vaikka bittejä menee molempiin suuntiin, niin yksi asukas ”tuottaa” puhetta vain toiseen suuntaan, koska toinen suunta on toisen asukkaan ”tuottamaa” liikennettä. Toisaalta yksi puhelu kuormittaa verkkoa kahdessa pisteessä. Siiten 1,05 minuuttia tarkoittaa keskimäärin:

$$1,05 \text{ min} \cdot 2 \cdot 12 \text{ kbit/s} / 60 \text{ min} = 0,42 \text{ kbit/s asukasta kohti.}$$

Kerrottuna asukasmäärällä saadaan kokonaiskuormitukseksi kiiretunnin aikana keskimäärin:

$$0,42 \text{ kbit/s} \cdot 7200000 = 3024 \text{ Mbit/s.}$$

Yhden tukiaseman kapasiteetti = 3 sektoria  $\cdot$  150 Mbit/s per sektori eli 450 Mbit/s. Lisäksi pitää huomioida se, että liikenteen epätasaisen jakautumisen vuoksi keskimääräinen kuormitusta ei voida nostaa kovin korkeaksi, ainakaan lähelle 100 prosenttia. Oletetaan, että sallittu keskimääräinen kuormitus kaikkien tukiasemien yli on 20 %. Tällöin tukiasemia tarvitaan:

$$N = 3024 \text{ Mbit/s} / (450 \text{ Mbit/s} \cdot 0,20) = 34$$

Eli vastaus on 34 tukiasemaa. Solun koko on tällöin  $1100 \text{ km}^2 / 34 = 29,4 \text{ km}^2$ . Neliön muotoisilla soluilla tukiasemien väli olisi 5,4 km.

Kohta b.

Tässä pitää ensin laskea miten suuri osuus liikenteestä tuotetaan yhden kiiretunnin aikana. Oletus on yleensä, että kuukaudessa on 30 päivää, jolloin saadaan:

$$1 \text{ GB} \cdot 0,07 / 30 = 2,33 \text{ MB}$$

Megatavut täytyy kääntää siirrettäviksi kilobiteiksi ja jakaa tunnin ajalle, jolloin saadaan

$$8000 \text{ kbit/MB} \cdot 2,33 \text{ MB} / 3600 \text{ s} = 5,19 \text{ kbit/s.}$$

Kokonaisliikennemäärä datalle on tällöin

$$5,19 \text{ kbit/s} \cdot 7200000 = 37,33 \text{ Gbit/s}$$

Kun tähän lisätään puheluiden tuottama liikenne, saadaan kokonaisliikenteeksi

$$40,36 \text{ Gbit/s,}$$

<sup>215</sup> Tehtävän anto on hieman epätarkka, joten hieman erilaisiinkin vastauksiin voi päätyä—toisaalta tämä epämääräisyys on tyypillistä myös todellisuudessa, joten sitä ei ole syytä säikähtää. Usein vaativampi tehtävä on lähtötilanteen arviointi kuin itse laskelman tekeminen.

Tukiasemia tarvitaan siten

$$N = 40\,360 \text{ Mbit/s} / (450 \text{ Mbit/s} \cdot 0,20) = 499$$

Solun keskikoko on tällöin 2,23 km<sup>2</sup> ja tukiasemien väli keskimäärin 1,49 km (nelikulmioilla).

### **Kohta c.**

Lopuksi lisätään yksi prosentti eli 72000 raskasta käyttäjää, joiden tuottama kuormitus on

$$72\,000 \cdot 25 \text{ Mbit/s} = 1\,800\,000 \text{ Mbit/s}.$$

Kun tähän lisätään edellä lasketut arvot päästään lukuun:

$$1\,840\,357 \text{ Mbit/s}.$$

Tukiasemia tarvitaan tällöin

$$N = 1\,840\,357 \text{ Mbit/s} / (450 \text{ Mbit/s} \cdot 0,20) = 20\,449.$$

Solun keskikoko on tällöin 0,049 km<sup>2</sup> ja tukiasemien väli keskimäärin 220 m (neliöillä).

