

# Utjecaj Zemljine ionosfere na niskofrekventna radioastronomska promatranja

---

Nikolac, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:835433>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ivana Nikolac

UTJECAJ ZEMLJINE IONOSFERE NA  
NISKOFREKVENTNA RADIOASTRONOMSKA  
PROMATRANJA

Diplomski rad

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA - GEOFIZIKA; SMJER  
METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGIJA

**Ivana Nikolac**

Diplomski rad

**Utjecaj Zemljine ionosfere na  
niskofrekventna radioastronomska  
promatranja**

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Giuliana Verbanac

Suvoditelj diplomskog rada: dr. sc. Vibor Jelić

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2020.

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Giuliani Verbanac na stručnom vođenju i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Ponajviše se zahvaljujem mentoru dr. sc. Viboru Jeliću na izrazitom strpljenju i kontinuiranoj pomoći prilikom izrade ovog rada, kao i na svom prenesenom znanju.

Također zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i neprestanoj podršci tijekom čitavog studija, kao i prijateljima čiji su savjeti, društvo i podrška uvelike uljepšali i olakšali moje studentske dane.



## Sažetak

U radioastronomskim je promatranjima sve veći interes za provođenje promatranja na niskim frekvencijama. Glavni izvor pogrešaka na frekvencijama nižim od  $\sim 1$  GHz je Zemljina ionosfera, ionizirani turbulentni sloj plazme u gornjoj atmosferi Zemlje. Uz disperzijsko kašnjenje, zbog postojanja Zemljinog magnetskog polja, prolaskom vala kroz ionosferu dolazi i do rotacije ravnine polarizacije vala, odnosno do Faradayeve rotacije. Utjecaj ionosfere na polarimetrijska promatranja očituje se u depolarizaciji zračenja, prividnom pomaku izvora zračenja, promjeni u amplitudi intenziteta zračenja te distorziji oblika samog izvora. U ovom je radu provedena korekcija podataka na Faradayevu rotaciju u ionosferi koja se očituje kao pomak u prostoru Faradayevih dubina, a koji je proporcionalan RM (engl. *Rotation Measure*) ionosfere (gdje je RM mjera kuta polarizacije u ovisnosti o valnoj duljini zračenja). Ispitano je može li se iz podataka detektiranog polariziranog zračenja Mliječne staze odrediti RM ionosfere te ukloniti utjecaj Faradayeve rotacije u ionosferi. Korišteni su podaci dobiveni *LOW Frequency ARray* (LOFAR) radioteleskopom koji su uključivali podatke bez i s već provedenom korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Proučene su razlike u maksimumima intenziteta polariziranog zračenja bez i s korekcijom te je određen odgovarajući pomak u prostoru Faradayevih dubina. Na osnovu 10-minutnih promatranja, određena je vremenska ovisnosti pomaka u prostoru Faradayevih dubina. Vremenska ovisnost pomaka uspoređena je s vrijednostima RM ionosfere za isto vremensko razdoblje te je dobiveno dobro slaganje. Interpolacijom postojećih komponenti linearno polariziranog zračenja dobiven je novi set podataka o ukupnom polariziranom zračenju. Uspoređeni su Faraday spektri intenziteta zračenja novih podataka s onima iz originalnih podataka bez i s osnovnom korekcijom na Faradayevu rotaciju. Nakon dodatno provedene korekcije, dobiven je odgovarajući pomak u prostoru Faradayevih dubina te veći iznos maksimuma intenziteta zračenja. Proučena je Sunčeva i geomagnetska aktivnost za vrijeme LOFAR promatranje te nisu uočeni poremećaji koji bi mogli dodatno utjecati na radiopolarimetrijska promatranja.

Ključne riječi: ionosfera, radioastronomija, Faradayeva rotacija, LOFAR, RM sinteza, Faradayeva dubina, geomagnetski indeksi, geomagnetski poremećaji

# Ionospheric effects on low-frequency radio astronomical observations

## Abstract

The Earth's ionosphere, an ionized turbulent plasma layer in the Earth's upper atmosphere, is the main source of errors for radio astronomical measures below  $\sim 1$  GHz. Due to the existence of the Earth's magnetic field, when an electromagnetic wave passes through the ionosphere, it experiences not only a frequency dependent phase delay, but also Faraday rotation of the plane of polarization. In polarimetric observations, the main effects of the ionosphere are depolarization and attenuation of the signal, position shift and distortion of the source. In our work we correct for Faraday rotation in the ionosphere by determining the shift in Faraday depth space of LOFAR data, which is proportional to the ionospheric RM. The purpose is to determine the ionospheric RM from polarized synchrotron emission from the Milky Way and correct for Faraday rotation in the ionosphere. Two sets of LOFAR data averaged over a six-hour period were used (with and without standard correction for Faraday rotation in the ionosphere). We determined the differences in maximum intensities between two sets and the corresponding shift in Faraday depth space. Based on the ten-minute observations, we determined the time dependence of the shift in Faraday depth space and compared it to the corresponding ionospheric RM values. The two were in good agreement, that is, the data curves showed the same trend. Using interpolation, we shifted the existing components of linear polarized emission for the corresponding amount in the Faraday depth space and produced a new data set for total polarized emission. Comparing the Faraday spectrum of the new data set with two original data sets, we showed that the results of the new correction for Faraday rotation in the ionosphere give adequate shift of data in the Faraday depth space and higher maximum intensity of observed emission. Finally, we studied solar and geomagnetic activity during analysed LOFAR observations and did not observe any disturbances that could significantly distort polarimetric observations.

Keywords: ionosphere, radio astronomy, Faraday rotation, LOFAR, RM Synthesis, Faraday depth, geomagnetic indices, geomagnetic disturbances

# Sadržaj

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Uvod</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Zemljino magnetsko polje i ionosfera . . . . .                                 | 1         |
| 1.1.1    | Zemljino magnetsko polje . . . . .   | 1         |
| 1.1.2    | Geomagnetska aktivnost i geomagnetski indeksi . . . . .                        | 4         |
| 1.1.3    | Ionosfera . . . . .  | 5         |
| 1.2      | Utjecaj ionosfere na radioastronomska promatranja . . . . .                    | 7         |
| 1.2.1    | Niskofrekventna radioastronomska promatranja . . . . .                         | 7         |
| 1.2.2    | Utjecaj ionosfere na radioastronomska promatranja . . . . .                    | 7         |
| 1.2.3    | Stokesovi parametri . . . . .  | 9         |
| 1.2.4    | Faradayeva rotacija u Zemljinoj ionosferi i motivacija za rad . .              | 10        |
| <b>2</b> | <b>Metodologija i podatci</b>  | <b>13</b> |
| 2.1      | LOFAR promatranja . . . . .  | 13        |
| 2.2      | RMextract i TEC podatci . . . . .  | 14        |
| 2.3      | RM sinteza . . . . .   | 15        |
| 2.4      | Sunčeva aktivnost i geomagnetski indeksi . . . . .                             | 16        |
| <b>3</b> | <b>Korekcija radioastronomskih promatranja na Faraday rotaciju u ionosferi</b> | <b>17</b> |
| <b>4</b> | <b>Sunčeva i geomagnetska aktivnost</b>  | <b>26</b> |
| <b>5</b> | <b>Zaključak</b>   | <b>30</b> |
| <b>A</b> | <b>Dodatak</b>   | <b>32</b> |
| A.1      | Gaussove raspodjele za 36 10-minutnih promatranja . . . . .                    | 32        |
| A.2      | Solarne baklje . . . . .   | 37        |
|          | <b>Literatura</b>  | <b>38</b> |

# 1 Uvod

## 1.1 Zemljino magnetsko polje i ionosfera

### 1.1.1 Zemljino magnetsko polje

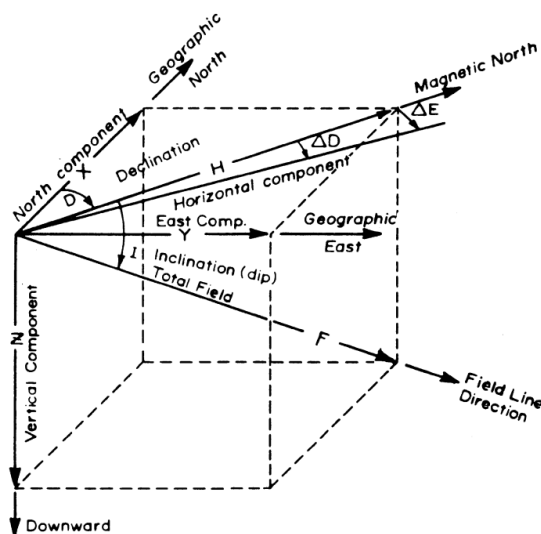
Magnetsko polje Zemlje sastoji se od glavnog magnetskog polja (oko 90% ukupnog polja), polja kore te vanjskog polja. Unatoč postojanju mnogobrojnih teorija o izvoru magnetskog polja Zemlje, općeprihvaćena je teorija samopobuđenog geomagnetskog dinama kao najbitnijeg izvora. Ostali doprinosi polju dolaze od magnetskih stijena u litosferi, ionosferskog dinama, prstenaste struje, struje magnetopauze, struje magnetskog repa i struje duž silnica magnetskog polja.

Glavno magnetsko polje stvara se u vanjskoj tekućoj jezgri, procesima dinamo-mehanizma. Za postojanje samopobuđenog geodinama potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta: postojanje vodljivog fluida, energije za gibanje, početnog magnetskog polja te dovoljno brze rotacije. Sažimanjem planeta i kristaliziranjem željeza na granici s unutrašnjom jezgrom oslobađa se toplina koja uzrokuje gibanje materijala u vanjskoj jezgri (termička konvekcija). Rotacijom planeta usmjeravaju se konvektivna gibanja. Uz postojeće magnetsko polje, gibanjem vodljive tekuće vanjske jezgre nastaje struja koja stvara vlastito magnetsko polje. Budući da je ono usmjereno jednako kao i početno, novostvoreno polje jača izvorno, čime potiče stvaranje jače struje, stvarajući tako samoodrživ geodinamo.

Magnetsko polje Zemlje u prvoj je aproksimaciji polje magnetskog dipola čija je os nagnuta u odnosu na os rotacije za otprilike  $10^\circ$ . Nagib osi dipola u odnosu na geografsku os varira te je trenutno u procesu smanjenja [12]. Dipolni moment Zemlje iznosi  $7.95 \times 10^{22}$  A/m<sup>2</sup> [18]. Budući da se samo 80% polja na površini Zemlje može opisati dipolnim poljem, razlikujemo geomagnetske i magnetske (engl. *dip pole*) polove. Geomagnetski polovi su mjesta gdje os dipola presijeca Zemljinu površinu, dok su magnetski polovi mjesta na površini Zemlje gdje je ukupno magnetsko polje vertikalno (dva glavna magnetska polja nalaze se u Arktičkom moru te u Indijskom oceanu uz obalu Antarktike). Jačina magnetskog polja na površini Zemlje varira od 20000 nT na području Južno-atlantske anomalije (Argentina) do 65000 nT na magnetskim polovima. Dnevne promjene za geomagnetski mirnih dana (engl. *quiet-time*) su u rasponu od 20 nT (umjerene širine) do 100 nT (ekvator), dok za vrijeme jače

Sunčeve aktivnosti na polovima dosežu 1000 nT.

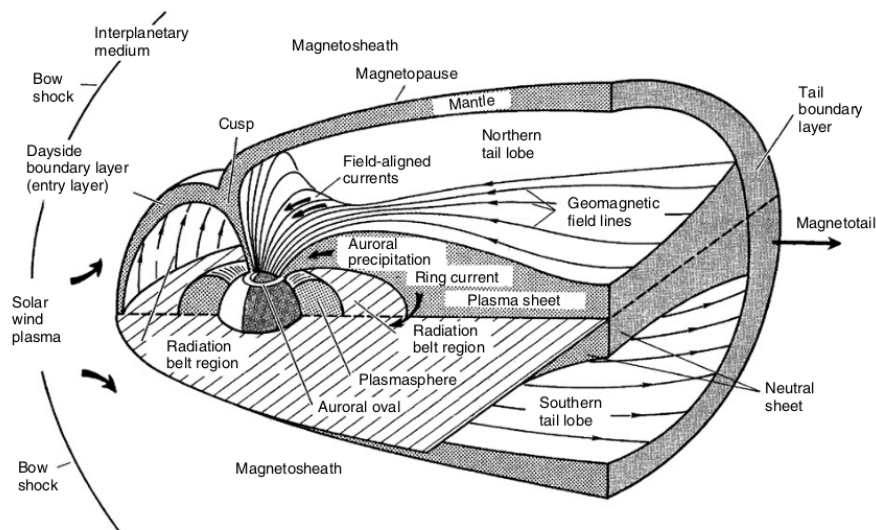
Glavno magnetsko polje možemo opisati sustavom komponenti polja u desnom koordinatnom sustavu (slika 1.1) putem dva seta koordinata: tri ortogonalne komponente polja XYZ (geografski sjever, istok i vertikalno prema središtu Zemlje) te HDZ (horizontalna magnituda polja, deklinacija i vertikalno prema središtu Zemlje). Deklinacija je kut između geografskog i magnetskog sjevera. Bitan parametar u reprezentaciji polja je i inklinacija, tj. kut između vektora horizontalne komponente polja  $H$  i vektora ukupnog polja  $F$ .



Slika 1.1: Komponente geomagnetskog polja za sjevernu hemisferu. Preuzeto iz [2].

Vanjsko magnetsko polje obuhvaća ionosferu i magnetosferu te u prosjeku seže do udaljenosti  $10 R_Z$  na dnevnoj strani ("nosu") te do  $200 R_Z$  na noćnoj strani ("repu"), gdje je  $R_Z = 6378$  km radijus Zemlje na ekvatoru (slika 1.2).

Zemljina magnetosfera je područje međuplanetarnog prostora u kojem je dominantno magnetsko polje Zemljino magnetsko polje. Ona nastaje interakcijom Zemljinog dipolnog magnetskog polja i Sunčevog vjetra. Sunčev vjetar je naziv za tok ioniziranog plina iz korone Sunca (vanjskog sloja atmosfere Sunca) u međuplanetarni prostor duž silnica magnetskog polja Sunca. Zbog velike vodljivosti za Sunčev vjetar vrijedi tzv. "zamrznutost" magnetskog polja (engl. *frozen flux approximation*) što povlači postojanje konstantnog toka magnetskog polja. Sunčev vjetar stoga sadržava magnetsko polje kao produženje magnetskog polja Sunca u međuplanetarni prostor [16]. Budući da je brzina gibanja Sunčevog vjetra desetak puta veća od brzine širenja zvuka u plinu, njegovim sudarom sa Zemljinom atmosferom na strani



Slika 1.2: Shematski prikaz magnetosfere. Preuzeto iz [6].

okrenutoj prema Suncu dolazi do formiranja udarnog vala. Tlak kojim se Zemljino magnetsko polje suprotstavlja Sunčevom vjetru ima za posljedicu sažimanje dipolnog polja Zemlje na strani okrenutoj prema Suncu (nos magnetosfere). Magnetopauza predstavlja granicu između Sunčevog vjetra i magnetosfere, gdje je uravnotežen dinamički tlak Sunčevog vjetra i tlak magnetskog polja Zemlje. Na noćnoj se strani (okrenutoj od Sunca) magnetosfera slobodno širi te tvori magnetski rep. Čestice Sunčevog vjetra u samu magnetosferu ne prodiru kroz nos magnetosfere, nego kroz rep. Do toga dolazi zbog procesa magnetske rekonekcije, odnosno procesa međudjelovanja dvaju plazmenih sustava s antiparalelnim komponentama magnetskog polja, kojim dolazi do pretvaranja magnetske energije u toplinu i kinetičku energiju. Dok magnetska rekonekcija na nosu magnetosfere ima takav učinak da čestice zaobilaze nos i nastavljaju se gibati prema repu, ponovna rekonekcija na repu omogućuje ulazak čestica u magnetosferu. Područje unutar magnetosfere stoga je karakterizirano postojanjem zarobljenih, električki nabijenih čestica. Prema energiji tih čestica unutrašnja se magnetosfera može podijeliti na tri područja: radijacijski (Van Allenov) pojas (nabijene čestice najviših energija), prstenastu struju (najveći tok te najveća gustoća nabijenih čestica) te plazmasferu (produžetak ionosfere u magnetosferu).

