

Loftnet og bylgjuútbreiðsla

ásamt

“Sviðsstyrkur nærri loftnetum - öryggismörk”

Námskeið ÍRA til amatörprófs
haustið 2019

Vilhjálmur Þór Kjartansson, TF3DX

Loftnet í hnotskurn

Rafsegulbylgja er samtvinnað segulsvið og rafsvið sprottið af riðstraumi. Breytilegt segulsvið spanar breytilegt rafsvið, sem aftur spanar breytilegt segulsvið og svo koll af kolli. Úr verður bylgja sem breiðist út og dofnar minna með fjarlægð en einungis rafsvið eða segulsvið gera hvort um sig.

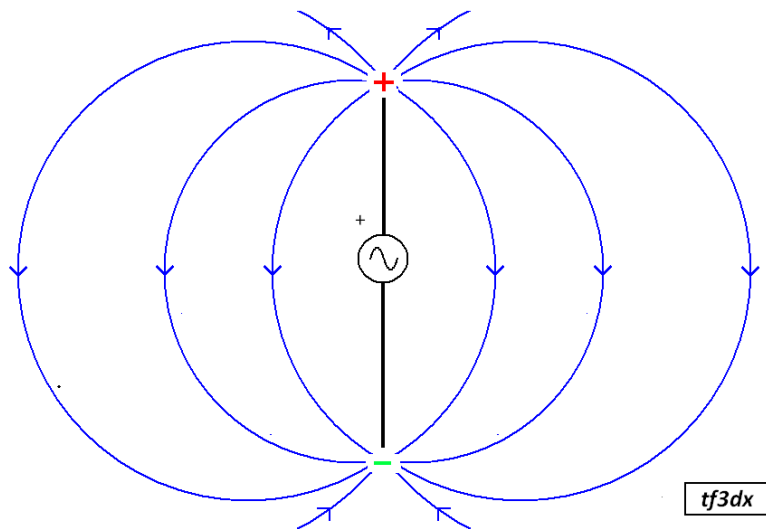
Straumurinn einn og sér dugir ekki til að framkalla útgeislun, hversu langa leið straumurinn gengur skiptir jafnmiklu máli. **Margfeldi straumgildis og lengdar gefur sviðsstyrk.** Loftnet af engri lengd geislar ekkert, óháð því hve straumurinn væri mikill.

Algeng loftnet nota leiðara sem eru einangraðir í endann. Við fyrstu sýn er ekki að ljóst að í þeim geti gengið straumur! En í hverri sveiflu af riðstraumi ganga hleðslur fyrst aðra leiðina og snúa svo til baka hina leiðina. Þetta er hliðstætt þétti, hann "leiðir" riðstraum þótt plöturnar séu einangraðar hver frá annarri.

Loftnet er rafrás, sem af ásetningi er glennt upp til að opna leið fyrir rafsegulsvið út í alheiminn þegar sent er. **Öll loftnet vinna jafn vel hvora leiðina sem er**, svo allar umbætur styrkja móttekið merki til jafns við sent merki. Það bætir þó ekki læsileika sem takmarkast af utanaðkomandi truflun, sem styrkist jafnt og æskilega merkið. Því duga oft ótrúlega lítil eða illa aðlöguð loftnet ekki síður en önnur til móttöku.

Rafsvið

Á sama hátt og við notum hugtakið þyngdarsvið til að lýsa togkrafti **án snertingar** á milli massa, er hugtakið **rafsvið** notað til að lýsa kraftverkun á milli **hleðslna**. Hleðsla dregst að hleðslu með gagnstæðu formerki en milli samkynja hleðslna verkar fráhrindikraftur. Til að myndgera sviðið eru teiknaðar **kraftlínur**. Stefna línu á hverjum stað er stefna krafts sem myndi verka á litla jákvæða prufuhleðslu. Sviðið er í öllu rúminu, ekki bara á línunum, en þéttleiki þeirra er mælikvarði á styrk sviðsins.



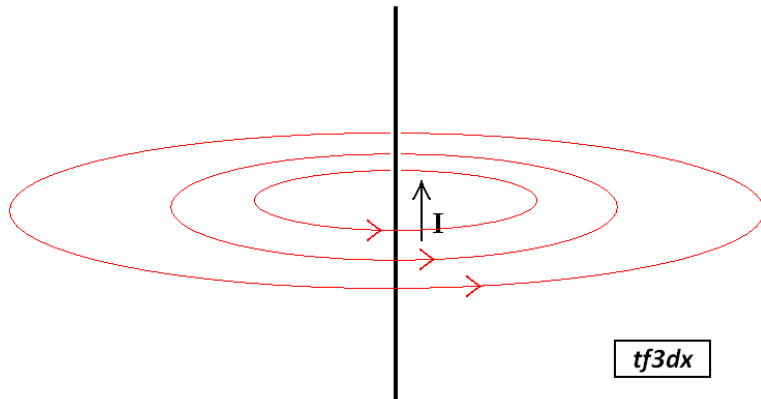
1. mynd Rafsvið frá hleðslu á endum loftnets.

Styrkurinn ræður kraftinum sem verkar á hleðslu, en jafngild eining sem hentar hér er volt á metra, **V/m**. Einnig má nota mV/m eða $\mu\text{V/m}$ fyrir veikt svið. Mestur spennunur er **langs** eftir kraftlínu en enginn þvert á hana. Færsla þvert á kraft felur ekki í sér neina vinnu.

1. mynd sýnir rafsvið frá hleðslu á endum loftnets. Það **dofnar** með vaxandi fjarlægð.

Segulsvið

Frá **hleðslu stafar** alltaf **rafsviði**, en ef hún er **á hreyfingu** bætist **segulsvið** við. Kraftlínur vegna **rafstraums** mynda **hringi** í kringum leiðarann. Með því að telja kraftlínur sem flæða í gegn um einingarflatarmál þvert á stefnu línanna, fæst styrkur sviðsins. Mælieiningin er Weber á fermetra, Wb/m^2 . Hægt er sýna að þessi eining jafngildir amperi á metra, **A/m** . Sviðið **dofnar** með vaxandi fjarlægð.



2. mynd Segulsvið frá straumi í miðju loftnets.

Rafsegulbylgja

Ef rafhleðsla er ekki einungis á jafnri hreyfingu, heldur **eykur hraðann** eða **minnkar**, myndast **rafsegulbylgja** sem breiðist út með hraða ljóssins. Þessi bylgja er **víxlverkun** sveiflandi segulsviðs og sveiflandi rafsviðs, sem **hvort spanar hitt** og viðheldur þannig bylgjunni. Hún **dofnar minna** með fjarlægð en það staka rafsvið og segulsvið sem áður er lýst. Það er **lykillinn að langdrægni** radiótækninnar. Sú uppgötvun skipti sköpum.

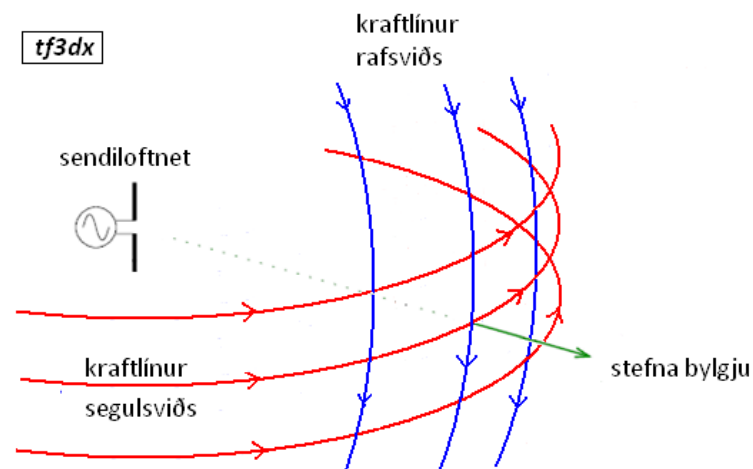
Skautun rafsegulbylgju

3. mynd sýnir afstöðu rafsviðs og segulsviðs í bylgju frá lóðréttu loftneti. Þau eru **hornrétt hvort á annað**, en jafnframt **hornrétt á stefnu bylgjunnar**. Það er **algild regla**.

Því er nóg að tilgreina stefnu annars hvors sviðsins til að þekkja heildarmynd bylgju sem kemur úr þekktri stefnu. Rafsviðið hefur orðið fyrir valinu í þessu skyni, stefna þess skilgreinir **skautun** bylgjunnar.

Frá móttakanda séð fellur rafsviðið **samsíða** ofan í mynd loftnetsleiðarans eins og hún horfir við honum. Athugandi staddur við upphaf grænu pílunnar á 3. mynd fær til sín lóðrétt skautaða bylgju, með lárétt liggjandi segulsviði. Þegar sendiloftnetið liggur lárétt, snýst þetta við.

Ef athugandinn væri staddur miklu ofar en loftnetið á 3. mynd, er ljóst að rafsviðið hallar í átt að loftnetinu. Engu að síður er tilhneiging til halda áfram að kalla þá skautun “lóðrétt”, sérstaklega þegar algeng hermunarforrit birta reiknað stefnumynstur.



3. mynd Rafsvið og segulsvið lóðrétt skautaðrar rafsegulbylgju.

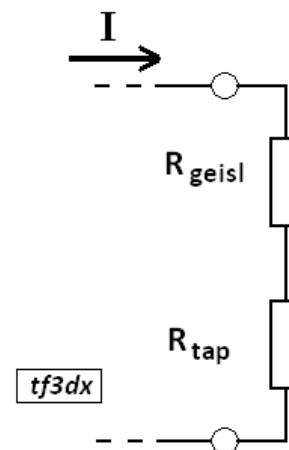
Geislunarviðnám loftnets

Aflið sem geislar út **hverfur úr rafrás** loftnetsins, rétt eins og afl sem beytist í varma í viðnámi. Mælt í tengistað loftnets **birtist** því raunviðnám, kallað geislunarviðnám. Gildi þess er návæmlega það sem tekur útgeislað afl við þann straum sem í gengur í fæðipunktinum. Það ræðst af því hvar í loftnetinu fæðipunkturinn er staðsettur.

Í raunverulegu loftneti er tap af ýmsu tagi. Leiðarar hafa viðnám og einangrarar leka. Jarðskaut hafa viðnám. Spanaður straumur sem vermir nógu nálæga jörð og hluti veldur líka tapi. Spólur í loftnetum hafa viðnám. Allt dregst þetta saman í **eitt tapsviðnám** í fæðipunkti, raðtengt geislunarviðnáminu.

Sami straumur gengur í báðum, svo reikna má nýtni loftnets þannig:

$$\frac{P_{geisl}}{P_{inn}} = \frac{I^2 R_{geisl}}{I^2 (R_{geisl} + R_{tap})}$$
$$\eta = \frac{R_{geisl}}{(R_{geisl} + R_{tap})}$$



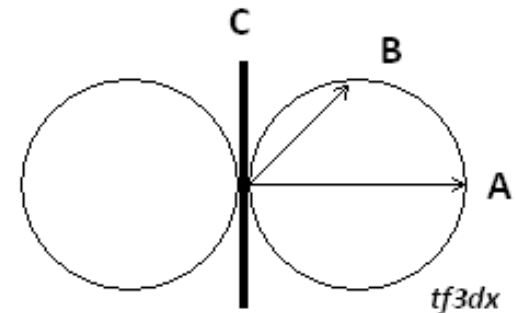
4. mynd Ígildisrás í fæðipunkti.

Venjulega þarf ekki að hafa sérstakar áhyggjur af nýtni loftnets ef það er a.m.k. verulegur hluti úr bylgjulengd að stærð. Því minna sem hvers konar loftnet er í **samanburði við bylgjulengd**, þeim mun lægra verður geislunarviðnámið. Þá gera allir tapsvaldar sig meira gildandi. Á 80 m þurfa góð stangarloftnet á bíl að sætta sig við nýtni sem er aðeins **nokkur prósent**. Geislunarviðnámið er örfá ohm, en tugir eiga við um tapsviðnámið. Það stafar mest frá stórra spólu sem stillir loftnetið í resónans. Ástandið er mun verra á 160 m, miklu betra á 40 m og prýðilegt á 20 m með sömu lengd á stöng.

Stefnuvirkni

Ekkert raunverulegt loftnet dreifir útgeisluðu afli jafnt í allar stefnur rúmsins, eins og jafnlýsandi kúla myndi gera. Slíkt ímyndað loftnet er þó oft notað sem viðmiðun og kallast **alstefnugeislari**. Afl sem raunverulegt loftnet sparar við sig í einhverja stefnu skilar sér í aðrar stefnur. Það leggur grunninn að **ávinningi** loftneta.

Stuttur bútur af beinum leiðara dreifir útgeislun í fleti sínum eins og 5. mynd sýnir. Sviðsstyrkurur í sérhverja stefnu er í samræmi við **lengd pílunnar** í þá stefnu.

