

MONITOR ZA SPREMLJANJE NENADNIH IONOSFERSKIH MOTENJ

ROK VOGRINČIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Nenadne ionosferske motnje (SID) so izjemno močne gostote ionizacije v D sloju Zemljine ionosfere, ki jih povzročajo izbruhi na Soncu. Ko se izbruh na Soncu zgodi, sunek močnega ultravijoličnega in rentgenskega sevanja zadane dnevno stran Zemlje. Visoko-energijsko sevanje absorbirajo delci v atmosferi, ki preko procesa foto ionizacije postanejo vzbujeni. Najnižjim slojem obsevane ionosfere (D in E sloj) se gostota elektronov nemudoma poveča. Ionosferske motnje ojačajo širjenje valov zelo nizkih frekvenc (VLF). S SID monitorjem, ki se nahaja na astronomskem geofizikalnem observatoriju Golovec v Ljubljani, lahko detektiramo izbruhe na Soncu tako, da spremljamo moč radijskega signala oddaljenega VLF oddajnika, v odvisnosti od časa. Izmerjena motnja (SID) pove, ali je zares prišlo do Sončevega izbruha.

SUDDEN IONOSPHERIC DISTURBANCES MONITOR

A sudden ionospheric disturbance (SID) is an abnormally high ionization density in the D layer of the Earth's ionosphere caused by a Solar flare. When a Solar flare occurs on the Sun a blast of intense ultraviolet and X-ray radiation hits the dayside of the Earth. This high energy radiation is absorbed by atmospheric particles, raising them to excited states and knocking electrons free in the process of photoionization. The low-altitude ionospheric layers (D and E layer) immediately increase in electron density over the entire dayside. The ionospheric disturbance enhances very low frequency (VLF) radio propagation. With an instrument called the SID monitor, located at Astronomical Geophysical Observatory on the Golovec hill in Ljubljana, we can detect Solar flares by monitoring the signal strength of distant VLF transmitters over the course of time. The recorded SIDs indicate whether Solar flares have taken place.

1. Uvod

Monitor za spremljanje nenadnih ionosferskih motenj (Sudden Ionospheric Disturbances), je naprava, ki zaznava spremembe v Zemljini ionosferi, ki jih povzročajo predvsem izbruhi na Soncu, v manjši meri pa tudi izbruhi sevanja gama, strele, kozmični delci, meteorski roji. Spremembe lahko opazimo, če spremljamo radijske signale zelo nizkih frekvenc (VLF), ko se ti odbijajo od Zemljine ionosfere. VLF radijski valovi prihajajo z oddajnikov, katerih glavni namen je komunikacija s podmornicami. Moč VLF signala se spremeni, ko Sonce vpliva na Zemljino ionosfero tako, da doda ionizacijo in s tem spremeni mesto odboja radijskega vala. Monitor za nenadne ionosferske izbruhe torej spremlja spremembe v moči signala [1].

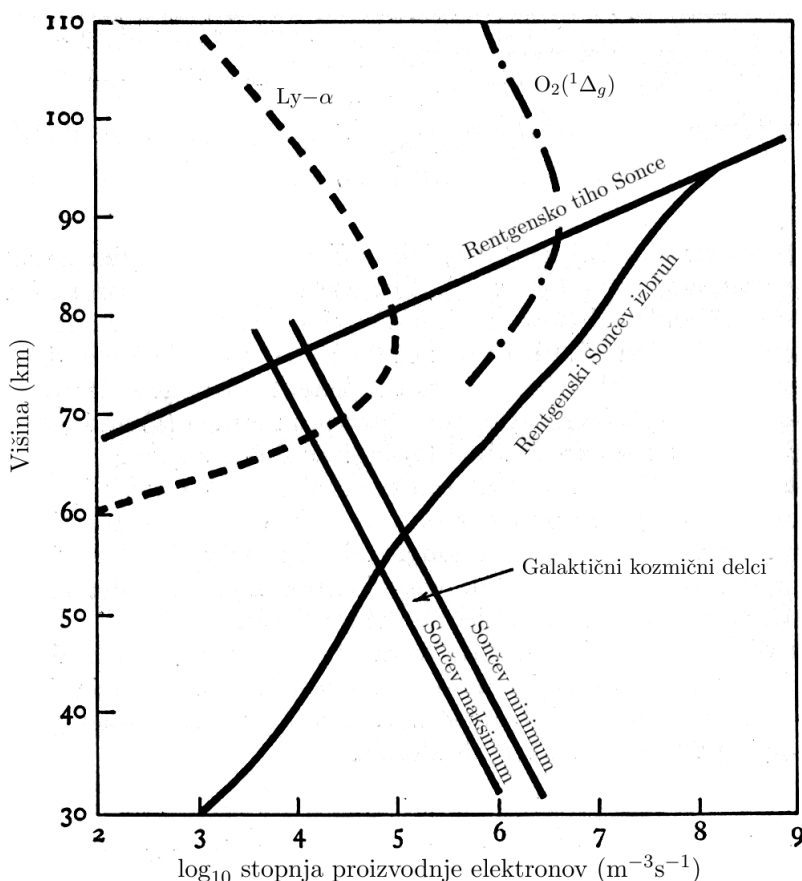
2. Teoretični uvod

2.1 Ionosfera

Zemljina ionosfera je najvišji del atmosfere in se začne na višini približno 60 km nad površjem. Sevanje s Sonca konstantno vpliva na Zemljino ionosfero, tako, da atome ionizira, molekule pa disociira. Zemljina ionosfera je sestavljena iz več slojev, ki ležijo na različnih višinah in se med seboj ločijo po številskih gostotah elektronov in ionov ter po plinski sestavi. Obstoj in število slojev se zaradi vpliva Sonca tekom dneva spreminja. Čez dan je ionosfera močno ionizirana zaradi vpliva sevanja s Sonca – takrat so prisotni D, E in F sloji. Ponoči sevanje s Sonca ni, je pa prisotna ionizacija zaradi kozmičnih delcev, ki ustvari najvišji, F sloj. Tako obstaja dnevni cikel povezan z ionizacijo, [1]. Ionosfera se zaradi prisotnosti prostih elektronov in ionov obnaša kot električni prevodnik, ki odbija širok spekter radijskih valov. Obstoj ioniziranega sloja v zgornjem delu atmosfere so začeli ceniti že v začetku 20. stoletja. Marconi je prvi opisal, da se lahko radijski valovi širijo za horizont, preko

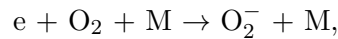
večkratnih odbojev med električno prevodnim slojem v atmosferi ter Zemljo. Obstoje ioniziranega sloja v atmosferi sta eksperimentalno dokazala Appleton in Barnett leta 1924 [2].

