



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



Jovan Bajčetić, dipl.inž.

# **MODELOVANJE UTICAJA INTENZIVNIH PROMENA SUNČEVOG ZRAČENJA NA PROSTIRANJE RADIO TALASA**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

Novi Sad, 2016.



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

|                                                                                         |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Редни број, <b>РБР:</b>                                                                 |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |
| Идентификациони број, <b>ИБР:</b>                                                       |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |
| Тип документације, <b>ТД:</b>                                                           |               | Монографска документација                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |
| Тип записа, <b>ТЗ:</b>                                                                  |               | Текстуални штампани материјал                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                |
| Врста рада, <b>ВР:</b>                                                                  |               | Докторат                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                |
| Аутор, <b>АУ:</b>                                                                       |               | Јован Бајчетић, дипл. инж.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                |
| Ментор, <b>МН:</b>                                                                      |               | ред. проф. др Војин Шенк, дипл.инж.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| Наслов рада, <b>НР:</b>                                                                 |               | Моделовање утицаја интензивних промена Сунчевог зрачења на простирање радио таласа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                |
| Језик публикације, <b>ЈП:</b>                                                           |               | Српски                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                |
| Језик извода, <b>ЈИ:</b>                                                                |               | Српски                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                |
| Земља публикавања, <b>ЗП:</b>                                                           |               | Република Србија                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                |
| Уже географско подручје, <b>УГП:</b>                                                    |               | Војводина                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |
| Година, <b>ГО:</b>                                                                      |               | 2016.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |
| Издавач, <b>ИЗ:</b>                                                                     |               | Ауторски репринт                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                |
| Место и адреса, <b>МА:</b>                                                              |               | Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| Физички опис рада, <b>ФО:</b><br>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога) |               | 7 поглавља / 148 страна / 163 цитата / 22 табеле / 56 слика                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                |
| Научна област, <b>НО:</b>                                                               |               | Електротехничко и рачунарско инжењерство                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                |
| Научна дисциплина, <b>НД:</b>                                                           |               | Телекомуникације и обрада сигнала                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                |
| Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>                                             |               | Простирање радио таласа, интензивне промене Сунчевог зрачења, индекс рефракције, диелектрична константа средине, моделовање простирања радио таласа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| <b>УДК</b>                                                                              |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |
| Чува се, <b>ЧУ:</b>                                                                     |               | У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| Важна напомена, <b>ВН:</b>                                                              |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |
| Извод, <b>ИЗ:</b>                                                                       |               | Ова дисертација представља резултате истраживања утицаја две врсте интензивних промена Сунчевог зрачења на простирање радио таласа. Први део приказаних резултата односи се на ефекте неперидичних зрачења у Х-опсегу таласних дужина у току трајања Сунчевог Х-флера. Извршено је моделовање карактеристика јонизоване средине Д-слоја јоносфере у току целокупног трајања ефеката додатне енергије јонизације и карактеристика простирања радио таласа одређених фреквенцијских опсега у оквиру наведене средине. Други део резултата приказује периодичну промену нивоа пријемног сигнала усмерене микроталасне радио комуникације која настаје у току јутарњих часова. Показано је да ова промена има висок степен корелисаности са променама вредности геомагнетског поља и да је узрокује појава Сунца на хоризонту. На основу резултата добијених мерењем је предложен модел који описује тренд наведене промене у јутарњим часовима. |                |
| Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>                                                       |               | 21.04.2016.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                |
| Датум одбране, <b>ДО:</b>                                                               |               | .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |
| Чланови комисије, <b>КО:</b>                                                            | Председник:   | др Бранислав Тодоровић, научни саветник                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Потпис ментора |
|                                                                                         | Члан:         | др Милан Наранџић, доцент                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |
|                                                                                         | Члан:         | др Мирослав Перић, научни сарадник                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                |
|                                                                                         | Члан:         | др Александра Нина, научни сарадник                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
|                                                                                         | Члан, ментор: | др Војин Шенк, редовни професор                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |



## KEY WORDS DOCUMENTATION

|                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------|
| Accession number, <b>ANO</b> :                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                |
| Identification number, <b>INO</b> :                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                |
| Document type, <b>DT</b> :                                                                   | Monographic publication                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                   |                |
| Type of record, <b>TR</b> :                                                                  | Textual printed material                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                   |                |
| Contents code, <b>CC</b> :                                                                   | PhD thesis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                   |                |
| Author, <b>AU</b> :                                                                          | Jovan Bajčetić, dipl.ing.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                   |                |
| Mentor, <b>MN</b> :                                                                          | dr Vojin Šenk, full professor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                   |                |
| Title, <b>TI</b> :                                                                           | Modelling of intense solar radiation change influence on radio propagation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                   |                |
| Language of text, <b>LT</b> :                                                                | Serbian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                   |                |
| Language of abstract, <b>LA</b> :                                                            | Serbian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                   |                |
| Country of publication, <b>CP</b> :                                                          | Republic of Serbia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                   |                |
| Locality of publication, <b>LP</b> :                                                         | Vojvodina                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                   |                |
| Publication year, <b>PY</b> :                                                                | 2016.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                   |                |
| Publisher, <b>PB</b> :                                                                       | Author's reprint                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                   |                |
| Publication place, <b>PP</b> :                                                               | Novi Sad, Dositeja Obradovića sq. 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                   |                |
| Physical description, <b>PD</b> :<br>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes) | 7 chapters / 148 pages / 163 references / 22 tables / 56 pictures                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                   |                |
| Scientific field, <b>SF</b> :                                                                | Electrical and computer engineering                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                   |                |
| Scientific discipline, <b>SD</b> :                                                           | Telecommunications and signal processing                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                   |                |
| Subject/Key words, <b>S/KW</b> :                                                             | Propagation of radio waves, intensive variation of Solar radiation, refraction index, dielectric constant of a medium, radio propagation modelling                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                   |                |
| <b>UC</b>                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                |
| Holding data, <b>HD</b> :                                                                    | The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                   |                |
| Note, <b>N</b> :                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                |
| Abstract, <b>AB</b> :                                                                        | <p>This thesis presents the research results of intensive solar radiation variation influence on radio propagation. The first part of presented results is related to the effects of non-periodic radiation within X-ray wavelength during Solar X-flare. Modelling of ionosphere D-layer medium is performed during all time duration of additional ionization energy, as well as radio propagation characteristics within this medium. The second part of the measured results presents periodic variation of receiving microwave radio signal level of experimental Line-of-site communication during the morning hours. It is shown that this variation is highly correlated with geomagnetic field component values variation and that is caused by the Sun appearance on the horizon. Based on the experimentally collected results, the model that describes this variation during morning hours is proposed.</p> |                                                   |                |
| Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :                                            | 21.04.2016.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                   |                |
| Defended on, <b>DE</b> :                                                                     | .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                   |                |
| Defended Board, <b>DB</b> :                                                                  | President:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | dr Branislav Todorović, principal research fellow |                |
|                                                                                              | Member:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | dr Milan Narandžić, assistant professor           |                |
|                                                                                              | Member:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | dr Miroslav Perić, research associate             | Menthor's sign |
|                                                                                              | Member:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | dr Aleksandra Nina, research associate            |                |
|                                                                                              | Member, Mentor:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | dr Vojin Šenk, full professor                     |                |

## Zahvalnica

*Doktorska disertacija "Modelovanje uticaja intenzivnih promena Sunčevog zračenja na prostiranje radio talasa" je urađena u Laboratoriji vojnoelektronskog inženjerstva na Vojnoj akademiji i u Laboratoriji za fiziku plazme na Institutu za fiziku u Beogradu u okviru projekata Ministarstva odbrane VA-TT/OS5/2015 i Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja br. III 44002 i OI 176002.*

*Hvala svima koji su pomogli da nakon dugogodišnjeg istraživanja punog izazova uspešno privedem kraju pisanje ove disertacije.*

*Posebnu zahvalnost dugujem:*

- mentoru, prof. dr Vojinu Šenku na saradnji, savetima i konstruktivnim sugestijama prilikom formulisanja disertacije,*
- komentoru, dr Aleksandri Nina na svesrdnoj pomoći u toku izrade disertacije i*
- prof. dr Branislavu Todoroviću na optimizmu, podršci i entuzijazmu po pitanju rada koji sam uložio u izradu ove disertacije.*

*Najiskrenije se zahvaljujem:*

- kolegama sa Vojne akademije koji su mi sve vreme pružali podršku i omogućavali prijatnu i konstruktivnu atmosferu za rad,*
- prof. dr Vladimiru Čadežu, doc. dr Milanu Narandžiću i dr Miroslavu Periću na saradnji i brojnim korisnim savetima,*
- prof. dr Desanki Šulić na obezbeđenoj eksperimentalnoj postavci uz pomoć koje je prikupljen deo rezultata koji su korišćeni u istraživanju i*
- kolegama sa Instituta za fiziku u Zemunu*

*Neizmerno hvala Dimitriju, Bojani i Slavici na strpljenju, podršci i bezgraničnoj ljubavi koju su mi pružili.*

# Sadržaj

|                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SADRŽAJ .....</b>                                                                                                            | <b>I</b>  |
| <b>SPISAK SLIKA.....</b>                                                                                                        | <b>I</b>  |
| <b>SPISAK TABELA.....</b>                                                                                                       | <b>I</b>  |
| <b>SKRAĆENICE .....</b>                                                                                                         | <b>I</b>  |
| <b>1. UVOD.....</b>                                                                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA .....                                                                                                 | 1         |
| 1.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA .....                                                                                                 | 2         |
| 1.3. CILJ ISTRAŽIVANJA.....                                                                                                     | 2         |
| 1.4. NAUČNI DOPRINOS.....                                                                                                       | 4         |
| 1.5. ORGANIZACIJA DISERTACIJE.....                                                                                              | 5         |
| <b>2. UTICAJ KOSMIČKOG VREMENA (SPACE WEATHER) NA<br/>KOMUNIKACIONE SISTEME .....</b>                                           | <b>9</b>  |
| 2.1. Istorijski pregled istraživanja Sunčevog zračenja.....                                                                     | 9         |
| 2.2. EFEKTI SUNČEVIH ZRAČENJA U JONOSFERI.....                                                                                  | 11        |
| 2.2.1. Čestična zračenja .....                                                                                                  | 12        |
| 2.2.2. Elektromagnetska zračenja .....                                                                                          | 13        |
| 2.3. EFEKTI SUNČEVIH ZRAČENJA NA KOMUNIKACIONE SISTEME.....                                                                     | 16        |
| 2.3.1. Istorijski pregled detektovanih efekata Sunčevog zračenja na komunikacione sisteme .....                                 | 16        |
| 2.3.2. Radio-komunikacioni sistemi pod uticajem pojava u kosmosu .....                                                          | 18        |
| <b>3. PROSTIRANJE ELEKTROMAGNETSKIH TALASA KROZ<br/>NEJONIZOVANU I JONIZOVANU SREDINU.....</b>                                  | <b>21</b> |
| 3.1. KARAKTERISTIKE PROSTIRANJA ELEKTROMAGNETSKIH TALASA KROZ HOMOGENU, IZOTROPNU,<br>NEPROVODNU SREDINU BEZ IZVORA POLJA ..... | 21        |
| 3.1.1. Osnovne postavke prostiranja radio talasa .....                                                                          | 23        |
| 3.1.2. Prostiranje ravanskog radio talasa .....                                                                                 | 26        |
| 3.1.3. Uticaj sredine na prostiranje radio talasa .....                                                                         | 29        |
| 3.1.3.1. Refrakcija .....                                                                                                       | 30        |
| 3.1.3.2. Refleksija .....                                                                                                       | 33        |
| 3.1.3.3. Apsorpcija .....                                                                                                       | 34        |
| 3.1.3.4. Difrakcija .....                                                                                                       | 35        |
| 3.2. KARAKTERISTIKE PROSTIRANJA RADIO TALASA KROZ JONIZOVANU SREDINU .....                                                      | 36        |
| 3.2.1. Prostiranje radio talasa u beskolizionoj jonizovanoj sredini.....                                                        | 36        |
| 3.2.2. Prostiranje radio talasa u kolizionoj jonizovanoj sredini.....                                                           | 41        |
| 3.2.3. Uticaj geomagnetskog polja na prostiranje radio talasa .....                                                             | 43        |
| 3.3. TEORIJE PROSTIRANJA ELEKTROMAGNETSKIH TALASA.....                                                                          | 44        |
| 3.3.1. Modalna teorija .....                                                                                                    | 45        |
| 3.3.2. Zračna teorija .....                                                                                                     | 49        |
| <b>4. DIJAGNOSTIKA NISKE JONOSFERE VLF/LF RADIO METODOM.....</b>                                                                | <b>53</b> |
| 4.1. HEMIJSKA SVOJSTVA D-SLOJA JONOSFERE .....                                                                                  | 53        |
| 4.2. IZNENADNI JONOSFERSKI POREMEĆAJI (THE SUDDEN IONOSPHERIC DISTURBANCES (SIDs)) .....                                        | 55        |
| 4.2.1. Munje .....                                                                                                              | 57        |
| 4.2.2. Gama bljeskovi.....                                                                                                      | 58        |
| 4.2.3. Upadi meteora .....                                                                                                      | 59        |
| 4.2.4. Zemljotresi .....                                                                                                        | 59        |
| 4.2.5. Putujući jonosferski poremećaji.....                                                                                     | 59        |
| 4.3. RADIO SONDIRANJE D-SLOJA JONOSFERE .....                                                                                   | 60        |
| 4.4. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA .....                                                                                             | 64        |

|           |                                                                                                                                                           |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.      | SIMULACIJA PROSTIRANJA VLF/LF RADIO TALASA.....                                                                                                           | 68         |
| <b>5.</b> | <b>MODELOVANJE PARAMETARA PLAZME U JONOSFERSKOM D-SLOJU I KARAKTERISTIKA PROSTIRANJA RADIO TALASA U TOKU POREMEĆAJA IZAZVANOG SUNČEVIM X-FLEROM .....</b> | <b>70</b>  |
| 5.1.      | UVOD .....                                                                                                                                                | 70         |
| 5.2.      | TEORIJSKO I NUMERIČKO MODELOVANJE KARAKTERISTIKA D-SLOJA I PROSTIRANJA RADIO TALASA TOKOM SUNČEVOG X-FLERA .....                                          | 72         |
| 5.2.1.    | Modelovanje koncentracije elektrona .....                                                                                                                 | 72         |
| 5.2.2.    | Modelovanje prostiranja radio talasa tokom Sunčevog X-flera .....                                                                                         | 74         |
| 5.2.3.    | Modelovanje drugih parametara jonizovane sredine tokom Sunčevog X-flera .....                                                                             | 75         |
| 5.2.3.1.  | Svojstva jonizovane sredine u trenutku maksimalnog intenziteta X-flera .....                                                                              | 76         |
| 5.2.3.2.  | Svojstva jonizovane sredine u periodu relaksacije nakon uticaja X-flera .....                                                                             | 79         |
| 5.3.      | REZULTATI .....                                                                                                                                           | 83         |
| 5.3.1.    | „Oštrina“ ( $\beta$ ), visina refleksije ( $H'$ ) i koncentracija elektrona ( $N_e$ ) .....                                                               | 84         |
| 5.3.2.    | Elektronska plazmena frekvencija i prostiranje radio talasa.....                                                                                          | 86         |
| 5.3.3.    | Karakteristike jonizovane sredine u toku trajanja X-flera .....                                                                                           | 94         |
| 5.3.3.1.  | Karakteristike jonizovane sredine u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja X-flera ...                                                                 | 94         |
| 5.3.3.2.  | Karakteristike jonizovane sredine u periodu relaksacije nakon X-flera .....                                                                               | 100        |
| 5.4.      | ZAKLJUČAK .....                                                                                                                                           | 107        |
| <b>6.</b> | <b>ANALIZA DNEVNIH PROMENA NIVOA PRIJEMNOG SIGNALA I MODELOVANJE JUTARNJEG SLABLJENJA MIKROTALASNE USMERENE RADIO KOMUNIKACIJE.....</b>                   | <b>110</b> |
| 6.1.      | UVOD .....                                                                                                                                                | 110        |
| 6.2.      | EKSPERIMENTALNA POSTAVKA .....                                                                                                                            | 112        |
| 6.3.      | MODELOVANJE PROMENA NIVOA PRIJEMNOG SIGNALA I ANALIZA UZROKA JUTARNJEG SLABLJENJA USMERENE MIKROTALASNE RADIO KOMUNIKACIJE .....                          | 115        |
| 6.3.1.    | Modelovanje promena nivoa prijemnog signala.....                                                                                                          | 115        |
| 6.3.2.    | Analiza uzroka jutarnjeg slabljenja .....                                                                                                                 | 115        |
| 6.4.      | REZULTATI .....                                                                                                                                           | 117        |
| 6.4.1.    | Merenje dnevne varijacije nivoa prijemnog signala .....                                                                                                   | 117        |
| 6.4.2.    | Korelacija promene nivoa prijemnog signala sa promenama vrednosti komponentata geomagnetskog polja.....                                                   | 119        |
| 6.4.3.    | Modelovanje jutarnje promene nivoa prijemnog signala za proizvoljne frekvencije opsega od 2,4 do 5 GHz .....                                              | 128        |
| 6.4.4.    | Komparativna analiza promene meteoroloških parametara i nivoa prijemnog signala .....                                                                     | 131        |
| 6.5.      | ZAKLJUČAK .....                                                                                                                                           | 133        |
| <b>7.</b> | <b>ZAKLJUČAK .....</b>                                                                                                                                    | <b>135</b> |
| <b>8.</b> | <b>LITERATURA.....</b>                                                                                                                                    | <b>139</b> |

## Spisak slika

|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sl. 2-1: Zemljina magnetosfera i Sunčev vetar.....                                                                                                                                                                                                                                         | 12 |
| Sl. 2-2: Dostupnost izmerenih vrednosti fluksa u X-opsegu talasnih dužina (1986-2015.).....                                                                                                                                                                                                | 15 |
| Sl. 3-1: Prostiranje radio talasa u Dekartovom koordinatnom sistemu. ....                                                                                                                                                                                                                  | 27 |
| Sl. 3-2: Refrakcija i refleksija na graničnoj površini između dve sredine.....                                                                                                                                                                                                             | 31 |
| Sl. 3-3: Zavisnost relativne dielektrične konstante u funkciji od frekvencije radio talasa $f$ i elektronske plazmene frekvencije $f_c$ . ....                                                                                                                                             | 39 |
| Sl. 3-4: Zavisnost brzine prostiranja faze u funkciji od frekvencije radio talasa $f$ i elektronske plazmene frekvencije $f_c$ . ....                                                                                                                                                      | 39 |
| Sl. 3-5: Zavisnost vrednosti indeksa refrakcije u funkciji od frekvencije radio talasa $f$ i elektronske plazmene frekvencije $f_c$ . ....                                                                                                                                                 | 40 |
| Sl. 3-6: Zemlja-jonosfera talasovod.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 46 |
| Sl. 3-7: Slojevitost parcijalno homogena sredina. ....                                                                                                                                                                                                                                     | 50 |
| Sl. 4-1: Šema interakcije naelektrisanih čestica u D-sloju jonosfere.....                                                                                                                                                                                                                  | 54 |
| Sl. 4-2: Prostorni raspored VLF/LF predajnika. ....                                                                                                                                                                                                                                        | 64 |
| Sl. 4-3: Blok šema AWESOME VLF prijemnika.....                                                                                                                                                                                                                                             | 66 |
| Sl. 5-1: Prostiranje radio talasa u okviru D-sloja jonosfere. ....                                                                                                                                                                                                                         | 74 |
| Sl. 5-2: Fluks zračenja u X-opsegu frekvencija (gornji panel), promena faze (srednji panel) i nivoa (donji panel) 23,4 kHz VLF radio signala 5. maja 2010. ....                                                                                                                            | 83 |
| Sl. 5-3: „Oštrina“ ( $\beta$ – crvena boja) i visina refleksije ( $H'$ – crna boja). ....                                                                                                                                                                                                  | 84 |
| Sl. 5-4: Raspodela koncentracije elektrona po nadmorskim visinama i u vremenu u toku trajanja X-flera. ....                                                                                                                                                                                | 85 |
| Sl. 5-5: Promena parametra „oštrine“ jonosfere u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.....                                                                                                                                                                            | 85 |
| Sl. 5-6: Promena parametra visine refleksije u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.....                                                                                                                                                                              | 86 |
| Sl. 5-7: Promena elektronske koncentracije u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.....                                                                                                                                                                                | 86 |
| Sl. 5-8: Raspodela elektronske plazmene frekvencije po nadmorskim visinama i u vremenu u toku trajanja X-flera. ....                                                                                                                                                                       | 87 |
| Sl. 5-9: Fluks zračenja u X-opsegu frekvencija (gornji panel) sa karakterističnim vremenskim trenucima a), b), c) i d) i proračunata elektronska plazmena frekvencija (donji panel) za četiri referentne nadmorske visine. ....                                                            | 88 |
| Sl. 5-10: Prostorno-vremenska raspodela realnog dela indeksa refrakcije za noseću frekvenciju radio talasa od 1 MHz.....                                                                                                                                                                   | 90 |
| Sl. 5-11: Prostorno-vremenska raspodela realnog dela indeksa refrakcije za noseću frekvenciju radio talasa od 10 MHz.....                                                                                                                                                                  | 91 |
| Sl. 5-12: Prostorno-vremenska raspodela realnog dela indeksa refrakcije za noseću frekvenciju radio talasa od 30 MHz.....                                                                                                                                                                  | 91 |
| Sl. 5-13: Prostiranje radio talasa noseće frekvencije 1 MHz za različite uglove pod kojima se emituje radio signal sa površine zemlje u mirnom stanju (a), trenutku početka X-flera (b), trenutku maksimalne elektronske koncentracije (c) i u jednom trenutku tokom relaksacije (d). .... | 92 |
| Sl. 5-14: Isto kao i Sl. 5-13, ali za noseću frekvenciju od 10 MHz. ....                                                                                                                                                                                                                   | 93 |
| Sl. 5-15: Isto kao i Sl. 5-13, ali za noseću frekvenciju od 30 MHz. ....                                                                                                                                                                                                                   | 93 |

|                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Sl. 5-16: Vrednosti elektronske koncentracije i fitovanih funkcija na reprezentativnim nadmorskim visinama u periodu oko maksimuma X-zračenja.....                                                                         | 94  |
| Sl. 5-17: Prvi i drugi izvod fitovanih funkcija promene elektronske koncentracije na reprezentativnim nadmorskim visinama u periodu oko maksimuma X-zračenja.....                                                          | 95  |
| Sl. 5-18: Efektivni rekombinacioni koeficijent u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama. ....                                                               | 96  |
| Sl. 5-19: Brzina gubitaka elektrona u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama. ....                                                                          | 96  |
| Sl. 5-20: Brzina proizvodnje elektrona u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama. ....                                                                       | 97  |
| Sl. 5-21: Koeficijent proizvodnje elektrona u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama. ....                                                                  | 97  |
| Sl. 5-22: Spektar zračenja pre (gornji panel) i u trenutku maksimalnog intenziteta X-zračenja (srednji panel) i varijacija udela zračenja na konkretnim talasnim dužinama (donji panel). ....                              | 99  |
| Sl. 5-23: Relativni udeo $L\alpha$ zračenja u jonizacionom procesu u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama. ...                                            | 100 |
| Sl. 5-24: Fluks zračenja u X-opsegu frekvencija (gornji panel), promena faze (srednji panel) i nivoa (donji panel) 23,4 kHz VLF radio signala 5. maja 2010. za vreme relaksacionog perioda (siva boja) nakon X-flera. .... | 101 |
| Sl. 5-25: Promena koncentracije elektrona i prvog izvoda koncentracije elektrona po vremenu u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija). ....              | 102 |
| Sl. 5-26: Promena efektivnog rekombinacionog koeficijenta u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija). ....                                                | 103 |
| Sl. 5-27: Promena brzine gubitaka elektrona u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija). ....                                                              | 104 |
| Sl. 5-28: Promena elektronske temperature u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija). ....                                                                | 105 |
| Sl. 5-29: Promena elektronske plazmene frekvenciji u funkciji promene temperature za tri referentne nadmorske visine. ....                                                                                                 | 106 |
| Sl. 5-30: Promena realnog dela indeksa refrakcije u funkciji od promene temperature i noseće frekvencije radio talasa. ....                                                                                                | 107 |
| Sl. 6-1: Usmerena mikrotalasna radio komunikacija komponente geomagnetskog polja. ....                                                                                                                                     | 113 |
| Sl. 6-2: Karakteristični slučajevi refrakcije. ....                                                                                                                                                                        | 116 |
| Sl. 6-3: Dnevne promene nivoa prijemnog signala svih referentnih nosećih frekvencija. ....                                                                                                                                 | 119 |
| Sl. 6-4: Dnevne promene nivoa prijemnog signala na 5 GHz za sedam referentnih dana. ....                                                                                                                                   | 120 |
| Sl. 6-5: Relativne dnevne promene nivoa prijemnog signala i komponentata geomagnetskog polja [%] u odnosu na srednju dnevnu vrednost za sedam referentnih dana. ....                                                       | 121 |
| Sl. 6-6: Promena nivoa prijemnog signala na 5 GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja za period od 00:00 do 12:00 (gornja dva panela) i od 05:30 do 10:30 (donja dva panela). ....                                 | 124 |
| Sl. 6-7: Promena nivoa prijemnog signala na 2,4 GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja za period od 00:00 do 12:00 (gornja dva panela) i od 05:30 do 10:30 (donja dva panela). ....                               | 125 |
| Sl. 6-8: Izmerene vrednosti i procenjena funkcija promene nivoa prijemnog signala na 5 GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja. ....                                                                               | 126 |

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Sl. 6-9: Izmerene vrednosti i procenjena funkcija promene nivoa prijemnog signala na 2,4GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja. ....                      | 126 |
| Sl. 6-10: Promena nivoa prijemnog signala (NPS - levi panel) i vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja (GMP - desni panel).....                                | 128 |
| Sl. 6-11: Modelovane funkcije promene nivoa prijemnog signala za referentne noseće frekvencije u opsegu od 2,4 do 5 GHz.....                                       | 129 |
| Sl. 6-12: Relativna promena nivoa prijemnog signala dobijena na osnovu modelovane funkcije. ....                                                                   | 131 |
| Sl. 6-13: Promena nivoa prijemnog signala na 2,7 GHz i refraktivnosti za period od 00:00 do 12:00 (gornja dva panela) i od 04:30 do 10:30 (donja dva panela). .... | 132 |
| Sl. 6-14: Promena srednje vrednosti nivoa prijemnog signala noseće frekvencije 2,7 GHz i refraktivnosti $N$ u periodu od 00:00 do 12:00.....                       | 133 |

## Spisak tabela

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 2-1: Pregled elektromagnetskih Sunčevih erupcija. ....                                                                                                           | 13  |
| Tab. 2-2: Klasifikacija Sunčevih flerova X-opsega. ....                                                                                                               | 15  |
| Tab. 2-3: Pregled uticaja pojava kosmičkog vremena na tehničke sisteme. ....                                                                                          | 17  |
| Tab. 2-4: Zavisnost radio sistema od jonosfere. ....                                                                                                                  | 19  |
| Tab. 3-1: Maksvelove jednačine u integralnom i diferencijalnom obliku. ....                                                                                           | 23  |
| Tab. 3-2: Maksvelove jednačine u diferencijalnom obliku za vakuum. ....                                                                                               | 25  |
| Tab. 3-3: Maksvelove jednačine u diferencijalnom obliku za ravanski talas. ....                                                                                       | 27  |
| Tab. 3-4: TE i TM modovi prostiranja radio talasa u planarnom talasovodu. ....                                                                                        | 48  |
| Tab. 4-1: Pregled praćenih VLF/LF predajnika. ....                                                                                                                    | 65  |
| Tab. 5-1: Vrednosti koeficijenata $C_i$ i $D_i$ za vrste jona D-sloja jonosfere [139]. ....                                                                           | 81  |
| Tab. 5-2: Vrednosti inicijalnih parametara analize dinamike D-sloja jonosfere. ....                                                                                   | 104 |
| Tab. 5-3: Promena temperature i elektronske plazmene frekvencije u toku relaksacije. ..                                                                               | 105 |
| Tab. 6-1: Podaci eksperimentalne usmerene mikrotalasne radio komunikacije. ....                                                                                       | 114 |
| Tab. 6-2: Parametri karakterističnih slučajeva refrakcije. ....                                                                                                       | 116 |
| Tab. 6-3: Pirsonov koeficijent korelacije (PPMCC) promene nivoa prijemnog signala i<br>komponenata geomagnetskog polja. ....                                          | 122 |
| Tab. 6-4: Vrednosti vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja i apsolutne promene<br>nivoa prijemnog signala u toku dana. ....                                      | 123 |
| Tab. 6-5: Vrednosti R-square i RMSE za procenjene funkcije. ....                                                                                                      | 126 |
| Tab. 6-6: Koeficijenti procenjene funkcije za period od 00:00 do 12:00. ....                                                                                          | 127 |
| Tab. 6-7: Koeficijenti modelovanih funkcija za reprezentativne noseće frekvencije u<br>opsegu od 2,4 do 5 GHz za period od TIS do TIS+5:30. ....                      | 129 |
| Tab. 6-8: Vrednost konstanti za izračunavanje koeficijenata modelovanih funkcija za<br>noseće frekvencije u opsegu od 2,4 do 5 GHz za period od TIS do TIS+5:30. .... | 130 |

## **Skraćenice**

|            |                                                                                          |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| AARDDVARKK | Antartic-Artic Radiation-belt (Dynamic) Deposition – VLF Atmospheric Research Consortium |
| AbsPAL     | Absolute Phase and Amplitude Logger                                                      |
| ALMA       | Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array                                             |
| AWESOME    | Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modelling and Education       |
| CMD        | Central Meridian Distance                                                                |
| CME        | Coronal Mass Ejections                                                                   |
| CPLD       | Complex Programmable Logic Device                                                        |
| ELF        | Extremely Low Frequencies                                                                |
| EUV        | Extreme Ultra Violet                                                                     |
| FASR       | Frequency Agile Solar Radiotelescope                                                     |
| GPS        | Global Positioning System                                                                |
| GOES       | Geostationary Operational Environmental Satellite                                        |
| HF         | High Frequencies                                                                         |
| HFDF       | High Frequency Direction Finding                                                         |
| HF SIGINT  | High Frequency Signal Inteligence                                                        |
| IC         | Infracrveno                                                                              |
| IRI        | International reference ionosphere                                                       |
| LEO        | Low Earth Orbit                                                                          |
| LF         | Low Frequencies                                                                          |
| LWPC       | Long Wave Propagation Capability                                                         |
| LWPM       | Long Wave Propagation Model                                                              |
| L $\gamma$ | Lajman- $\alpha$                                                                         |
| MF         | Medium Frequencies                                                                       |
| NBE        | Narrow Bipolar Events                                                                    |
| Ni-DAQ     | National Instruments Data Acquisition                                                    |
| NOAA       | National Oceanic and Atmospheric Administration                                          |
| OTHR       | Over The Horison Radar                                                                   |
| PPMCC      | Pearson Product-Moment Correlation Coefficient                                           |
| RMSE       | Root-Mean-Square Error                                                                   |

|        |                                             |
|--------|---------------------------------------------|
| SAVNET | South America VLF NETwork                   |
| SCNA   | Sudden Cosmic Noise Absorption              |
| SEA    | Sudden Enhancement/decrease of Atmospherics |
| SFD    | Sudden Frequency Deviation                  |
| SID    | Sudden Ionospheric Disturbances             |
| SPA    | Sudden Phase Anomaly                        |
| SWF    | Short Wave Fadeout                          |
| TEC    | Total Electron Content                      |
| TID    | Traveling Ionospheric Disturbances          |
| ULF    | Ultra Low Frequencies                       |
| UV     | Ultra Violet                                |
| VCO    | Voltage Controlled Oscillator               |
| VHF    | Very High Frequencies                       |
| VLF    | Very Low Frequencies                        |
| XRS    | X-Ray Sensors                               |

### 1. Uvod

Komunikacione tehnologije postale su neizostavan segment ljudskog života. Samo do pre nekoliko decenija je bilo teško zamisliti da se informacija može za samo nekoliko sekundi preneti sa kraja na kraj sveta, sa velikom pouzdanošću i malim kašnjenjem. Danas je moguće imati pristup bilo kojem informacionom sadržaju, sa bilo koje tačke na Zemlji. Fenomen globalnog povezivanja prisutan je u svim sferama ljudske delatnosti i omogućava integraciju široke palete komunikacionih tehnologija. Razmena informacije se ostvaruje različitim komunikacionim putevima čije fizičke karakteristike predstavljaju okvir u kojem je moguće ostvariti određenu brzinu prenosa informacije u skladu sa frekvencijskim opsegom kanala i standardima koje konkretno upotrebljena komunikaciona tehnologija propisuje. Fizička osnova prenosa informacionog sadržaja je kompleksna multidisciplinarna oblast istraživanja koja zahteva sveobuhvatno ulaženje u srž mnogobrojnih fizičkih procesa i analizu interakcije energije i materije. Ovaj deo opšteg naučnog saznanja, bez obzira na vrlo uspešnu dugogodišnju eksploataciju i evidentno sada već nesagledivu praktičnu primenu u svim domenima ljudske delatnosti, ostavlja prostora za istraživanja koja će omogućiti efikasnije korišćenje dostupnih resursa komunikacionih puteva. Od svih postojećih sredina za prenos informacionog sadržaja (optička vlakna, bakarni kablovi, itd.) radio prenos je najpodložniji uticaju prirodnih izvora zračenja interferirajući direktno sa prirodno generisanim radio talasima ili posredno, preko promena uslova sredine kroz koju se radio talas prostire.

#### 1.1. Problem istraživanja

Postoje dva problema istraživanja koja su podstakla izradu ove disertacije. Prvi je bila činjenica da se u široj naučnoj literaturi ne može pronaći model koji opisuje prostorno-vremensku zavisnost karakteristika prostiranja radio talasa u okviru jonosferskog D-sloja u uslovima poremećenog stanja ovog dela jonosfere. Drugi problem kojim se deo ove disertacije bavi je zakonitost dnevno-noćne promene nivoa prijemnog signala eksperimentalno postavljene usmerene mikrotalasne radio komunikacije, njeno modelovanje u vidu matematičke formulacije i detektovana korelacija ove varijacije sa

promenama komponenata geomagnetskog polja koja nije u naučnoj literaturi prikazana do sad.

### 1.2. Predmet istraživanja

Predmet istraživanja i dobijeni rezultati predstavljeni u ovoj disertaciji odnose se na jedan od najčešće korišćenih načina prenosa informacije – radio prenos u Zemljinoj atmosferi u specifičnim uslovima kada Sunce svojim promenama intenziteta zračenja utiče na sredinu prenosa. Osnovni predmet istraživanja su efekti koje Sunčevo elektromagnetsko zračenje ispoljava na zemaljske komunikacione sisteme pojedinih frekvencijskih opsega radi što vernijeg modelovanja i pružanja preciznog opisa uticaja na radio komunikacione sisteme. Posebna pažnja je usmerena ka detekciji uticaja Sunčevog X-zračenja kroz promene osobina D-sloja jonosfere putem dobro poznate i u literaturi dosta zastupljene VLF/LF (*Very Low Frequency* – 3-30 kHz/*Low Frequency* – 30-300 kHz) metode radio dijagnostike. U naučnoj literaturi su u velikoj meri obrađene karakteristike sredine prostiranja u situacijama kada je mirno stanje, tj. u odsustvu intenzivnog jonizujućeg zračenja, a s obzirom na to da se u D-sloju u toku intenzivnog X-flera događaju promene koje dovode do porasta koncentracije elektrona i za red veličine, uticaj na prostiranje radio talasa se pod tim uslovima značajno menja. Predmet istraživanja predstavlja i eksperimentalno ustanovljena periodična noćno-dnevna promena nivoa prijemnog signala mikrotalasne usmerene radio komunikacije koja nastaje prilikom pojave intenzivnijeg Sunčevog zračenja, zakonitost te promene i uzroci koji do nje dovode.

### 1.3. Cilj istraživanja

Cilj istraživanja predstavljenog u ovoj disertaciji je da se na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata razviju modeli koji opisuju karakteristike jonosferske D-oblasti, kao i karakteristike prostiranja radio talasa različitih frekvencijskih opsega u okviru D-oblasti u uslovima za vreme intenzivne Sunčeve aktivnosti. Na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka je predstavljena i analiza uticaja Sunca na usmerene radio-komunikacione sisteme mikrotalasnog frekvencijskog područja sa ciljem da se razvije model koji opisuje posledičnu detektovanu varijaciju nivoa prijemnog signala.

Opšti ciljevi istraživanja su:

- Analiza uticaja Sunčeve EM aktivnosti na zemaljske komunikacione radio sisteme.
- Razvijanje teorijskih modela i numeričkih procedura koji će na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih praćenjem D-sloja radio metodom radio dijagnostike dati vrednosti prostorno-vremenski zavisnih parametara u ovom delu jonosfere koji se odnose na konkretan posmatrani prostor i vremenski period i njihov uticaj na prostiranje radio talasa.
- Modelovanje periodičnih promena koje se događaju u toku dana na prijemnom signalu usmerene mikrotalasne komunikacije.

Posebni ciljevi u istraživanju su:

- Analiza neperiodičnih promena (usled Sunčevog X-flera) karakteristika niske jonosfere upotrebom VLF/LF metode radio dijagnostike. Ovde je posebna pažnja usmerena ka analizi X-flera C klase iz razloga što je njihov intenzitet dovoljan za značajan poremećaj D-sloja jonosfere, a njihov broj je značajno veći od broja X-flerova M i X klase. To je praktično vrlo naglašeno u podacima registrovanim na GOES-14 satelitu za ceo jedanaestogodišnji sunčev ciklus.
- Modelovanje parametara plazme i karakteristika prostiranja radio signala jonosferskog D-sloja tokom poremećaja jonosfere izazvanog Sunčevim X-flerom analizom prostorno-vremenske zavisnosti:
  - elektronske koncentracije i elektronske plazmene frekvencije kao parametra plazme koji predstavljaju uticajne faktore sredine kroz koju se radio talas prostire i indeksa refrakcije radio signala u LF, MF i HF frekvencijskim domenima u toku celog perioda poremećaja,
  - brzine proizvodnje i gubitaka elektrona, efektivnog rekombinacionog koeficijenta, koeficijenta proporcionalnosti brzine fotojonizacije X-zračenjem i zabeleženog fluksa X-zračenja na satelitu i odnosa brzina fotojonizacije uzrokovane  $Ly\alpha$  u trenutku maksimalnog X-zračenja,
  - brzine gubitaka elektrona, promene temperature i efektivnog rekombinacionog koeficijenta tokom relaksacije.

- Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog mikrotalasnog radio signala u frekvencijskom domenu 2,4 – 5 GHz i korelisanosti sa promenama komponenata geomagnetskog polja izazvanih Sunčevom aktivnošću.
- Modelovanje jutarnjeg slabljenja prijemnog signala usmerene mikrotalasne radio komunikacije na nosećim frekvencijama od 2,4 do 5 GHz u funkciji od noseće frekvencije i relativnog vremena od trenutka izlaska Sunca.
- Analiza uzroka nastanka jutarnjeg slabljenja usmerene mikrotalasne radio komunikacije.

### 1.4. Naučni doprinos

Rezultati dobijeni u toku izrade ove disertacije će omogućiti razvoj preciznijeg modela niske jonosfere u slučaju intenzivnih poremećaja izazvanih Sunčevim elektromagnetskim aktivnostima koji bi preciznije definisao karakteristike prostiranja radio talasa u opsegu rada komunikacionih i radarskih sistema koji koriste jonosferski sloj atmosfere kao reflektujuću sredinu, kao i omogućio proširenje saznanja vezanog za naučna istraživanja iz oblasti astro i geofizike. Konkretno, na osnovu procedura razvijenih u disertaciji biće omogućena modelovanja koje se odnose na posmatrani vremenski period i posmatranu lokaciju za veličine:

- elektronsku plazmenu frekvenciju kao parametra plazme koji reprezentuje uticaj sredine na karakteristike prostirućeg radio talasa,
- indeks refrakcije radio talasa tokom perioda poremećaja jonosfere,
- brzinu proizvodnje i gubitaka elektrona, efektivni rekombinacioni koeficijent, koeficijent proporcionalnosti brzine fotojonizacije X-zračenja i zabeleženog fluksa X-zračenja na satelitu i odnos brzina fotojonizacije uzrokovane  $Ly\alpha$  u trenutku maksimalnog X-zračenja,
- brzinu gubitaka elektrona, temperaturu i efektivni rekombinacioni koeficijent tokom relaksacije.

Ove prostorno-vremenske zavisnosti moći će dalje da se implementiraju u druge procedure koje će proširiti poznavanje jonosferskih karakteristika za naučne i tehnološke potrebe. Iako su u disertaciji analizirani poremećaji izazvani Sunčevim X-flerovima,

rezultati modelovanja izraženi analitičkim izrazima su univerzalni i primenjivi na poremećaje izazvane drugim astrofizičkim, geofizičkim ili veštačkim pojavama. Kao konkretan primer primene rezultata disertacije može se navesti da bi tehnološka primena preciznijeg modela omogućila bolju rezoluciju i preciznost goniometara na bazi jedne goniometarske stanice (*Single Station Location – SSL*) što predstavlja buduće proširenje istraživanja u ovoj oblasti. Proširenom analizom uticaja neperiodičnih promena na karakteristike plazme D-sloja jonosfere može se ustanoviti uticaj na mikrotalasne signale u domenu radio komunikacija između zemaljskih i satelitskih stanica, kao i na GPS signale. Pored mogućnosti detekcije promena koncentracije elektrona usled Sunčevog zračenja, istraživanje u ovoj oblasti ima perspektivu detekcije i eventualnog predviđanja nastanka prirodnih pojava kao što su zemljotresi, cikloni,  $\gamma$ -bljeskovi, itd. što predstavlja izazov za buduće proširenje istraživanja u tom smeru.