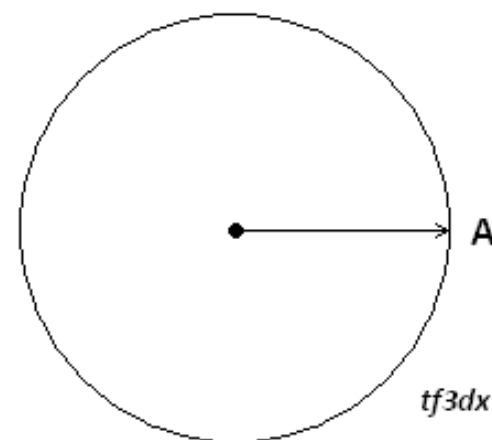


5. mynd Stefnuvirkni stutts búts, í fleti leiðarans.

Skýringin á stefnuvirkni beina leiðarans á myndinni liggur í því sem áður var sagt, að vegalengd straums skiptir ekki minna máli en gildi hans. Athugandi sem horfir í **enda** leiðarans **sér enga straumlengd**, hjá honum er sviðsstyrkur núll. Eftir því sem hann færir sig til annarrar hvorrar handar, verður **ofanvarp lengdarinnar** til hans stærra og stærra, uns lengdin blasir öll við honum séð þvert á leiðarann. Því er útgeislun mest í stefnu A, minni í stefnu B og engin í stefnu C. Þessu mynstri er lýst svo, að það hafi 2 **lauf**.

Þó gengið sé umhverfis leiðarann í fleti sem liggur þvert á hann miðjan, verður engin breyting á straumlengdinni sem blasir við. Búturinn er því **alátta** í þeim fleti með hámarksútgeislun, eins og 6. mynd sýnir.

Þessi flötur er stundum kallaður H – flötur eftir segulsviðinu, því í honum liggja segulkraftlínur. Flöturinn á 5. mynd kallast með sama hætti E – flötur eftir rafsviðinu. Í honum er stefnuvirknin **tvíátta**.



6. mynd Stefnuvirkni stutts búts, í fleti þvert á leiðarann.

Nánar um lítinn bút

Einhver kann að spyrja hvers vegna verið sé að fjalla um lítinn bút, þegar lítil loftnet eru ekki ýkja gagnleg í reynd til sendinga. Í fyrsta lagi skýrir það almennt hvernig útgeislun tengist stefnu og vegalengd straumsins sem veldur henni. Það eykur skilning á því hvernig fyrirkomulag leiðara ræður útgeilsun loftnets.

Í öðru lagi er stuttur bútur “**Legókubburinn**” í nútíma **hermiforritum** fyrir loftnet. Forritin reikna straummynstur á leiðurum loftnets á svipuðum nótum og við eigum eftir að skoða, en með meiri nákvæmni. Síðan er leiðurunum skipt upp í litla búta (segments) og hverjum bút gefið fast straumgildi, sem næst raunverulegu meðalgildi yfir bútin. Útgeislun hvers búts fylgir **þekktum reglum**, eins og sjá má af 5. og 6. mynd að ofan. Þá snýst hermunin einfaldlega um það að reikna útgeislun frá fjölda lítilla búta og leggja allar niðurstöðurnar saman. Þetta kostar reiknivinnu svo mikla, að hún varð ekki fýslileg fyrr en tölvur komu til sögunnar. Venjulega leggur forritið það í hendur notandans að velja fjölda búta. Það er m.a. málamiðlun milli reiknitíma og nákvæmni. Of fín uppdeiling getur þó verið til baka vegna takmarkana á þeim líkönum sem forritið leggur til grundvallar, svo lesa þarf leiðbeiningar sem fylgja í þá veru. Í öllu falli er þekking á eiginleikum stutts búts bitastætt veganesti til að skilja hermun og það sem hún skilar.

Ávinningur loftneta

Uppgefinn ávinningur loftnets er jafnan miðaður við **bestu stefnu** þess. Eins og sést á 5. mynd eyðir stutti búturinn engu afli í stefnu leiðarans og litlu afli þar í kring. Í staðinn skilar hann 50 % meiri aflþéttni (W/m^2) í sína bestu stefnu en algeislari myndi gera með sama afli frá sendi. **Ávinningur stutta bútsins er því 1,5** miðað við algeislara. Það þýðir að algeislari þyfti 15 W til að skila jafnsterku merki og búturinn gerir í sína bestu stefnu með 10 W, svo dæmi sé tekið. Þetta er **fræðilegur ávinningur** stutts búts, sem helgast af því hverning hann dreifir aflinu út í rúmið. Sama á við um öll loftnet, meðfætt útgeislunarmynstur þeirra fer bara eftir stærð þeirra og lögun. Í reynd bætist svo við speglun af jörð, sem ekki verður farið nánar út í hér.

Til að finna **raunverulegan** ávinning, þarf að **margfalda** fræðilegan ávinning **með nýtninni**. Því er þó oftast sleppt fyrir loftnet í fullri stærð, en gæti þó skipt máli ef annars gott loftnet er mjög nærri jörð eða öðrum tapsvaldi.

Algengast er að gefa ávinning loftneta upp í **desibelum** fremur en hlutfallstölu afls. Desibel er **lógaritminn af hlutfallinu**, margfaldaður með 10 vegna forskeytisins desi. Aflhlutfallið 1,5 jafngildir þá $10 \log(1,5) = 1,76 \text{ dB}$. Alsiða er að gefa til kynna hver viðmiðunin er með því að rita 1,76 dBi, þar sem **litla i stendur fyrir “isotropic”** og vísar til alstefnugeislara (isotropic radiator).

Notkun dB hefur þann kost að **margföldun** hlutallstalna **breytist í samlagningu** á dB gildum og deiling í frádrátt. Þegar stefnumynstur er kvarðað í desibelum, fremur en sviðsstyrk, breytist lögun laufanna nokkuð en heildarmyndin er sú sama.

Hálfbylgjutvípóll er algengt loftnet sem er einfalt er að búa til. Því er eðlilegt að bera kosti flóknari loftneta saman við það. Tvípóllinn hefur samskonar stefnumynstur og stutti búturinn á 5. mynd, nema hvað lafin eru ívið þrengri og geilarnar víðari. Helmingarnir vinna ekki fullkomlega saman í skástefnur vegna fasviks sem stafar af mismunandi fjarlægð frá móttakanda. Þvert á leiðarann er hins vegar enginn munur og þangað er samlegðin fullkomin. Því fæst sterkari útgeislun í bestu stefnu en frá stuttum bút, svo ávinningur hálfbylgjutvípóls er **1,64 eða 2,15 dBi**.

Til að finna hlutfallslegan ávinning einhvers loftnets miðað við tvípól, þarf að deila í ávinning þess miðað við alstefnugeislara með tölunni 1,64. Sé unnið með desibel þarf að draga $\log(1,64) = 2,15$ frá. Reglan verður þá þessi:

$$G \text{ (dBd)} = G \text{ (dBi)} - 2,15 \quad \text{og} \quad G \text{ (dBi)} = G \text{ (dBd)} + 2,15$$

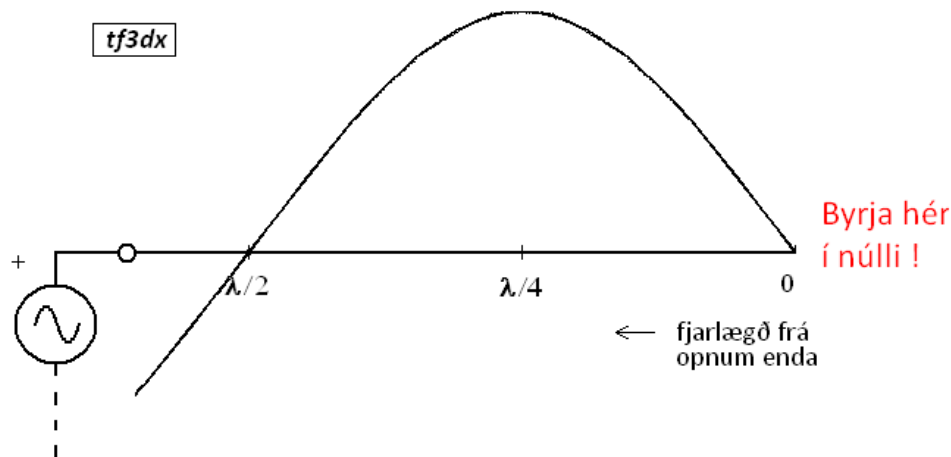
Litla d stendur fyrir “dipole” og vísar til hálfbylgjutvípóls.

Straummynstur á leiðara

Riðstraumur sem er sendur út á leiðara ferðast eftir honum eins og bylgja. Þegar straumbylgjan kemur að **opnum enda**, á hún engra kosta völ annarra en að **snúa við**, sem jafngildir 180° fasavendingu. Í bláendann ganga því tveir jafnsterkir straumar hvor í sína áttina svo útkoman verður núll. Þetta er lykilinn að því að rekja mynstur straums eftir leiðara, það á alltaf að byrja **í núlli frá opnum enda**!

Eftir því sem fjarlægð frá enda vex, færast bylgjurnar í vaxandi mæli út úr mótfasa og summa þeirra stígur.

Kvartbylgju frá endanum er útbylgjan 90° fyrr á ferðinni en í endanum, en endurkastaða bylgjan hefur tafist um 90° . Þá eru þær orðnar samfasa og **summan nær hámarki**.



7. mynd Straummynstur rakið frá opnum enda.

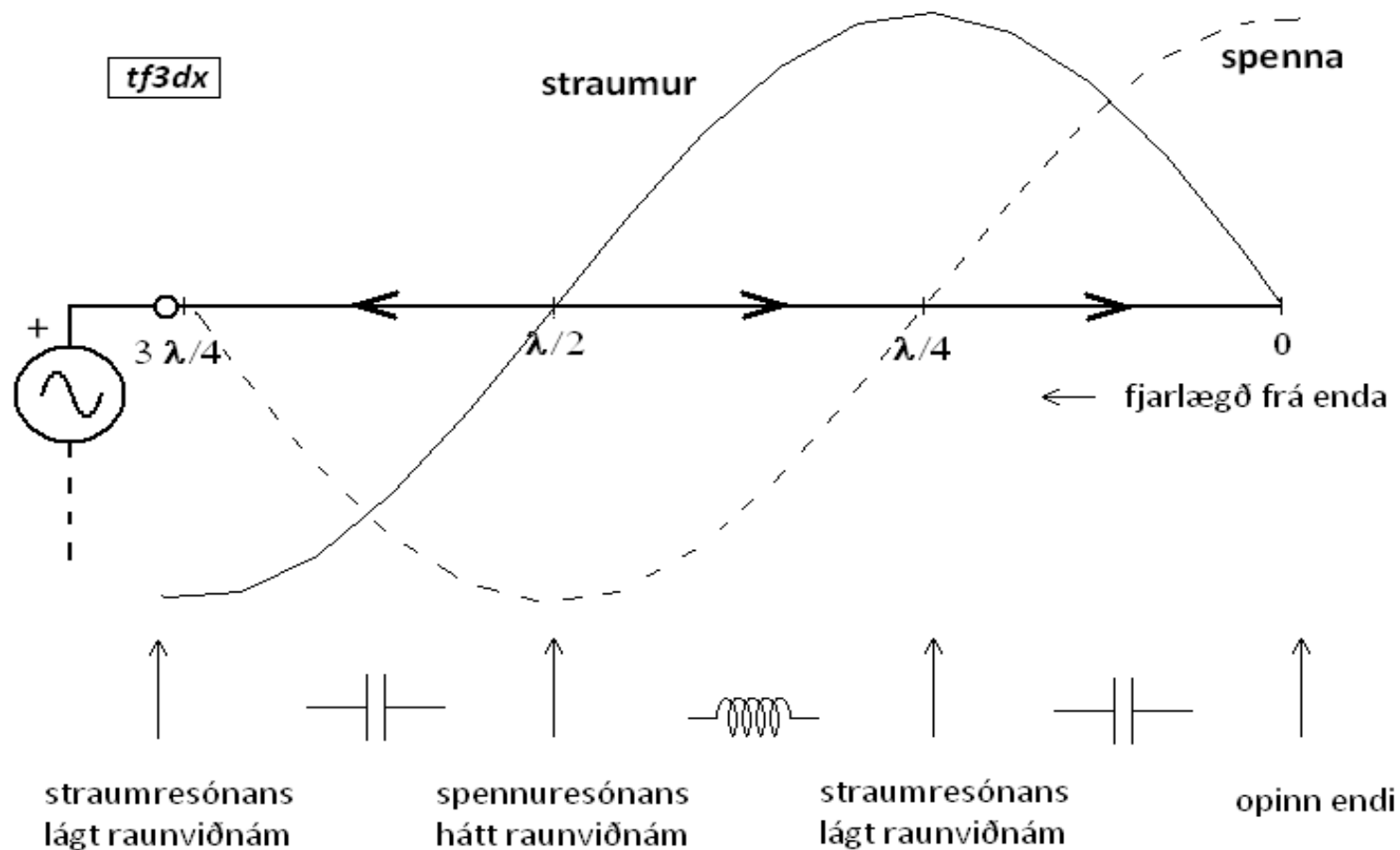
Með sama hætti er aftur kominn mótfasi hálfbylgju frá enda, **og svo koll af kolli**.

Mynstrið hefur **sínuslög**un, fullkomna ef bylgjan deyfðist ekkert á leið sinni fram og til baka. Það er góð nálgun fyrir straum á loftnetsleiðara.