Kot je bilo omenjeno prej, se ionosfera deli na tri sloje. Najvišji, F sloj, se razteza od 150 - 500 km nad površjem Zemlje. Proizvodnja elektronov preko ionizacije doseže vrh pri približno 150 km in ustreza ionizaciji O in N₂. Sloj E se razteza od 90 - 150 km nad površjem Zemlje. Tukaj poteka ionizacija molekularnega kisika O₂ zaradi mehkih X-žarkov (1 - 10 nm) in ultravijoličnega (UV) sevanja s Sonca. Tretji, ki je najbolj pomemben v tem članku, je D sloj. Je najnižji od omenjenih in se razteza od 60 - 90 km nad površjem Zemlje. Ionizacija poteka tu predvsem zaradi relativno močnega Lyman alfa sevanja s Sonca pri valovni dolžini 121.5 nm. To sevanje je dovolj močno, da ionizira dušikov oksid (NO) in proizvede elektrone s tako mero, kot je prikazano na sliki 1. Ta prikazuje stopnjo proizvodnje elektronov v obdobju Sončevega minimuma, na različnih višinah, zaradi različnih sevanj. Ko Sončev cikel napreduje, se jakost Lyman alfa sevanja, rentgenskega sevanja in galaktičnih kozmičnih delcev spreminja na različne načine. Med Sončevim minimumom in maksimumom se jakost Lyman alfa sevanja poveča za polovico, rentgensko sevanje pa za faktor 10³. Nasprotno pa velja za gostoto galaktičnih kozmičnih delcev, katerih jakost se zmanjša za faktor 0.5. Sloj D velja za najbolj težaven del ionosfere, v smislu opazovanja in modeliranja. Poleg plinov, ki so prisotni v E in F slojih (N₂, O₂, O, N), so v D sloju za ionizacijo pomembni tudi manj pogosti plini (NO, CO₂, H₂O, O₃, OH, NO₂, O₂(¹Δ_g)) [2], [3], [4].

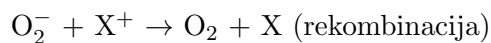


Slika 1. Slika prikazuje stopnjo proizvodnje elektronov v obdobju Sončevega minimuma, na različnih višinah, zaradi različnih sevanj. Ko Sončev cikel napreduje, se jakost Lyman alfa sevanja, rentgenskega sevanja in galaktičnih kozmičnih delcev spreminja na različne načine. Fotoni z valovnimi dolžinami med 102.7 in 111.8 nm ionizirajo vzbujeno molekulo kisika O₂(¹Δ_g) [4].

Pri obravnavi kemijskih procesov v ionosferi, ki vsebuje tako elektrone kot ione, je potrebno razlikovati med primarnimi in sekundarnimi produkti. Primarne elektrone in pozitivne ione proizvede ionizirajoče sevanje, ki potuje skozi plin v ionosferi ($\gamma + X \rightarrow X^+ + e^-$). Primarni negativni ion nastane z zajetjem elektrona ($e^- + Z \rightarrow Z^-$). Ion ene vrste lahko proizvede ion druge vrste, preko prenosa naboja na nevtralni delec, če ima proizveden ion ionizacijsko energijo manjšo od prvotnega iona (za pozitivne ione) oziroma večjo elektronsko afiniteto (za negativne ione). V najnižjem delu ionosfere elektroni hitro izginjajo v reakcijah med tremi telesi, katerih produkti so negativni ioni. V enem izmed takih procesov se elektroni vežejo na molekulo kisika, v prisotnosti tretjega delca, s tem nastane negativni ion po reakciji



ki se zgodi s stopnjo k_1 . Nastali O_2^- ion izgine pri rekombinaciji s pozitivnim ionom ali preko odcepitev elektrona od iona O_2^- . Rekombinacija s pozitivnim ionom se zgodi pri reakciji



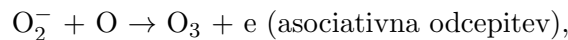
s stopnjo α_1 . Elektron se odcepi od O_2^- v enem izmed naslednjih procesov

1. preko trka z drugim delcem (M)



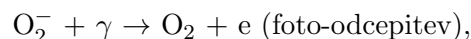
s stopnjo k_2 .

2. preko interakcije z atomskim kisikom, kjer pri reakciji nastane molekula ozona in prosti elektron



s stopnjo k_3 ali

3. zaradi sevanja fotona z intenziteto I



s stopnjo k_4I .

Večinoma se odcepitev in zajetje dogajata tako hitro, da se skoraj izenačujeta. Vpeljemo lahko razmerje λ med koncentracijo negativnih ionov in prostih elektronov. Izračunamo ga tako, da enačimo stopnjo proizvodnje negativnih ionov in stopnjo izgube ionov, potemtakem

$$k_1 = k_2 + k_3 + k_4I.$$

Od tod sledi

$$\lambda = \frac{k_1}{k_2 + k_3 + k_4I}. \quad (1)$$

Vrednost λ je manjša od 1, če je število elektronov večje od števila negativnih ionov. Zaradi odcepitev in zajetja elektronov je potrebno prilagoditi kontinuitetno enačbo, ki povezuje koncentracijo elektronov s stopnjami nastajanja in izginjanja elektronov. Naj bo L stopnja, s katero so elektroni na enoto volumna izgubljeni zaradi "pretvorbe" v ione. Potem je, če predpostavimo, da elektroni izginjajo pri rekombinaciji s pozitivnimi ioni (X^+) z rekombinacijskim koeficientom α_e , kontinuitetna enačba za elektrone