Promjene ukupnog magnetskog polja postoje na svim skalama, od kojih su reverzali glavnog polja i sekundarne varijacije najvažniji. Iz paleomagnetskih je izvora zaključeno da se reverzali, tj. promjene smjera dipola nastale promjenama u dinamo-

mehanizmu aperiodički ponavljaju svakih 5 tisuća do 50 milijuna godina [20].

### 1.1.2 Geomagnetska aktivnost i geomagnetski indeksi

Interakcijom Sunčevog vjetra i Zemljine magnetosfere dolazi do transfera energije i čestica unutar magnetosfere, što uzrokuje promjene jakosti i oblika magnetskog polja Zemlje, promjene veličine i oblika magnetosfere kao i poremećaje unutar Zemljine magnetosfere, ionosfere i termosfere. Utjecaj Sunca na ukupno magnetsko polje Zemlje ponavlja se periodički svaki 27 dana (sinodički period rotacije Sunca), svake godine (period ponavljanja jednakog geometrijskog položaja Zemlje prema Sunčevu ekvatoru) te svakih 11 godina (prosječno trajanje ciklusa Sunčeve aktivnosti) [16]. Brze i jake promjene magnetskog polja Zemlje (magnetske oluje) uzrokovane su solarnim bakljama, koroninim izbačajima mase (CME, od engl. *Coronal Mass Ejections*) te brzim Sunčevim vjetrom (HSS, od engl. *High Speed Stream*). Interakciju toka čestica i zračenja sa Sunca s magnetosferom te povezanih fenomena proučava sve-mirsko vrijeme (engl. *space weather*).

Budući da geomagnetska aktivnost Zemlje direktno ovisi o karakteristikama Sunčevog vjetra, bitno je detaljno poznavati iste kako bi se mogli analizirati geomagnetski poremećaji. Za kvantitativno opisivanje poremećaja Zemljinog magnetskog polja uvedeni su geomagnetski indeksi.

*Dst* (od engl. *storm time disturbance*, [27]) indeks predstavlja efekte koje zapadna ekvatorijalna prstenasta struja u magnetosferi ima na horizontalnu komponentu Zemljinog magnetskog polja,  $H$ , tijekom magnetskih oluja. U početnom stadiju magnetske oluje vrijednosti komponente  $H$  su povećane u odnosu na svoju prosječnu vrijednost, nakon čega dolazi do globalnog pada u vrijednostima koji predstavlja glavnu fazu magnetske oluje. *Dst* se određuje iz vrijednosti  $H$  izmjerenih na 4 geomagnetske mjerne postaje u ekvatorijalnom području (između  $-33^\circ$  i  $+33^\circ$  geomagnetske širine) [14].

*AE* (od engl. *Auroral Electrojet*, [17]) indeks predstavlja mjeru aktivnosti polarne electrojet struje, tj. geomagnetsku aktivnost nastalu povećanim tokom ionsferskih struja u auroralnom području. *AE* se također određuje iz promjena u  $H$  komponenti geomagnetskog polja, mjerenim na 12 postaja unutar auroralne zone na sjevernoj hemisferi.

*ap* indeks je trosatno usrednjen indeks kojim se opisuju geomagnetski poremećaji

umjerenih širina [19]. Određuje se iz  $Kp$  indeksa, koji predstavlja usrednjeni  $K$  indeks za 11 sjevernih i 2 južne geomagnetske postaje u području između  $44^\circ$  i  $60^\circ$  sjeverne ili južne geomagnetske širine [22]. Pritom  $Kp$  indeks predstavlja kvazilogaritamsku skalu kojom se može opisati relativna magnetska aktivnost dane postaje u odnosu na aktivnost za vrijeme geomagnetski mirnih dana.

Kontinuirano praćenje geomagnetskih indeksa bitno je ne samo za proučavanje i opisivanje geomagnetske aktivnosti Zemlje, već i za proučavanje utjecaja koji Sunčeva aktivnost ima na Zemljinu ionosferu i fizikalne procese do kojih u njoj dolazi.

### 1.1.3 Ionosfera

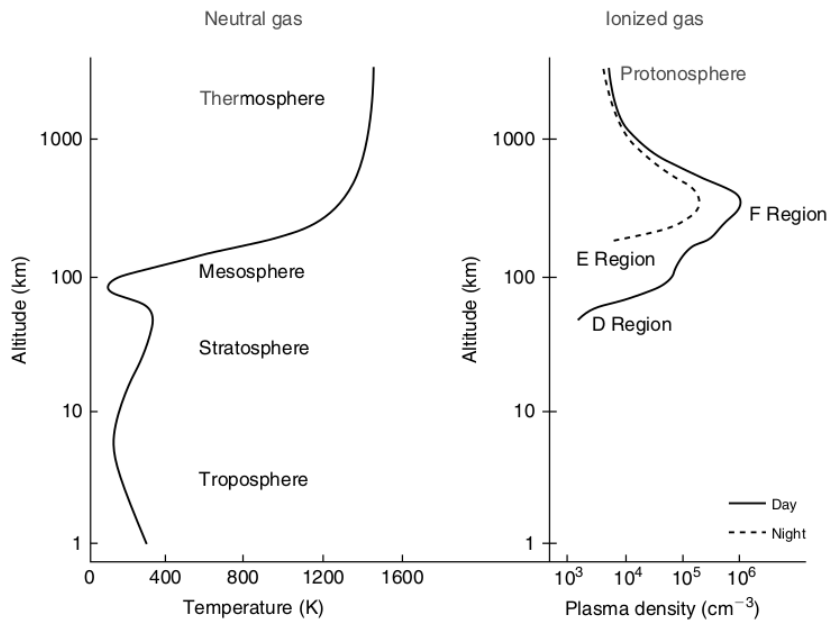
Ionosfera je djelomično ionizirani turbulentni sloj plazme u gornjoj atmosferi Zemlje. Zbog svojih svojstava modificira elektromagnetske valove (refleksija, refrakcija, atenuacija, rotacija ravnine polarizacije), utječe na dinamiku atmosfere ispod nje i termosfere iznad te omogućuje tok električnih struja.

Primarni izvor ionizacije je Sunčevo UV i X zračenje, kroz procese fotoionizacije ( $X + \text{foton} \rightarrow X^+ + e^-$ ). Sekundarni izvori uključuju kozmičke zrake, ionizaciju fotoelektronima, raspršenim/reemitiranim zračenjem te reakcijama izmjene naboja. Za ionizaciju atmosfere u polarnim područjima posebno su bitne i čestice Sunčevog vjetra. Ionizacija nestaje procesima rekombinacije: disocijativnom rekombinacijom molekularnih iona (dominantno), radijacijskom rekombinacijom atomskih iona te reakcijama izmjene naboja. Ioni i elektroni stvoreni visoko u atmosferi difuzijom mogu prijeći u niže slojeve, vođeni Zemljinim magnetskim poljem.

Ionosfera je, kao i neutralna atmosfera, u prvoj aproksimaciji horizontalno stratificirana. Na slici 1.3 dan je prikaz strukture neutralne atmosfere u ovisnosti o temperaturi te ionosfere u ovisnosti o gustoći plazme (gustoći elektrona) za umjerene širine.

S obzirom na sastav i gustoću elektrona, ionosfera je danju tradicionalno podijeljena u tri dijela: D (ispod 90 km), E (90 – 150 km) te F (iznad 90 km, često se dijeli na  $F_1$  i  $F_2$ ). Maksimum ionizacije nalazi se u sloju  $F_2$  (tipično na visinama 300 – 400 km [3]), gdje dominiraju ioni atomskog kisika  $O^+$ . Iznad maksimuma, gradijent tlaka uravnotežen je silom gravitacije i elektrostatskom silom, gdje elektrostatska sila djeluje s ciljem očuvanja neutralnosti ionosfere (zbog masivnosti iona, s porastom visine gustoća elektrona bi nadvladala pozitivne ione te bi ionosfera bila





Slika 1.3: Tipičan profil neutralne atmosfere u ovisnosti o temperaturi (lijevo) i ionosfere u ovisnosti o gustoći plazme (desno) za umjerene širine, s naznačenim imenima pripadnih slojeva. Puna linija u profilu ionosfere predstavlja dnevnu situaciju, dok isprekidana linija predstavlja noćnu. Preuzeto iz [6].

negativno nabijena). Budući da je ispod 100 km atmosfera pretežno homogena te dominiraju molekule  $N_2$  i  $O_2$  s kojima  $O^+$  reagira, ispod maksimuma, u E dijelu, dominiraju molekularni ioni  $NO^+$  i  $O_2^+$ . U najvišim dijelovima dominantan postaje  $H^+$ , koji tvori protonosferu. Noću dolazi do smanjenja gustoće elektrona u cijeloj ionosferi. S obzirom na to da je za molekularne ione stupanj rekombinacije s elektronima puno veći nego za atomske ione, D regija nestaje potpuno, dok se ionizacija E regije drastično smanji. Tijekom noći stupanj ionizacije opstaje jedino u F regiji, gdje se  $F_1$  i  $F_2$  spajaju u jedan sloj, na visini  $F_2$  (Appletonov sloj) [21]. Minimum gustoće plazme postiže se nešto prije zore.

Promjene u ionizaciji ionosfere mogu biti prostorne i vremenske. Vremenski promjene mogu biti dnevne, sezonske te povezane sa Sunčevim 11-godišnjim ciklusom. Prostorna ionizacija varira u ovisnosti o geografskoj širini (uslijed djelovanja Zemljinog magnetskog polja, solarnog vjetrova, termosfernih vjetrova i kuta upada Sunčevih zraka). Do kratkotrajnih poremećaja u ionosferi može doći prilikom pojave solarnih baklji, koronarnih izbačaja mase, kao i pojavom munja uslijed troposferskih grmljavinskih oluja na Zemlji.

## **1.2 Utjecaj ionosfere na radioastronomska promatranja**

### **1.2.1 Niskofrekventna radioastronomska promatranja**

Radioastronomija je grana astronomije koja se bavi detekcijom i istraživanjem radiovalova iz svemira pomoću radioteleskopa, u rasponu frekvencija od desetak MHz do THz. Do nedavno su promatranja dominantno bila rađena na visokim radio frekvencijama. Zahvaljujući novoizgrađenim instrumentima poput *LOW Frequency ARray* (LOFAR), *Long Wavelength Array* (LWA), *Murchison Widefield Array* (MWA) te iščekivanom *Square Kilometre Array* (SKA), sve je veći interes za istraživanje na niskim radiofrekvencijama [3], u rasponu frekvencija od 10 do 300 MHz.

Iako se samostalni tanjurasti radioteleskopi i dalje koriste za istraživanje astrofizičkih izvora poput pulsara i tranzijentnih izvora, sve je češća uporaba interferometrijskih radioteleskopa. Interferometrijski radioteleskopi bazirani su na tehnici *aperture synthesis interferometry*. Ona podrazumijeva postojanje povezanih polja individualnih elemenata, od kojih svaki za sebe prikuplja podatke te se zatim podaci objedinjuju i usrednjavaju pomoću korelatora.

Niskofrekventna radiopromatranja obuhvaćaju istraživanje: magnetskih polja u svemiru, kozmološke epohe reionizacije, kozmičke zrake visokih energija, Sunčevu aktivnost i svemirsku prognozu, različite populacije ekstragalaktičkog radioizvora te potragu za tranzijentima i pulsarima, o čemu se više može pročitati u [3]. U ovom će se radu koristiti podatci o sinkrotronskom zračenju Mliječne staze dobiveni polarimetrijskim promatranjima pomoću interferometrijskog radioteleskopa LOFAR, a koji će detaljnije biti opisani u sljedećem poglavlju. Za promatranja na frekvencijama nižim od  $\sim 1$  GHz, veliki utjecaj na kvalitetu podataka ima ionosfera, kao jedan od glavnih izvora grešaka u mjerenju [7].

### **1.2.2 Utjecaj ionosfere na radioastronomska promatranja**

Ako dođe do odvajanja pozitivno i negativno nabijenih čestica dotad neutralno nabijene ionizirane materije Zemljine ionosfere (uslijed npr. prolaska elektromagnetskog vala), elektrostatska sila će uzrokovati gibanje elektrona prema pozitivno nabijenim ionima (gibaju se elektroni, jer su za red veličine manje masivni od iona). Time će doći do osciliranja elektrona. Frekvencija ovih oscilacija naziva se frekvencija

plazme te se može opisati izrazom:

$$\nu_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\pi m_e}} \simeq 9\sqrt{n_e}, \quad (1.1)$$

gdje je  $e$  naboj elektrona,  $m_e$  masa elektrona te  $n_e$  gustoća elektrona. Za tipične vrijednosti  $n_e$  ionosfere  $\sim 10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , frekvencija plazme  $\nu_p$  iznosi  $1 - 10 \text{ MHz}$ .

Budući da je indeks loma u ovisnosti o frekvenciji upadnog vala  $\nu$  za ionosferu jednak:

$$n_p(\nu) = \sqrt{1 - \frac{\nu_p^2}{\nu^2}}, \quad (1.2)$$

za elektromagnetske valove frekvencije manje od kritične frekvencije  $\nu_p$  ionosfera postaje "neprozirna" (dolazi do refleksije vala). Stoga radiovalovi frekvencije manje od  $\sim 10 \text{ MHz}$  (što se naziva *ionospheric cutoff frequency*) ne dolaze do površine Zemlje i ne mogu se detektirati radioteleskopima na Zemlji.

Prolaskom radiovalova frekvencije veće od kritične frekvencije  $\nu_p$  kroz ionosferu, dolazi do refrakcije vala, što kao posljedicu ima prividan pomak radioizvora u izmjenjenim podacima od stvarne pozicije na nebu.

Zbog refrakcije u ionosferi, radioval mora prijeći dulji put do površine Zemlje nego u slučaju prolaska kroz neioniziranu materiju. Zbog ovisnosti indeksa loma ionosfere danog izrazom (1.2), dodatak na duljinu staze vala ovisi o frekvenciji vala, kao i integriranoj gustoći elektrona duž doglednice. Zbog prostorne varijabilnosti u ionizaciji ionosfere, u interferometrijskim promatranjima stoga dolazi do različitih promjena u pojedinim dijelovima valne fronte, što uzrokuje pomak u fazi vala. Promjene su proporcionalne gustoći iona, tj. elektrona,  $\text{TEC}^1$  te obrnuto proporcionalne kvadratu frekvencije radiovalova [4]. Zbog ovakve frekventne ovisnosti, za radioastronomska istraživanja na niskim frekvencijama Zemljina je ionosfera dominantan izvor grešaka u fazi. Samo disperzijsko kašnjenje može uzrokovati prividan pomak izvora zračenja od njegove stvarne pozicije, promjenu u iznosu intenziteta zračenja te iskriviti oblik izvora.

