

Radioaaltojen eteneminen

Hacklabin radioamatöörikurssi

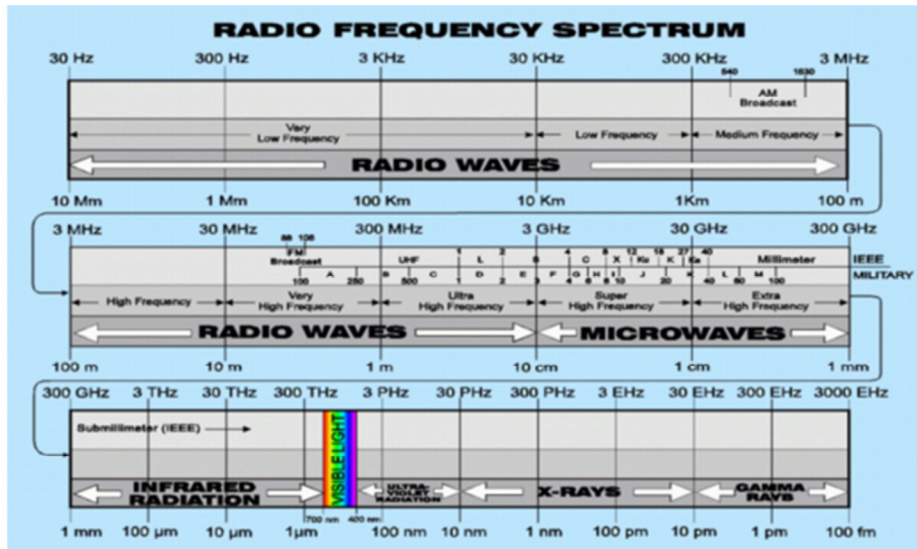
Marjo Yli-Paavola, OH3HOC

Kevät 2016

Radioaaltojen etenemistavat

- Eteneminen ionosfäärissä
- Eteneminen troposfäärissä
- Pinta-aalto
- Erkoisemmat etenemismuodot
- Yleisesti eteneminen riippuu mm.
 - taajuudesta
 - Väliaineesta (ionosfäärin taitekerroin, maanpinnan sähkönjohtavuus, neutraali-ilmakehän ilmiöt)
 - auringon aktiivisuudesta, vuorokaudenajasta, vuodenajasta, kelistä

Sähkömagneettinen spektri



<http://radio.cotdazr.org/license/freqnmap.html>

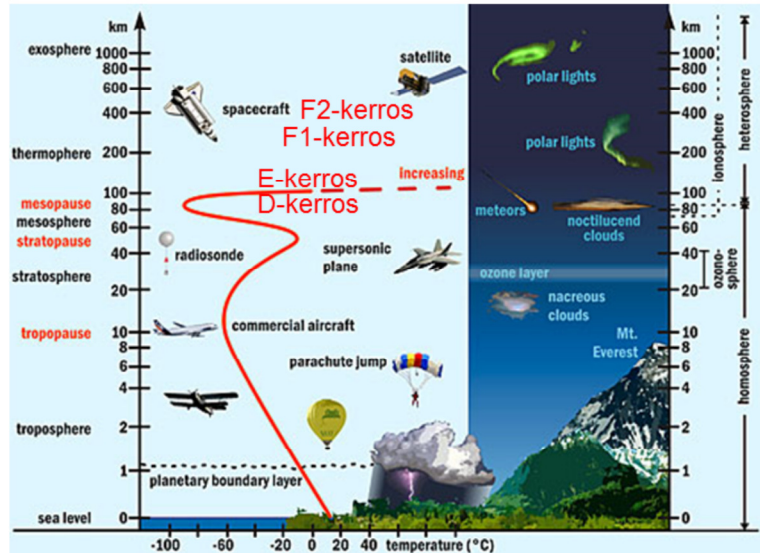
Etenemistavat spektriin nähden

Bandi	Taajuusalue	Pääasialliset etenemismuodot
VLF	3-30 kHz	Pinta-aalto, ionosfääri
LF	30-300 kHz	Pinta-aalto, ionosfääri
MF	300-3000 kHz	Pinta-aalto, ionosfääri (E-kerros)
HF	3-30 MHz	Ionosfääri (E, F1, F2, Es)
VHF	30-300 MHz	Troposfääri, Es, meteorisirona, aurora
UHF	300-3000 MHz	Troposfääri
SHF	3-30 GHz	Troposfääri

(mukailtu kirjasta Radio Propagation Principles and Practice)

Suurin piirtein, ei tarkkoja rajoja!