Dodatni naučni doprinos se odnosi na opis varijacije nivoa prijemnog signala usmerene zemaljske radio komunikacije usled noćno-dnevni promena intervala dana što u izvesnoj meri omogućava tehnološku primenu. Na bazi ustanovljenih relacija, za service prenosa podataka koji zahtevaju visok nivo kvaliteta prenosa bi se u tom slučaju mogla planirati dodatna rezerva za feding koja bi omogućavala održavanje zahtevanog kvaliteta u prenosu informacije.

Deo rezultata prikazanih u disertaciji je do sada publikovan u [1], [2], [3] i [4].

### 1.5. Organizacija disertacije

Na bazi dugogodišnje sprovedenih istraživanja, prvi logički segment ove disertacije predstavlja analizu karakteristika jonizovane sredine u uslovima neperiodičnih Sunčevih zračenja u opsegu talasnih dužina X-zračenja (0,01-10 nm), modelovanje parametara jonizovane sredine u specifičnim vremenskim intervalima trajanja X-flera i modelovanje prostiranja radio talasa u toku celokupnog trajanja ovih specifičnih pojava. Drugi segment disertacije je usmeren na uticaj Sunčevog zračenja u toku jutarnjih časova na nejonizovanu sredinu u kojoj se vrši radio prenos u mikrotalasnom frekvencijskom opsegu, korelaciju promena nivoa prijemnog signala sa detektovanim promenama komponenata geomagnetskog polja i modelovanje trenda promene nivoa signala u funkciji noseće

frekvencije i relativnog vremena u odnosu na trenutak izlaska Sunca. Fenomen izmerenog slabljenja je analiziran i sa aspekta promena karakteristika sredine merenjem meteoroloških parametara na prostoru sprovedenog eksperimenta.

Uvodna poglavlja predstavljaju teorijsku osnovu za razumevanje, analizu navedenih pojava i modelovanje prostiranja radio talasa pod neperiodičnim i periodičnim karakterističnim uslovima, dok su u narednim poglavljima predstavljeni rezultati do kojih se došlo u dugogodišnjem eksperimentalnom prikupljanju podataka, njihovoj analizi i razvoju teorijskih i numeričkih modela.

U poglavlju 2 su predstavljena saznanja o manifestaciji različitih vrsta zračenja sa Sunca u blizini Zemlje (*Space Weather*), kao i uticaj ovih pojava na prostiranje radio talasa na Zemlji. Sumarizovano je istorijski formirano saznanje direktnih i posrednih efekata Sunčevog zračenja na telekomunikacione sisteme, a posebna pažnja je usmerena ka jonizujućem zračenju u domenu talasnih dužina X-zračenja. Ova vrsta zračenja ima najvećeg značaja u jonizujućim procesima D-sloja jonosfere u periodu trajanja Sunčevih X-flerova čime predstavlja osnovni uzrok neperiodičnih poremećaja stanja jonosfere u vidnom delu dana što je jedan od osnovnih predmeta istraživanja koji je prikazan u ovoj disertaciji. Pored navedenog, predstavljena je sublimacija dosadašnjeg saznanja vezanog za uticaj kosmičkih pojava koje dovode do narušavanja osnovnog stanja sredine prenosa radio talasa. Ove manifestacije dovode do strukturnog poremećaja sredine čime se stvaraju uslovi za nekarakteristično prostiranje radio talasa različitih frekvencijskih opsega što je osnovni predmet istraživanja prikazan u ovoj disertaciji.

Poglavljje 3 je sistematizovan prikaz makroskopske teorije prostiranja elektromagnetske energije kroz Maksvelovu teoriju analize elektromagnetskog polja. Na početku su dati osnovni principi u vidu matematičkih relacija koje opisuju prenos elektromagnetske energije kroz vakuum i sredine bez slobodnih naelektrisanja značajnih za predviđanje prostiranja radio talasa u prizemnom sloju atmosfere. Nakon toga su prikazane relacije preko kojih se opisuje stanje jonizovane sredine – plazme i njen uticaj na prostiranje radio talasa. Opisani su osnovni procesi idealizovane provodne sredine i karakteristične fizičke veličine koje vrše uticaj na prostiranje radio talasa kroz jonizovanu sredinu bez uticaja magnetskog polja, kao i kroz sredinu koja je pod uticajem magnetskog polja. Ovo poglavljje, takođe daje osnovne principe dve teorije analize prostiranja radio talasa u makroskopskim razmerama. Ove teorije (modalna – *mode theory* i zračna – *ray*

*theory*) predstavljaju teorijsku osnovu za modelovanje vrednosti vektora električnog i magnetskog polja u tački u prostoru, u zavisnosti od odnosa dimenzija posmatranog prostora i talasne dužine posmatranog radio talasa. Jedan deo predmeta istraživanja ove disertacije je prirodno formiran talasovod Zemlja – D-sloj jonosfere i prostiranje radio talasa vrlo niskih frekvencija (VLF) i niskih frekvencija (LF) u okviru njega. Upotrebom adekvatnog softverskog alata izvršeno je izračunavanje potrebnih parametara sredine za modelovanje prostiranja radio talasa ostalih frekvencijskih opsega prikazano u disertaciji, a ovo izračunavanje je bazirano na modalnoj teoriji koja je kroz relacije predstavljena u ovom poglavlju. Zračna teorija je kao osnova za modelovanje prostiranja radio talasa različitih frekvencijskih opsega u jonizovanoj sredini, takođe detaljno opisana.

Poglavlje 4 je opis merne tehnike radio sondiranja niske jonosfere VLF/LF radio talasima na osnovu čijih podataka je vršena analiza prostiranja radio talasa ostalih frekvencijskih opsega prikazana u narednim poglavljima disertacije. Prikazane su specifičnosti prostiranja radio talasa ovih frekvencijskih opsega u jonizovanoj sredini D-sloja jonosfere i predstavljene su merne tehnike prikupljanja i procedure proračunavanja parametara potrebnih za modelovanje prostiranja radio talasa u uslovima poremećenog stanja D-sloja jonosfere. Opisani su funkcionalni delovi mernog instrumenta i osnovne karakteristike delova VLF/LF prijemnika.

U 5. poglavlju su prikazani rezultati istraživanja promena uslova prostiranja i predstavljeno je modelovanje karakteristika sredine i prostiranja radio talasa u D-sloju jonosfere u periodu poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom. Analiziran je celokupan period – od karakteristika mirnog stanja jonosferskog D-sloja i početka uticaja zračenja u talasnom opsegu X-zračenja do kraja trajanja relaksacionog perioda (trenutka kada se karakteristike sredine vraćaju u stacionarno stanje). Modelovanje parametara jonosferskog D-sloja tokom poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom vršeno je parcijalnom prostorno-vremenskom analizom značajnih parametara jonizovane sredine u pojedinim fazama X-flera radi primene adekvatnih aproksimacija.

6. poglavlje prikazuje eksperimentalnu postavku kojom je dugogodišnjim merenjima ustanovljena periodična promena nivoa prijemnog signala usmerene mikrotalasne komunikacije u toku jutarnjih časova. Izvršena je analiza dnevnih promena nivoa prijemnog mikrotalasnog radio signala u frekvencijskom domenu 2,4 – 5 GHz i korelisanosti sa promenama komponenata geomagnetskog polja izazvanih Sunčevom

aktivnošću. Na kraju je izvršeno modelovanje jutarnjeg slabljenja prijemnog signala usmerene mikrotalasne radio komunikacije na nosećim frekvencijama od 2,4 do 5 GHz u funkciji od noseće frekvencije i relativnog vremena od trenutka izlaska Sunca i izvršena analiza promena nivoa radio signala poređenjem sa promenama meteoroloških parametara sredine u okviru koje je sproveden eksperiment.

Na kraju su, u poglavlju 7 dati zaključci dobijeni u ovoj disertaciji.

## **2. Uticaj kosmičkog vremena (*Space Weather*) na komunikacione sisteme**

Kosmičko vreme (*Space Weather*) se odnosi na sveobuhvatno istraživanje promenljivih uslova u okviru Sunčevog sistema, a prevashodno u blizini Zemlje sa pažnjom usmerenom ka efektima koje Sunce i ostala nebeska tela ostvaruju na Zemljinu termosferu, magnetosferu i jonosferu [5]. U ovom poglavlju će biti prikazani najdominantniji izvori zračenja na Suncu koji utiču na prostiranje radio talasa u Zemljinoj atmosferi, menjajući karakteristike sredine kroz koju se radio talas prostire.

Sunce je izvor različitog čestičnog i elektromagnetskog zračenja talasnih dužina u širokom opsegu. Oko 149,7 miliona kilometara je udaljeno od Zemlje, oko 333 hiljade puta veću masu od Zemlje, rotira sa periodom rotacije od 27 dana i gasovite je strukture (90% vodonik, 9% helijum i 1% ostali elementi) [6]. Uticaj koje Sunčevo zračenje ispoljava je od velikog značaja za brojne procese na Zemlji, a detekcije ovih efekata i predviđanje Sunčevih emisija su moguće zahvaljujući sve naprednijim tehnikama i mernim instrumentima. Čestične i elektromagnetske emisije različitih struktura, talasnih dužina i energetskih domena prate se konstantno najrazličitijom mernom opremom u svim oblastima ljudske delatnosti, a efekti koje Sunčevo zračenje ispoljava na komunikacione sisteme i njihov intenzitet mogu se neposredno i posredno detektovati i meriti različitim procedurama od kojih su neke primenjive i danas, dok su ostale koje više nisu u praktičnoj upotrebi dale svoj značajan doprinos razvoju globalnih komunikacionih sistema današnjice. Efekti koje Sunce ispoljava na Zemlju najvidljiviji su u promenama strukture jonosferskog sloja atmosfere (50-1000 km nadmorske visine) koji u vidu apsorbujućeg omotača štiti Zemlju od periodičnog i neperiodičnog zračenja sa Sunca i iz kosmosa.

### **2.1. Istorijski pregled istraživanja Sunčevog zračenja**

Istorijski posmatrano, razvitak tehnologija prikupljanja informacija o efektima Sunčevog zračenja na jonosferu započet je još 1928. godine radarskim merenjima u američkoj Pomorskoj istraživačkoj laboratoriji (*Naval Research Laboratory – NRL*), a zatim po završetku Drugog svetskog rata u istoj instituciji nastavljen je raketnim

merenjima na modifikovanim V2 raketama opremljenim uređajima za sondiranje jonosfere. Radio tehnika sondiranja jonosfere upotrebom disperzivno raspoređenih predajnika i prijemnika na Zemlji je intenzivno primenjivana u periodu izuzetno velike Sunčeve aktivnosti od 1954-1958. godine što je dovelo do razvoja jonosferskog modela [7] koji se sa uvedenim modifikacijama u istraživanjima koristi i danas. Lansiranjem aktivnih satelita – ruskog Sputnjika 1957. godine i američkog Vanguard-I 1958. godine započeo je period intenzivnog istraživanja karakteristika svih atmosferskih oblasti. Veliki broj LEO (*Low Earth Orbit*) satelita opremljenih VHF (*Very High Frequencies* – 30-300 MHz) radio farovima je lansiran u toku šezdesetih godina prošlog veka među kojima je za radio sondiranje jonosfere jedan od značajnijih bio Alouette sa promenljivom frekvencijom emitovanja u opsegu 0,5-11,5 MHz koji je omogućio merenje raspodele koncentracije elektrona u funkciji od geografske širine [8]. Prvi sateliti ekskluzivno namenjeni merenju Sunčevih aktivnosti bili su Solrad-1 do Solrad-11B koji su lansirani krajem sedamdesetih godina kako bi kontinuirano merili intenzitet X (0,01-10 nm) i Lajman- $\alpha$  (121,567 nm – Ly $\alpha$ ) spektralne linije zračenja pristiglog sa Sunca.

1978. godine je počelo formiranje NAVSTAR/GPS mreže satelita koja je pored svoje osnovne funkcije određivanja prostornog pozicioniranja objekata na Zemlji, omogućila i kontinuirano praćenje jonosferskih promena kroz pojave scintilacije (iznenadne promene indeksa refrakcije usled prostorne i vremenske promene homogenosti jonosfere) i totalnog elektronskog sadržaja (*Total Electron Content* – TEC) [9], [10] i [11]. Kasnije su se među ostalim sistemima, razvili i GLONASS – Ruski sistem za geografsko pozicioniranje i GALILEO – Projekat Evropske kosmičke agencije, čija se završna faza realizacije očekuje do početka 2020. godine [12] i [13].

Radio teleskopi širokog frekvencijskog opsega (*Frequency Agile Solar Radiotelescope* – FASR) pored detekovanja izvora radijacija u udaljenom kosmosu kontinuirano prate zračenja Sunca koja potiču iz njegovih različitih regija u širokom opsegu frekvencija [14] i [15]. Ova posmatranja, kao i korelacija sa ostalim merenjima (satelitskim i zemaljskim) dovodi kako do bolje interpretacije nastanka pojedinih pojava koje dovode do iznenadnog neperiodičnog zračenja sa Sunca, tako i do uticaja na Zemljinu atmosferu i posledično na zemaljske komunikacione sisteme.

Marta 2013. godine je uz internacionalano angažovanje astronomskih agencija zvanično pušten u rad ALMA (*Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array*) radio interferometar koji će u godinama koje dolaze biti u mogućnosti da pomoću antenskog niza od 66 antena vrši kontinuirano merenje kosmičkih aktivnosti u opsegu frekvencija od 31 do 950 GHz pokrivajući 73 % neba severne hemisfere i 87 % celokupnog vidljivog neba [15]. Podaci snimani kontinuirano i obrađivani brzinom od 6,3 Tb/s će omogućiti izuzetan napredak u oblasti razumevanja interplanetarnih procesa interakcije i dublje ulaženje u suštinu interplanetarne strukture materije, aktivnosti Sunca i ostalih nebeskih tela, kao i uzročno-posledičnih efekata zračenja.

Navedenim mernim tehnikama prikupljaju se informacije o aktivnostima ne samo na Suncu kao najbližeg izvora, već i u udaljenim galaskijama koje su više od milijarde svetlosnih godina udaljene od Zemlje [16]. Razvoj merenja Sunčevih i kosmičkih emisija je usmeren u pravcu proširenja opsega posmatranog frekvencijskog spektra i prostorne pokrivenosti koja bi omogućila neprekidno praćenje aktivnosti koje dovode do promena karakteristika prostiranja radio talasa u Zemljinj atmosferi. Iako se u poslednjim decenijama došlo do ogromnog napretka u razumevanju procesa interakcije između Sunca i Zemlje zahvaljujući pretežno razvoju tehnologije na bazi teorijskih istraživanja naučnika i istraživačkih grupa širom sveta, ostaje još mnogo neotkrivenih pojava koje direktno ili posredno utiču na radio prostiranje komunikacionih signala.

### 2.2. Efekti Sunčevih zračenja u jonosferi

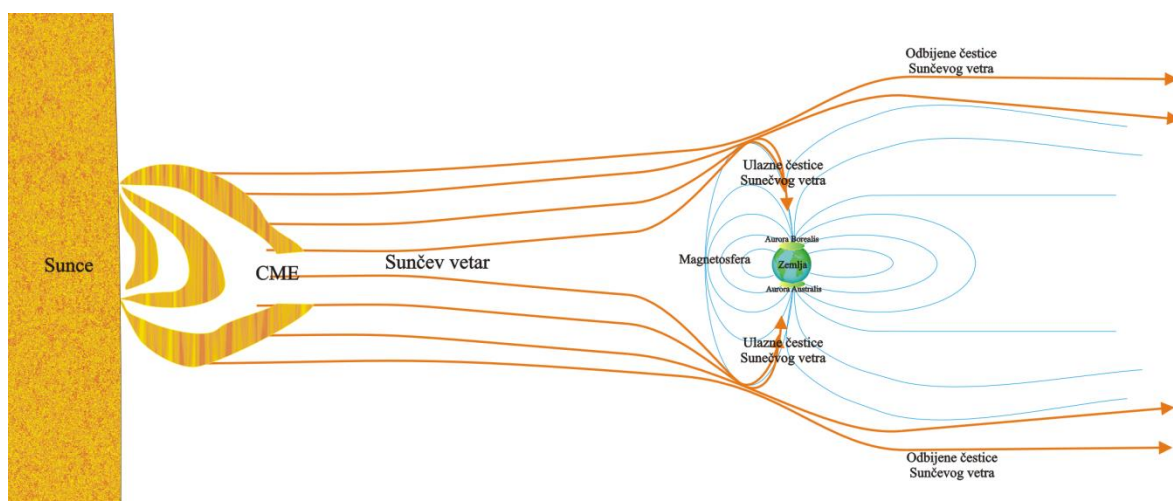
Pored kontinuiranog zračenja sa Sunca, čiji se intenzitet periodično menja tokom Sunčevog ciklusa, veliki uticaj na jonosferu imaju i iznenadna neperiodična Sunčeva elektromagnetska i čestična zračenja koja se u široj naučnoj literaturi nazivaju Sunčevim erupcijama (*Solar Bursts*) [14]. Ove Sunčeve erupcije se najčešće javljaju u vidu izbacivanja koronarne mase (*Coronal Mass Ejections* – CME) i elektromagnetskih erupcija – Sunčevih flerova. Broj Sunčevih erupcija u jednoj Sunčevoj rotaciji (*NF*) se dovodi u vezu sa srednjim brojem Sunčevih pega (*R*) [17]:

$$NF = a(R - 10), \quad (2.1)$$

gde je *a* konstanta u opsegu od 1,5 do 2.

### 2.2.1. Čestična zračenja

U toku Sunčevih erupcija se oslobađa ogromna količina čestičnog materijala u vidu koronarnog izbacivanja mase (CME) koje je neraskidivo povezano sa pojavom flerova. Erupcije ovih energetskih čestica, ukoliko je front Sunčevog vetra okrenut ka Zemlji, dovode do tzv. geomagnetskih oluja (intenzivnih poremećaja geomagnetskog polja), kao i do interakcije između struje ovih čestica (Birkelendova struja) koja može dostizati vrednost od  $10^6$  A i dela jonosfere iznad polova na nadmorskim visinama između 90 i 1000 km što može proizvesti poremećaje u radu satelita koji orbitiraju na nižim nadmorskim visinama [18].



Sl. 2-1: Zemljina magnetosfera i Sunčev vetar.

Zemljina magnetosfera se prilikom pojave Sunčevog vetra ponaša kao apsorbujući štit koji preusmerava energetske čestice duž linija geomagnetskog polja dalje u kosmos i ka Zemljinim magnetskim polovima (Sl. 2-1). Prilikom ove interakcije se deo čestica zadržava u okviru gornjeg dela atmosfere iznad magnetskih polova čime u krugu od oko 3000 km pojavljuje vidljiva polarna svetlost (aurora). Talasna dužina emitovanog zračenja usled energetske interakcije između pristiglih čestica i čestica koje čine Zemljinu atmosferu zavisi od sastava konkretnih oblasti atmosfere – jonizacijom kiseonika se pojavljuje zelena (557,7 nm) i crvena (630 nm), a azota narandžasto-crvena (600 – 700 nm) boja.

Erupcije čestičnih zračenja imaju znatno jači uticaj u visokoj, nego u niskoj jonosferi. Na nižim jonosferskim visinama znatnu ulogu ima geografska lokacija. Naime, savijene linije geomagnetskog polja omogućavaju prodiranje naelektrisanih čestica dublje u oblast oko Zemljinih polova. Na srednjim geografskim širinama koje su od značaja za analizu prikazanoj u ovoj disertaciji, efekti čestičnih upada usled CME nisu izraženi. Iz tog razloga, njihov uticaj nije razmatran u nastavku rada.

### 2.2.2. Elektromagnetska zračenja

Za razliku od čestičnih erupcija, uticaj elektromagnetskog zračenja sa Sunca je uočljiv na svim geografskim lokacijama koje se nalaze na osunčanoj strani atmosfere. Praktično, ono uzrokuje postojanje E i D sloja tokom dana i razdvajanje F sloja na podslojeve F1 i F2.

Elektromagnetsko zračenje sa Sunca se nalazi u širokom frekvencijskom spektru. S obzirom na frekvencijske opsege u kojima je raspodeljena najveća spektralna gustina snage (do nekoliko stotina MHz), u skladu sa intenzitetom zračenja koja prilikom njihovih pojava nastaje, erupcije se mogu klasifikovati u pet kategorija [19], [20] i [21] (Tab. 2-1). Najveći uticaj na komunikacione sisteme ispoljavaju erupcije tipa 2, 3 i 4.

Tab. 2-1: Pregled elektromagnetskih Sunčevih erupcija.

| Tip Sunčeve erupcije | Karakteristike                                                                                                                                                           | Trajanje                                                     | Frekvencijski opseg |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1                    | Kratkotrajne, uskopojasne erupcije koje neprekidno nastaju u velikom broju                                                                                               | Jedna erupcija ~ 1 sekunda,<br>Sunčeva oluja ~ nekoliko dana | 80 – 200 MHz        |
| 2                    | Frekvencijski sporopromenljive erupcije koje vrlo često sadrže intenzivnije komponente na drugom harmoniku                                                               | 3 – 30 minuta                                                | 20 – 150 MHz        |
| 3                    | Frekvencijski brzopromenljive erupcije, često sa neprekidnom raspodelom snage, koje nastupaju pojedinačno, u grupama ili olujama, a mogu biti praćene emisijom na drugom | Jedna erupcija: 1 – 3 sekunde,<br>Grupa: 1 – 5 minuta        | 10 kHz – 1 GHz      |

## 2. Uticaj kosmičkog vremena (*Space Weather*) na komunikacione sisteme

|   |                                                                                                                                      |                                                      |                |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------|
|   | harmoniku                                                                                                                            | Sunčeva oluja:<br>nekoliko minuta<br>– nekoliko sati |                |
| 4 | <b>Stacionarni:</b> sa finom neprekidnom raspodelom snage u celokupnom frekvencijskom opsegu                                         | nekoliko sati – nekoliko dana                        | 20 MHz – 2 GHz |
|   | <b>Pokretni:</b> Širokopojasni, sporopromenljivi po frekvenciji, sa neprekidnom raspodelom snage u celokupnom frekvencijskom opsegu  | 30 minuta – 2 sata                                   | 20 – 400 MHz   |
|   | <b>Neprekidni flerovi (<i>Flare Continua</i>):</b> Širokopojasni, sa neprekidnom raspodelom snage u celokupnom frekvencijskom opsegu | 3 – 45 minuta                                        | 25 – 200 MHz   |
| 5 | Kratkotrajni, sa neprekidnom raspodelom snage, ne identifikuju se samostalno, već kao nastavak nekih erupcija tipa 3                 | 1 – 3 minuta                                         | 10 – 200 MHz   |

Uticaj pojedinih spektralnih domena je različit na različitim jonosferskim lokacijama. Elektromagnetske sunčeve erupcije navedene u Tab. 2-1 nemaju dominantan uticaj na D-sloj jonosfere, a osnovni izvori poremećaja ovog dela jonosfere mogu se svrstati u dve kategorije. Prvo, tokom mirnog stanja Sunca vodonikova Ly $\alpha$  linija je najizraženija za proizvodnju elektrona i predstavlja dominantan izvor jonizacije na nadmorskim visinama oko 70 km. U drugom slučaju, kada je Sunce aktivno, najznačajniji uticaj na jonizovanu sredinu niske jonosfere ima X-zračenje tokom Sunčevih X-flerova.

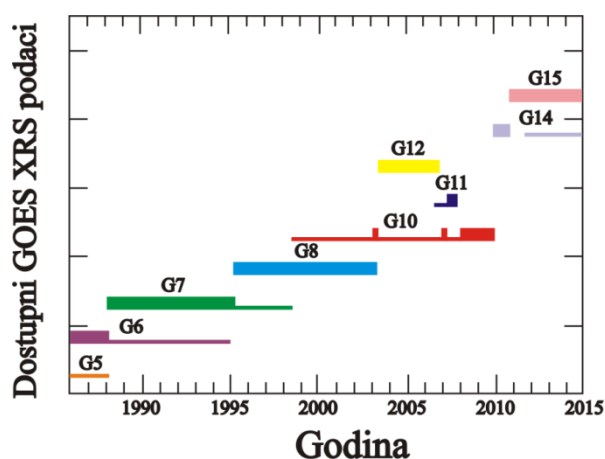
Flerovi izazivaju kratkotrajne jonosferske poremećaje (*Sudden Ionospheric Disturbances* – SIDs) koji će biti opisani u 4. poglavlju i vrlo su tesno povezani po izvoru nastanka sa mnoštvom procesa koji se odigravaju u okviru Sunčeve korone, kao na primer brojem Sunčevih pega sa kojima se može ustanoviti neposredna korelacija. Flerovi se učestalije pojavljuju sa povećanim brojem Sunčevih pega u periodičnim ciklusima od 11 godina, a traju od par minuta do par sati.

Sunčevi flerovi X-opsega koji će sa aspekta uticaja na fizičko-hemijske osobine D-sloja jonosfere biti najviše analizirani u nastavku rada, mogu se u klasifikovati u klase prikazane u Tab. 2-2 na osnovu gustine snage zračenja u opsegu 1-8 Å<sup>1</sup>.

Tab. 2-2: Klasifikacija Sunčevih flerova X-opsega.

| Klasa flera | Gustina snage u domenu 1-8 Å (W/m <sup>2</sup> ) |
|-------------|--------------------------------------------------|
| X           | $>10^{-4}$                                       |
| M           | $10^{-5} \sim 10^{-4}$                           |
| C           | $10^{-6} \sim 10^{-5}$                           |
| B           | $10^{-7} \sim 10^{-6}$                           |
| A           | $<10^{-7}$                                       |

Merenje fluksa zračenja u opsegu frekvencija X-zračenja kontinuirano se sprovodi od 1974. godine XRS senzorima (*X-Ray Sensors*) na aktivnim GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) satelitima. Sateliti su opremljeni sa dve vrste XRS senzora – za merenje fluksa X-zračenja u talasnom opsegu od 0,5-4 Å i u opsegu od 1-8 Å. Na Sl. 2-2 su širokom linijom predstavljeni primarni GOES-5 – GOES15 (G5-G15) sateliti, a uskom linijom sekundarni sateliti koji su u prikazanom periodu pružali podatke o merenom fluksu zračenja u navedenim opsezima X-zračenja. Detaljno objašnjenje principa rada, tačnosti i tehnički podaci XRS senzora dati su u [22] i [23].



Sl. 2-2: Dostupnost izmerenih vrednosti fluksa u X-opsegu talasnih dužina (1986-2015.).

<sup>1</sup> 1 Å (angstrom) = 0,1 nm

Za potrebe istraživanja prikazanom u ovoj disertaciji su korišćeni podaci sa GOES-14 i GOES-15 geostacionarnih satelita Nacionalne okeanografske i atmosferske agencije Sjedinjenih Američkih Država (*National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA, USA).

### **2.3. Efekti Sunčevih zračenja na komunikacione sisteme**

Nije neophodno navoditi sve aspekte ljudskog života u kojima se osete efekti Sunčevog zračenja. U krajnjoj liniji, život na Zemlji ne bi ni bio moguć da nije Sunčevog zračenja u doslovno svim frekvencijskim domenima, s obzirom na efekte koje energija u tim domenima proizvodi na Zemljinu magnetosferu, atmosferu, litosferu i celokupan živi svet. Neizostavno je i tehnologija podložna uticaju Sunčevih zračenja, a efekti su vidljiviji kako tehnološka rešenja vremenom postaju složenija, među kojima komunikacioni sistemi nisu izuzetak.

#### **2.3.1. Istorijski pregled detektovanih efekata Sunčevog zračenja na komunikacione sisteme**

Razvitak i implementacija telegrafskih sistema za razmenu informacija započeo je tridesetih godina 19. veka zahvaljujući Semjuelu F. B. Morzeu (*Samuel Finley Breese Morse* – 1791-1872). Vrlo brzo potom se zahvaljujući tada još nesagledivom praktičnom značaju, telegrafski sistem u vidu mreže počeo širiti kroz Evropu i istok SAD. Zahvatajući sve veće geografske prostore, ova telegrafska mreža postajala je sve složenija i podložnija različitim vrstama anomalija u toku kablovskog prenosa, od kojih je jednu za to vreme nesvakidašnju pojavu ustanovio 1849. godine W.H. Barlow (*William Henry Barlow* – 1812-1902), telegrafski inženjer. On je primetio zavisnost između vidljivosti polarne svetlosti Aurore Borealis i otklona igle galvanometra kod formiranog telegrafskog kablovskog sistema čime je praktično ustanovio uticaj promena Sunčevog zračenja kao najopštijeg pojma i dodatno indukovane struje u telegrafskim kablovima usled promena geomagnetskog polja. Ovaj vid posredno indukovane smetnje samo je jedan od efekata Sunčevog zračenja na sisteme zasnovane na dugim provodnim elementima (telekomunikacioni, elektro-energetski, gasovodi, naftovodi...)

Nakon uspešno sprovedenih eksperimenata upotrebe i prektične primene radio talasa za daljinsku kontrolu koje je 1898. godine sproveo Nikola Tesla (1856-1943), 1901. godine je uspostavljena transatlanska radio komunikacija koja je dovela do razmene informacije na do tada najvećoj udaljenosti između Poldhu Station, Cornwall i St. John's, Newfoundland. Ova radio komunikacija je bila omogućena postojanjem reflektujuće oblasti u atmosferi – jonosfere. 1928. godine je Markoni (*Guglielmo Marconi* – 1874-1937), tvorac ove bežične komunikacije za koju je 1909. godine dobio Nobelovu nagradu, doveo u vezu iščezavanje radio signala na mestu prijema (feding), smetnje na kablovskim linijama i broj Sunčevih pega. Istraživanja uticaja jonosferskog prostiranja započela su 1925. godine zahvaljujući naučnicima Breit, Tuve, Eplton i Barnet (*Gregory Breit* – 1899-1981, *Merle Antony Tuve* – 1901-1982, *Edward Victor Appleton* – 1892-1965, *Miles Aylmer Fulton Barnett* – 1901-1979) kada je ustanovljena veza između fizičkih karakteristika plazme jonosfere i kvaliteta ostvarenja radio komunikacije. S obzirom na ustanovljen periodični jedanaestogodišnji ciklus Sunčevih aktivnosti numerički određen brojem Sunčevih pega [24] i [25], za pojedine frekvencijske opsege u kojima se ostvaruju zemaljske radio-komunikacije, moguće je ustanoviti preciznu periodičnu doslednost u promeni nivoa snage signala na mestu prijema [26].

U zavisnosti od frekvencijskog opsega koji se koristi za prenos informacije, dominantnu „smetnju“ koja potiče od efekata kosmičkog vremena na tehničke sisteme predstavljaju pojave navedene u Tab. 2-3 [27].

Tab. 2-3: Pregled uticaja pojava kosmičkog vremena na tehničke sisteme.

| Frekvencijski opseg | Pojava                                     | Uticaj                                | Sistem                                                                                             |
|---------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0-1 MHz             | Mikrometeoriti i fizički elementi          | Fizičko oštećenje                     | Solarne ćelije, satelitski elementi                                                                |
|                     | Varijacija komponenata geomagnetskog polja | Direktan uticaj                       | Kompasi, instrumenti za navigaciju i kontrolu visine kod letelica                                  |
|                     |                                            | Indukovana električna struja u zemlji | Prenosni i distributivni sistemi električne energije, dugi bakarni komunikacioni kablovi, cevovodi |

|               |                                   |                                                                                    |                                                                   |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1 MHz – 1 GHz | Varijacija stanja jonosfere       | Refrakcija, slabljenje jačine elektromagnetskog polja radio talasa                 | Bežični komunikacioni sistemi                                     |
|               |                                   | Interferencija i scintilacija delova sredine prostiranja                           | Komunikacioni sateliti, instrumenti za geofizička istraživanja    |
| 1 GHz i više  | Iznenadne radio emisije (flerovi) | Dodatni šum u radio frekvencijskom opsegu                                          | Bežične radio komunikacije, radarski sistemi, GPS prijemnici      |
|               | Čestična radijacija               | Oštećenja opreme i osoblja kosmičkih i zemaljskih letelica                         | Solarne ćelije, elektronska oprema, astronauti i avionski putnici |
|               | Promene u atmosferi               | Slabljenje i refrakcija usled promene dielektričnih karakteristika sredine prenosa | Bežični komunikacioni sistemi                                     |

### 2.3.2. Radio-komunikacioni sistemi pod uticajem pojava u kosmosu

Kosmičkim vremenom (*Space Weather*) se uopšteno može smatrati skup različitih uslova koji čine stanja na Suncu, u Zemljinoj magnetosferi, jonosferi i termosferi i efekti Sunčevog vetra koji vrše direktan uticaj na jonosferu, menjajući joj karakteristike [17]. Kosmičkog vremena se sa aspekta koji se odnosi na telekomunikacione sisteme na Zemlji može se definisati kao skup uslova koji vladaju na Suncu i u Sunčevom vetru, magnetosferi, jonosferi i termosferi, a koji imaju uticaja na kvalitet i pouzdanost kosmičkih i zemaljskih tehničkih (tehnoloških) sistema i mogu negativno uticati na ljudske živote i zdravlje [28].

Sa aspekta radio komunikacionih sistema, uticaj kosmičkog vremena se najupečatljivije manifestuje kroz uticaj na jonosferu. Promene jonosfere mogu dejstvovati dvojako:

- pozitivno – utičući povoljno na radio prenos omogućavajući uslugu za koju su namenjeni (npr. HF radio komunikacije) ili

- negativno – opstruirajući komunikaciju kroz promenu karakteristika radio talasa i povećavanjem kašnjenja kod satelitskih navigacionih sistema u ultra visokom (*Ultra High Frequencies* – UHF (0,3-3 GHz)) frekvencijskom opsegu.

U Tab. 2-4 su prikazani sistemi razvrstani u ove dve kategorije [17].

Tab. 2-4: Zavisnost radio sistema od jonosfere.

| Radio sistemi čija funkcionalnost zavisi od jonosfere                                    | Radio sistemi kod kojih jonosfera negativno utiče na prostiranje radio talasa |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| VLF-LF komunikacioni i navigacioni sistemi                                               | Satelitske komunikacije                                                       |
| MF komunikacioni sistemi                                                                 | Satelitska navigacija (npr. GPS i GLONASS)                                    |
| HF komunikacioni sistemi                                                                 | Satelitsko radarsko osmatranje                                                |
| HF radio difuzija                                                                        | Zemaljsko radarsko osmatranje i praćenje                                      |
| OTHR ( <i>Over The Horizon Radar</i> ) sistemi                                           | Komunikacije zasnovane na meteorskoj difrakciji                               |
| HFDF (High Frequency Direction Finding) i HF SIGINT (High Frequency Signal Intelligence) | Svaki drugi sistem kod kojeg postoji negativan jonosferski uticaj             |

Najznačajniji jonosferski uticaji na satelitske komunikacije mogu biti ispoljeni kroz [29]:

- Faradejevu rotaciju (promena polarizacije radio talasa) koja nastaje usled promene izotropnosti jonizovane sredine. Ovaj poremećaj u raspodeli čestica sredine nastaje zbog uticaja promena geomagnetskog polja. Vrednost ugla rotacije u polarizaciji radio talasa se može izraziti kroz:

$$\theta = 2,36 \cdot 10^2 B_m N_T f^{-2} \text{ [rad]}, \quad (2.2)$$

gde je  $\theta$  ugao rotacije,  $B_m$  [T] je vrednost intenziteta geomagnetskog polja,  $f$  [Hz] je frekvencija radio talasa, a  $N_T$  [el/m<sup>2</sup>] je vrednost totalnog elektronskog sadržaja (TEC).

- grupno kašnjenje radio signala frekvencije  $f$  [Hz] nastaje zbog naelektrisanih čestica jonosfere koje u skladu sa totalnim elektronskim sadržajem  $N_T$  [el/m<sup>2</sup>] i posledičnom promenom prividne dielektrične konstante (detajnije objašnjena u 3.

poglavlju) utiču na kašnjenje u prostiranju radio signala čija se vrednost  $t$  može izraziti kroz:

$$t = 1,345 \cdot 10^{-7} N_T f^{-2} \text{ [s]}. \quad (2.3)$$

- iznenadna promene indeksa refrakcije usled prostorne i vremenske promene homogenosti jonosfere (scintilacija) koja negativno utiče na amplitudu, fazu i ugao pristizanja radio talasa.

Dominantan uticaj na prostiranje satelitskih signala ima F-sloj jonosfere zbog najveće elektronske koncentracije. Međutim, istraživanja pokazuju da se prilikom intenzivnih Sunčevih flerova visina maksimalnih vrednosti elektronske koncentracije smanjuje i da se može se spustiti u E-sloj [30]. Uticaj D-sloja na prostiranje satelitskih signala je praktično zanemarljiv u mirnom stanju jonosfere, međutim za precizna merenja se u analizu mora uključiti i D-sloj u toku trajanja X-flera [3].

### **3. Prostiranje elektromagnetskih talasa kroz nejonizovanu i jonizovanu sredinu**

Svojstva sredine kroz koju se radio talas prostire su u praktičnim uslovima podložna delovanju mnogih činilaca, pa i samog radio talasa. Struktura atmosfere, bez obzira da li se posmatra na makro ili mikroskopskom nivou je složen sistem u kojem se vrši intenzivna razmena energije koja dovodi do promene strukturnih i elektromagnetskih karakteristika posmatranog prostora. Izvori fotona i čestica koji dovode do promene svojstava sredine ili interferiraju sa „korisnom“ energijom radio talasa, mogu poticati iz mnoštva različitih prirodnih izvora od kojih najintenzivnije deluje Sunce.

S obzirom na to da je glavni predmet istraživanja predstavljen u disertaciji prostiranje radio talasa pod uticajem intenzivnog Sunčevog zračenja na bazi merenja dobijenih putem radio talasa koji su u toku prostiranja bili podložni promenama sredine propagacije, u ovom poglavlju su zasebno iz literature sublimirane glavne postavke fenomena koji se odnose na prostiranje radio talasa u nejonizovanoj i jonizovanoj sredini. Za sveobuhvatnost istraživanja čiji su rezultati predstavljeni neophodno je bilo proučiti kako teorije koje tretiraju prostiranje elektromagnetskog talasa kroz različite sredine bazirane na talasnom fenomenu koji se prostire kroz korpuskularnu homogenu i izotropnu sredinu zbog prostorne analize i predstave jačine elektromagnetskog polja, tako i dualnu korpuskularno-talasnu teoriju radi potpunog razumevanja fizičke osnove pojava koje se dešavaju u sredini u kojoj se prenosi energija elektromagnetskog talasa.

Neke od teorija i relacija koje su prikazane i izvedene na narednim stranama su kasnije korišćene za modelovanje prostiranja radio talasa pod specifičnim uslovima kada je sredina pod uticajem Sunčevog zračenja, dok ostale predstavljaju osnovu za buduće istraživanje i poboljšanje preciznosti razvijenih modela.

#### **3.1. Karakteristike prostiranja elektromagnetskih talasa kroz homogenu, izotropnu, neprovodnu sredinu bez izvora polja**

Da bi se razumela suština fizičkih procesa prostiranja elektromagnetske energije nastale u jednoj tački prostora, potrebno je poznavati principe klasične i moderne fizike

kao svojevrsnog integralnog znanja nastalog zahvaljujući vizionarstvu i genijalnosti brojnih naučnika koji su se pitali isto – koje je to svojstvo materije koje može prenositi elektromagnetsku energiju?

Ovo pitanje je istorijski poniklo od toga da se o strukturi materije nije znalo mnogo, pa je sredina kroz koju je moguće bilo prenositi efekat elektromagnetske indukcije, kojom se na bazi istraživanja Ersteda (*Hans Christian Ørsted* – 1777-1871) i Ampera (*André-Marie Ampère* – 1775-1836) Faradej (*Michael Faraday* – 1791-1867) najviše bavio, počinjala da se u suprotnosti sa dotadašnjim dominantnim stavom iz treće četvrtine 19. veka kao kontinualnim etrom koji je omogućavao „delovanje na daljinu“, tretira kao korpuskularna „elektrotonična“ sredina. U vreme kada je Faradej genijalno sprovodio svoja uspešna istraživanja nije se znalo koje su to čestice koje su zaslužne za formiranje struje kao izvora elektromagnetskog polja. Princip i pojam elektromagnetskog polja koje predstavlja vid fizičkog polja kao oblika kretanja materije uveo je upravo Faradej, dok je na bazi njegovog teorijskog i eksperimentalnog istraživanja Maksvel (*James Clerk Maxwell* – 1831-1879) vizionarski opisao elektromagnetsko polje kroz čuveni set „Maksvelovih jednačina“. Zaprepašćujuće je koliko je revoluciju najpre u teorijskoj fizici, a kasnije u primenjenoj elektromagnetici Maksvel proizveo opisujući efekte čiju fizičku osnovu ni sam nije poznao, ali je instinktivno naslućivao. Kasnijim revolucionarnim teorijama kao što su Lorencova (*Hendrik Antoon Lorentz* – 1853-1928) „Elektronska teorija“, Plankova (*Max Karl Ernst Ludwig Planck* – 1858-1947) i Hajzenbergova (*Werner Karl Heisenberg* – 1901-1976) „Kvantna mehanika“ i Ajnštajnova (*Albert Einstein* – 1879-1955) „Opšta teorija relativnosti“ razmatranja elektromagnetskog polja prodirala su u suštinu pojave, pružajući inicijalno formiranim Faradejevim učenjima i Maksvelovim relacijama prostora da budu skoro savršeno tačni u makroskopskim dimenzijama. Iako se princip prenosa energije i sile po modernim shvatanjima proisteklim iz značajno razvijene kvantne teorije svodi na delovanje fotona kao nosilaca elektromagnetske energije kroz sredine različitih sastava, u obrazlaganju fenomena koji utiču na prostiranje radio talasa u ovom radu će analiza biti vršena upravo Maksvelovim principima koji i dalje za praktične primene u radio-komunikacionim frekvencijskim opsezima na makroskopskom nivou daju tačne i primenjive rezultate. Nesavršenost makroskopske analize uviđa se tek kada se

analiza svede na teoriju kvantne elektrodinamike gde se pojave mogu „predviđati“ u skladu sa verovatnoćom događaja emisije i apsorpcije energije fotona [31].