$$\frac{d[e]}{dt} = +q - \alpha_e[e][X^+] - L, \quad (2)$$

kjer je $[e]$ koncentracija elektronov, $[X^+]$ koncentracija pozitivnih ionov in q stopnja proizvodnje elektronov na enoto volumna. Ustrezna kontinuitetna enačba za negativne ione je

$$\frac{d[O_2^-]}{dt} = -\alpha_i[O_2^-][X^+] + L. \quad (3)$$

Električna nevtralnost ionosfere zahteva, da je

$$[X^+] = [O_2^-] + [e] = (1 + \lambda)[e]. \quad (4)$$

Če vstavimo to enačbo v enačbi 2 in 3 ter ju seštejemo, dobimo

$$\frac{d[e]}{dt} = \frac{q}{1 + \lambda} - (\alpha_e + \lambda\alpha_i)[e]^2. \quad (5)$$

Pri obravnavi prehodnih pojavov, ki so povezani z nenadno spremembo stopnje proizvodnje elektronov na enoto volumna q (tekem izbruhov na Soncu, Sončevih mrkov, izginjanju elektronov ponoči), je uporabno vzeti enačbo 5 s $q = 0$. Tedaj dobimo

$$\frac{d[e]}{dt} = -\alpha_{\text{eff}}[e]^2 \quad (6)$$

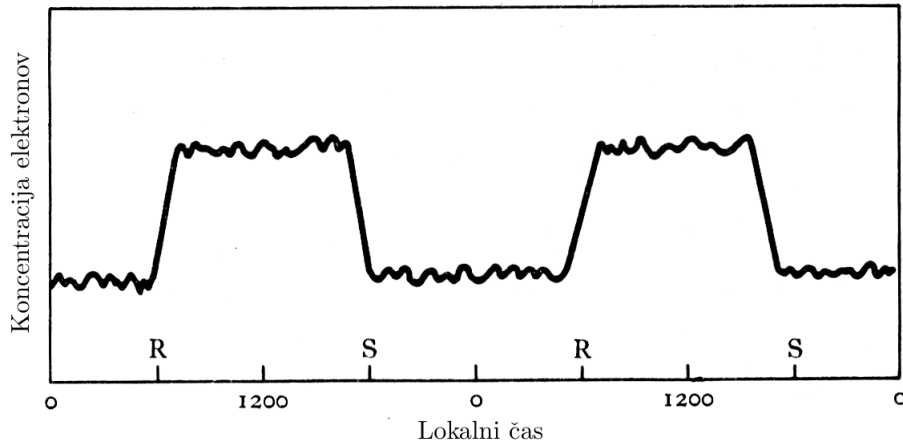
z

$$\alpha_{\text{eff}} = (\alpha_e + \lambda\alpha_i).$$

V D sloju ima elektronsko-ionski rekombinacijski koeficient α_e magnitudo okoli $10^{-13} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ionsko-ionski rekombinacijski koeficient α_i je enakega reda velikosti. V delih ionosfere, kjer je λ reda velikosti ≥ 1 , je koeficient α_i pomemben. Poglejmo si še situacijo kvazi-ravnovesja ($d[e]/dt = 0$). Tedaj lahko enačbo 5 pišemo v obliki

$$[e] = \left(\frac{q}{\Psi}\right)^{1/2},$$

kjer je $\Psi = (\alpha_e + \lambda\alpha_i)(1 + \lambda)$. Zdi se, kot da se koncentracija elektronov $[e]$, dana z ravnovesno vrednostjo, ne spreminja veliko med dnevom in nočjo. Potrebno pa se je zavedati, da lahko sevanje s Sonca odcepi elektrone od negativnih ionov, zato je λ tekom dneva sorazmerno majhen in koncentracija elektronov sorazmerno visoka. Sledi, da ima koncentracija elektronov v spodnjem delu ionosfere dnevno variacijo, ki je prikazana na sliki 2. Koncentracija elektronov je večja podnevi in se nenadno spremeni ob Sončevem vzhodu in zahodu. Groba ocena za λ podnevi se giblje okoli 1, na višini 70 km nad površjem Zemlje ter okoli 10 na višini 60 km. Ponoči je λ večja za en velikostni red [4].



Slika 2. Slika prikazuje, kako se koncentracija elektronov, v najnižjem delu D sloja ionosfere, spreminja tekom dneva. R in S predstavljata čas Sončevega vzhoda in zahoda [4].

2.2 Širjenje radijskih valov

Ekstremno nizke frekvence (ELF, 30 Hz do 3 kHz) in zelo nizke frekvence (VLF, 3-30 kHz) predstavljajo uporaben način komunikacije na velike razdalje, zaradi majhnih izgub energije. Širjenje VLF valov karakterizira zelo nizka vrednost atenuacije, približno 2-3 dB/Mm, kar omogoča širjenje tega na zelo velikih razdaljah (5000 - 20000 km) znotraj t.i. valovnega vodnika Zemlja-ionosfera. Kot pove že ime samo, je ta valovni vodnik sestavljen iz površja Zemlje, ki predstavlja spodnjo mejo in D sloja ionosfere, ki predstavlja zgornjo mejo vodnika.