Eteneminen ionosfäärissä: Ilmakehä



<http://www.kowoma.de/en/gps/index.htm>

- http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/images/atmosphere_mural_jpg_image.html
- Kerrosten korkeudet elävät omaa elämäänsä
 - rajat lämpötilan mukaan
 - Homosfääri, homopaussi ja heterosfääri: homosfäärissä kaasun tiheys sen verran suuri, että törmäilyt sekoittavat eri aineet, heterosfäärissä maan vetovoima erottelee raskaammat molekyylit matalammalle, ylimpänä on lähinnä vetyä ja heliumia
 - Neutraali-ilmakehä, ionosfääri, magnetosfääri ionisoitumisen mukaan
- Troposfääri
 - Tropopaussi navoilla 5km ja päiväntasaajalla 15km, kylmempänä matalammalla (talvella) ja lämpöisempänä korkeammalla (kesällä)
 - Sääilmiöt, lentokoneet, kaasupallot
- Stratosfääri
 - Otsonikerros: lyhytaaltainen säteily absorboituu ja rikkoo happimolekyylejä → rekombinoituvat otsonimolekyyleiksi → absorboivat vuorostaan UV-säteilyä
 - Suojelee lisäksi kosmiselta säteilyltä (suurienergisiä protoneita ja raskaampia atomiytimiä)
- mesosfääri
 - Valaisevat yöpilvet, meteorit höyrystyvät näillä main
- Termosfääri
 - Ionosfääri löytyy alaosasta
 - Kerrostuu, korkeudet vaihtelevat käytännössä
 - Päivällä voimakkaimmillaan, yöllä jäljellä vain yhteen sulautunut F2-kerros

Eteneminen ionosfäärissä: Aurinko

- Säteilee sähkömagneettista säteilyä ja hiukkasia
- Säteily ionisoi ionosfäärin atomeja ja molekyyliä → heijastuspinta radioaaltoille
 - Voi myös estää radioaaltojen etenemisen
 - Lisäksi hetkittäisiä ionisaatiohuippuja (flaret, koronan massapurkaukset, korona-aukot)
- Auringon aktiivisuus vaikuttaa HF-etenemiseen (elektronitiheys)
- Auringonpilkkut ja säteilytaso
 - auringonpilkkuluku (ei pilkkujen lkm) → auringonpilkkujakso nro. 24 (7 ... 17 vuotta, 11 vuotta) (<http://www.sidc.oma.be/>)
 - aurinkovuo F10.7 (kohinatason tarkkailua)
- Auringon oma pyörähdysaika ~27 päivää