Posledice nastanka intenzivnih elektromagnetsko-čestičnih Sunčevih emisija odražavaju se na materiju i dinamičke fizičke procese na Zemlji i u njenoj atmosferi. Uzimajući u obzir uticaj površinskog sloja atmosfere na prostiranje radio talasa i uticaj jonizovane sredine D-sloja jonosfere, proces prostiranja radio talasa će u ovom poglavlju odvojeno biti razmatran za nejonizovane i jonizovane sredine radi što kompletnijeg uvida u efekte koje Sunčeve aktivnosti ispoljavaju na pojavu prenosa elektromagnetske energije.

#### 3.1.1. Osnovne postavke prostiranja radio talasa

Analiza prostiranja elektromagnetskog talasa u sredini prostiranja sa fizičkim karakteristikama izraženim kroz dielektičnu konstantu (permitivnost)  $\epsilon$ , specifičnu provodnost  $\sigma$  i magnetsku konstantu (permeabilnost)  $\mu$  svodi se na rešavanje Maksvelovih jednačina na elementarnoj zapremini  $dv$ , površini  $ds$  i konturi  $dl$ . Ovakvo razmatranje elektromagnetskog polja omogućava analizu u skladu sa teorijom efekata koje radio talas proizvodi na korpuskularnu sredinu. U Tab. 3-1 prikazani su Maksvelovi postulati u integralnom i diferencijalnom obliku.

Tab. 3-1: Maksvelove jednačine u integralnom i diferencijalnom obliku.

| Integralni oblik                                                                                          |                                            | Diferencijalni oblik                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_v q dv$                                                                  | Gausov zakon električnog fluksa            | $\text{div} \vec{D} = q$                                             |
| $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$                                                                            | Gausov zakon magnetizma                    | $\text{div} \vec{B} = 0$                                             |
| $\oint_C \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$                        | Faradejev zakon elektromagnetske indukcije | $\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$         |
| $\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \int_s \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$ | Amperov zakon                              | $\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ |
| $\oint_s \vec{J} d\vec{S} = - \int_v \frac{\partial q}{\partial t} dv$                                    | Jednačina kontinuiteta                     | $\text{div} \vec{J} = - \frac{\partial q}{\partial t}$               |

### 3. Prostiranje elektromagnetskih talasa kroz nejonizovanu i jonizovanu sredinu

|                                                                  |                                                  |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $\vec{J}$ – vektor gustine električne struje [A/m <sup>2</sup> ] | $\vec{B}$ – vektor magnetske indukcije [T]       |
| $\vec{E}$ – vektor jačine električnog polja [V/m]                | $q$ – gustina naelektrisanja [C/m <sup>3</sup> ] |
| $\vec{H}$ – vektor jačine magnetskog polja [A/m]                 | $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$      |
| $\vec{D}$ – vektor električne indukcije [C/m <sup>2</sup> ]      | $\mu = \mu_0 \mu_r$                              |

U međunarodnom sistemu jedinica su vrednosti električne permitivnosti i magnetske permeabilnosti u vakuumu:

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= 8,854 \cdot 10^{12} \frac{F}{m} \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Uzimajući da je  $\vec{J} = (\sigma + j\varepsilon\omega)\vec{E}$ ,  $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$ ,  $\vec{B} = \mu\vec{H}$  i  $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ , pri čemu je  $k$  propagacioni koeficijent, a elektromagnetski talas sinusoidalnog ugaone frekvencije  $\omega$ , skup jednačina iz Tab. 3-1 se može napisati u obliku:

$$\begin{aligned}\text{rot}\vec{E} &= -j\mu\omega\vec{H} \\ \text{rot}\vec{H} &= (\sigma + j\varepsilon\omega)\vec{E} \\ \text{rot}(\text{rot}\vec{E}) &= \text{grad}(\text{div}\vec{E}) - \nabla^2\vec{E} = -\nabla^2\vec{E} = -j\mu\omega(\sigma + j\varepsilon\omega)\vec{E} \\ \text{div}(\text{grad}\vec{E}) &= j\mu\omega(\sigma + j\varepsilon\omega)\vec{E} \\ \nabla^2\vec{E} &= -k^2\vec{E}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Upotrebom ovih jednačina u sredini bez slobodnih naelektrisanja i struja se dolazi do Helmholtzovih (Helmholtz) parcijalnih diferencijalnih jednačina drugog reda električnog i magnetskog polja:

$$\begin{aligned}\nabla^2\vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \Rightarrow \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = \frac{c^2}{\varepsilon} \nabla^2\vec{E} \\ \nabla^2\vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} &= 0 \Rightarrow \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} = \frac{c^2}{\varepsilon} \nabla^2\vec{H}.\end{aligned}\tag{3.3}$$

Iz izraza (3.3), u kompleksnom domenu i slobodnom prostoru, radio talas se može predstaviti u funkciji vremena i prostornih koordinata relacijama:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_0 \cdot e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}_0 \cdot e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})},\end{aligned}\tag{3.4}$$

gde je u opštem slučaju:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= x \cdot \vec{i}_x + y \cdot \vec{i}_y + z \cdot \vec{i}_z \\ \vec{k} &= k_x \cdot \vec{i}_x + k_y \cdot \vec{i}_y + k_z \cdot \vec{i}_z.\end{aligned}\tag{3.5}$$

Na osnovu Tab. 3-1, uzimajući u obzir pretpostavku prostiranja elektromagnetskog talasa kroz vakuum ( $\epsilon_r=1$ ) koji predstavlja dielektričnu sredinu bez slobodnih električnih struja i naelektrisanja ( $\vec{J} = 0$ ,  $q = 0$ ), sa linearnom permitivnošću  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  i relativnom magnetskom permeabilnošću  $\mu_r = 1$  ( $\vec{H} = \vec{B}$ ), kao i to da je  $\text{div} \vec{E} = 0$  mogu se dobiti relacije koje definišu električnu i magnetsku komponentu elektromagnetskog talasa u diferencijalnom obliku (Tab. 3-2).

Tab. 3-2: Maksimalne jednačine u diferencijalnom obliku za vakuum.

|                                                                                               |                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $\text{div} \vec{E} = \nabla \cdot \vec{E} = q$                                               | Gausov zakon električnog fluksa            |
| $\text{div} \vec{H} = \nabla \cdot \vec{H} = 0$                                               | Gausov zakon magnetizma                    |
| $\text{rot} \vec{E} = \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$     | Faradejev zakon elektromagnetske indukcije |
| $\text{rot} \vec{H} = \nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ | Amperov zakon                              |
| $\text{div} \vec{J} = 0$                                                                      | Jednačina kontinuiteta                     |

Ovakav vid analize koji se bazira na elektromagnetskom polju kao nosiocu energije elektromagnetskog talasa omogućava da se u bilo kojoj tački prostora odredi vektor jačine električnog i magnetskog polja promenljivih u vremenu koji se kreću kroz prostor brzinom  $c_0$  [m/s]:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8.\tag{3.6}$$

#### 3.1.2. Prostiranje ravanskog radio talasa

Postojanje elektromagnetskog polja na velikoj udaljenosti od izvora inicijalno je prouzrokovano naelektrisanjima i njihovim strujama indukovanim u antenskom sistemu predajnika. Ovo polje se u vidu talasa (obliku kretanja materije – Faradej-Maksvelove ideje i učenja [32]) prostire kroz najčešće nehomogen i anizotropan medijum prenosa i može postojati i nakon nestanka izvora – primarnog uzroka nastanka. Radio talas se može smatrati ravanskim u dalekom polju od antene na udaljenosti (Fraunhoferova udaljenost) koja se definiše kao:

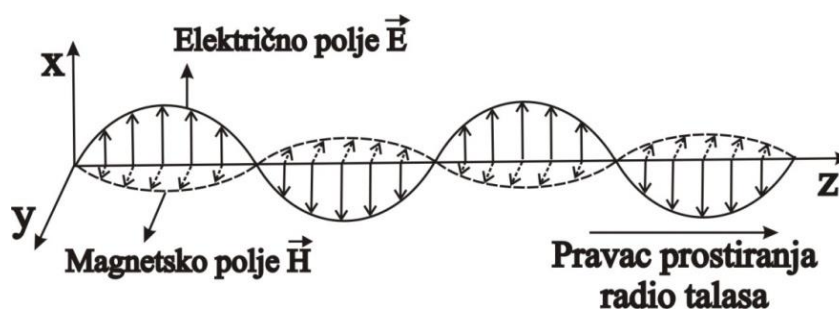
$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3.7)$$

gde  $D$  predstavlja dimenziju najvećeg radijatora antenskog sistema ili prečnik antene, dok je  $\lambda$  talasna dužina emitovanog radio talasa. Ovaj uslov važi za dimenzije antena koje su veće od vrednosti polovine talasne dužine emitovanog radio talasa [33].

Na ovako definisanoj razdaljini od antene, pravac prostiranja se vizualno može predstaviti u Dekartovom sistemu kao vektorski proizvod vektora jačine električnog ( $\vec{E}$ ) i vektora jačine magnetskog ( $\vec{H}$ ) polja koji su prostorno pomereni pod uglom od  $\pi/2$  u odnosu jedan na drugog i u vektorskom proizvodu daju karakteristiku toka elektromagnetske energije u vidu Pointingovog vektora ( $\vec{P}$ ) koji je po prirodi snaga radio talasa po jedinici površine:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (3.8)$$

Smer prostiranja elektromagnetske energije vertikalno polarizovanog ravanskog talasa čija je količina prenešene energije jednaka intenzitetu vektora  $\vec{P}$  je u ovom slučaju u pravcu z ose (Sl. 3-1) i predstavlja funkciju vremena i jedne Dekartove koordinate (u prikazanom slučaju koordinate z).



Sl. 3-1: Prostiranje radio talasa u Dekartovom koordinatnom sistemu.

Praktična analiza prostiranja elektromagnetske energije u prostoru u daljoj analizi svešće se na pojednostavljen slučaj ravanskog sinusoidalnog radio talasa koji se u vremenu i prostoru može predstaviti fazorskom formulom kod koje  $\omega$  predstavlja ugaonu frekvenciju talasa, a  $t$  vreme:

$$e(t, x, y, z) = \text{Re}[E(x, y, z) \cdot e^{j\omega t}] \quad (3.9)$$

Direktne praktične aplikacije Maksvelovih jednačina za dobijanje rešenja svode se na pojednostavljenu analizu ravanskih prostoperiodičnih talasa kod kojih su parcijalni izvodi komponentata vektora  $x$  i  $y$  jednaki nuli, pa se diferencijalne jednačine svode na sistem parcijalnih jednačina predstavljenih u Tab. 3-3.

Tab. 3-3: Maksvelove jednačine u diferencijalnom obliku za ravanski talas.

|                                                  |                                            |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $\text{div} \vec{E} = 0$                         | Gausov zakon električnog fluksa            |
| $\text{div} \vec{H} = 0$                         | Gausov zakon magnetizma                    |
| $\text{rot} \vec{E} = j\omega\mu\vec{H}$         | Faradejev zakon elektromagnetske indukcije |
| $\text{rot} \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$ | Amperov zakon                              |
| $\text{div} \vec{J} = 0$                         | Jednačina kontinuiteta                     |

(3.3) se u tom slučaju može pojednostaviti u oblik hiperboličnih parcijalnih diferencijalnih jednačina oblika Dalamberove jednačine:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial z^2} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \vec{H}_z}{\partial z^2} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}_z}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Prikazane jednačine opisuju prenos elektromagnetske energije ravanskog talasa u pravcu ose prostiranja (z ose). U svakoj tački prostora koji nije vakuum, energija radio talasa se prenosi sa jednog atoma na susedni u vidu fotonske razmene i zbog toga dolazi do smanjenja brzine prostiranja ( $v$ ) elektromagnetske energije. Brzina prostiranja zavisi od relativne dielektrične konstante sredine  $\epsilon_r$  i relativne magnetske permeabilnosti  $\mu_r$ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}}. \quad (3.11)$$

Najjednostavnija rešenja jednačina (3.10) su sinusoidalne funkcije koje opisuju prostiranje radio talasa:

$$\begin{aligned} E(z, t) &= E_{\max} \cos(kz - \omega t) \\ H(z, t) &= H_{\max} \cos(kz - \omega t), \end{aligned} \quad (3.12)$$

gde  $k = 2\pi / \lambda$  predstavlja talasni broj, a  $\omega = 2\pi f$  je ugaona frekvencija radio talasa.  $E_{\max}$  i  $H_{\max}$  predstavljaju amplitude jačine električnog i magnetskog polja, respektivno.

Ukupna energija radio talasa u elementarnoj zapremini slobodnog prostora  $dU$  koju čini integralni zbir gustina električnog i magnetskog polja  $u_E = \epsilon_0 E^2 / 2$  i  $u_B = B^2 / 2\mu_0$  respektivno je:

$$dU = u \cdot S dx = (u_E + u_B) \cdot S dx. \quad (3.13)$$

S obzirom na to da se radio talas prostire kroz sredinu brzinom  $v$ , vreme potrebno da se izvrši prenos energije na daljinu  $dx$  je  $dt = dx/v$ . To znači da se brzina promene energije po jediničnoj površini može izraziti kroz:

$$P = \frac{dU}{S \cdot dt} = \frac{v}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0} \right) = \frac{v B^2}{\mu_0} = v \epsilon_0 E^2 = \frac{EB}{\mu_0}. \quad (3.14)$$

U smeru prostiranja radio talasa se intenzitet promene energije po jedinici površine može predstaviti u vidu Pointingovog vektora kod kojeg je intenzitet, ako se posmatra ravanski talas kod kojeg su vektori električnog i magnetskog polja normalni jedan u odnosu na drugog:

$$|\vec{P}| = \frac{1}{\mu_0} |\vec{E} \times \vec{B}| = \frac{EB}{\mu_0} = P. \quad (3.15)$$

Za sinusoidalni radio talas kod kojeg važi (3.15), intenzitet se može izračunati kao vremenska srednja vrednost intenziteta Pointingovog vektora:

$$P = \frac{E_{\max} B_{\max}}{\mu_0} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(kz - \omega t) dt = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2c\mu_0} = \frac{c \cdot B_{\max}^2}{2\mu_0}. \quad (3.16)$$

S obzirom na to da su gustine električne i magnetske energije istih vrednosti:

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = u_E, \quad (3.17)$$

srednja vremenska vrednost gustine energije sinusoidalnog talasa je:

$$u = u_B + u_E = \epsilon_0 E^2 = \frac{\epsilon_0 E_{\max}^2}{2} = \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{B_{\max}^2}{2\mu_0}. \quad (3.18)$$

S obzirom na to da je u 6. poglavlju ove disertacije predstavljena pojava slabljenja nemodulisanog signala mikrotalasnog opsega na više različitih frekvencija na mestu prijema u toku jutarnjih časova, neophodno je ustanoviti do kakvih sve efekata može dovesti promena parametara sredine prenosa (u ovom slučaju prizemnog sloja atmosfere) na karakteristike radio signala. Rezultati merenja koji će biti prikazani u navedenom poglavlju suštinski prikazuju uticaj sredine pobuđene promenom intenziteta zračenja sa Sunca na snagu posmatranog radio signala na prijemu.

#### 3.1.3. Uticaj sredine na prostiranje radio talasa

Sredina prostiranja radio talasa u zavisnosti od sastava menja fizičko-hemijsku strukturu kada se nađe pod uticajem energije pristigle sa Sunca. Složenost prostorno-vremenske promene se u makroskopskom domenu analizira sa pretpostavkom pojava nehomogenosti u strukturi. Usled složenosti i nemogućnosti direktnog merenja, ovaj vid analize se svodi na pojedinačna istraživanja neperiodičnih pojava za male prostorne oblasti [34]. Kod prostiranja ravanskog talasa, usled nehomogenosti sredine dolazi do efekata refrakcije, refleksije, apsorpcije, difrakcije i disperzije energije elektromagnetskog talasa i ovi fenomeni se mogu pojedinačno razmatrati za svaku radio emisiju specifičnih karakteristika.

### 3.1.3.1. Refrakcija

Refrakcija je pojava povijanja fronta radio talasa usled prostorne nehomogenosti karakteristika sredine prostiranja. Gradijentalna promena električnih i magnetskih karakteristika sredine se svodi analizu prostiranja radio talasa na primenu Snelovog (*Willebrord Snellius* – 1580-1626) zakona na teorijski vrlo gusto raspoređenim graničnim površinama u smeru prostiranja radio talasa. Pošto su brzine prostiranja elektromagnetske energije ( $v_1$  i  $v_2$ ) prema (3.11) zavisne od karakteristika prve i druge sredine ( $\varepsilon_1, \mu_1, \varepsilon_2$  i  $\mu_2$ ), mera refrakcije se definiše kroz odnos indeksa refrakcije između druge ( $n_2$ ) i prve sredine ( $n_1$ ) (Sl. 3-2):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_p} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}}. \quad (3.19)$$

S obzirom na činjenicu da je magnetska permeabilnost u vazduhu u svim tačkama prostora približno ista, dobija se:

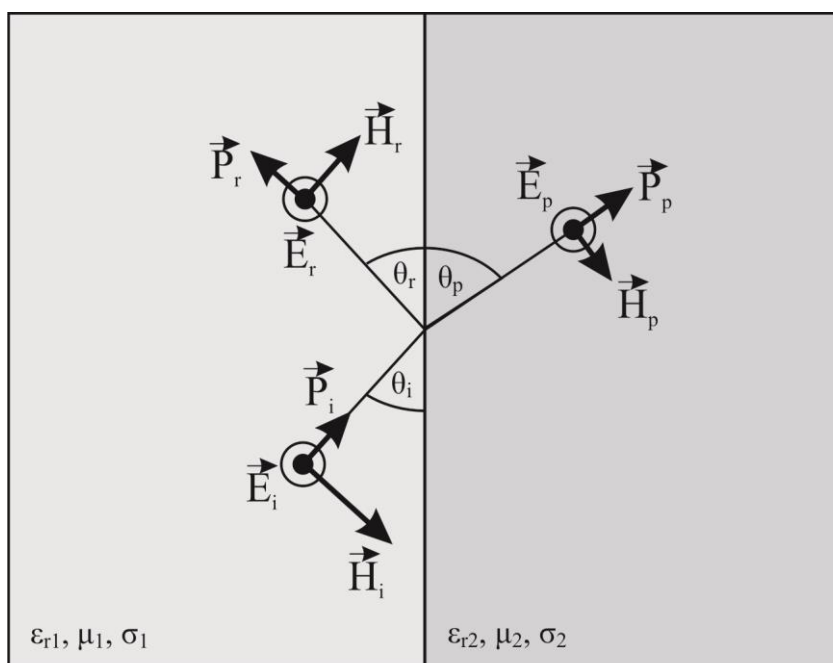
$$\frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}}. \quad (3.20)$$

Ako se posmatra granična površina između dve sredine različitih relativnih permitivnosti i formira kontura koja je obuhvata, linijski integral vektora električnog polja (3. Maksvelova jednačina – Tab. 3-1), kao i površinski integral vektora magnetskog polja je jednak nuli, pa su tangencijalne komponente električnog polja u odnosu na graničnu površinu jednake u obe sredine. Analogno se na osnovu (4. Maksvelova jednačina – Tab. 3-1) može pokazati da su tangencijalne komponente magnetskog polja u odnosu na graničnu površinu jednake u obe sredine. Ako se smatra da vazduh ima merljivu provodnost  $\sigma$ , a posmatrani radio talas je sinusoidalan ugaone frekvencije  $\omega$ , na osnovu (4. Maksvelove jednačine – Tab. 3-3) se može izvesti kompleksna permitivnost  $\overline{\varepsilon_r}$  [35]:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= j\omega \left( \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right) \vec{E} \\ \overline{\varepsilon_r} &= \varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Na osnovu jednakosti tangencijalnih komponenti vektora električnog i magnetskog polja u dve različite sredine, dobija se odnos između komponenta elektromagnetskog polja incidentnog ( $i$ ), refraktovanog ( $p$ ) i reflektovanog ( $r$ ) talasa (Sl. 3-2):

$$\begin{aligned} E_i + E_r &= E_p \\ (H_i - H_r) \sin \theta_i &= H_p \sin \theta_p \\ (E_i - E_r) \frac{\sin \theta_i}{Z_1} &= E_p \frac{\sin \theta_p}{Z_2}. \end{aligned} \quad (3.22)$$



Sl. 3-2: Refrakcija i refleksija na graničnoj površini između dve sredine.

U prethodnoj jednačini se uzima da je  $\theta_i = \theta_r = \theta_1$ , a  $\theta_p = \theta_2$ , dok su  $Z_1$  i  $Z_2$  impedanse prve i druge sredine, respektivno. S obzirom na to da su impedanse kod magnetski izotropno homogenih sredina jednake samo recipročnoj vrednosti korena električne permitivnosti, dobija se:

$$(E_i - E_r) \sin \theta_1 \sqrt{\epsilon_{r1}} = E_p \sin \theta_2 \sqrt{\epsilon_{r2}}. \quad (3.23)$$

Elektromagnetski talas (3.9) koji se prostire kroz sredinu sa konstantnim indeksom refrakcije  $n$  se može definisati kroz jednačinu koja opisuje prostornu  $\vec{r}$  i vremensku  $t$  zavisnost:

$$E(\vec{r}, t) = E_0 \cdot \exp \left[ i \left( n \vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega t \right) \right], \quad (3.24)$$

gde je  $\omega$  ugaona frekvencija radio talasa, a  $\vec{k}_0$  je vektor normala na talasni front, intenziteta jednakog talasnom broju ( $2\pi/\lambda$ ). Za mikrotalasni opseg radio frekvencija, nivo električnog polja se menja u skladu sa sporom vremenskom promenom indeksa refrakcije, dok je uočljivija prostorna promena usled nehomogenosti hemijskog sastava troposfere.

Radio indeks refrakcije u troposferi zavisi od molekularnog sastava vazduha – načelno azota ( $N_2$ ), kiseonika ( $O_2$ ), ugljen-dioksida ( $CO_2$ ) i vodene pare. Vrednost navedenog indeksa refrakcije je različit od jedinice zbog razlike u polarizaciji ovih molekula u odnosu na polarizaciju elektromagnetskog polja incidentnog radio talasa, a apsolutna promena je praktično vrlo mala, tako da je tipična vrednost na površini Zemlje 1,0003. Ovaj efekat je nezavisan od frekvencije radio talasa, a generalno je primenjiv za frekvencije više od 100 MHz [35].

Zbog vrlo male promene u odnosu na jedinicu, uobičajeno je da se definiše vrednost refraktivnosti –  $N$ :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (3.25)$$

$N$  je vrednost kojom se može opisati mera uticaja troposferske sredine na prostiranje radio talasa i zavisi od relativnog vazdušnog pritiska  $P$  [mbar], apsolutne temperature  $T$  [K] i delimično pritiska vodene pare  $P_{vp}$  [mbar] [36] i [37]:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{P_{vp}}{T^2}. \quad (3.26)$$

Pritisak vodene pare  $P_{vp}$  [mbar] se može izraziti u funkciji relativne vlažnosti vazduha  $H$  [%] i relativnog pritiska vodene pare  $e_s$  [mbar] koji zavisi od dominantnih strukturnih činilaca troposfere – vode ili leda [38]:

$$P_{vp} = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (3.27)$$

gde se vrednosti parametra  $e_s$  [mbar] za vodenu paru mogu dobiti uz pomoć vrednosti relativnog vazdušnog pritiska  $P$  [mbar] i apsolutne temperature  $T$  [K] kroz:

$$e_s = 6,11 \cdot \left[ 1 + 10^{-4} \left( 7,2 + P \cdot (0,03 + 5,9 \cdot 10^{-7} \cdot T^2) \right) \right] \cdot \exp \left( \frac{18,68 - \frac{T}{234,5}}{T + 257,14} \cdot T \right) \quad (3.28)$$

Kao što je prikazano u [39], varijacije navedenih meteoroloških vrednosti se mogu razmatrati na tri nivoa:

- Na globalnom nivou se troposfera smatra razloživom na horizontalne slojeve usled efekata gravitacije.
- Na srednjem nivou su od značaja promene u blizini Zemljine površine i meteoroloških uslova koji vladaju u posmatranom delu troposfere.
- Na lokalnom nivou efekte ispoljavaju turbulentne promene koje izazivaju intenzivnu varijaciju stanja tog dela troposfere.

### 3.1.3.2. Refleksija

Refleksija predstavlja pojavu odbijanja dela energije radio talasa od granične površine. Svaka realna granična površina svojim karakteristikama vrši delimičnu apsorpciju elektromagnetske energije, ali veći deo energije radio talasa nastavi prostiranje nakon odbitka. Na osnovu (3.22) i (3.23) se može izvesti odnos između intenziteta vektora električnog polja reflektovanog i incidentnog talasa:

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{\sin \theta_1 \sqrt{\epsilon_{r1}} - \sin \theta_2 \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sin \theta_1 \sqrt{\epsilon_{r1}} + \sin \theta_2 \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3.29)$$

Pošto je na osnovu Snelovog zakona:

$$\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}, \quad (3.30)$$

može se kao mera refleksije izvesti kompleksni oblik koeficijenta refleksije između graničnih površina za slučaj nailaska radio talasa normalne polarizacije i paralelene polarizacije (u odnosu na z-osu) na granicu između vakuuma i sredine sa različitim električnim karakteristikama [35]:

$$\begin{aligned}\rho_{norm} &= \frac{\sin \theta_1 - \sqrt{(\varepsilon_{r2} - j\chi_2) - \cos^2 \theta_1}}{\sin \theta_1 + \sqrt{(\varepsilon_{r2} - j\chi_2) - \cos^2 \theta_1}} \\ \rho_{para} &= \frac{(\varepsilon_{r2} - j\chi_2) \sin \theta_1 - \sqrt{(\varepsilon_{r2} - j\chi_2) - \cos^2 \theta_1}}{(\varepsilon_{r2} - j\chi_2) \sin \theta_1 + \sqrt{(\varepsilon_{r2} - j\chi_2) - \cos^2 \theta_1}},\end{aligned}\quad (3.31)$$

gde je  $\theta_1$  upadni ugao između linije talasnog fronta i granične površine,  $\varepsilon_{r2}$  relativna permitivnost druge sredine,  $\sigma_2$  [S·m<sup>-1</sup>] je provodnost druge sredine,  $\chi_2 = 18 \cdot 10^9 \sigma_2 / f$ , a  $f$  [Hz] je frekvencija radio talasa.

### 3.1.3.3. Apsorpcija

Apsorpciju je kao pojavu nepovratnog gubitka elektromagnetske energije u fotonskoj interakciji sa sredinom prostiranja potrebno analizirati zajedno sa efektima disperzije, u skladu sa nosećom frekvencijom radio talasa. Apsorpcija elektromagnetske energije radio talasa se može razmatrati sa aspekta prenosa energije radio talasa na sredinu prostiranja, a može se numerički prikazati kroz imaginarni deo indeksa refrakcije. U slučaju modelovanja, za mikrotalasne komunikacije će sredina vršiti uticaj apsorpcije na nivo električnog polja kao što je to definisano sa [35]:

$$E(\vec{r}, t) \approx E0 \cdot \exp \left[ i \left( \Re[n(\vec{r})] \vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega t \right) \right] \exp \left[ -\Im[n(\vec{r})] \vec{k}_0 \cdot \vec{r} \right]. \quad (3.32)$$

Imaginarni deo indeksa refrakcije prouzrokuje eksponencijalno opadanje nivoa električnog polja sa udaljenjem od predajnika gde je za frekvenciju radio signala  $f$  [GHz] specifično slabljenje dato sa:

$$a = 0,182 \cdot 10^6 f \Im(n) \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right]. \quad (3.33)$$

Disperzija je zastupljena u sredinama prostiranja gde postoje nehomogenosti karakterističnog oblika opisanog funkcijom  $S$  u interakciji sa kojima radio talas menja fazu kroz funkciju promene ugla disperzije  $\theta$ , faze radio talasa  $\varphi$  i udaljenosti od prepreke  $r$ . Na taj način se može definisati nivo električnog polja disperzovanog signala  $E_s$  u funkciji navedenih veličina i nivoa električnog polja pre disperzije [35]:

$$E_s = E_i \frac{S(\theta, \varphi)}{jkr} e^{-jkr + j\omega t}, k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (3.34)$$

Uzimajući u obzir frekvencijske opsege u kojima je vršeno istraživanje za potrebe izrade ove disertacije, dominantan uticaj koji sredina prizemnog dela atmosfere ostvaruje na prenos elektromagnetske energije predstavlja slabljenje slobodnog prostora  $a_0$ :

$$a_0 = 92 + 20 \log f + 20 \log d - g_1 - g_2. \quad (3.35)$$

$f$  [GHz] je frekvencija radio talasa,  $d$  [km] je udaljenost između predajnika i prijemnika,  $g_1$  [dBi] dobitak predajne antene i  $g_2$  [dBi] dobitak prijemne antene.

Ostali efekti slabljenja se mogu smatrati dodatnim slabljenjem koje u zavisnosti od vrste uticaja može značajno doprineti ukupnom slabljenju na radio-komunikacionom putu.

#### 3.1.3.4. Difrakcija

Difrakcija radio talasa je jedna od pojava koja može biti objašnjena kako talasnom teorijom, tako i teorijom kvantne mehanike sa aspekta dualne prirode materije, a univerzalno važi za sve vrste elektromagnetskih zračenja (vidljiv deo elektromagnetskog spektra, opseg X-zračenja, radio opseg...). Ona predstavlja pojavu prividnog skretanja talasnog fronta usled njegovog nailaska na prepreku u toku prostiranja. Nailaskom na prepreku, elektromagnetska energija se preusmerava u više različitih pravaca, a geometrija naknadne prostorne raspodele elektromagnetskog polja zavisi od dimenzija i oblika prepreke, kao i od odnosa dimenzija prepreke i talasne dužine posmatranog radio talasa.

Sa aspekta analize efekata koji dovode do slabljenja radio signala na mestu prijema, može se razmatrati slabljenje usled difrakcije, a široko korišćeni modeli na osnovu kojih se računa slabljenje su [35]:

- difrakcija na oštrici noža,
- difrakcija na cilindru i
- difrakcija na glatkoj sferi.

Kod usmerenih mikrotalasnih komunikacija se prilikom projektovanja, u ukupnu rezervu za feding uračunava dodatno slabljenje usled difrakcije, ukoliko neka od prepreka na putu prostiranja zadire u područje prve Frenelove zone [40].

Eksperimentalna mikrotalasna radio komunikacija koja će biti detaljno opisana u 6. poglavlju je formirana tako da na putu prostiranja nisu postojale prepreke koje bi uzrokovale dodatno slabljenje usled navedenih efekata.

## 3.2. Karakteristike prostiranja radio talasa kroz jonizovanu sredinu

Prostiranje radio talasa kroz jonizovan gas zavisi od karakteristika koje se odnose kako na radio signal, tako i na sredinu kroz koju se prostire. Pri tome, analitički izrazi koji se koriste u analizama zavise od toga da li se u obzir moraju uzeti sudarni procesi ili se njihovo prisustvo može zanemariti. Takođe, uticaj geomagnetskog polja može da bude nezanemarljiv usled čega se i njegovo prisustvo mora uključiti u razmatranje.

### 3.2.1. Prostiranje radio talasa u beskolizionoj jonizovanoj sredini

Razmena energije između radio talasa i jonizovane sredine vrši se delovanjem sile  $\vec{F}$  koja izaziva kretanje naelektrisanih čestica (jona i elektrona) naelektrisanja  $q$ , a izazvana je promenljivim električnim poljem  $\vec{E}$  (3.32).

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}. \quad (3.36)$$

Ako je u pitanju prostoperiodični radio talas ugaone frekvencije  $\omega$ , brzina naelektrisane čestice  $v_c$ , mase  $m$  koja će biti indukovana ovom silom biće:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m} \cdot E_0 \cos \omega t \\ v_c &= \frac{E_0 \cdot q}{m} \int \cos \omega t \cdot dt \\ v_c &= \frac{E_0 \cdot q}{\omega \cdot m} \sin \omega t + v_{c0}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

U slučaju kada se posmatra jednočestični gas (to se na primer, aproksimativno može primeniti na elektrone kada se zbog znatno veće mase, kretanje jona u nekim slučajevima zanemaruje) ovo kretanje naelektrisanih čestica koncentracije  $N_c$  i naelektrisanja  $q$  obrazuje struju gustine  $J_k$ . Ako se u razmatranju može zanemariti  $v_{c0}$  (u slučaju velike koncentracije čestica se može zanemariti jer predstavlja zanemarljivu termički izazvanu komponentu

vektora brzine naelektrisane čestice na pravac vektora elektromagnetskog polja) iz prethodne jednačine se dobija:

$$J_k = N_c \cdot q \cdot v = \frac{N_c \cdot q^2 \cdot E_0}{\omega \cdot m} \sin \omega t, \quad (3.38)$$

gde se vidi da je  $J_k$  za  $\pi/2$  fazno pomerena (kasni) u odnosu na fazu posmatranog radio talasa.

U posmatranom prostoru dielektrične konstante  $\varepsilon_0$  se usled uticaja elektromagnetskog polja  $\vec{E}$  javlja i Maksvelova struja pomeraja  $J_m$ , fazno pomerena (prednjači) za  $\pi/2$  u odnosu na polje i u protivfazi je sa jonskom, konvekcionskom strujom:

$$J_m = \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} E_0 \cos \omega t = -\omega \varepsilon_0 E_0 \sin \omega t. \quad (3.39)$$

Zbir ove dve struje  $J_u$  može se napisati kao [41]:

$$J_u = -\omega \left( \varepsilon_0 - \frac{N \cdot q^2}{\omega^2 \cdot m} \right) E_0 \sin \omega t. \quad (3.40)$$

Za jonizovanu sredinu se Maksvelova struja pomeraja ne može poistovetiti sa dielektričnom strujom pomeraja zbog mnoštva slobodnih slučajno prostorno raspoređenih elektrona čiji mali ukupan pomeraj u istom pravcu na posmatranoj zapremini ne dovodi do njene polarizacije [42].

Iz izraza (3.40) se vidi da se jonizovana sredina može posmatrati kao dielektrik kod kojeg se „prividna“ dielektrična konstanta (Ekls-Larmorova (*Joseph Larmor* – 1857-1942) teorija) može računati pomoću izraza:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{N \cdot q^2}{\varepsilon_0 \omega^2 m} \right). \quad (3.41)$$

Promena dielektrične konstante zavisi od koncentracije naelektrisanih čestica – direktno je srazmerna, od frekvencije radio talasa i mase nosioca naelektrisanja (elektroni će imati najviše uticaja, laki joni znatno manji, a teški i klaster joni najmanje) – obrnuto je proporcionalna, a ne zavisi od polariteta naelektrisane čestice. S obzirom na to da je ugaona plazmena frekvencija:

$$\omega_c^2 = \frac{N \cdot q^2}{\epsilon_0 m}, \quad (3.42)$$

prividna dielektrična konstanta jonizovane sredine se može predstaviti kao:

$$\epsilon = \epsilon_0 \left( 1 - \frac{f_c^2}{f^2} \right), \quad (3.43)$$

gde je  $f_c = \omega_c / 2\pi$  plazmena frekvencija koja potiče isključivo od slobodnih elektrona, pa se može nazivati elektronska plazmena frekvencija, a  $f$  je frekvencija radio talasa.

Iz izraza za relativnu dielektričnu konstantu:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.44)$$

i (3.43) može se dobiti brzina prostiranja faze  $v$  i indeks refrakcije sredine  $n$ :

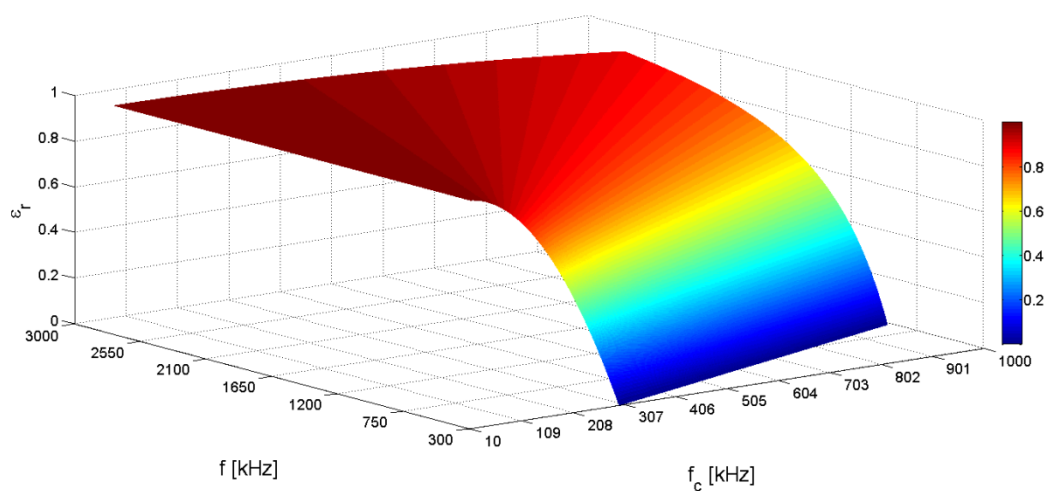
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - \frac{f_c^2}{f^2} \quad (3.45)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f^2}}} \quad (3.46)$$

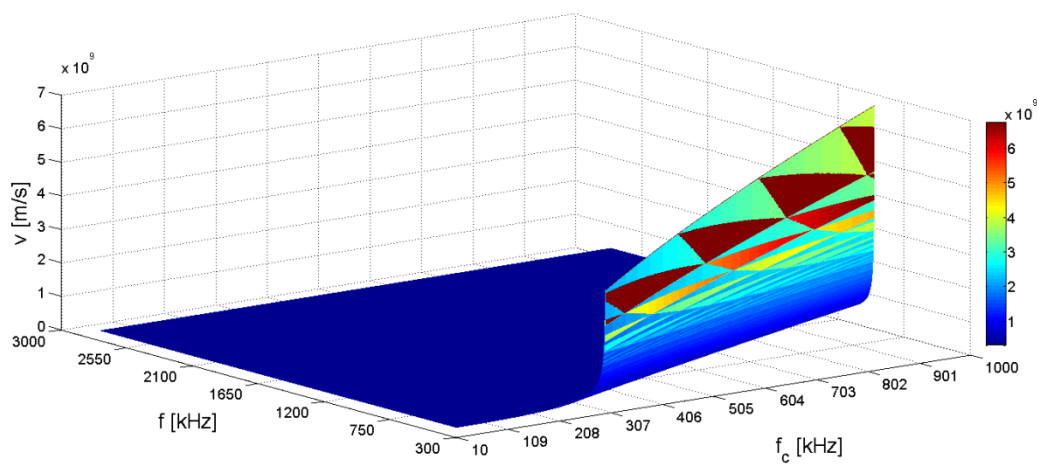
$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f^2}} \quad (3.47)$$

Brzina prostiranja faze radio talasa smanjenjem njegove frekvencije raste od vrednosti brzine svetlosti do beskonačne vrednosti koja važi za izjednačenu vrednost frekvencije radio talasa i plazmene frekvencije. Daljim smanjenjem frekvencije radio talasa, ispod vrednosti plazmene frekvencije, brzina prostiranja faze ima negativne vrednosti (imaginarna je) što znači da se talas kroz sredinu ne prostire, već biva reflektovan od slojeva na manjim nadmorskim visinama. Iz tog razloga se  $f_c$  smatra kritičnom frekvencijom i dalje se u razmatranju analiziraju samo pozitivne vrednosti  $\epsilon_r$ ,  $v$  i  $n$ .

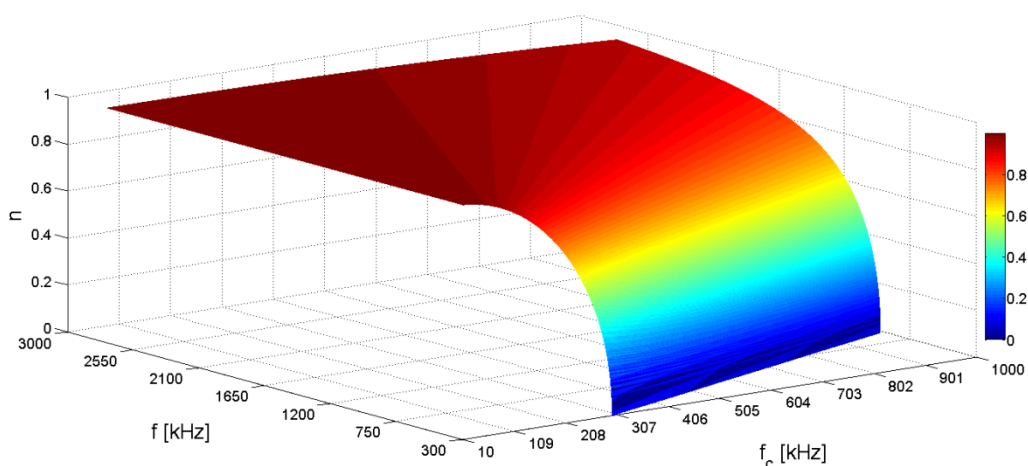
Zavisnost navedenih veličina bitnih za predstojeću analizu od frekvencije elektromagnetskog talasa prikazana je na Sl. 3-3 – Sl. 3-5.



Sl. 3-3: Zavisnost relativne dielektrične konstante u funkciji od frekvencije radio talasa  $f$  i elektronske plazmene frekvencije  $f_c$ .



Sl. 3-4: Zavisnost brzine prostiranja faze u funkciji od frekvencije radio talasa  $f$  i elektronske plazmene frekvencije  $f_c$ .



Sl. 3-5: Zavisnost vrednosti indeksa refrakcije u funkciji od frekvencije radio talasa  $f$  i elektronske plazmene frekvencije  $f_c$ .

Prikazani grafici su izgenerisani na osnovu izraza (3.45) – (3.47) i odnose se na opseg frekvencija radio talasa od 300 kHz do 3 MHz i za opseg plazmene frekvencije od 10 kHz do 1 MHz karakterističnih za D-sloj jonosfere u mirnom stanju. Vrednost relativne dielektrične konstante se kreće u opsegu od 0 do 1, njena vrednost raste sa smanjenjem odnosa  $f_c/f$ , a jedinična vrednost dobija u slučajevima kada je frekvencija radio talasa mnogo veća od vrednosti plazmene frekvencije što praktično znači da jonizovana sredina ne utiče na prostiranje radio talasa. Sa porastom vrednosti plazmene frekvencije, za radio talas definisane frekvencije, relativni indeks refrakcije jonizovane sredine opada do vrednosti nula kada se frekvencije izjednače, pri čemu dolazi do refleksije radio talasa od posmatranog sloja jonosfere.