Budući da interferometar mjeri samo razlike u fazi, signal će biti promijenjen samo ako  $\text{TEC}$  iznad dva elementa interferometra nije jednak. Disperzijsko kašnjenje ovisi stoga samo o relativnom  $\text{TEC}$  između signalnih puteva do dvije stanice.

<sup>1</sup> $\text{TEC}$  (engl. *Total Electron Content*) je gustoća elektrona integrirana duž linije gledanja [3], mjeri se u jedinicama  $\text{TECU}$  (od engl. *Total Electron Content Units*,  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2$ )

Greške u fazi izazvane ionosferom mogu se djelomično ukloniti iz podataka procesom kalibracije. Na temelju pretpostavljenog modela neba radi se prilagodba na izmjerene podatke te dobivena rješenja daju korekciju amplituda i fazu promatranog signala. Zbog nesavršenosti samog modela kalibraciju je potrebno iterativno ponoviti [9].

U polarimetrijskim promatranjima potrebna je dodatna korekcija. Osim pomaka u fazi, Faradayeva rotacija u Zemljinoj ionosferi stvara promjene kuta polarizacije detektiranog polariziranog zračenja. Faradayeva rotacija detaljnije je opisana u sljedećem potpoglavlju. Veliki prostorni TEC gradijenti mogu uzrokovati i diferencijalnu Faradayevu rotaciju zbog koje nepolarizirani izvori postaju prividno kružno polarizirani.

### 1.2.3 Stokesovi parametri

Za lakšu obradu podataka o detektiranom polariziranom elektromagnetskom zračenju, prigodno je koristiti Stokesove parametre definirane ([25]):

$$\begin{aligned}
 I &= \langle E_{\parallel} E_{\parallel}^* + E_{\perp} E_{\perp}^* \rangle, \\
 Q &= \langle E_{\parallel} E_{\parallel}^* - E_{\perp} E_{\perp}^* \rangle, \\
 U &= \langle E_{\parallel} E_{\perp}^* + E_{\perp} E_{\parallel}^* \rangle, \\
 V &= i \langle E_{\parallel} E_{\perp}^* - E_{\perp} E_{\parallel}^* \rangle,
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

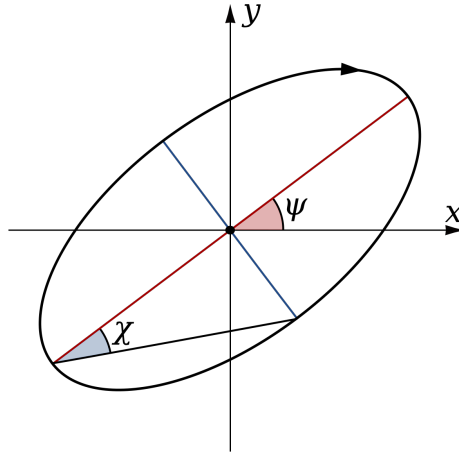
gdje je  $I$  ukupan intenzitet,  $Q$  i  $U$  linearno te  $V$  kružno polarizirano zračenje.

Stokesovi parametri mogu se zapisati pomoću sfernih koordinata  $pI$  ( $p$  je stupanj polarizacije),  $2\chi$  i  $2\psi$  ([26]):

$$\begin{aligned}
 Q &= pI \cos 2\psi \cos 2\chi, \\
 U &= pI \sin 2\psi \cos 2\chi, \\
 V &= pI \sin 2\chi.
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Ovdje su kutevi  $\chi$  i  $\psi$  definirani kao na slici 1.4.

Za koherentni monokromatski val vrijedi  $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ . Kada je kružna polarizacija zanemariva, ukupna linearna polarizacija  $P$  može se prikazati kao kompleksna



Slika 1.4: Parametriziranje polarizacije preko elipse. Preuzeto iz [26].

varijabla

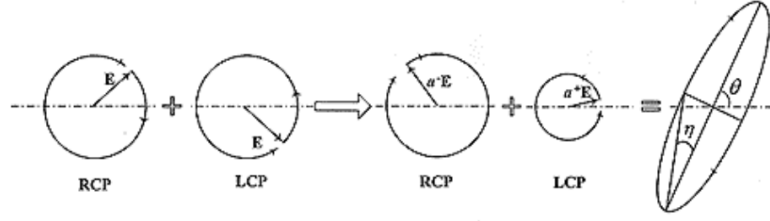
$$P = pIe^{i2\psi} = Q + iU. \quad (1.5)$$

#### 1.2.4 Faradayeva rotacija u Zemljinoj ionosferi i motivacija za rad

Prolaskom linearno polariziranog zračenja kroz magnetiziranu plazmu ionosfere dolazi do zakretanja ravnine polarizacije, tj. Faradayeve rotacije. Linearno polarizirano zračenje može se shvatiti kao superpozicija lijevog i desnog kružno polariziranog vala. Prolaskom elektromagnetskog vala kroz magnetsko polje i ionizirani sloj, dolazi do interakcije s elektronima ioniziranog sloja. Val inducira rotirajuće gibanje tih elektrona u vanjskom magnetskom polju. Gibanjem elektroni stvaraju vlastito magnetsko polje. Ako je vanjsko magnetsko polje usmjereno duž smjera širenja vala, vlastito magnetsko polje elektrona za jednu će komponentu kružno polariziranog vala biti paralelno vanjskom magnetskom polju (doprinosi njegovoj jakosti), dok će za drugu komponentu biti usmjereno suprotno vanjskom magnetskom polju (smanjuje njegovu jakost). Dvije komponente kružno polariziranog vala imaju stoga kao svojstvene vrijednosti različite indekse loma. Zbog toga dolazi do razlike u faznoj brzini i amplitudama lijevo i desno kružno polariziranog vala (slika 1.5). Njihovom se superpozicijom dobiva linearno polarizirano zračenje rotirano od početnog smjera polarizacije za kut:

$$\Delta\psi = \lambda^2 \frac{e^3}{8\pi^2\epsilon_0 m^2 c^3} \int_0^d n_e(\mathbf{r}) \mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \lambda^2 \phi, \quad (1.6)$$

gdje je  $\lambda$  valna duljina svjetlosti,  $d$  udaljenost od izvora zračenja do promatrača,  $\phi$  Faradayeva dubina,  $n_e$  gustoća elektrona te  $\mathbf{B}$  magnetsko polje.



Slika 1.5: Parametriziranje linearno polarizirane svjetlosti preko elipse pri prolasku kroz okomito magnetsko polje. Preuzeto iz [8].

Faradayeva dubina definira se dakle kao:

$$\frac{\phi}{[\text{rad m}^{-2}]} = 0.812 \int_{\text{izvor}}^{\text{promatrač}} \frac{n_e}{[\text{cm}^{-3}]} \frac{B_{\parallel}}{[\mu\text{G}]} \frac{dl}{[\text{pc}]}, \quad (1.7)$$

gdje je  $B_{\parallel}$  komponenta magnetskog polja paralelna doglednici  $dl$ . Pozitivna Faradayeva dubina ukazuje na komponentu magnetskog polja usmjerenu prema nama, a negativna usmjerenu od nas.

Kao rezultat Faradayeve rotacije u ionosferi, promatrano polarizirano zračenje pomaknuto je u prostoru Faradayevih dubina i djelomično dekorelirano te je dinamični opseg slike smanjen. Pomak u prostoru Faradayevih dubina proporcionalan je RM (od engl. *Rotation Measure*) ionosfere usrednjenom po vremenu promatranja, gdje se RM obično definira kao nagib pravca ovisnosti kuta polarizacije  $\chi$  o  $\lambda^2$ :

$$RM = \frac{d\chi}{d\lambda^2}, \quad (1.8)$$

gdje je  $\chi$  izražen preko Stokesovih  $Q$  i  $U$  parametara:

$$\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U}{Q}. \quad (1.9)$$

Pri promatranju na 150 MHz tipične promjene RM su  $0.2 \text{ rad/m}^2$ , što zakreće ravninu polarizacije za  $45^\circ$ , dok je za niže frekvencije promjena još veća. Dnevne varijacije mogu dosegnuti i  $\pm 10 \text{ rad/m}^2$ . Uklanjanje utjecaja Faradayeve rotacije u ionosferi stoga je važan korak osnovne kalibracije radioastronomskih podataka. U protivnom Faradayeva rotacija može izazvati depolarizaciju promatranog signala.

Kako bi se uklonile greške uzrokovane Faradayevom rotacijom u ionosferi po-

trebno je procijeniti varijacije u RM ionosfere kao funkciju vremena te “derotirati” izmjeren polarizacijski kut. To je npr. i standardan način uklanjanja utjecaja ionosfere u osnovnoj kalibraciji podataka dobivenih radioteleskopom LOFAR.

U sklopu ovog rada ispitana je mogućnost korištenja detektiranog polariziranog sinkrotronskog zračenja Mliječne staze za određivanje RM ionosfere te uklanjanje Faradayeve rotacije u ionosferi. Budući da je pomak u prostoru Faradayevih dubina proporcionalan upravo RM ionosfere, cilj je odrediti vremensku ovisnost pomaka u prostoru Faradayevih dubina između podataka bez i sa standardnom korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Uz pomoć poznatih vrijednosti pomaka, interpolacijom se može dobiti novi set podataka o intenzitetu zračenja, ”derotiran” za Faradayevu rotaciju u ionosferi. Tako dobivene vrijednosti o intenzitetu zračenja trebale bi biti većih iznosa od onih dobiveni standardnom korekcijom dobivenu RMextractom te kao takve davati jasniju i točniju sliku.

Iako je glavni cilj svake osnovne kalibracije uklanjanje utjecaja ionosfere iz podataka, detaljnijim proučavanjem RM ionosfere, kao i prije spomenutih ionosferskih faza, moguće je dobiti mnogo informacija o fizikalnim procesima u samoj ionosferi. Poznavanje stanja ionosfere ujedno nam može dati i uvid u geomagnetsku, a samim time i Sunčevu aktivnost, tj. može biti korisno u proučavanju svemirskog vremena. Poznavanje svemirskog vremena veoma je bitno ne samo za radiopromatranja, već i za telekomunikacije, satelite, svemirske misije i slično.

U poglavlju 2 predstavljeni su podatci dobiveni radioteleskopom LOFAR koji su korišteni u analizi, opisana je metoda RMextract kojom su dobiveni podatci o RM ionosfere, kao i metoda RM sinteze i postupak dobivanja Faradayevih kocki te su navedeni izvori podataka o Sunčevoj i geomagnetskoj aktivnosti za traženi vremenski period. U poglavlju 3 analizirane su Faradayeve kocke bez i s provedenom korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi, određena je vremenska ovisnost pomaka u prostoru Faradayevih dubina između kocaka i uspoređena s vrijednostima RM ionosfere te je provedena dodatna korekcija na Faradayevu rotaciju u ionosferi. U poglavlju 4 opisana je Sunčeva i geomagnetska aktivnost za vrijeme promatranja LOFAR-om. Rad završava diskusijom i zaključkom.

## 2 Metodologija i podatci

### 2.1 LOFAR promatranja

Ovaj rad baziran je na polarimetrijskim opažanjima sinkrotronskog zračenja Mliječne staze pomoću radioteleskopa LOFAR (engl. *LOw Frequency ARray*). Područje promatranja je polje 3C196 ( $l = 171^\circ$ ,  $b = 33^\circ$ ), koje pokazuje zanimljive strukture (ravni depolarizirani kanali i filamenti) polariziranog sinkrotronskog zračenja [5]. U središtu polja prividno se nalazi i radiogalaksija 3C196.

Podatci su dobiveni iz mjerenja visokopojasnim antenama (HBA, od engl. *High-Band Antenna*) u tzv. HBA DUAL INNER konfiguraciji [13] pri kojoj se koristi 48 glavnih (engl. *core stations*) i 14 udaljenih (engl. *remote stations*) LOFAR-ovih stanica u Nizozemskoj. Mjereno je na frekvencijama od 115 MHz do 189 MHz, podijeljenih na 380 frekvencijska intervala širine 195.3125 kHz, u periodu od osam sati, s početkom na 16.12.2012. u 22:01:46 UTC (promatranje L80508). U obradi je uzeto samo šest sati promatranja, simetričnosti radi oko tranzita.

Osnovna kalibracija podataka obuhvaća uklanjanje pojasa frekvencija kontaminiranih zemaljskim radio-izvorima (poput npr. odašiljača mobilnih i radio operatera), tj. uklanjanjem RFI (od engl. *Radio Frequency Interference*). Zatim slijedi usrednjavanje po frekvencijama te u vremenu. Sama kalibracija provodi se u dva koraka: pozicijski neovisna kalibracija prema dominantnom izvoru 3C196 za svaki pojas frekvencija zasebno (čime se ispravljaju greške u intenzitetu ovisne o frekvenciji te greške u fazi izazvane ionosferom) te pozicijski ovisna kalibracija prema 8 dodatnih izvora (ispravljaju se vremenski ovisne varijacije u polariziranom intenzitetu te kašnjenja uzrokovana ionosferom). U konačnici, napravljene su slike za Stokesove parametre ( $I, Q, U, V$ ), razlučivosti od oko tri lučnih minuta, u ovisnosti o 308 frekvencija promatranja. Dobivene slike spremaju se u podatkovnu kocku<sup>2</sup> s tri dimenzije (rektascenzija, deklinacija, frekvencija). Više detalja o osnovnoj kalibraciji nalazi se u [5]. Dobivene kocke  $Q$  i  $U$  parametara, koje se koriste u daljnjoj analizi, potrebno je korigirati na utjecaj Faradayeve rotacije u ionosferi. Pritom je potrebno prikazati linearno polarizirano sinkrotronsko zračenje naše galaksije kao funkciju Faradayeve dubine  $\phi$ ,

---

<sup>2</sup>Podatkovna kocka je struktura podataka koja općenito može kombinirati nekoliko različitih dimenzija. Ovdje nije riječ o "kocki" u strogo matematičkom smislu, budući da ona ne mora nužno imati jednake strane. U daljnjem tekstu pod pojmom kocka će se podrazumijevati da je riječ o podatkovnoj kocki.



za što koristimo metodu RM sinteze (engl. *Roatation Measure synthesis*), opisanu na kraju ovog poglavlja.

## 2.2 *RMextract* i *TEC* podatci

Kako bi bilo moguće provesti korekciju podataka dobivenih LOFAR-om na Faradayevu rotaciju u ionosferi, potrebno je poznavati RM ionosfere u vremenu opažanja. U osnovnoj se kalibraciji LOFAR-ovih opažanja standardno koristi paket *RMextract* ([10]). *RMextract* obuhvaća set Python programa ([23]) kojima se iz podataka s GNSS-a (*Global Navigation Satellite Systems*) te modela Zemljinog magnetskog polja izdvajaju podatci o ukupnom TEC, vertikalnom TEC (*vTEC*), Zemljinom magnetskom polju te računa RM ionosfere.

Budući da je promjena u kutu ( $\beta$ ) polariziranog zračenja zbog Faradayeve rotacije u ionosferi proporcionalna RM ionosfere kao  $\beta = RM \lambda^2$  (gdje je  $\lambda$  valna duljina zračenja), za "derotiranje" podataka potrebno je poznavati RM ionosfere. Pri određivanju RM ionosfere u *RMextract*, pretpostavljeno je da je na danoj ionosferskoj visini ionosfera beskonačan tanak sloj, čime se izraz za RM ionosfere:

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e(s) B_{\parallel}(s) ds, \quad (2.1)$$

pojednostavljuje u oblik:

$$RM = 2.62 e^{-6} \cdot B_{\parallel} \cdot vTEC \cdot am, \quad (2.2)$$

gdje je *vTEC* vertikalno integrirana vrijednost TEC-a te *am* korekcijski faktor zračne mase ([23]).