Elektromagnetni val se popolnoma odbije od sredstva s spremenljivo dielektričnostjo, v točki, kjer je lomni količnik enak 0. Za izotropno plazmo brez izgub, je ta pogoj zadoščen, ko je $\omega \simeq \omega_p$, kjer je ω_p plazemska frekvenca medija in je podana kot

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi N_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e},$$

kjer je N_e številska gostota elektronov, q_e naboj elektrona, ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma in m_e masa elektrona. Ta pogoj pa se ne nanaša nujno na VLF valove. Vrednost lomnega količnika za VLF valove je v ionosferi kompleksna, vsebuje tako odbojni kot absorptivni člen. Odvisna je od lokalnih lastnosti medija in smeri elektromagnetnega vala glede na zemeljsko magnetno polje, to pa je zelo zapleten problem. Zaradi učinka magnetnega polja in absorpcije zaradi trkov, lomni količnik v D sloju ionosfere nikoli ne doseže vrednosti 0, zato se popolni odboj nikoli ne zgodi, pride pa lahko do znatnega delnega odboja. Delni odboj se zgodi v območju, kjer se lomni količnik spreminja zelo drastično, na razdalji, ki je primerljiva z valovno dolžino elektromagnetnega vala, območje se obnaša kot ostra meja med dvema različnima sredstvoma. To se zgodi v območju, za katerega velja

$$\omega \simeq \frac{\omega_p^2}{\nu},$$

kjer je ω_p plazemska frekvenca, ω frekvenca vala, ν efektivna frekvenca trkov elektronov s težjimi delci. Od tod sledi, da so pogoji za odboj odvisni od številske gostote elektronov v ionosferi. Tipični profil elektronske gostote v D sloju ionosfere je podan kot dvo-parametrski eksponentni profil,

$$N_e(h) = 1.43 \times 10^{13} e^{-0.15h'} e^{(\beta-0.15)(h-h')}, \quad (7)$$

kjer je N_e številska gostota elektronov (cm^{-3}), h' je efektivna odbojna višina, podana v km in β strmina profila v enotah km^{-1} , [2]. Na splošno je širjenje radijskih valov znotraj ionosfere odvisno

od frekvence vala, vpadnega kota, dela dneva, letnega časa, Zemljinega magnetnega polja in Sončeve aktivnosti. Tekom dneva se vrednosti za ω_p gibljejo med 8-15 MHz [5].

Teorija širjenja VLF radijskih valov preko večkratnih odbojev med Zemljo in spodnjim delom ionosfere je bila uveljavljena po letu 1930. Obstajata dve teoretični računski metodi, ki sta sposobni napovedati moč VLF radijskih signalov. Prva je teorija žarkov (Ray Theory), ki odlično deluje za kratke razdalje širjenja in uporablja principe geometrijske optike. V tem članku pa imamo opravka z daljšimi razdaljami širjenja, zato postane pomembnejša druga, Mode (način) teorija. V tem primeru je uporabno predstaviti mehanizme širjenja v obliki valovnih načinov (waveguide modes), to sta spodnja in zgornja meja. Te načine dobimo z reševanjem Maxwellovih enačb z ustreznimi robnimi pogoji. Red načina pravzaprav predstavlja število maksimumov in minimumov v transversalnem vertikalnem polju. Za širjenje VLF signalov na velike razdalje je zadovoljivo upoštevati le najnižje redove načinov, saj pri višjih redovih signali hitreje atenuirajo. Valovi močno atenuirajo znotraj valovnega vodnika, če je njihova frekvenca nižja od cut-off frekvence, podane z

$$f_n = \frac{nc}{2h},$$

kjer je n red načina. Načini (modes) s frekvenco večjo od f_n se širijo z grupno hitrostjo. Tipična dnevna cut-off frekvenca prvega reda načina znaša ~ 2 kHz [2].

2.3 Od kod pridejo radijski valovi?

Nekatere države uporabljajo VLF valove za komunikacijo s svojimi podmornicami, saj valovi s takimi frekvencami prodrejo dovolj globoko v vodo. Na svetu najdemo kar precej tovrstnih oddajnikov. Ti so tipično zelo veliki, antene so dolge tudi nekaj kilometrov, valovne dolžine oddanih valov pa ponavadi znašajo okoli 10 km [1]. V tem članku bom podrobneje opisal svoj projekt, kjer konstantno merim signale s šestih različnih VLF oddajnikov po svetu. Podrobnosti so prikazane v tabeli 1.

Lokacija	Ime	Frekvenca [kHz]
Rhauderfehn, Nemčija	DHO	23.4
Anthorn, VB (NATO)	GQD	22.1
Rosnay, Francija	HWU	20.9
Tavolara, Italija	ICV	20.27
Anthorn, VB	GBZ	19.6
Katabomman, Indija	VTX3	18.2

Tabela 1. Tabela prikazuje lokacijo, ime in frekvenco VLF oddajnika [1].

2.4 Nenadne ionosferske motnje

Izbruh na Soncu je eksplozija, ki se zgodi, ko je energija, ki je shranjena v zavutih magnetnih poljih (po navadi nad Sončevimi pegami), nenadoma sproščena. Izbruhi povzročijo sevanje preko širokega dela elektromagnetnega spektra. Sončevi izbruhi so klasificirani glede na jakost rentgenskega sevanja pri valovnih dolžinah med 0.1-0.8 nm. Tako obstajajo 3 kategorije: X-izbruhi, so najmočnejši in lahko povzročijo izpad elektrike in dolgotrajne sevalne nevihte po večjem delu Zemlje. M-izbruhi so srednje močni, povzročijo lahko kratke radijske izpade predvsem v polarnih območjih Zemlje. C-izbruhi so šibki, nimajo znatnih posledic na Zemljo. Vsak razred omenjenih izbruhov se deli na 9 podrazredov, od 1 do 9 [6]. Razredi izbruhov na Soncu so prikazani v tabeli 2.

Razred	Jakost med 0.1-0.8 nm [W/m ²]
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq 10^{-4}$
X	$I \geq 10^{-4}$

Tabela 2. Razredi izbruhov na Soncu in njihove pripadajoče jakosti [6].

Ko pride do izbruha na Soncu, jakost rentgenskega sevanja z valovnimi dolžinami pod 1 nm naraste in povzroči porast ionizacije v D sloju ionosfere, na višini okoli 80 km nad površjem Zemlje, (glej sliko 1). Prirastek koncentracije elektronov vodi do večih pojavov, ki jih pod skupnim imenom uvrščamo med nenadne ionosferske motnje (SIDs). Kot je bilo opisano prej, imajo te motnje močan efekt na potovanje radijskih valov. Ker nenadne ionosferske motnje (SIDs) povzročajo predvsem sevanje s Sonca, so te prisotne le na osvetljenem delu Zemlje, njihov efekt je najmočnejši, kadar je Sonce za danega opazovalca v zenitu. Tekom SID-ov se koncentracija elektronov v D sloju nenadno, v roku nekaj minut, poveča in se počasi vrne na začetno magnitudo znotraj 0.75 - 1.5 ure [4].