Brzina prostiranja faze radio talasa smanjenjem njegove frekvencije raste od vrednosti brzine svetlosti do beskonačne vrednosti koja važi za izjednačenu vrednost frekvencije radio talasa i plazmene frekvencije.

Indeks refrakcije jonizovane sredine  $n$  u slučaju svojih pozitivnih vrednosti, kada je vrednost noseće frekvencije radio talasa veći od plazmene frekvencije sredine menja se u opsegu od nule do jedinične vrednosti i prikazuje meru uticaja jonizovane sredine na prostiranje radio talasa prikazanog opsega frekvencija.

### 3.2.2. Prostiranje radio talasa u kolizionoj jonizovanoj sredini

Za preciznije modelovanje uticaja jonizovane sredine na prostiranje radio talasa, u proračun se uključuje i koliziona frekvencija čija se vrednost za nadmorske visine do oko 100 km može prikazati izrazom [43]:

$$\nu_k = 4,4 \cdot 10^{-9} \frac{T}{300} N_c, \quad (3.48)$$

gde  $T$  predstavlja temperaturu, a  $N_c$  koncentraciju čestica.

Kod kinetičke teorije gasova, izraz:

$$N = \nu e^{at} \quad (3.49)$$

prikazuje broj slobodnih čestica  $N$  u jedinici zapremine  $\nu$  koje u intervalu vremena  $t$  ne dožive sudar sa okolnim česticama, gde je  $a$  konstanta proporcionalnosti [41]. Ukupan broj slobodnih naelektrisanih čestica koje se posmatraju u datom vremenskom intervalu obrazuju konvekcioni struju koja daje svoj doprinos promeni dielektrične konstante.

Brzina kretanja ovih čestica  $v$  u intervalu između dva sudara, u trenutku  $t$  se može predstaviti kao [41]:

$$v = \int_{t-\tau}^t \frac{q}{m} E_0 e^{j\omega t} dt + v_0, \quad (3.50)$$

gde je  $v_0$  projekcija početne brzine čestice na osu prostiranja radio talasa u početnom trenutku posmatranja  $(t-\tau)$ ,  $q$  naelektrisanje čestice,  $m$  masa čestice,  $E_0$  električna komponenta elektromagnetskog polja ravanskog talasa, a  $\omega$  ugaona frekvencija radio talasa.

Broj čestica koje čine konvekcioni struju, a imaju isto vreme života  $(d\tau)$  između dva sudara, a samim tim i istu brzinu  $v$ , može se u trenutku  $t$  izračunati kroz:

$$dn = -Nve^{-v\tau} d\tau. \quad (3.51)$$

Elementarna gustina konvekcione struje koju u jednom vremenskom trenutku čini ovaj broj slobodnih čestica se računa kao:

$$dJ_{kk} = qv|dn| = qvNve^{-v\tau} d\tau. \quad (3.52)$$

Ukupna gustina konvekcione struje u slučaju uračunatih kolizija se dobija kroz:

$$J_{kk} = \int_0^{\infty} dJ_{kk} = \frac{Nq^2v}{j\omega m} E_0 e^{j\omega t} \int_0^{\infty} (1 - e^{-j\omega\tau}) e^{-v\tau} d\tau + Nq\overline{v_0}, \quad (3.53)$$

a s obzirom na to da se srednja vrednost brzine kretanja između sudara može uzeti sa vrednošću nula, dobija se da se ukupna gustina konvekcione struje u slučaju kolizija računa kroz:

$$J_{kk} = \frac{Nq^2}{m} \frac{1}{v + j\omega} E_0 e^{j\omega t}. \quad (3.54)$$

Uticaj kolizija čestica u jonizovanoj sredini menja prividnu vrednost dielektrične konstante (3.43) i omogućava preciznije definisanje totalne struje koja je zbir gustine struje pomeraja (3.39) i konvekcione struje (3.54):

$$\begin{aligned} J_{tot} &= J_m + J_{kk} = j\omega\epsilon_0 E_0 e^{j\omega t} + \frac{Nq^2}{m} \frac{1}{v + j\omega} E_0 e^{j\omega t} \\ J_{tot} &= \left( j\omega\epsilon_0 + \frac{Nq^2}{m} \frac{1}{v + j\omega} \right) \cdot E_0 e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (3.55)$$

S obzirom na (3.45), ekvivalentna dielektrična konstanta sa uračunatim uticajem kolizionih efekata je:

$$\epsilon = \epsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{v^2 + \omega^2} \right) - j \frac{\epsilon_0 \omega_c^2 v}{\omega(v^2 + \omega^2)}, \quad (3.56)$$

gde se član:

$$\epsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{v^2 + \omega^2} \right) \quad (3.57)$$

može smatrati dielektričnom konstantom, a

$$\frac{\epsilon_0 \omega_c^2 v}{v^2 + \omega^2} \quad (3.58)$$

provodnošću.

Ukoliko se sredina posmatra kao dielektrik male provodnosti, konstanta slabljenja se izražava kao:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (3.59)$$

što na kraju rezultira relacijom:

$$\alpha = \frac{1}{2c} \frac{v \cdot \omega_c^2}{(v^2 + \omega^2)n}. \quad (3.60)$$

S obzirom na to da geomagnetsko polje u pojedinim delovima jonosfere, zavisno od gustine magnetskih silnica, vrši značajan uticaj na stanje sredine promenom magnetske permeabilnosti, ovako anizotropna sredina može vršiti dodatne promene karateristika radio talasa. Ovaj dodatni vid uticaja razdvaja incidentni talas na dva talasa različite polarizacije – redovan (*ordinary*) i neredovan (*extraordinary*) koji usled prostiranja kroz jonizovanu sredinu pod uticajem magnetskog polja Zemlje imaju promenjenu polarizaciju.

#### 3.2.3. Uticaj geomagnetskog polja na prostiranje radio talasa

Kada se u uopšteno razmatranje uzme intenzitet geomagnetskog polja (trensverzalne –  $T$  i longitudinalne –  $L$  komponente), može se definisati kompleksni indeks refrakcije kroz Appleton-Lassen formulu kod kojeg je realni deo u slučaju zanemarnih sudara između elektrona i neutrala [42]:

$$\begin{aligned} n^2 &= 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \left[ Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ X &= \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \\ Y_L &= \frac{eB_L}{m\omega} \\ Y_T &= \frac{eB_T}{m\omega} \end{aligned} \quad (3.61)$$

Kada se efekti sudara ne zanemaruju, (3.61) se može proširiti na oblik (3.62) radi predstave intenziteta apsorpcije energije radio talasa gde je  $Z = v/\omega$ , a  $v$  elektron-neutral koliziona frekvencija.

$$n_A^2 = (n - i\chi)^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} - \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2}} \quad (3.62)$$

Vrednost  $\chi$  je imaginarni deo indeksa refrakcije koji ukoliko postoji u analizi, utiče na vrednost slabljenja amplitude po jedinici dužine i predstavlja apsopcioni koeficijent  $k$ :

$$k = \frac{\omega\chi}{c} \quad (3.63)$$

U odsustvu magnetskog polja, koeficijent apsorpcije je [35]:

$$k = \frac{\omega XZ}{17,38 \cdot cn(1 + Z^2)} = \frac{e}{17,38 \cdot \varepsilon_0 mcn} \frac{Nv}{(\omega^2 + v^2)} \quad (3.64)$$

Analiza sprovedena u 5. poglavlju tretira jonosferski D-sloj kao jonizovanu sredinu koja se u vremenskom intervalu uticaja X-flera ponaša kao sredina koja je pod dejstvom geomagnetskog polja male gustine magnetskih silnica na geografskoj širini na kojoj je vršeno merenje, pa su se efekti magnetskog polja zanemarili u proračunima. Naredna istraživanja biće usmerena ka modelovanju parametara jonizovane sredine pod uticajem geomagnetskog polja kako bi procedure bile primenjive za sve geografske širine.

### 3.3. Teorije prostiranja elektromagnetskih talasa

Postoje dve teorije prostorno-vremenske analize prostiranja radio talasa:

- modalna teorija i
- teorija zraka (zračna teorija).

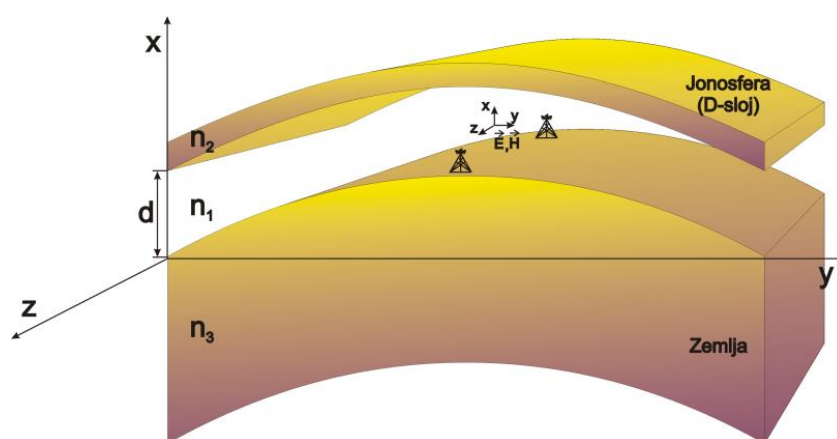
Koja teorija u razmatranju prostiranja radio talasa kroz sredine različitih karakteristika će biti upotrebljena u konkretnom slučaju zavisi od noseće frekvencije radio talasa, udaljenosti posmatrane tačke od predajnika, kao i od sredine za koju se vrši analiza [35]. Za adekvatnu analizu korišćenjem bilo koje od navedenih teorija neophodno je uzeti u obzir horizontalnu i vertikalnu nehomogenost sredine prostiranja. Zakrivljenost Zemljine

površine povećava složenost analize, pa je neophodno za konkretan slučaj uporediti vrednosti noseće frekvencije, udaljenosti između predajnika i prijemnika i vrednost korekcije visine usled zakrivljenosti Zemljine površine, da bi se vrednost jačine elektromagnetskog polja u tački prostora što preciznije odredila.

Istraživanja predstavljena u ovoj disertaciji se bazično oslanjaju na obe navedene teorije. Modalna teorija je primenjena u LWPC (*Long-Wave Propagation Capability*) programskom paketu korišćenog za simulaciju prostiranja VLF signala kojim se vršio monitoring jonosfere i koji je detaljno opisan u poglavlju 4. Zračna teorija predstavlja osnovu za modelovanje prostiranja radio talasa u okviru jonosferskog D-sloja koje je predstavljeno u 5. poglavlju. Iz tog razloga su osnove ovih teorija date u nastavku teksta.

#### 3.3.1. Modalna teorija

Modalna teorija analize prostiranja komunikacionih radio talasa u atmosferi se može primeniti na VLF opseg radio talasa u prostoru prirodnog talasovoda gore oivičenog donjim delom D-sloja jonosfere, a dole Zemljinom površinom. Ova teorija je primenjiva u uslovima kada se žele pronaći tačna rešenja Maksvelovih jednačina za poznatu prostornu raspodelu indeksa refrakcije pod pretpostavkom aproksimacije pojedinih uslova [44], [45] i [46]. Koeficijent refleksije na graničnim površinama je za radio talase ovih frekvencijskih područja vrlo veliki i primena modalne teorije daje zadovoljavajuće rezultate proračuna prostorne raspodele nivoa elektromagnetskog polja u slučajevima kada udaljenost predajnika i prijemnika nije premala, a opet ni prevelika zbog ograničavajućeg broja modova koji bi bili uključeni u proračun vrednosti nivoa elektromagnetskog polja. Drugim rečima, ovako oivičen prostor se može smatrati zakrivljenim planarnim talasovodom gde se intenzivne promene dielektričnih konstanti javljaju na navedenim graničnim slojevima. Ukoliko se posmatra struktura prikazana na Sl. 3-6, propagaciona sredina između predajnika u koordinatnom početku i prijemnika u bilo kojoj tački na  $z$  osi može se karakterisati dielektrikom indeksa refrakcije  $n_1$ , dok je indeks refrakcije jonosferskog sloja – iznad i Zemlje – ispod  $n_2$  i  $n_3$ , respektivno. Širina jezgra ovakvog talasovoda ( $d$ ) ima vrednost nadmorske visine jonosferskog sloja od kojeg nastaje refleksija posmatranog elektromagnetskog talasa.



Sl. 3-6: Zemlja-jonosfera talasovod.

Ukupan nivo elektromagnetskog polja u svakoj tački talasovoda se može dobiti kao suma teoretski beskonačnog broja „talasovodnih modova“. Svaki od modova se izračunava rešavanjem Maksvelovih jednačina u bilo kojoj tački talasovoda, a sadrži karakterističnu vrednost (*eigenvalue*) koja definiše brzinu faze i stepen slabljenja i karakterističnu funkciju (*eigenfunction*) koja definiše vertikalnu raspodelu energije konkretnog moda. U pojednostavljenom obliku, sredina prostiranja se može smatrati linearnom, homogenom, izotropnom, neprovodnom i bez izvora polja (naelektrisanja i struja), pa se snaga elektromagnetskog talasa u ovoj zapremini definiše vektorima polja  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{H}$  i  $\vec{B}$ . Ti vektori moraju zadovoljavati Maksvelove jednačine (Tab. 3-1) na osnovu kojih se dobijaju Helmholtcove jednačine za električno i magnetsko polje (3.3).

U kompleksnom domenu se za planarni talasovod može napisati:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, y, z, t) &= \vec{E}(x, y) \cdot e^{j(\omega t - kz)} \\ \vec{H}(x, y, z, t) &= \vec{H}(x, y) \cdot e^{j(\omega t - kz)},\end{aligned}\tag{3.65}$$

gde je  $k$  konstanta prostiranja talasa, a prikazane vrednosti jačine električnog ( $\vec{E}$ ) i magnetskog ( $\vec{H}$ ) polja predstavljaju kompleksne veličine.

Na osnovu Faradejevog zakona elektromagnetske indukcije (3. Maksvelova jednačina Tab. 3-1), posmatrajući radio talas koji se prostire u pravcu  $z$  ose, u tački prijema koja leži na  $z$  osi, može se izvesti:

$$\begin{aligned}
 \text{rot} \vec{E} &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} (H_x \vec{i}_x + H_y \vec{i}_y + H_z \vec{i}_z) \\
 \frac{\partial}{\partial z} &\equiv -jk, \quad \frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega, \quad \frac{\partial}{\partial y} \equiv 0 \\
 \vec{i}_x \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) - \vec{i}_y \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) + \vec{i}_z \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) &= -\vec{i}_x \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \vec{i}_y \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \vec{i}_z \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \\
 \vec{i}_x jkE_y - \vec{i}_y \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} + jkE_x \right) + \vec{i}_z \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\vec{i}_x j\mu\omega H_x - \vec{i}_y j\mu\omega H_y - \vec{i}_z j\mu\omega H_z,
 \end{aligned} \tag{3.66}$$

odakle se dobija sistem jednačina:

$$\begin{aligned}
 \vec{i}_x : jkE_y &= -j\mu\omega H_x \\
 \vec{i}_y : -jkE_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\mu\omega H_y \\
 \vec{i}_z : \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -j\mu\omega H_z.
 \end{aligned} \tag{3.67}$$

Na osnovu Amperovog zakona (4. Maksvelova jednačina Tab. 3-1), opet posmatrajući radio talas koji se prostire u pravcu z ose, u tački prijema koja leži na z osi, se dobija:

$$\begin{aligned}
 \text{rot} \vec{H} &= \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (E_x \vec{i}_x + E_y \vec{i}_y + E_z \vec{i}_z) \\
 \frac{\partial}{\partial z} &\equiv -jk, \quad \frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega, \quad \frac{\partial}{\partial y} \equiv 0 \\
 \vec{i}_x \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) - \vec{i}_y \left( \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) + \vec{i}_z \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) &= \vec{i}_x \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \vec{i}_y \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \vec{i}_z \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \\
 \vec{i}_x jkH_y - \vec{i}_y \left( \frac{\partial H_z}{\partial x} + jkH_x \right) + \vec{i}_z \frac{\partial H_y}{\partial x} &= \vec{i}_x j\varepsilon\omega E_x + \vec{i}_y j\varepsilon\omega E_y - \vec{i}_z j\varepsilon\omega E_z,
 \end{aligned} \tag{3.68}$$

što dalje daje sistem jednačina:

$$\begin{aligned}
 \vec{i}_x : jkH_y &= j\varepsilon\omega E_x \\
 \vec{i}_y : -jkH_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\varepsilon\omega E_y \\
 \vec{i}_z : \frac{\partial H_y}{\partial x} &= -j\varepsilon\omega E_z.
 \end{aligned} \tag{3.69}$$

### 3. Prostiranje elektromagnetskih talasa kroz nejonizovanu i jonizovanu sredinu

Na osnovu prethodno izvedenih relacija, mogu se definisati poprečni električni i magnetski (TE i TM) modovi prostiranja talasa za homogenu sredinu (Tab. 3-4). Talasovodni mod se može definisati kao vid prostiranja talasa koji se karakteriše tačno određenom formom polja u projekciji normalnom na putanju prostiranja, dok je forma polja nezavisna od pozicije duž ose talasovoda [47]. Red moda predstavlja broj maksimuma i minimuma u poprečnom vertikalnom obrascu polja.

Tab. 3-4: TE i TM modovi prostiranja radio talasa u planarnom talasovodu.

|                              | <b>TE modovi (<math>E_y, H_x, H_z</math>)</b>                                                                                                   | <b>TM modovi (<math>H_y, E_x, E_z</math>)</b>                                                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Set jednačina</b>         | $jkE_y = -j\mu\omega H_x$ $-jkH_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -j\epsilon\omega E_y$ $\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\mu\omega H_z$ | $jkH_y = j\epsilon\omega E_x$ $-jkE_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\mu\omega H_y$ $\frac{\partial H_y}{\partial x} = -j\epsilon\omega E_z$ |
| <b>Helmholcova jednačina</b> | $\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (\mu\epsilon\omega^2 - k^2)E_y = 0$ $\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + k_x^2 E_y = 0$                | $\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (\mu\epsilon\omega^2 - k^2)H_y = 0$ $\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + k_x^2 H_y = 0$                    |
| <b>Rešenje jednačine</b>     | $E_y = A_E e^{(-jk_x x)} + B_E e^{(jk_x x)}$                                                                                                    | $H_y = A_E e^{(-jk_x x)} + B_E e^{(jk_x x)}$                                                                                                        |

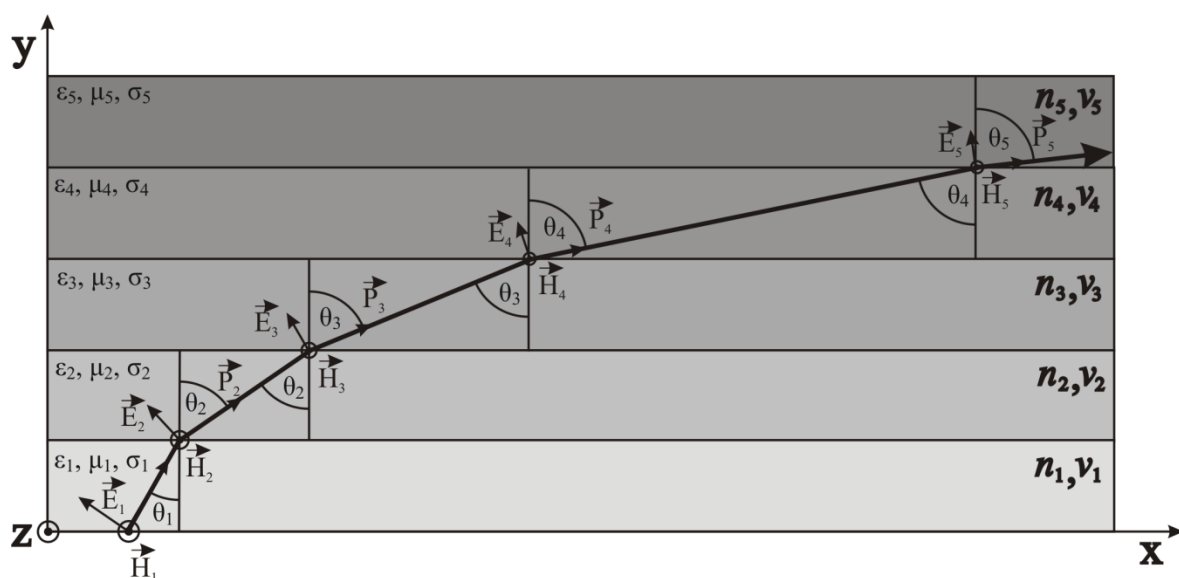
Za nehomogene sredine se u navedenim jednačinama i dielektrična konstanta smatra prostorno zavisnom promenljivom. Rešenja jednačina sa konstantnim koeficijentima imaju po dva partikularna rešenja od kojih jedno predstavlja talas koji se kreće u pozitivnom, a drugo u negativnom smeru x-ose.

#### 3.3.2. Zračna teorija

Zračna teorija je uopšteno jednostavnija za vizualizaciju i analizu karakteristika prostiranja, pošto se koriste principi optičke geometrije. Preduslov korišćenja ove vrste teorije je da se gradijentalna promena elektro-hemijskog sastava sredine u pravcu prostiranja radio talasa, a samim tim i indeks refrakcije ne menja značajno u domenu razdaljine koja je jednaka vrednosti jedne talasne dužine posmatranog radio talasa. Ovaj metod podrazumeva diskretno razvrstavanje talasnog fronta radio talasa na niz zraka koji se refraktuju nailaskom na niz teorijski homogenih horizontalnih slojeva sredine i čija integralna suma na prijemu nakon stepenaste refrakcije i preusmerenja daje resultantno elektromagnetsko polje u posmatranoj tački. Preciznost ove metode u primenama analize prostiranja radio talasa prevashodno zavisi od rezolucije podele prostora promenljive dielektrične konstante na što veći broj homogenih podslojeva sa jednakim dielektričnim konstantama. Ukupan broj refleksija koje radio talas načini prilikom prostiranja od predajnika do prijemnika naziva se redom zračne putanje. Teoretski, postoji beskonačan broj zračnih putanja između predajnika i prijemnika. Pošto su za više redove zračne putanje po kojima se razmatra prostiranje radio talasa podložnije apsorpciji, generalno gledajući, one nemaju značajnog udela u sveukupnom nivou elektromagnetskog polja na prijemu, pa se analiza svodi na ograničen broj zračnih putanja nižeg reda.

Veći deo elektromagnetske energije radio talasa se na udaljenostima od predajnika do 300 km prenosi putem direktnog talasa, površinskog talasa (*surface*) i talasa reflektovanog od zemlje. Sveukupno, ovakav talas se naziva površinskim talasom. Za udaljenosti preko 300 km, dominantan udeo u nivou prijemnog signala ima prostorni talas – reflektovan od jonosfere (*sky-waves*). U zbiru sa površinskim talasima, na mestu prijema se zbog promene faze može javiti slabljenje ili pojačanje nivoa elektromagnetskog polja. Zračna teorija nalaže da je resultantno polje na prijemu suma površinskog talasa i diskretnih komponenata prostornog talasa.

Radio talas čiji je incidentni ugao  $\theta_1$  između Pointingovog vektora  $\vec{P}_n$  i normale na graničnu površinu imaće refraktujuću i reflektujuću komponentu koje se mogu izraziti kroz indeks refrakcije (3.47) i koeficijent refleksije (3.31).



Sl. 3-7: Slojevita parcijalno homogena sredina.

Za prikazanu slojevitu strukturu na Sl. 3-7, sa  $n \in [1, 5]$  slojeva može se analizirati radio talas definisan kroz (3.9)) kod kojeg električna komponenta  $\vec{E}_n$  leži u  $xy$  ravni, magnetska komponenta  $\vec{H}_n$  poklapa sa  $z$  osom i čiji pravac prostiranja sa narednom graničnom površinom u  $y$  osi zaklapa ugao  $\theta_n$ . Pod uslovom da je u pitanju ravanski talas, a slojevi kroz koje se prostire elektromagnetski talas bez izvora magnetskog polja, analiza refrakcije i refleksije se vrši na svakoj graničnoj površini što se može svesti na relativno mali broj jednačina koje opisuju elektromagnetski talas. Efekti na graničnim površinama se manifestuju kroz promenu električne komponente radio talasa, a pošto je magnetska komponenta elektromagnetskog polja normalna na pravac prostiranja (Sl. 3-7), formalno se u ovom primeru posmatra TM talas.

## Refrakcija

S obzirom na jednakost upadnih i izlaznih uglova u okviru jednog sloja, na osnovu Snelovog zakona se može napisati (Sl. 3-7):

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (3.70)$$

gde su  $v_1$  i  $v_2$  brzine prostiranja radio talasa, a  $n_1$  i  $n_2$  indeksi refrakcije u sredinama 1 i 2. U funkciji permitivnosti i permeabilnosti sredine, (3.70) se može napisati kao:

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}}{\sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_1}{\epsilon_1 \mu_2}}, \quad (3.71)$$

dok se indeks refrakcije računa kao količnik brzine svetlosti u vakuumu ( $c=2,998 \cdot 10^8$  km/s) i brzine prostiranja u posmatranoj sredini:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r}. \quad (3.72)$$

#### Refleksija

Koeficijent refleksije  $\rho$  i transmisioni koeficijent  $\tau$  se pod uslovom da su incidentni i reflektujući uglovi isti, mogu definisati kao:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ \tau &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}. \end{aligned} \quad (3.73)$$

Impedanse prve ( $Z_1$ ) i druge ( $Z_2$ ) sredine, respektivno se definišu kao:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \\ Z_2 &= \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}. \end{aligned} \quad (3.74)$$

Za jednake magnetske permeabilnosti prve i druge sredine, koeficijent refleksije  $\rho$  i transmisioni koeficijent  $\tau$  se prema (3.73) i (3.74) mogu napisati u obliku:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \\ \tau &= \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}.\end{aligned}\tag{3.75}$$

## 4. Dijagnostika niske jonosfere VLF/LF radio metodom

U ovom poglavlju će biti predstavljene osnovne hemijske osobine D-sloja jonosfere i vrste iznenadnih jonosferskih poremećaja koje mogu poremetiti stanje ove jonosferske oblasti i koje trenutno predstavljaju aktuelan predmet istraživanja u oblasti astrofizike, geofizike i telekomunikacija. Takođe će biti prikazana i procedura merenja i merna tehnika koja omogućava VLF/LF radio sondiranje na bazi koje su prikupljeni podaci o karakteristikama D-sloja jonosfere u mirnom i poremećenom stanju, kao i osnove simulacije prostiranja VLF/LF radio talasa na osnovu koje se izračunavaju parametri D-sloja jonosfere.

### 4.1. Hemijska svojstva D-sloja jonosfere

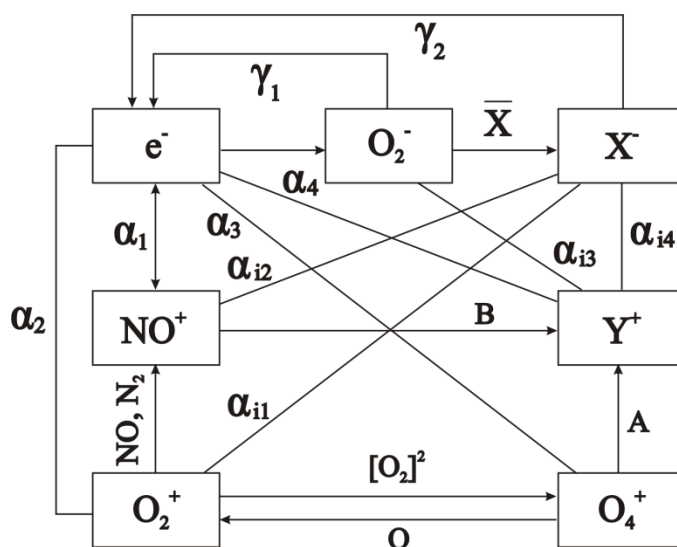
D-sloj jonosfere se nalazi na visinama od oko 50-90 km nadmorske visine. Plazma u ovom prostoru je slabo jonizovana u odnosu na više slojeve jonosfere i formira se u toku dana pod dominantnim uticajem kosmičkog zračenja na visinama ispod 70 km i zračenja Ly $\alpha$  vodonikove spektralne linije (121.567 nm) sa Sunca koje je dominantno u jonizacionim procesima u gornjoj polovini ove oblasti.

Hemijski sastav D-sloja se konstantno menja, kako periodično (dnevno, sezonski i u toku jedanaestogodišnjeg Sunčevog ciklusa), tako i u toku neperiodičnih promena pri čemu intenzitet promena zavisi i od posmatrane geografske lokacije.

Neutralni molekuli koji dominiraju u D-sloju su azot (N<sub>2</sub>), kiseonik (O<sub>2</sub>) i ugljen-monoksid (CO), čija koncentracija opada sa porastom nadmorske visine. Koncentracija ovih molekula se kreće u domenu od  $10^{15} - 10^{23} \text{ m}^{-3}$ , ali je azot-monoksid (NO) molekul koji je u D-sloju zastupljen u koncentraciji  $10^{15} - 10^{17} \text{ m}^{-3}$ , najuticajniiji u procesu jonizacije. Pored NO molekula, značajan udeo u jonizaciji ima i ekscitovan molekul kiseonika (O<sub>2</sub>(<sup>1</sup> $\Delta_g$ )) čija koncentracija se kreće u domenu od  $10^{15} - 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . Ostale vrste neutralnih čestica su molekuli vode (H<sub>2</sub>O) i ozona (O<sub>3</sub>) u koncentracijama  $10^{11} - 10^{13} \text{ m}^{-3}$  i atomi kiseonika (O), vodonika (H) i azota (N) u koncentracijama  $10^{12} - 10^{22} \text{ m}^{-3}$  [48].

Pod normalnim uslovima se na visinama do 70 km nadmorske visine usled kosmičkog zračenja efikasno jonizuju molekuli kiseonika i azota, pa se formiraju joni  $O_2^+$  i  $N_2^+$ . Na višim nadmorskim visinama se pod uticajem  $Ly\alpha$  zračenja jonizuje azot-oksidi i stvaraju  $NO^+$  joni od kojih se dalje, u složenim reakcijama formiraju kompleksniji klaster joni koji predstavljaju dominantne naelektrisane čestice u gornjoj polovini D-sloja. Koncentracija negativnih jona ukupno dostiže koncentracije reda veličine  $10^9 \text{ m}^{-3}$ , dok u dnevnom periodu dana odnos njihove koncentracije i koncentracije slobodnih elektrona značajno opada sa visinom i manji je od jedan iznad 70 km u mirnom stanju [49] i [50].

Pojednostavljena šema interakcije naelektrisanih čestica u D-sloju jonosfere na visini od 70 km, čiji hemijski sastav je vrlo raznolik i otežava analizu reakcija, prikazana je na Sl. 4-1 [51].



Sl. 4-1: Šema interakcije naelektrisanih čestica u D-sloju jonosfere.

Usled vrlo složene čestične strukture, postoje reakcije pozitivnih i negativnih jona međusobno, kao i reakcije jona iste vrste.  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  su rekombinacioni koeficijenti azot-monoksida i kiseonika, respektivno.  $X^-$  su negativni klaster joni od kojih su u najvećem procentu  $NO_3^-(H_2O)_n$ ,  $Y^+$  su pozitivni klaster joni, najvećim delom  $H^+(H_2O)_n$ , a  $\alpha_i$  su koeficijenti neutralizacije. Proces interakcije produkata intenzivne jonizacije D-sloja u toku X-flerova su detaljno opisani u [51].

### 4.2. Iznenadni jonosferski poremećaji (The Sudden Ionospheric Disturbances (SIDs))

VLF/LF radio sondiranjem se može pratiti kako periodična dnevna promena nivoa primanog VLF/LF radio signala, tako i dodatni neperiodični poremećaji koji se pojavljuju slučajno i vrše dodatnu jonizaciju D-sloja. Povećanje proizvodnje elektrona u vremenu zavisi od vrste, intenziteta i trajanja pojave koja doprinosi jonizaciji. Izazvani poremećaji se odražavaju na energetska stanje jonizovane sredine, a neki od njih mogu povećati koncentraciju elektrona i za nekoliko redova veličine [30] i posledično uticati na temperaturne karakteristike jonosfere [52], [53]. Analiza neperiodičnih pojava detektovanih VLF/LF radio dijagnostikom je veoma kompleksna. Obrada prikupljenih rezultata omogućava detekciju intenzivnih promena, ali proces identifikacije pojave koja je dovela do poremećaja stepena jonizacije obuhvata proceduru pronalaženja korelisanosti sa drugim detektorima iste pojave (npr. promena fluksa X-zračenja na satelitu). Ovi poremećaji mogu vrlo često poticati iz izvora sa Zemlje čija pojava, manifestacija, efekti koje proizvode i detekcija nisu do sada u potpunosti ustanovljeni. Prirodno generisani elektromagnetski signali kao što su na primer efekat munja, aurora i Zemljine magnetosfere neiscrpan su predmet istraživanja širom sveta u poslednje vreme.

Periodične promene u stepenu jonizacije D-sloja jonosfere mogu biti dnevne, sezonske i promene u toku Sunčevog ciklusa [54] i [55]. Nasuprot ovim periodičnim promenama, iznenadne promene u intenzitetu zračenja izvora sa Sunca ili u kosmosu, mogu se manifestovati kroz iznenadnu promenu koncentracije elektrona. Kada energetski front Sunčevih flerova ili nekih drugih izvora kosmičkog jonizujućeg zračenja (npr.  $\gamma$ -bljeskova) pristigne u područje Zemljine granične atmosfere, stepen jonizacije se značajno poveća što dovodi do značajnog porasta koncentracije elektrona i jona u svim oblastima jonosfere. Termin iznenadni jonosferski poremećaji (SIDs) se koristi za pojave intenzivne jonizacije koja traje od nekoliko sekundi, do nekoliko minuta nakon čega se koncentracija elektrona nakon ove apsorpcije energije, a posle prestanka izvora vrati u stacionarno – normalno stanje. SIDs je generalno moguće detektovati putem pojava kao što su [47], [56] i [57]:

- kratkotrajni fedinzi (*Short Wave Fadeout* – SWF),

- iznenadne fazne anomalije (*Sudden Phase Anomaly – SPA*),
- iznenadne devijacije frekvencije (*Sudden Frequency Deviation – SFD*),
- iznenadne apsorpcije kosmičkog šuma (*Sudden Cosmic Noise Absorption – SCNA*),
- iznenadan porast ili smanjenje atmosfera (*Sudden Enhancement/decrease of Atmospherics – SEA*).

Efekat pojave kratkotrajnog fedinga je najuočljiviji kod prostiranja radio talasa HF opsega, jer se manifestuje kroz iznenadnu apsorpciju i slabljenje nivoa električnog polja na mestu prijema komunikacionih sistema zbog povećane koncentracije elektrona u niskoj jonosferi. U većini slučajeva je kao rezultat ove pojave onemogućena komunikacija što traje od nekoliko minuta do nekoliko sati pri čemu može doći do potpunog iščezavanja (*blackout*) nivoa signala na mestu prijemne antene u celom HF opsegu. Intenzitet ove vrste poremećaja zavisi od intenziteta fluksa X-zračenja, Sunčevog zenitnog ugla i početnih uslova u niskoj jonosferi.

Izenadne fazne anomalije predstavljaju značajne promene u fazi između predajnog i prijemnog signala koje nastaju zbog iznenadne promene visine refleksije radio signala. Ove anomalije se karakterišu naglim porastom u fazi (u 1-5 min) i sporim povratkom u stari režim (od 30 minuta do 3 sata) i fazne promene od 30-60 stepeni za flerove srednjeg intenziteta [47]. Fazne varijacije su korelisane sa vremenskom promenom Sunčevog X-flera i sa konstantnim kašnjenjem odziva [58].

Intenzivne devijacije frekvencije primanog radio signala odlikuju se iznenadnim porastom frekvencije viših frekvencijskih opsega koji se reflektuju od E i F sloja. Devijacija frekvencije može da se ispolji kroz nekoliko vršnih promena gde neke mogu biti i negativne. Trajanje promene je do 1 minut, dok je promena vrednosti frekvencije do pola Hz [59]. Uopšteno, ove devijacije se događaju gotovo istovremeno sa naglim porastom koncentracije elektrona u E i F sloju.

Izenadna apsorpcija kosmičkog šuma koja nastaje u jonosferi je iznenadno smanjenje u snazi kosmičkog šuma merenog na površini zemlje posle kojeg sledi postepeno vraćanje u stacionarni režim, a povezano je sa Sunčevim poremećajima. Generalno, postoje tri tipa:

- malog intenziteta i kratkotrajno,
- srednjeg intenziteta i relativno dugo i
- velikog intenziteta i dugo

Najveći udeo apsorpcije potiče iz D i F2 sloja [60].

Iznenadan porast ili smanjenje atmosfera događa se kada naglo poraste broj detektovanih atmosfera, a uslovljeno je Sunčevim zračenjem u opsegu X-zračenja koji omogućavaju promenu uslova refleksije specifičnih opsega frekvencija u jonosferi. Događaju se u opsegu između 10 i 75 kHz [61], kao i ispod 1 kHz. Takođe je i iznenadno smanjenje atmosfera primećeno u opsegu između 1 i 10 kHz.

Dodatno, pojava naglog porasta TEC-a je prevashodno uslovljena porastom koncentracije elektrona u F sloju, gde jonizacija nastaje primarno zbog iznaneđenog UV zračenja [62]. Danas se parametri prostiranja radio talasa za vezu sa satelitima mogu pratiti pomoću GPS prijemnika koji omogućavaju dvodimenzionalnu predstavu jonosferskog TEC [63] i [64].

Pored Sunčevih flerova koji su opisani u 2. poglavlju, u ovom delu disertacije će biti iznete karakteristike poremećaja u D-sloju jonosphere uzrokovanih od strane nekoliko drugih izvora.

##### 4.2.1. Munje

Većina prirodnih radio emisija u VLF frekvencijskom području koja je generisana sa Zemlje nastaje u troposferi za vreme munja prilikom kojih nastaje spektar elektromagnetskih talasa u domenu od nekoliko Hz do frekvencija  $\gamma$  zračenja, sa maksimumom energije skoncentrisane u domenu ELF/VLF opsega [65], [66] i [67].

Direktni uticaj pojave munja na nivo prijemnog VLF radio signala ispoljava se u vremenskom intervalu od 20 do 100 ms, potiče od oslobađanja energije munje i naziva se „rani/brzi“ VLF poremećaj [68]. Ova vrsta poremećaja koju munja direktno izaziva se dešava usled naglog zagrevanja i jonizacije niske jonosphere intenzivnim elektromagnetskim emitovanjima-impulsima koji svojom ogromnom vrednošću elektromagnetske energije vrše direktan uticaj iz oblasti troposphere u kojoj nastaju na donji sloj jonosphere [69], [70] i [71].

Indirektna smetnja kod detekcije nemodulisanih nosilaca emitovanih sa VLF predajnika potekla od pojave munja je za razliku primanog signala širokopojasna i prostire se u okviru Zemlja-jonosfera talasovoda sa vrlo malim slabljenjem [72]. Ovu vrstu prirodno generisane radio emisije u literaturi poznate pod nazivom atmosferici – sferici moguće je detektovati na vrlo udaljenim lokacijama. Sferici se detektuju kao oštra pucketanja u čujnom području frekvencija, nakon prijema i pojačanja u VLF prijemniku. U slučaju prostiranja kroz Zemlja-jonosfera talasovod, sferici disperziju prostirući se kroz nehomogenu sredinu što dovodi do nejednakih brzina prostiranja komponenata elektromagnetskog talasa. Generisani VLF talasi nižih frekvencija prostiru se sporije od onih na višim frekvencijama i pri tome proizvode tvikove – u čujnom frekvencijskom području identifikovane kao brzi audio „rikošeti“. Deo energije ovih talasa može prodreti do magnetosfere, kojom se duž magnetskih silnica prostiru ka suprotnoj hemisferi i posle disperzije koja je još intenzivnija od one kod pojave tvikova, na vrlo velikoj udaljenosti se može detektovati klizeći ton koji je poznat kao zvižduk (*whisler*) [73].

#### 4.2.2. Gama bljeskovi

Gama ( $\gamma$ ) bljeskovi su iznenadne emisije fotona  $\gamma$ -zraka koje se dešavaju usled kratkotrajnih ekstremno energetski bogatih eksplozija u udaljenim galaksijama. Tipično trajanje gama bljeskova je od milisekunde do nekoliko sekundi. Za sada vlada uverenje da se najveći udeo detektovanih  $\gamma$ -bljeskova događa zbog aktivnosti supernova gde se brzorotirajuća velika zvezda pretvori u crnu rupu ili zbog spajanja para neutronske zvezde [74] i [75].

Moćni  $\gamma$ -zruci menjaju električnu provodljivost jonosfere i proizvode detektabilne poremećaje u amplitudi i fazi VLF signala. Proračuni različitih istraživanja koja su se bavila uticajem gama zraka na život na Zemlji pokazuju da kada bi se desila eksplozija obližnje zvezde u galaksiji i gama bljesak pogodio Zemlju u trajanju 10 sekundi, bila bi uništena polovina ukupnog ozona u ozonskom omotaču, a celokupan živi svet na Zemlji bi iskusio ogroman intenzitet zračenja u više različitih energetskih domena čime bi bio izazvan pomor živog sveta na Zemlji [76] i [77].

Prvi registrovani VLF odziv na  $\gamma$ -bljesak je detektovan 1983. godine što je prikazano u [78], dok je najjači  $\gamma$ -bljesak do sad je detektovan 27. decembra 2004. [79] čija

manifestacija je detektovana kao sniženje nivoa merenog VLF signala za 20 dB. Ovaj gama bljesak je bio toliko intenzivan da je izvršio jonizaciju atmosfere do visine od 20 km u trajanju od nekoliko sekundi. Pored detektovanih dugotrajnih reakcija VLF radio signala u toku radio sondiranja D-sloja jonosfere, studija prikazana u [80] je potvrdila i kratkotrajne reakcije amplitude na pojavu  $\gamma$ -bljeska.

