

Sprejemnik za elektromagnetne valove frekvenc pod 50 Hz

Rudi Čop, Franci Henigman

Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje
E-pošta: rudi@artal.si

Povzetek. V članku so opisane gradnja sprejemnika ELF (Extremely Low Frequency), njegova montaža na observatoriju in analiza sprejetih signalov. Na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenija) merimo spremembe zemeljskega magnetnega polja po mednarodnih priporočilih. V naših razmerah ta priporočila dopuščajo meritve z digitalnimi magnetometri le z enosekundnim vzorčenjem. Za meritve geomagnetnih impulzov, naravnih resonančnih frekvenc našega planeta in razmer v ionosferi smo zgradili sprejemnik ELF. Ker smo prvotno želeli odkriti izvore šuma v geomagnetnem polju frekvenc od 0,01 Hz do 1 Hz, smo njegovo anteno usmerili vertikalno. Komponenta Z geomagnetnega polja na ozemlju Slovenije je tista, ki je najbolj obremenjena s šumom. Odkrili smo, da so v frekvenčnem območju od 5 Hz do 50 Hz elektromagnetne motnje umetnega izvora, ki vplivajo tudi na območje pod 1 Hz.

Ključne besede: sprejemnik ELF, obdelava sprejetih signalov, elektromagnetne motnje

An electromagnetic wave receiver at frequencies beyond 50 Hz

The paper describes the structure of an extremely low frequency (ELF) receiver, its assembly, and analysis of the received signals. At the PIA Geomagnetic Observatory (Piran, Slovenia) we measure changes in the geomagnetic field according to the applicable international recommendations. For this purpose we use only one-second sampling magnetometers. To register geomagnetic pulsations, natural resonant frequencies of the planet Earth and its ionospheric conditions, we constructed an Earth Receiver with a vertically directed antenna to detect the noise sources in the geomagnetic field in the frequency range from 0.01 Hz to 1 Hz. In Slovenia, the most noisy geomagnetic field component is the Z component. It is being noted that, in the frequency range from 5 Hz to 50 Hz, there are electromagnetic disturbances of an artificial origin with an impact below 1 Hz.

Keywords: ELF receiver, signal analysis, electromagnetic noise

1 NARAVNE RESONANČNE FREKVENCE ZEMLJE

Vibracije Zemlje v elektromagnetnem (v nadaljnjem besedilu: EM) spektru nastajajo v votlem resonatorju med Zemljo in njeno ionosfero. O tem naravnem resonatorju vemo relativno zelo malo. V prvem približku lahko Zemljo in njeno atmosfero obravnavamo kot radialno oblikovano školjko, sestavljeno iz treh plasti z različno električno prevodnostjo, ki tvorijo

zaključen valovod. Zemlja in ionosfera, ki sta med seboj oddaljeni od 100 do 150 km, sta izjemno dobra prevodnika. Med njima so zračne plasti, ki niso naelektrene in so zato neprevodne. Udari strel v troposferi sproščajo energijo v ta votli resonator in EM-valovi potujejo okoli zemeljske oble. Skoraj stojno valovanje ima približno osnovno frekvenco $f_0 = 7,8$ Hz, ki je povprečna vrednost, izračunana iz izmerjenih vrednosti v daljšem časovnem obdobju. To stojno valovanje ima vozle s približnimi frekvencami 14, 21, 26, 33, 39 in 45 Hz, ki se dnevno spreminjajo za $\pm 0,5$ Hz [1, 2]. Po označbah mednarodne zveze za telekomunikacije spadajo EM-valovi od 0,03 Hz do 300 Hz v območje ELF [3].



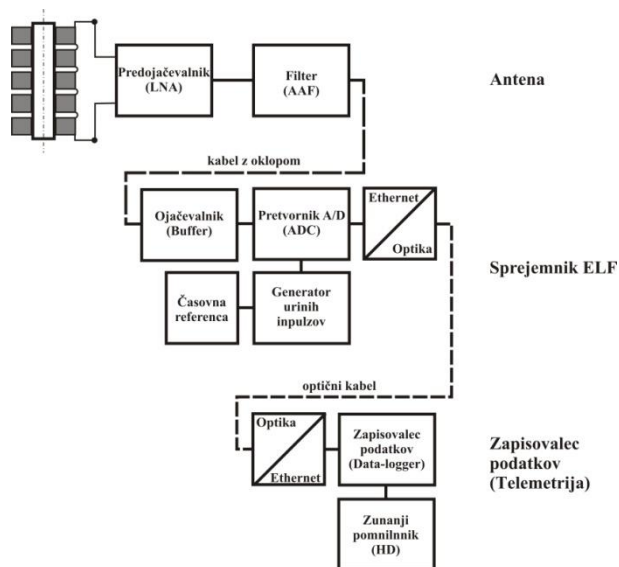
Slika 1: Antena sprejemnika ELF na observatoriju v jaški, globokem 2 m

Nikola Tesla (1856–1943) je bil prvi, ki je dejansko raziskoval naravno resonanco Zemlje. Na začetku 20. stoletja je opravil pionirsko delo na tem področju in si pridobil patentno zaščito za oddajnik, ki je ustvarjal stojno valovanje med zemeljsko površino in ionosfero s približno frekvenco 8 Hz. To valovanje je nameraval uporabljati za brezžični prenos energije. Leta 1952 je nemški fizik Winfried Otto Schumann (1888–1974) objavil svoje teoretične izsledke o resonančnem pojavu našega planeta. Dve leti pozneje je skupaj s svojim sodelavcem objavil tudi rezultate meritev teh resonančnih frekvenc. Po njem se ta pojav imenuje tudi Schumannove resonance [4, 5].