Podaci o TEC i vTEC, potrebni za određivanje RM ionosfere, dobivaju se Python programom *getIONEX*, koji iste određuje iz IONEX mapa (engl. *The IONosphere Map EXchange*, [11]) koje se mogu preuzeti sa servera GNSS<sup>3</sup> ili iz globalnih ionosferskih mapa, tzv. GIMs (engl. *Global Ionospheric Maps*) koje se mogu preuzeti sa servera CODE<sup>4</sup> (engl. *Centre for Orbit Determination in Europe*). Budući da je vremenska rezolucija IONEX podataka od 15 minuta do 2 sata, za potrebe određivanja TEC vremenske rezolucije manje od 15 minuta koristi se interpolacija.

<sup>3</sup><ftp://gnss.oma.be/gnss/products/IONEX/>

<sup>4</sup><ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>

Za procjenu paralelne komponente magnetskog polja  $B_{\parallel}$ , RMextract koristi model Zemljinog magnetskog polja WMM<sup>5</sup> (engl. *World Magnetic Model*). WMM je model koji koristi sferno-harmoničku analizu 12. reda i stupnja, tj. 168 sferno-harmoničkih Gaussovih koeficijenata za modeliranje glavnog magnetskog polja Zemlje i podjednak broj sferno-harmoničkih koeficijenata za modeliranje sekundarnih varijacija polja za period od pet godina. Iz modela se mogu odrediti  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $F$ ,  $D$ ,  $I$ , i  $H$  komponente Zemljinog magnetskog polja opisane u poglavlju 1.1. Više detalja o samim Python kodovima te načinima uporabe istih može se pronaći u [23].

Kako su prostorne promjene u RM ionosfere iznad LOFAR-a uobičajeno minimalne, najčešće se računaju vrijednosti RM s obzirom na centar LOFAR-a, tj. samo za jednu stanicu. U ovom su radu korišteni podatci o RM ionosfere izračunati za 46 glavnih i 11 udaljenih LOFAR-ovih stanica u Nizozemskoj. Podatci su vremenske rezolucije 3 minute te odgovaraju osmosatnom promatranju L80508. U analizi su korištene usrednjene vrijednosti RM (gdje su uključeni doprinosi svake stanice) te je uzet vremenski interval od 6 sati koji odgovara podatcima o polariziranom zračenju.

U radu su korišteni podatci o polariziranom zračenju bez korekcije na Faradayevu rotaciju u ionosferi, kao i podatci korigirani na istu, tj. "derotirani" za kut  $\beta$  izračunat iz podataka o RM ionosfere koji su određeni uporabom RMextract.

### 2.3 RM sinteza

U radiopolarimetrijskim mjerenjima standardna metoda obrade podataka je RM sinteza ([1]), kojom strukture duž linije gledanja možemo prikazati u prostoru Faradayevih dubina. Osnova RM sinteze je veza između ukupne izmjerene kompleksne polarizacije u prostoru valnih duljina:

$$P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2), \quad (2.3)$$

te Faradayeve dubine:

$$F(\phi) = \frac{1}{W(\lambda^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\phi, \quad (2.4)$$

---

<sup>5</sup><http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>

gdje je  $W(\lambda^2)$  težinska funkcija koja ovisi isključivo o svojstvima teleskopa. Normirani Fourierov transformat funkcije  $W$  u literaturi se naziva RMSF (engl. *Rotation Measure Spread Function*).

RM sinteza ograničena je trima instrumentalnim parametrima: spektralnom pojasnom širinom ( $\Delta\lambda^2$ ), spektralnom rezolucijom ( $\delta\lambda^2$ ) te minimumom izmjerene  $\lambda^2$  distribucije ( $\lambda_{min}^2$ ). Pomoću njih možemo procijeniti fizikalne veličine koje definiraju ograničenja RM sinteze: maksimalnu detektiranu Faradayevu dubinu ( $\phi_{max}$ ), maksimalnu širinu struktura u Faradayevom prostoru ( $\Delta\phi_{max}$ ) te rezoluciju u Faradayevom prostoru koja je ujedno definirana širinom RMSF funkcije ( $\delta\phi$ ) [1]:

$$|\phi_{max}| \approx \frac{\sqrt{3}}{\delta\lambda^2}, \quad \Delta\phi_{max} \approx \frac{\pi}{\lambda_{min}^2}, \quad \delta\phi \approx \frac{2\sqrt{3}}{\Delta\lambda^2}. \quad (2.5)$$

RM sinteza provodi se uz pomoć Python koda RM-Synthesis [24]. Ulazni podaci su dvije 3D kocke (rektascenzija, deklinacija, frekvencija) s vrijednostima Stokesovih  $Q$  i  $U$  parametara u ovisnosti o frekvenciji te lista s vrijednostima pripadajućih frekvencija. Izlaz čine RM kocke Stokesovih  $Q$ ,  $U$  i  $P$  parametara (gdje je treća dimenzija Faradayeva dubina) te RMSF. Više detalja o samom kodu nalazi se u [1] te [24].

## 2.4 Sunčeva aktivnost i geomagnetski indeksi

Podatci o geomagnetskim indeksima  $Dst$ ,  $AE$  i  $ap$  preuzeti su s OMNIWeb-a<sup>6</sup> pri *Goddard Space Flight Center*. Oni su određeni uz pomoć mjerenja karakteristika Sunčevog vjetra nekoliko svemirskih letjelica u geocentričnim orbitama. Preuzete su prosječne satne vrijednosti indeksa  $Dst$  i  $AE$  te prosječne trosatne vrijednosti indeksa  $ap$  za vremenski period od 48 sati s početkom na 16.12.2012. u 00:00:00 UTC.

Budući da na geomagnetsku aktivnost velik utjecaj imaju CME i baklje, u pripadnim je katalogima Sunčeve aktivnosti pretraženo jesu li takve pojave zabilježene za vrijeme promatranja LOFAR-om. Pritom su pretražena dva kataloga CME: Richardson i Cane lista CME<sup>7</sup> te SOHO/LASCO (engl. *Solar and Heliospheric Observatory*) katalog<sup>8</sup>. Podatci o bljeskovima za traženo razdoblje preuzeti su iz kataloga baklji RHESSI<sup>9</sup> (engl. *The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager*).

<sup>6</sup><https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

<sup>7</sup><http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>

<sup>8</sup>[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)

<sup>9</sup>[https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/dbase/hessi\\_flare\\_list.txt](https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/dbase/hessi_flare_list.txt)

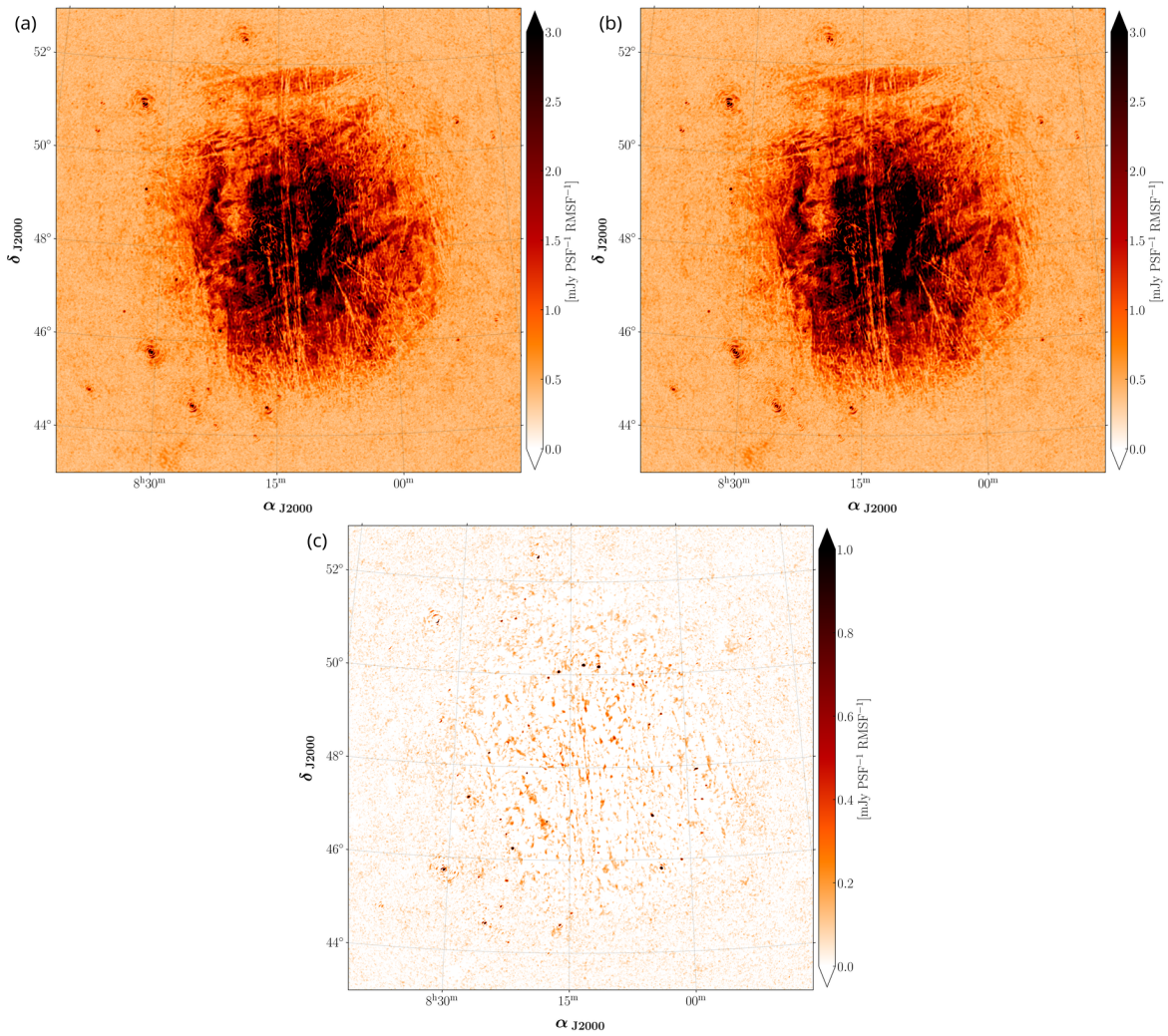
### 3 Korekcija radioastronomskih promatranja na Faraday rotaciju u ionosferi

Primjenom RM sinteze na Stokesove  $Q$  i  $U$  parametre za L80508 promatranje s i bez korekcije na Faradayevu rotaciju u ionosferi, dobivene su dvije RM kocke Stokesovog  $P$  parametra za L80508 promatranje. Prelaskom iz prostora valnih duljina u Faradayev prostor  $(x, y, \phi)$  dobivene su kocke dimenzija  $(201, 1200, 1200)$ , gdje je treća dimenzija Faradayeva dubina u rasponu od  $-25$  do  $+25$  rad/m<sup>2</sup>, uz korak od  $0.25$  rad/m<sup>2</sup>. Pritom je rezolucija u Faradayevom prostoru  $\delta\phi = 0.9$  rad/m<sup>2</sup> te je maksimalna širina struktura koja se može detektirati  $\Delta\phi_{max} = 1.1$  rad/m<sup>2</sup>.

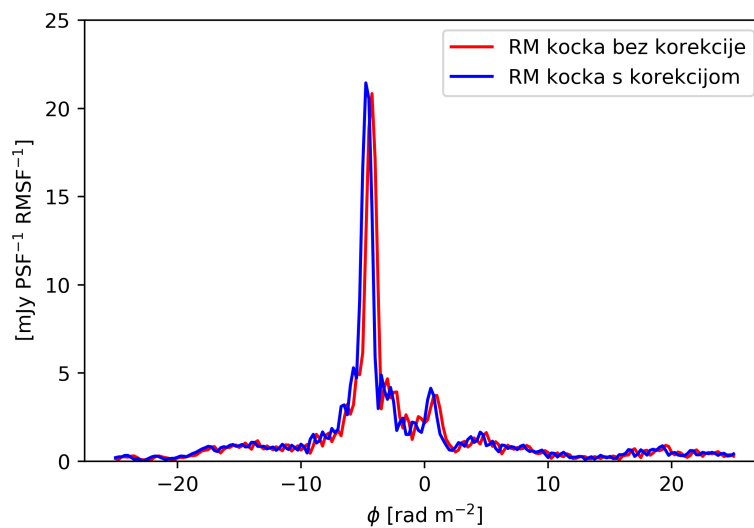
Kako bi se mogle primijetiti i uspoređivati razlike između dvije kocke, određeni su maksimumi intenziteta duž Faradayeve dubine za svaki piksel pojedine kocke te Faradayeva dubina na kojoj se pripadajući intenzitet postiže. 2D slike dobivene tim postupkom prikazane su na slici 3.1, gdje prva slika predstavlja maksimum intenziteta duž Faradayeve dubine za kocku bez i druga slika za kocku s korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Treća slika prikazuje razliku maksimuma intenziteta između dvije RM kocke. Pažljivijim proučavanjem može se uočiti da je nakon korekcije na Faradayevu rotaciju u ionosferi slika jasnija, morfološke karakteristike polja 3C196 su oštrije i tamnije, dok je pozadina svjetlija.

Maksimalni iznos intenziteta obje kocke postiže se na pikselu  $(750, 704)$ . Na slici 3.2 prikazan je Faradayev spektar za navedeni piksel u obje kocke, gdje je crvenom bojom prikazan intenzitet bez, a plavom s korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Sukladno očekivanju, maksimalni intenzitet veći je nakon provedene korekcije (za 3%). Također, postoji pomak u prostoru Faradayevih dubina - bez korekcije maksimum se za dani piksel postiže na  $\phi = -4.25$  rad/m<sup>2</sup>, a nakon korekcije na  $\phi = -4.75$  rad/m<sup>2</sup>.

Pomak u prostoru Faradayevih dubina između dvije kocke određen je pomoću Pearsonovog koeficijenta korelacije. On je statistička mjera linearne korelacije dvije varijable te može postići vrijednosti u rasponu od  $-1$  do  $1$ , gdje je  $+1$  potpuna pozitivna korelacija,  $0$  izostanak linearne korelacije te  $-1$  potpuna negativna korelacija. Korištena je Python statistička funkcija `scipy.stats.pearsonr` kako bi se provela korelacija između piksela izvorne kocke s odgovarajućim pikselom iz kocke s korekcijom te 10 susjednih piksela (susjednih s obzirom na prostor Faradayevih dubina) u oba



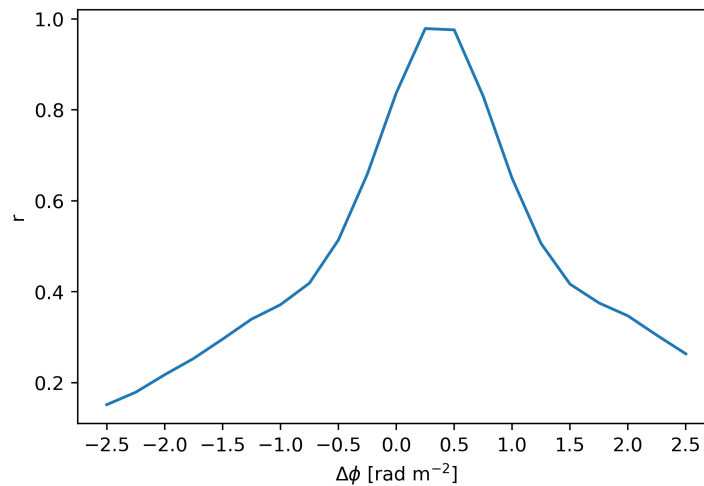
Slika 3.1: Maksimumi intenziteta duž Faradayeve dubine za svaki piksel RM kocke bez (a) i s korekcijom (b) na Faradayevu rotaciju u ionosferi te razlika maksimuma intenziteta dviju RM kocki (c).