##### 4.2.3. Upadi meteora

Prodirući velikom brzinom kroz Zemljinu atmosferu, meteori trenjem sa neutralnim molekulima konvertuju kinetičku energiju u potencijalnu koja proizvodi dodatnu jonizaciju u jonosferi i na taj način se stvaraju takozvani jonizovani repovi na visinama od 80-120 km. Ovaj vid iznenadne jonizacije u toku trajanja meteorskih „pljuskova“ može poticati od vrlo mnogo pojedinačnih izvora (čak i do milion detekcija), vrlo kratko traje i energija koja dovodi do jonizacije brzo disperzuje, tako da ova nehomogenost u koncentraciji elektrona nestaje u vrlo kratkom vremenskom intervalu [81].

##### 4.2.4. Zemljotresi

Uticaj na jonosferu može, pored pojava koje se dešavaju u neposrednom i udaljenom kosmosu, biti ispoljen i sa Zemlje. Pojave kao što su vulkanske erupcije, zemljotresi, nesvakidašnji meteorološki uslovi i ljudska delatnost mogu izazvati atmosferske gravitacione talase u troposferi i stratosferi i na taj način izazvati poremećaje u niskoj jonosferi [82]. Kako istraživanja pokazuju, postoje indicije da zemljotresi ispoljavaju uticaj na jonosferu i pre nego što se dogode [83] i na taj način se praćenjem poremećaja u jonosferi može i predvideti nastanak zamljotresa, a posredno predvideti i prognozirati nastanak cunamija [84].

##### 4.2.5. Putujući jonosferski poremećaji

Putujući jonosferski poremećaji (TIDs) su talasni poremećaji jonosferske plazme na ogromnim područjima, talasnih dužina od 100 – 1000 km, vremeskog trajanja jedan sat i više, a nastaju u periodima od nekoliko minuta do jednog sata. Brzina prostiranja im je od 50 – 1000 m/s i smatraju se snažnim i srednje snažnim perturberima. Potiču od snažnih geomagnetskih oluja i putuju prevaljujući velike udaljenosti, a intenzivne poremećaje

proizvode u auroralnim zonama. Srednje snažni poremećaji nastaju lokalno, u stratosferi i troposferi i ne prostiru se preko velikih udaljenosti. Talasne dužine se kreću u opsegu od 100-200 km, a periodi trajanja su od 5 do 45 minuta. Primeri putujućih jonosferskih poremećaja su atmosferski gravitacioni talasi [85].

### 4.3. Radio sondiranje D-sloja jonosfere

Prikupljanje podataka o karakteristikama jonosfere vrši se različitim metodama koje zavise od posmatrane nadmorske visine. Najčešće korišćene tehnike koje se koriste za sondiranje slojeva jonosfere su raketna i radarska merenja, kao i satelitska i merenja putem meteoroloških balona opremljenim adekvatnim senzorima. Raketna merenja su ograničavajuća u pogledu posmatranog perioda i prostora u kome se sprovodi merenje [86], [87] pa nisu adekvatna za detekciju neperiodičnih poremećaja karakteristika jonosfere. Radarska merenja se sprovode metodama nekoherentnog rasejanja [88] i parcijalne refleksije [89] i omogućavaju kontinuirano praćenje promena karakteristika jonosferskih oblasti. Radio metodom sondiranja D-sloja jonosfere [42] koja je korišćena u prikazanom istraživanju se na bazi kontinuirano merenih promena amplitude i faze VLF/LF radio signala emitovanih prostorno raspoređenim zemaljskim predajnicima prikupljaju podaci o ovoj jonosferskoj oblasti na celokupnoj putanji prostiranja radio talasa.

VLF i LF radio talasi obuhvataju opseg frekvencija od 3 – 30 kHz, odnosno 30 – 300 kHz, respektivno, odakle proizilazi da se talasne dužine VLF i LF talasa zajedno nalaze u domenu od 100 do 1 km. Pored mogućnosti razmene podataka u vidu efikasnog načina komunikacije sa udaljenim korisničkim terminalima lociranim na podmornicama u vojnim telekomunikacionim i sistemima za globalno pozicioniranje [90], [91], specifičnosti prostiranja ove vrste radio talasa omogućavaju kontinuirano „sondiranje“ niske jonosfere, tj. praćenje promena u stepenu jonizacije kako u mirnom stanju, tako i u prisustvu neperiodičnih poremećaja izazvanim različitim kosmičkim i uzrocima poteklim sa Zemlje. Radio-komunikacioni sistem u ovom slučaju predstavljaju predajnik i prijemnik sa svojim antenskim sistemima i prirodni talasovod (Sl. 3-6). Ovaj prirodno formiran talasovod (promenljiva elipsoidna ljuska oko Zemlje) svojim karakteristikama omogućava gradijentalnu refrakciju i višestruku refleksiju VLF radio talasa emitovanih sa Zemlje unutar zapremine od aproksimativno  $4,65 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$  ukoliko se najviša zona refleksije radio signala

nalazi na visini D-sloja jonosfere od 90 km. Efekat refleksije je značajan i praktično upotrebljiv za frekvencijska područja radio signala do frekvencija reda nekoliko desetina MHz, a zavisi od trenutnih prostorno-vremenskih uslova stepena jonizacije. Karakteristike plazme D-sloja jonosfere su vremenski promenljive i zavise od različitih izvora poremećaja kao što su X-flerovi [92], [93], pomračenje Sunca [94], munje [95] i dosta retka i još nedovoljno istražena hidrodinamička kretanja [96].

Prilikom prostiranja kroz sredinu u kojoj postoje neregularnosti i kod koje je slojevitost svedena na pojaseve približno homogenih struktura, prostiranje radio talasa ovog frekvencijskog opsega može poslužiti za detekciju gradijentne promene koncentracije elektrona jonosferskih podslojeva D-sloja. Kao što je objašnjeno u 2. poglavlju, koncentracija elektrona se konstantno menja pod uticajem značajnih jonizujućih zračenja i u skladu sa čestičnom strukturom oblasti. Povećanjem visine se intenzitet jonizujućih zračenja iz kosmosa povećava, ali sredina se strukturno razređuje čime se smanjuje ukupan broj čestica koje se mogu jonizovati. Tako svaka oblast specifične koncentracije slobodnih naelektrisanih čestica može biti posmatrana kao sredina koja u datom trenutku ima mogućnost uticaja na prostiranje radio talasa odgovarajućih frekvencijskih opsega.

Metoda VLF radio dijagnostike se koristi za praćenje promena i posredno računanje koncentracije elektrona u D-sloju jonosfere u toku mirnog stanja i za vreme poremećaja. Ostale metode merenja, kao što su raketna i radarska merenja [97] i [98], praktično su upotrebljive za merenja na određenim lokacijama, pokrivajući jonosfersko područje iznad merne tačke. Merenje radio sondiranjem sa satelita nije primenjivo zbog većih elektronskih koncentracija iznad D-sloja zbog čega se refleksija radio talasa pogodnih za dijagnostiku ovog dela jonosfere događa na većim visinama. Satelitski radio signali u mikrotalasnom frekvencijskom opsegu detektovani na površini zemlje nose integralnu informaciju o atmosferi između satelita i mesta prijema, tako da se na ovaj način ne mogu parcijalno izmeriti karakteristike D-sloja. Postoje i merenja atmosferskih parametara, kao i efekata koji dovode do jonizacije u D-sloju pomoću meteoroloških balona [99], ali je sprovođenje ovog metoda merenja ograničeno samo do visina od otprilike 25-30 km.

U oblasti istraživanja fizičko-hemijskih procesa koji se događaju u jonosferskom D-sloju do sada je najviše podataka dobijeno posredno, radio sondiranjem. Na osnovu konstantnih merenja koje pruža radio metoda sondiranja, moguće je detektovati i

konsekventno predvideti mnoge prirodne fenomene, kao što su u poslednje vreme vrlo zastupljeni u istraživanjima kratkotrajni impulsi energije u olujnim oblacima (*Narrow Bipolar Events* – NBE) [100], [101], akustički gravitacioni talasi u atmosferi [102], kao i jonosferski poremećaji koji prate seizmičke aktivnosti i ciklone koji će detaljnije biti opisani u okviru ovog poglavlja. S obzirom na to da se provodnost i permitivnost Zemljine površine ne menja značajno u vremenskom prozoru u kojem nastupe značajne promene elektronske koncentracije D-sloja, u realnom vremenu je moguće „oslušivati“ niz efekata koji dovode do poremećaja u koncentraciji elektrona.

U opštoj, makroskopskoj analizi se jonosfera posmatra kao hladna nehomogena i anizotropna plazma čija se svojstva neprestano menjaju pod uticajem najrazličitijih pojava čiji izvori mogu poticati sa Zemlje ili iz kosmosa. S obzirom na to da su slojevi jonosfere vrlo različitih čestičnih sastava, uticaj kosmičkih i zemaljskih pojava na jonosferu i efekti koje ona ispoljava se ne mogu integralno posmatrati. Praktično je jedino raketnim merenjima moguće tačno izmeriti koncentraciju elektrona i njenu visinsku raspoređenost. Sa druge strane, u teorijskom razmatranju se Zemljina površina može smatrati homogenom sredinom konstantne provodnosti  $\sigma$ , permeabilnosti  $\mu$  i permitivnosti  $\varepsilon$ , sve dok je ova homogenost podrazumevana do dubine reda vrednosti talasne dužine posmatranog radio talasa. Za modelovanje prostiranja VLF/LF radio talasa, ovaj uslov se može smatrati zadovoljenim na definisanim kompenim i morskim područjima kod kojih se električna provodnost može smatrati približno jednakom.

Vrednost indeksa refrakcije (3.61) za VLF radio talase u jonosferi je kompleksan, sadrži reflektujući i apsorpcioni član i zavisi od karakteristika lokalne sredine i smera prostiranja talasa uzimajući u obzir geomagnetsko polje Zemlje. Zahvaljujući efektima magnetskog polja i prisustva apsorpcije zbog sudara jona sa molekulima vazduha, indeks refrakcije praktično ne dostiže nulu nigde u D-sloju, tako da se totalna refleksija nikada ne događa, već znatna parcijalna refleksija. Parcijalna refleksija nastaje na mestima gde se indeks refrakcije intenzivno menja na prostorima čije su dimenzije uporedive sa talasnom dužinom i ta regija se ponaša kao granica između dve različite sredine prostiranja. Numerički, ovo važi za delove jonosfere gde važi [103]:

$$\omega \approx \frac{\omega_p^2}{\nu}. \quad (4.1)$$

$\omega_p$  predstavlja ugaonu plazmenu frekvenciju,  $\omega$  ugaonu frekvenciju radio talasa, dok je  $\nu$  efektivna koliziona frekvencija elektrona sa teškim česticama.

Tipičan izraz za računanje elektronske koncentracije, baziran na ovom modelu i vrlo često korišćen u proračunima dat je kroz relaciju [104]:

$$N_e(h, t) = 1,43 \cdot 10^{13} e^{-\beta(t)H'(t)} e^{(\beta(t)-0,15)h} \text{ [cm}^{-3}\text{]}, \quad (4.2)$$

gde je  $N_e$  koncentracija elektrona,  $H'$  [km] je efektivna visina refleksije i  $\beta$  [km<sup>-1</sup>] je „oštrina“ (nagib) profila. Vrednost ovih parametara se računa numeričkom procedurom koja je bazirana na poređenju merenih promena amplitude i faze VLF radio signala sa parametrima dobijenim pomoću LWPC simulacionog numeričkog modela [105], [106] i omogućava računanje kao što je prikazano u [107], [92] i [108]. Postoji mnoštvo različitih metoda za računanje koncentracije elektrona koje su bazirane na tehnikama merenja od kojih su neke preciznije od drugih, ali u domenu kontinuiranog merenja ograničavajuće, dok druge omogućavaju vrlo visoku vremensku rezoluciju merenja, ali daju nepreciznije rezultate [109], [110], [111] i [112].

Kada su pobuđeni energijom elektromagnetskog talasa, slobodni elektroni apsorbuju pobuđene fotone i njihova kinetička energija raste, povećavajući oscilovanje i haotično kretanje ovih čestica. Usled ovog prinudnog oscilovanja, dolazi do povećanja broja sudara sa okolnim česticama i deo energije koju ovi elektroni poseduju predaje se okolnoj sredini što dovodi do slabljenja energije radio talasa koje se može prikazati kroz konstantu slabljenja (3.59). Numerički se srednji broj sudara u jedinici vremena može opisati vrednošću kolizione frekvencije (3.48) uzimajući u obzir brzine kretanja čestica koje se sudaraju, kao i njihove putanje kretanja pre i posle sudara. Ovaj složeni problem određivanja tačnih vrednosti kolizione frekvencije se praktično svodi na veći broj modela za konkretne slučajeve vezane za sastav posmatranog dela jonosfere [42]. Vrednost kolizione frekvencije raste sa povećanjem broja slobodnih elektrona po jedinici zapremine i zavisi od molekulskog sastava posmatranog sloja jonosfere.

U literaturi postoje različiti profili koji opisuju promenu kolizione frekvencije sa visinom za elektron-neutral slučajeve, pozitivni jon – neutral slučajeve i negativan jon – neutral slučajeve. Kao primer se mogu navesti [103], [113]:

$$\nu_e(h) = 1.816 \cdot 10^{11} e^{-0.15h} [\text{s}^{-1}] \quad (4.3)$$

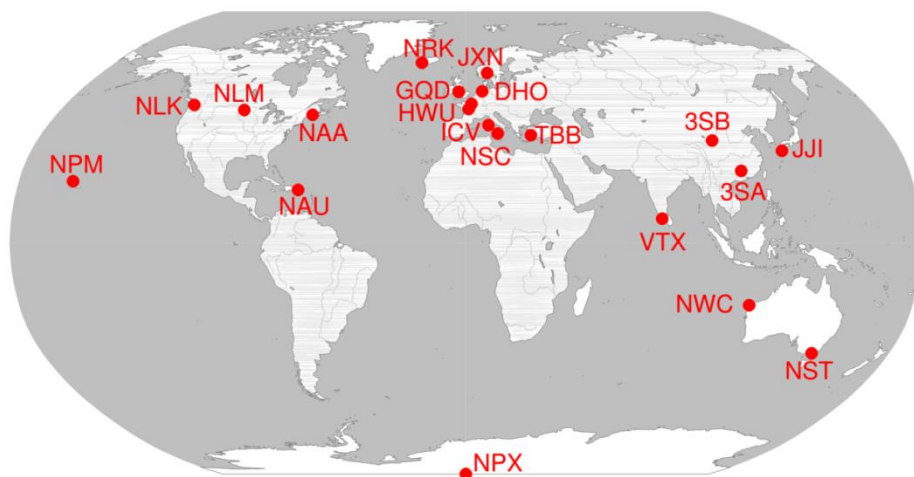
$$\nu_+(h) = 4.540 \cdot 10^9 e^{-0.15h} [\text{s}^{-1}] \quad (4.4)$$

$$\nu_-(h) = 4.540 \cdot 10^9 e^{-0.15h} [\text{s}^{-1}] \quad (4.5)$$

U navedenim formulama je  $h$  [km] nadmorska visina, a eksponencijalno opadanje kolizije frekvencije sa visinom važi do nadmorskih visina 100-110 km. Nakon toga se koriste Kelly profili za kolizionu frekvenciju [114].

#### 4.4. Eksperimentalna postavka

Tehnika radio sondiranja D-sloja jonosphere bazira se na kontinualnom merenju nivoa amplitude i vrednosti faze VLF/LF radio signala. Na bazi kontinuiranih merenja, uz pomoć modela prostiranja realizovanog kroz LWPC program čija funkcionalnost će biti objašnjena u nastavku, dobija se prostorno-vremenska raspodela koncentracije elektrona D-sloja jonosphere. Ova tehnika omogućava modelovanje raspodele koncentracije elektrona D-sloja jonosphere u toku intenzivnih poremećaja izazvanih različitim pojavama sa Sunca, Zemlje i iz kosmosa.



Sl. 4-2: Prostorni raspored VLF/LF predajnika.

Prostorni raspored predajnika signala VLF i LF opsega frekvencija je prikazan na Sl. 4-2. Prijemnikom stacioniranim na Institutu za fiziku u Zemunu se od 2008. godine kontinuirano prate promene radio signala poteklih sa predajnika predstavljenih u Tab. 4-1.

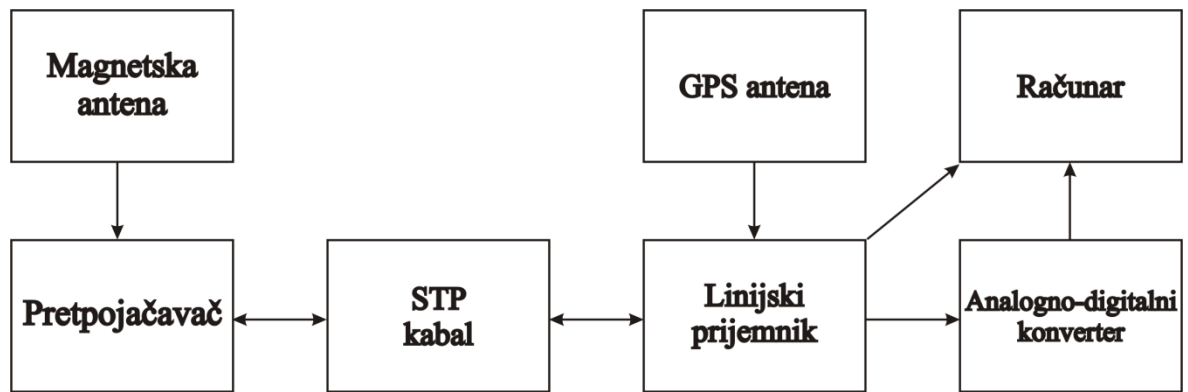
Tab. 4-1: Pregled praćenih VLF/LF predajnika.

| <b>Predajnici čiji se nivo prijemnog signala kontinuirano meri na Institutu za fiziku u Zemunu</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DHO (Nemačka)                                                                                      |
| ICV (Italija)                                                                                      |
| NSC (Italija)                                                                                      |
| GQD (Velika Britanija)                                                                             |
| NRK (Island)                                                                                       |
| NAA (SAD)                                                                                          |
| NWC (Australija)                                                                                   |

Kako se dosadašnjim iskustvom pokazalo, zbog dužine trase (1304 km) i izlazne snage (800 kW) predajnik DHO lociran u Rauderfenu (Nemačka) je najreferentniji za praćenje promena parametara talasovoda između ove dve lokacije.

Za potrebe istraživanja predstavljenih u ovoj tezi su korišćeni AbsPAL (*Absolute Phase and Amplitude Logger*) i AWESOME (*Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modelling and Education*) prijemnici od kojih drugi pripada međunarodnoj mreži prijemnika Stanford/AWESOME. Pored ove mreže, poznate su i AARDDVARKK (*Antartic-Artic Radiation-belt (Dynamic) Deposition – VLF Atmospheric Research Consortium*) i SAVNET (*South America VLF NETwork*) koje su do sada dale veliki doprinos boljem shvatanju procesa koji se događaju u niskoj jonosferi.

S obzirom na sve veću popularnost geofizike i astrofizike u domenu „osluškivanja“ prirodnih pojava koja dovode do poremećaja u jonosferi i dostupnost tehnoloških rešenja koja omogućavaju merenja pristupačnom i dostupnom opremom, merenja nivoa prijemnog VLF i LF signala je sa određenim nivoom tačnosti moguće sprovoditi korišćenjem jednostavnih hardverskih komponenata – personalnim računarom opremljenog zvučnom karticom, adekvatnom antenom i prigodnim softverom. U nastavku će biti predstavljene osnovne funkcionalnosti korišćenog AWESOME VLF prijemnika za frekvencijski opseg od 300 Hz do 30 kHz [115] čija je blok šema predstavljena na Sl. 4-3.



Sl. 4-3: Blok šema AWESOME VLF prijemnika.

Antena AWESOME prijemnika je sastavljena od dve nezavisne okvirne antene normalno postavljene jedna u odnosu na drugu, prilagođene za komponentu vektora magnetske indukcije radio talasa usmerene normalno na površinu koju opisuje kalem kabla od kojeg je okvir antene napravljen.

Nivo termalnog šuma indukovano u anteni izražen kroz elektromotornu silu  $E_a$  zavisi od otpornosti ( $R_a$ ):

$$E_a = (4kTR_a)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.6)$$

gde je  $k$  Bolcmanova konstanta, a  $T$  apsolutna temperatura. Antena korišćena u eksperimentu ima dvanaest namotaja ukupne dužine 75,3 m koji obrazuju jednakokraki trougaoni okvir osnove 2,6 m, visine 1,3 m čiji su kraci pod uglom od  $45^\circ$ , što daje efektivnu površinu okvira od  $1,69 \text{ m}^2$ .

Nivo šuma indukovan u anteni se u slučaju osetljivosti antene posmatra kao referentan prilikom određivanja intenziteta vektora magnetske indukcije radio talasa. Napon ( $V_a$ ) indukovan vektorom magnetske indukcije radio talasa intenziteta  $B$ , ugaone frekvencije  $\omega$  u navojcima antene površine  $A_a$  i broja navojaka  $N_a$  se izračunava kao:

$$V_a = j\omega N_a A_a B. \quad (4.7)$$

Ukoliko se izjednače (4.6) i (4.7) za vrednost nivoa šuma u frekvencijskom opsegu od 1Hz i napona indukovano u anteni, može se izračunati  $B_n$ :

$$B_n = \frac{(4kTR_a)^{\frac{1}{2}}}{N_a A_a j \omega}. \quad (4.8)$$

Osetljivost magnetske antene  $S_a$  koja ne zavisi od frekvencije radio signala se dobija normalizacijom vrednosti  $B_n$  za napon indukovani šumom  $V_a$  sa  $\omega/2\pi$ :

$$S_a = \frac{\omega}{2\pi} \cdot B_n = \frac{(4kTR_a)^{\frac{1}{2}}}{2\pi N_a A_a}. \quad (4.9)$$

Otpornost antene je  $1 \Omega$ , a induktivnost  $1 \text{ mH}$ . Za navedene vrednosti parametara antene, koristeći izraz (4.7) i ukoliko je intenzitet vektora magnetske indukcije na mestu antene  $1 \text{ pT}$  i frekvencija VLF radio talasa  $23,4 \text{ kHz}$ , može se dobiti vrednost indukovanog napona intenziteta  $\sim 3 \mu\text{V}$ .

Malošumni pretpojačavač [116] je formiran od prilagodnog transformatora sa funkcijom prilagođenja impendanse antene i ulaznog stepena pretpojačavača i malošumnog pojačavača prilagođenog za LF/VLF opseg frekvencija, a napajan je jednosmernim naponom od  $15 \text{ V}$  preko četvoroparičnog oklopljenog bakarnog kabla (*Shielded Twisted Pairs* – STP) BELDEN 1217B [117]. Izlazna snaga pretpojačavača je oko  $1 \text{ W}$ , a sa antenom je povezan kratkim koaksijalnim kablom.

Linijski prijemnik ima funkciju obrade primljenih signala sa pretpojačavača i sa podacima sa dodatno integrisanog GPS prijemnika i antene Motorola M12+ OnCore [118] prosleđuje merene analogne podatke i taktni signal ka računaru preko serijskih interfejsa radi digitalizacije. Naponski podesiv oscilator (*Voltage Controlled Oscillator* – VCO) održava sinhronizaciju zahvaljujući GPS podacima i generiše stabilan signal frekvencije  $10 \text{ MHz}$ . Postavljanje prijemnika na konkretne prijemne frekvencije obavlja se putem brojača i delitelja (*Complex Programmable Logic Device* – CPLD).

Analogno-digitalna kartica je PCI kartica (*National Instruments Data Acquisition* – Ni-DAQ) u okviru računara koja vrši digitalizaciju po moguća tri kanala sa frekvencijom odabiranja od  $100 \text{ kHz}$  i  $16 \text{ bita}$  rezolucijom. Ovo omogućava količinu prikupljenih podataka od  $687 \text{ MB/h}$  po jednom kanalu što je za praktične potrebe istraživanja kratkotrajnih pojava uticajnih na promenu koncentracije elektrona u D-sloju jonosfere kao

što su npr.  $\gamma$  bljeskovi neophodno, dok se vremenska rezolucija snimanja za relativno duge poremećaje može smanjiti na dovoljnih 1 sekund. Detaljniji opis prijemnika dat je u [115].

### 4.5. Simulacija prostiranja VLF/LF radio talasa

Da bi se adekvatno odredila koncentracija elektrona, u upotrebi su dva različita numerička simulaciona modela koji se zasnivaju na modalnoj teoriji određivanja karakteristika prostiranja radio talasa – LWPC [119] i ModeFinder [113]. U ovoj disertaciji je korišćen LWPC programski paket.

Osnovna praktična upotrebna vrednost LWPC programa ogleda se u mogućnosti predikcije nivoa elektromagnetskog polja VLF radio signala i prezentacije u vidu geografskih mapa pokrivenosti. Kod modalne teorije na kojoj se zasniva rad LWPC softvera, TE i TM modovi se mogu zasebno razmatrati i računati za izotropnu sredinu talasovoda kako je to prikazano u poglavlju 3. U slučaju D-sloja jonosphere koja pogotovo u toku noći može da se smatra anizotropnom plazmom pod uticajem magnetskog polja, ovi modovi se moraju kombinovati na gornjoj graničnoj površini u  $2 \times 2$  matricu gde je svaki element matrice jedan od četiri različita koeficijenta refleksije za svaki specifičan incidentni i reflektovani TE i TM mod. Donja granična površina talasovoda je zemlja, koja se može smatrati izotropnom, pa su kros-polarizacioni koeficijenti reflektovanih modova u okviru matrice jednaki nulama [120]. Za simulaciju prostiranja upotrebom LWPC softvera korišćenom za dobijanje podataka u ovoj disertaciji su vrednosti provodnosti zemlje korišćene sa mape Geofizičke laboratorije „Westinghaus“ (*Westinghouse Geophysics Laboratory*) [121], a promena jonosphere se analizirala u toku vidnog dela dana. Na velikoj udaljenosti od predajnika najveći udeo u ukupnom nivou elektromagnetskog polja praktično ima konačan broj neoslabljenih modova, dok je za kraće udaljenosti od predajnika teže primenjivati modalnu teoriju usled manje efikasnosti i kompleksnosti analitičkog i numeričkog dolaženja do rešenja Maksvelovih jednačina. U tom slučaju u ukupnom nivou elektromagnetskog polja značajan udeo čine i oslabljeni modovi.

LWPC program čine četiri povezana potprograma – LWPM (*Long Wave Propagation Model*), geografski model, modelovanje atmosferskog šuma i grafički potprogram. Baziran je na modalnoj teoriji prostiranja radio talasa VLF/LF opsega frekvencija čije su osnove

prikazane u 3. poglavlju i bazično je koncipiran na modelu prikazanom u [103]. Numerička procedura koja je implementirana u okviru programa omogućava dobijanje parametara potrebnih za izračunavanje raspodele koncentracije elektrona (4.2) po nadmorskim visinama. Osnovni model prostiranja LWPM modeluje raspodelu provodnosti homogenih podslojeva D-sloja koja eksponencijalno raste sa porastom nadmorske visine. Ulazni parametri programa su „oštrina“ (*slope-sharpness* -  $\beta$ ) i referentna visina refleksije ( $H'$ ), a izlazni parametri simulacije su amplituda i faza VLF/LF radio signala čija će praktična upotreba biti objašnjena u 5. poglavlju.

Putanja prostiranja simuliranog VLF radio talasa je inicijalno izdvojena na niz horizontalno homogenih segmenata, a raspodela parametara segmenata je određena promenama u jonosferi, provodnošću zemljišta, geomagnetskim poljem i geografskim koordinatama predajnika i prijemnika. Segment programa čiji izlazni podaci predstavljaju osnovu za modelovanje uslova prostiranja radio talasa korišćen je za dobijanje podatka o raspodeli koncentracije elektrona po nadmorskim visinama i u vremenu u toku trajanja Sunčevog X-flera.

## **5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom**

U ovom poglavlju je prikazana studija bazirana na dva aspekta analize prostiranja radio talasa. S jedne strane je prikazana primena u dijagnostici poremećaja jonizovane sredine D-sloja jonosfere i posledično primena u detekciji različitih astro i geofizičkih fenomena, dok je s druge strane analiziran uticaj poremećenog stanja sredine na prostiranje radio talasa različitih frekvencijskih opsega.

Analiza karakteristika sredine u jonosferi je vrlo kompleksna jer je prostorno-vremenska promena zavisna od mnogo različitih geofizičkih, astrofizičkih i veštačkih uticaja. Iz tog razloga su istraživanja sprovedena na bazi eksperimentalno dobijenih rezultata od velikog značaja za modelovanje ovih uticaja. To je bila motivacija za izradu ovog dela doktorske disertacije u kome je korišćena baza podataka prikupljena prijemnom VLF/LF radio stanicom postavljenom na Institutu za fiziku u Zemunu od 2008. godine. Prikazano modelovanje se odnosi na periode uticaja Sunčevih X-flerova koji su najznačajniji neperiodični izvori poremećaja D-sloja jonosfere i ispoljavaju najviše uticaja na prostiranje radio talasa.

Pored značaja u vidu proširenja naučnog saznanja o niskoj jonosferi, istraživanje predstavljeno u ovom poglavlju se može praktično primeniti i u oblasti terestrijalnih radio sistema [122], [123] i [124]. Prostiranje radio talasa u okviru Zemlja-jonosfera talasovoda je bilo opisano u poglavlju 4, a najveći uticaj na radio komunikacione sisteme u slučajevima poremećaja niske jonosfere se ispoljava u ULF, VLF i LF frekvencijskim opsezima. Uticaj ovog dela jonosfere na prostiranje radio talasa HF opsega u periodima značajnih poremećaja postaje nezanemarljiv, pa je pažnja u istraživanju usmerena na modelovanje prostiranja radio talasa u ovom frekvencijskom opsegu.

### **5.1. Uvod**

U ovom delu disertacije je prikazano istraživanje uticaja Sunčevog X-flera na karakteristike jonizovane sredine D-sloja jonosfere i efekti tih promena na prostiranje radio

talasa. Prikazane su numeričke procedure razvijene u okviru ove disertacije, a njihova konkretna primena je urađena sa eksperimentalno zabeleženim podacima u periodu jednog reprezentativnog X-flera. Modelovanje je vršeno kroz kvantitativne proračune na bazi teorijski definisanih relacija u slučaju X-flera klase C8.8 koji se dogodio 5. maja 2010. godine [125], a koji je izvršio intenzivne poremećaje D-sloja jonosfere.

Posebna pažnja u prvom delu je posvećena modelovanju elektronske koncentracije. Poznavanje prostorno-vremenske promene ove veličine značajno zbog mogućnosti dolaženja do saznanja o posledičnim promenama ostalih parametara jonizovane sredine kao što su efektivni rekombinacioni koeficijent [107], brzina gubitaka elektrona [108], udeo uticaja  $L\alpha$  zračenja u jonizacionom procesu u trenutku maksimuma intenziteta X-zračenja [2], itd. Takođe, poznavanje trenda promene ove fizičke veličine omogućava modelovanje parametara jonizovane sredine koji su uticajni na prostiranje radio talasa u niskoj jonosferi – elektronske plazmene frekvencije i indeksa refrakcije. Gradijentalna promena elektronske koncentracije se u karakterističnim vremenskim trenucima može posmatrati u funkciji promene nadmorske visine, pa je na narednim stranama pažnja u analizi usmerena ka osobenostima prostorno-vremenske promene elektronske koncentracije, prvog i drugog izvoda njene vrednosti.

Drugi deo ove analize se odnosi na modelovanje prostiranja radio talasa u D-sloju čije su karakteristike poremećene uticajem Sunčevog X-flera. Najznačajniji parametri za modelovanje prostiranja radio talasa u poremećenoj plazmi D-sloja jonosfere su elektronska plazmena frekvencija i indeks refrakcije koji su modelovani na osnovu vrednosti elektronske koncentracije, pa je na ovim parametrima i njihovoj vremenskoj evoluciji bazirano predstavljeno istraživanje. Do sada su vršena istraživanja promena elektronske plazmene frekvencije na visinama iznad 90 km u mirnim [126] i poremećenim uslovima [127] i [128], dok je u ovoj disertaciji pažnja usmerena na jonosfersku oblast do navedene visine. Predstavljena je modelovana prostorno-vremenska promena indeksa refrakcije jonizovane sredine preko koje je moguće u svakom trenutku poremećaja predstaviti prostornu raspodelu elektromagnetske energije radio talasa upotrebom zračne teorije.

Na kraju, u trećem delu su prikazani rezultati modelovanja prostorno-vremenskih promena analiziranih parametara u toku trajanja X-flera. Predstavljen je modelovan prostorni i vremenski uticaj emisija u opsegu X-zračenja za pojedine faze konkretnog X-flera na osnovu razvijenih procedura u karakterističnim vremenskim trenucima i na karakterističnim nadmorskim visinama.

## **5.2. Teorijsko i numeričko modelovanje karakteristika D-sloja i prostiranja radio talasa tokom Sunčevog X-flera**

Specifičnost reakcija jonizovane sredine D-sloja u toku trajanja uticaja X-flera omogućava prostorno-vremensku analizu karakterističnih parametara na bazi kojih je moguće vršiti modelovanje u specifičnim slučajevima kada se mogu izvršiti aproksimativna zanemarivanja uticaja pojedinih nedominantnih procesa. Pod tim uslovima, u narednom delu je predstavljeno modelovanje pojedinih fizičkih veličina za pojedine faze X-flera.

### **5.2.1. Modelovanje koncentracije elektrona**

Modelovanje koncentracije elektrona i njene prostorno-vremenske promene u toku trajanja X-flera je zasnovano na procedurama prikazanim u [105], a korišćeno je i u mnogo drugih istraživanja [129], [130], [131]. Ova procedura se zasniva na upoređivanju izmerenih vrednosti promena amplitude i faze VLF radio talasa ( $\Delta A_{rec}$  i  $\Delta P_{rec}$ ) sa odgovarajućim rezultatima LWPC simulacije ( $\Delta A_{sim}$  i  $\Delta P_{sim}$ ). Na ovaj način su primenjene teorijske i numeričke procedure nad eksperimentalno prikupljenim rezultatima radi dobijanja prostorno-vremenske raspodele vrednosti elektronske koncentracije za posmatrani prostor i vremenski interval.

Amplitudske ( $\Delta A_{rec}$ ) i fazne promene ( $\Delta P_{rec}$ ) VLF/LF radio signala se dobijaju u odnosu na vrednosti amplitude i faze signala u mirnim uslovima ( $A_{rec}^0$  i  $P_{rec}^0$ ):

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

$$\begin{aligned}\Delta A_{rec}(t) &= A_{rec}(t) - A_{rec}^0 \\ \Delta P_{rec}(t) &= P_{rec}(t) - P_{rec}^0.\end{aligned}\tag{5.1}$$

U slučaju analiziranom u ovoj disertaciji su korišćene vrednosti  $A_{rec}^0=25,6$  dB i  $P_{rec}^0=16,2^\circ$ .

Vrednosti simuliranih promena amplitude i faze u toku poremećaja dobijaju se korišćenjem LWPC programskog paketa, a ulazni parametri potrebni za simulaciju su „oštrina“  $\beta$  i nadmorska visina refleksije  $H'$ . Ovi parametri predstavljaju osnovu nad kojom softver izračunava vrednosti amplitude ( $A_{sim}(\beta, H')$ ) i faze ( $P_{sim}(\beta, H')$ ) VLF radio signala određene frekvencije na konkretnoj lokaciji prijemnika. Promene ovih veličina se posmatraju u odnosu na vrednosti amplitude ( $A_{sim0}(\beta, H')$ ) i faze ( $P_{sim0}(\beta, H')$ ) u periodu mirne jonosfere (inicijalni parametri su  $\beta_0=0,3$  km<sup>-1</sup> i  $H_0'=74$  km). Relacije za računanje ovih promena se mogu napisati u obliku:

$$\begin{aligned}\Delta A_{sim}(\beta, H') &= A_{sim}(\beta, H') - A_{sim0}(\beta, H') \text{ i} \\ \Delta P_{sim}(\beta, H') &= P_{sim}(\beta, H') - P_{sim0}(\beta, H').\end{aligned}\tag{5.2}$$

Vrednosti početnih uslova za računanje simuliranih vrednosti promene amplitude i faze signala dati su na osnovu istraživanja predstavljenih u [108], [132], [86], [133], a njihova mala varijacija u vrednostima za D-sloj jonosfere ne utiče mnogo na dobijene vrednosti.

Kriterijum za numeričko određivanje parametara  $\beta$  i  $H'$  u vremenu  $t$  je uslov najboljeg slaganja promena izmerenih vrednosti amplitude i faze sa odgovarajućim simuliranim vrednostima:

$$\begin{aligned}\Delta A_{sim}(\beta, H') &\approx \Delta A_{rec}(t) \text{ i} \\ \Delta P_{sim}(\beta, H') &\approx \Delta P_{rec}(t).\end{aligned}\tag{5.3}$$

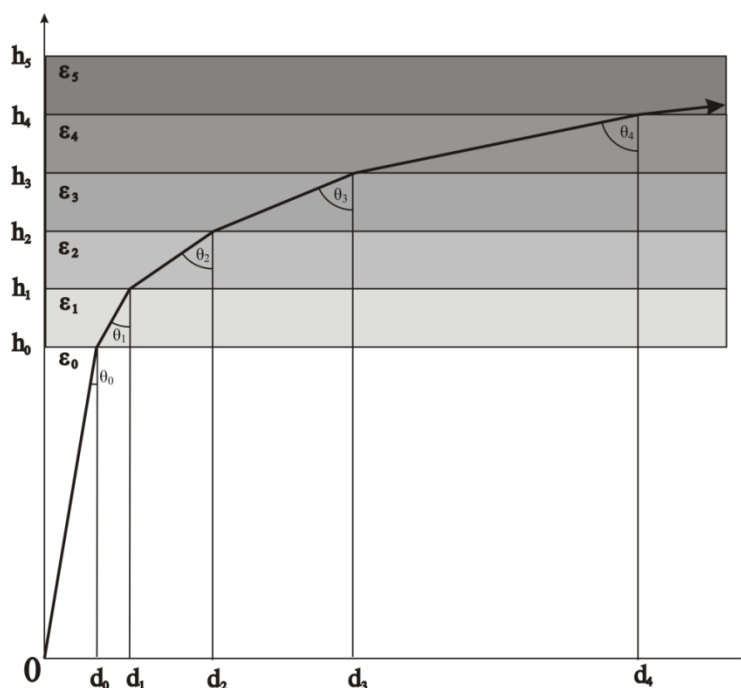
Na osnovu dobijenih parametara po kriterijumu najboljeg slaganja u vremenskom intervalu  $t$  i po zadatim nadmorskim visinama  $h$ , može se odrediti elektronska koncentracija na osnovu (4.2).

### 5.2.2. Modelovanje prostiranja radio talasa tokom Sunčevog X-flera

Poznajući prostorno-vremensku zavisnost elektronske koncentracije  $N_e$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] i koristeći relaciju (3.42) za vrednosti elektronske mase  $m_e=9,10938356 \cdot 10^{-31}$  kg, električne permitivnosti vakuumu  $\epsilon_0=8,854187 \cdot 10^{-12}$  F/m i količine naelektrisanja elektrona  $q=1,60217662 \cdot 10^{-19}$  C, može se odrediti elektronska plazmena frekvencija jonizovane sredine kroz izraz:

$$f_0 \approx 8,98 \sqrt{N_e} \text{ [Hz]}. \quad (5.4)$$

Kao što je bilo opisano u 3. poglavlju, jonizovana sredina se može okarakterisati „prividnom“ dielektričkom konstantom  $\epsilon$  kroz relaciju (3.41) na osnovu koje se može izvesti jednačina za računanje indeksa refrakcije u jonizovanoj sredini D-sloja (3.47). Prostorno-vremenska promena navedenih veličina zavisi posledično od promene elektronske koncentracije. U posmatranom prostoru određenom nadmorskom visinom  $h$  i udaljenošću od predajnika  $d$  se slojevita struktura može posmatrati kao sredina kroz koju se radio talas u skladu sa vrednošću svoje noseće frekvencije refraktuje na graničnim površinama (Sl. 5-1).



Sl. 5-1: Prostiranje radio talasa u okviru D-sloja jonosfere.

Za  $k$ -ti homogeni sloj se može odrediti ugao  $\theta_k$  u odnosu na normalu granične površine pod kojim se talasni front radio talasa povija (refraktuje):

$$\theta_k = \cos^{-1} \left[ \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_{k-1}}{\varepsilon_k} \sin^2(\theta_{k-1})} \right]. \quad (5.5)$$

### 5.2.3. Modelovanje drugih parametara jonizovane sredine tokom Sunčevog X-flera

Poznavanje prostorno-vremenske raspodele elektronske koncentracije omogućava modelovanje vremenskih evolucija drugih parametara lokalne plazme u D-sloju. Ovi proračuni se baziraju na jednačini za dinamiku elektronske koncentracije [134], [135]:

$$\frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} = G(\vec{r}, t) - L(\vec{r}, t). \quad (5.6)$$

$G(\vec{r}, t)$  i  $L(\vec{r}, t)$  predstavljaju brzine proizvodnje i gubitaka elektrona, respektivno na lokaciji  $\vec{r}$  i u trenutku  $t$ . Ove veličine su prostorno-vremenski zavisne kako u slučajevima kada je mirno stanje, tako i u vremenskom intervalu trajanja X-flera, a procedura određivanja činilaca koji doprinose procesima proizvodnje i gubitaka elektrona detaljno je opisana u [106]. U daljoj analizi će biti korišćen pojednostavljen izraz:

$$\frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} = G_0(\vec{r}) + K(\vec{r}, t)I(t) - \alpha_{eff}(\vec{r}, t)N_e^2(\vec{r}, t), \quad (5.7)$$

gde je  $K$  koeficijent proizvodnje elektrona X-zračenja (zavisi od raspodele energije u spektru, energetskog kanala u kome se određuje intenzitet X-zračenja ( $I$ ) i sastava jonosfere), a  $\alpha_{eff}$  koeficijent gubitaka elektrona (zavisi od sastava D-sloja i temperature) koji se na visinama iznad oko 70 km može aproksimativno izjednačiti sa efektivnim rekombinacionim koeficijentom zbog dominacije elektrona nad negativnim jonima [135].