Eden od matematičnih modelov za izračun Schumannovih resonančnih frekvenc [6] je predstavljen v enačbi (1).

$$f = \sqrt{\frac{n(n+1)}{2\pi} \frac{c}{r_e} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}} \quad (1)$$

V enačbi (1) sta poleg številke vozla $n \geq 1$, hitrosti svetlobe c in srednjega polmera Zemlje r_e še mejni višini za najnižjo ionosfersko plast D: $h_1 \sim 40\text{--}50$ km in $h_2 \sim 75\text{--}90$ km.



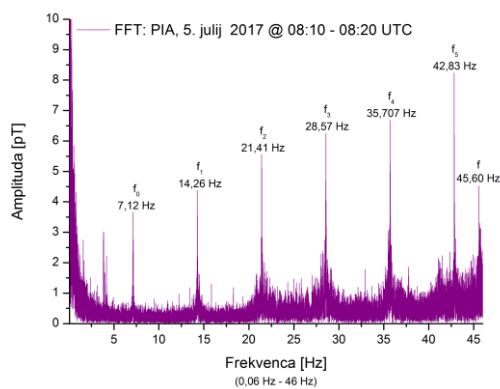
Slika 2: Blokovna shema širokopasovnega sprejemnika ELF

Globalna detekcija strel za potrebe zračnega prometa je bila prva področje uporabe naravnih resonančnih frekvenc Zemlje. V ta namen so potrebni vsaj trije sprejemniki ELF, ki imajo po dve pravokotno postavljeni anteni v vodoravni ravnini. Časovno morajo biti dobro sinhronizirani in med seboj čim bolj oddaljeni. Danes se meritve s temi sprejemniki kombinirajo z zelo občutljivimi in hitrimi optičnimi kamerami na zemeljski površini in na satelitih zaradi sočasne detekcije razelektritev v ionosferi TLE (transient luminous events) [1, 6]. Področja uporabe

sprejemnikov ELF so še: globalna detekcija ionosferske plasti D ter ugotavljanja stanja vesolja v bližini Zemlje (Space Weather), spremljanje spremembe klime, ugotavljanje bioloških efektov in spremljanje zemeljskih potresov [7]. Naravni pojavi se v tem primeru proučujejo na podlagi spremembe frekvence, amplitude in faze pri širjenju EM-vala okoli planeta skozi njegovo atmosfero. V ta namen se uporabljajo širokopasovni sprejemniki ELF z neposrednim ojačanjem analognega signala in njegovo pretvorbo v digitalno obliko.

2 GRADNJA SPREJEMNIKA

Gradnje sprejemnika ELF za sprejem frekvenc od 1 mHz do 50 Hz smo se lotili z namenom, da bi z njim dopolnili obstoječe merilne sisteme na ozemlju Slovenije: meritve sprememb lokalnega zemeljskega polja na observatoriju PIA (Piran, Slovenija; v nadaljnjem besedilu: observatorij), spremljanju udarom strel [8] in seizmološke meritve [9]. Kot izhodišče smo uporabili nekatere uspešne projekte amaterjev [10, 11], ki ljubiteljsko spremljajo naravne resonančne frekvence Zemlje, in profesionalne projekte [12, 13], ki so namenjeni raziskavam na področju geofizike. Varno in zanesljivo delovanje pa je bilo vodilo pri načrtovanju antenskega sistema in samega sprejemnika ter načina njune vgradnje na observatoriju.

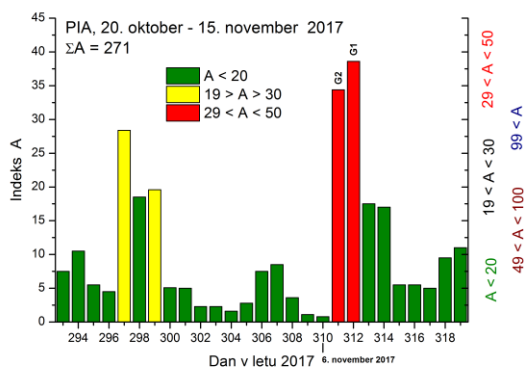


Slika 3: Spektralna analiza merilnih podatkov sprejemnika ELF 5. julija 2017 med 08:10 in 08:20 UTC v frekvenčnem območju od 0,06 Hz do 46 Hz

Antena, ki zajema B-komponento EM polja (B-antena), je radijska antena z zaključenim tokokrogom, ki je zgrajena iz enega ali več ovojev (angl. magnetic loop antenna). Impedanca te antene je bila prilagojena lastnostim vhoda predojačevalnika. Ker taka antena zelo dobro sprejema tudi šum, ki ga povzroča sistem za prenos električne energije, jo je treba postaviti zelo daleč stran od vira teh motenj. Če je njena os usmerjena proti središču Zemlje (slika 1) je najmočnejši sprejem tistega koristnega signala, ki ga ustvarjajo zemeljski električni tokovi. To vrsto antene lahko na observatoriju preprosto zaščitimo pred vplivom atmosferskih

prenapetosti. Tako zaščito smo namreč na observatoriju že pred tem uspešno preizkusili pri zavarovanju magnetometrov [14].