### *Huomiota*

Tehtävän kohta b on varsin realistinen laskelma nykypäivänä. Toisaalta liikennemäärät ovat kasvussa, eikä 1 GB/liittymä/kuukausi riitä edes kaikkiin nykyisiin, saati tuleviin, tarpeisiin. Kohta c osoittaa, että varsin pieni määrä erittäin vaativia käyttäjiä voi moninkertaistaa liikenteen määrän. Tällä tavoin laskettu tukiasemien kokonaismäärä on nykyisillä kustannuksilla erittäin suuri, mutta mahdollinen toteuttaa, kun suuri osa tukiasemista on pienen alueen kattavia edullisia tukiasemia. Lisäksi voidaan olettaa, että tukiasemien kapasiteetit nousevat useaan gigabittiin sekunnissa.

## **Langattomat lähiverkot**

Edellä kuvatut verkkoratkaisut 1G:stä 5G:hen eteenpäin on tarkoitettu kaupallisten operaattoreiden palveluja toteuttamiseen. Toinen kehityslinja on langattomat lähiverkot, joita käytetään ensisijaisesti henkilökohtaiseen tiedonsiirtoon kotona tai kahviloissa ja erilaisten organisaatioiden sisäiseen käyttöön. Toisaalta samaa teknologiaa voidaan käyttää kaupallisten palveluiden toteuttamiseen rajatulla alueella. Jatkossa solukoverkkojen ja langattomien lähiverkkojen välinen ero hämärtyy. Ne tavoitteet, joita 5G-tekniikalle on asetettu, vaativat pieniä soluja ja suuria siirtonopeuksia samoin kuin langattomat lähiverkot. Looginen ratkaisu olisi integroida erilaiset tekniikat yhteen saumattomaan järjestelmään. Kysymys on ensisijaisesti liiketaloudellisista päätöksistä: jokainen taloudellinen toimija arvioi itse, mikä teknologia todennäköisesti tuottaa parhaan taloudellisen tuloksen.

Tietoliikenneverkot on tapana jakaa kolmeen kategoriaan verkon fyysisen ulottuvuuden perusteella:

- Likiverkko tai henkilökohtainen verkko (PAN, [Personal Area Network](#))
- Lähiverkko (LAN, [Local Area Network](#))

- Kaupunkiverkko (MAN, [Metropolitan Area Network](#))

Jokaiseen näistä voidaan sitten liittää määre langaton ([wireless](#)), jolloin saadaan lyhenneet WPAN, WLAN ja WMAN (tai joskus myös R, radio, esimerkiksi RLAN).

Ulottuvuuden lisäksi eri verkkotyypeillä on jossain määrin erilaiset käyttötavat. Sanastokeskuksen termipankin mukaan likiverkko on verkko, jonka samaa langatonta tiedonsiirtotekniikkaa hyödyntävät laitteet muodostavat lähietäisyydellä ollessaan automaattisesti, ilman toiminta-asetusten määrittämistä.<sup>216</sup> Likiverkossa päätelaitteet ovat siten periaatteessa tasa-arvoisia, kun taas lähi- ja kaupunkiverkot perustuvat yleensä tukiaseman ([access point](#)) käyttöön. Tukiasema on yleensä liitetty Internetiin langallisen yhteyden kautta. Kaupunkiverkkoja käytetään tyypillisesti yksityisten yritysten tiedonsiirtotarpeisiin. Taulukossa 5.2 on esitetty joitain keskeisimpiä langattomia verkkoteknologioita.

**Taulukko 5.2.** Langattomien verkkojen teknologioita.<sup>217</sup>

Tyyppi	Tuotenimi	IEEE standardi	Vuosi	Taajuusalue	Max nopeus	Etäisyys sisätila
PAN	Bluetooth	802.15.1a	1999	2.4 GHz	721 kbit/s	10 m
	v3.0 + HS	-	2009	2.4 GHz	24 Mbit/s	
	Smart	-	2010	2.4 GHz	270 kbit/s	10 m
LAN	Wi-Fi	802.11a	1999	5.7 GHz	54 Mbit/s	35 m
		802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbit/s	35 m
		802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbit/s	38 m
		802.11n	2009	2.4 / 5 GHz	150 Mbit/s	70 m
		802.11ac	2013	5 GHz	3,46 Gbit/s	35 m
MAN	WiMAX	802.16e	2005	2 - 66 GHz	70 Mbit/s	
	WiMAX rel. 2	802.16m	2012	1.4 -5.8 GHz	1 Gbit/s	