Þrátt fyrir þessa fallegu sínuslöggun er áriðandi að gera sér grein fyrir því að 7. mynd sýnir **ekki bylgju** á ferð eftir leiðaranum, heldur samanlagðan straum tveggja bylgna sem renna með ljóshraða hvor á móti annarri. Þetta mynstur kallast **standbylgja**, kannski varasamt heiti, en fyrri hluti orðsins minnir á að mynstrið stendur kyrrt. **Raunveruleg bylgja** ferðast hins vegar og **flytur orku**.

Spennumynstur

Spenna og straumur eru óaðskiljanlegir þættir í bylgju sem ferðast eftir leiðara. Með einföldum dæmum úr rásafræði er hægt að ganga úr skugga um að stefna orkuflutnings (afls) **snýst við ef annað hvort** straumnum **eða** spennunni er **umpólað**, ekki hvoru tveggja. Straumurinn umpólast við opinn enda eins og áður segir, svo spennan gerir það ekki. Endurköstuð spennan er því samfasa þeirri aðvífandi og summa þeirra í hámarki. Kvarthbylgju frá enda eru þær komnar í mótfasa og summan í núll. Þannig fæst reglan: Samanlögð **spenna** er alltaf í **hámarki** þar sem samanlagður **straumur** er í **lágmarki** og öfugt. Þetta mynstur endurtekur sig eins langt og leiðarinn nær frá enda, sjá 8. mynd.



8. mynd Mynstur straums og spennu á loftneti, ásamt reglubundinni hegðun tvinnviðnáms, Z. *Skoðið þessa mynd gaumgæfilega* eftir því sem lestri vindur fram.

Nánari skoðun

Skýringarnar á ýmsu því sem fram kemur í þessum kafla eru ekki ýkja flóknar, en þeim væri ofaukið í þessu samhengi. Þær byggja á vektorsamlagningu sínussveiflna.

Fasi í straummynstri. Þó hvor straumbylgjan um sig, út eða endurköstuð, tefjist jafnt og þétt í fasa með vaxandi vegalengd, hefur summa þeirra **alls staðar sama fasa innan hálfbylgjubugs**. Fasinn breytist um 180° þegar farið er yfir núll (lágmark) í samfelldum leiðara. Með öðrum orðum, stefna straumsins snýst við og er öfug uns kæmi að nýju núlli ef leiðarinn er nógu langur. Vendingin er sýnd sem formerkisbreyting þegar ferillinn fer yfir leiðarann.

Fasi í spennumynstri. Algjör **hliðstæða gildir um spennumynstrið**, spennan umpólast þar sem ferill hennar fer í gegnum núll. Fasi samanlögðu spennunnar á hverjum stað er 90° úr fasa við strauminn á sama stað, ýmist á undan eða eftir. Það ræðst af fjarlægð frá opna endanum. Þetta er eiginleiki rýmdar eða sjáflspans.

Tvinnviðnám loftnets. Hvar sem skorið væri á leiðarann í **fyrstu fjórðungsbylgju** frá opna endanum, er tvinnviðnámið horft þar inn **rýmdarkennt**. Í næsta fjórðungi er það spankennt, svo aftur rýmdarkennt og koll af kolli svo langt sem leiðarinn nær frá enda. Þetta sést vel á 8. mynd.

Resónans

Á kvartbylgjufresti er Z hvorki spankennt eða rýmdarkennt, það er **einkenni á resónans**. Tala má um straumresónans eða spennuresónans eftir því hvort er í hámarki.

Hátt viðnám eða lágt

Sé loftnetið fætt í straumhámarki, eins og við eina eða þrjár kvartbylgjur frá enda á 8.mynd, mætti ætla að viðnámið væri núll eins og spennan. En eins og áður var sagt er nokkur nálgun gerð við gröf eins og þetta. Þó ekki væri nema vegna þess að loftnetið **geislar frá sér** þarf það afl inn á sig. Spenna getur því **ekki verið núll** á þessum stöðum, **en hún er lág**. Ef lóðrétt kvartbylgja er fædd á móti fullkominni jörð er viðnámið **36 Ω** . Lítilsháttar reikningur sýnir að slíkt viðnám tekur 100 W við **60 V**. Sú spenna er lág miðað við stærðargráðuna **kílóvolt** í toppi.

Með sama hætti er straumur **ekki alveg núll í lágmarki**, en nógu lítill til að fæðiviðnám á slíkum stað er gjarnan í **kílóohmum**!

Val á fæðistað

Sammiðjukapal (kóax) ætti að tengja við loftnet í straumhámarki. Algengast er að nota kapal með $50\ \Omega$ bylgjuviðnámi, sem fellur gjarnan að algengu viðnámi í straumhámarki og resónans. Slíkan kapal má leggja hvar sem er, en tap er nokkurt og versnar með lengd, tíðni og standbylgju á kaplinum.

Sammiðjukapall hentar því alls **ekki nærri spennuhámarki**, né loftnetum sem ekki eru í resónans. Í þeim tilvikum næst betri árangur með **samsíða fæðilínu**. Hún hefur bylgjuviðnám á bilinu $300 - 600\ \Omega$ og mun minna tap, því frekar sem minna er af öðru en lofti í bilinu á milli leiðaranna.

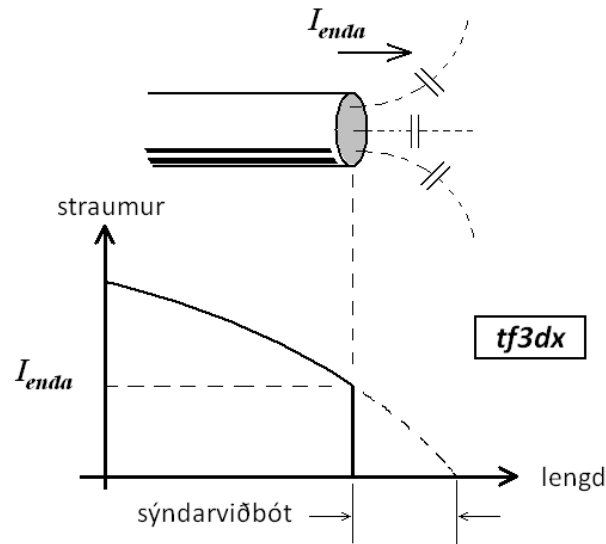
Önnur leið er að nota loftnetsaðlögun við sjálfan fæðistaðinn, sem ræður við að breyta tilfallandi viðnámi í þau $50\ \Omega$ sem henta sendi beint eða sammiðjukapli. Hún gæti líka eytt span- eða rýmdarviðnámi þegar loftnetið er ekki í resónans.

Lenging og stytting

Eiginleikar loftnets ráðast alltaf af lengd í hlutfalli við bylgjulengd. Ef eitthvað vantar upp á til að fá **straumresónans** á tiltekinni tíðni, er loftnetið rýmdarkennt eins og 8. mynd sýnir. Þá þarf að lengja leiðarann, en það er líka hægt að tengja **spólu** í fæðistað sem upphefur rýmdaráhrifin. Með sama hætti má tengja þétti við loftnet sem er of langt. Oftast er raðtengt, hliðtenging hækkar resónansviðnámið.

Endahrif

Reyndar er það svo, að straumurinn í bláenda raunverulegs loftnets er **ekki alveg núll** ef grant er skoðað. Leiðarinn hefur óhjákvæmilega svolítið þverskurðarflatarmál. Það hefur smávegis rýmd, líkt og plata í þétti, til umhverfisins. Þó rýmdin sé lítil er spennan mjög há, og straumurinn merkjanlegur. Því þarf í reynd að **stytta leiðarann** um nokkur prósent eftir þvermáli og nálægð við jörð. Þetta er stundum fínstillt með endurtekinni prófun, eða giskað á eitthvað í námunda við **5%** af kvartbylgju.



9. mynd Endahrif

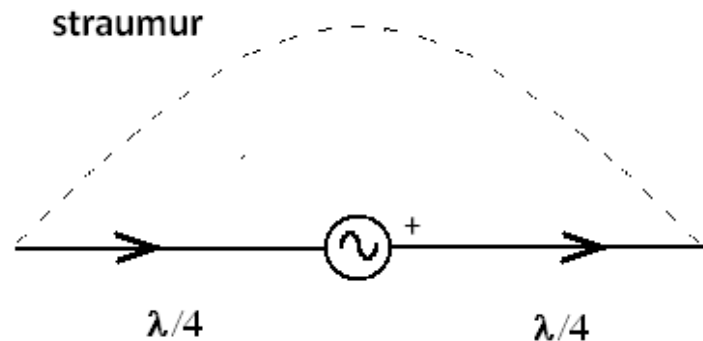
Hitt skautið

Á 8. mynd er látið liggja milli hluta í hvað “hinn endi” lindarinnar er tengdur, en þar þarf að ganga **jafn mikill straumur** og fer út í loftnetið. Í grunninn er um **tvennt að ræða**, tengja við annan hluta loftnetsins eða nota eitthvað sem hefur þann megin tilgang að vera **straumgleypir án útgeislunar**. Það kallast **mótvægi**. Gott dæmi um slíkt er jörðin, húspak úr málm eða yfirbygging bíls. Ef fætt er í straumlágmarki dugir eiginlega hvað sem er, en **straumhámark** gerir kröfur um **lágt viðnám**.

Hálfbylgjutvípóll

Hálfbylgjutvípóll er gott dæmi um fyrri kostinn, loftnet sem þarf ekkert mótvægi. Kvartbylgja, sem er opin í hinn endann, hefur lágt viðnám við resónans og er því í sjálfu sér ágætur straumgleypir. Hvor helmingur þjónar sem slíkur fyrir hinn. Þó báðir geisli, er það enginn ókostur, straumstefnan er sú sama báðum megin og leggst á eitt um að senda út í átt til lesandans.

Fæðiviðnám í miðju hálfbylgjutvípóls er 72Ω ef ekki gætir áhrifa frá jörð eða öðru sem er nærri.



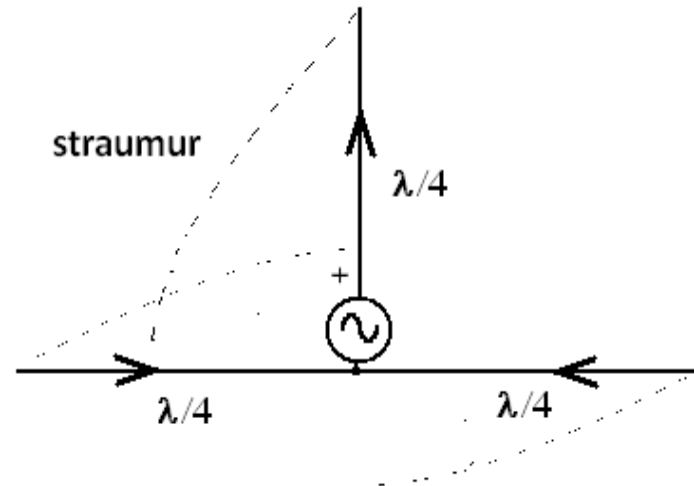
10. mynd Hálfbylgjutvípóll

Þegar leiðari loftnets er tekinn svona í sundur og lind skotið þar inn, verður að rekja straummynstrið aðskiljanlega frá sitt hvorum enda. Fæðipunkturinn situr þá uppi með hverja þá stöðu sem kann að vera á stað í straummynstri hvorum megin. Engu að síður skalast straumgildin svo að jafnmikill straumur sé hvorum megin við lindina. Þá fær sá hlutinn sem kynni að hafa hærra geislunarviðnám meira afl.

Ef heildarlengd milli opnu endanna stítt hvorum megin er heilt margfeldi af hálfbylgjum, er loftnetið í resónans óháð því hvar fæðipunkturinn er. Annars er það hvergi í resónans.

GP (ground plane) loftnet

11. mynd sýnir dæmi um loftnet sem notar mótvægi. Lóðrétti hlutinn er **geislarinn**. Straumurinn í neðri enda hans skiptist til helminga á láréttu kvartbylgjurnar, en til **sitt hvorrar handarinnar**. Því upphefst útgeislun þeirra algjörlega í stefnu til lesandans, og svo vel í aðrar stefnur, að geislunarviðnámið í mótvæginu **er ekki nema um 1Ω** .



11. mynd GP loftnet

Í þessu tilviki kemur tenging við láréttu kvartbylgjurnar í stað tengingar við góða jörð. Þær kallast því **jarðgeislar (radíalar)**.

Ef jarðgeislarnir eru **of nálægt jörð** spanast **tapsviðnám** í þeim. Þá er til bóta að **hliðtengja** fleiri og dreifa á stefnuhringinn. Þar er komin skýring á “plani” í nafninu.

Svona kvartbylgjuloftnet er hálfur hálfbylgjutvípóll. Fræðilegt fæðiviðnám er því **36Ω** ef mótvægið er viðnámslaust. Yfirleitt er betra að nota einangraða jarðgeisla sem er lyft eitthvað frá jörðu, en að tengja í jörðina sjálfa.

Langur vír

Loftnet sem eru ekki lengri en hálfbylgja hafa stefnuvirkni eins og 5. og 6. mynd sýna. Með lengri leiðara verður **fasavending** á straumnum eins og áður er getið. Þá vinnur ekki öll lengdin saman að því að gefa útgeislun þvert á leiðarann. Þegar hún nær heilli bylgjulengd fást **2 bugir í mótfasa** og **núll þvert á leiðarann**. Stakur fjöldi buga hefur alltaf útgeislun þvert á en sléttur fjöldi enga. Stefnulauf hvorum megin verða jafnmörg lengdinni í hálfbylgjum talið og þau ystu styrkjast með vaxandi lengd.