B-anteno sprejemnika ELF sestavljata jedro iz mehkomagnetnega materiala in električno navitje. Jedro je okrogla kovinska palica, dolga 400 mm in s premerom 25 mm iz Mu-metala. Mu-metal je standardna zlitina niklja, molibdena in železa kot polnilo, ki ima tipično relativno magnetno permeabilnost μ_r med 80.000 in 100.000. Največjo magnetno permeabilnost $\mu_r \sim 350.000$ doseže pri šibkem enosmernem magnetenju [15]. Z jedrom iz mehkomagnetnega materiala z visoko magnetno permeabilnostjo se B-anteni zelo zmanjša potrebno število ovojev njene tuljave in s tem njene dimenzije in teža. Je pa merilni sistem z mehkomagnetnim jedrom in z indukcijsko tuljavo težje umeriti. Če je vhodni signal premočan, se ustvarjajo višje harmonske frekvence, zaradi nelinearnosti jedra pa je izhodni signal vedno popačen.



Slika 4: Z geomagnetnim indeksom A prikazana geomagnetna aktivnost za posamezni dan v enem efektivnem obratu Sonca od 20. oktobra do 15. novembra 2017

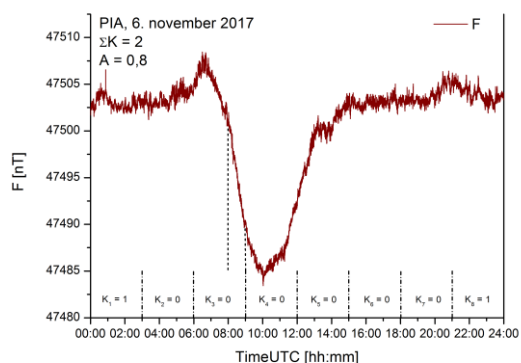
Navitje B-antene ima 9000 ovojev izolirane bakrene žice s premerom 0,711 mm (22 SWG). Pri tako velikem številu ovojev pride do izraza parazitska kapacitivnost med ovoji. Da bi bila ta čim manjša, je navitje B-antene sestavljeno iz petih zaporedno vezanih tuljav (slika 2).

Načrtovanje B-antene sprejemnika ELF (angl. Earth Receiver) pomeni njeno optimizacijo za sprejem zelo šibkih signalov. Da se zagotovi njena občutljivost pod pT (10^{-12} T), je treba uskladiti njeno impedanco na vhodno stopnjo operacijskega ojačevalnika v predojačevalniku, ki deluje v režimu tokovno napetostnega pretvornika. Občutljivost sprejemnika ELF omejujeta termični šum tega ojačevalnika in termični šum navitja B-antene.

Za sprejem zelenega signala smo zgradili širokopasovni sprejemnik ELF z neposrednim ojačanjem [16]. Neposredno ojača sprejeti analogni signal, ga filtrira, neposredno pretvori v digitalno obliko in nato tudi shrani. Omogoča uravnoteženje med lastnostmi sprejemnika in izbranimi področji uporabe merilnih rezultatov. Optimizirali smo tudi njegovo

razmerje med koristnim signalom in šumom SNR (Signal-to-Noise Ratio). Zelo pomembna sta njegovo enakomerno ojačanje po celotnem frekvenčnem območju in velika dinamika odziva. Zadostitev vsem tem pogojem pa omejuje ojačanje signala, ki je potrebno za digitalizacije DSP (Digital Signal Processing) [17]. Veliko ojačanje operacijskih ojačevalnikov namreč podaljšuje integracijske čase in s tem zmanjšuje njihovo dinamiko. Zgradba širokopasovnega sprejemnika ELF je predstavljena v blokovni shemi (slika 2).

Antena s predojačevalnikom in aktivnim analognim filtrom je s samim sprejemnikom povezana prek kabla z električnim oklepom. Ta preprečuje, da bi preostali sestavni deli sprejemnika vplivali na sprejemno anteno: časovna referenca z digitalno-analognim pretvornikom ADC (Analog-to-Digital Converter) in pretvornik za prenos digitaliziranih podatkov prek optičnega kabla. Optični kabel prenaša merilne podatke do njihovega zapisovalca (angl. data-logger, data recorder) in obenem omogoča popolno galvansko ločitev sprejemnika ELF. Na observatoriju je sprejemnik zaprt v nepredušno plastično škatlo, ki je nameščena v komunikacijskem jašku. Napaja se iz enosmernega napajalnega sistema, ki je tudi galvansko ločen od preostalih naprav in zemlje.



Slika 5: Absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja, izmerjena na observatoriju PIA 6. novembra 2017 ter vrednost indeksa K in ekvivalentne dnevne amplitude A za ta dan

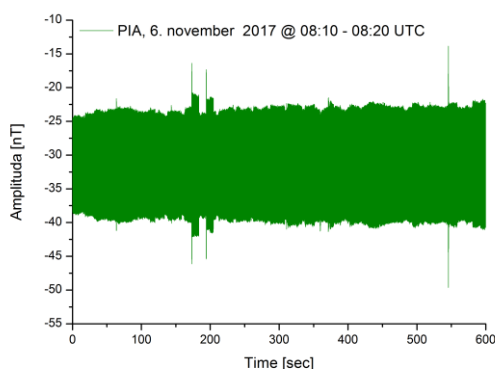
Širokopasovni sprejemnik na observatoriju vzorči analogni signal z 200 vzorci na sekundo (200 sps). Tako vzorčenje, ki presega minimalno število potrebnih vzorcev, omogoča večjo stabilnost aktivnih analognih filtrov in kakovostnejšo pretvorbo v digitalno obliko. Analogno-digitalni pretvornik ADC v sprejemniku ELF na observatoriju je pravi 16-bitni pretvornik.