3. Montaža in delovanje antene

Vrsta antene, ki lahko lovi VLF radijske signale, je oblike zanke. V osnovi je antena v obliki zanke, LC (tuljava kondenzator) vezje, ki resonira pri neki frekvenci. Tuljava zbira magnetno energijo, medtem ko kondenzator shranjuje naboj in s tem električno energijo. Indukcija nastane zaradi žičnate zanke, kapaciteto pa ustvari kovinska površina žice, ki teče vzdolž zanke. Upor žice je majhen, vendar vedno prisoten in se večja z naraščajočo dolžino žice. Ko elektromagnetni val, ki pride iz VLF oddajnika, prečka zanko, nastane v žici zelo majhna (~ 0.1 mV) inducirana napetost. Da dosežemo boljši signal, povečamo število navojev zanke ali pa povečamo površino antene. Ko število navojev narašča, kapaciteta narašča, kar pa zmanjšuje resonančno frekvenco. Prav tako narašča tudi upor žice, kar pa zmanjšuje amplitudo signala. Na srečo obstajajo elektronski ojačevalci, ki lahko signale povečajo za 100 ali več 1000-krat [1].

3.1 Lokacija AGO

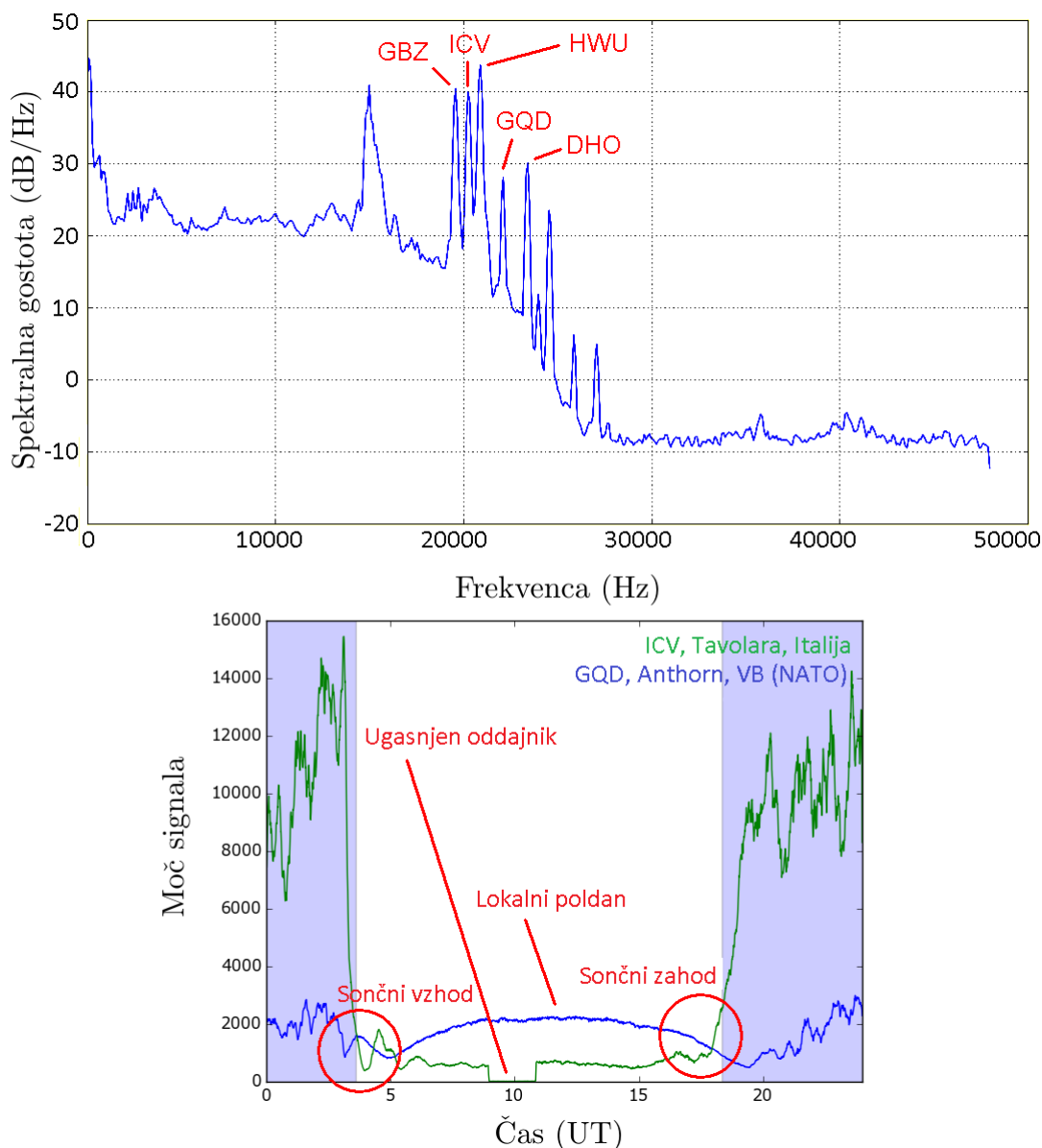
Da bi lahko proučeval nenadne ionosferske motnje (SIDs), sem postavil lastno anteno. Sestavne dele, vključno s strojno in programsko opremo, je priskrbel Stanford Solar Center [1]. Antena z dodeljenim imenom AGO se nahaja na astronomskem geofizikalnem observatoriju Golovec v Ljubljani. Antena je sestavljena iz izolirane bakrene žice in je navita okoli 2 m širokega lesenega okvirja ter ima 30 navojev. Okvir, ki je privit na leseno steno, zagotavlja oporo za žico. Konca žice sta preko vijačne sponke povezana z 9 m dolgim koaksialnim kablom, ki potuje v kontrolno sobo, glej sliko 3. Konec koaksialnega kabla je povezan s predojačevalnikom. Ta dvigne signal do take mere, da ga lahko zajamemo s PC zvočno kartico, na katero je povezan preko Line-in vhoda. Zvočna kartica pretvarja signal iz analognega v digitalni, ki pa je pozneje računalniško obdelan s Stanford Solar Center SuperSID 1.2.2 programsko opremo [1].