Yagi

Samsíða hálfbylgjutvípól er lögð alveg **ótengd** hálfbylgja. Hún kallast þá **sníkjustak** (parasitic element). Í henni spanast straumur vegna nálægðar við drifna stakið. Með því að víkja örlítið frá réttri resónanslengd sníkjustaksins er hægt að **stilla fasann** á straumi þess. Sé það aðeins **of langt** leggst útgeislun stakanna saman í áttina frá sníkjustaki að tvípól en dofna mjög í öfuga átt. Sníkjustakið kallast þá **endurvarpari** (reflector). Með því að hafa sníkjustakið ívið **of stutt** snýst þetta við. Þá kallast það **beinir** (director). **Fleiri beinar**, hver á eftir öðrum í sendistefnuna, **auka ávinninginn**. Að fjölga endurvörpum með sama hætti í hina áttina **dugir ekki**, aftan við þann fyrsta er næsta lítil úgeislun til að snúa við! Almennigur hefur til skamms tíma þekkt þessi loftnet undir heitinu “greiða” og notað til sjóvarpsviðtöku á VHF og UHF. Þá geta stök verið um tugur, en tilsvarendi bóma væri of löng fyrir **HF böndin**. Þar eru **3 stök algengust**, endurkastari, drifinn tvípóll og beinir.

Enskur orðalisti

<i>alátta</i>	omnidirectional
<i>alstefnugeislari</i>	isotropic radiator
<i>ávinningur</i>	gain
<i>einátta</i>	unidirectional
<i>geislari</i>	radiator
<i>geisli</i>	radial
<i>jarðgeisli</i>	ground radial
<i>lauf (loftnets)</i>	lobe
<i>lykkja</i>	loop
<i>mótvægi</i>	counterpoise
<i>nýtni</i>	efficiency
<i>skautun</i>	polarization
<i>standbylgja</i>	standing wave
<i>stefnuvirkni</i>	directivity
<i>tómarúm</i>	free space
<i>tvíátta</i>	bidirectional

Helstu dB tölur

<i>aflhlutfall</i>	<i>db</i>
2	3
4	6
10	10
$\frac{1}{2}$	- 3
$\frac{1}{4}$	- 6
$\frac{1}{10}$	- 10

Takið eftir að deiling í hlutfalli breytist í frádrátt í dB. Með sama hætti breytist margföldun í samlagningu.

Afl fylgir 2. veldi af spennu eða straumi, sem þýðir þá tvöföldun á dB tölunum. Í raun þarf aðeins að muna dB tölurnar 3 og 10 fyrir afl til að geta skrifað upp þessar töflur!

Getið þið séð af töflunni að fimmföldun í afli eru 7 dB?

Minnispunktur

TF3DX 3. mars 2016
(nokkrar breytingar okt. 2019)

Bylgjuútbreiðsla
Námskeið ÍRA haust 2019

Gróf skipting tíðnisviða

Samhengi tíðni og bylgjulengdar: $\lambda \text{ (m)} \times f \text{ (MHz)} = 300$

30 kHz – 300 kHz	LF	Low Frequency	(langbylgja)
300 kHz – 3 MHz	MF	Medium Freq.	(miðbylgja)
3 MHz – 30 MHz	HF	High Freq.	(stuttbylgja)
30 MHz – 300 MHz	VHF	Very High Freq.	144 – 146 MHz 2m amatörband
300 MHz – 3 GHz	UHF	Ultra High Freq.	430 – 440 MHz 70 cm amatörband

“Gömlu böndin”

160 m	1,8 MHz
80 m	3,5 MHz
40 m	7 MHz
20 m	14 MHz
15 m	21 MHz
10 m	28 MHz

“WARC böndin”

1979

30 m	10 MHz
17 m	18 MHz
12 m	24 MHz

Keppni ekki leyfð og aðeins mors á 30 m.

Tíðnisvið amatöra eru fleiri, sjá nákvæmar upplýsingar á heimasíðu ÍRA:

<http://www.ira.is/tidnisvid/>

1. Jarðbylgja (ground wave)

Jarðbylgjan skríður út eftir yfirborði jarðar. Hún dofar hraðar en bylgja í lofti (eða tómrúmi) vegna taps í jörðinni. Langdrægni vex með bylgjulengd.

Deyfingin er þeim mun meiri sem:

- ❖ **tíðnin er hærri**, stuttbylgja dregur skammt yfir land
- ❖ **leiðni í yfirborði jarðar er minni**, saltur sjór er næstum tapslaus

Jarðbylgja er **stöðug** og óháð jónhvolfinu.

Lóðrétt loftnet, allt með sama fasa (um hálfbylgja eða minna) er gott.

2. Stökkbylgja (sky wave)

Stökkbylgja fer upp í loftið og speglast niður aftur.

Tvennt kemur til greina:

- ☐ háloftabylgja (ionospheric wave) sem speglast af jónhvolfi
- ☐ veðrahvolfsbylgja (tropospheric wave) af hita- eða rakaskilum

Sé ekki annað tekið fram er átt við háloftabylgju. Veðrahvolfið getur komið við sögu á 10 m og styttri bylgjulengdum, VHF og UHF.

Stökkbylgja er mjög breytileg (**QSB**) og oft ekki til staðar. Jónhvolfinu má líkja við skýjafar, þar sem skýin er frjálssar rafeindir í u.þ.b. 60 – 400 km hæð.

Lárétt skautuð loftnet henta vel, sérstaklega fyrir hátt horn.

3. Krítisk tíðni (critical frequency, f_c)

Ef sent er beint upp í loftið með hækkandi tíðni, kemur að því að jónhvolfið er of gisið fyrir bylgjulengdina og sendingin fer í gegn út í geiminn.

Krítiska tíðnin er mjög breytileg, með:

- ❖ **geislun frá sól**, sérstaklega útfjólublárri (UV) - einkum háð sólblettum
- ❖ **hnattstöðu**, því lægri sólarhæð - því minni jónun

Ísland á 64° norður er illa sett m.v. þéttbýlli svæði jarðar.

Hér er krítisk tíðni oft fyrir neðan 3,5 MHz (80 m).

4. MUF (maximum useable frequency, “múffið”)

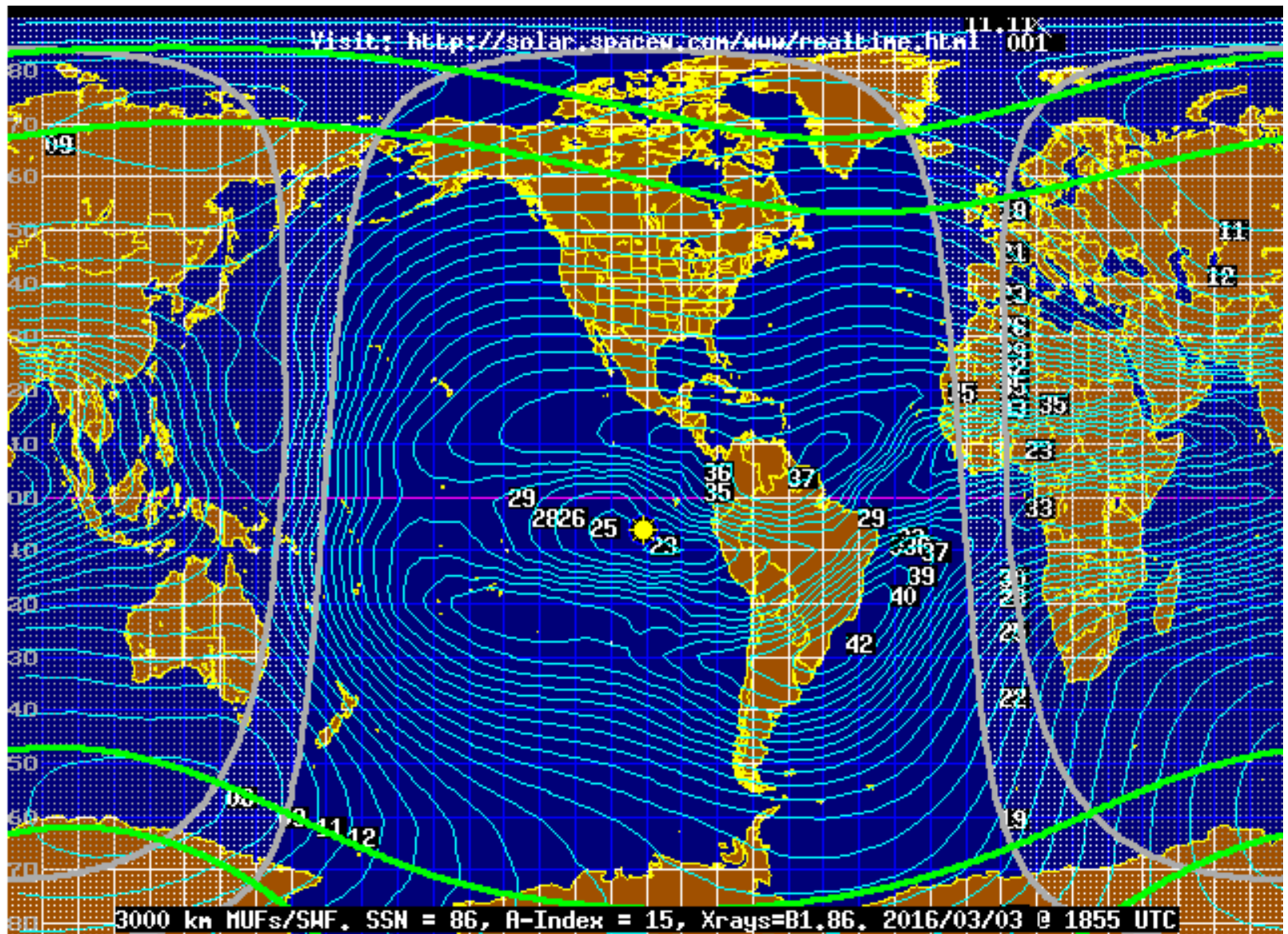
Ef bylgjan kemur skáhallt á jónhvolfið er eins og það sé þéttara. Þessu má, svona á einföldum nótum, líkja við girðingu úr neti.

Því lægra sem útsendingarhornið er, þeim mun flatar (lengra frá lóðréttu) fellur bylgjan á jónhvolfið. Þá er hægt er að nota styttri bylgjur, þ.e. **hærri tíðni**, án þess að missa þær út í geim.

Lægra útsendingarhorn gefur líka lengra stökk, svo MUF fer eftir fjarlægðinni sem stökkið spannar. Vegna kúlulögunar jarðar næst ekki lengra stökk en um það bil 2000 km frá E-lagi og 4000 km frá F₂ lagi.

Uppgefin gildi á MUF miðast oft við þessar fjarlægðir, eða meðaltalið 3000 km, sjá:

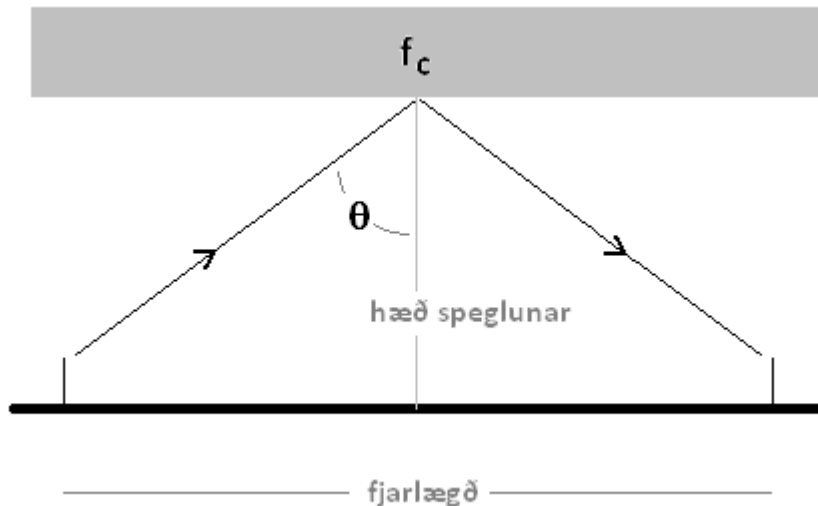
<http://www.spacew.com/www/realtime.php>



<http://www.spacew.com/www/realtime.php>

6. Samhengi MUF og f_c

Fyrir þá sem vilja, er samhengi MUF og f_c á speglunarstað þetta:

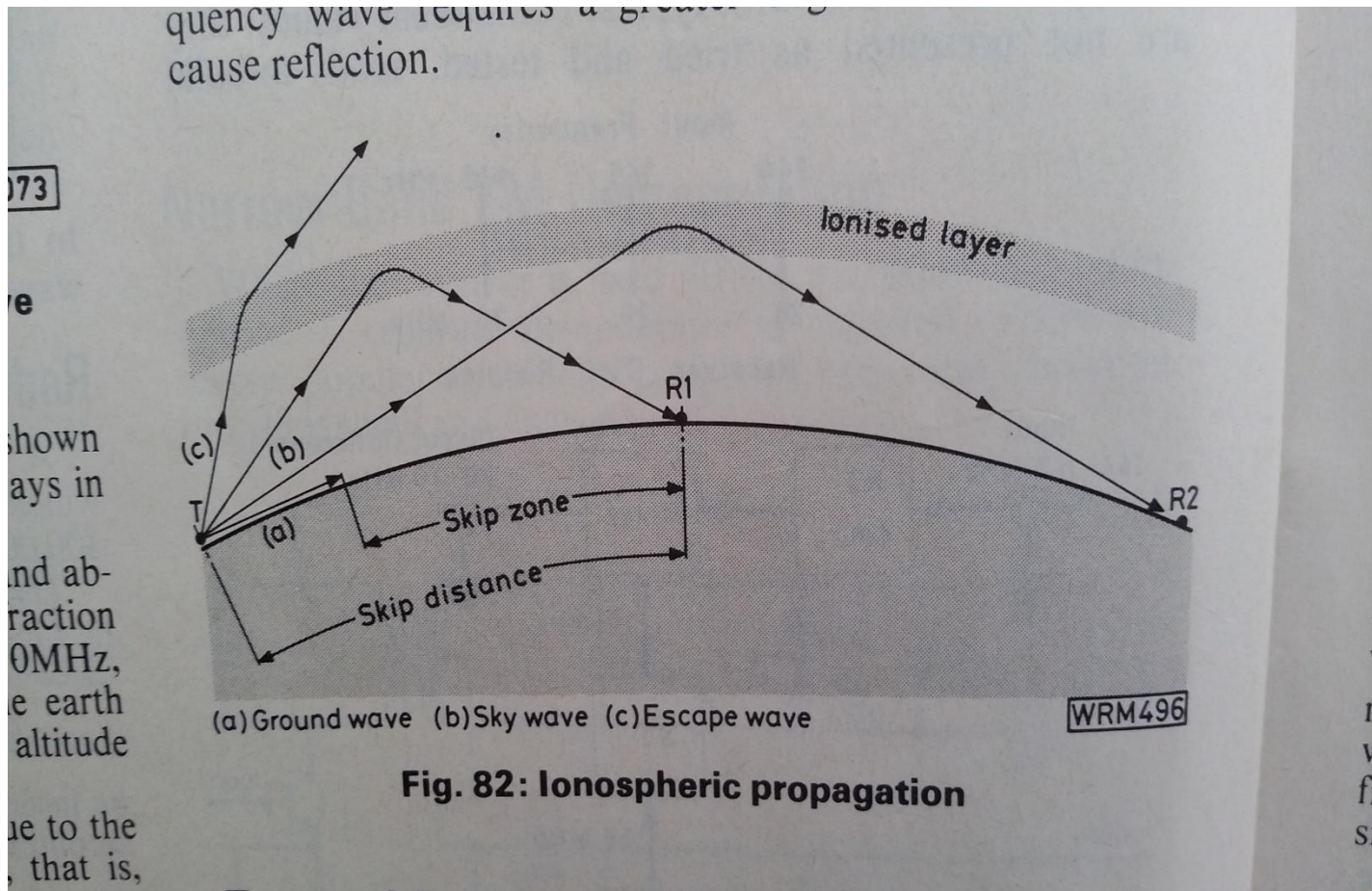


$$\text{MUF} = \frac{f_c}{\cos \theta}$$

Eftir því sem **fjarlægð** vex frá því að vera engin:

- * stækkar hornið θ
- * $\cos \theta$ minnkar frá gildinu 1
- * **MUF hækkar.**

7. Dautt svæði (skip zone)



Passport to Amateur Radio, GW3JGA "Practical Wireless"

8. Jónhvolfið

Hér fyrir aftan koma nokkrar glærur úr fyrirlestrum sem ég hef haldið í ÍRA.

Takið sérstaklega eftir hegðun **D-lagsins**:

- deyfing
- sem vex gríðarlega með vaxandi bylgjulengd
- hverfur þegar sólar nýtur ekki við í D-lags hæð, um 60 km
- “skrúfar fyrir” lægri böndin, 80 m og 160 m, sem og MW útvarp frá öðrum löndum að degi til

Hvernig verður jónhvolfið til?

- Eins og alltaf til framleiðslu, þarf

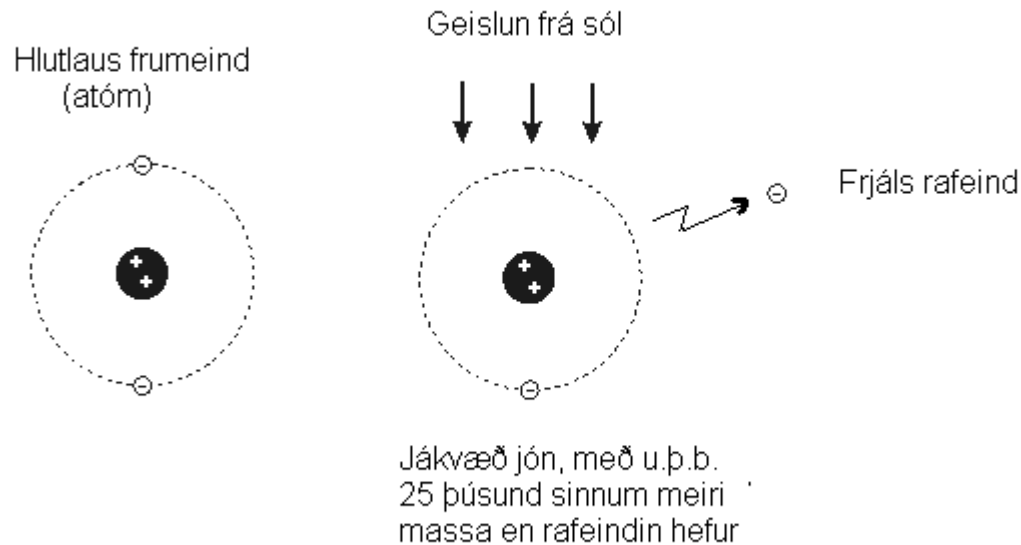
EFNI + ORKU

- **Efnið** Kemur úr gufuhvolfinu, einkum súrefni (O) og köfnunarefni (N)
- **Orkan** Kemur að mestu leyti frá sólinni, einkum með rafsegulbylgjum:

útfjólublátt ljós (UV)

mjúkir Röntgengeislar (soft X-rays)

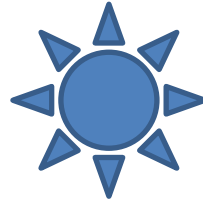
Jónun loftfrumeindar



Helsta loft sem jónast:

O_2	(súrefnissameind)
O	(súrefnisfrumeind)
NO	(köfnunarefnismónoxíð)

Hæð jónalags

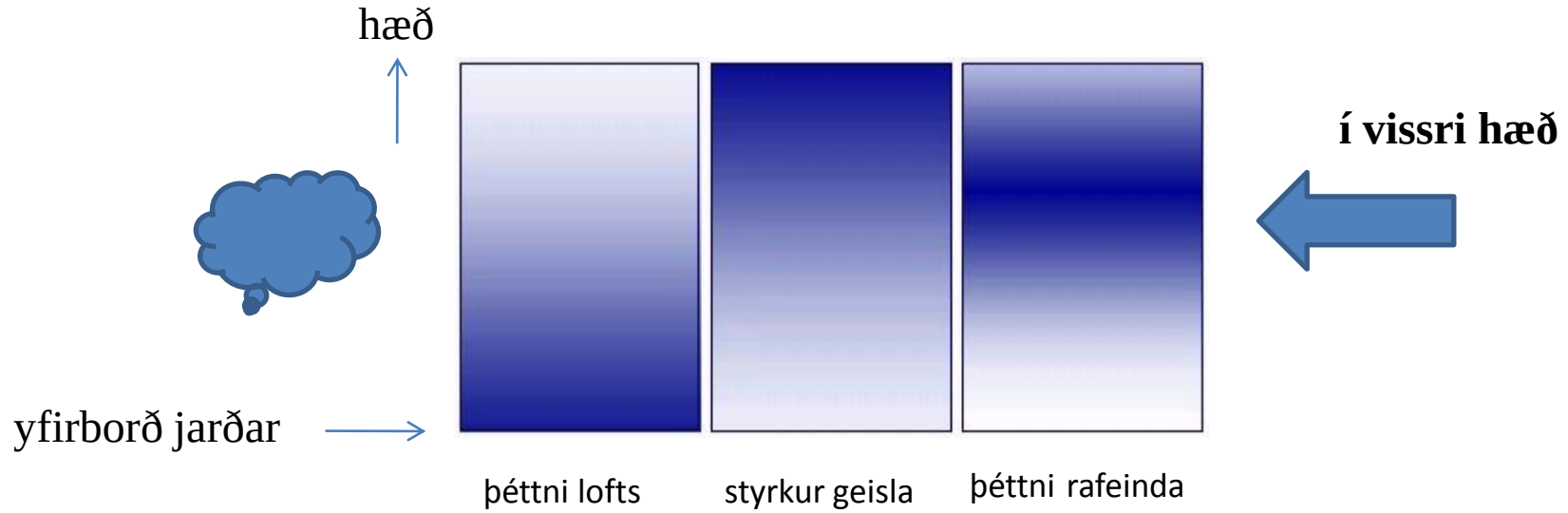


EFNI

+ ORKA

=

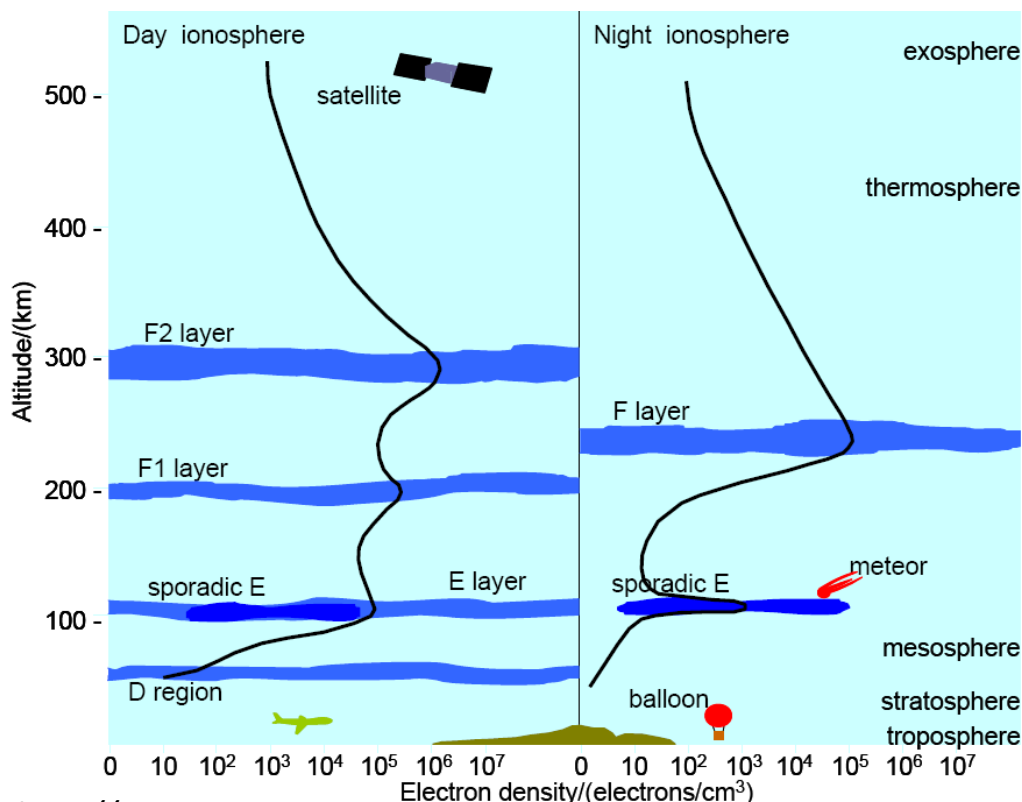
JÓNALAG



Jónalögin eru fleiri en eitt

dagur

nótt



<http://www.ips.gov.au>

Ástæðan er

- fleiri en ein loftgerð jónast
- hver loftgerð þarf ákveðinn orkuskammt
- orkuskammtur geislunar fer eftir bylgjulengd hennar
- mismunandi bylgjulengdir draga mislangt niður í gufu-hvolfið

Í raun eru lögin ekki aðskilin, heldur toppar í þéttni, eins og svörtu línurnar sýna.

Hvað verður um sveifluorku rafeindanna?