Poređenjem poslednja dva izraza se vidi da je brzina proizvodnje elektrona ( $G(\vec{r}, t)$ ) na lokaciji  $\vec{r}$  i u trenutku  $t$  data kao zbir brzine proizvodnje slobodnih elektrona kada je

zanemaren uticaj energije X-zračenja ( $G_0(\vec{r})$ ) i brzine proizvodnje slobodnih elektrona pod uticajem X-zračenja ( $K(\vec{r}, t)I(t)$ ):

$$G(\vec{r}, t) = G_0(\vec{r}) + K(\vec{r}, t)I(t). \quad (5.8)$$

Brzina gubitaka elektrona ( $L(\vec{r}, t)$ ) je predstavljena kao proizvod koeficijenta  $\alpha_{eff}(\vec{r}, t)$  i kvadrata elektronske koncentracije ( $N_e^2(\vec{r}, t)$ ):

$$L(\vec{r}, t) = \alpha_{eff}(\vec{r}, t)N_e^2(\vec{r}, t). \quad (5.9)$$

U ovom slučaju su zanemareni transportni procesi s obzirom na to da je njihov uticaj značajan tek iznad nadmorske visine od 120-150 km [136] i ne uzimaju se u obzir kada je u pitanju ovaj jonosferski sloj [137].

Zbog kompleksnosti analize istovremenog uticaja prostorno i vremenski zavisnih procesa (čije su pojave često nepredvidljive) uključenih u proces promene koncentracije elektrona prikazane jednačinom (5.7), uticaj X-zračenja se može posmatrati u nekoliko zasebnih karakterističnih faza i trenutaka u toku ukupnog posmatranog vremena. U ovoj disertaciji su analizirani periodi maksimalnog intenziteta X-zračenja i relaksacije jonosferske plazme nakon uticaja X-flera.

### 5.2.3.1. Svojstva jonizovane sredine u trenutku maksimalnog intenziteta X-flera

Trenutak maksimalnog intenziteta X-flera je, posmatrajući sa aspekta efekata zračenja koji su najuticajniji u tom kratkom vremenskom periodu, pogodan za primenu uslova zanemarljive brzine proizvodnje elektrona ( $G_0(\vec{r})$ ) usled energije  $Ly\alpha$  i kosmičkog zračenja (može se izračunati na način kako je to predstavljeno u [108]) u odnosu na proizvodnju elektrona X-zračenjem:

$$G_0(\vec{r}, t) \ll K(\vec{r}, t)I(t). \quad (5.10)$$

Ukupna brzina proizvodnje elektrona koja u ovom slučaju potiče dominantno od delovanja energije fotona X-zraka se može smatrati konstantnom u vremenskom intervalu oko trenutka maksimalnog intenziteta X-zračenja:

$$I(t) = I(t_{I_{\max}}) = \text{const} \Rightarrow \left. \frac{dI}{dt} \right|_{t=t_{I_{\max}}} = 0. \quad (5.11)$$

Ovi uslovi omogućavaju redukovan izraz (5.7) za dinamiku elektrona:

$$\left. \frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} \right|_{t=t_{I_{\max}}} = K(\vec{r}, t_{I_{\max}}) I(t_{I_{\max}}) - \alpha_{\text{eff}}(\vec{r}, t_{I_{\max}}) N_e^2(\vec{r}, t_{I_{\max}}), \quad (5.12)$$

na osnovu kojeg se mogu izračunati koeficijenti  $K$  i  $\alpha_{\text{eff}}$  i brzine proizvodnje i gubitaka elektrona u posmatranom trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u talasnom opsegu X-zračenja merenog na satelitu. Aspekt neodređenosti prikazane jednačine sa dve nepoznate se u nastavku razrešava posmatranjem drugog izvoda koncentracije elektrona.

### Koeficijent gubitaka elektrona.

Diferencirajući prethodni izraz po vremenu i uzimajući u obzir (5.9), može se dobiti odnos između efektivnog rekombinacionog koeficijenta  $\alpha_{\text{eff}}$  i prvog i drugog izvoda vrednosti koncentracije elektrona  $N_e$  u trenutku maksimalnog fluksa X-zračenja:

$$\left. \frac{d^2 N_e(\vec{r}, t)}{dt^2} \right|_{t=t_{I_{\max}}} = -\alpha_{\text{eff}}(\vec{r}, t_{I_{\max}}) \left. \frac{dN_e^2(\vec{r}, t)}{dt} \right|_{t=t_{I_{\max}}}. \quad (5.13)$$

Iz prethodnog izraza se može dobiti modelovana prostorno-vremenska promena koeficijenta  $\alpha_{\text{eff}}(\vec{r}, t_{I_{\max}})$ :

$$\alpha_{\text{eff}}(\vec{r}, t_{I_{\max}}) = - \frac{d^2 N_e(\vec{r}, t)}{dt^2} \left[ \frac{dN_e^2(\vec{r}, t)}{dt} \right]^{-1} \bigg|_{t=t_{I_{\max}}} \quad (5.14)$$

### Brzina gubitaka elektrona

Uvrštavanjem poslednjeg izraza u izraz (5.9) dobija se prostorna raspodela brzine gubitaka elektrona  $L(\vec{r}, t_{I_{\max}})$ :

$$L(\vec{r}, t_{I_{\max}}) = - \frac{d^2 N_e(\vec{r}, t)}{dt^2} \left[ \frac{dN_e^2(\vec{r}, t)}{dt} \right]^{-1} \Big|_{t=t_{I_{\max}}} \cdot N_e^2(\vec{r}, t_{I_{\max}}) \quad (5.15)$$

### Brzina proizvodnje elektrona

Kombinujući izraze (5.6) i (5.15) se može dobiti prostorna raspodela brzine proizvodnje elektrona usled dejstva energije X-zračenja  $G(\vec{r}, t_{I_{\max}}) = K(\vec{r}, t_{I_{\max}}) I(t_{I_{\max}})$  u trenutku maksimalne vrednosti fluksa X-zračenja  $t_{I_{\max}}$ :

$$G(\vec{r}, t_{I_{\max}}) = \frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} \Big|_{t=t_{I_{\max}}} - \frac{d^2 N_e(\vec{r}, t)}{dt^2} \left[ \frac{dN_e^2(\vec{r}, t)}{dt} \right]^{-1} N_e^2(\vec{r}, t) \Big|_{t=t_{I_{\max}}} \quad (5.16)$$

### Koeficijent proizvodnje elektrona

Na kraju se iz izraza (5.7) i (5.16) može izračunati prostorna raspodela koeficijenta proizvodnje elektrona  $K$ :

$$K(\vec{r}, t_{I_{\max}}) = \frac{1}{I_{\max}} \left\{ \frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} \Big|_{t=t_{I_{\max}}} - \frac{d^2 N_e(\vec{r}, t)}{dt^2} \left[ \frac{dN_e^2(\vec{r}, t)}{dt} \right]^{-1} N_e^2(\vec{r}, t) \Big|_{t=t_{I_{\max}}} \right\} \quad (5.17)$$

Kao što se može videti iz prethodne analize, dobijene raspodele su funkcije samo jedne promenljive – elektronske koncentracije koja se u trenutku maksimalnog intenziteta X-flera zabeleženog na satelitu može izračunati po već opisanoj proceduri.

Pored analize parametara značajnih za dinamiku elektrona moguće je ispitati i udeo proizvodnje elektrona usled  $Ly\alpha$  i kosmičkog zračenja u ukupnoj brzini proizvodnje elektrona za ovaj specifičan trenutak kada intenzitet X-zračenja ima dominantan efekat u procesu jonizacije. Vrednost  $G_0(\vec{r})$  se može smatrati konstantnom i visinski zavisnom u kratkom vremenskom intervalu oko trenutka maksimalnog intenziteta u talasnom opsegu X-zračenja [138].

Ovaj slučaj se može analizirati sa aspekta udela u jonizacionom procesu  $r_0(\vec{r}, t_{I_{max}})$ :

$$r_0(\vec{r}, t_{I_{max}}) = \frac{100 \cdot G_0(\vec{r})}{\left. \frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} \right|_{t=t_{I_{max}}} - \frac{d^2 N_e(\vec{r}, t)}{dt^2} \left[ \frac{dN_e^2(\vec{r}, t)}{dt} \right]^{-1} \left. N_e^2(\vec{r}, t) \right|_{t=t_{I_{max}}}}. \quad (5.18)$$

Imajući u vidu dominantan uticaj  $Ly\alpha$ , odnosno kosmičkog zračenja na visinama iznad, odnosno ispod oko 70 km, udeo  $r_0(\vec{r}, t_{I_{max}})$  se može aproksimativno smatrati udelom ovih vrsta zračenja  $r_{Ly\alpha}(\vec{r}, t_{I_{max}})$  i  $r_C(\vec{r}, t_{I_{max}})$ , respektivno, u odgovarajućim oblastima D-sloja.

### 5.2.3.2. Svojstva jonizovane sredine u periodu relaksacije nakon uticaja X-flera

Period relaksacije nakon uticaja X-flera može da se definiše kao period u kome intenzitet X-zračenja pada na dovoljno male vrednosti da se njegov uticaj na proces jonizacije može zanemariti. Ovaj uslov se može predstaviti izrazom:

$$K(\vec{r}, t)I(t) \ll G_0(\vec{r}, t). \quad (5.19)$$

Primenom ove aproksimacije u izrazu (5.7) dobija se aproksimativna relacija:

$$\frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt} = G_0(\vec{r}) - \alpha_{eff}(\vec{r}, t)N_e^2(\vec{r}, t), \quad (5.20)$$

iz koje se poznajući elektronsku koncentraciju i brzinu proizvodnje elektrona u mirnom stanju može izračunati koeficijent gubitaka elektrona  $\alpha_{eff}$  i dalje elektronska temperatura  $T_e$ .

### Koeficijent gubitaka elektrona

Prostorno-vremenska raspodela koeficijenta gubitaka elektrona  $\alpha_{eff}$  tokom relaksacije, kao i njegova vrednost  $\alpha_{eff}^0$  u mirnom stanju ( $dN_e/dt=0$ ) može da se izračuna na osnovu jednačine dinamike elektronske koncentracije (5.20):

$$\alpha_{eff}^0(\vec{r}, t) = \frac{G_0(\vec{r}, t) - \frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt}}{N_e^2(\vec{r}, t)}. \quad (5.21)$$

### Brzina gubitaka elektrona

Kombinacijom izraza (5.9) i (5.21) može da se izračuna prostorno-vremenska raspodela brzine gubitaka elektrona tokom relaksacionog perioda:

$$L(\vec{r}, t) = \frac{G_0(\vec{r}, t) - \frac{dN_e(\vec{r}, t)}{dt}}{N_e^2(\vec{r}, t)} N_e^2(\vec{r}, t). \quad (5.22)$$

### Elektronska temperatura

Teoretska procedura korišćena za analizu temperaturnih promena se može primeniti na visine iznad oko 70 km, gde je dominantan uticaj rekombinacionih procesa u procesu gubitaka elektrona, odnosno gde se koeficijent  $\alpha_{eff}$  može izjednačiti sa efektivnim rekombinacionim koeficijentom.

Vrednost  $\alpha_{eff}$  se intenzivno menja u skladu sa promenama obdanice i noći. Analiza je u ovom slučaju usmerena ka dnevnim uslovima, a  $\alpha_{eff}$  se posmatra kroz rekombinacioni koeficijente  $\alpha_i$ , koji se odnose na  $i$ -te vrste jona – glavnih izvora rekombinacionog procesa u D-sloju (Tab. 5-1), koncentraciju elektrona  $N_e$  i koncentraciju jona  $N_i$ , (5.23) [134]. U prikazanoj relaciji se indeks  $c$  odnosi na jone klastera koji se izdvajaju u poseban član jer su dominantni u procesima rekombinacije na posmatranim visinama.

$$\begin{aligned}\alpha_{eff}(\vec{r}, t) &= \frac{1}{N_e(\vec{r}, t)} \sum_i \alpha_i(\vec{r}, t) N_i(\vec{r}, t) \\ \alpha_{eff}(\vec{r}, t) &= \frac{1}{N_e(\vec{r}, t)} \left( \alpha_c(\vec{r}, t) N_c(\vec{r}, t) + \sum_{i'} \alpha_{i'}(\vec{r}, t) N_{i'}(\vec{r}, t) \right) \\ &= \frac{\alpha_c(\vec{r}, t) N_c(\vec{r}, t)}{N_e(\vec{r}, t)} \left( 1 + \sum_{i'} \frac{\alpha_{i'}(\vec{r}, t) N_{i'}(\vec{r}, t)}{\alpha_c(\vec{r}, t) N_c(\vec{r}, t)} \right).\end{aligned}\quad (5.23)$$

Konkretno vrednosti za jone konstituente D-sloja jonosfere:  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$  i klaster jone  $H^+(H_2O)_n$ , date u navedenoj literaturi, prikazane su u Tab. 5-1. Udeo navedenih vrsta jona u rekombinacionom procesu zavisi od nadmorske visine tako što na višim nadmorskim visinama (iznad 80 km) dominantnu ulogu u rekombinaciji imaju  $O_2^+$  joni, dok je na nižim visinama uticaj klaster jona dominantniji [139].

Tab. 5-1: Vrednosti koeficijenata  $C_i$  i  $D_i$  za vrste jona D-sloja jonosfere [139].

| Vrsta jona    | $C_i(10^{-13})$ | $D_i$ |
|---------------|-----------------|-------|
| $N_2^+$       | 1,8             | -0,39 |
| $O_2^+$       | 1,6             | -0,55 |
| $NO^+$        | 4,5             | -0,83 |
| $H^+(H_2O)_n$ | 5+20n           | -0,5  |

Dosadašnja istraživanja pokazuju da se temperaturna promena koja je zavisna od rekombinacionog koeficijenta može definisati kao u izrazu [139]:

$$\alpha_i(\vec{r}, t) = C_i \left( \frac{T_e(\vec{r}, t)}{300} \right)^{D_i}, \quad (5.24)$$

gde je  $T_e$  elektronska temperatura, a koeficijenti  $C_i$  i  $D_i$  zavise od vrste jona.

Pošto je dominantan uticaj jona klastera u posmatranim reakcijama, može se uzeti da je  $\alpha_{eff}$  proporcionalno članu  $(T_e/300)^{-0,5}$ , pa se jednačina (5.23) može izraziti kao:

$$\alpha_{eff}(\vec{r}, t) = \alpha_{Claster}(\vec{r}, t) \left( 1 + \sum_{i'} r_{\alpha_{i'}}^{Claster}(\vec{r}, t) \cdot r_{Ni'}^{Claster}(\vec{r}, t) \right), \quad (5.25)$$

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

gde  $r_{\alpha_i}^{Cluster}$  i  $r_{N_i}^{Cluster}$  predstavljaju odnose rekombinacionih koeficijenata jona molekula i-te vrste  $\alpha_i$  i jona klastera  $\alpha_{Cluster}$  ( $r_{\alpha_i}^{Cluster} = \alpha_i / \alpha_{Cluster}$ ) i koncentracije jona i-te vrste  $N_i$  i jona klastera  $N_{cluster}$  ( $r_{N_i}^{Cluster} = N_i / N_{cluster}$ ), respektivno. Na ovaj način su pored dominantnog rekombinacionog procesa na određenim visinama u razmatranje uzeti i manje zastupljeni procesi. Analiza je pokazala da je domen promene vrednosti  $r_{\alpha_{O_2}}^{Cluster}$  u opsegu do 1% uzimajući temperaturni opseg 190 – 230 K. Iz navedenog, izraz u zagradi poslednje jednačine može se smatrati približno vremenski konstantnim na posmatranim visinama i posledično, efektivni rekombinacioni koeficijent se može definisati kao:

$$\alpha_{eff}(\vec{r}, t) = C(\vec{r}) \left( \frac{T_e(\vec{r}, t)}{300} \right)^{-0,5}. \quad (5.26)$$

$C$  je u ovom slučaju vremenska konstanta koja se može dobiti kao vrednost u uslovima neporemećene sredine ( $\alpha_{eff}^0$  i  $T_e^0$ ):

$$C(\vec{r}) = \alpha_{eff}^0(\vec{r}) \left( \frac{T_e^0(\vec{r})}{300} \right)^{0,5}. \quad (5.27)$$

Na kraju se može izvesti zavisnost temperaturnih promena u funkciji promena efektivnog rekombinacionog koeficijenta:

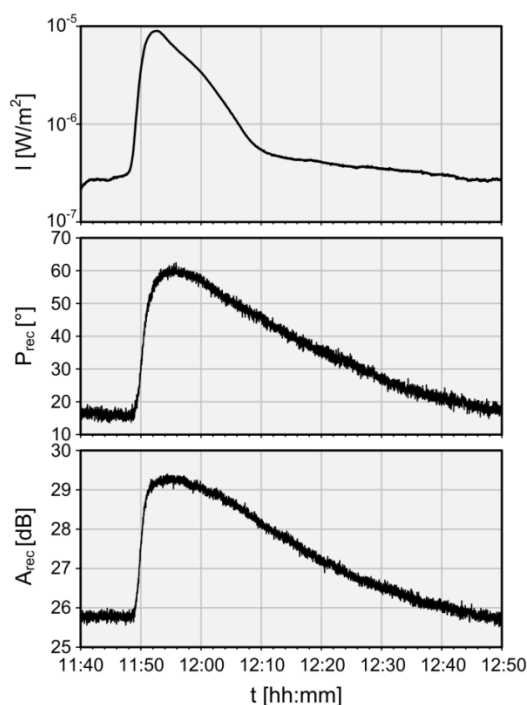
$$T_e(\vec{r}, t) = 300 \left( \frac{\alpha_{eff}(\vec{r}, t)}{C(\vec{r})} \right)^{-0,5}. \quad (5.28)$$

Prikazani model definiše vremensku promenu temperature elektrona u posmatranoj sredini na bazi inicijalnih prostorno-vremenski zavisnih parametara – efektivnog rekombinacionog koeficijenta  $\alpha_{eff}^0$  i elektronske temperature  $T_e^0$  u toku mirnog stanja. Vrednost ovih parametara se može računati na više načina, dok je u ovoj disertaciji predstavljena nova procedura dobijanja parametra  $\alpha_{eff}$  kao što je već opisano, dok je parametar  $T_e^0$  dobijen na način kako je to definisano IRI (*International Reference Ionosphere*) modelom [140].

### 5.3. Rezultati

U ovom delu su prikazani rezultati razvijenih modela u slučaju poremećaja koji je izazvao X-fler klase C8.8 koji se dogodio 5. maja 2010. godine. Intenzitet zračenja u X talasnom opsegu je meren na GOES-14 satelitu, a promene amplitude i faze primanog VLF radio signala frekvencije 23,4 kHz emitovanog posredstvom predajnika DHO (Rhauderfehn, Nemačka) i merenog su na Institutu za fiziku u Zemunu.

Reakcija D-sloja jonosfere na intenzivan X-fler se merenjem amplitude i faze VLF radio signala može detektovati u domenu vremena u kojem je potrebno da jonizovana sredina odreaguje na dodatnu pristiglu energiju. Na Sl. 5.2 je predstavljena promena fluksa zračenja u opsegu X-zračenja zabeleženog senzorom na GOES-14 satelitu u opsegu talasnih dužina između 0,1 i 0,8 nm i posledične promene karakteristika merenog VLF radio signala frekvencije 23,4 kHz kod kojeg se značajna promena događa nakon vremenskog intervala reda veličine od nekoliko minuta od početka značajnijeg porasta fluksa u X-talasnom opsegu.

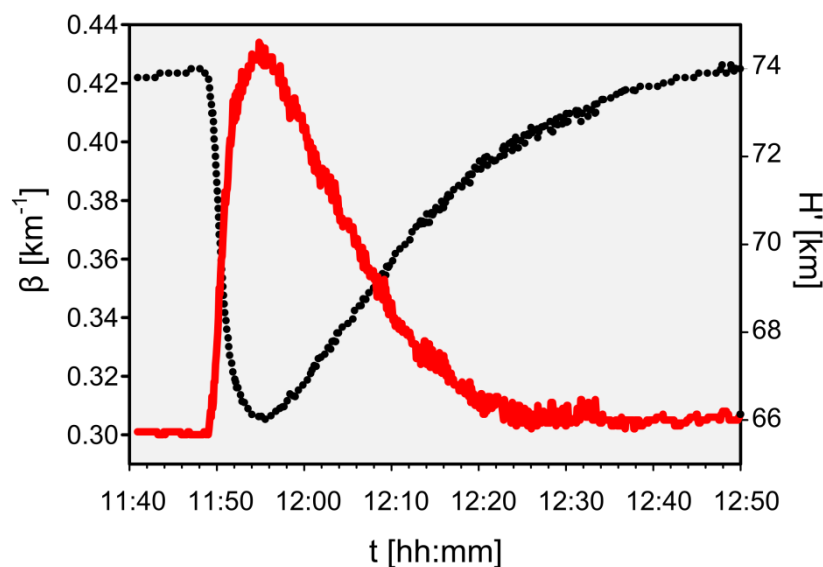


Sl. 5-2: Fluks zračenja u X-opsegu frekvencija (gornji panel), promena faze (srednji panel) i nivoa (donji panel) 23,4 kHz VLF radio signala 5. maja 2010.

### 5.3.1. „Oštrina“ ( $\beta$ ), visina refleksije ( $H'$ ) i koncentracija elektrona ( $N_e$ )

Merene vrednosti promena amplitude  $\Delta A_{rec}$  i faze  $\Delta P_{rec}$  primanog VLF radio signala korišćene su za proračunavanje prostorno-vremenske zavisnosti koncentracije slobodnih elektrona  $N_e(h, t)$  na diskretnim nadmorskim visinama, u vremenskom intervalu trajanja X-flera, korišćenjem Vajtovog modela horizontalno uniformne jonosfere (prostorna zavisnost od vektora položaja  $\vec{r}$  se može redukovati na visinsku zavisnost od  $h$  [103] i relacije (4.2). Procedura izračunavanja vrednosti  $H'$  i  $\beta$  detaljno je opisana u [106], a vremenom je postala standard u ovoj oblasti naučnog istraživanja [141], [142] i [108].

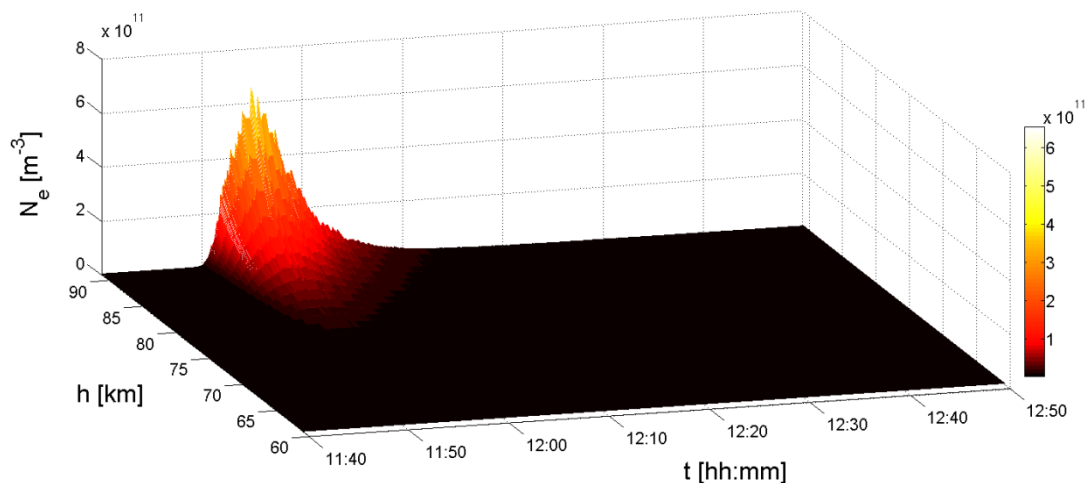
Na Sl. 5-3 prikazana je promena „oštrine“ jonosferskog D-sloja ( $\beta$ ) i visine refleksije ( $H'$ ) za celokupan period poremećaja izazvanog X-flerom.



Sl. 5-3: „Oštrina“ ( $\beta$  – crvena boja) i visina refleksije ( $H'$  – crna boja).

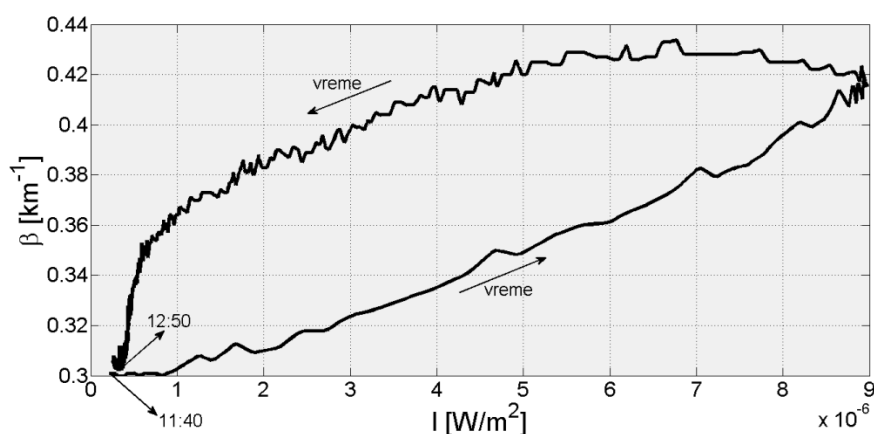
Proračunata koncentracija elektrona za ceo period poremećaja ima tendenciju promene kao što je prikazano na Sl. 5-4. Koncentracija elektrona na diskretnim vrednostima visina D-sloja jonosfere koja je u prikazanom slučaju računata za domen nadmorskih visina od 60 do 90 km, sa inkrementom od 100 m, omogućava izračunavanje ostalih parametara jonizovane sredine.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom



Sl. 5-4: Raspodela koncentracije elektrona po nadmorskim visinama i u vremenu u toku trajanja X-flera.

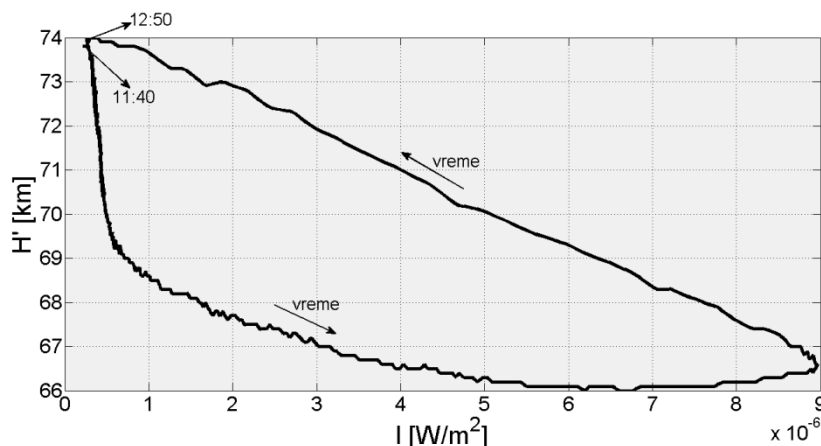
Dinamika promene jonizovane sredine se može posmatrati i sa aspekta uticaja intenziteta X-zračenja na osnovne ulazne podatke proračunavanja elektronske koncentracije. Sl. 5-5 prikazuje promenu „oštrine“ u funkciji vremenske promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.



Sl. 5-5: Promena parametra „oštrine“ jonosfere u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.

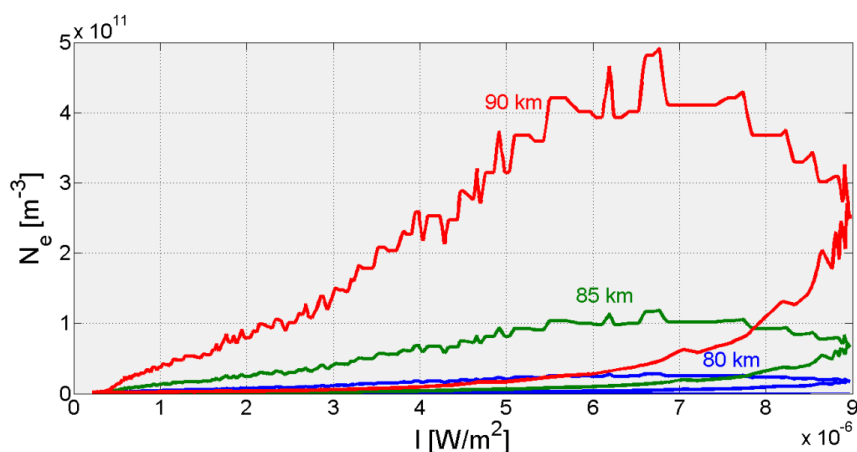
Sl. 5-6 predstavlja promenu parametra visine refleksije u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom



Sl. 5-6: Promena parametra visine refleksije u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.

Promena elektronske koncentracije zavisi od promene intenziteta X-zračenja, kao i od uslova koji su vladali pre i koji vladaju posle efekata energije zračenja na jonizovanu sredinu. Na Sl. 5-7 je u obliku kvazi-histerezis krivih prikazana posledična promena elektronske koncentracije u celokupnom vremenu trajanja X-flera na reprezentativnim nadmorskim visinama u funkciji intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.



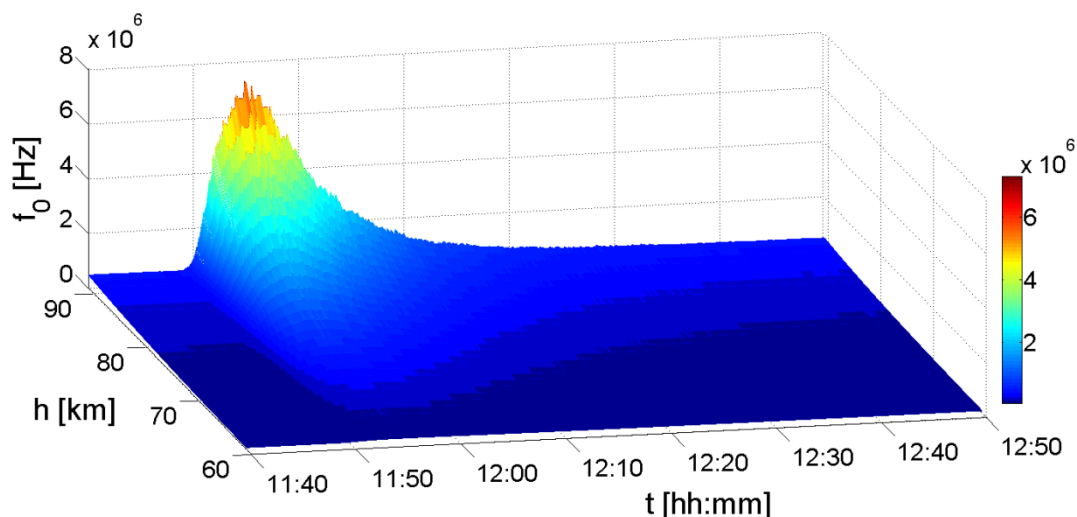
Sl. 5-7: Promena elektronske koncentracije u funkciji promene intenziteta zračenja u X talasnom opsegu.

### 5.3.2. Elektronska plazmena frekvencija i prostiranje radio talasa

Elektronska plazmena frekvencija predstavlja najznačajniji parametar jonizovane sredine na bazi kojeg se može izvršiti modelovanje prostiranja radio talasa u jonizovanoj

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

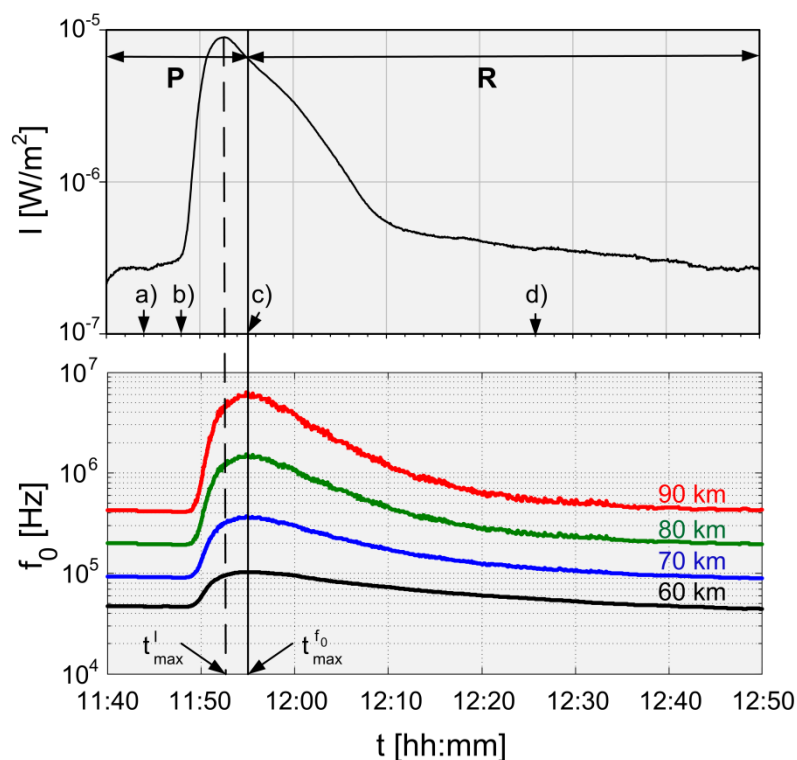
sredini. Na osnovu izraza (5.4) i sa već proračunatom prostorno-vremenskom promenom koncentracije elektrona, na Sl. 5-8 je predstavljena prostorno-vremenska promena elektronske plazmene frekvencije za ceo period poremećaja u toku trajanja X-flera.



Sl. 5-8: Raspodela elektronske plazmene frekvencije po nadmorskim visinama i u vremenu u toku trajanja X-flera.

Vrednost elektronske koncentracije i posledično elektronske plazmene frekvencije zavisi od relativnog udela procesa fotojonizacije i rekombinacije u celokupnom sistemu hemijskih reakcija posmatranog sloja jonosfere [134]. U ovom smislu se u toku trajanja X-flera mogu definisati fotojonizacioni domen (P) u toku kog nastaje porast vrednosti elektronske plazmene frekvencije i rekombinacioni domen (R) kada preovlađuje proces gubitaka slobodnih elektrona i elektronska plazmena frekvencija opada. Sveukupan proces na referentnim nadmorskim visinama je prikazan na Sl. 5-9.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom



Sl. 5-9: Fluks zračenja u X-opsegu frekvencija (gornji panel) sa karakterističnim vremenskim trenucima a), b), c) i d) i proračunata elektronska plazmena frekvencija (donji panel) za četiri referentne nadmorske visine.

Zavisnost trenutka maksimalne koncentracije elektrona i posledično najveće vrednosti elektronske plazmene frekvencije (prelazni trenutak iz P u R) od nadmorske visine se može dobiti iz uslova da je  $df_0/dt=0$ . Tada se iz (4.2) dobija relacija:

$$h = \frac{d}{dt} [\beta(t) H'(t)] \Big|_{t=t_{\max}} \left[ \frac{d\beta(t)}{dt} \right]_{t=t_{\max}}^{-1} \quad (5.29)$$

Numeričkom analizom jednačine (5.29) se može utvrditi da je varijacija vremenskog trenutka maksimalne vrednosti  $f_0$  manja od jedne sekunde u rasponu visina od 70 do 80 km, tako da je u daljim proračunima, shodno vremenskoj rezoluciji merenja parametara prijemnog VLF signala od 1 s, smatrano da elektronska plazmena frekvencija u istom trenutku  $t_{\max}^{f_0}$  dostiže svoju maksimalnu vrednost na svim visinama (vertikalna linija na Sl. 5-9).

Poredeći grafike na Sl. 5-9 može se ustanoviti jednoznačan uticaj energije oslobođene u toku X-flera na Suncu na svojstva jonizovane sredine na nadmorskim visinama između 60 i 90 km. Na osnovu prikazanog se mogu ustanoviti sledeće razlike:

- Početak porasta  $f_0(t)$  nastupa nakon porasta  $I(t)$ ,
- $f_0(t)$  dostiže svoju maksimalnu vrednost nakon maksimalne vrednosti  $I(t)$  i
- relaksacioni period za  $f_0(t)$  je dužeg perioda trajanja u odnosu na  $I(t)$ .

Pre otpočinjanja energetskog pobuđivanja posmatrane sredine uticajem X-zračenja, primat u jonizacionom procesu ostvaruju fotoni  $Ly\alpha$  i kosmičkog zračenja [143]. Nakon određenog vremena, kada pristigla energija fotona X-opsega pređe graničnu vrednost energije jonizacije već donekle pobuđenih molekula sredine, ostvaruje se primetno povećanje broja slobodnih elektrona, a posledično i elektronske plazmene frekvencije  $f_0$ . Maksimalne vrednosti  $f_0$  nastupaju nakon maksimuma intenziteta zračenja, tj. kada vrednost intenziteta X-zračenja opada. Objasnjenje ove pojave se može dati analizirajući jednačinu (5.7), uzimajući da se  $\alpha_{eff}(h,t)$ ,  $G_0(h,t)$  i  $K(h,t)$  mogu smatrati približno nepromenljivim u vremenu u kratkom vremenskom intervalu oko trenutka maksimalne vrednosti  $N_e(t)$ , kada je  $dN_e(t)/dt = 0$ . Jednačina (5.7) se tada svodi na:

$$\frac{dN_e(h,t)}{dt} = G_0(h) + K(h)I(t) - \alpha_{eff}(h)N_e^2(h,t). \quad (5.30)$$

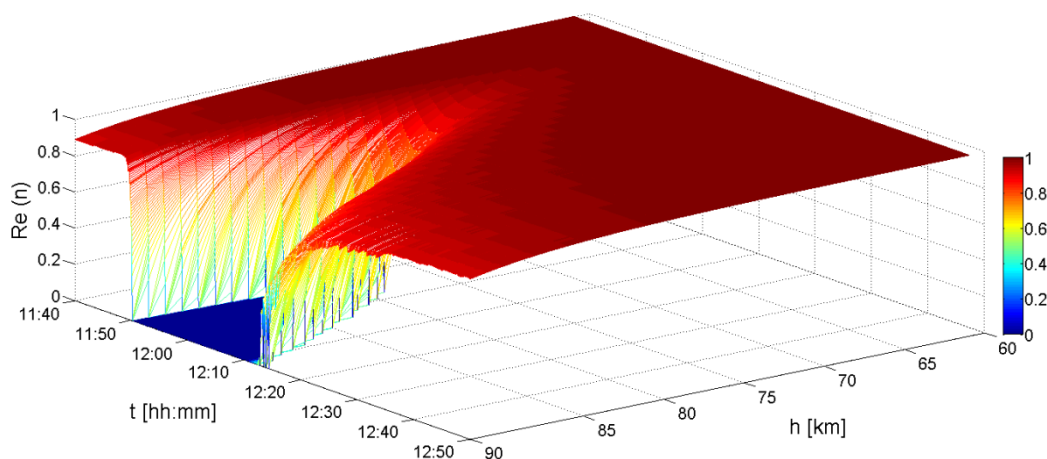
Diferenciranjem prethodnog izraza po vremenu se dalje dobija relacija:

$$K(h,t) \frac{dI(t)}{dt} = \frac{dN_e^2(h,t)}{dt^2}. \quad (5.31)$$

Imajući u vidu da je u trenutku maksimalne vrednosti  $N_e$   $dN_e^2/dt^2 < 0$  i  $K > 0$ , može se zaključiti da je  $dI/dt < 0$ , tj. intenzitet X-zračenja opada u vremenu, što znači da je maksimalna vrednost fluksa zračenja bila u trenutku pre posmatranog. Fizičko objašnjenje ovog fenomena leži u činjenici da je posmatranoj sredini potrebno vreme da odreaguje na povećanje fluksa zračenja, pa se iz tog razloga maksimalne vrednosti navedenih veličina ne ostvaruju u istom trenutku.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

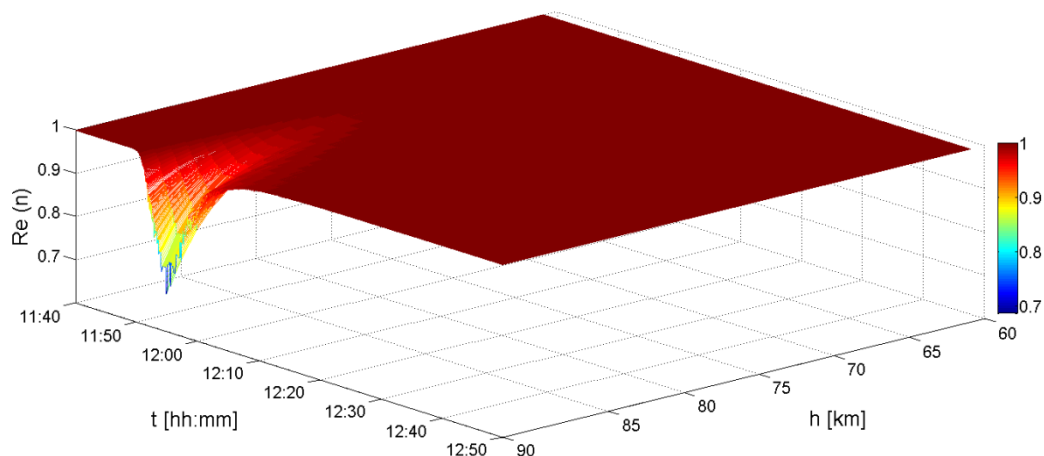
Korišćenjem jednačine (3.47) za izračunavanje indeksa refrakcije, na Sl. 5-10 – Sl. 5-12 je prikazana promena realnog dela ove fizičke veličine koja opisuje stanje sredine i njen uticaj na prostiranje radio talasa. Raspodela po nadmorskim visinama je prikazana za tri karakteristične frekvencije HF frekvencijskog opsega. Vrednost indeksa refrakcije  $n$  opada sa porastom nadmorske visine  $h$  i raste sa porastom vrednosti frekvencije radio signala  $f$ . Proračuni pokazuju da se za razliku od uslova u mirnom stanju, kada ovaj deo jonosfere ne utiče na prostiranje radio talasa ( $n \approx 1$ ) analiziranog frekvencijskog opsega (1-30 MHz), u toku trajanja X-flera se front radio talasa refraktuje ( $1 > n \geq 0$ ) ili u zavisnosti od noseće frekvencije reflektuje ka zemlji. Za vrednost  $n=0$ , nastaje refleksija energije radio talasa u jonizovanoj sredini, a u prikazanom slučaju se ovo događa na visinama iznad 80 km za noseću frekvenciju od 1 MHz u periodu oko maksimalnog efekta jonizacije X-flera. Nadmorska visina na kojoj nastaje refleksija raste sa porastom frekvencije posmatranog radio talasa. Energija radio talasa viših frekvencijskih opsega se u određenom stepenu apsorbuje na višim nadmorskim visinama usled značajnijeg porasta elektronske plazmene frekvencije sredine.