3 MERITVE V FREKVENČNEM OBMOČJU OD 5 Hz DO 50 Hz

Nelinearni sistemi se na vzbujevalno funkcijo, ki je sinusne oblike in ene same frekvence, pogosto odzivajo z odzivom, ki vsebuje večje število frekvenc. Te frekvence so večkratniki vzbujalne frekvence (superharmonične frekvence). Takšen odziv je stabilen in se

vedno pojavi pri vzburjanju nelinearnega sistema. V posebnih primerih pa se pojavijo tudi odzivi s frekvencami, nižjimi od frekvence vzbujevalnega signala (subharmonične frekvence). Za takšen odziv sta potrebna, poleg nestabilnosti nelinearnega sistema, tudi vzbujalni signal neke najmanjše jakosti in prava faza. Od frekvence vzbujalnega signala f_0 so podharmonične frekvence nižje za večkratnik polovice frekvence vzbujalnega signala $f_0/2n$, kjer je n pozitivno celo število večje od ena. Običajno obstajajo te frekvence v parih, pri čemer pa je vsota vsakega para enaka frekvenci vzbujalnega signala f_0 [18].

Meritve sprejemnika ELF so v geomagnetno mirnem dnevu najmanj pod vplivom Sonca. V času enega učinkovitega obrata Sonca od 1. julija do 27. julija 2017 je bil izbran najbolj miren geomagnetni dan 5. julij 2017. Tega dne je geomagnetni indeks A , ekvivalent dnevnih amplitud, na observatoriju PIA dosegel vrednost $A = 2,25$. Ta linearni indeks je primeren za opisovanje geomagnetnih razmer v preteklosti in doseže največjo vrednost $A_{\max} = 400$. Najbolj mirno obdobje v dopoldanskih urah 5. julija 2017 je bilo med 06:00 in 09:00 uro UTC. V tem času je bila vrednost geomagnetnega indeksa $K = 0$.



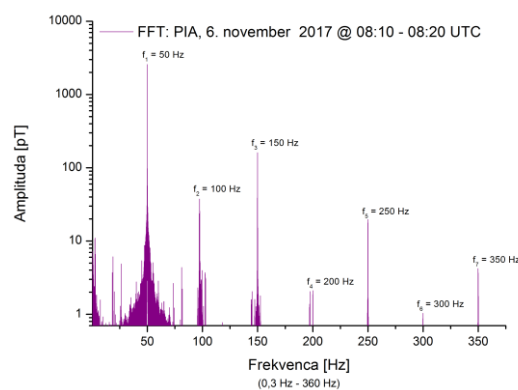
Slika 6: Rezultat meritve s sprejemnikom ELF na observatoriju PIA 6. novembra 2017 od 08:10 do 08:20 UTC predstavljen v časovnem prostoru

Geomagnetni indeks K je logaritmčni indeks, primeren za opisovanje trenutnih razmer v zemeljskem magnetnem polju, lahko doseže največjo vrednost $K_{\max} = 9$ [19, 20]. Za analizo merilnih podatkov sprejemnika ELF je bila izbrana zadnja ura v tem triurnem obdobju. V začetku te ure se je začasno upočasnilo pojevanje absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja F [nT]. V dopoldanskih urah geomagnetno mirnega dne zemeljsko magnetno polje zelo enakomerno slabi do sončnega poldneva, nakar se do sončnega zahoda ponovno enakomerno povečuje. Poveča se do nivoja, ki nato velja vso noč.

Rezultat frekvenčne analize FFT v območju med 0,06 Hz in 46 Hz meritev, narejenih 5. julija 2017 med 08:10 in 08:20 UTC, so predstavljeni na sliki (slika 3). Glede na rezultate obdelave v preostalih časovnih obdobjih istega dne, kot tudi v drugih geomagnetno

mirnih dneh, je to izjemen rezultat. Frekvence od f_1 do f_6 z izstopajočimi amplitudami enakomerno upadajo tako po frekvenci kot tudi po amplitudi. Od mrežne frekvence $f = 50$ Hz je frekvenca f_1 odmaknjena za $\Delta f = 7,1$ Hz. Isti razmak obstaja tudi med vsemi drugimi frekvencami, nižjimi od f_0 . Vsota posameznega para teh frekvenc $f_1 + f_6, f_2 + f_5, f_3 + f_4$ da vrednost osnovne frekvence $f = 50$ Hz. Z obravnavo merilnih podatkov samo v frekvenčnem prostoru od 0,06 Hz in 46 Hz ni mogoče določiti pravega izvora teh frekvenc, kot tudi ne izvora frekvence $f = 45,6$ Hz.

Za analizo merilnih podatkov s sprejemnika ELF na observatoriju PIA je bil v učinkovitem obratu Sonca od 20. oktobra do 15. novembra 2017 (slika 4) izbran 6. november 2017, ko je bila ekvivalentna dnevna amplituda $A = 0,8$. Za analizo merilnih podatkov sprejemnika ELF je bilo izbrano časovno obdobje od 08:10 do 08:20 UTC v triurnem intervalu od 06:00 do 09:00 UTC, ko je bila vrednost geomagnetnega indeksa $K = 0$. V izbranem časovnem obdobju je absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja F [nT] zelo enakomerno pojema (slika 5).