- Hiukkassäteilyä kutsutaan aurinkotuuleksi: elektroneita ja protoneita (siis plasmaa), siinä miljoona km/h
- Sähkömagneettista säteilyä voimakkaimmin näkyvän valon alueella, myös muillakin mutta onneksi pahimmat pysähtyy ilmakehään
- Ilmakehän ionisoituminen vuorokauden aikana: ionosfäärissä auringon sm-säteily (UV ja röntgen) irrottaa elektroneita atomeistaan tai hajottaa molekyyliä □ vapaana olevat elektronit muodostavat kerroksen joka voi heijastaa radioaaltoja
 - Elektronitiheys määrää mitä aallonpituuksia voidaan heijastaa (elektronitiheys määrää taitekertoimen) □ elektronitiheys riippuu taas auringon lyhytaikaisesta aktiivisuudesta että auringonpilkkujaksosta
 - Keskipäivällä ionisoituminen on voimakkaimmillaan, yöllä heikoimmillaan (osa kerroksista katoaa) □ rekombinoituminen muttei uutta ionisaatiota tarjolla
 - Röntgensäteily pääsee alimpiin kerroksiin, UV-säteily ylimpiin
- Auringonpilkkut
 - Auringonpilkkujen lukumäärä suhteessa F-kerroksen elektronitiheyteen, molemmat koholla samaan aikaan □ auringonpilkkut ovat yksi indikaattori auringon aktiivisuudesta
 - Auringon kokonaissäteilyn määrän vaihtelu riippuu Auringon pinnalla vallitsevasta magneettikentästä (pilkkujen magneettikenttä ja auringon oma heikko dipolikenttä)
 - Auringonpilkku on magneettikentän voimakas keskus auringon pinnalla □ hidastaa materian kumpuamista syvemmältä □ tummempi koska kylmempi
 - Säteily on voimakkaampaa pilkun ympäristössä, itse pilkku säteilee heikommin
 - Pilkkujen lukumäärä vaihtelee keskimäärin 11 vuoden jaksossa, nousukausi kestää viitisen vuotta ja laskukausi kuutisen
 - Pilkut syntyvät korkeammalle ja vanhetessaan lähestyvät päiväntasaajaa
 - Pilkuilla on napaisuus, useimmiten esiintyvät pareina (ei aina): vaihtavat napaisuutta pilkkujakson vaihtuessa

- Auringonpilkkuluku: luonnehtii määrää, painottaa pilkkuryhmiä pilkkujen lukumäärään nähden ($\text{auringonpilkkuluku}/15 = \text{näkyvällä puolella olevat pilkut}$), siis silmähavaintoja!
- Aurinkovuoto eli kohinamittaus 10.7cm aallonpituudella (2.8GHz) □ objektiivinen indikaattori perusionosfäärilälle, enemmän kohinaa □ enemmän ionisaatiota
- Pyörähdysaika: 24d ekvaattori ja 30d navat → sama hyvä keli voi tulla uudestaan 27d päästä

Eteneminen ionosfäärissä: hyyt

- yksi tai useampi hyyt, heijastuminen maasta tai eri kerroksista
 - lähtökulma pieni pitkille hyyteille
- skippi ja kuollut alue
- Ionosondi: heijastuskorkeuden ja elektronitiheyden mittausta → ionogrammeja
 - kriittinen taajuus (90°), MUF (antennin lähtökulma) ja LUF (D-kerroksen vaimennus)
- greyline
- long path ja echo
- back scatter

- suurin osa yhteyksistä on multihyytyjä, voi kiertää myös maan ympäri
- Ionosondi: lähetetään suoraan ylös tai viistoon signaali, jonka taajuutta kasvatetaan -- > kukin kerros heijastaa sille sopivan taajuuden takaisin, kunnes lopulta signaali painuu kerroksista läpi
- On nykyään modernimpiakin järjestelmiä, esim. EISCAT:n sirontatutkajärjestelmä
- kriittinen taajuus on kohtisuoraan ylöspäin lähetetty korkein takaisinheijastuva taajuus (ionogrammi), tämän jälkeen korkeammat taajuudet eivät enää heijastu takaisin (ionogrammissa esim. foF2 F-kerrokselle)
http://www.sgo.fi/Data/RealTime/ionogram_f.php
- MUF maximum usable frequency lasketaan kriittisestä taajuudesta ja lähtökulmasta, korkein taajuus mitä kahden aseman välillä voidaan käyttää, kasvaa välimatkan kasvaessa
- LUF, alin käytettävä taajuus, D-kerros vaikuttaa eniten (mitä matalampi taajuus sitä enemmän vaimentaa) --> maksimin aikaan LUF nousee kun D-kerroksen ionisaatio kasvaa. Riippuu myös käytettävästä kalustosta, kohinatasosta
- MUF < LUF --> yhteyttä ei voi saada ionosfäärin kautta millään taajuudella, esim. kovan aktiivisuuden kaudella
- greyline in twilight zone (<http://dx.qsl.net/propagation/greyline.html>), 1.8MHz ja 3.5MHz DX, F-kerros saa vielä auringon säteilyä D:n jo kadottua
- Backscatter: lähete siroaa takaisin jostain, esim. asemat liian lähellä toisiaan F-hyytyyn --> signaali siroaa takaisin F-kerrokseen esim. merenpinnasta