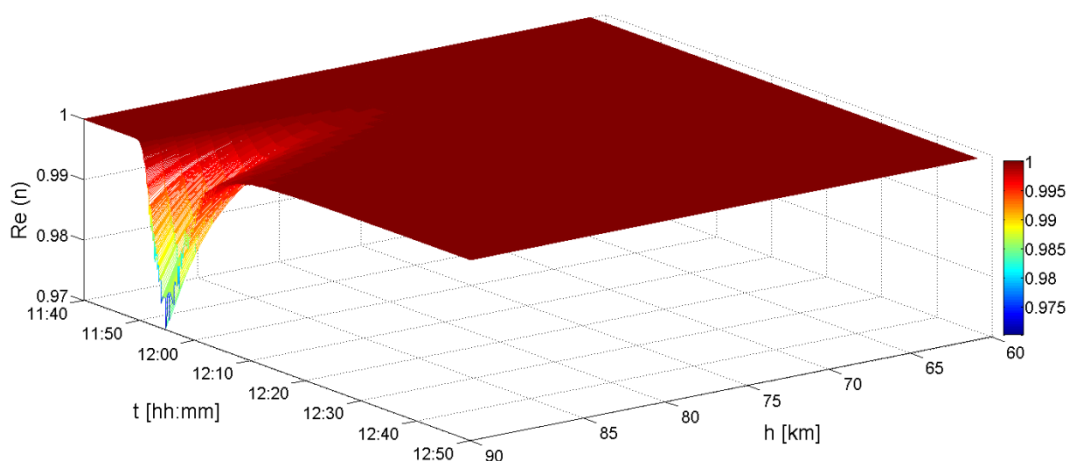
Sl. 5-10: Prostorno-vremenska raspodela realnog dela indeksa refrakcije za noseću frekvenciju radio talasa od 1 MHz.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

---



Sl. 5-11: Prostorno-vremenska raspodela realnog dela indeksa refrakcije za noseću frekvenciju radio talasa od 10 MHz.

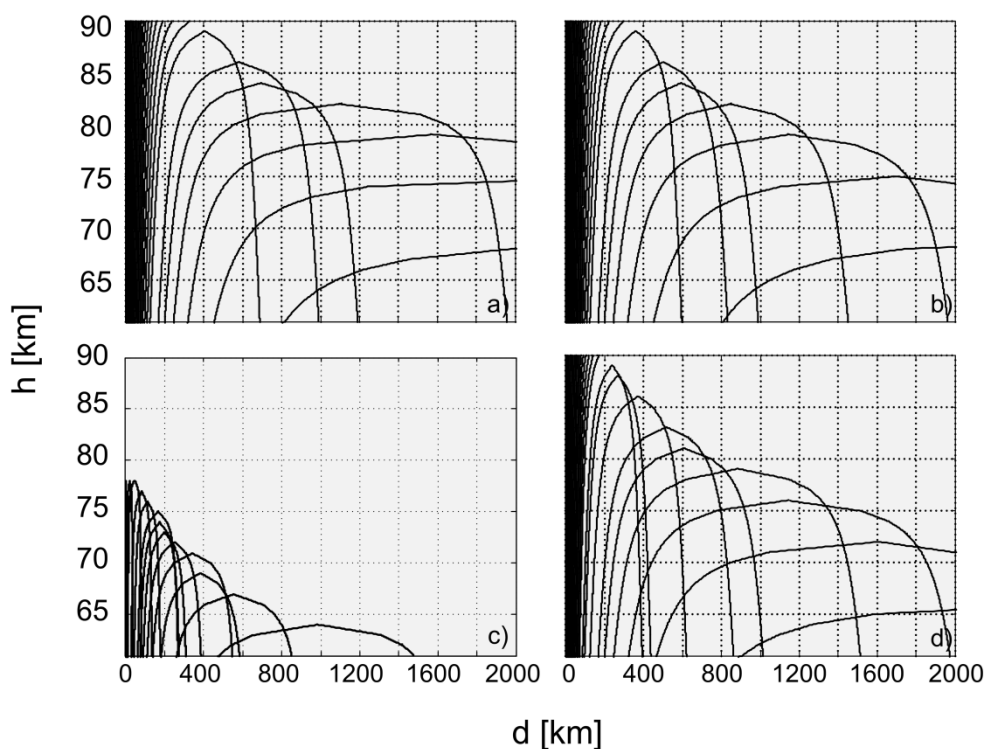


Sl. 5-12: Prostorno-vremenska raspodela realnog dela indeksa refrakcije za noseću frekvenciju radio talasa od 30 MHz.

Na Sl. 5-13 – Sl. 5-15 su prikazane putanje radio signala frekvencija 1, 10 i 30 MHz emitovanih pod različitim uglovima sa površine zemlje u četiri vremenska trenutka (Sl. 5-9): mirnom stanju (a), trenutku početka X-flera (b), trenutku maksimalne elektronske koncentracije (c) i u jednom trenutku tokom relaksacije (d). Upoređujući različite panele se vidi da se za sve posmatrane frekvencije putanja kretanja zraka (talasnog fronta) dobijene numeričkim modelovanjem na bazi relacije 5.5 intenzivnije povija kako elektronska plazmena frekvencija sredine raste usled dodatne jonizacije izazvane X-flerom pri čemu je

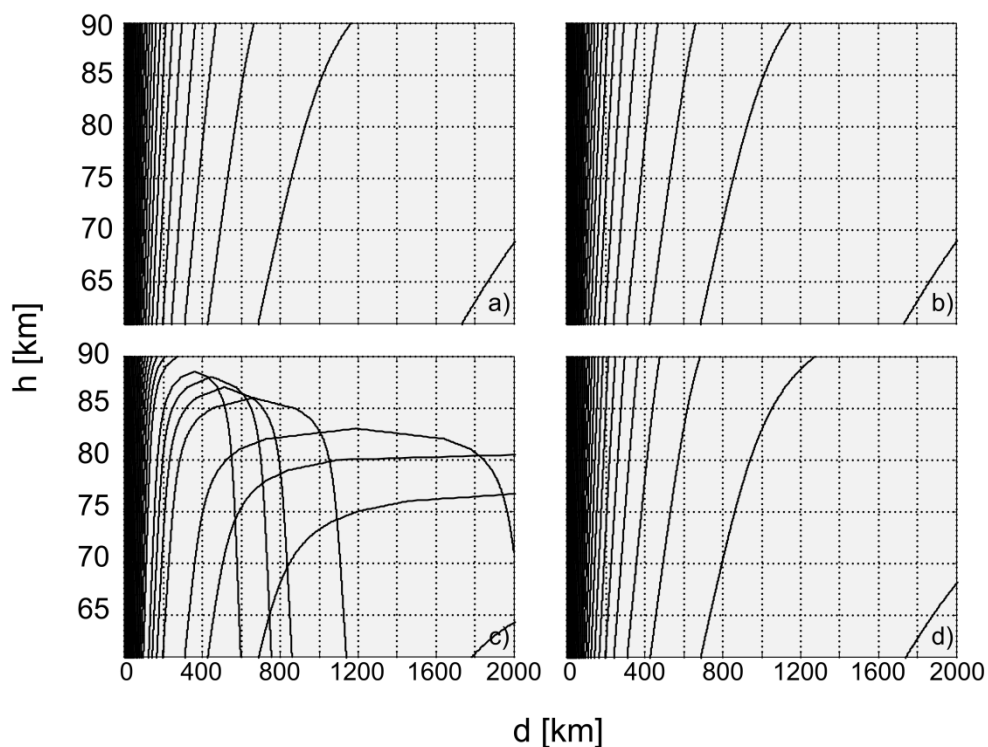
## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

povijanje maksimalno izraženo u trenutku maksimalnog  $f_o$ . Takođe, povećanjem nadmorske visine ( $h$ ) uočljivo je značajnije povijanje posmatranih radio talasa karakterističnih frekvencija u okviru D-sloja, a povećanjem noseće frekvencije se tačka refleksije izmešta u više jonosferske slojeve (E i F). Za zrake koji su emitovani pod većim uglom u odnosu na normalu graničnih površina, tačka prodiranja u D-sloj jonosfere se pomera ka većim udaljenostima od predajnika ( $d$ ) za istu nadmorsku visinu (linije na panelima se pomeraju u desno) i primetan je izraženiji uticaj sredine na njihovo prostiranje. U toku povijanja talasnog fronta, deo energije radio talasa se predaje sredini prostiranja tj. nastaje apsorpcija energije radio talasa.

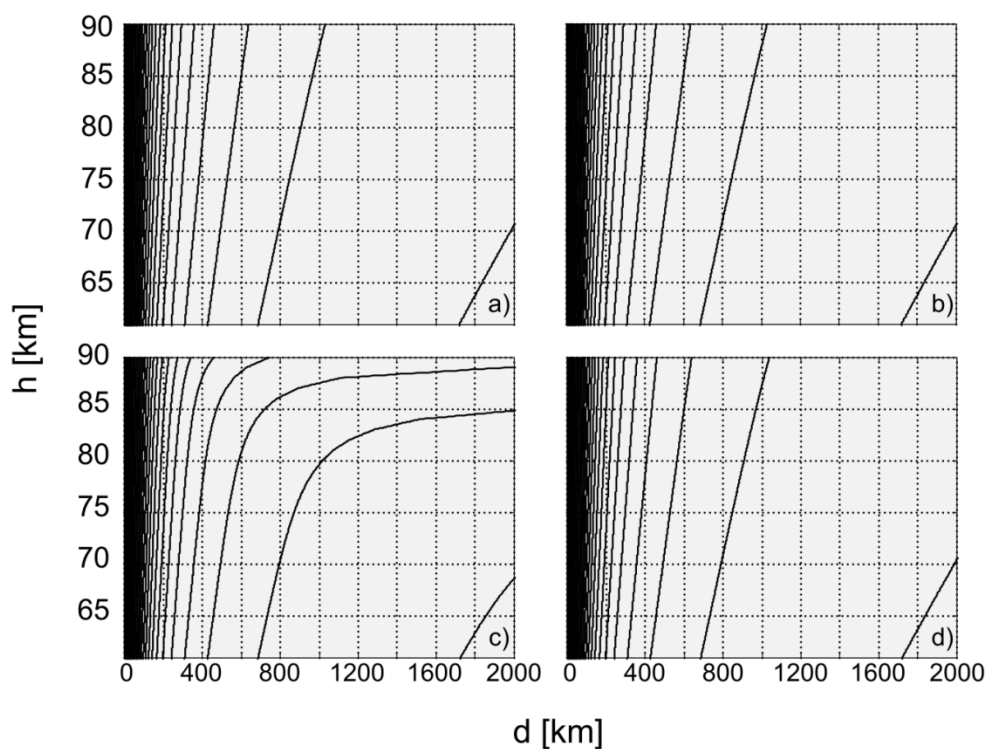


Sl. 5-13: Prostiranje radio talasa noseće frekvencije 1 MHz za različite uglove pod kojima se emituje radio signal sa površine zemlje u mirnom stanju (a), trenutku početka X-flera (b), trenutku maksimalne elektronske koncentracije (c) i u jednom trenutku tokom relaksacije (d).

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom



Sl. 5-14: Isto kao i Sl. 5-13, ali za noseću frekvenciju od 10 MHz.



Sl. 5-15: Isto kao i Sl. 5-13, ali za noseću frekvenciju od 30 MHz.

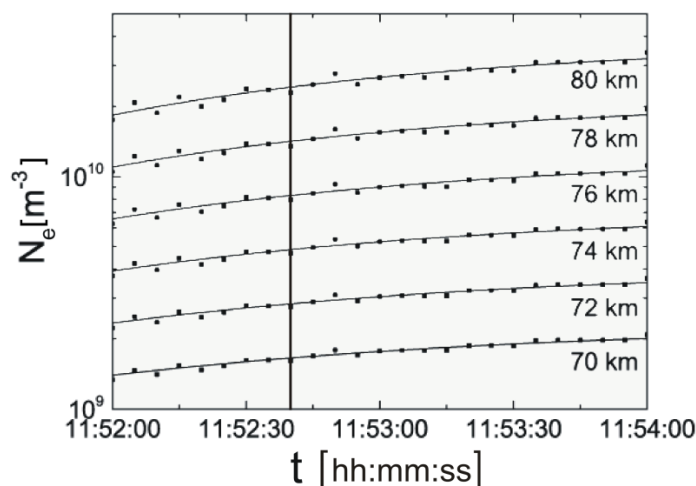
### 5.3.3. Karakteristike jonizovane sredine u toku trajanja X-flera

Efekti koje energija dodatne jonizacije usled pojave Sunčevog X-flera ispoljava na D-sloj jonosfere na narednim stranama će biti odvojeno razmatrana na konkretnom slučaju X-flera, u dva karakteristična slučaja – trenutak maksimalnog fluksa X-zračenja i period relaksacije nakon pojave X-flera.

#### 5.3.3.1. Karakteristike jonizovane sredine u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja X-flera

Iz analize date u 5.2.3.1. se vidi da se u trenutku maksimuma intenziteta zračenja ( $t_{l_{max}}$ ) za poznate visinske raspodele elektronske koncentracije  $N_e$  i njenog prvog i drugog izvoda mogu dobiti brzine proizvodnje ( $G(h, t_{max})$ ) i gubitaka ( $L(h, t_{max})$ ) elektrona, kao i koeficijenta  $K(h, t_{max})$  i  $\alpha_{eff}(h, t_{max})$ .

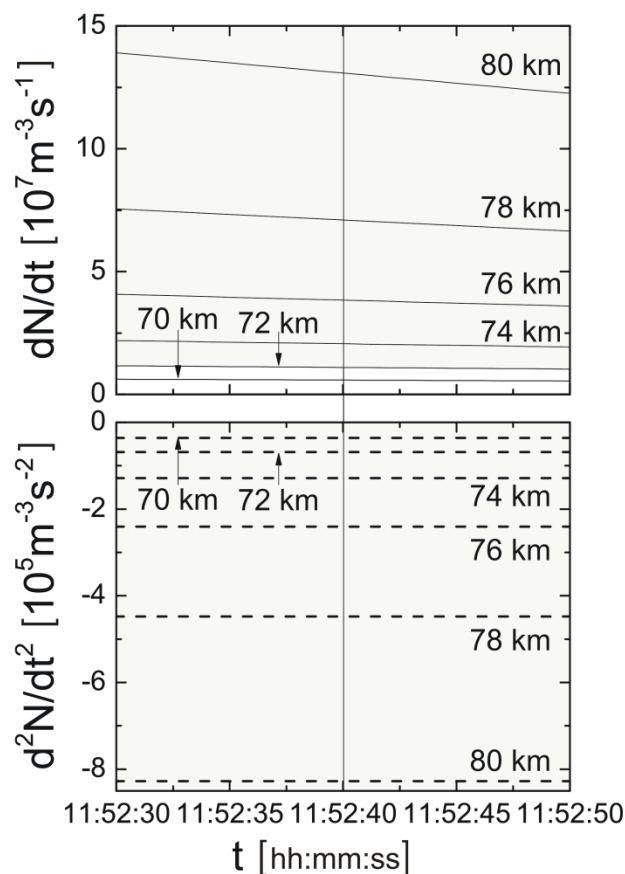
Na Sl. 5-16 prikazana je koncentracija elektrona na referentnim nadmorskim visinama u periodu oko trenutka maksimalne vrednosti intenziteta X-zračenja (11:52:40) računata u ekvidistantnim vremenskim trenucima sa razmakom od 5 sekundi.



Sl. 5-16: Vrednosti elektronske koncentracije i fitovanih funkcija na reprezentivnim nadmorskim visinama u periodu oko maksimuma X-zračenja.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

Trend promene vrednosti elektronske koncentracije je opisan fitovanim polinomnim funkcijama drugog stepena, a prvi i drugi izvodi ovih funkcija su predstavljeni na Sl. 5-17. Prvi izvod funkcije promene elektronske koncentracije ima pozitivne vrednosti, dok je su vrednosti drugog izvoda negativne, a apsolutne vrednosti ovih izvoda rastu sa porastom nadmorske visine što indicira veći uticaj Sunčevog flera na višim visinama.

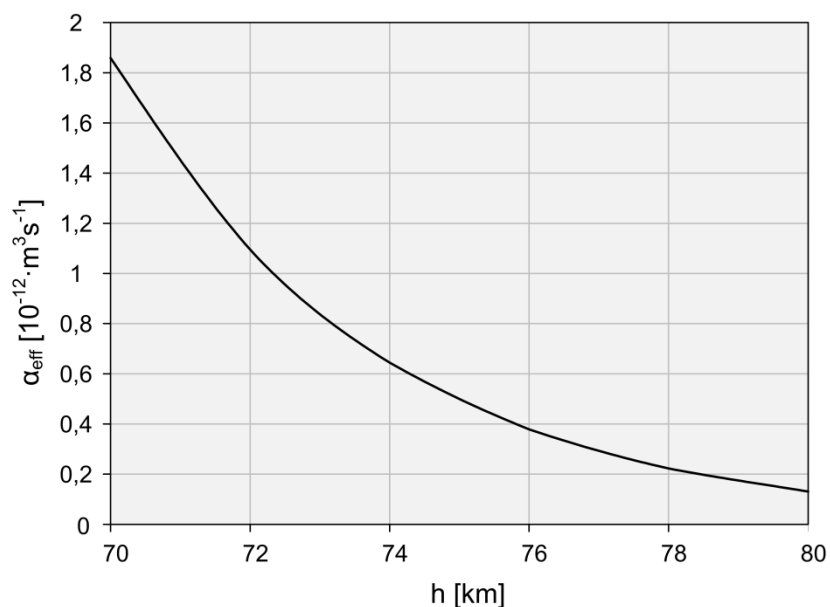


Sl. 5-17: Prvi i drugi izvod fitovanih funkcija promene elektronske koncentracije na reprezentativnim nadmorskim visinama u periodu oko maksimuma X-zračenja.

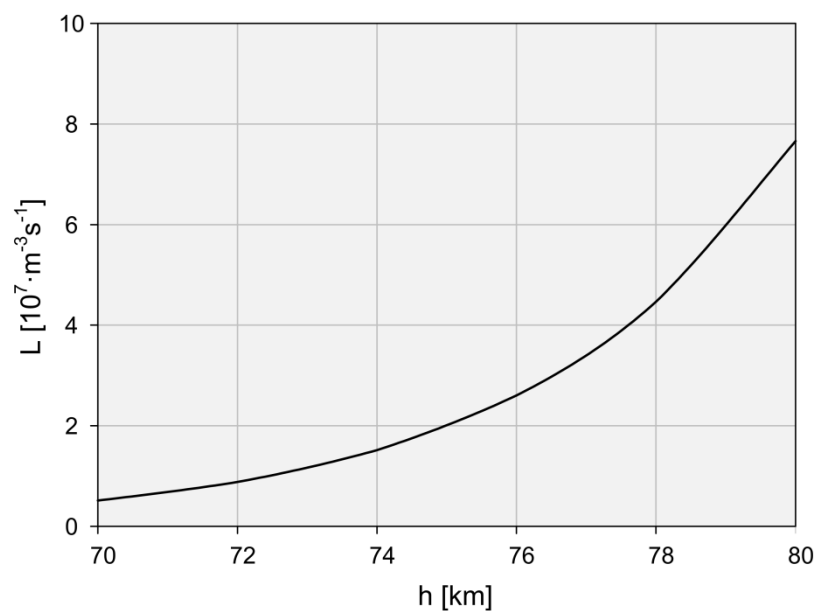
Primenom izraza (5.14) – (5.18) na ove vrednosti dobijene numeričkim procesuiranjem podataka zabaleženim radio prijemnikom dobijaju se visinske zavisnosti odgovarajućih gore navedenih parametara jonizovane sredine prikazanih na Sl. 5-18 – Sl. 5-21.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

---



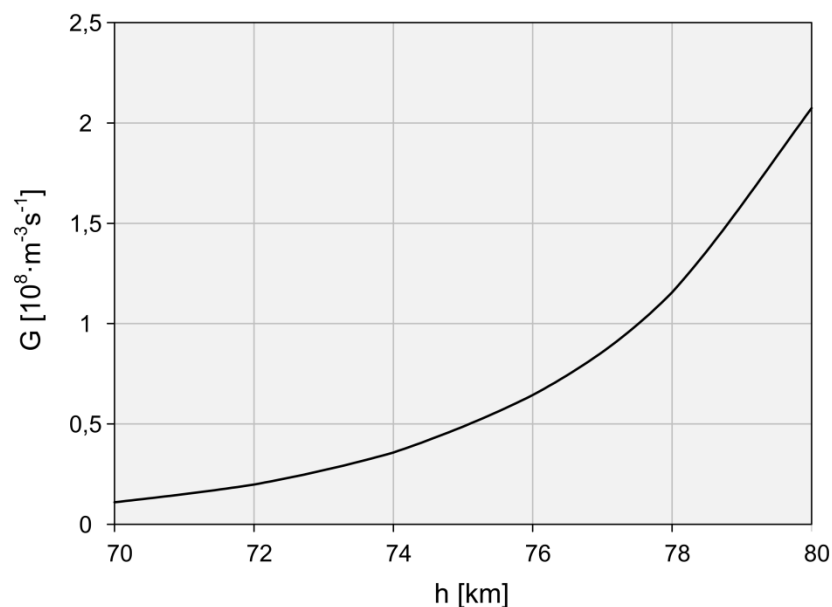
Sl. 5-18: Efektivni rekombinacioni koeficijent u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama.



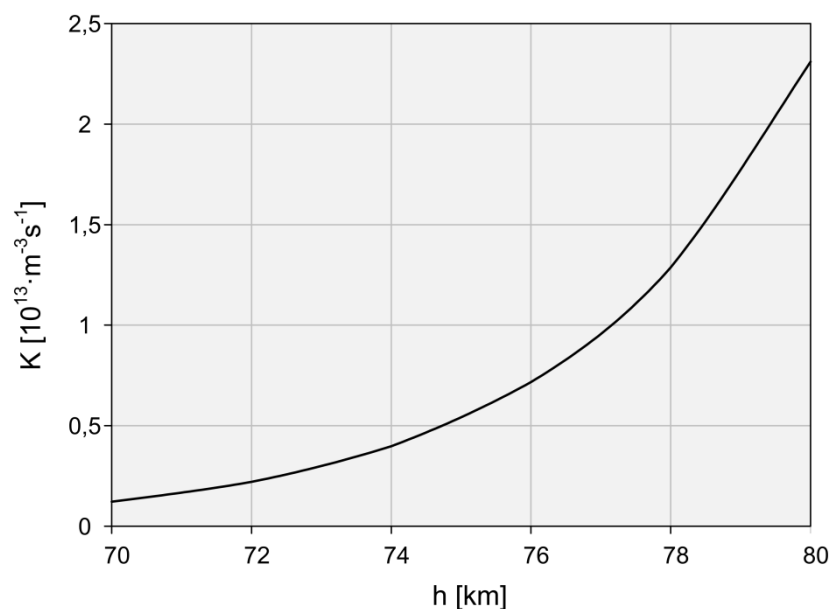
Sl. 5-19: Brzina gubitaka elektrona u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

---



Sl. 5-20: Brzina proizvodnje elektrona u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama.



Sl. 5-21: Koeficijent proizvodnje elektrona u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama.

Na prikazanim graficima u trenutku maksimalne vrednosti intenziteta X-flera uočljiva je visinska zavisnost vrednosti analiziranih parametara. Povećanjem nadmorske visine u domenu D-sloja uočava se opadanje vrednosti efektivnog rekombinacionog

koeficijenta ( $\alpha_{eff}$ ), a porast vrednosti koeficijenta proizvodnje elektrona ( $K$ ), brzine gubitaka elektrona ( $L$ ) i brzine proizvodnje elektrona ( $G$ ).

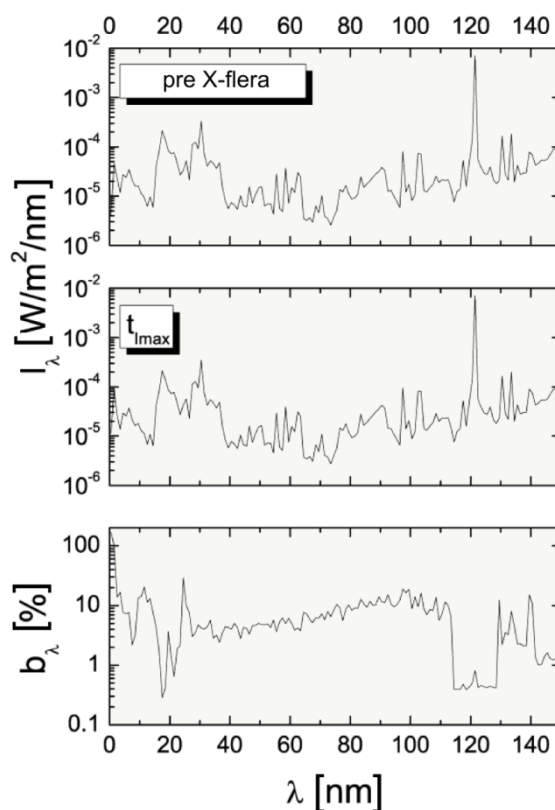
U dodatku prikazanim poremećajima moguće je analizirati i udeo vrednosti  $G_0(h)$  u  $G(h)$ , što za visine iznad oko 70 km to praktično znači udeo  $Ly\alpha$  fotona u jonizaciji.

Kao što je već bilo opisano ranije u ovom poglavlju (kraj odeljka 5.2.3.1.), jedan od uslova za ovu analizu je bila konstantna vrednost  $G_0(h)$  tokom poremećaja. Na visinama iznad oko 70 km to praktično znači konstantna brzina fotojonizacije  $Ly\alpha$  fotonima. Uzimajući u obzir da se koeficijent apsorpcije  $Ly\alpha$  fotona ne menja značajno u posmatranom vremenu jer je jonosferska plazma slabo jonizovana (broj neutralnih čestica koje opsorbuju fotone je praktično nepromenjen), potrebno je uporediti porast nivoa intenziteta X i  $Ly\alpha$  zračenja da bi se ustanovila validnost aproksimacije. To se može realizovati uvođenjem parametra  $b_\lambda$  u toku trajanja X-flera:

$$b_\lambda = 100 \frac{(I_\lambda(t_{max}) - I_\lambda(t_{up}))}{I_\lambda(t_{up})}, \quad (5.32)$$

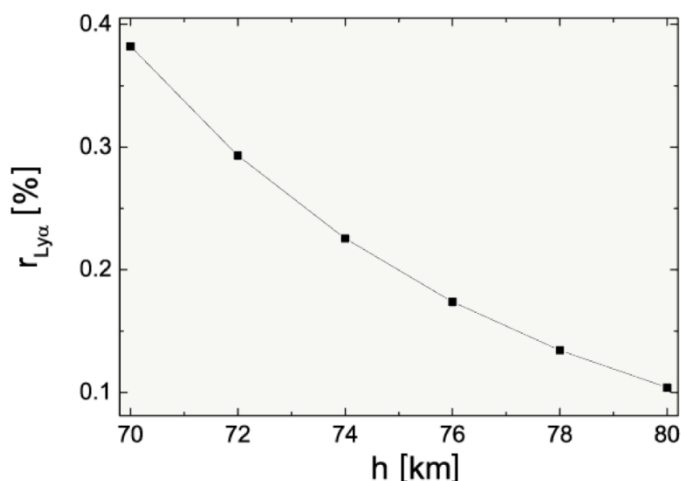
gde  $t_{max}$  i  $t_{up}$  predstavljaju vremenske trenutke maksimalnog intenziteta zračenja i trenutka u mirnom stanju, pre pojave X-flera, respektivno. Spektri zračenja u posmatranom trenutku su dobijeni metodom datom u [144]. Kao što je prikazano na Sl. 5-22,  $Ly\alpha$  zračenje čija se talasna dužina nalazi u domenu od 120 – 121 nm menja se u domenu do 1 % u odnosu na period pre pojave X-flera, dok se X-zračenje čija je talasna dužina u domenu od 0,1 – 1 nm menja u domenu od oko 170 %. To znači da je promena u intenzitetu  $Ly\alpha$  zračenja u toku trajanja X-flera u odnosu na promenu intenziteta X-zračenja zanemarljiva. Na ovaj način se ukupan udeo  $Ly\alpha$  zračenja u jonizacionom procesu značajno smanjuje u odnosu na period mirnog stanja.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom



Sl. 5-22: Spektar zračenja pre (gornji panel) i u trenutku maksimalnog intenziteta X-zračenja (srednji panel) i varijacija udela zračenja na konkretnim talasnim dužinama (donji panel).

Primenom izraza (5.32) dobija se visinska zavisnost udela energije  $\text{Ly}\alpha$  zračenja (opseg 120 – 121 nm) u jonizacionom procesu u trenutku maksimalnog zračenja u toku trajanja X-flera (opseg 0,1 – 1 nm) prikazana na Sl. 5-23 gde se vidi da u posmatranom slučaju njena vrednost ne prelazi 0,5 %. U slučaju analize konkretno prikazanog X-flera, jonizacioni uticaj u ukupnom jonizacionom procesu je najveći (oko 0,4 %) na najnižoj nadmorskoj visini D-sloja od 60 km. Analiza pokazuje da u toku trajanja X-flera energija koja je spektralno raspoređena u X talasnom opsegu ima primat u jonizacionom procesu na svim nadmorskim visinama D-sloja jonosfere.

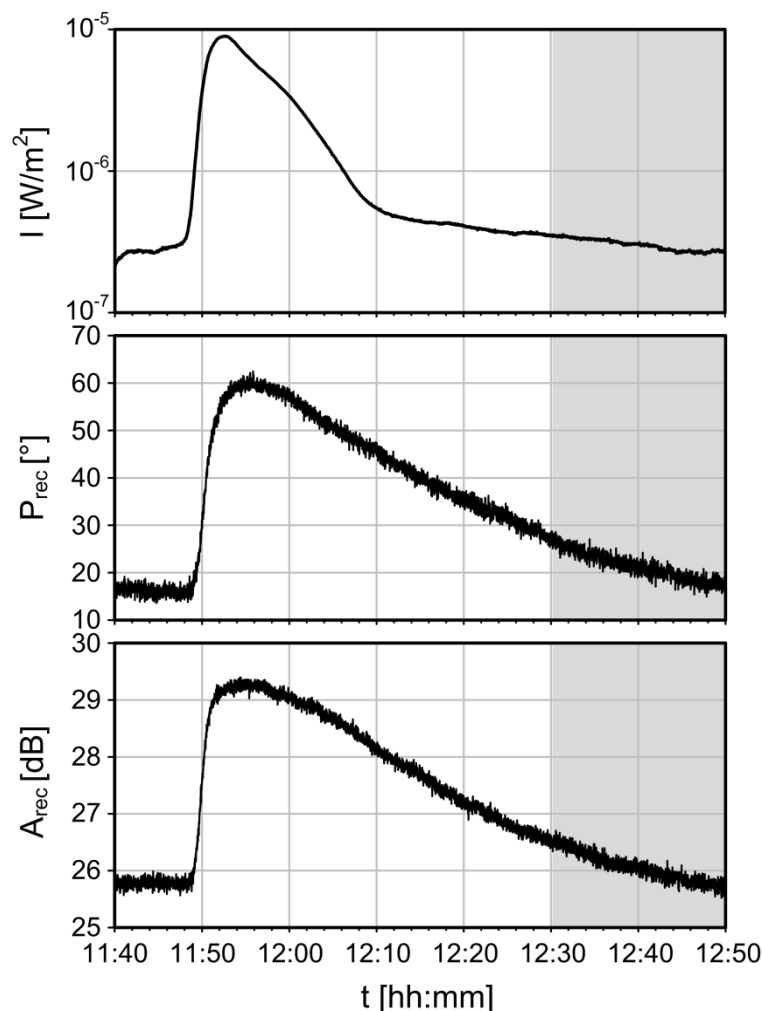


Sl. 5-23: Relativni udeo  $Ly\alpha$  zračenja u jonizacionom procesu u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja u X talasnom opsegu na reprezentativnim nadmorskim visinama.

### 5.3.3.2. Karakteristike jonizovane sredine u periodu relaksacije nakon X-flera

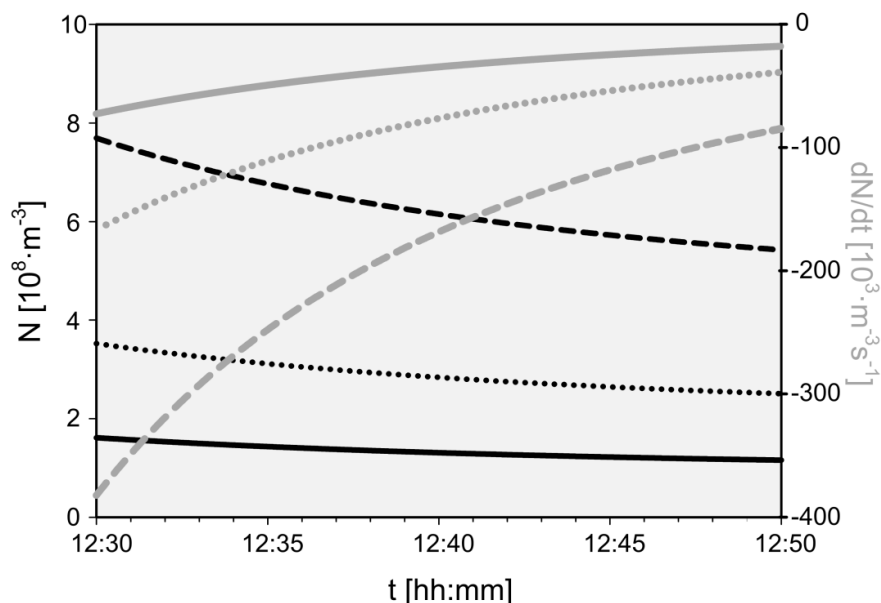
U toku relaksacije, kada  $I(t)$  opadne ispod nivoa značajnog za dodatnu jonizaciju, koncentracija elektrona  $N_e$  opada usled dominantnog procesa rekombinacije slobodnih elektrona kao što je to prikazano jednačinom (5.20). U ovom slučaju se smatra da je fotojonizacija uzrokovana X-zračenjem zanemarljiva u odnosu na  $G_0$  ( $K(\vec{r}, t)I(t) \ll G_0$ ), a proces traje dok god se uslovi sredine ne stabilizuju u kvazi-stacionarne, tj. dok ne postanu približno isti kao i pre delovanja energije X-flera (razlika nastaje usled periodičnih dnevnih varijacija). Vreme potrebno da se dostigne takvo stanje sredine da bi se uticaj Sunčevog flera C klase zanemario tipično traje manje od jednog sata [130].

Rezultati koji će biti prikazani na narednim stranicama odnose se na period relaksacije nakon X-flera koji je razmatran u ovoj disertaciji. Na Sl. 5-24 je to osenčeni deo vremena koji počinje u trenutku kada intenzitet fluksa X-zračenja, nakon dostizanja maksimalne vrednosti, dostigne istu vrednost koju je imao kada je jonizovana sredina počela vidljivo da menja odziv detektovan karakteristikama merenog VLF radio signala. Uslov sprovedene analize je pretpostavka da manji intenzitet X-zračenja ne doprinosi dodatnoj jonizaciji D-sloja jonosfere što predstavlja osnovu za analizu poremećaja u pojedinim fazama flera.



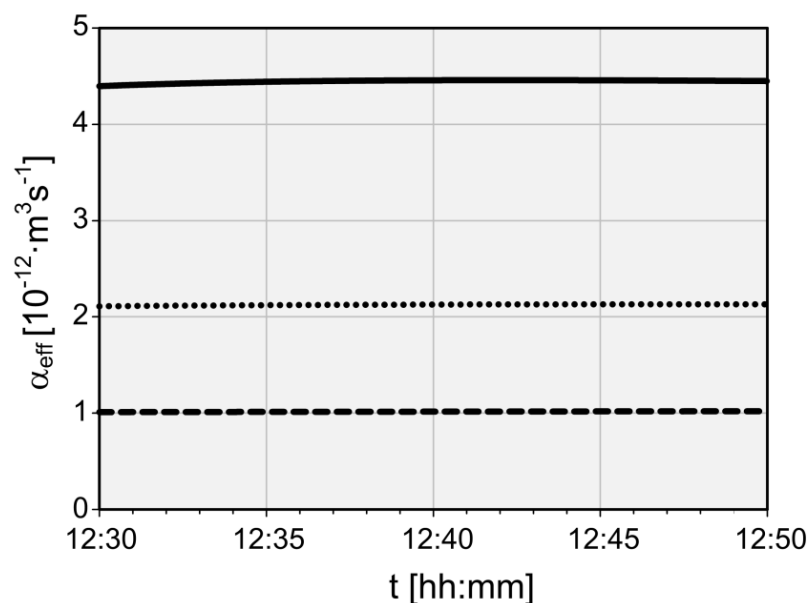
Sl. 5-24: Fluks zračenja u X-opsegu frekvencija (gornji panel), promena faze (srednji panel) i nivoa (donji panel) 23,4 kHz VLF radio signala 5. maja 2010. za vreme relaksacionog perioda (siva boja) nakon X-flera.

Kao što je ranije naglašeno, za izračunavanje parametara plazme u ovom periodu poremećaja, koeficijenta ( $\alpha_{eff}(h,t)$ ), brzine gubitaka elektrona ( $L(h,t)$ ) i elektronske temperature ( $T_e$ ), potrebno je poznavanje raspodele elektronske koncentracije  $N_e(h,t)$  i njenog prvog izvoda. Zavisnost ovih veličina respektivno opisanih izrazima (5.21), (5.22) i (5.28). Ovi ulazni parametri, dobijeni već opisanom procedurom baziranom na merenjima karakteristika VLF radio signala i korišćenju LWPC numeričkog modela, predstavljeni su na Sl. 5-25 za nadmorske visine od 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija).



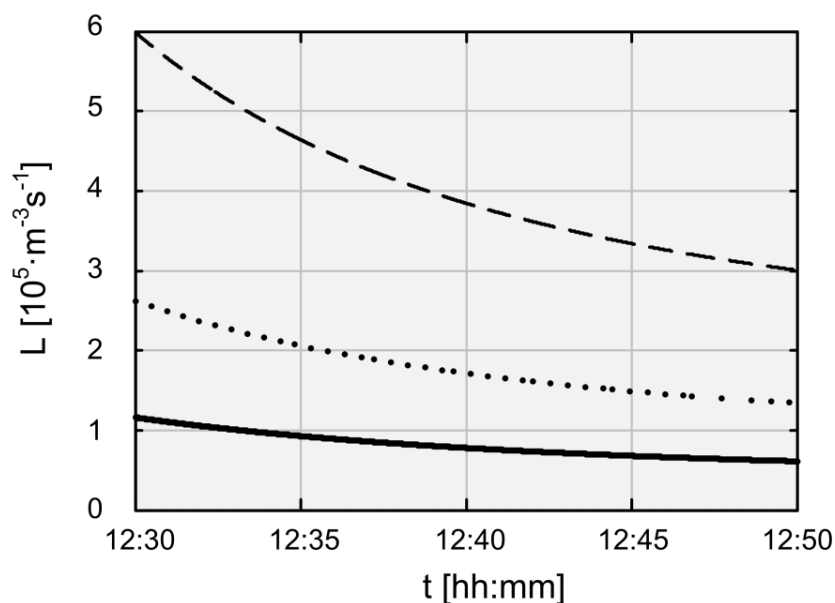
Sl. 5-25: Promena koncentracije elektrona i prvog izvoda koncentracije elektrona po vremenu u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija).

Uvrstivši dobijene vrednosti sa Sl. 5-25 u jednačinu (5.21), dobija se vremenska zavisnost efektivnog rekombinacionog koeficijenta po visinama za nadmorske visine od 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija) (Sl. 5-26). Može se primetiti blagi porast vrednosti koeficijenta kada se posmatra vremensko trajanje relaksacije, a promena je vidljivija na nižim nadmorskim visinama. Ovakav trend je prisutan i u istraživanju predstavljenom u [107], a vrednosti dobijene na kraju perioda relaksacije slažu se sa rezultatima dobijenim u [134] i [145].



Sl. 5-26: Promena efektivnog rekombinacionog koeficijenta u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija).

Poznajući zavisnost  $\alpha_{eff}(h,t)$  u periodu relaksacije, na osnovu izraza (5.22) i (5.28) mogu se dobiti prostorno-vremenske raspodele brzine gubitaka elektrona  $L(h,t)$  i elektronske temperature  $T_e$ . Na Sl. 5-27 je predstavljena promena brzine gubitaka elektrona na reprezentativnim visinama D-sloja. U toku relaksacionog perioda primetna je značajnija promena ovog parametra na višim nadmorskim visinama.



Sl. 5-27: Promena brzine gubitaka elektrona u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija).