Slika 3. Antena AGO na astronomskem geofizikalnem observatoriju Golovec v Ljubljani. Navita je okoli 2 m širokega lesenega okvirja ter ima 30 navojev. Konca žice sta preko vijačne sponke (na sliki levo) povezana z 9 m dolgim koaksialnim kablom, ki potuje v kontrolno sobo.

4. Zbiranje podatkov in interpretacija

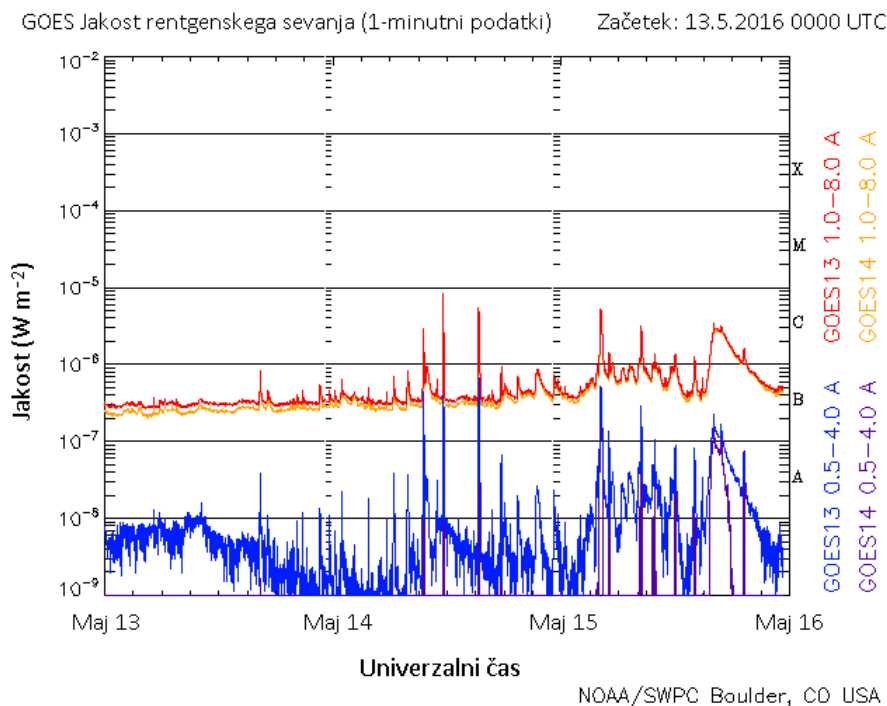
SID monitor se na lokaciji AGO prebudi vsakih 5 sekund, zajame 1 sekundo podatkov o moči signala za vsakega od vrhov, izračuna spektralno gostoto oz. PSD (z uporabo Welchove metode) in prikaže spekter. Omenjeni vrhovi ustrezajo frekvencam VLF oddajnikov, (glej tabelo 1). Če je razmerje signal-šum veliko, je dnevni graf čistejši. Tega dobimo preko hitre Fourierove transformacije (FFT), ki jo opravi programska oprema sama. Po 24-ih urah dobimo dnevni graf moči signala v odvisnosti od časa, ki je pripravljen na nadaljno analizo. Oba grafa sta prikazana na sliki 4 spodaj. Spodnji graf prikazuje, da doseže dnevni signal vrh okoli poldneva, ko je Sonce na najvišjem višinskem kotu nad obzorjem. Ponoči je moč signala primerno večja od dnevne, zaradi višjega odbojnega koeficienta ionosfere ter zaradi odsotnosti D sloja. Na širjenje VLF valov močno vplivajo karakteristike ionosfere, ki vodijo do močnih variacij signala, ki preprečuje nočno opazovanje SID-ov [1]. Naslednji korak je identifikacija Sončevih izbruhov. Ti so ponavadi na grafu vidni kot velike špice (odvisno od moči izbruha). Dvigajo se zelo hitro, pridejo do vrha in počasi padajo ter se sklopijo s signalom iz ozadja. Ker pa Sonce ni edini izvor omenjenih motenj, lahko občasno pride do pomote pri identifikaciji izvora [1]. V naslednjem podpoglavju je opisan način, s katerim si tovrstni problem zagotovo olajšamo.



Slika 4. Zgornji graf prikazuje PSD v odvisnosti od frekvence. Vrhovi, ki so označeni se skladajo s tabelo 1. Neoznačene vrhove lahko najdete v [7]. Spodnji graf prikazuje moč signala skozi čas (UTC) za dva oddajnika (ICV in GQD), dne 9.5.2016, pridobljenega na lokaciji AGO. Oba signala imata značilen vzorec Sončevega vzhoda in zahoda. Območje med njima je tisto, kjer se lahko pojavijo izbruhi. Dnevni signal doseže vrh okoli lokalnega poldneva, ko je Sonce na najvišjem višinskem kotu nad obzorjem. Vodoravna zelena črta prikazuje, da je bil oddajnik, verjetno zaradi vzdrževalnih del, takrat ugasnjen. Ponoči je moč signala primerno večja od dnevne, zaradi višjega odbojnega koeficienta ter zaradi odsotnosti D sloja ionosfere. Na širjenje VLF valov močno vplivajo karakteristike ionosfere, ki vodijo do močnih variacij signala, ki preprečuje nočno opazovanje SID-ov [1].

4.1 Satelit GOES

Sateliti GOES (G13, G14, G15) se nahajajo v geostacionarni orbiti okoli Zemlje, dovolj visoko, da lahko spremljajo celotno ploskev Zemlje in obenem opazujejo tudi izbruhe na Soncu. Za razliko od SID monitorja, GOES sateliti merijo emisijo direktno s Sonca. Oblika izbruhov je precej podobna tistim, ki jih pridobimo na Zemlji. Graf (glej sliko 5) prikazuje jakost rentgenskega sevanja s Sonca (0.1 - 0.8 nm) skozi čas. Vrhovi ustrezajo močnim Sončevim izbruhom, ki vplivajo na Zemljino ionosfero. Preko primerjave podatkov s satelitov GOES in podatkov pridobljenih na lokaciji AGO, je izbruhe enostavno razkriti [1], [7].