Slika 3.2: Faraday spektar intenziteta za piksel (750,704) RM kocke bez (crveno) te s korekcijom (plavo) na Faradayevu rotaciju u ionosferi.

smjera. Svaki piksel originalne kocke koreliran je stoga s 21 pikselom iz korigirane kocke, što predstavlja pomak od ukupno  $\pm 2.5 \text{ rad/m}^2$  u prostoru Faradayevih dubina. Korelacija je provedena samo ako je intenzitet danog piksela veći od pet standardnih devijacija intenziteta. Takvim je filtriranjem osigurano da se u obradi ne uzima šum.

Na slici 3.3 prikazan je Pearsonov koeficijent korelacije  $r$  u ovisnosti o pomaku u prostoru Faradayevih dubina  $\Delta\phi$  za piksel (750,704). Vidljivo je da se najveća linearna korelacija za dani piksel postiže između  $\Delta\phi = 0 \text{ rad/m}^2$  i  $\Delta\phi = 1 \text{ rad/m}^2$ . To je i očekivano, s obzirom na prije određene položaje maksimuma intenziteta za ovaj piksel.



Slika 3.3: Pearsonov koeficijent korelacije  $r$  u ovisnosti o pomaku u prostoru Faradayevih dubina  $\Delta\phi$  za piksel (750,704).

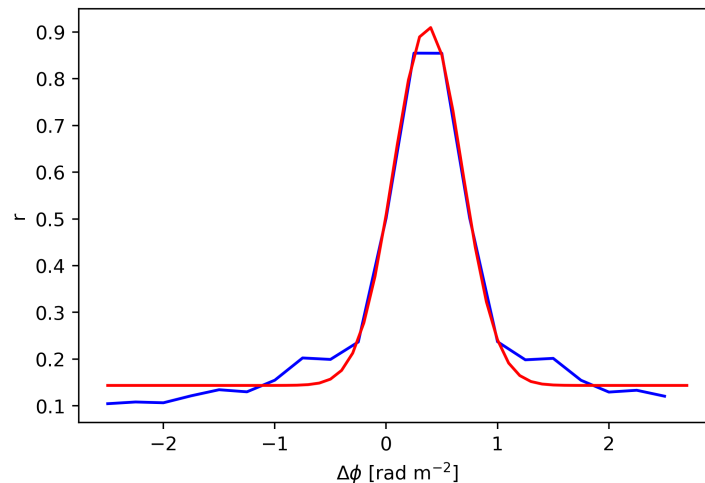
Zbrajanjem i usrednjavanjem koeficijenta korelacije u ovisnosti o pomaku  $\Delta\phi$  za cijelo polje od  $1200 \times 1200$  piksela dobivena je krivulja koja se može parametrizirati Gaussovom raspodjelom oblika  $A \exp(-(x - x_0)^2 / (2\sigma^2)) + C$ . Ovdje je  $A$  visina Gausijana,  $x_0$  srednjak, tj. traženi pomak u prostoru Faradayevih dubina te  $C$  pomak krivulje od nule duž osi ordinata. Prije parametrizacije su iz podataka o koeficijentu korelacije uklonjeni svi podatci iznosa nula. Pri parametrizaciji je korišten Python modul `scipy.optimize.curve_fit`. Dobivena krivulja prikazana je na slici 3.4 te su izračunati parametri jednaki

$$A = 0.768, \quad x_0 = 0.375, \quad C = 0.144, \quad (3.6)$$

uz pripadajuće standardne pogreške

$$M_A = 0.026, \quad M_{x_0} = 0.012, \quad M_C = 0.008. \quad (3.7)$$

Traženi pomak u prostoru Faradayevih dubina između kocke bez i kocke s korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi je stoga  $\Delta\phi = (0.38 \pm 0.01) \text{ rad/m}^2$ .



Slika 3.4: Prilagodba krivulje usrednjenih koeficijenata korelacije  $r$  u ovisnosti o  $\Delta\phi$  na Gaussovu raspodjelu za cijelo polje 1200x1200 piksela.

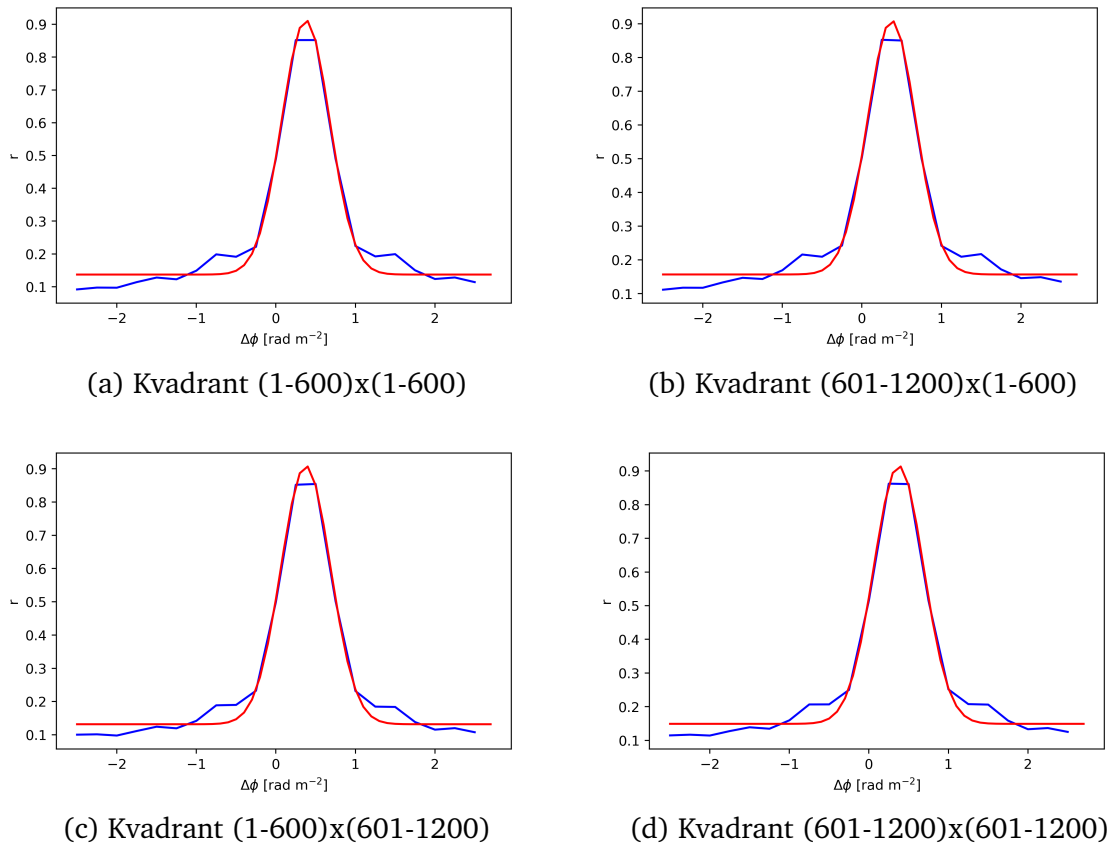
Kako bi se provjerilo postoje li značajne razlike u pomaku u prostoru Faradyevih dubina na različitim mjestima polja 3C196, ukupno područje od 1200x1200 piksela podijeljeno je na četiri jednaka dijela dimenzija 600x600 piksela te je za svaki dio proveden jednak postupak prilagodbe krivulje Pearsonovog koeficijenta korelacije na Gaussovu raspodjelu. Tako dobivene krivulje prilagodbe prikazane su na slici 3.5.

Izračunate pripadne vrijednosti pomaka u prostoru Faradayevih dubina između dvije kocke su za četiri kvadranta redom jednake:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_1 &= 0.375 \text{ rad/m}^2, \quad \Delta\phi_2 = 0.374 \text{ rad/m}^2, \\ \Delta\phi_3 &= 0.376 \text{ rad/m}^2, \quad \Delta\phi_4 = 0.375 \text{ rad/m}^2, \end{aligned} \quad (3.8)$$

uz pripadajuće standardne pogreške

$$\begin{aligned} M_1 &= 0.012 \text{ rad/m}^2, \quad M_2 = 0.012 \text{ rad/m}^2, \\ M_3 &= 0.011 \text{ rad/m}^2, \quad M_4 = 0.012 \text{ rad/m}^2. \end{aligned} \quad (3.9)$$



Slika 3.5: Prilagodbe krivulje usrednjenih koeficijenata korelacije  $r$  u ovisnosti o  $\Delta\phi$  na Gaussovu raspodjelu za četiri kvadranta jednakih dimenzija originalne 1200x1200 slike.

Vrijednosti pomaka  $\Delta\phi$  međusobno se razlikuju tek u trećoj decimali. Uzimajući u obzir da su sve nepouzdanosti pomaka  $\sim 10^{-2}$ , ta je razlika zanemariva. One samo ukazuju na činjenicu da je ionosfera prostorno varijabilna. Od pomaka dobivenog uzimajući u obzir cijelo polje od 1200x1200 piksela, najviše odstupa "drugi kvadrant", (1-600)x(601-1200), tj. razlika je 0.28%, a najmanje "četvrti kvadrant", (601-1200)x(601-1200), za 0.05%. Jednako kao i međusobne razlike, razlike između pomaka za pojedini kvadrant i cijelu sliku su tek u trećoj decimali te zanemarive.

Daljnja obrada provedena je korištenjem po 36x308 slika Stokesovih  $Q$  i  $U$  parametara, snimljenih u 10-minutnim intervalima koji ukupno pokrivaju isto LOFAR promatranje u trajanju od šest sati. Pritom, za svaki od 36 intervala, svaka slika odgovara jednoj od 308 frekvencija na kojima su mjerenja provedena (u rasponu 115-175.8 MHz), a koje su preostale nakon eliminiranja RFI i ostalih smetnji prilikom osnovne kalibracije. Spajanjem ("lijepljenjem") slika za svaki 10-minutni interval dobiveno je po 36 kocki dimenzija (308,600,600) Stokesovih  $Q$  i  $U$  parametara. Budući

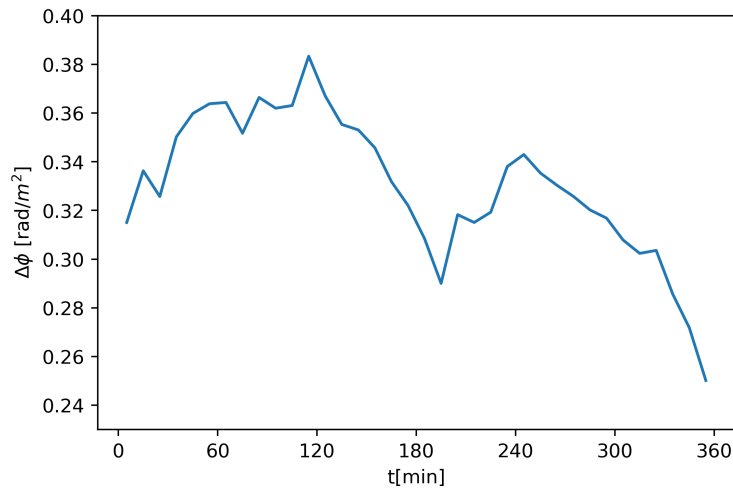


da je riječ o podacima intenziteta u ovisnosti o frekvenciji, prvo je provedena RM sinteza kako bi se dobila ovisnost o Faradayevoj dubini. Dobivene RM kocke Stoksovih  $Q$ ,  $U$  i  $P$  parametara oblika su (201,600,600), gdje je treća os Faradayeva dubina u intervalu  $-25$  do  $25$  rad/m<sup>2</sup> s korakom od  $0.25$  rad/m<sup>2</sup>.

Ponovljen je postupak koreliranja piksela iz 36 novih P kocki s pikselima originalne kocke s korekcijom na ionosferu. Pritom je uzeto samo 600x600 centralnih piksela originalne kocke, budući da one odgovaraju prostoru pokrivenom 10-minutnim promatranjima. Kao i prije, za svaku od 36 kocki, koreliran je piksel iz nove kocke s odgovarajućim pikselom iz originalne kocke te 10 susjednih piksela (susjednih s obzirom na prostor Faradayevih dubina) u oba smjera (sveukupno s 21 pikselom). Korelacija je provedena samo ako je intenzitet danog piksela veći od pet standardnih devijacija intenziteta. Dobivene vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije  $r$  u ovisnosti o pomaku  $\Delta\phi$  su usrednjene po cijelom polju 600x600 piksela kako bi se dobile krivulje koje se mogu parametrizirati Gaussovom raspodjelom. Dobivenih 36 krivulja prikazano je na slikama A.1 koje se nalaze u poglavlju Dodatak A, na kraju ovog rada.

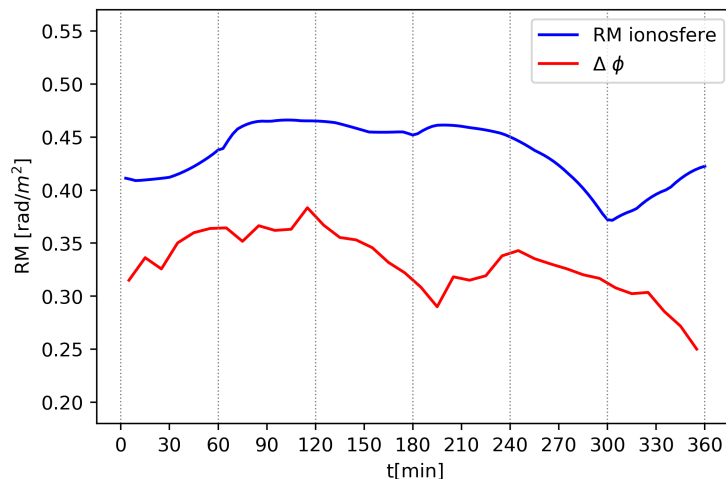
Postupkom već opisane prilagodbe krivulja na Gaussovu raspodjelu dobiveno je 36 pomaka  $\Delta\phi$  koji svaki odgovara jednom 10-minutnom promatranju. Ovisnost pomaka  $\Delta\phi$  o vremenu promatranja dana je na slici 3.6. Dobiveni su pomaci u rasponu od  $0.250$  rad/m<sup>2</sup> (posljednje promatranje, u periodu od 350 – 360 min) do  $0.383$  rad/m<sup>2</sup> (12. promatranje, tj. promatranje u periodu od 110 – 120 min). Standardne pogreške svih 36 pomaka reda su  $\sim 10^{-2}$ . Srednja vrijednost pomaka je  $0.331$  rad/m<sup>2</sup>. Većina pomaka je unutar 20% od vrijednosti dobivene s (3.6), odnosno pomaka dobivenog koreliranjem dviju originalnih RM kocki cjelonoćnog promatranja ( $\Delta\phi = 0.375$  rad/m<sup>2</sup>).