Slika 7: Spektralna analiza od 0,3 Hz do 360 Hz rezultatov meritev s sprejemnikom ELF na observatoriju PIA 6. novembra 2017 od 08:10 do 08:20 UTC

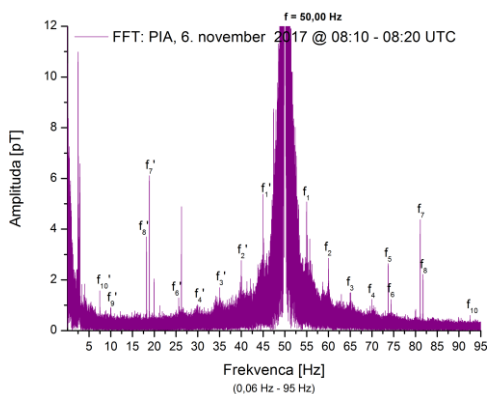
Pri dani konstrukciji sprejemnika ELF in njegovega zapisovalca podatkov (data-logger) je bilo izbrano 1000 sps (sample per second), največje mogoče število merilnih vzorcev na sekundo (slika 6). Z uporabo ustreznega orodja za analizo FFT je bila narejena analiza v frekvenčnem prostoru od 0,3 Hz do 360 Hz (slika 7). Izrazite so sode in lihe višje harmonske frekvence od 100 Hz do 350 Hz, ki so večkratniki osnovne harmonske frekvence $f_1 = 50,0$ Hz. Okoli osnovne harmonske frekvence f_2 pa je še simetrični sistem višjih in nižjih harmonskih frekvenc s precej nižjimi amplitudami. Ta vzorec se v zmanjšani obliki ponovi tudi še okoli druge in tretje višje harmonske frekvence.

Spektralna analiza FFT rezultatov meritev s sprejemnikom ELF na observatoriju PIA v frekvenčnem območju od 0,5 Hz do 95 Hz (slika 8) kaže, da so frekvence z izstopajočo amplitudo simetrično oddaljene od osnovne frekvence $f_1 = 50,0$ Hz. Tvorijo zgornji in

spodnji bočni pas. Simetrija amplitud teh frekvenc iz zgornjega in spodnjega bočnega pasu pa ni popolna.

4 MERITVE EM-VALOV ULF

O spremembah geomagnetnega polja v frekvenčnem območju od 1 mHz do 5 Hz je prvi leta 1741 poročal švedski fizik, astronom in matematik Anders Celsius (1701–1744). Primerjal je kratkotrajne in majhne spremembe smeri kompasne igle s spremembami v polarnem siju [21]. Na začetku raziskovanja so premike konice dolge kompasne igle opazovali z mikroskopom in jih zato imenovali magnetni mikroimpulzi. Z razvojem merilne opreme so se ti pojavi v geofiziki preimenovali najprej v magnetne impulze (angl. magnetic pulsation) in nato v EM-valove ULF (ultra low frequency). Frekvenca teh valov je namreč nižja od naravne frekvence plazme, ionske žiromagnetne frekvence hladne plazme. Leta 1963 so bili ti valovi v okviru mednarodne organizacije IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) razdeljeni glede na njihovo valovno dolžino in čas trajanja [22].



Slika 8: Spektralna analiza od 1 Hz do 95 Hz rezultatov meritev s sprejemnikom ELF na observatoriju PIA 6. novembra 2017 od 08:10 do 08:20 UTC

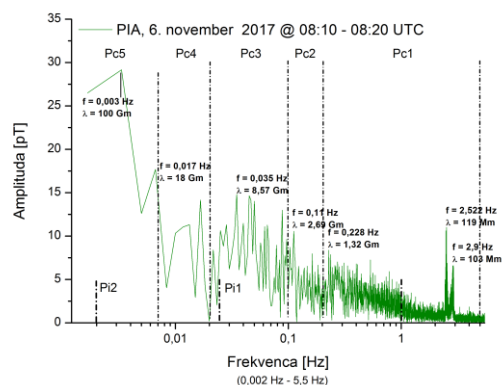
EM-valovi ULF, izmerjeni na observatoriju PIA 6. novembra 2017 od 08:10 do 08:20 UTC s pomočjo sprejemnika ELF, so predstavljeni na sliki (slika 9). V frekvenčnem prostoru od 2,0 mHz do 5,5 Hz, analiziranem po amplitudi, so razdeljeni po mednarodnih priporočilih na skupine cikličnih magnetnih impulzov Pc (pulsation continuous) približno sinusnih signalov od Pc1 do Pc5. Magnetni impulzi, ki niso ponavljajočih se oblik Pi (pulsation irregular), sestavljajo skupini Pi1 in Pi2. Ti dve skupini lahko zaznamo v frekvenčnem prostoru glede na njuno moč ali v časovnem prostoru glede na njune amplitude.

EM-valovi ULF so rezultat delovanja sončnega vetra na magnetopavzo in na posamezne dele magnetosfere [22, 23]. Ustvarjajo jih različni procesi v plazmi. Ta plazma je lahko del sončnega vetra ali je ujeta v magnetno polje Zemlje. Na vrsto teh impulzov vpliva sprememba usmerjenosti medplanetarnega magnetnega

polja in sprememba hitrosti širjenja sončnega vetra v tem prostoru [24]. Impulzi ustvarjajo EM-valove frekvence od 1 mHz do okoli 5 Hz, ki jih lahko merimo na površini Zemlje.