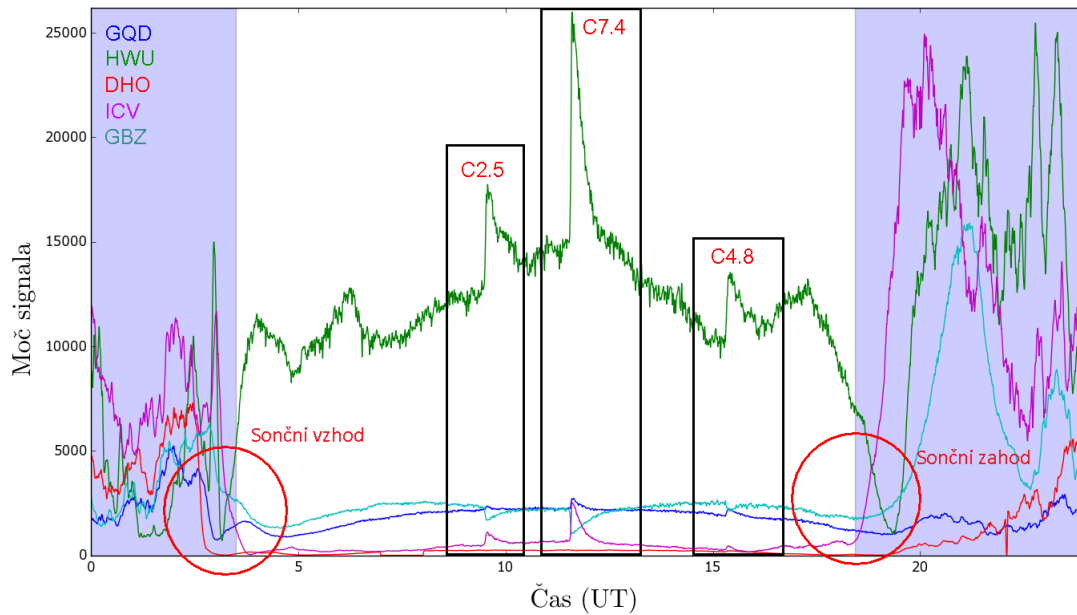
Slika 5. Graf prikazuje jakost rentgenskega sevanja s Sonca (0.1 - 0.8 nm) skozi čas. Vrhovi ustrezajo močnim Sončevim izbruhom, ki vplivajo na Zemljino ionosfero. Graf prikazuje podatke pridobljene med 13.5. - 16.5.2016, [8].

5. Rezultati

Od 20.2.2016 uspešno merim nenadne ionosferske motnje na lokaciji AGO. Do sedaj sem detektiral 29 izbruhov na Soncu, različnih moči in trajanja, 28 od tega je bilo izbruhov razreda C. Najmočnejši klasificiran izbruh je imel oznako C7.4, najšibkejši B6.5. Če predpostavim, da je opazovalna perioda (87 dni) zelo kratka v primerjavi s Sončevim ciklom (≈ 11 let), lahko naredim enostavno oceno pogostosti izbruhov razreda C na Soncu. Pogostost (frekvenca) F_c je potem $F_c \sim 2N_f/P_o \approx 0.6$, kar pomeni okoli 3 izbruhe razreda C v 5-ih dneh. N_f označuje število izbruhov, P_o je opazovalna perioda, številski faktor 2 pa pride iz predpostavke, da detektiram le polovico izbruhov, saj jih ponoči ne morem detektirati. Poleg tega lahko predpostavim še faktor $\times 2$, ker izbruhi na nasprotni strani Sonca, nam niso vidni. To mi prinese grobo oceno o frekvenci C izbruhov, približno 1 izbruh na dan. Pri tej oceni pa moramo biti previdni, saj se ta nanaša le na trenutni Sončev cikel.

Na sliki 6 spodaj so predstavljeni nedavni izbruhi na Soncu (14.5.2016), pridobljeni na lokaciji AGO. Črni pravokotniki predstavljajo območja sovpadajočih izbruhov za različne signale VLF oddajnikov. Časi maksimumov se dobro (znotraj 3 minutnega časovnega okna) ujemajo z vrhovi pridobljenimi z GOES 13 in GOES 14, (glej sliko 5). Moč signala z nekaterih oddajnikov pravzaprav pade, kar je posledica destruktivne interference valov. Signali tipično strmo narastejo, pridejo do vrha in se potem počasi zmanjšajo na raven ozadja. Rdeči krogi označujejo sončni vzhod in zahod, ko moč signala nenadno naraste ali pade.

Tabela 3 spodaj prikazuje najmočnejši izbruh razreda C, doslej detektiranega na AGO. Vrh izbruha (FPT, flare peak time) se je zgodil ob 11:34 UT, opazovani čas vrha (OPT, observed peak time) je sledil minuto kasneje za GBZ signal in 2 minuti kasneje za ICV signal. Na podlagi tega lahko ocenimo potreben čas za rentgensko sevanje, da ionizira D sloj Zemljine ionosfere. Poleg tega



Slika 6. Slika prikazuje nedavni Sončev izbruh (14.5.2016), detektiran na lokaciji AGO. Črni pravokotniki predstavljajo območja sovpadajočih izbruhov za različne signale VLF oddajnikov. Moč signala z nekaterih oddajnikov pravzaprav pade, kar je posledica destruktivne interference valov. Ti tipično strmo narastejo, pridejo do vrha in se potem počasi zmanjšajo na raven ozadja. Rdeči krogi označujejo sončni vzhod in zahod, ko moč signala nenadno naraste ali pade.