Pomaci su manji za kasnija promatranja, tj. Faradayeva rotacija je manje prisutna. To je i očekivano, budući da je ionosfera tada manje ionizirana. Na slici 3.7, uz ovisnost pomaka  $\Delta\phi$ , prikazana je i RM ionosfere u ovisnosti o vremenu promatranja, za istih šest sati promatranja. Može se primijetiti da dvije krivulje imaju isti trend, odnosno da su veće vrijednosti RM ionosfere praćene su većim vrijednostima pomaka i obrnuto. Takav rezultat je i očekivan, budući da je pomak u prostoru Faradayevih dubina proporcionalan vrijednosti RM ionosfere usrednjenom po vremenu promatranja. Budući da krivulja RM ionosfere predstavlja usrednjenu vrijednost po-



Slika 3.6: Vrijednost pomaka  $\Delta\phi$  u ovisnosti o vremenu promatranja.

dataka RM ionosfere 57 različitih stanica te je vremenska rezolucija TEC podataka na osnovu kojih je RM određena manja od vremenske rezolucije polarimetrijskih podataka iz kojih je određen pomak  $\Delta\phi$ , krivulja RM ionosfere zamjetno je glađa od krivulje pomaka  $\Delta\phi$  te postoji razlika u apsolutnoj vrijednosti RM i određenog pomaka. Kako metoda daje relativni pomak u prostoru Faradayevih dubina u odnosu na srednjak šestosatnog mjerenja (što je za korekciju dovoljno), apsolutna vrijednost pomaka nije važna.

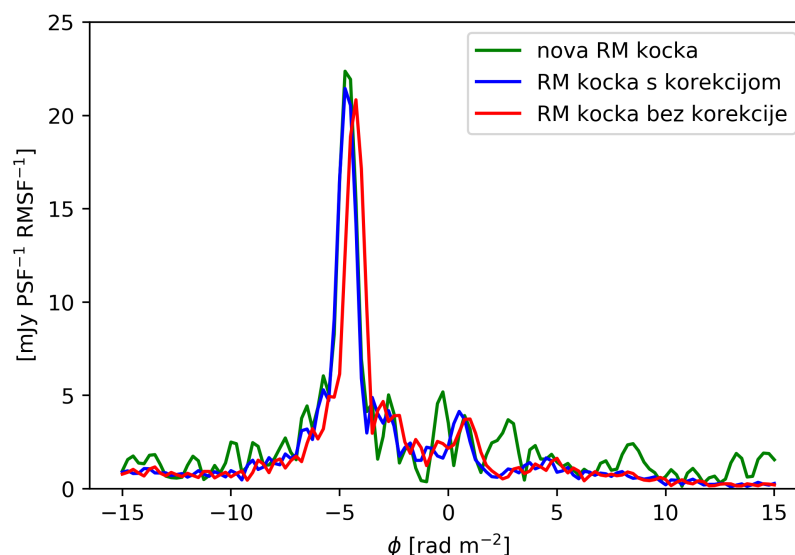


Slika 3.7: Vrijednost pomaka  $\Delta\phi$  (crveno) te RM ionosfere (plavo) u ovisnosti o vremenu promatranja.

Iz poznatih pomaka u prostoru Faradayevih dubina u ovisnosti o vremenu, moguće je "derotirati" postojeće RM kocke Stokesovih  $Q$  i  $U$  parametra kako bi se uklonio

utjecaj Faradayeve rotacije. Svaka od kocki interpolacijom je pomaknuta za odgovarajući izračunati pomak  $\Delta\phi$ . Korišten je Python modul `scipy.interpolate.interp1d` kojim se 3D polje (poput RM kocki u pitanju) može interpolirati za određen iznos duž jedne komponente. Time je dobiveno po 36 novih kocki Stokesovih  $Q$  i  $U$  parametara (dimenzija (121,600,600)) koji odgovaraju 10-minutnim promatranjima, korigiranih s obzirom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Zbrajanjem i usrednjavanjem podataka iz novih kocaka, dobivene su dvije RM kocke koje sadrže podatke o Stokesovim  $Q$  i  $U$  parametrima za cjelokupno šestosatno promatranje. Zatim je uz pomoć relacije  $Q^2 + U^2 = P^2$  dobivena RM kocka dimenzija (121,600,600) koja sadrži podatke o Stokesovom  $P$  parametru, tj. ukupnom polariziranom zračenju polja 3C196 u ovisnosti o Faradayevoj dubini za cjelokupno šestosatno promatranje, a koja je korigirana s obzirom na Faradayevu rotaciju u ionosferi.

Rezultat nove korekcije podataka s obzirom na Faradayevu rotaciju u ionosferi najbolje se može uočiti usporedbom Faraday spektra intenziteta jednog od piksela nove RM kocke sa spektrima intenziteta odgovarajućeg piksela dvije originalne RM kocke s i bez korekcije na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Na slici 3.8 prikazan je Faraday spektar intenziteta za već spomenuti piksel (750,704), gdje se postiže maksimalan intenzitet duž Faradayeve dubine unutar cijele RM kocke. U novoj RM kocki s korekcijom riječ je o pikselu (450,404).

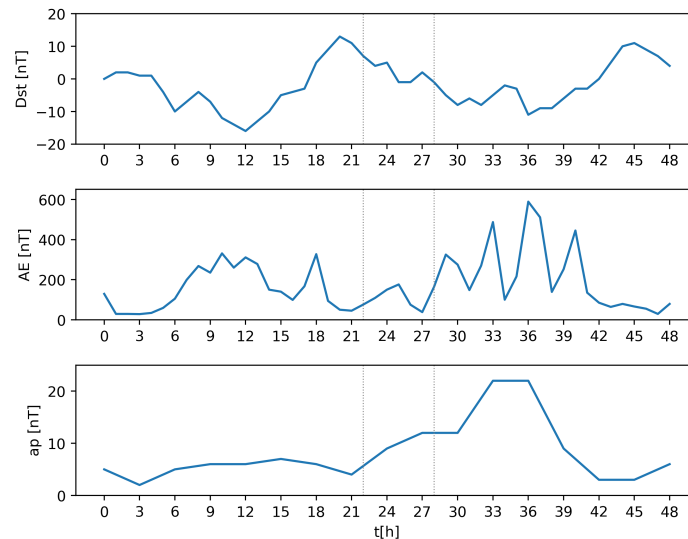


Slika 3.8: Faraday spektar intenziteta za piksel (750,704) RM kocke bez korekcije (crveno), s originalnom korekcijom (plavo) te novom korekcijom (zeleno) na Faradayevu rotaciju u ionosferi.

Može se primijetiti da se novom korekcijom postigao odgovarajući pomak maksimuma intenziteta danog piksela u prostoru Faradayevih dubina, tj. da on odgovara pomaku postignutom originalnom korekcijom. Može se uočiti i da je novom korekcijom postignuta veća vrijednost intenziteta samog maksimuma. Takav ishod nove korekcije je očekivan i poželjan, budući da je vremenska rezolucija polarimetrijskih promatranja veća od vremenske rezolucije TEC podataka korištenih za izračun RM ionosfere pomoću koje je provedena originalna korekcija na Faradayevu rotaciju u ionosferi.

## 4 Sunčeva i geomagnetska aktivnost

Geomagnetsku aktivnost u danima koji odgovaraju proučavanom LOFAR promatranju možemo proučiti promatranjem vremenske ovisnosti geomagnetskih indeksa  $Dst$ ,  $AE$  i  $ap$  koje su prikazane na slici 4.1 za 48-satno razdoblje, početkom na 16.12.2012. u 00:00:00 UTC. Pritom je vremenska rezolucija  $Dst$  i  $AE$  indeksa jedan sat te  $ap$  indeksa tri sata. Kao što je i očekivano ([15]), primjetna je korelacija vremenske ovisnosti triju indeksa: promjene  $AE$  i  $ap$  imaju isti trend te se na vremenskoj skali događaju približno istovremeno dok je  $Dst$  približno antikoreliran s  $AE$  i  $ap$  te "kasni" u odnosu na njih za otprilike četvrtinu dana. U tablici 4.1 dane su minimalne i maksimalne vrijednosti triju indeksa za promatrano vremensko razdoblje.



Slika 4.1: Vremenska ovisnost prosječnih jednosatnih vrijednosti geomagnetskih indeksa  $Dst$ ,  $AE$  te trosatnih vrijednosti geomagnetskog indeksa  $ap$  za 48-satno razdoblje, s početkom na 16.12.2012. u 00:00:00 UTC. Vertikalne linije označavaju vremenski interval proučavanog LOFAR promatranja.

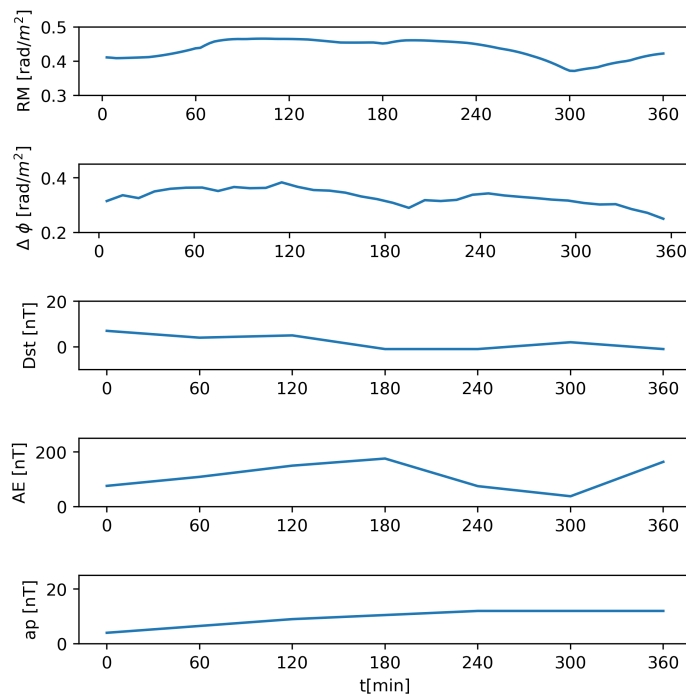
Tablica 4.1: Minimalne i maksimalne vrijednosti geomagnetskih indeksa  $Dst$ ,  $AE$  i  $ap$  za 48-satno razdoblje, s početkom na 16.12.2012. u 00:00:00 UTC.

| Geomagnetski indeks | min [nT] | max [nT] |
|---------------------|----------|----------|
| $Dst$               | -16      | 13       |
| $AE$                | 28       | 589      |
| $ap$                | 2        | 22       |

Budući da minimalna vrijednost  $Dst$  za promatrano razdoblje iznosi  $-16\text{nT}$ , može se zaključiti da u tom razdoblju nije bilo magnetskih oluja (slabe magnetske oluje karakterizirane su vrijednostima  $Dst$  od  $-30$  do  $-50\text{nT}$  [15]). Iz vremenske se ovisnosti

geomagnetskih indeksa stoga može zaključiti da je LOFAR promatranje napravljeno za vrijeme geomagnetski mirnih dana.

Na slici 4.2 uz vrijednosti geomagnetskih indeksa  $Dst$ ,  $AE$  i  $ap$  prikazana je i vrijednost RM ionosfere te pomaka  $\Delta\phi$  za šestosatno razdoblje promatranja, s početkom na 16.12.2012. u 22:00:00 UTC. Tijekom proučenog šestosatnog promatranja LOFAR-om, vrijednosti promatranih geomagnetski indeksa slabo variraju i općenito su malih iznosa. Budući da indeksi mjere odstupanje od prosječne vrijednosti horizontalne komponente geomagnetskog polja Zemlje za vrijeme geomagnetski mirnih dana, male vrijednosti indeksa ukazuju na slabu geomagnetsku aktivnost.



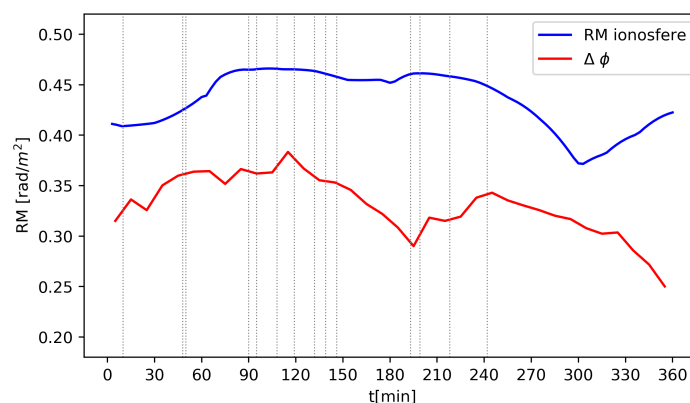
Slika 4.2: Vremenska ovisnost RM ionosfere, pomaka  $\Delta\phi$  te geomagnetskih indeksa  $Dst$ ,  $AE$  i  $ap$  za šestosatno razdoblje promatranja, s početkom na 16.12.2012. u 22:00:00 UTC.

Vremenska rezolucija RM podataka, a posebice podataka o pomaku značajno je veća od vremenske rezolucije geomagnetskih indeksa, zbog čega su krivulje RM ionosfere i pomaka  $\Delta\phi$  puno detaljnije od onih za geomagnetske indekse. Stoga je korelaciju između indeksa i RM vrijednosti moguće uočiti samo na vremenskoj skali od jednog sata, a ne za pojedine manje vremenske intervale. Točnije, potrebno je promatrati trendove krivulja. Trendovi krivulja RM i indeksa AE ukazuju na njihovu povezanost. Naime, vidi se da povećana vrijednost RM ionosfere odgovara višim vrijednostima AE indeksa te da se minimumi tih dviju krivulja na  $\sim 300$  min poklapaju.

Iz slike 4.2 može se primijetiti i da do prvog minimuma  $\Delta\phi$  dolazi neposredno nakon maksimuma indeksa  $AE$ , tj. nakon  $\sim 180$  min, kao i da je sam trend obje krivulje nakon  $\sim 180$  min negativan, tj. vrijednosti padaju. Budući da su geomagnetski indeksi povezani sa stanjem ionosfere, usklađenost trenda krivulja je i očekivana.

Iz kataloga CME-a određeno je da tijekom LOFAR promatranja L80508 nije bilo značajnijih CME. U 02:12:06 UTC 17.12.2012. došlo je tzv. slabog događaja (engl. *poor event*) zabilježen je samo na LASCO C2 detektoru<sup>10</sup> te kao takav nije imao značajan utjecaj na geomagnetsku aktivnost. To je vidljivo i iz podataka o geomagnetskim indeksima za promatrano šestosatno razdoblje (4.2), budući da nije zabilježena značajna promjena u vrijednostima indeksa tijekom i nakon tog događaja (koji vremenski odgovara  $\sim 250$  min na grafu 4.2), tj. nema značajne razlike u vrijednostima satno uzorkovanih indeksa  $Dst$  i  $AE$  na 240 min i 300 min.

U katalogu HESSI solarnih baklji pronađeno je 15 solarnih bljeskova zabilježenih tijekom šestosatnog promatranja LOFAR-om. Podatci o vremenu početka i kraja, energetskom pojasu u kojem je zabilježeno zračenje te pozicija svih 15 bljeskova dani su u tablici A.1 u poglavlju Dodatak na kraju ovog rada. Svi zabilježeni bljeskovi spadaju u A (maksimum zračenja blizu Zemlje  $< 10^{-7}$  W/m<sup>2</sup>) i B (maksimum zračenja blizu Zemlje u intervalu od  $10^{-7}$  do  $10^{-6}$  W/m<sup>2</sup>) grupe solarnih baklji, tj. baklje malih energija. Zabilježeni bljeskovi kratkog su trajanja: najkraći 8 s, a najduži 16 min i 44 s. Na slici 4.3 prikazana je vremenska ovisnost RM ionosfere za šestosatno promatranje te izračunate vrijednosti pomaka u prostoru Faradayevih dubina  $\Delta\phi$ , gdje su verti-



Slika 4.3: Vremenska ovisnost izračunatog pomaka u prostoru Faradayevih dubina  $\Delta\phi$  (crveno) te RM ionosfere (plavo), s početkom na 16.12.2012. u 22:00:00 UTC. Vertikalne linije označavaju maksimum 15 slabih solarnih bljeskova.