5 RAZPRAVA

Observatorij PIA je priključen na javno omrežje nizke napetosti za razdelitev električne energije 0,4 kV/50 Hz pri najbližji kmetiji, ki je oddaljena 90 m zračne razdalje. Stanovanjsko poslopje te kmetije sestavljata vrstni hiši, ki sta stari istrski hiši novejšega tipa [25]. Naslednja hiša, ki je že v sami vasi Sv. Peter nad Dragonjo, je od observatorija oddaljena 545 m in leži v približno isti smeri kot najbližja kmetija. Obratovalna frekvenca 50 Hz proizvodnih, prenosnih in razdelilnih trifaznih izmeničnih sistemov električne energije je kompromisna rešitev med potrebnimi prenosnimi razdaljami, električno indukcijo in kakovostjo njene uporabe [26]. Izogiba se vsem tistim frekvencam EM-polja, ki bi pomembno vplivale na delovanje naših čutil, možganov in srca [27, 28].



Slika 9: EM-valovi ULF izmerjeni na observatoriju PIA 6. novembra 2017 od 08:10 do 08:20 UTC in njihova razdelitev po skupinah na ciklične in neciklične magnetne impulze

Meritve s sprejemnikom ELF na observatoriju PIA so bile obravnavane v obdobju okoli solsticijev, ko je geomagnetna aktivnost najmanjša [29, 30]. Izbran je bil dan v posameznem učinkovitem obratu Sonca [31], ko je bila ekvivalentna dnevna amplituda A najmanjša. Meritve s sprejemnikom ELF so bile v tistem času, ko se po mednarodnih priporočilih na geomagnetnih observatorijih opravljajo tudi absolutne meritve [32, 33]. Sprejemna antena sprejemnika ELF ni v horizontalni ravnini, kot je to običajno pri meritvah Schumannovih frekvenc, temveč z osjo usmerjena v smeri zenit–nadir.

Analiza rezultatov meritev s sprejemnikom ELF v frekvenčnem območju od 0,3 Hz do 360 Hz (slika 6) pokaže višje harmonske frekvence f_2, f_3, \dots, f_7 , ki jih povzročajo magnetilni toki. Ta ustvarja izmenično magnetno polje v tuljavi z jedrom iz mehkega feromagnetnega materiala. Podrobnejša frekvenčna analiza od 1 Hz do 95 Hz pokaže spodnji in zgornji

bočni pas (slika 7). Ta dva bočna pasova sta rezultat frekvenčne modulacije [34, 35] za regulacijo vrtljajev asinhronnega motorja [36, 37]. Stopnja modulacije primera meritev 5. julija (slika 3) je enaka $\beta = 1$, v naslednjem obravnavanem primeru 6. novembra pa $\beta > 1$ (slika 7). Simetrija po amplitudah ni popolna zaradi velike širine izbranega časovnega okna v katerem je bila narejena frekvenčna analiza. V frekvenčnem prostoru od 5 Hz do 45 Hz so sicer prisotne resonančne frekvence Zemlje, vendar kot del EM-šuma.

Ugotavljanje prisotnosti motenj, ki jih povzročata naša dejavnost, omogoča nadaljnje spoznavanje naravnih frekvenc, ki so prisotne na frekvenčnih območjih pod omrežno frekvenco 50 Hz. Obravnavani frekvenčni območji od 1 mHz do 5 Hz v skupini EM-valov ULF in od 5 Hz do 50 Hz, kjer so prisotne Schumannove resonančne frekvence, sta pomembni tako za samo spoznavanje narave našega planeta kot tudi lastnosti okolja, v katerem živimo, in za nadzora nad njim [38]. Raziskave v obeh območjih frekvenc spadajo pod okrilje mednarodne organizacije IAGA, ki se je do leta 1930 imenovala IATME (International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity). Skupaj s še sedmimi sorodnimi organizacijami tvori mednarodno združenje IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Pod okriljem te krovne organizacije deluje tudi interdisciplinarna delovna skupina ESEV (Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) [39].

6 SKLEP

Na observatoriju PIA (Piran, Slovenija) se redno merijo magnetne in EM-razmere v okolju v katerem živimo v Sloveniji:

1. Ozemlje Slovenije leži na robu jadranske tektonske mikroplošče. Zaradi premikanja te plošče je ozemlje Slovenije potresno aktivno [7].
2. Čez ozemlje Slovenije prehajajo obsežne nevihtne fronte MCS (mesoscale convective system). Zato ima jugozahodni del Slovenije največjo gostoto strel v Evropi in pogoste razelektritve v zgornjem delu atmosfere TLE [40].

Zaradi naravnih razmer na ozemlju Slovenije, ki so enkratne narave, je lahko le geofizikalni observatorij tisti, ki meri te razmere v celoti. Šele na podlagi teh meritev lahko ovrednotimo vplive našega okolja na naše življenje ter vplive naše dejavnosti na to okolje [38]. Zato bi bilo treba na observatoriju izpeljati meritve tudi v drugih legah antene sprejemnika ELF in še naprej spremljati spremembe naravnih frekvenc Zemlje skozi daljše časovno obdobje.

