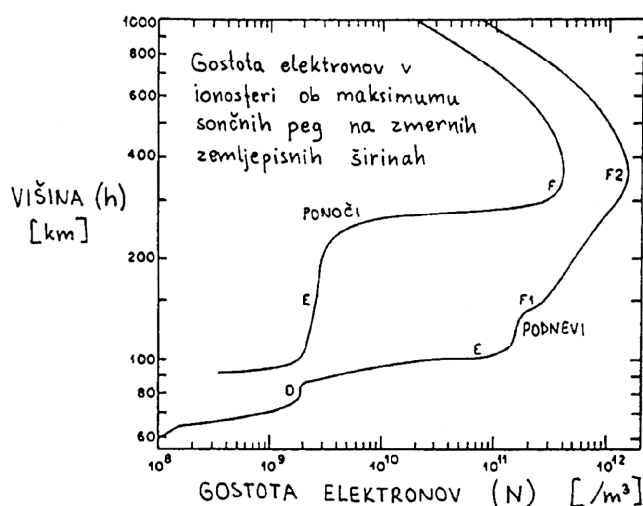


VAJA 22: Opazovanje mejne frekvence ionosfere

1. Elektromagnetne lastnosti ionosfere

Visoke plasti zemeljskega ozračja kot tudi navidezna "praznina" vesolja vsebujejo razmeroma veliko število delcev z visokimi energijami. Razen nevtralnih delcev, posamičnih atomov in molekul, so zelo pogosti tudi ionizirani delci z različnimi električnimi naboji. Medtem ko imajo električno nevtralni, močno razredčeni plini le malenkosten vpliv na relativno dielektričnost prostora, je vpliv naelektrenih delcev na elektromagnetne lastnosti prostora dosti večji.

Od vseh naelektrenih delcev imajo največji vpliv na elektromagnetne lastnosti prostora prosti elektroni, saj je pri njih razmerje naboj/masa večstokrat večje v primerjavi z drugimi delci. Gostoto elektronov v visokih plasteh zemeljskega ozračja, v "ionosferi", prikazuje Slika 1. Elektroni in drugi naelektreni delci nastanejo iz nevtralnih delcev in se lahko spet rekombinirajo nazaj v nevtralne delce. Različni hitrosti obeh pojavov, ionizacije in rekombinacije, sta vzrok nastanka ionosferskih slojev.



Slika 1: Plasti zemeljske ionosfere

Glavni izvor ionizacije električno nevtralnih delcev je ultravijolično sevanje Sonca. Ultravijolično sevanje Sonca je seveda močno odvisno od dogajanja na samem Soncu (število sončnih peg) in od vpadnega kota sončnih žarkov v zemeljsko ozračje, saj se ultravijolično sevanje razmeroma hitro vpije v ozračju. Ponoči glavni izvor ionizacije seveda presahne.

Rekombinacija v nevtralne delce je sorazmerna pogostnosti trkov med delci. Rekombinacija poteka zelo hitro v gostih nizkih plasteh ozračja pod 100 km višine in obratno zelo počasi na velikih višinah nad 200 km. Potek gostote elektronov se zato bistveno razlikuje med dnevom in nočjo. Podnevi ima ionosfera štiri glavne pasove: D, E, F1 in F2. Ponoči sloj D izgine takoj, sloj E tudi hitro slabi, le sloja F1 in F2 se zlijeta v enotni sloj F.

Poglavitni učinek oblaka naelektrenih delcev je navidezno znižanje dielektričnosti prostora, kot je to prikazano na Sliki 2. V skorajšnji odsotnosti trkov na velikih višinah se sloji F1 in F2 oziroma F obnašajo kot skoraj brezizguben dielektrik. Relativna dielektričnost in lomni količnik ionosfere sta močno odvisna od frekvence. Učinki ionosfere naraščajo z nižanjem frekvence. Pod frekvenco plazme f_p se ionosfera začne obnašati kot prevodnik (kovina).

Trki med delci so sicer elastični, vendar popolnoma naključno spremenijo smer gibanja delcev. Naelektreni delci po trčenju zato ne morejo več vrniti svoje kinetične energije

elektromagnetnemu polju. Trki med delci zato vnašajo izgube, ki se kažejo v obliki specifične prevodnosti ionosfere, kot je to prikazano na Sliki 3. Čeprav je sprememba lomnega količnika v nižjih slojih ionosfere skoraj zanemarljiva, sloja E in predvsem D močno dušita elektromagnetno valovanje.