<sup>10</sup>[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make\\_javamovie.php?stime=20121217\\_0101&etime=20121217\\_0548&img1=lasc2rdf&title=20121217.021206.p291g;V=269km/s](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?stime=20121217_0101&etime=20121217_0548&img1=lasc2rdf&title=20121217.021206.p291g;V=269km/s)

kalnim linijama označena zabilježena vremena maksimuma 15 bljeskova. Vidljivo je da oni nisu prouzročili velike poremećaje u vrijednosti RM ionosfere, tj.  $vTEC$  ionosfere. Također, u vrijednostima pomaka  $\Delta\phi$  nema značajnih promjena za vrijeme zabilježenih bljeskova, tj. nije opažen trend pada ili porasta vrijednosti  $\Delta\phi$  za vrijeme ili nakon spomenutih slabih bljeskova. Zbog malih intenziteta samih bljeskova, tj. budući da je riječ o bljeskovima niskih energija, to je i očekivano.



## 5 Zaključak

Korištenjem LOFAR-ovih mjerenja linearnog polariziranog sinkrotronskog zračenja Mliječne staze ispitana je mogućnost korištenja detektiranog zračenja za određivanje RM ionosfere te uklanjanje Faradayeve rotacije u ionosferi. Pritom je cilj bio pokazati da se takvom korekcijom može dobiti bolji set podataka, tj. da su maksimumi intenziteta pojedinog piksela većeg iznosa nego što je to za sliku dobivenu standardnom korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi putem predviđanja RM ionosfere iz podataka o TEC ionosfere i WMM modela geomagnetskog polja.

U obradi su korišteni podaci o ukupnom polariziranom zračenju bez i sa standardnom korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi za šestosatno promatranje. Usporedbom slika maksimuma intenziteta duž Faradayeve dubine za oba seta podataka uočeno je da je slika dobivena nakon korekcije na Faradayevu rotaciju u ionosferi jasnija i kontrastnija, da su morfološke strukture izraženije, a sami maksimumi intenziteta većeg iznosa. Takav je rezultat i očekivan.

Korelacijom odgovarajućih piksela između slika iz dvaju seta podataka određen je pripadan pomak u prostoru Faradayevih dubina u iznosu od  $\Delta\phi = (0.38 \pm 0.01)\text{rad/m}^2$ . Podjelom polja promatranja na četiri jednaka dijela, dobivene su vrijednosti pomaka  $\Delta\phi$  koje se međusobno, kao i od ukupnog pomaka, razlikuju tek u trećoj decimali. Budući da su nepouzdanosti svih izračunatih vrijednosti pomaka  $\sim 10^2$ , te su razlike zanemarive.

Kako bi se izračunale vrijednosti pomaka u ovisnosti o vremenu, korišteni su podaci o komponentama Q i U linearnog polariziranog zračenja dobiveni tijekom 36 10-minutnih promatranja (koje odgovara ukupnom šestosatnom promatranju). RM sintezom su dobivene RM kocke za Q, U te ukupno polarizirano zračenje P, u ovisnosti o Faradayevoj dubini. Ponovljen je postupak korelacije piksela iz 36 novih RM kocki za P s odgovarajućim pikselima iz originalne kocke sa standardnom korekcijom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Time je dobiveno 36 vrijednosti pomaka, gdje svaki pomak odgovara jednom 10-minutnom razdoblju. Usporedbom vremenske ovisnosti pomaka  $\Delta\phi$  s vrijednostima RM ionosfere za isti vremenski interval, uočeno je podudaranje u trendu krivulja (veće vrijednosti  $\Delta\phi$  prate veće vrijednosti RM ionosfere i obrnuto). Takav je rezultat i očekivan, s obzirom na to da je pomak u prostoru Faradayevih dubina proporcionalan RM ionosfere. Također, dobiveni po-

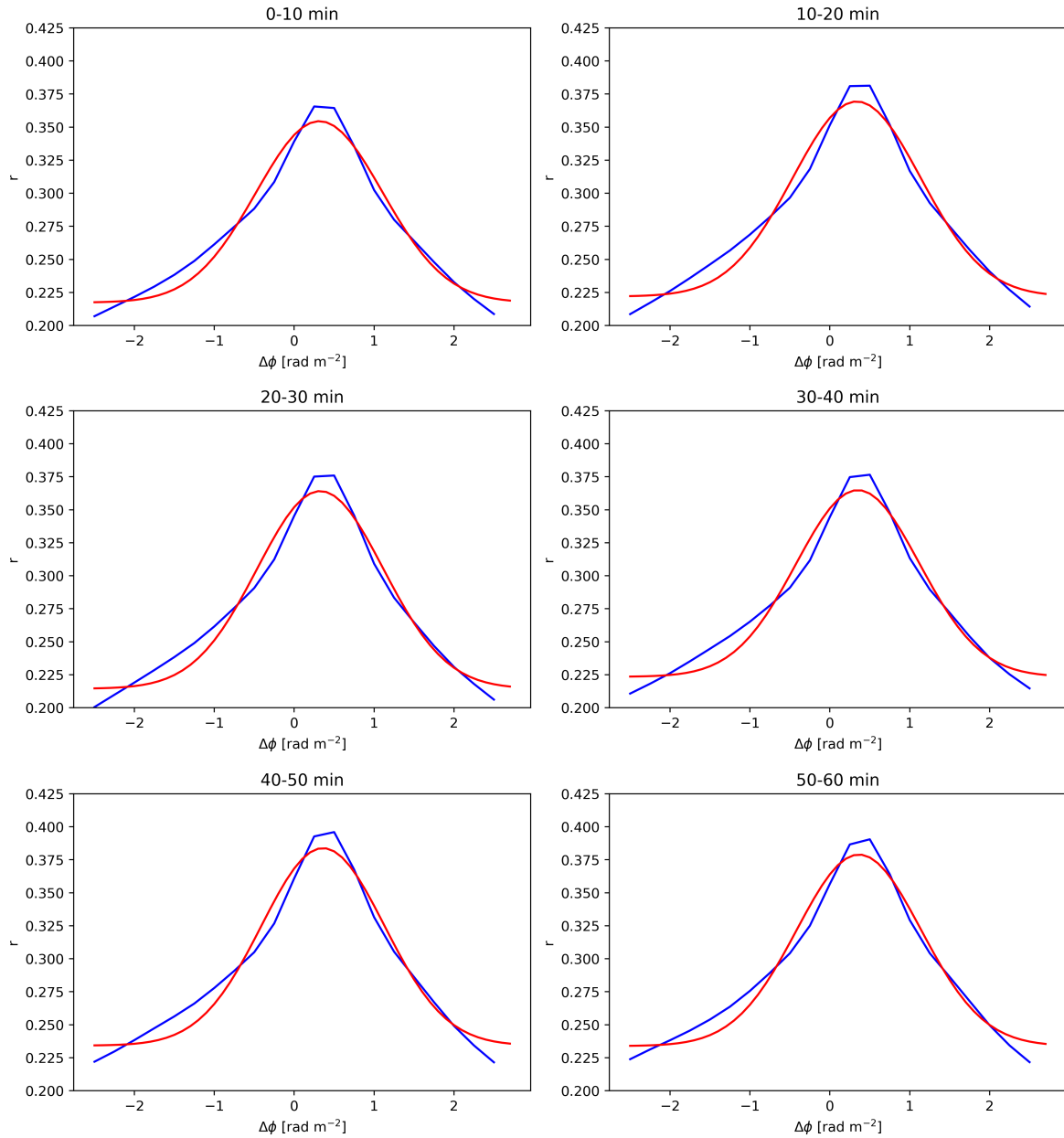
maci manji su za kasnija promatranja, što je također očekivano budući da je tada ionizacija ionosfere manja pa je i linearno polarizirano zračenje manje "zarotirano" Faradayevom rotacijom.

Iz dobivene vremenske ovisnosti pomaka, interpolacijom podataka iz 36 parova Q i U komponenti zračenja, dobivene su nove vrijednosti Q i U komponenti zračenja za cjelokupno šestosatno promatranje, "derotirane" s obzirom na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Iz njih je izračunato ukupno polarizirano zračenje P koje se može usporediti s podacima iz dviju originalnih kocaka. Novo dobiveni podaci o ukupnom polariziranom zračenju pomaknuti su u prostoru Faradayevih dubina jednako kao i nakon standardne korekcije na Faradayevu rotaciju u ionosferi. Pritom je maksimum intenziteta za pojedini piksel veći nego što je on bio nakon standardne korekcije, što je i očekivani ishod. Zbog toga bi slike nakon dodatne korekcije trebale biti jasnije, a morfološke strukture promatranog polja jače uočljivije.

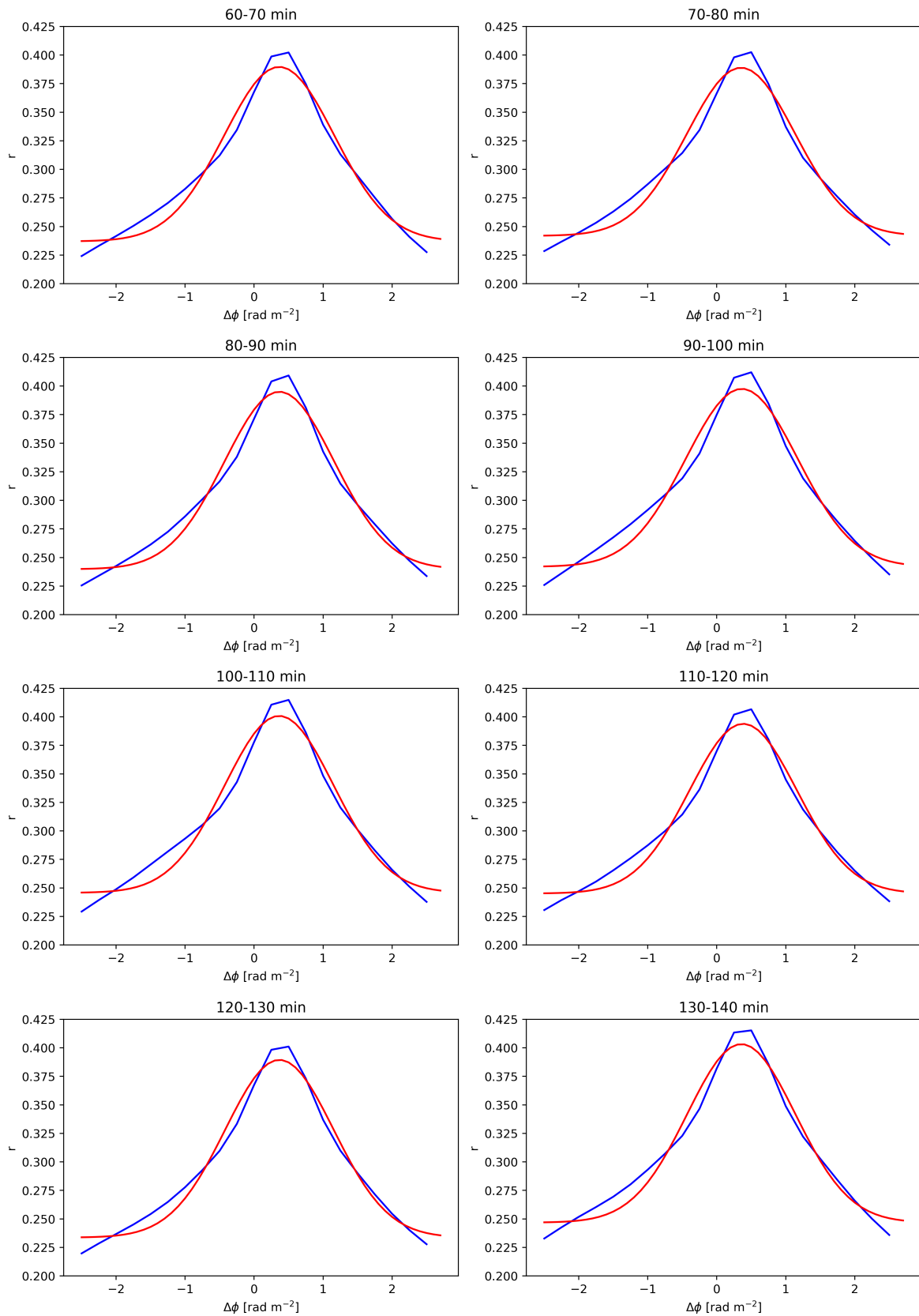
Proučavanjem vremenske ovisnosti geomagnetskih indeksa  $Dst$ ,  $AE$  i  $ap$  na dane LOFAR-ova promatranja je uočena slaba geomagnetska aktivnost. Proučavanjem kataloga CME-a i solarnih bljeskova uočeno je nepostojanje CME-a u promatranom periodu te 15 slabih bljeskova. Iz karakteristika samih bljeskova te nepostojanja značajnih promjena u geomagnetskim indeksima za vrijeme ili neposredno nakon uočenih bljeskova, zaključeno je da je Sunce bilo slabo aktivno za vrijeme proučavanog LOFAR-ova promatranja te nije uzrokovalo značajne poremećaje u stanju magnetosfere i ionosfere. Proučavanjem Sunčeve i geomagnetske aktivnosti stoga nisu uočeni poremećaji koji bi značajno utjecali na radioastronomska promatranja.

# A Dodatak

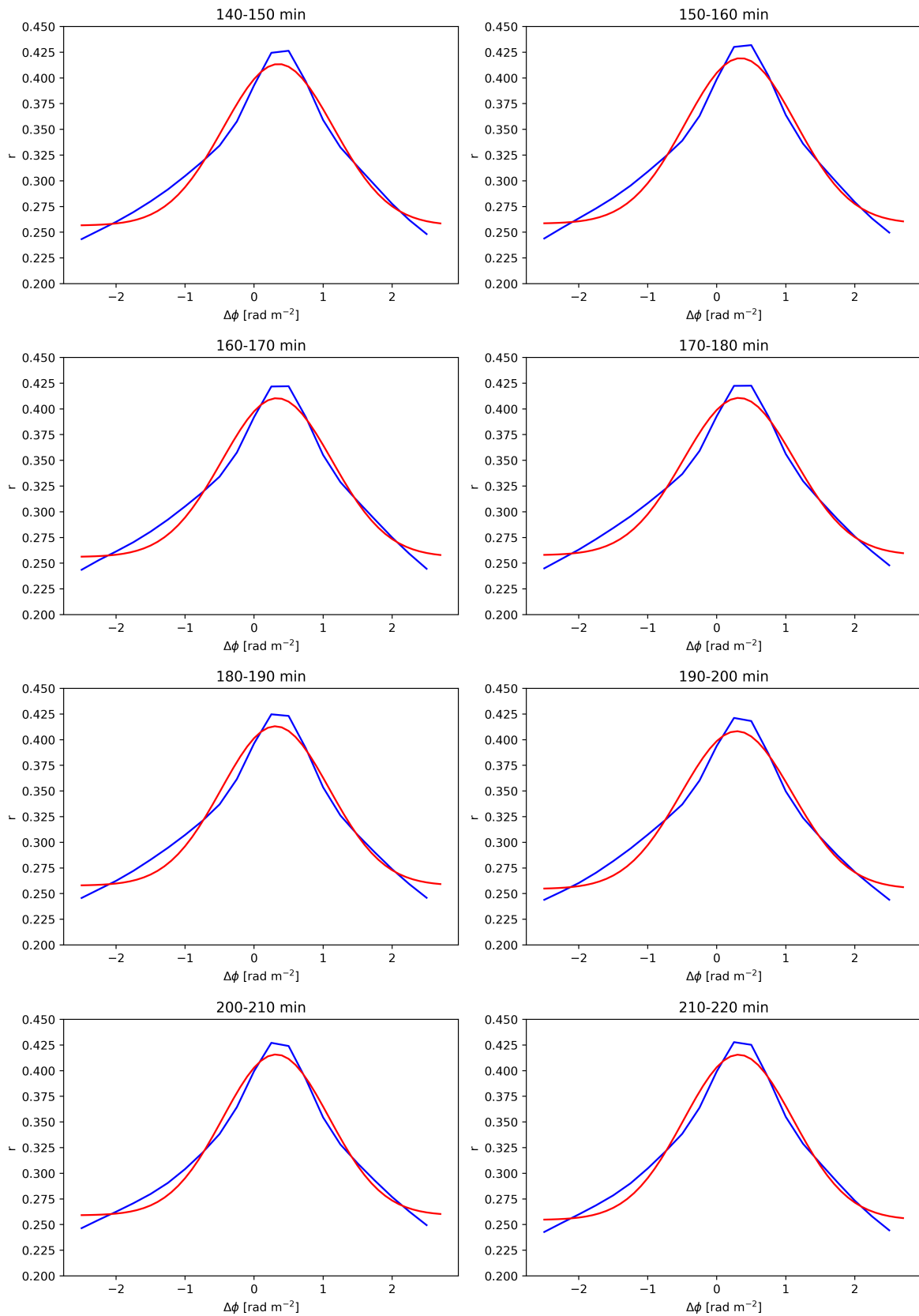
## A.1 Gaussove raspodjele za 36 10-minutnih promatranja