### Bluetooth

Yleisimmin käytetty likiverkkotekniikka on Bluetooth. Bluetooth on englanninkielinen käännös muinaisskandinaavisesta kuninkaan nimestä Harald Blåtand II. Harald tiettävästi yhdisti 900-luvulla nykyiset Tanskan ja Norjan alueet yhdeksi kuningaskunnaksi. Miksi ihmeessä tällainen nimi, kun verkkotekniikoiden yhteydessä käytetään yleensä jotain kryptisiä kirjainyhdistelmiä, kuten UMTS tai GPRS? Bluetooth oli alun perin vain työryhmän koodinimi siksi aikaa, kun markkinointiosasto kehittäisi paremman nimen. Markkinointiosasto päätyi tylsään nimeen PAN ([Personal Area Networking](#)). Viikkoa ennen julkis-

<sup>216</sup> Sanastokeskuksen termipankki TEPA, <http://www.tsk.fi/tepa/>.

<sup>217</sup> Lähteinä mm. D. Comer, *Computer Networks and Internets*; M. Sauter, *From GSM to LTE*. Wikipedia: Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, IEEE\_802.11, IEEE 802.16.

tamista selvisi, että PAN:ia ei voisi käyttää tavaramerkkinä, koska se oli liian yleisesti käytetty. Julkistus päätettiin tehdä nimellä Bluetooth, joka sitten voitaisiin vaihtaa kun parempi keksittäisiin; vaan Bluetooth-nimellä mennään edelleen.<sup>218</sup>

Bluetooth-standardin tarkoitus, kuten muidenkin standardien, on välttää erilaisten samaan tarkoitukseen mutta keskenään epäyhteensopivien ratkaisujen syntyminen. Bluetoothin tapauksessa tavoite on tarjota yksinkertainen ja edullinen tapa liittää kevyt päätelaite (kuten kuuloke tai hiiri) langattomasti tietokoneeseen tai puhelimeen. Teoriassa Bluetoothilla voi päästä jopa 100 metrin etäisyyksiin suurimmalla lähetysteholla (100 mW), mutta käytännön sovellukset rajoittuvat yleensä alle 10 metrin etäisyyksiin.

Vaikka Bluetoothia käytetään varsin laajasti, sillä on myös heikkoutensa. Ensimmäisen version turvallisuuteen liittyi ongelmia, joita on myöhemmissä versioissa ratkottu. Siirtonopeus (alle 1 Mbit/s) on moniin sovelluksiin liian pieni ja samalla energiankulutus on joihinkin muihin sovelluksiin liian suuri. Niinpä uudemmissa versioissa on pyritty sekä suurempiin bittinopeuksiin että hyvin matalaan energiankulutukseen. Näitä kahta tavoitetta on kuitenkin lähes mahdotonta saavuttaa samanaikaisesti, joten on päädytty kahteen eri ratkaisuun: Bluetooth **low energy** (markkinointinimellä Bluetooth Smart) ja Bluetooth v3.0.

Hyvin alhainen energiankulutus on välttämätön ominaisuus monissa pienellä paristolla toimivissa laitteissa, kuten kelloissa, sykemittareissa ja muissa antureissa. Käytännössä kulutus riippuu olennaisesti siitä, miten usein päälaitte tarkistaa onko sille tulossa dataa. Tyypillisessä käytössä pariston pitäisi kestää vuodesta kahteen. Bluetooth v3.0+HS (**High Speed**) mahdollistaa jopa 24 Mbit/s nopeuden, mutta tällöin itse Bluetooth-kanavaa käytetään vain yhteyden luomiseen, sen sijaan data siirretään 802.11-linkin kautta.