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{N Q_e^2}{\varepsilon_0 \omega^2 m_e} \quad \begin{array}{l} N \equiv \text{gostota elektronov } [/\text{m}^3] \\ Q_e \approx -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \\ m_e \approx 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \end{array}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N Q_e^2}{\varepsilon_0 m_e}} \approx \sqrt{80.8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} N} = \begin{cases} \text{max} \sim 12 \text{ MHz} & \text{podnevi} \\ \text{max} \sim 5 \text{ MHz} & \text{ponoči} \end{cases}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{1 - (f_p/f)^2}$$

Slika 2: Relativna dielektričnost, frekvenca plazme in lomni količnik brezizgubne ionosfere

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{N Q_e^2}{\varepsilon_0 (\gamma^2 + \omega^2) m_e} \quad \begin{array}{l} \gamma \equiv \text{frekvenca (pogostnost)} \\ \text{trkov z drugimi delci} \\ [s^{-1}] \end{array}$$

$$\gamma = \frac{N Q_e^2 \gamma}{(\gamma^2 + \omega^2) m_e}$$

Slika 3: Dielektričnost in prevodnost izgubne ionosfere

Prisotnost zemeljskega magnetnega polja povzroča žiromagnetno (ciklotronsko) resonanco s frekvenco približno 1,4 MHz. Na tej frekvenci se močno poveča slabljenje elektromagnetnega valovanja. Žiromagnetni pojav povzroči tudi neregularno dvolomnost ionosfere, ki ima različen lomni količnik za desno-krožno oziroma levo-krožno polarizirano valovanje. Končna posledica je neregularno Faraday-evo sukanje ravnine polarizacije linearno-polariziranega valovanja. Žiromagnetno resonanco in Faraday-ev pojav opisujejo enačbe na Sliki 4.

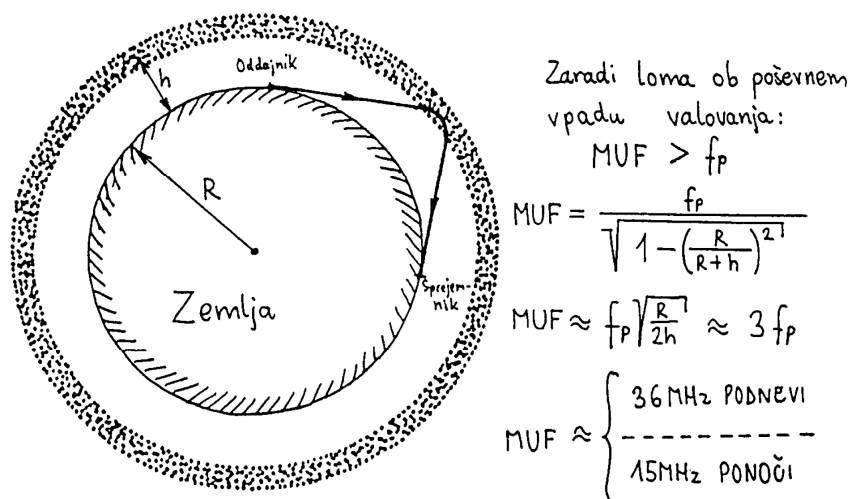
$$f_g = \frac{1}{2\pi} \frac{\mu_0 Q_e}{m_e} H_0 \approx 1.4 \text{ MHz} \equiv \text{žiromagnetna resonanca}$$

$$H_0 \approx 40 \text{ A/m} \equiv \text{zemeljsko magnetno polje}$$

$$\varepsilon_r = 1 - \left(f_p/f\right)^2 \cdot \frac{1}{1 \pm f_g/f} \quad \begin{array}{l} \pm \text{ LEVA / DESNA KROŽNA POLARIZACIJA} \\ (\text{FARADAY-EV POJAV}) \end{array}$$

Slika 4: Žiromagnetna resonanca in Faraday-ev pojav

Čeprav je osnovni podatek ionosfere, frekvenca plazme v najgostejšem sloju, razmeroma nizka (velikostni razred 10 MHz), občutimo učinke ionosfere tudi na dosti višjih frekvencah. Najvišjo frekvenco popolnega odboja v ionosferi označimo z MUF (*angl. Maximum Usable Frequency*), kot je to prikazano na Sliki 5. Faraday-evo sukanje ravnine polarizacije in spremembe lomnega količnika motijo celo satelitske zveze in satelitsko radionavigacijo v mikrovalovnem frekvenčnem področju na frekvencah nad 1 GHz.