Eteneminen ionosfäärissä: D-kerros

- alin, 55 – 90 km korkeudella
- vain päiväsaikaan
- vaimentaa, heijastaa ainoastaan VLF-alueella
 - voi päästää läpi 7 MHz ja 10 MHz signaaleja korkealla lähtökulmalla, >10 MHz helpottaa
- yöaikana ei ole estämässä 1,8 MHz ja 3,5 MHz liikennettä
- kun mikään muu eteneminen ei toimi, siroaminen D-kerroksen kautta saattaa toimia 25–100 MHz (hyvin heikko signaalitaso)

Eteneminen ionosfäärissä: E-kerros

- keskimäinen, 90–150 km
- tämäkin vain päivällä
- voi heijastaa hieman vaimentaen, hyppy maksimissaan ~2000 km
- mielenkiintoinen muiden ilmiöidensä vuoksi (sporadinen E, aurora, meteorit)

- D vaimentaa matalia taajuuksia päivällä, lisäksi kerroksessa on yhä sen verran tiheästi kaasua, että tehoa hukkuu törmäilyihin
- Ei välttämättä erotu F-kerroksen heijastumasta

Eteneminen ionosfäärissä: F-kerros

- Tärkein HF-etenemiselle
- Valoisana aikana jakautunut F1- ja F2-kerroksiin, n. 300 km ja 400 km korkeudella
 - F2 näistä tärkeämpi, ei koskaan täysin poissa
 - korkein ionisaatiotaso kaikista kerroksista
- yksi hyppy melkein 4000 km

- Korkein ionisaatiotaso (elektronitiheys suurin, kaasumolekyylit harvassa) → pystyy heijastamaan korkeampia taajuuksiakin takaisin
- Korkeimmalla maanpinnasta → pidempiä etäisyyksiä

Eteneminen ionosfäärissä: auringon häiriöt

- Auringon häiriöt (geomagneettiset ja ionosfääriset myrskyt)
 - flaret → SID (röntgen), PCA (protonit)
 - CMEt
 - A-indeksi (0-400), K-indeksi (0-9) indikoivat avaruussäätilaa, magneettikentän häiriöisyys
 - nouseva K/Kp → huonontuva HF-keli, parantuva aurorakeli

- Auringon vetovoima ei riitä pitämään kaikkia hiukkasia → koronasta karkaa materiaa aurinkotuulena, jonka Maan magneettikenttä ohjaa enimmäkseen ohi
- flare = roihupurkaus (magneettikentät uudelleenyhdistyvät Auringon pinnalla, vuotaa materiaa pinnalta ja nostaa vielä säteilytasoakin vuotokohdalta) → korkea-energisiä hiukkasia ja säteilyä sinkoutuu, kestää sekunneista tunteihin →
 - sm-säteily 8min maahan → Sudden Ionospheric Disturbance, äkillinen D-kerroksen voimistuminen voi jopa blokata 2-30MHz auringon puolella, kestää ~tunnin
 - 15min nopeat protonit → magneettikenttä ohjaa navoille → Polar Cap Absorption, D-kerroksen voimistuminen napa-alueilla, kestää päiviä
- CME (koronan massapurkautuminen):
 - Koronasta purkautuu nopeita hiukkasia määrissä
 - aurinkotuulella mukana magneettikenttä, jos sopivassa asennossa Maan magneettikenttään nähden niin tunkeutuu magnetosfääriin → geomagneettinen myrsky
 - Magnetosfääriin syntyy voimakas rengasvirta, joka häiritsee maan magneettikenttää → voi syntyä ionosfäärimyrsky kun napojen kautta pääsee partikkeleita ionosfääriin (F-kerroksen ionisaatio putoaa, D kasvaa), aurora, häiriöt liikenteessä voi kestää päiviä (MUF laskee ja LUF nousee, jos kohtaavat niin täysi radio blackout)
- A-indeksi magneettikentän voimakkuuden mitta (päivän keskiarvo), K-indeksi magneettikentän muutoksen mitta rauhallisesta perustilasta 0-9 (3h)
 - K-indeksi on normitettu observatorion leveysasteen mukaan, Kp on planetaarinen (maapallon laajuinen)
- <http://dx.qsl.net/propagation/>