Vzporedno z meritvami na observatoriju PIA bi bilo treba boljše umeriti sprejemnik ELF. Le če se ga umeri kot zaključen merilni sistem, skupaj z njegovo frekvenčno in fazno analizo, se lahko obvlada nelinearnost, ki jo ustvarja njegova B-antena [15]. Razvoj namenskih programskih orodij za obdelavo merilnih podatkov iz sprejemnika ELF [41, 42] bi

pospešil njihovo obdelavo in prevesil nadaljnje delo v obdelavo rezultatov meritev in v oblikovanje ustrežnejših modelov za spremljanje dogajanj v bližnjem vesolju, v celotni atmosferi Zemlje, v njeni skorji in v njeni notranjosti.

Za zanesljivejše umerjanje sprejemnika ELF z razpoložljivo merilno opremo na observatoriju je treba izboljšati časovno sinhronizacijo tako zapisovalnika merilnih podatkov sprejemnika ELF kot tudi magnetometrov. Pri izbiri njihovega operacijskega sistema je treba upoštevati potrebno zanesljivost in časovno stabilnost zapisovalnikov in hiter razvoj elektronskih komponent računalništva [43]. Te se še vedno razvijajo petkrat hitreje kot digitalni merilni instrumenti za observatorije. Zanesljivost delovanja telekomunikacijskih in računalniških sistemov na observatoriju in nizki stroški njihovega vzdrževanja pa zahtevajo tako izbiro njihove strojne opreme, da je število skupin komponent minimalno in da je čim manj tudi izdelovalcev.

ZAHVALA

Za pomoč pri gradnji in testiranju sprejemnika ELF se avtorja zahvaljujeta sodelavcem: Edvinu Salviju, Vladu Rosi, Petru Reismanu in Janezu Forteju.

LITERATURA

- [1] Schlegel, K. Füllekrug, M. "50 Years of Schumann Resonance". Translation: Catarina Geoghan, 2007. *Physik in unserer Zeit*, 33 (6), 256–26, 2002.
- [2] Farmer, W. Brian. Hannan, C. Robert. "Investigations of Relatively Easy To Construct Antennas With Efficiency in Receiving Schumann Resonances; Preparations for a Miniaturized Reconfigurable ELF Receiver". NASA/TM-2003-212647. Hampton (Virginia, US): Langley Research Center, 2003.
- [3] Recommendation ITU-R V.431-7 (08/20145); Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. Geneva (CH): International Telecommunication Union; Radio-communication Sector, 2015.
- [4] Galejs, Janis. "Schumann Resonances". *Radio Science Journal of Research*, 69D (8), 1965.
- [5] Besser, B. P. "Synopsis of the historical development of Schumann resonances". *Radio Science*, 42, RS2S02, 2007.
- [6] Sato, Mitsuteru. "Global Lightning and Sprite Activities and Their Solar Activity Dependences". Dissertation. Sendai (Japan): Tohoku University; Department of Geophysics; Graduate School of Science, 2003.
- [7] Čop, Rudi. "Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju". *Elektrotehniški vestnik*, 84 (4), 148–154, 2017.
- [8] SCALAR. Ljubljana: Elektroinštitut Milan Vidmar, <http://www.arso.gov.si/potresi/obvestila%20o%20potresih/> (4.8.2017).
- [9] Obvestila o potresih. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor; Agencija Republike Slovenije za okolje – ARSO, <http://www.arso.gov.si/potresi/obvestila%20o%20potresih/> (4.8.2017).
- [10] Rowan, Alysson. VLF natural radio Reception. Techlib.com; Marnetic Field Receiver, <http://www.techlib.com/electronics/vlfwhistle.htm> (22.6.2015).
- [11] Feletti, L. Romero, R. IDEALLOOP H301 - VLF loop receiver. Radio waves below 22 kHz; Nature Radio Signals and strange