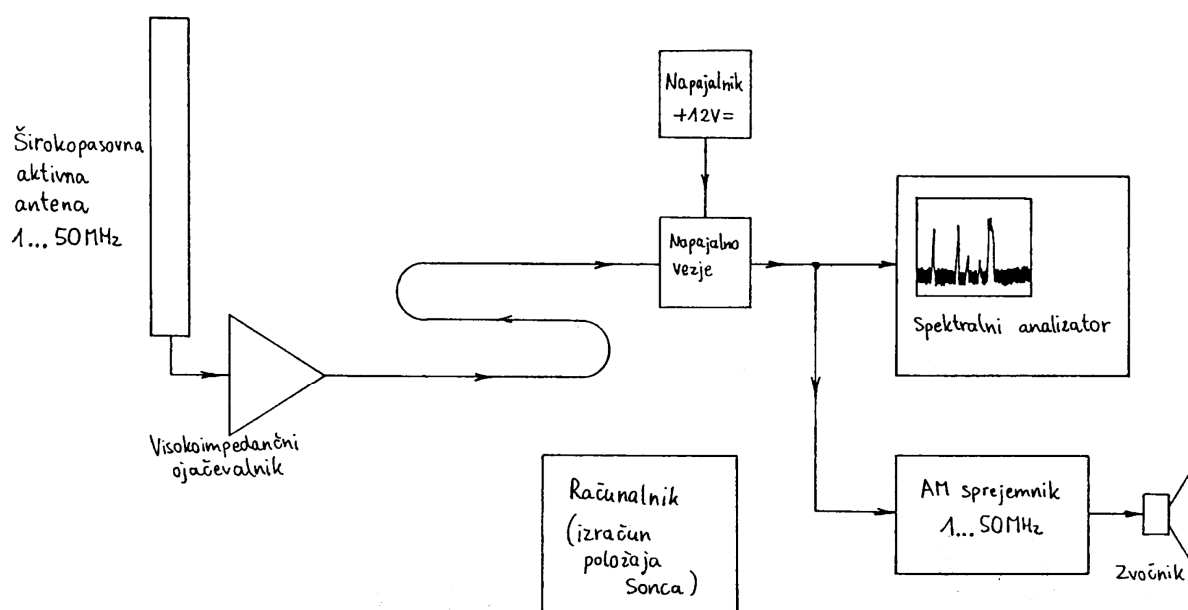
Slika 5: Najvišja frekvenca popolnega odboja (MUF)

2. Seznam potrebnih pripomočkov

Za izvedbo vaje potrebujemo:

- Širokopasovno aktivno anteno (z vgrajenim visokoimpedančnim ojačevalnikom) za frekvenčno področje 1...50 MHz na primernem podstavku na odprtem prostoru (strehi).
- Napajalnik in napajalno vezje za aktivno anteno.
- Visokofrekvenčni spektralni analizator 0...1000 MHz.
- AM sprejemnik (lahko je vgrajen v spektralni analizator) za frekvenčno področje 1...50 MHz z zvočnikom.
- Računalnik s programom za izračun položaja Sonca in prikazom osvetljene zemeljske poloble.
- Priključne kable za vse povezave.

Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov je prikazana na Sliki 6.



Slika 6: Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov

3. Obrazložitev in opis poteka vaje

Celovito opazovanje pojavov v ionosferi je lahko zelo dolgotrajno in potrpežljivo delo. Nekateri pojavi se zgodijo poredkoma in skoraj povsem naključno, ampak v točno določenem obdobju 11-letnega cikla sončnih peg. Razen redkih izjem zelo visoke sončne aktivnosti lahko osnovne pojave v ionosferi (lom, popolni odboj, slabljenje in neregularno Faraday-evo sukanje polarizacije) opazujemo v obdobju enega dneva in noči.