Eteminen troposfäärissä:

- VHF, UHF ja mikroaallot
- Avaruusaaltona, heijastukset vaimentavat
- Troposfäärieteneminen, kanavoituminen erilämpöisistä kerroksista (VHF, UHF DX)
- Troposfäärisirona: siroaminen vesi- tai lumisateesta, sumusta, pilvistä ja pölystä (aina olemassa vaikkakin heikko)

- Ilmakehällä on matallakin oma taitekertoimensa (riippuu lämpötilasta, ilmanpaineesta ja ilmankosteudesta) → radioaallot taipuvat
 - Radiohorisontti on kauempana kuin visuaalinen horisontti
- Kanavoituminen eli inversiokerrokset, lämpöiset kesäillat (maan pinnalla lämmennyt ilmakerros nousee ylös ja alle virtaa kylmää ilmaa)

Pinta-aalto

- Maanpinnan myötä etenevä aaltorintama, yltää horisontin taakse
- Riippuu maan johtavuudesta ja muodosta
 - vesi ja kostea maa hyviä, kuiva maa huono
 - tasainen pinta parempi
- Koskee lähinnä matalia taajuuksia (LF ja MF)

- Maanpinnan johtavuus saa aaltorintaman painumaan vähän alaviistoon
- Hyvä lyhyillä etäisyyksillä
- Toimii päivällä LF ja MF kun D-kerros estää muun toiminnan

Muut ovelat etenemismuodot

- Aurora
- EME
- Meteorisyhteydet
- Sporadinen E
- Satelliitit

Muut ovelat etenemismuodot: Aurora

- CMEn jälkeen navoilta virtaa ionosfääriin elektroneja → ionisoi E-kerrosta
- 28 – 423 MHz
- $K > 5$ → auroraa ilmassa
- Epätasainen ja liikkuva "heijastuspinta" → signaalilaatu huononee, VHF/UHF-alueella pitää käyttää CW:tä (A = aurora)
- VHF/UHF DX

- Aurora: aurinkotuulen nopeat elektronit saapuvat ilmakehään napojen kautta ja ionisoivat ilmakehää voimakkaasti (happi- ja typpimolekyyliden virittämisen lisäksi) → heijastuspinta VHF-signaaleille
- happi: keltavihreä ja verenpunainen, typpi: sininen ja violetti
 - normaalia pidemmät yhteydet mahdollisia VHF:llä
 - lähiyhteyksiä 28MHz:llä! DX todennäköisesti tukossa!
- CW:stäkin tulee suhisevaa

Muut ovelat etenemismuodot: EME

- Earth-Moon-Earth
- 50 MHz – 10 GHz
- Haasteita: vapaan tilan vaimennus, $\frac{1}{2}^{\circ}$ kohde, Doppler siirtymä, Faraday-kiertyminen, epätasainen heijastuspinta...
- Vaatimuksia: herkkä vähäkohinainen vastaanotin, tarpeeksi lähetystehoa, tarkka suuntaus, hyvä antenni (antenniryhmä)

- Haasteet:
 - FSL: 251 dB @ 144 MHz, 270 dB @ 1296 MHz
 - Doppler-siirtymä (kuu liikkuu)
 - Faraday-kiertyminen (ionosfäärin läpi kulkeminen)
 - Kuun pinta on rosainen (libration fading) ja huono heijastin
- EME-yhteys sillä alueella, mille kuu näkyy

Muut ovelat etenemismuodot: Meteoriyhteydet

- Meteori aiheuttaa ionisoituneen vanan palaessaan ilmakehässä E-kerroksessa → riittää hyvin lyhyeen QSOon
 - Hyvin nopea CW
 - paloittain koottu
- 50 MHz, 144 MHz (28 ... 432 MHz)
- 800 ... 2300 km