lahko iz relaksacijskega časa ocenimo tudi efektivni koeficient rekombinacije, ki je pomemben člen pri reševanju kontinuitetne enačbe za elektrone. Časovna zakasnitev je odvisna od propagacijske poti in frekvence VLF signala [2]. Nadalje lahko izračunamo razliko moči signalov (amplitudo) med dnevom, ko se je izbruh zgodil in predhodnjim dnevom (tiho Sonce). Razlika signala pomeni razliko amplitud ΔA . Preko te vrednosti lahko pridobimo parametre β in h' v času izbruha. To je mogoče z uporabo LWPC (Long Wave Propagation Compatibility Code) kode, v LWPM (Long Wave Propagation Model) načinu, kjer prevodnost ionosfere eksponentno narašča z višino. Strmina profila β in referenčna višina h' definirata eksponentni model. Razliko amplitud ΔA prištejemo k simulirani neperturbirani (tiho Sonce) vrednosti A_{lwpc} , ki je pridobljena preko LWPC kode,

$$A'_{\text{perturb}} = A_{\text{lwpc}} + \Delta A.$$

To nam da perturbirano vrednost (Sončev izbruh) A'_{perturb} , preko katere določimo strmino profila in referenčno višino v času izbruha. Na koncu lahko izračunamo profil gostote elektronov za spodnji del ionosfere, podan z enačbo 7 [2]. Tega zaenkrat ne morem izračunati, saj LWPC kode ne posedujem.

Frekvenca [kHz]	Razred	FPT [UT]	OPT [UT]	ΔT [min]	T [UT]	ΔA
19.6, GBZ	C7.4	11:34	11:35	1	11:25	177
					11:35	1110
					11:45	797
					11:55	555
20.27, ICV	C7.4	11:34	11:36	2	11:25	207
					11:35	1357
					11:45	983
					11:55	305

Tabela 3. Tabela prikazuje najmočnejši izbruh razreda C, doslej detektiranega na AGO. Vrh izbruha (FPT, flare peak time) se je zgodil ob 11:34 UT, opazovani čas vrha (OPT, observed peak time) je sledil minuto kasneje za GBZ signal in 2 minuti kasneje za ICV signal. Satelit GOES zajame podatke enkrat na minuto. FPT (podatek z GOES) in OPT (podatek z lokacije AGO) sta zato na minuto natančna. Izračunamo lahko razliko moči signalov (amplitudo) med dnevom, ko se je izbruh zgodil in predhodnjim dnevom (tiho Sonce). Razlika signala pomeni razliko amplitud ΔA . Preko te vrednosti lahko z uporabo LWPC kode pridobimo parametre β in h' v času izbruha, [1].

6. Zaključek

Namen tega članka je bil predstaviti relativno novo področje raziskovanja v fiziki/astrofiziki, ki vključuje proučevanje efektov Sončevih izbruhov na Zemljino ionosfero, z uporabo detekcije VLF valov. V teoretičnem uvodu sem opisal glavne komponente ionosfere in procese, ki prispevajo k stalno spreminjajoči se koncentraciji elektronov in ionov. Poudarek sem dal na D sloj ionosfere, saj se VLF radijski valovi podnevi od tega odbijajo. Pri širjenju VLF valov sem opisal spodnjo (cut-off frekvenca) in zgornjo (plazemska frekvenca) limito znotraj valovnega vodnika Zemlja-ionosfera. Nenadne ionosferske motnje povzročajo večinoma rentgenski žarki s Sonca. Motnja ima temeljit učinek na potovanje radijskih valov. Tekom SID-a se koncentracija elektronov v D sloju ionosfere, v roku nekaj minut, nenadno poveča in se potem počasi relaksira na magnitudo ozadja. Da bi detektiral tovrstne ionosferske motnje, sem sestavil svoj lasten SID monitor, ki se nahaja na astronomskem geofizikalnem observatoriju Golovec v Ljubljani in uspešno deluje od 20.2.2016. Od takrat sem detektiral 28 Sončevih izbruhov razreda C, različnih moči in trajanj. Najmočnejši zabeležen izbruh ima oznako C7.4. Preko primerjave podatkov s satelitov GOES 13 in GOES 14 ter podatkov pridobljenih na lokaciji AGO, zlahka razkrijem Sončeve izbruhe. Z nekaj predpostavkami sem izračunal povprečno število Sončevih izbruhov razreda C in predstavil način, kako bi ocenil učinkovit koeficient rekombinacije, ki je ključen za reševanje kontinuitetne enačbe za elektrone. Pomembna se mi zdi tudi ideja o izračunu profila gostote elektronov preko ΔA , β in h' . S podatki, ki jih bom pridobil z anteno na lokaciji AGO, bom lahko ustvaril model spodnjega dela ionosfere in proučeval, kakšni so efekti Sončevih izbruhov nanjo. Poleg naštetega bom lahko pridobil tudi podrobnejši vpogled v sezonsko in dnevno variacijo moči signala. Za konec bi omenil še en cilj, to je, narediti SID monitor popolnoma avtonomen sistem, ki bo sposoben razlikovati med izbruhi na Soncu in drugimi motnjami.

LITERATURA

- [1] *The SID Monitor*, dosegljivo na <http://solar-center.stanford.edu/SID/sidmonitor/> (15.8.2016)
- [2] P. Sujay, *Numerical modelling of VLF radio wave propagation through earth-ionosphere waveguide and its application to sudden ionospheric disturbances*, 2015, 150pp, arXiv:1503.05789.
- [3] *The Ionospheric Layers*, dosegljivo na https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere#The_ionospheric_layers (15.8.2016)
- [4] Ratcliffe J.A., *An introduction to the ionosphere and magnetosphere*. Cambridge University Press **75** 1972, ISBN 0-521-08341-9.
- [5] *Ionosphere Waveguide*, dosegljivo na https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%E2%80%93ionosphere_waveguide (15.8.2016)

MONITOR ZA SPREMLJANJE NENADNIH IONOSFERSKIH MOTENJ

- [6] *Flare Classes*, dosegljivo na <http://spaceweather.com/glossary/flareclasses.html> (15.8.2016)
- [7] *SID Stations*, dosegljivo na <http://sidstation.loudet.org/stations-list-en.xhtml> (15.8.2016)
- [8] *GOES X-ray Flux*, dosegljivo na <http://services.swpc.noaa.gov/images/goes-xray-flux.gif> (15.8.2016)