### *WLAN, IEEE 802.11*

Yleisin langattomiin lähiverkkoihin liittyvä lyhenne näyttää olevan Wi-Fi.<sup>219</sup> Wi-Fi on langattomien lähiverkkojen tuotenimi, jota hallinnoi Wi-Fi Alliance.<sup>220</sup> Termiä WLAN voidaan pitää yleisnimenä, joka kattaa erilaiset suhteellisen pienen alueen langattomat verkot. Nimitykset Wi-Fi, WLAN ja IEEE 802.11 ovat lähes synonyymeja keskenään.

Taulukossa 5.2 on esitetty perustiedot muutamasta standardista, jotka kuvaavat langattomien lähiverkkojen kapasiteetin kehittymistä. Ensimmäinen 802.11-standardi (ei taulukossa 5.2) tarjosi 2 Mbit/s nopeuden, mutta sen käytännön toteutukset jäivät rajallisiksi.

<sup>218</sup> J. Kardach (2008) *Tech History: How Bluetooth got its name, Vikings keep the peace*, *EETimes*, [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1269737&page\\_number=1](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1269737&page_number=1).

<sup>219</sup> <http://www.bing.com/>:n haussa Wi-Fi tuottaa 15,4 miljoonaa ja WLAN 12,6 miljoonaa osumaa (26.11.2018).

<sup>220</sup> Wi-Fi ei virallisesti ole lyhenne sanoista *Wireless fidelity*, vaikka kyseistä termiä on aikanaan käytetty markkinoinnissa, <http://www.wi-fi.org/>.

Ensimmäinen laajemmin käytetty standardi on 802.11b, jolla teoriassa voidaan saavuttaa 11 Mbit/s nopeus. Sovellusten saavuttamana nopeus jää kuitenkin yleensä selvästi alle 10 Mbit/s, muun muassa johtuen käytetystä CSMA/CD-pääsynhallintamenetelmästä (jonka periaatetta käsiteltiin 4. luvussa). Uudempi 802.11g käyttää monimutkaisempaa tekniikkaa, jonka avulla voidaan päästä huomattavasti suurempiin bittinopeuksiin. Kehitys on jatkunut siten, että 802.11n-standardi mahdollistaa 150 Mbit/s nopeuden ja joidenkin arvioiden mukaan jopa 600 Mbit/s nopeuden.<sup>221</sup>

Alkuperäisenä ideana oli, että WLAN-verkkojen taajuusalueiden käyttäminen ei edellytä viranomaislupia, eli ne toimivat ns. vapailla taajuuksilla. Tästä seuraa myös ongelmia, jos esimerkiksi naapurukset eivät pääse sopuun käyttämistään taajuuksista. WLAN-verkkojen kantama riippuu paljon ympäröivästä tilasta. Raskaasta materiaalista tehtyjen seinien läpi sisätilakantama on vain muutamia kymmeniä metrejä. Vapaassa tilassa päästään suunta-antenneja käyttäen jopa kilometrien kantomatkoihin.

WLAN-tekniikan käyttö alkoi yleistyä vuosituhaten vaihteen aikoihin, ensin tehdas- ja toimistotiloissa kiinteiden lähiverkkojen jatkeena. Standardoinnin edistyessä, valmistajien määrän kasvaessa, tekniikan yleistyessä ja kilpailun koventuessa laitteista saatiin hintansa puolesta kotikäyttöön sopivia. Ensimmäiset julkisessa käytössä olevat WLAN-verkot toteutettiin 1990-luvun lopulla.<sup>222</sup> Julkiset WLAN-verkot tunnetaan myös WLAN *hotspot* -nimellä, jolle Sanastokeskus suosittelee käännöksiä *langaton alue* tai *WLAN-alue*. WLAN-alueella tarkoitetaan siis langattomalla lähiverkkotekniikalla toteutettuja, pienen alueen kattavia yleisessä käytössä olevia joko avoimia tai maksullisia langattomia verkkoja. Erään arvioin mukaan maailmassa olisi noin 47 miljoonaa WLAN-aluetta, joista maksullisia olisi noin 8 miljoonaa.<sup>223</sup>