Za opazovanje pojavov v ionosferi seveda potrebujemo ustrezen oddajnik in pripadajoči sprejemnik, ki delujeta v širokem razponu frekvenc vsaj od 1 MHz do 50 MHz. Vajo si poenostavimo tako, da kot oddajnik izkoristimo kar obstoječe radiodifuzne oddajnike, ki oddajajo v različnih frekvenčnih pasovih. S poslušanjem oddaje določimo izvor oddaje, jakost polja in periodo presihanja sprejema.

Kot sprejemno anteno uporabimo širokopasovno aktivno anteno. Takšne antene imajo razmeroma majhne izmere glede na valovno dolžino, impedanca je močno reaktivna in električni izkoristek je zelo slab. Aktivna antena ima zato vgrajen visokoimpedančni predojačevalnik, ki visoko impedanco antene zasilno prilagodi na 50-ohmski vhod sprejemnika. Slab električni izkoristek majhne antene nas pri sprejemu ne moti, saj je tudi naravni šum na nizkih frekvencah pod 30 MHz zelo močen – šumna temperatura neba naraste na preko milijon K.

Sprejemno anteno moramo seveda namestiti na odprt prostor (streha). Pri nameščanju antene se seveda izogibamo znanim izvorom električnega šuma in motenj, kot so fluorescentne svetilke in računalniki. Anteno povežemo preko daljšega kosa koaksialnega kabla na sprejemnik. Po istem kablu napajamo visokoimpedančni ojačevalnik v anteni, ki potrebuje poseben napajalnik in napajalno vezje, krenico, ki loči enosmerno napajanje od visokofrekvenčnih signalov.

Kot sprejemnik uporabimo spektralni analizator, ki nam omogoča opazovanje radijskih signalov v širokem frekvenčnem pasu. Večina sodobnih spektralnih analizatorjev ima vgrajen tudi običajen radijski sprejemnik z možnostjo demodulacije AM in FM signalov in poslušanjem preko zvočnika. Pri uporabi vgrajenega sprejemnika moramo seveda nastaviti pravilno pasovno širino medfrekvenčnega sita v spektralnem analizatorju ter izključiti krmilno žago za lokalni oscilator (spektralni analizator postavimo v "zero span").

Koristen pripomoček je tudi računalnik s programom za izračun položaja Sonca na nebu. Program na računalniku uporabimo tako, da nam prikaže osvetljeno poloblo, iz česar lahko sklepamo o obnašanju ionosfere v različnih smereh razširjanja radijskih valov. Pri uporabi računalnika seveda obvezno preverimo nastavitve programa (predvsem ure!) in seveda motnje, ki jih računalnik povzroča našemu sprejemniku.

4. Prikaz značilnih rezultatov

Za vajo poskusimo ugotoviti osnovni veličini ionosfere, ki pogojujeta razširjanje valov – MUF in LUF. MUF ali najvišja uporabna frekvenca zavisi izključno od gostote elektronov v najgostejšem sloju ionosfere in je določena s pogojem za popolni odboj v dielektriku s spreminjajočim se lomnim količnikom. MUF predstavlja strogo določeno mejo, nad katero slišimo samo še bližnje radijske postaje v krogu nekaj sto kilometrov, ki jih sprejemamo neposredno brez posredovanja ionosfere.

LUF (*angl. Lowest Usable Frequency*) ali najnižja uporabna frekvenca je določena z dušenjem nizkih frekvenc v nizkih slojih ionosfere (predvsem v sloju D, nekaj tudi v sloju E). LUF ni stroga meja kot MUF, saj lahko povečano dušenje nadomestimo z oddajnikom večje moči.

LUF je zelo spremenljiv, saj poteka rekombinacija v nizkih slojih D in E zelo hitro. LUF lahko doseže podnevi vrednost 5 MHz in lahko ponoči upade pod 100 kHz.

Pri vaji najprej s spektralnim analizatorjem na grobo ocenimo, kateri frekvenčni pas prepušča ionosfera. V prepustnem pasu ionosfere opazimo množico signalov, izven tega pasu pa je signalov znatno manj. Nato spektralni analizator preklopimo v način delovanja kot radijski sprejemnik in poskusimo ugotoviti vrsto in izvor posameznih signalov. V končnem rezultatu vaje si zabeležimo ugotovljena LUF in MUF kot tudi datum, uro in položaj Sonca na nebu (azimut in elevacijo).