- emissions at very low frequency, <http://www.vlf.it/feletti2/idealloop.html> (18.6.2015).
- [12] Neska, M. Satori, G. Szendroi, J. Marianiuk, J. Nowozynski, J. Tomczyk, S. "Schumann Resonance Observation in Polish Polar Station at Spitsbergen and Central Geophysical Observatory in Belsk". Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, C-99, 398, 2007.
- [13] Kruger, Anton. "Construction and Deployment of an ULF Receiver for the Study of Schumann Resonance in Iowa". Ames (IA, US): Iowa State University; Iowa Space Grant Consortium, 2013, http://www.iaspacegrant.org/sites/default/files/pdf_files/Kruger-SEED.pdf (23.5.2015).
- [14] Čop, Rudi. Milev, Goran. Deželjin, Damir. Kosmač, Janko. "Zaščita pred strelami na geomagnetnem observatoriju Sinji vrh". Elektrotehniški vestnik, 81(1–2), 33–38, 2014.
- [15] "MuMETAL". Catalog mU-2. Bensenville (IL, US): Magnetic Shield Corporation, 2012.
- [16] Parra, José. A. Gázquez. Ros, Manuel Fernández. Castellano, Nuria Novas. Salvador, Rosa M. García. "Techniques for Schumann Resonance Measurements: A Comparison of Four Amplifiers With a Noise Floor Estimate". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 64 (10), 2759–2768, 2015.
- [17] Lyons, G. Richard. Understanding Digital Signal Processing. Reading (MA, US): Addison Wesley Longman, 1997.
- [18] Yen, Nai-chyuan. "Subharmonic Generation in Acoustic Systems". Office of Naval Research, Contract N0014-67-A-0298-0007. Technical Memorandum No. 65. Cambridge (MA, US): Harvard University; Division of Engineering and Applied Physics; Acoustics Research Laboratory, 1971.
- [19] "What are K indices?". Strasbourg (France): SIIG/ISGI – Service International des Indeces Geomagnetiques/International Service of Geomagnetic Indices, 2013. http://isgi.unistra.fr/what_are_kindices.php (6.8. 2017).
- [20] Čop, Rudi. Deželjin, Damir. DeReggi, Robert. "Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K". Geodetski vestnik, 59 (4), 697–708, 2015.
- [21] Kangas, J. Guglielmi, A. Pokhotelov, O. "Morphology and physics of shortperiod magnetic pulsations (A Review)". Space Science Reviews, 83, 435–512, 1998.
- [22] McPherron, L. Robert. "Magnetic Pulsations: Their Sources and Relation to Solar Wind and Geomagnetic Activity". Surveys in Geophysics, 26, 545–592, 2005.
- [23] Odera, Joab. Timothy. "The control and generation of magnetic pulsations on the ground and in interplanetary space by parameters of the solar wind". Doctorial Thesis. Edinburgh (UK): University of Edinburgh, 1982.
- [24] Kulak, A. Kubisz, J. Michalec, A. Michalek, G. Zieba, S. "Relation of Schumann Resonances and Ionosphere Parameters to Solar Activity". Proceedings of the SOHO 11 Symposium; From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO, 11–15 March 2002, Davos, Switzerland. A symposium dedicated to Roger M. Bonnet. Edited by A. Wilson. ESA SP-508. Noordwijk (NL): ESA Publications Division, 485–488, 2002.
- [25] Čop, Rudi. "Additional exploitation of solar energy in ancient house of Istria". Proceedings. ISES Solar World Congress 2003, Solar Energy for a Sustainable Future, June 14–19, 2003, Göteborg, Sweden. Göteborg: International Solar Energy Society, 2003.
- [26] Vidmar, Milan. "Problem prenašanja električne energije". Ljubljana; Državna založba Slovenije, 65, 1947.
- [27] Helmreich, Stefan. "Potential Energy and the Body Electric Cardiac Waves, Brain Waves, and the Making of Quantities into Qualities". Current Anthropology, 54 (7), S139–S147, 2013.
- [28] "Brain Wave Signal (EEG) of NeuroSky, Inc". San Jose (CA, US): NeuroSky, 2009.
- [29] Hathaway, H. David. "The Solar Cycle". Living Reviews in Solar Physics, 7, (1), 2010.
- [30] Clivera, E. W. Kamide, Y. Ling, A. G. "The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of aa data". Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64, 47–53, 2002.
- [31] Čop, Rudi. "Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg". Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016; zbornik del. Ljubljana; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–80, 2017.
- [32] Jankowski, Jerzy. Sucksdorff, Christian. "Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice". Boulder (US): International Association of Geomagnetism and Aeronomy IAGA, 1996.
- [33] Čop, Rudi. "Absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja". Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015; zbornik del. Ljubljana; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 73–84, 2016.
- [34] "Spectrum Analysis Amplitude and Frequency Modulation". Application Note 150-1. Santa Clara (CA, US): Agilent Technologies, 2001.
- [35] Der, Lawrence. "Frequency Modulation (FM) Tutorial". Austin (TX, US): Silicon Laboratories.
- [36] Luo, Fang Lin. Ye, Hong. Rashid, Muhammad. "Digital Power Electronics and Applications". London (UK): Elsevier, 2005.
- [37] Pande, Saurabh. SINGH, Saket. "Operation of Induction Motor with Different Modulation Index". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4 (4), 2002–2006, 2017.
- [38] "Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)". 1999/519/EC. Official Journal of the European Communities, L 199, 59–70.
- [39] "IAGA, International Association of Geomagnetism and Aeronomy; Scientific Structure", IAGA, <http://www.iaga-aiga.org/about/> (16.11.2017).
- [40] Čop, R. Snowstorm at the geomagnetic observatory. Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 4, 155–159, 2015.
- [41] Klein, Max. Edward. "Autonomous ultra-low power ELF/VLF receiver systems". Doctor dissertation. Stanford (CA, US): Stanford University, 2010.
- [42] Cohen, B. Morris. Inan, S. Umran. Paschal, W. Evans. "Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception with the AWESOME Instrument". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48 (1), 3–17, 2010.
- [43] "Thoughts on Moore's Law and Related Topics". Santa Clara (CA, US): Intel, 2015.

Rudi Čop je doktoriral leta 2003 na Fakulteti za pomorstvo in promet v Portorožu in naslednje leto še na fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Zagrebu. Področje njegovega dela so merilni instrumenti, meritve in obdelava signalov. Leta 2014 je začel projekti in pripravljati gradnje observatorija PIA (Piran, Slovenija). Zdaj upravlja ta observatorij, ki od 1. januarja 2015 redno obratuje, pošilja merilne podatke v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET in se nenehno dopolnjuje tako z merilno kot tudi z ustrezno programsko opremo.

Franci Henigman je leta 1979 diplomiral z merilno-procesne tehnike na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in leta 1988 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani s področja elektrofiziologije. Razvija merilne naprave za področje elektrofiziologije in oceanografije. Je član Tehnološkega parka Ljubljana. Sodeluje pretežno z Nacionalnim inštitutom za biologijo, Inštitutom Jožef Stefan in Inštitutom za patološko fiziologijo Medicinske fakultete v Ljubljani.