- geislar út sem spegluð bylgja (reflection)
- eyðist í varma við árekstur (absorption)

Líkur á árekstri vaxa með minni hæð og þéttara lofti:

- D-lag (≈ 60 km) er fyrst og fremst deyfilag
- F-lög (200 – 400 km) góður spegill (hærri böndin)
- E-lag (≈ 120 km) þokkalegur spegill (lægri böndin), nokkur deyfing

Deyfing í D lagi

D lagið **fylgir dagsbirtu**. Því lægri sem tíðnin er, þeim mun meiri er deyfingin í D-laginu. Hún "skrúfar fyrir" **miðbylgjuútlarp** frá Evrópu til Íslands á daginn. Sama gildir um 160 m og 80 m að mestu leyti. Áhrif D lags **á 20 m** og hærra eru að **jafnaði óveruleg**.

$$\text{Deyfing (dB)} = \frac{\text{deyfing við 1 MHz}}{f^2 \text{ (MHz)}}$$

Tökum dæmi um 2 dB deyfingu við 14 MHz (20 m) í D-laginu, og reiknum með að þar dugi 1 W til að hafa samband. Þá fæst fyrir lægri bönd:

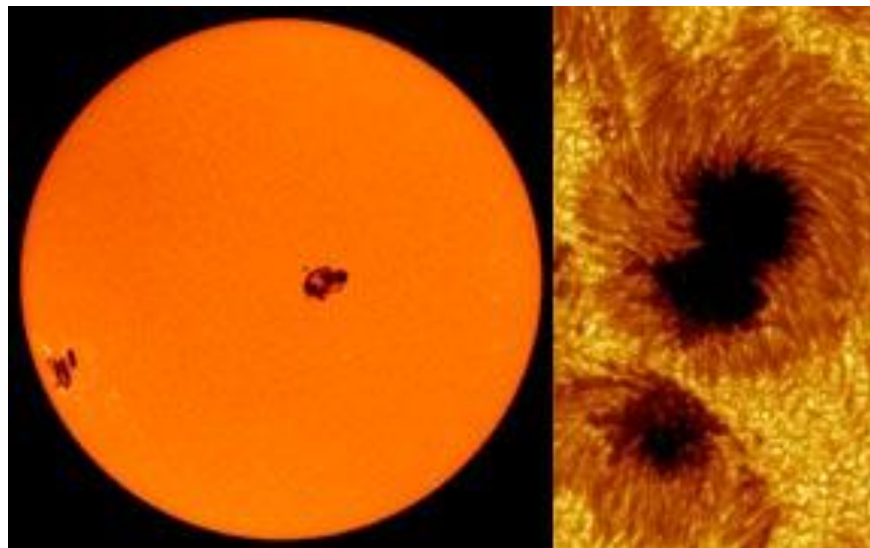
20 m	2 dB	1 W
40 m	8 dB	4 W
80 m	32 dB	1 kW
160 m	128 dB	4 TW (milljón MW)

Norðurljósaagnir ná niður í D-lags hæð og valda jónun þar. Deyfing af þeirra völdum, háð agnastreymi, er því háð tíðni með sama móti og í dagsbirtu.

Hvað eru sólblettir?

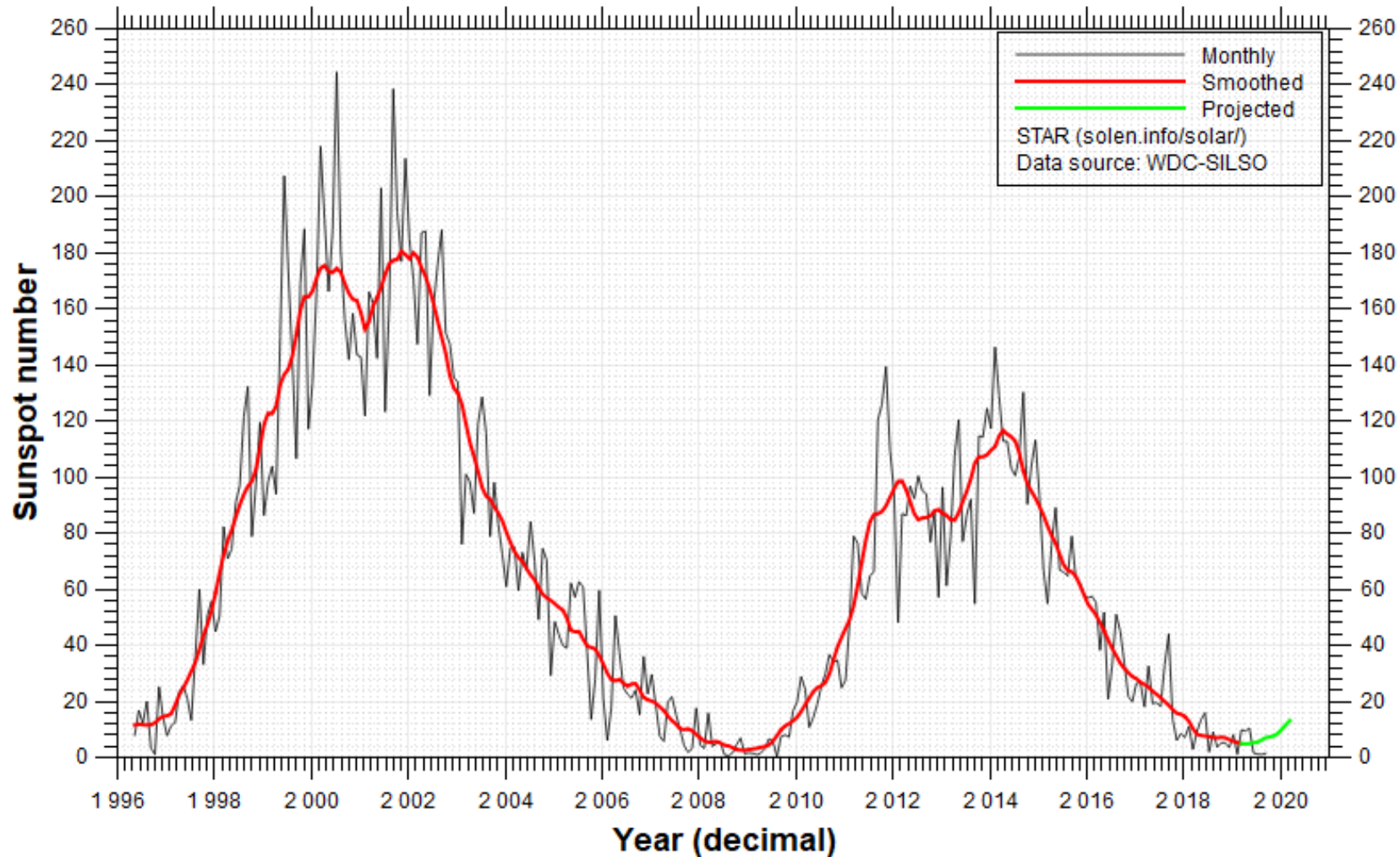
- blettir, gjarnan stærri en jörðin, sem birtast og hverfa á yfirborði sólar. Endast í daga eða vikur
- virðast dökkir í samanburði við heitara yfirborðið í kring, en eru í raun um 3700 °C og því ágætlega lýsandi

sólblettaflekkir
(sun spot groups)



stækkuð mynd
af 2 sólblettum

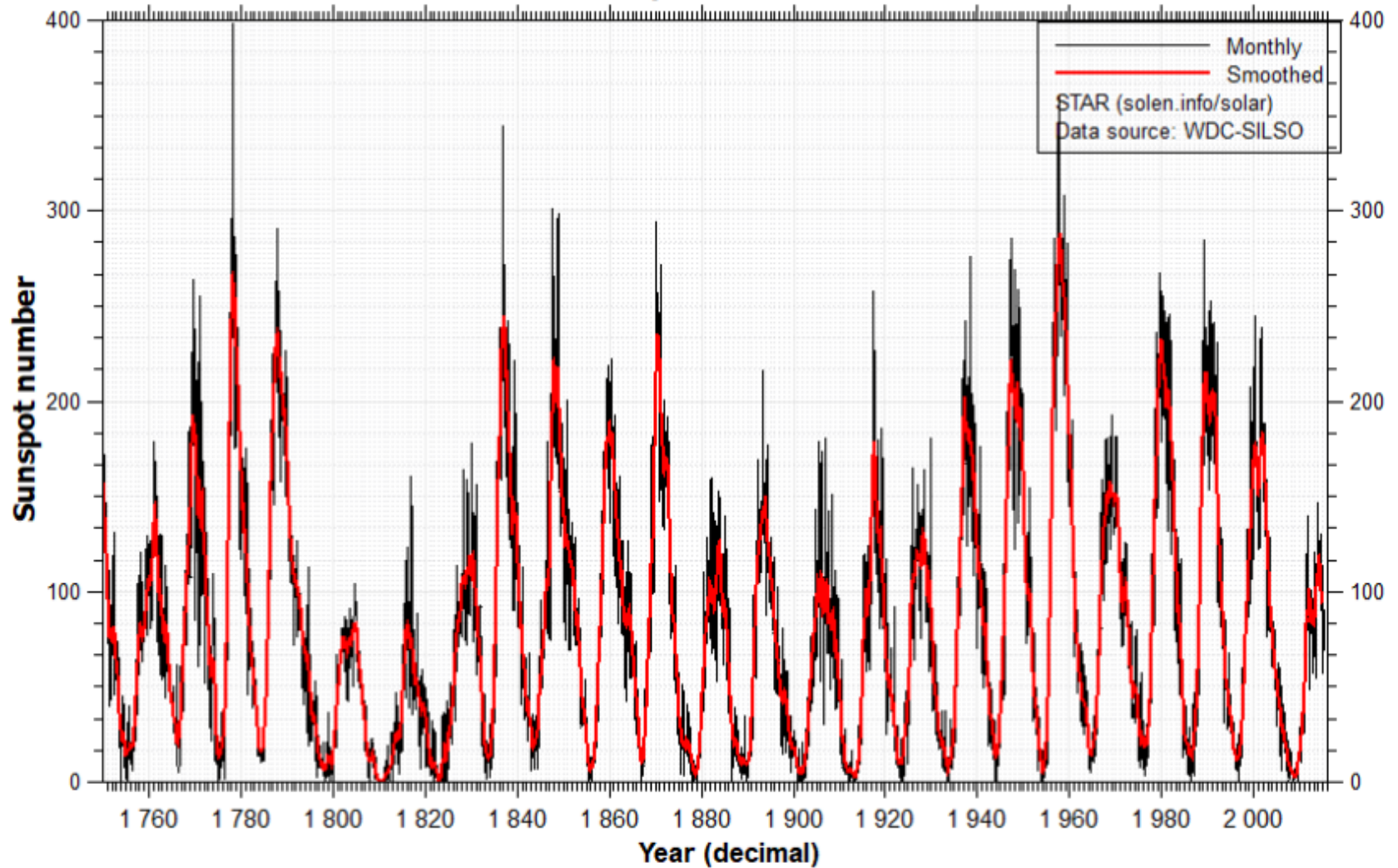
Monthly sunspot number solar cycles 23-24



Jan Alvestad

https://www.solen.info/solar/images/cycles23_24.png

Cycles 1-24



Jan Alvestad

https://www.solen.info/solar/cycles1_24.png

Sviðsstyrkur nærri loftnetum

Öryggismörk

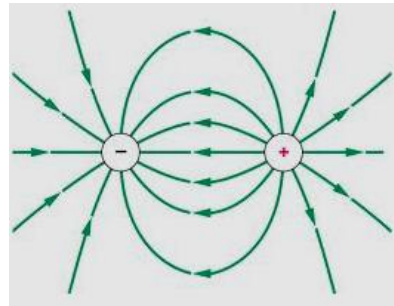
Fyrirlestur í ÍRA 15. mars 2012

Ekki þarf að kunna útreikninga og töflur til prófs, en hafa skilning á meginefninu og vita hvar hægt sé að leita frekari upplýsinga. Vita frá hvaða stofnun (ICNIRP) tilmæli um mörkin koma og þekkja til forrits (DL9KCE) sem IARU bendir á.

Vilhjálmur Þór Kjartansson, TF3DX

Þrenns konar svið

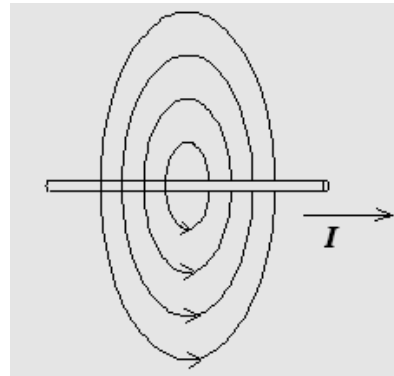
1. **Rafsvið** stafar frá hleðslu, því sterkara sem spennan er hærri



E (V/m)
volt á metra

1. mynd rafsvið eins og frá endum tvíþóls

2. **Segulsvið** stafar af hleðslu á hreyfingu, því sterkara sem straumurinn er meiri

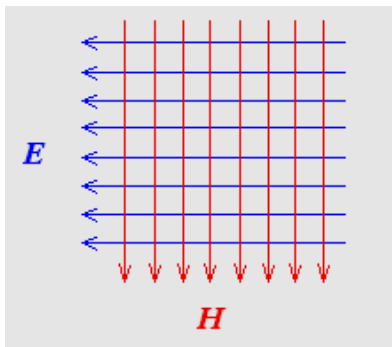


H (A/m)
amper á metra

2. mynd segulsvið eins og frá miðbikil tvíþóls

Þessi svið voru þekkt áður en Maxwell leiddi út tilvist rafsegulbylgjunnar. Bæði þessi svið geyma orku sem sveiflast á milli þeirri eins og milli þéttis (rafsviðs) og spólu (segulsviðs) í sveiflurás. Milli þeirra er 90° fasvik. Þau dofna hratt með fjarlægð frá loftnetinu en eru ráðandi næst því. Þar er talað um **nærsvið** loftnetsins. Þessi svið geta **spanað** merki í nágrenni, en eru ekki bylgja.