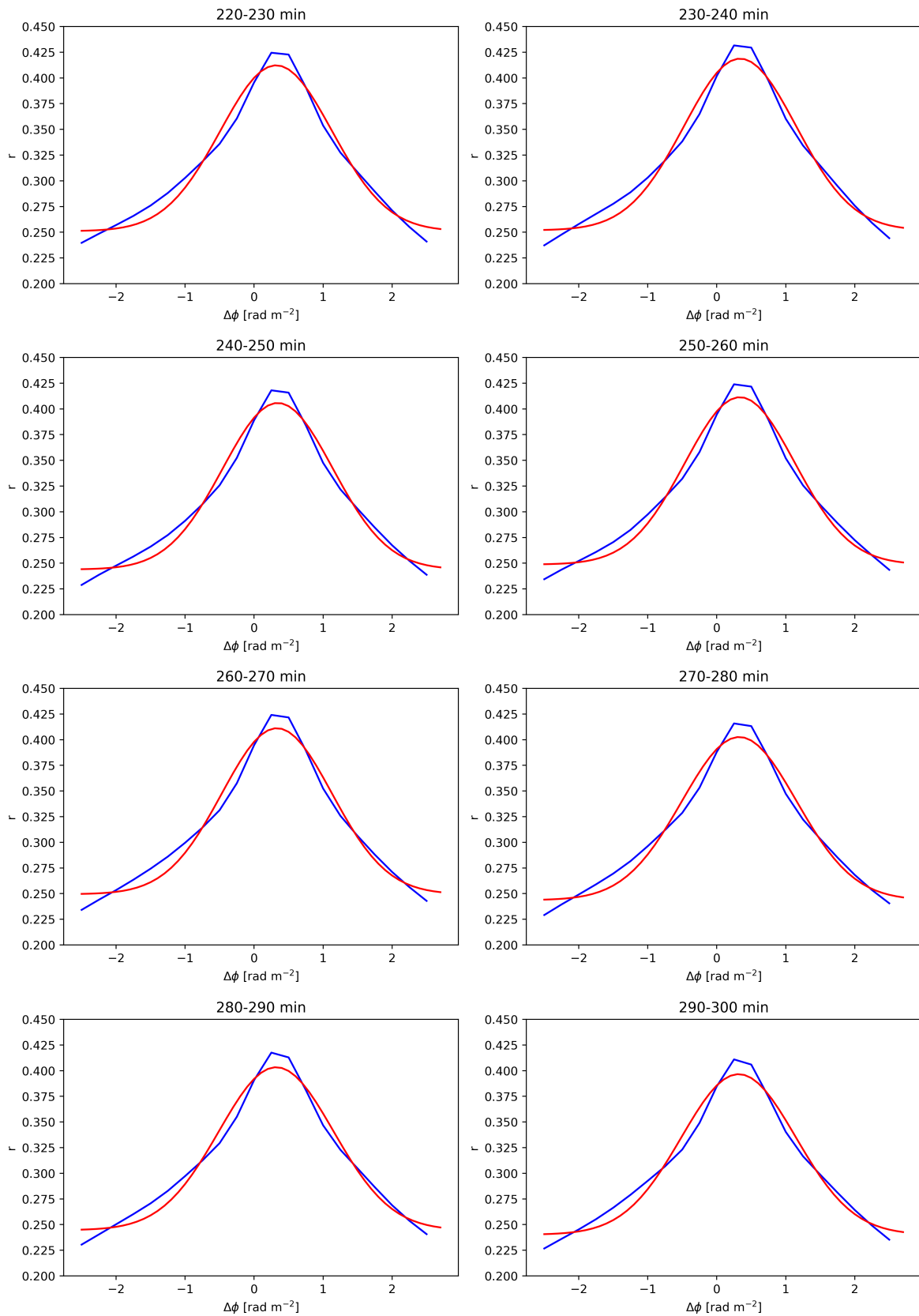
Slika A.1: Prilagodbe krivulje usrednjenih koeficijenata korelacije  $r$  u ovisnosti o  $\Delta\phi$  na Gaussovu raspodjelu za 36 10-minutnih promatranja.



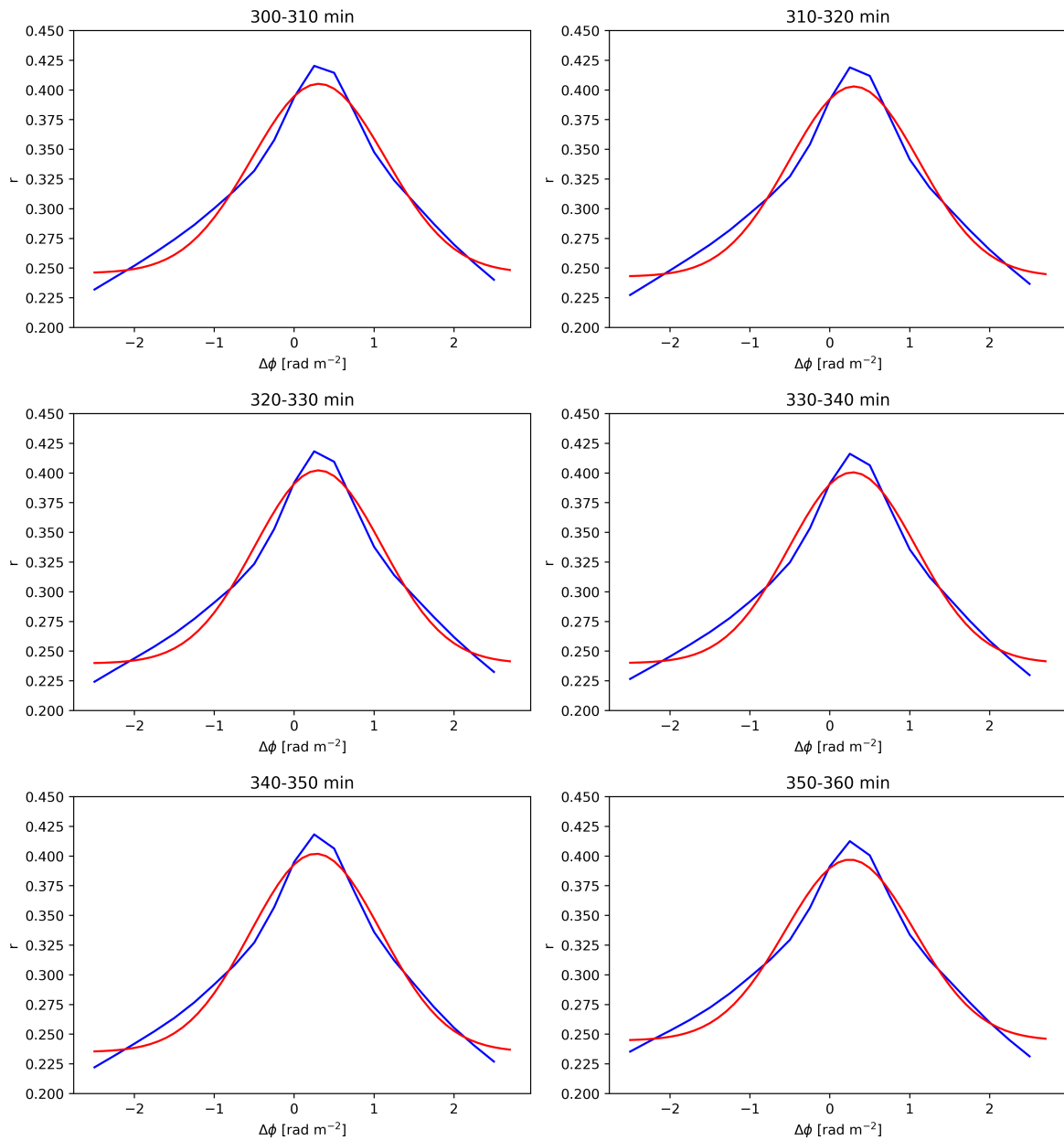
Slika A.1: Nastavak.



Slika A.1: Nastavak.



Slika A.1: Nastavak.



Slika A.1: Nastavak.

## A.2 Solarne baklje

Tablica A.1: Popis solarnih baklji koje su zabilježene za vrijeme LOFAR-ova šestosatnog promatranja.

| Datum       | Početak [UTC] | Kraj [UTC] | Ener.[keV] | X [asec] | Y [asec] | Rad [asec] |
|-------------|---------------|------------|------------|----------|----------|------------|
| 16.12.2012. | 22:05:04      | 22:17:00   | 12-25      | -733     | -109     | 741        |
| 16.12.2012. | 22:47:04      | 22:49:40   | 6-12       | 866      | 292      | 914        |
| 16.12.2012. | 22:49:40      | 22:51:52   | 6-12       | 879      | 298      | 928        |
| 16.12.2012. | 23:21:56      | 23:26:24   | 6-12       | 867      | 296      | 916        |
| 16.12.2012. | 23:28:44      | 23:34:00   | 12-25      | 871      | 295      | 920        |
| 16.12.2012. | 23:34:00      | 23:40:28   | 6-12       | 878      | 296      | 926        |
| 16.12.2012. | 23:40:28      | 23:56:28   | 6-12       | 878      | 302      | 928        |
| 16.12.2012. | 23:56:28      | 00:10:28   | 6-12       | 869      | 318      | 926        |
| 17.12.2012. | 00:10:28      | 00:13:56   | 6-12       | 875      | 307      | 927        |
| 17.12.2012. | 00:13:56      | 00:25:28   | 12-25      | 890      | 297      | 938        |
| 17.12.2012. | 00:25:28      | 00:27:44   | 12-25      | 878      | 294      | 926        |
| 17.12.2012. | 01:12:16      | 01:13:12   | 6-12       | 888      | 277      | 930        |
| 17.12.2012. | 01:14:08      | 01:29:12   | 12-25      | 878      | 293      | 926        |
| 17.12.2012. | 01:29:12      | 01:46:00   | 6-12       | 889      | 297      | 938        |
| 17.12.2012. | 01:46:00      | 02:03:12   | 6-12       | 915      | 291      | 960        |



## Literatura

- [1] Brentjens, M. A., and De Bruyn, A. Faraday rotation measure synthesis. *Astronomy & Astrophysics* 441, 3 (2005), 1217–1228
- [2] Campbell, W. H. Introduction to geomagnetic fields. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [3] Heald, G., McKean, J., Pizzo, R. Low Frequency Radio Astronomy and the LOFAR Observatory. *Astrophysics and Space Science Library* 426. Springer International Publishing. 2018
- [4] Jelić, V., de Bruyn, Mevius, M., Abdalla, F., Asad, K., Bernardi, G., Brentjens, M., et al. Initial LOFAR observations of epoch of reionization windows: II. Diffuse polarized emission in the ELAIS-N1 field. *Astronomy & Astrophysics* 568 (2014), A101.
- [5] Jelić, V., de Bruyn, A., Pandey, V., Mevius, M., Haverkorn, M., Brentjens, M., Koopmans, L., Zaroubi, S., Abdalla, F., Asad, K., et al. Linear polarization structures in LOFAR observations of the interstellar medium in the 3C 196 field. *Astronomy & Astrophysics* 583 (2015), A137.
- [6] Kelley, M. C. The Earth's Ionosphere : Plasma Physics and Electrodynamics. 2nd ed. Academic Press, 2009.
- [7] Loi, S. T., Murphy, T., Bell, M. E., Kaplan, D. L., et al., Quantifying ionospheric effects on time-domain astrophysics with the Murchison Widefield Array. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 453, 3, (2015), 2731–2746
- [8] Mansuripur, M. The Faraday Effect. *Optics & Photonics News* 10(11), (1999), 32-36
- [9] Mevius, M., et al., Probing ionospheric structures using the LOFAR radio telescope. *Radio Sci.*, 51, (2016), 927– 941
- [10] Mevius, M. (2018) RMextract, Astrophysics Source Code Library, record [ascl:1806.024]

- [11] Schaer, S., W. Gurtner, and J. Feltens, IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1, 1998, in Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany
- [12] Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth Planet Sp* 67, (2015), 79
- [13] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. LOFAR: The LOW-Frequency ARray. *Astronomy & Astrophysics* 556 (2013), A2
- [14] Verbanac, G., Manda, M., Vrsnak, B., Sentic, S., Evolution of Solar and Geomagnetic Activity Indices, and Their Relationship: 1960 – 2001. *Solar Physics* 271 (2011), 183-195
- [15] Verbanac, G., Vršnak, B., Živković, S., Hojsak, T., Veronig, A. M. and Temmer, M., Solar wind high-speed streams and related geomagnetic activity in the declining phase of solar cycle 23, *Astronomy & Astrophysics* 533 (2011), A49
- [16] Vujnovic, V., *Astronomija 2: metode astrofizike, Sunce, zvijezde i galaktike*, Školska knjiga, 1990.
- [17] AE, AU, AL, AO Indices. *International Service of Geomagnetic Indices*. [http://isgi.unistra.fr/indices\\_ae.php](http://isgi.unistra.fr/indices_ae.php), 3.10.2020.
- [18] Geomagnetic Field. *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field>, 4.6.2020.
- [19] Geomagnetic kp and ap Indices. NOAA. [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp\\_ap.html](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp_ap.html), 3.10.2020.
- [20] Geomagnetism Frequently Asked Questions. NOAA. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml>, 4.6.2020.
- [21] Ionosphere and Magnetosphere. *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere>, 20.6.2020.
- [22] Kp Index. *International Service of Geomagnetic Indices*. [http://isgi.unistra.fr/indices\\_kp.php](http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php), 3.10.2020.
- [23] RMextract. <https://github.com/lofar-astron/RMextract>, 13.9.2020.

- [24] RM-Synthesis. <https://github.com/brentjens/rm-synthesis>, 13.9.2020.
- [25] Stokes Parameters *UCI, Department of Earth System Science*. <https://www.ess.uci.edu/~cmclinden/link/xx/node11.html>, 13.9.2020.
- [26] Stokes Parameters. *Wikipedia* [https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes\\_parameters](https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_parameters), 13.9.2020.
- [27] The Disturbance Storm Time Index. *NOAA*. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/dst.html>, 3.10.2020.