- voidaan käyttää kaukoyhteyksissä
- vuosittaiset meteorikuurot

Muut ovelat etenemismuodot: Sporadinen E

- Ionisaatiotaso nousee epätavallisen korkeaksi E-kerroksessa
- 28, 50, 144 MHz
- Useimmiten esiintyy kesäkuukausina, ehtoolla tai aamulla
- jopa 2000 km hyppyjä
- "pilvi", joka voi hävitä äkillisesti ja liikkua

- ionosfäärin etenemisen muoto VHF:lle
- Voi myös estää matalamman taajuuden heijastumisen F-kerroksesta → odotettua lyhempiä yhteyksiä
- ihme pilvi, joka syntyy ja voi liikkua tai vain haihtua
 - HF-heijastusmittauksissa näyttää selvärajaiselta metallipinnalta

Muut ovelat etenemismuodot: Satelliitit

- Toistinasemia kiertoradalla
 - useimmiten transponderiasemia: vastaanottavat yhden taajuuskönnän ja lähettävät sen sellaisenaan toisella taajuusalueella
- VHF, UHF
- AMSAT-organisaatio
 - <http://rats.fi/toiminta/amsat-ch/>

- LEO- tai elliptisillä radoilla → liikkuvat maahan nähden
- <http://www.amsat.org/amsat-new/index.php>

Bandit ja käyttöalueet – HF

Pientä tiivistelmää bandeista (puuttuu mm. WARC-bandit)

- 160 m (1,8 MHz)
 - päivällä kärsii vaimennuksesta → maa-aalto
 - yöllä DX
- 80 m (3,5 MHz)
 - vähemmän kärsii vaimennuksesta → maa-aalto, lyhyet kotimaan QSOT
 - yöllä DX
- 40 m (7 MHz)
 - päivällä kotimaan bandi, kärsii pilkkuminimistä
 - yöllä Eurooppa
- 20 m (14 MHz): DX
- 15 m (20 MHz): päivällä Eurooppa, yöllä DX
- 10 m (28 MHz): DX heikommillakin laitteilla. Herkkä keleille, kiinni pilkkuminimin aikaan, yleensä auki aamusta muutama tunti auringonlaskun jälkeen

Bandit ja käyttöalueet – V/U/SHF

- 6 m (50 MHz): pilkkumaksimissa DX ionosfäärin kautta, myös sporadinen E. Muutoin troposironta
- 2 m (144 MHz): troposfäärikanavoinnilla 2000 km, auroralla, EMEllä, troposironta
- 70cm (433 MHz): troposfäärikanavoinnilla 1000 km (ainakin), troposironta, EME

Radioamatöörien taajuusalueet

LF	135.700–137.800 kHz		UHF	432–438 MHz	70 cm
MF	472–479 kHz			1240–1300 MHz	23 cm
	1810–1855 kHz			2300–2450 MHz	13 cm
	1861–1906 kHz	160m	SHF	3400–3408 MHz	
	1912–2000 kHz			5650–5850 MHz	
HF	3500–3600 kHz	80 m		10.000–10.250 GHz	
	7000–7200 kHz	40 m		10.300–10.370 GHz	
	10100–10150 kHz	30 m		10.450–10.500 GHz	
	14000–14350 kHz	20 m		24.000–24.250 GHz	
	18068–18168 kHz	17 m	EHF	47.000–47.200 GHz	
	21000–21450 kHz	15 m		76.000–81.500 GHz	
	24000–24900 kHz	12 m		122.250–123.000 GHz	
	28.000–29.700 MHz	10 m		134.000–141.000 GHz	
VHF	50–52 MHz	6 m		241.000–250.000 GHz	
	70.000–70.300 MHz	4 m			
	144–146 MHz	2 m			

Luettavaa

- ARRL Handbook
- Ian Poole, G3YWX: Radio Propagation, Principles & Practice
- Eric P. Nichols, KL7AJ: Propagation and Radio Science
- Heikki Nevanlinna: Avaruussää
- Heikki E. Heinonen OH3RU: Tiimissä hamssiksi 1 & 2
- <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>
- <http://www.spaceweather.com/>
- http://www.sgo.fi/index_f.php
- <http://www.amsat.org/amsat-new/tools/predict/>
- http://science.nasa.gov/headlines/y2008/30apr_4dionosp_here.htm