3. Rafsegulbylgja stafar af hleðslu með hröðun, því sterkari sem útgeislað afl er meira.



$P \text{ (W/m}^2\text{)}$
wött á fermetra

3. mynd
rafsvið og segulsvið lárétt skautaðrar rafseglbylgju sem kemur á móti lesanda

Rafsegulbylgja er **samtvinnað** rafsvið og segulsvið, hornrétt hvort á annað og hornrétt á útbreiðslustefnu. Þau eru samfasa og bera **orku** burt frá loftnetinu. Riðstraumur sveiflar hleðslu til og frá, sem gefur bylgju til **viðbótar** hefðbundnu rafsviði og segulsviði sem áður er getið. Hún dofnar hægar með fjarlægð og getur því borið boð langar leiðir. Hún er allsráðandi í **fjarsviði** loftnets.

bylgja í rúmi

Bylgjuviðnám $Z_o = \frac{E}{H}$

Aflþéttni $P_a = E \cdot H \Rightarrow \frac{E^2}{Z_o}$

tilsvarandi á fæðilínu

$Z_o = \frac{U}{I}$

Afl $P = U \cdot I \Rightarrow \frac{U^2}{Z_o}$

Rafsvið og segulsvið sömu bylgju eru ávallt í tilteknu hlutfalli, sem ræðst af miðlinum sem bylgjan ferðast í. Það kallast **bylgjuviðnám** og er $120 \pi \text{ ohm}$ eða því sem næst **377 Ω** fyrir tómarúm og loft með góðri nálgun.

1. dæmi

$E = 100 \text{ mV/m}$ í lofti. Reiknið segulsviðið H og aflþéttni bylgjunnar.

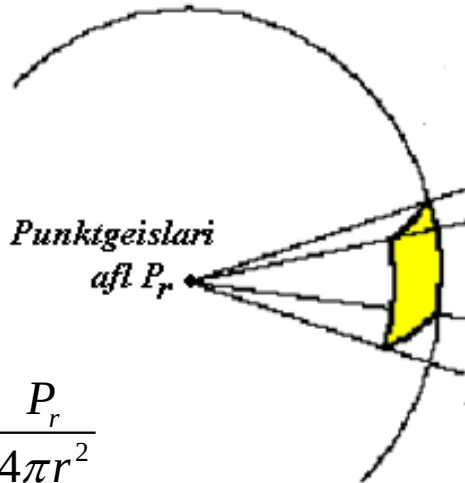
$$H = \frac{0,1 \text{ V/m}}{377 \Omega} \Rightarrow 265 \text{ } \mu\text{A/m}$$

$$P_a = 0,1 \text{ V/m} \cdot 265 \text{ } \mu\text{A/m} \Rightarrow 26,5 \text{ } \mu\text{W/m}^2$$

Styrkur **spansviðanna** ræðst af gerð loftnetsins. Frá opnum endum stafar fyrst og fremst rafsviði, frá lykkju segulsviði. Almennt er því hlutfallið E/H allt annað en 377Ω í nærsviði loftneta þar sem spansviðin eru ráðandi.

Nærsvið stutts tvíþóls (eða stangar móti jörð) er yfirgnæfandi rafsvið.
Nærsvið lítillar lykkju (eða hálfrar lykkju móti jörð) er yfirgnæfandi segulsvið.

Punktgeislari (*isotropic radiator*)

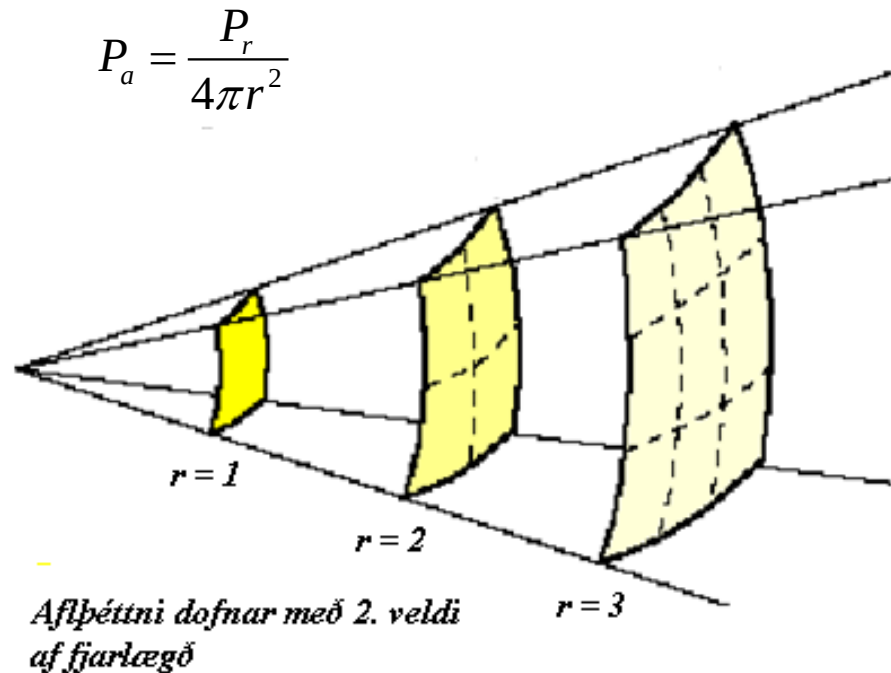


Aflið dreifist jafnt í allar stefnur rúmsins.
Flatarmál kúlu er $4\pi r^2$. Því er aflþéttnin

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{P_r}{4\pi r^2}$$

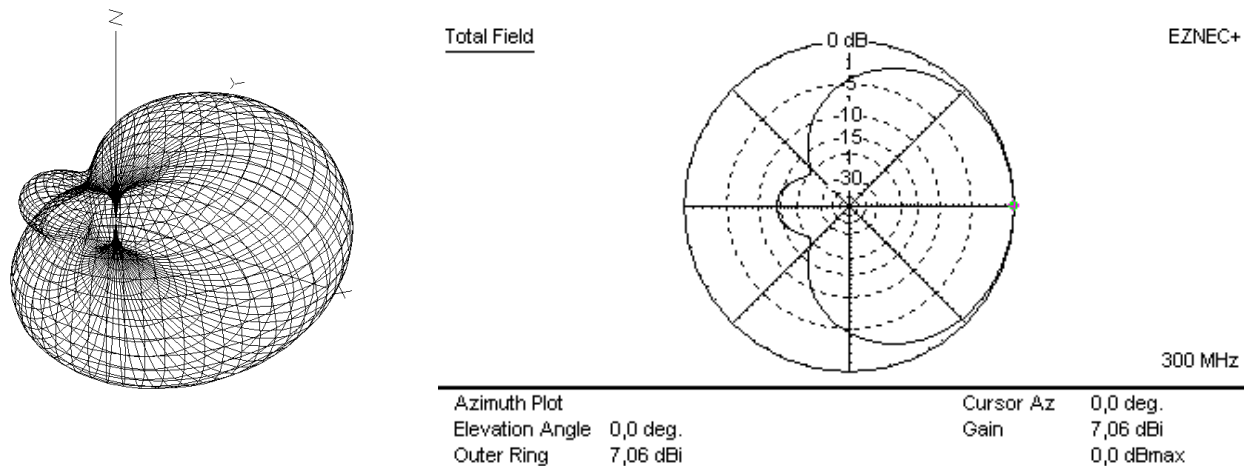
$$E = \frac{\sqrt{30P_r}}{r} \text{ (V/m)}$$

Sviðsstyrkur dofnar með
1. veldi af fjarlægð



4. mynd Styrkur bylgju frá punktgeislara

Ávinningur loftnets



5. mynd
Ávinningur
loftnets

Venjuleg loftnet beina aflinu í vissar stefnur á kostnað annarra. Ávinningur, G , er miðaður við bestu stefnu. Þá gilda sömu útreikninga og hér að framan, ef notað er **virkt útgeislað afl (effective radiated power)** í stað heildarafls:

$$ERP = G \cdot P_r$$

Hér er ávinningurinn 1 fyrir punktgeislara, og hlutfallslega fyrir önnur loftnet. Ef hann er þekktur í dBi þarf að breyta því í hlutfallstölu:

$$G = 10^{\frac{dBi}{10}} \quad \text{t.d.} \quad G = 10^{\frac{7}{10}} \Rightarrow 5 \quad \text{fyrir loftnetið á 5. mynd.}$$

2. dæmi

Ávinningur taplauss hálfbylgjutvípóls er 1,64 (2,15 dBi). Reiknið sviðsstyrk bylgjunnar í 10 m fjarlægð þvert á tvípólinn ef útgeislað afl er 80 W.

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot G \cdot P_r}}{r} \Rightarrow \frac{\sqrt{30 \cdot 1,64 \cdot 80}}{10} = 6,3 \text{ V/m}$$

Í tíðnisviðinu 10 – 400 MHz má sviðsstyrkur til almennings vera allt að 28 V/m samkvæmt ICNIRP. Hve nærri þessu loftneti má almenningur koma?

$$r = \frac{\sqrt{30 \cdot G \cdot P_r}}{E} \Rightarrow \frac{\sqrt{30 \cdot 1,64 \cdot 80}}{28} = 2,24 \text{ m}$$

Útgeislað afl er minna en afl sendis vegna taps í loftnetskerfinu öllu. Auðvelt er að reikna tap í fæðilínu. Tap í loftnetum sem hvorki eru lítil né efnisrýr er oft óverulegt, ef frá er talið tap í jarðviðnámi eða spanað tap í umhverfi.

Í þessum útreikningum er ekki tekið tillit til speglunar af jörð eða mannvirkjum. Hún getur allt að tvöfaldað sviðsstyrk, en líkur á því eru fremur litlar

Fyrirvarar

Ávinningur loftnets miðast við móttakanda í fjarska. Þegar komið er nærri loftneti raskast afstaðan til mismunandi hluta þess. Þessa gætir því meir sem umfang loftnets er meira miðað við fjarlægðina til þess. Þá er ávinningur til fjarska fremur ofmat en vanmat.

Speglun af jörð er ekki tekin með í útreikningunum að framan, nema hún sé innifalin í gildi ávinnings. Samliðun beinnar og speglaðrar bylgju getur allt að tvöfaldað sviðsstyrk. Undir lárétt skautuðu loftneti veikir hún rafsviðið í hæð sem er minni en u.þ.b. 8% af bylgjulengd, en styrkir segulsviðið.

Speglunin hefur einnig áhrif á geislunarviðnám loftnets og þar með ávinninginn.

Það er auðvelt að taka speglun með í reikninginn fyrir hálfloftnet fædd á móti jörð. Þá er notaður tvöfaldur (+ 3dB) ávinningur tilsvareandi heilloftnets, t.d. $2 \times 1,64 = 3,28$ (2,15 dBi + 3 dB = 5,15 dBi) fyrir kvartbylgju stöng. Ef mælt fæðiviðnám er hærra en fræðilegt gildi má reikna nýtnina og lækka útgeislað afl í hlutfalli við hana.

Nærsvið

Sviðstyrkur bylgju dofna með 1. veldi af fjarlægð eins og áður segir.

Spansviðin hafa liði sem dofna með **2. og 3. veldi**, sem líka þýðir að þeir styrkjast þeim mun hraðar þegar komið er nær loftnetinu. Þess vegna kemur að því að sviðstyrkur í námunda við loftnet geti verið meiri en útreikningarnir fyrir bylgjuna eina og sér, eins og hér að framan, gefa til kynna.

Fyrir staka beina og stutta straumlengd gildir að spanliðir eru jafnstærkir bylgjuliðunum í fjarlægðinni:

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \approx 0,16\lambda$$

Fyrir önnur loftnet en stutta tvíþóla (eða stangir) er þetta aðeins vísbending, áreiðanlegir útreikningar eru í besta falli flóknir. Við gætum reiknað sviðsstyrk bylgjunnar í þessari fjarlægð og gert ráð fyrir að spanliðirnir **kunni að vera** jafnstærkir þar. Síðan fer það eftir gerð loftnets hvort réttara sé að reikna með 2. eða 3. veldi af fjarlægð þegar nær dregur.

Ef jafnan gefur nokkuð minni fjarlægð en sem nemur öryggismörkum fyrir bylgjuna þarf ekkert að gera.

Öryggismörk

Við miðum við tilmæli **ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Gerður er greinarmunur á mörkum fyrir almenning annars vegar og upplýst fagfólk hins vegar. Amatörinn sjálfur fellur væntanlega í seinni flokkinn en nágrannar í þann fyrri.