Toisaalta voitaisiin käyttää termiä WLAN-palvelu, jossa olennaisinta käyttäjän kannalta on langaton yhteys Internetiin. Yksinkertaisimmillaan WLAN-palvelun tarjoamiseen tarvitaan ainoastaan WLAN-tukiasema ja Internet-yhteys, joten kynnys WLAN-palvelun tarjoamiseen on matala. Tyypillisessä WLAN-palvelussa on käyttäjien liikennettä rajoitetaan esimerkiksi käyttäjätunnusten ja salasanojen avulla. Samoin käytettävät laskutusperusteet vaihtelevat, osa operaattoreista laskuttaa palvelun käytöstä aikaveloituksella, osalla veloituspäätteena on siirretty datamäärä. Jotkut operaattorit tarjoavat palvelua ainoastaan palvelun tilanneille asiakkailleen, mutta joillakin operaattoreilla on tarjolla yhteyksiä, jotka eivät edellytä pitkäaikaista asiakassuhdetta.

---

<sup>221</sup> Katso myös <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/why-wifi-stinksand-how-to-fix-it>

<sup>222</sup> Yksi ensimmäisiä laajoja WLAN-ratkaisuja oli MobileStarin tekemä sopimus Starbucksin kahviloiden WLAN-palveluiden toteutuksesta vuonna 2001.

<sup>223</sup> <http://www.ipass.com/wifi-growth-map/>



*WiMAX, IEEE 802.16*

Kaupunkiverkot eivät ole olleet kovinkaan menestyksellisiä, vaikka niitä on kehitetty ja tuoteistettu 1990-luvun alkupuolelta lähtien.<sup>224</sup> Lähiverkkojen ja julkisten maan- tai maailmanlaajuisten verkkojen väliin ei ole jäänyt tilaa sen paremmin teknisesti kuin kaupallistikaan. Langattomalla puolella tilanne näyttää jossain määrin erilaiselta. IEEE 802.16:n, josta käytetään tuotenimeä WiMAX, tulevaisuus on avoin kysymys.<sup>225</sup> On ainakin kaksi mahdollista kehityskulkua:<sup>226</sup>

1. WiMAX harmonisoituu ja integroituu osaksi LTE- tai 5G-ratkaisuja.
2. WiMAX voi palvella yksityisten liiketoiminta-alojen, kuten energia- ja kuljetusalan suuryritysten, tiedonvälitystarpeita.

Ensimmäinen vaihtoehto on teknisesti täysin mahdollinen, sillä sekä LTE että WiMAX ovat niin sanottuja *all-IP* teknologioita eli ne perustuvat kokonaisuudessaan IP-pohjaiseen pakettivälitykseen. WiMAXin menestyksen mahdollisuus riippuu siitä pystyykö se palvelemaan joidenkin toimialojen erityistarpeita paremmin kuin julkiset matkapuhelinverkot. Tällöin WiMAXia voidaan joko käyttää WLAN-verkon käyttäjien saavuttamiseen tai yhdistämään paikallisten WLAN-verkkojen tukiasemia paikkoihin, joissa on hyvin nopea Internet-yhteys.<sup>227</sup> Vaikka WiMAX 2.0 tukee 1 Gbit/s nopeutta, mobiilikäyttö rajoittuu nopeuteen 100 Mbit/s. Lisäksi, kuten kaikissa langattomissa verkoissa, käyttäjän todellisuudessa saama nopeus riippuu monista tekijöistä, erityisesti etäisyydestä tukiasemaan. WiMAXin nopeudet ovat käytännössä samaa luokkaa kuin vastaavan matkapuhelinverkon nopeudet.

---

<sup>224</sup> Esimerkiksi kuva 1.8, joka on siis vuodelta 1995, sisältää MAN-verkon, tosin katkoviivalla piirrettyinä. Sen ajan MAN-teknologioita olivat mm. DQDB (*Distributed-Queue Dual-Bus*) ja FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), Nopeat Ethernet-ratkaisut (100 Mbit/s ja 1 Gbit/s) ovat käytännössä syrjäyttäneet nämä MAN-teknologiat.

<sup>225</sup> WiMAX = *Worldwide Interoperability for Microwave Access*.

<sup>226</sup> I. Aldmour, *LTE and WiMAX: Comparison and Future Perspective*, *Communications and Network*, 5, 2013.

<sup>227</sup> Jälkimmäisestä käytetään englannin kielessä nimitystä *backhaul*.