Table 7. Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).^a

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W m ⁻²)
up to 1 Hz	—	3.2×10^4	4×10^4	—
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	—
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	—
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25	—
3–150 kHz	87	5	6.25	—
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	—
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	—
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

^a Note:

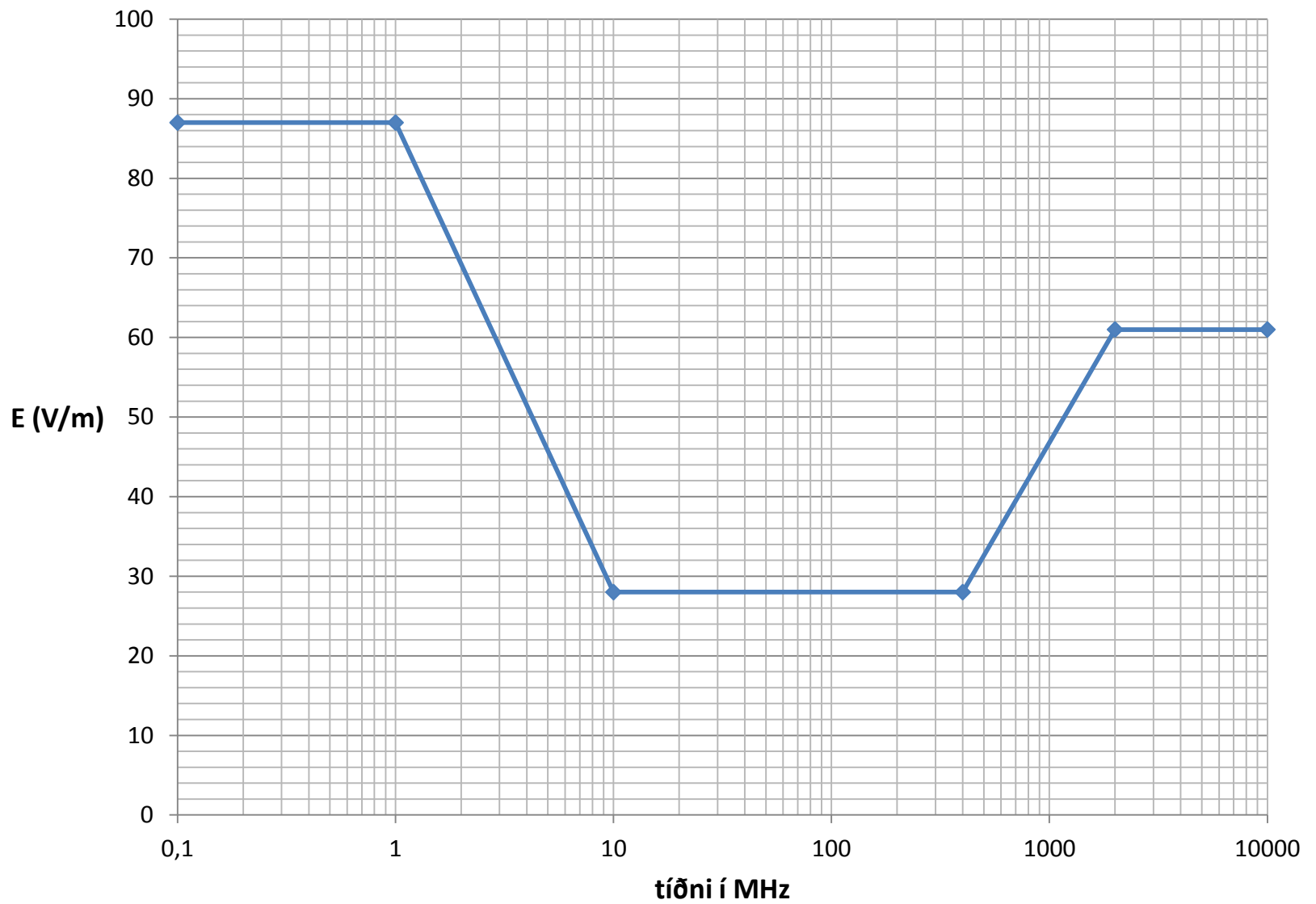
1. f as indicated in the frequency range column.
2. Provided that basic restrictions are met and adverse indirect effects can be excluded, field strength values can be exceeded.
3. For frequencies between 100 kHz and 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , and B^2 are to be averaged over any 6-min period.
4. For peak values at frequencies up to 100 kHz see Table 4, note 3.
5. For peak values at frequencies exceeding 100 kHz see Figs. 1 and 2. Between 100 kHz and 10 MHz, peak values for the field strengths are obtained by interpolation from the 1.5-fold peak at 100 kHz to the 32-fold peak at 10 MHz. For frequencies exceeding 10 MHz it is suggested that the peak equivalent plane wave power density, as averaged over the pulse width does not exceed 1,000 times the S_{eq} restrictions, or that the field strength does not exceed 32 times the field strength exposure levels given in the table.
6. For frequencies exceeding 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , and B^2 are to be averaged over any $68/f^{1.05}$ -min period (f in GHz).
7. No E-field value is provided for frequencies <1 Hz, which are effectively static electric fields. perception of surface electric charges will not occur at field strengths less than 25 kVm⁻¹. Spark discharges causing stress or annoyance should be avoided.

Skoðum það sem snýr að amatörum, lægsta tíðnisvið 137 kHz og hæst 250 GHz:

tíðni	E (V/m)	H (A/m)
3–150 kHz	87	5
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$
10–400 MHz	28	0.073
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$
2–300 GHz	61	0.16

6. mynd Öryggismörk fyrir almenning, f í MHz

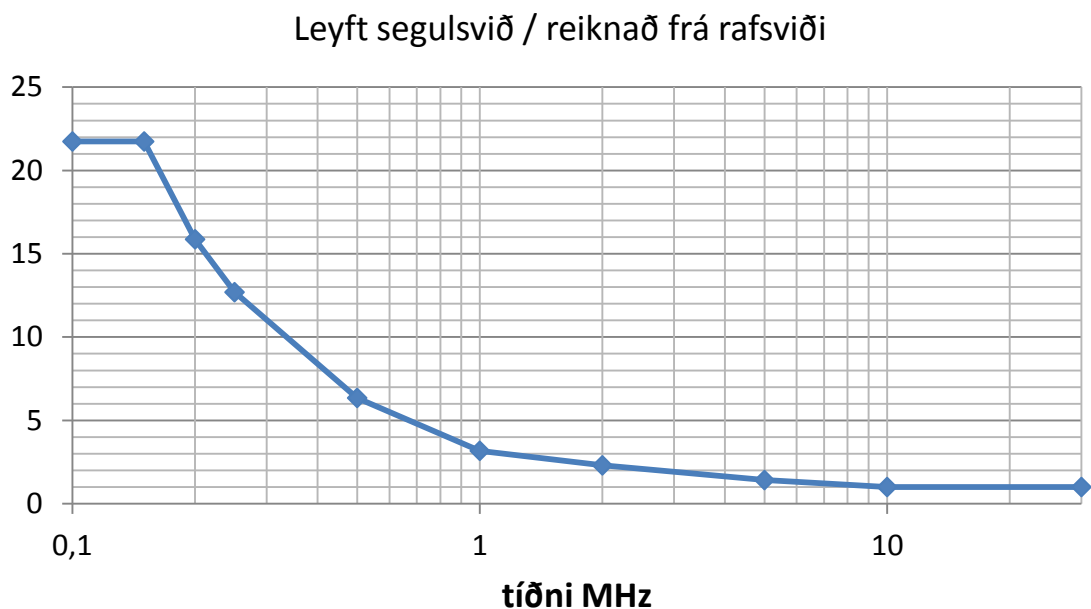
Við útreikninga má nota meðalafl yfir 6 mínútna tímabil. Það tekur bæði til styrkmótunar, þ.m.t. lyklingar, og iðnilotu sendingar. Amatörar reikna gjarnan með hlustun og sendingu til helminga.



7. mynd Öryggismörk fyrir almenning

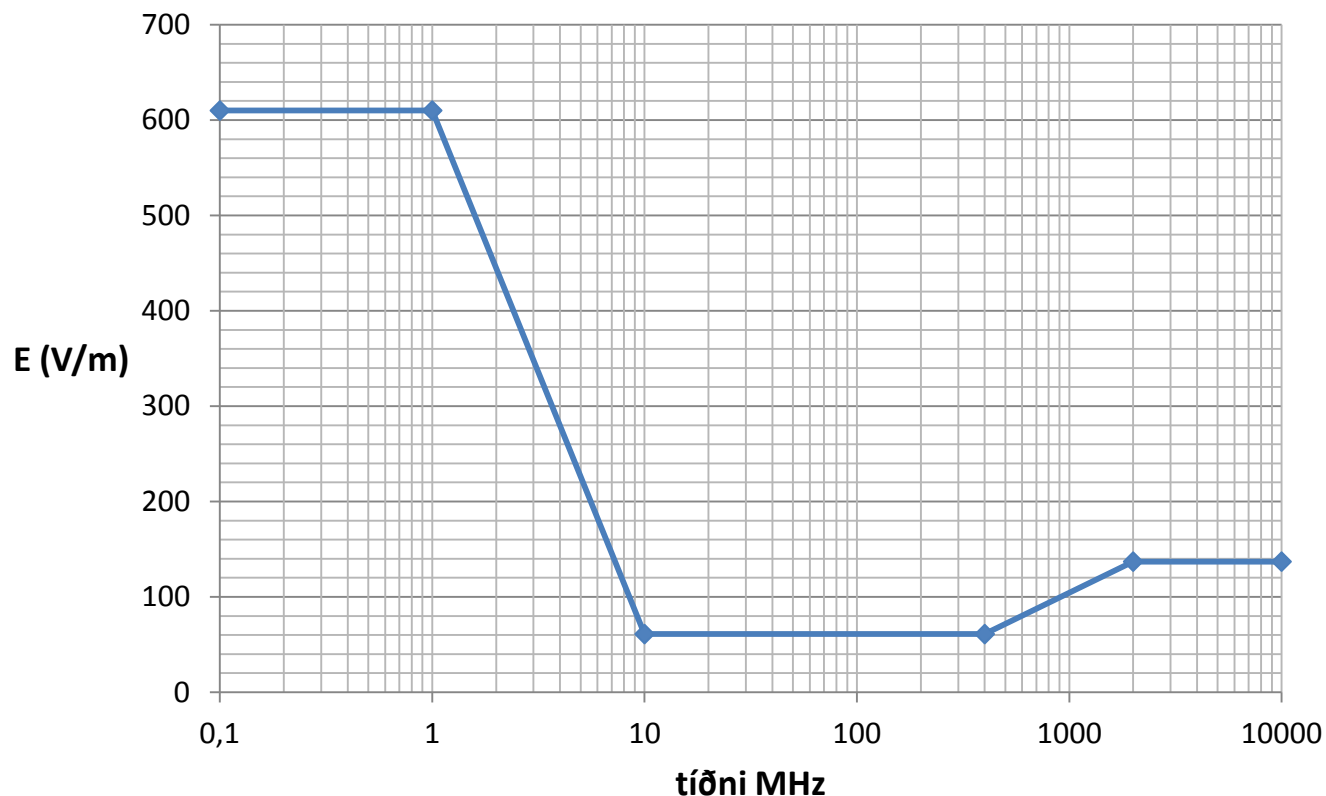
Það er hefð fyrir því að miða styrk bylgju við rafsviðið, enda fylgir segulsviðið með í öfugu hlutfalli við bylgjuviðnámið, 377Ω í tómarúmi (og lofti). Því er forvitnilegt að vita hvort öryggismörk segulsviðs fylgja með sama hætti. Í ljós kemur að svo er frá 10 MHz og upp.

8. mynd
*Hlutfallið milli
öryggismarka
segulsviðs og
rafsviðs*



Þetta þýðir að nóg er að reikna út frá rafsviði. Einnig að styrking segulsviðs vegna speglunar undir láréttu loftneti á lágu tíðnum er síður áhyggjuefni.

9. mynd
Öryggismörk
fyrir fagfólk



Margfeldisstuðull öryggismarka rafsviðs fyrir fagfólk umfram almenning er:

0,1 – 1 MHz	7
10 – 400 MHz	2,18 ≈ 2,2
> 2 GHz	2,25 ≈ 2,2

Hvað bylgjuna varðar má deila með sama stuðli í öryggisfjarlægð.

ICNIRP Calc DL9KCE

IARU mælir með ICNIRP reiknvél DL9KCE. Hún er með öryggismörk fyrir almenning innbyggð og reiknar með sömu aðferðum og raktar hafa verið hér að framan, það er út frá rúmdeyfinu eins og í tómarúmi.

Vélin reiknar ekki með speglun af jörð og fljótt á litið er speglunin ekki með í ávinningstölum þekktra loftneta. Það mætti þó að kanna betur, því óvíst er hvaðan þær upplýsingar koma og hvort þær eru innbyrðis samræmdar.

Fyrir tvíþól (hálfbylgju) er reiknað með fræðilegum ávinningi, ekki reiknað með tapi í loftnetinu sjálfu né spönuðu í umhverfinu. Notandinn getur sett inn aukatap í dB undir “Other Attenuation(s)” eða minnkað “Power” hlutfallslega.

Það fylgir ekki almennt líkan fyrir stangarloftnet, en notandinn getur búið það til og notfært sér ábendingar á bls. 8. Athygli vekur að ávinningur þekktra stangarloftneta er í því ljósi ótrúlega lítill. Þó vitað sé að sending háloftabylgju undir lágu horni sé verulega deyfð undir Brewster-horni á það ekki við um jarðbylgjuna í nágrenni stangar.

Ljóst er að í mörgum tilfellum eru þessar aðferðir ekki nákvæmar en gefa gagnlega vísbendingu. Mæling með réttum tækjum ætti að vera öruggust.