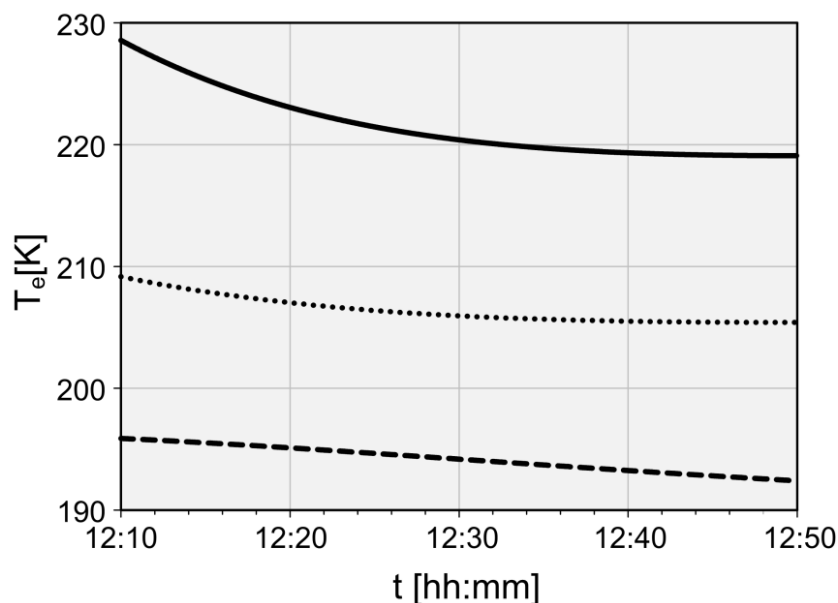
Sa Sl. 5-16 i Sl. 5-17 se može uočiti mala promena elektronske koncentracije i njenog prvog izvoda u posmatranom periodu vremena, što je osnov za primenu aproksimacija uvedenih za računanje konstante  $C$ . Vrednost inicijalnih parametara potrebnih za dalju analizu su predstavljeni u Tab. 5-2, a dobijeni su na osnovu podataka iz literature, po već objašnjennoj proceduri.

Tab. 5-2: Vrednosti inicijalnih parametara analize dinamike D-sloja jonosfere.

| Nadmorska visina<br>[km] | $G_0$ [108]<br>[m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ] | $T_e^0$ [140]<br>[K] | $\alpha_{eff}^0$<br>[10 <sup>-12</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] | $C$<br>[10 <sup>-12</sup> ] |
|--------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 70                       | 41841                                             | 219,1                | 4,55                                                                    | 3,89                        |
| 75                       | 95000                                             | 205,4                | 2,13                                                                    | 1,76                        |
| 80                       | 215697                                            | 192,4                | 1,02                                                                    | 0,82                        |

Dobijene vrednosti omogućavaju, korišćenjem (5.28) prostorno-vremensku promenu elektronske temperature za nadmorske visine od 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija) koja je prikazana na Sl. 5-28. Može se uočiti manja temperaturna promena na višim nadmorskim visinama, a srednja brzina temperaturne promene u toku prikazanih 20 minuta relaksacionog perioda prikazana je u Tab. 5-3.

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom



Sl. 5-28: Promena elektronske temperature u periodu relaksacije na visinama 70 km (puna linija), 75 km (tačkasta linija) i 80 km (isprekidana linija).

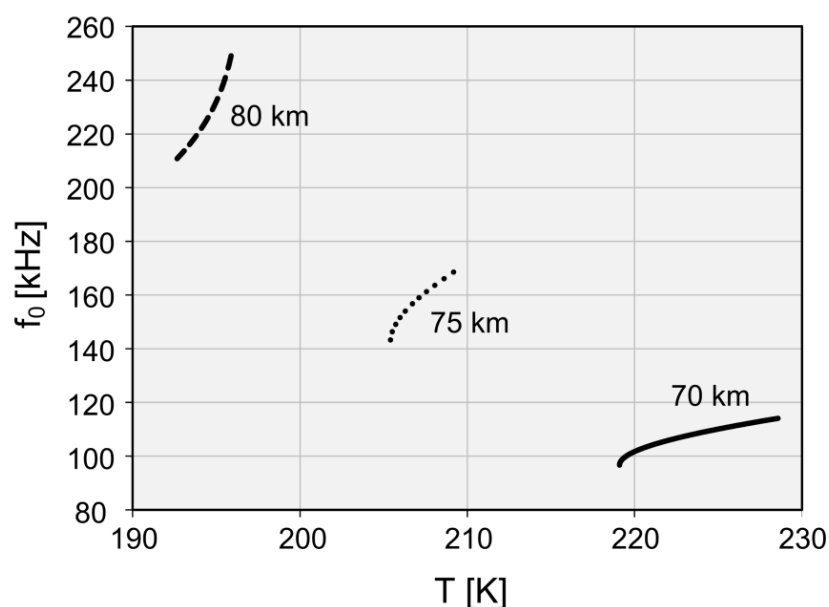
Razlika u brzini temperaturne promene se može uočiti po nadmorskim visinama što prikazuje različito ponašanje sredine po njenim slojevima nakon prestanka dejstva X-flera, dodatnog faktora u jonizacionom procesu. Rezultati pokazuju veću relativnu promenu elektronske plazmene frekvencije (15,27 %, 15,64 % i 16,01 % na nadmorskim visinama od 70, 75 i 80 km, respektivno) u odnosu na temperaturnu promenu (-4,55 %, -1,99 % i -1,95 % na nadmorskim visinama od 70, 75 i 80 km, respektivno). Iz Tab. 5-3 se vidi da navedene promene  $f_0$  nisu velike i da su relativne vrednosti promene  $f_0$  veće u odnosu na promene  $T$ .

Tab. 5-3: Promena temperature i elektronske plazmene frekvencije u toku relaksacije.

| Nadmorska visina<br>[km] | Srednja brzina promene           |                                      | Trenutna relativna promena             |                                            |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
|                          | $\Delta T / \Delta t$<br>[K/min] | $\Delta f_0 / \Delta t$<br>[kHz/min] | $(\Delta T / \Delta t) / T$<br>[%/min] | $(\Delta f_0 / \Delta t) / f_0$<br>[%/min] |
| 70                       | -0,522                           | -0,871                               | -0,227                                 | -0,764                                     |
| 75                       | -0,208                           | -1,318                               | -0,099                                 | -0,782                                     |
| 80                       | -0,191                           | -1,994                               | -0,097                                 | -0,801                                     |

U analizi jonizovane sredine D-sloja tokom relaksacije interesantno je ispitati i povezanost parametara  $f_0$  i  $n$  koji su značajni za prostiranje radio talasa sa temperaturom.

Na Sl. 5-29 se vidi obrnuta tendencija sa povećanjem nadmorske visine – promene elektronske plazmene frekvencije rastu, a odgovarajuće temperaturne promene opadaju. Objašnjenje ove pojave leži u činjenici da je na višim nadmorskim visinama intenzivnija jonizacija usled veće količine energije oslobođene u toku flera, a na nižim nadmorskim visinama je veća promena vrednosti efektivnog rekombinacionog koeficijenta, pa samim tim i temperature.

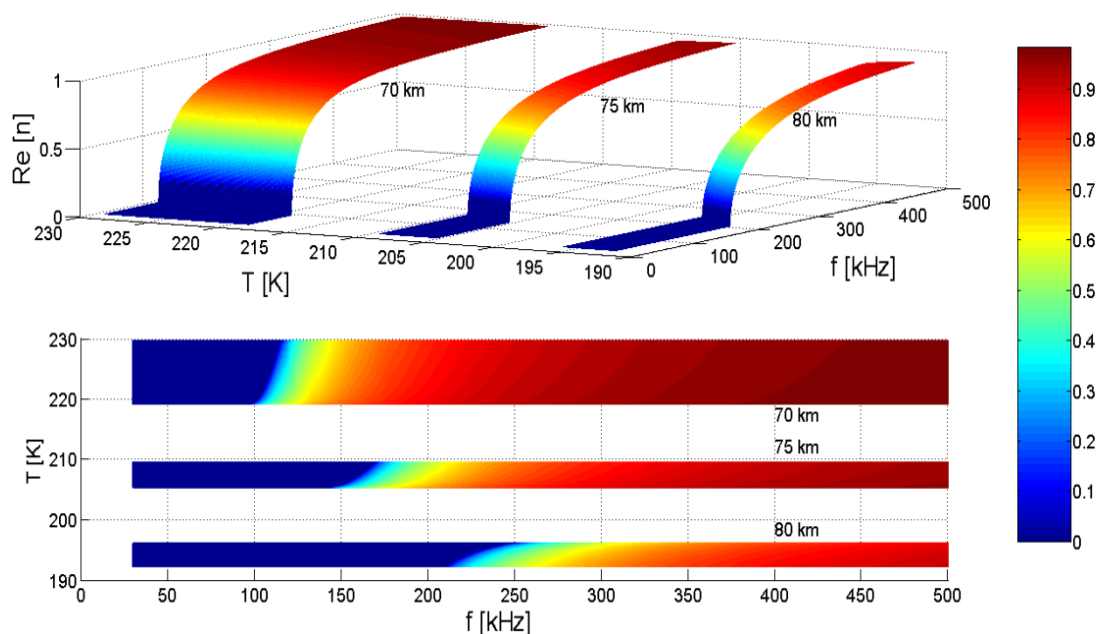


Sl. 5-29: Promena elektronske plazmene frekvenciji u funkciji promene temperature za tri referentne nadmorske visine.

Dobijene vrednosti  $f_0$  su na kraju korišćene za dobijanje vrednosti indeksa refrakcije (3.47) koji je na Sl. 5-30 promenljivom bojom predstavljen u funkciji temperature i vrednosti noseće frekvencije radio signala, na tri referentne nadmorske visine D-sloja. Ovde se mogu razlikovati dva tipična slučaja – indeks refrakcije ima imaginarnu vrednost (radio talas je apsorbovan i delimično reflektovan od slojeva na nižim nadmorskim visinama) i realnu vrednost (radio talas se prostire kroz D-sloj). Prvi slučaj se odnosi na radio talase nosećih frekvencija 96,64 – 114,06 kHz, 142,19 – 168,55 kHz i 209,21 – 249,09 kHz za nadmorske visine od 70, 75 i 80 km, respektivno, u funkciji od temperature. Kada je vrednost indeksa refrakcije realna i uzima vrednost u opsegu od 0 do 1, vrednost elektronske plazmene frekvencije je manja od vrednosti noseće frekvencije radio signala čime jonizovana sredina vrši refrakciju radio talasa. U slučaju kada je  $n=1$ ,

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

radio talas se nesmetano prostire kroz posmatranu sredinu, a kada je  $n=0$ , radio talas ima istu vrednost noseće frekvencije kao i elektronska plazmena frekvencija sredine i u tom slučaju nastaje apsorpcija elektromagnetske energije radio talasa. 3D grafik na Sl. 5-30 predstavlja zavisnost realnog dela indeksa refrakcije od vrednosti noseće frekvencije radio talasa  $f$  i temperature  $T$  na referentnim nadmorskim visinama, dok je na donjem delu iste slike predstavljena ista promena radi bolje uočljivosti. Nadmorska visina na kojoj realni deo indeksa refrakcije  $n$  ima definisanu vrednost raste sa porastom vrednosti noseće frekvencije radio signala i praktično određuje dubinu prodiranja u D-sloj za radio talase emitovane sa Zemlje. Takođe, indeks refrakcije  $n$  opada sa povećanjem temperature na svim visinama, ali je promena intenzivnija na višim nadmorskim visinama.



Sl. 5-30: Promena realnog dela indeksa refrakcije u funkciji od promene temperature i noseće frekvencije radio talasa.

### 5.4. Zaključak

U ovom poglavlju prikazana je studija promena karakteristika parametara jonizovane sredine D-sloja jonosfere i prostiranja radio talasa kroz ovu sredinu tokom poremećaja uzrokovanim Sunčevim X-flerom. Analiza se sastoji iz tri dela koja se odnose na:

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

---

- **ceo period poremećaja** – date su prostorno-vremenske zavisnosti elektronske koncentracije, elektronske plazmene frekvencije, indeksa refrakcije i putanje prostiranja radio talasa različitih nosećih frekvencija,
- **trenutak maksimuma intenziteta X-zračenja** – data je procedura izvođenja analitičkih izraza za računanje visinske zavisnosti promena parametara brzine proizvodnje i gubitaka elektrona, kao i koeficijenata proizvodnje i gubitaka elektrona i
- **period relaksacije nakon uticaja X-flera** – data je procedura izvođenja analitičkih izraza za računanje vremenske zavisnosti promena parametara koeficijenta gubitaka elektrona, brzine gubitaka elektrona i elektronske temperature za pojedine nadmorske visine D-sloja.

Rezultati sprovedenog istraživanja pokazuju da:

- koncentracija elektrona u D-sloju jonosfere u toku trajanja X-flera C klase, a posledično i elektronska plazmena frekvencija može porasti više od reda veličine čime značajno utiče na prostiranje radio talasa u ovom delu jonosfere,
- u periodu vremena oko maksimalne vrednosti elektronske plazmene frekvencije, ovaj deo jonosfere značajno može uticati na prostiranje radio talasa do najviše frekvencije HF opsega,
- maksimalan uticaj na prostiranje radio talasa se ostvaruje nakon registrovanja maksimalne vrednosti fluksa X-zračenja na satelitu,
- uticaj na prostiranje radio talasa je značajniji na višim nadmorskim visinama,
- promene indeksa refrakcije su intenzivnije na višim nadmorskim visinama,
- promene karakteristika prostiranja radio talasa HF opsega kroz sredinu D-sloja jonosfere postaju značajne sa zakašnjenjem u odnosu na značajan porast fluksa X-zračenja,
- D-sloj jonosfere u vremenskom intervalu značajne dodatne jonizacije može izazvati intenzivnu refrakciju radio talasa što se na konkretnom mestu prijema manifestuje kao iznenadno smanjenje nivoa prijemnog polja radio talasa dela HF opsega frekvencija,

## 5. Modelovanje parametara plazme u jonosferskom D-sloju i karakteristika prostiranja radio talasa u toku poremećaja izazvanog Sunčevim X-flerom

---

- za istu vrednost intenziteta X-zračenja pre i nakon maksimuma vrednosti fluksa X-zračenja, vrednost indeksa refrakcije se razlikuje – uticaj sredine je značajniji u toku relaksacije što indicira zavisnost uticaja jonizovane sredine na prostiranje i od inicijalnog stanja posmatrane sredine,
- u trenutku maksimalnog intenziteta X-zračenja, udeo  $L\alpha$  zračenja se može zanemariti u ukupnom fotojonizacionom procesu,
- značajniji udeo  $L\alpha$  zračenja u fotojonizacionom procesu je na nižim visinama jonosfere, ali je energija fotona u X talasnom opsegu dominantan uzrok povećanja elektronske koncentracije na svim nadmorskim visinama D-sloja,
- promena elektronske temperature je mala u periodu od 20 minuta nakon uticaja X-flera na sredinu D-sloja jonosfere,
- smanjenje elektronske temperature je promenljivo po nadmorskim visinama, a promena je izraženija na višim nadmorskim visinama i
- razlikuje se uticaj jonizujućeg zračenja na temperaturu i elektronsku plazmenu frekvenciju sa promenom visine – za razliku od prve veličine, druga raste sa porastom visine.

## **6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije**

U ovom poglavlju su predstavljeni rezultati istraživanja Sunčevog uticaja na usmerenu mikrotalasnu radio komunikaciju. Za potrebe istraživanja je formirana eksperimentalna radio komunikacija čija noseća frekvencija je bila diskretno promenljiva u opsegu od 2,4 do 5 GHz i kod koje se pratila promena nivoa prijemnog signala u različitim periodima godine. U toku merenja primećene su zakonitosti u varijaciji nivoa prijemnog signala koje su dovedene u vezu sa promenama vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja. Prikazana je korelacija dnevne promene ova dva parametra u toku celog dana na najvišoj i najnižoj frekvenciji navedenog opsega merenja. S obzirom na to da je u celokupnom opsegu merenja, na nekoliko reprezentativnih nosećih frekvencija primećeno karakteristično slabljenje u toku jutarnjih časova koje počinje od trenutka izlaska Sunca, izvršeno je modelovanje promene nivoa prijemnog signala u funkciji vrednosti noseće frekvencije i trenutka izlaska Sunca. Na kraju je izvršena analiza uzroka promena nivoa prijemnog signala u toku jutarnjih časova upoređivanjem trenda ove promene sa izmerenim meteorološkim parametrima sredine kroz koju se radio talas prostirao.

### **6.1. Uvod**

Prizemni sloj atmosfere – troposfera koja se nalazi u prostoru do dvadesetak kilometara nadmorske visine ispoljava presudan uticaj na prostiranje radio talasa zemaljskih radio-komunikacionih sistema. Za usmerene radio komunikacije mikrotalasnog područja, pored uticaja atmosferalija [146], refrakcija predstavlja jedan od dominantnih fenomena koji dovodi do promena karakteristika prostiranja radio talasa [147], [148]. Usled povećanja nadmorske visine, a samim tim i gradijentalne promene dielektrične konstante sredine, kao i promena meteoroloških uslova na putu prostiranja signala dolazi do povijanja talasnog fronta usmerene radio komunikacije i na mestu prijema se efekti ove pojave mogu manifestovati kao varijacija nivoa prijemnog signala. Blage varijacije u nivou

prijemnog signala linearno polarizovanog talasa mogu proisteći iz narušavanja polarizacionih osobina radio talasa, odnosno promene smera i intenziteta vektora električne i magnetske komponente radio talasa na mestu prijema u odnosu na emitovani signal. Ova pojava može proisteći iz uticaja sredine koja je sama po sebi polarizaciono uticajna, koja je pod uticajem stalnog ili promenljivog magnetskog polja [149] ili iz direktnog uticaja interferirajućih prirodnih i veštačkih izvora elektromagnetskog zračenja [150]. U zavisnosti od frekventijskog opsega koji se koristi za prenos informacije, dominantnu „smetnju“ koja potiče od efekata Sunčevih aktivnosti u prostiranju predstavljaju pojave navedene u Tab. 2-3.

Kako se tehnološka rešenja radio komunikacija današnjice pomeraju ka sve višim frekventijskim opsezima radi povećanja kapaciteta komunikacionih kanala, postavlja se problem uticaja sredine prostiranja na mogućnost informacionog prenosa u mikrotalasnom frekventijskom području iznad 2 GHz. Merenjima karakteristika eksperimentalne usmerene radio komunikacije u mikrotalasnom području i poređenjem dobijenih rezultata sa izmerenim vrednostima geomagnetskog polja i meteoroloških pojava, u predstavljenom istraživanju se došlo do zakonitosti u vidu modela koji će dovesti do preciznijeg proračuna kvaliteta usmerenih mikrotalasnih komunikacionih puteva.

Radio signal mikrotalasnog područja podložan je uticaju sredine kroz koju se prostire na mnogo načina. Proračun uticaja sredine na prostiranje modulisanog radio signala prevashodno podrazumeva upotrebu empirijskim putem dobijenih relacija. Promenljive ovih relacija su karakteristične vrednosti koje opisuju modulisani radio signal (frekvencija, frekventijski opseg dodeljen za prenos, trajanje informacionog simbola...), kao i sredinu kroz koju se signal prostire (osnovno projektovano slabljenje, refrakcija, difrakcija, refleksija...). Pojava iščezavanja signala na mestu prijema (feding) je stohastičke prirode, pa se iz tog razloga koriste statističke metode za analizu verovatnoće pojavljivanja prirodnih pojava koje utiču na radio signal. Feding se prema uzroku nastajanja može podeliti na: propagacioni, interferencijski, apsorpcioni i disperzioni [151]. Suština delovanja svake vrste fedinga je, sa aspekta korisnika komunikacionog linka, isključivo negativna – signal prilikom prostiranja, pored osnovnog slabljenja biva izložen slučajnom

delovanju nedeterminisanih prirodnih činilaca koji ga dodatno slabe i u pojedinim trenucima onemogućavaju komunikaciju. Da bi se opisala pojava koja vrši intenzivan i kratkotrajan uticaj na nivo prijemnog signala koristi se termin „brzi feding“ usled čega signal u vremenskom intervalu od nekoliko sekundi do nekoliko minuta oslabi čak do vrednosti od 30-40 dB u odnosu na nominalnu vrednost [152] i [153]. Ukoliko pojava slabljenja signala dostiže vrednost do 10 dB, a traje u vremenskom intervalu od nekoliko sati, onda se takva pojava karakteriše terminom „spori feding“ [154] i [155]. Uticaj fedinga se uzima u obzir svaki put kada se projektuje usmerena mikrotalasna radio komunikacija, a u numeričkom smislu se definiše kao „rezerva za feding“.

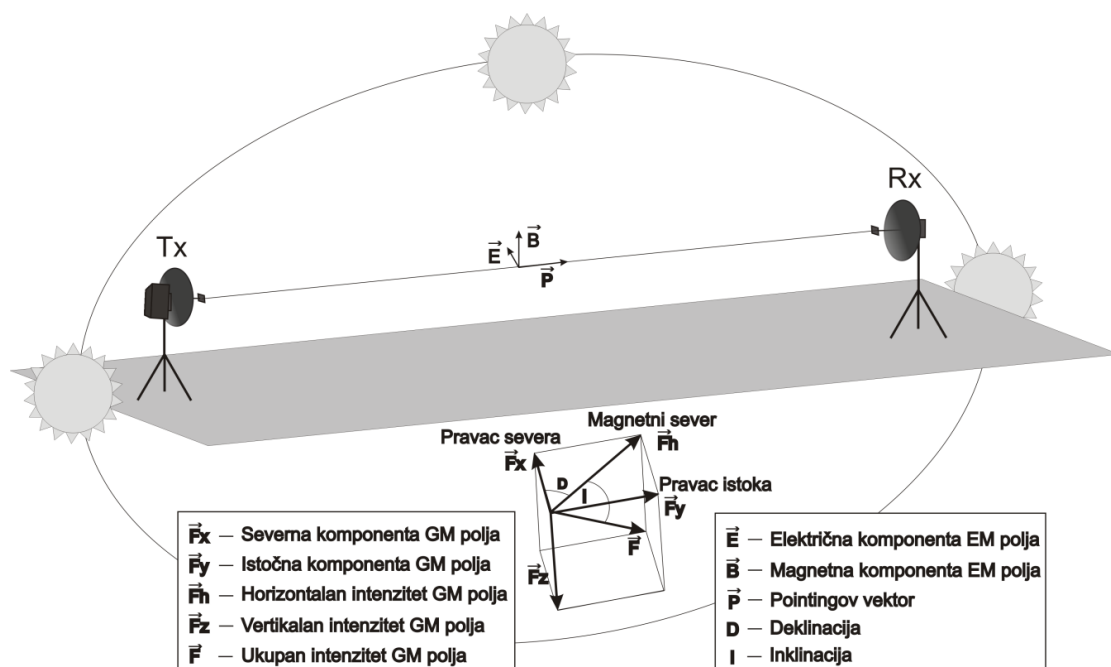
Uzroci nastanka slabljenja radio signala na mestu prijema u slučaju izostanka veštački generisanih interfereirajućih izvora zračenja u blizini prijemne antene potiču od karakteristika sredine kroz koju se radio talas prostire. Sporadične pojave koje dovode do slabljenja nedovoljno su dugog trajanja ili nisu po svom intenzitetu dovoljno značajne da bi ugrozile kvalitet prenosa informacije. Sporadične pojave pod kojim se mogu smatrati potencijalni izvori interferencije se adekvatnim projektovanjem mikrotalasne usmerene radio komunikacije mogu izbeći tako što se za rad biraju slobodni frekvencijski opsezi i adekvatni prostorni raspored elemenata telekomunikacionog sistema. Pored modela za izračunavanje potrebne rezerve za feding koji su zastupljeni u literaturi, a koji se koriste prilikom projektovanja usmerenih mikrotalasnih komunikacija, na bazi dobijenih rezultata merenja, pod ograničavajućim uslovima eksperimenta je moguće u proračune uvesti i predloženi model opisan u ovoj disertaciji. Model opisuje efekte na komunikacioni signal koji potiču od uticaja Sunca, a koji na pojedinim frekvencijskim područjima mikrotalasnog opsega nisu zanemarljivi, posebno u delu dana kada se Sunce pojavljuje na horizontu.

### 6.2. Eksperimentalna postavka

Za potrebe analize značajnih faktora koji utiču na pojavu nestabilnosti signala na mestu prijema, kao i njihovog udela u celokupnoj promeni nivoa prijemnog signala, u toku perioda od 1. februara 2012. do 06. jula 2016. godine je na prostoru Beograda (44° 46' 28''

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

SGŠ i 20° 28' 08'' IGD) formirana usmerena mikrotalasna radio komunikacija sa frekvencijom nosioca od 2,4 do 5 GHz (Sl. 6-1).



Sl. 6-1: Usmerena mikrotalasna radio komunikacija komponente geomagnetskog polja.

Tačna vrednost nosećih frekvencija, periodi u kojima je vršeno merenje na svakoj od njih, kao i podaci generatora signala korišćenih u eksperimentu su dati u Tab. 6-1.

6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

Tab. 6-1: Podaci eksperimentalne usmerene mikrotalasne radio komunikacije.

| Noseća frekvencija radio signala | Period merenja                                                       | Generator signala  | Nivo izlazne snage | Usmerenost antene | Pojačanje antene |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| 2,4 GHz                          | 14.02. – 01.03.2014.                                                 | HAMEG HM8135 [156] | 10 dBm             | 10°               | 23 dBi           |
| 2,7 GHz                          | 25.05. – 06.06.2016.<br>07.07. – 08.07.2016.                         | HAMEG HM8135       | 10 dBm             | 13°               | 18 dBi           |
| 3 GHz                            | 20.08. – 27.08.2014.<br>03.10. – 23.10.2015.<br>07.06. – 10.06.2016. | HAMEG HM8135       | 10 dBm             | 11°               | 19 dBi           |
| 5 GHz                            | 22.02. – 12.07.2012.                                                 | GRC-408E/34 [157]  | 18 dBm             | 3°                | 28 dBi           |

Predajnik ( $T_x$ ) je u toku celodnevnog emitovanja zračio nemodulisani nosilac stabilnosti nivoa signala i frekvencije karakteristične za svaki uređaj, navedene u specifikacijama. Usmerena radio komunikacija je formirana na udaljenosti od 70 m koja na bazi (3.7) za najnižu frekvenciju analiziranog opsega predstavlja dovoljno veliku udaljenost da bi se prijemno polje smatralo dalekom zonom u odnosu na predajnik. Antene su se nalazile na 22 m visine iznad zemlje, a korišćena je horizontalna polarizacija radio talasa u slučaju svih navedenih merenja. Prijemnik ( $R_x$ ) u ovako formiranom sistemu predstavljao je Tektronix SA2600 [158] analizator spektra koji je posredstvom makro skripte bio programiran da vrši snimanje spektralne raspodele snage signala opsega širine 1 kHz u 500 ekvidistantnih frekvencijskih tačaka, na svaka tri minuta. Na taj način se iz svakog generisanog snimka mogao rekonstruisati spektar signala sa preciznošću od 2 Hz, što je bilo dovoljno da se prati promena u nivou signala koja je nastupala u vremenskim intervalima od tri minuta. U merenjima je utvrđeno da u odsustvu generisanog signala ne postoje značajne smetnje istokanalnih predajnika na lokaciji eksperimenta, tako da je uticaj okolnih emitera sveden na minimum odabirom adekvatne frekvencije, sužavanjem merenog opsega (1 kHz) i korišćenjem antena usmerenog dijagrama zračenja (Tab. 6-1).

U cilju korelisanja izmerenih promena nivoa prijemnog signala u toku jutarnjih časova sa promenama komponenata geomagnetskog polja dodatno su korišćeni i podaci prikupljeni merenjima pomoću magnetometra lociranog u Geomagnetskom zavodu u Grockoj.

### **6.3. Modelovanje promena nivoa prijemnog signala i analiza uzroka jutarnjeg slabljenja usmerene mikrotalasne radio komunikacije**

U narednoj analizi je predstavljeno modelovanje promene nivoa prijemnog signala usmerene mikrotalasne radio komunikacije uočeno prilikom kontinuiranog merenja u toku opisanog eksperimenta. U drugom delu je izvršena analiza uzroka slabljenja poređenjem eksperimentalno prikupljenih podataka o promenama meteoroloških parametara na mestu sprovedenog eksperimenta sa promenama izmerenog nivoa prijemnog signala.

#### **6.3.1. Modelovanje promena nivoa prijemnog signala**

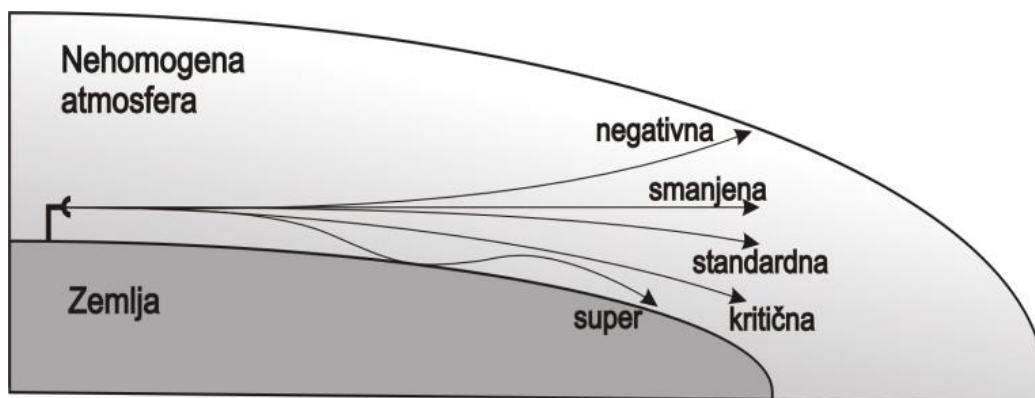
Merenja nivoa prijemnog signala na reprezentativnim frekvencijama u opsegu od 2,4 do 5 GHz predstavljala su bazu podataka nad kojom je procesom interpolacije izvršeno modelovanje promena nivoa prijemnog signala za ceo navedeni opseg. Na bazi numeričkog procesuiranja izmerenih podataka u programskom paketu Matlab [159] je predstavljena formula koja u funkciji od vremena u odnosu na trenutak izlaska Sunca i vrednost noseće frekvencije opisuje relativnu promenu nivoa prijemnog signala u odnosu na srednju dnevnu vrednost. Celokupan navedeni postupak je prikazan delu ovog poglavlja koji se odnosi na prikaz rezultata.

#### **6.3.2. Analiza uzroka jutarnjeg slabljenja**

Promena dielektrične konstante sredine je jedan od značajnih faktora koji mogu uticati na promenu nivoa signala na mestu prijema jedne usmerene radio komunikacije [37], [160], [161] i [162]. U analizi rezultata dobijenih merenjem, pojava refrakcije bi mogla biti fenomen koji bi dovodio do izmerenih karakteristika promene nivoa prijemnog signala. Ova vrsta varijacije atmosferskih činilaca dovodi do povijanja fronta

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

elektromagnetskog talasa i tada, u zavisnosti od trenutne vrednosti gradijenta dielektrične konstante može doći do slučajeva prikazanih na Sl. 6-2.



Sl. 6-2: Karakteristični slučajevi refrakcije.

Za svaki od karakterističnih slučajeva refrakcije, u Tab. 6-2 date su vrednosti: ekvivalentnog poluprečnika Zemlje ( $R$ ), faktora refrakcije ( $k_t$ ) i gradijenta dielektrične konstante ( $g_\epsilon$ ), [40].

Tab. 6-2: Parametri karakterističnih slučajeva refrakcije.

|                       |                                                                 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Standardna refrakcija | $R \rightarrow \frac{4}{3} R_0, k_t = \frac{4}{3}$              |
| Negativna refrakcija  | $R < R_0, k_t < 1, g_\epsilon > 0$                              |
| Smanjena refrakcija   | $R = R_0, k_t = 1, g_\epsilon = 0$                              |
| Kritična refrakcija   | $R \rightarrow \infty, g_\epsilon = -31,4 \cdot 10^{-8} m^{-1}$ |
| Super refrakcija      | $g_\epsilon < -31,4 \cdot 10^{-8} m^{-1}$                       |

Kada se zemljište iznad kojeg je ostvarena usmerena radio komunikacija počne zagrevati, to se uticaj povećanja toplote Zemljine površine posredno prenosi na prizeman sloj atmosfere, što može uzrokovati menjanje gradijenta dielektrične konstante. Takav atmosferski fenomen dovodi do stvaranja inverznog sloja – toplog vazduha koji se u određenom vremenskom intervalu nalazi ispod hladnog sloja što uzrokuje pojavu super refrakcije [163] i [164]. Talasni front se u tom slučaju povija ka zemlji i prouzrokuje varijaciju nivoa prijemnog signala. Svaki od navedenih slučajeva refrakcije direktno prouzrokuje prizeman sloj atmosfere, a proizvedeni efekat se ogleda u vidu pojačanja ili slabljenja signala na mestu prijema.

Na bazi analiziranih karakteristika sredine prilikom pojave refrakcije radio talasa u toku prostiranja predstavljenih u odeljku 3.1.3.1, za upoređivanje promena nivoa prijemnog signala u toku jutarnjih časova i značajnih meteoroloških parametara u toku eksperimenta, korišćen je izraz za vrednost refraktivnosti  $N$  (3.26). Celokupan postupak analize je prikazan delu ovog poglavlja koji se odnosi na prikaz rezultata.

## 6.4. Rezultati

U narednom delu su prikazani rezultati merenja dnevne varijacije nivoa prijemnog signala i geomagnetskog polja. Izvršena je korelacija ova dva parametra i modelovanje jutarnje promene nivoa prijemnog signala. Na kraju je izvršena analiza uzroka izmerene karakteristične promene nivoa prijemnog signala.

### 6.4.1. Merenje dnevne varijacije nivoa prijemnog signala

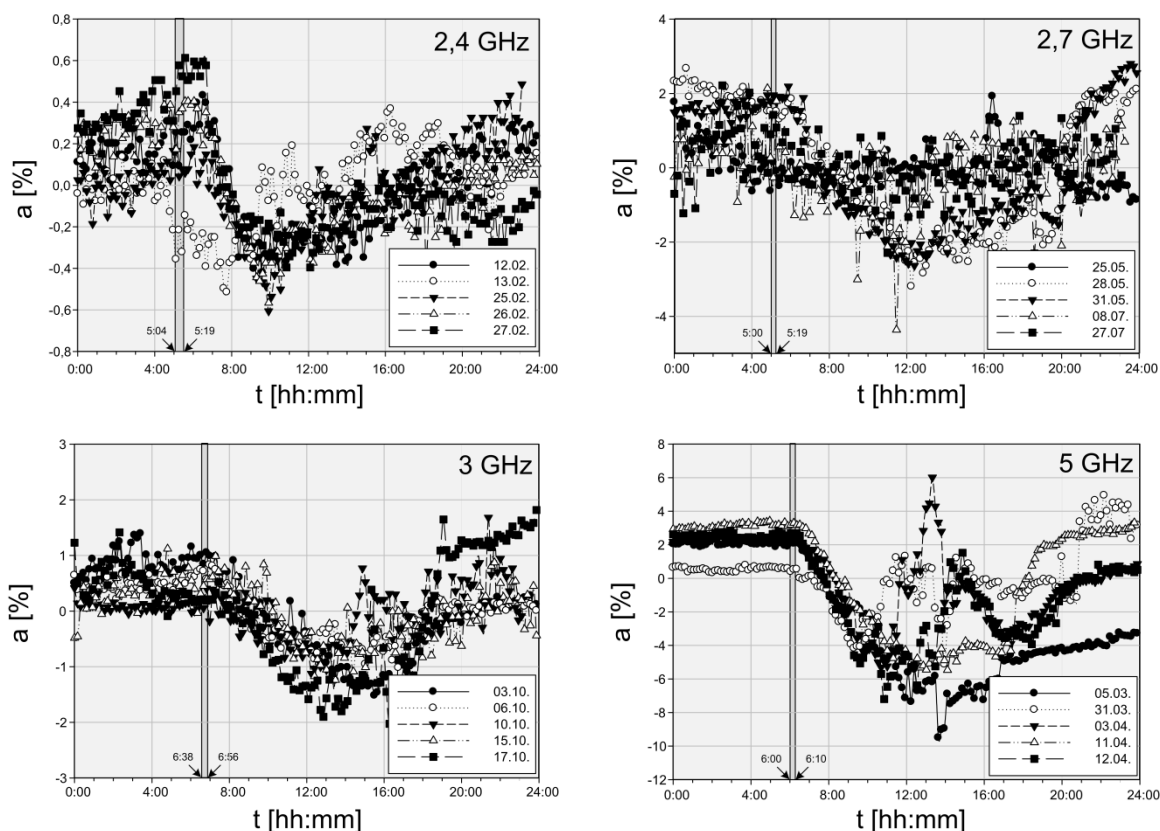
U toku celokupnog perioda vremena sprovedenog eksperimenta izvršeno je ukupno 2520 časova merenja od čega je bilo moguće rekonstruisati 68 dana celodnevnog snimanja signala na prijemu u periodu od 00 do 24 časa i 86 dana snimanja u periodu od 00 do 12 časova koji su predstavljali bazne podatke za modelovanje jutarnjeg slabljenja. Na Sl. 6-3 su pregledno date promene nivoa prijemnog signala u toku celog dana za po pet reprezentativnih dana, za svaku od nosećih frekvencija na kojima je vršeno merenje. Vrednosti sa grafika su radi boljeg isticanja relativnih promena u odnosu na srednju dnevnu vrednost predstavljene izrazom:

$$a_i = 100 \cdot \frac{R_{xi} - \bar{R}_x}{|\bar{R}_x|}, \quad (6.1)$$

gde je  $i = 1, 2, 3, \dots, 480$ ,  $R_{xi}$  predstavlja vrednost merenu u  $i$ -tom vremenskom trenutku,  $\bar{R}_x$  je srednja vredost merenja u toku celog dana, a  $a_i$  je normalizovana vrednost u  $i$ -tom vremenskom trenutku izražena u [%]. Na taj način je jasno istaknuta analizirana relativna promena nivoa signala u odnosu na srednju vrednost nivoa signala u toku dana čime su izbegnute varijacije apsolutne vrednosti nivoa signala nakon npr. zamene antene ili povremene korekcije usmerenosti predajne i prijemne antene.

Uočene promene nivoa prijemnog signala značajne za analizu u ovoj disertaciji počinju u trenutku kada se Sunce pojavi na horizontu i intenzivne su u toku dnevnog dela dana, do sumraka. Na Sl. 6-3 su prikazane dnevne promene nivoa signala od 00:00 do 24:00 za po pet dana merenja na svim referentnim frekvencijama. Dani merenja koji su prikazani su birani da budu u istom periodu godine da bi se ustanovila posledična promena nivoa signala u toku obdanice koja počinje u približno istom trenutku za sve dane prikazane na istom grafiku (siva vertikalna linija). Na graficima je uočljiva karakteristična noćno-dnevna promena nivoa prijemnog signala gde se najintenzivnije promene uočavaju na signalu noseće frekvencije od 5 GHz, dok su najmanje promene detektovane na signalu noseće frekvencije od 2,4 GHz. Takođe je uočljivo da se minimalna vrednost nivoa prijemnog signala dostiže u ranijim vremenskim trenucima u toku dana za niže u odnosu na više frekvencije posmatranog opsega.

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije



Sl. 6-3: Dnevne promene nivoa prijemnog signala svih referentnih nosećih frekvencija.

### 6.4.2. Korelacija promene nivoa prijemnog signala sa promenama vrednosti komponenata geomagnetskog polja

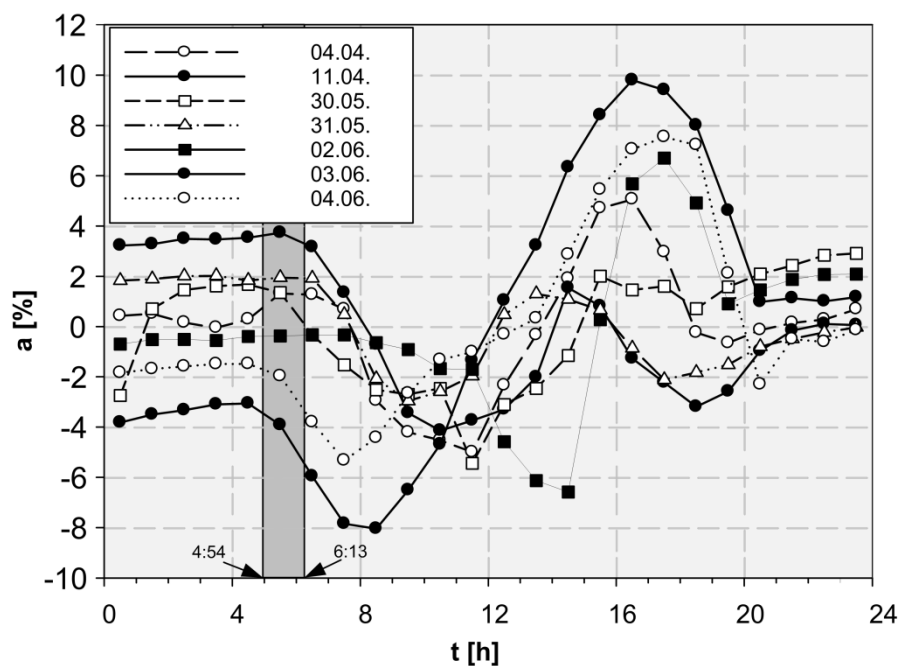
#### Celodnevna analiza za noseću frekvenciju od 5 GHz

Dnevna promena nivoa prijemnog signala je upotrebom izraza (6.1) za radio signal noseće frekvencije 5 GHz, za sedam reprezentativnih dana izdvojena na Sl. 6-4. Uočene karakteristične periodične promene nivoa prijemnog signala za radio signal noseće frekvencije 5 GHz su na početku istraživanja upoređivane sa jednočasovnim promenama karakteristika geomagnetskog polja na mestu formiranog radio-relejnog linka.

Posledična promena karakteristika geomagnetskog polja usled uticaja Sunčevog zračenja je poslužila za identifikaciju vremenske i amplitudske korelisanosti ovog uticaja sa promenom merenog nivoa prijemnog signala. Rezultati geomagnetskih opservatorijskih merenja izmereni su na Geomagnetskoj opservatoriji Grocka. Iz tabela srednječasovnih

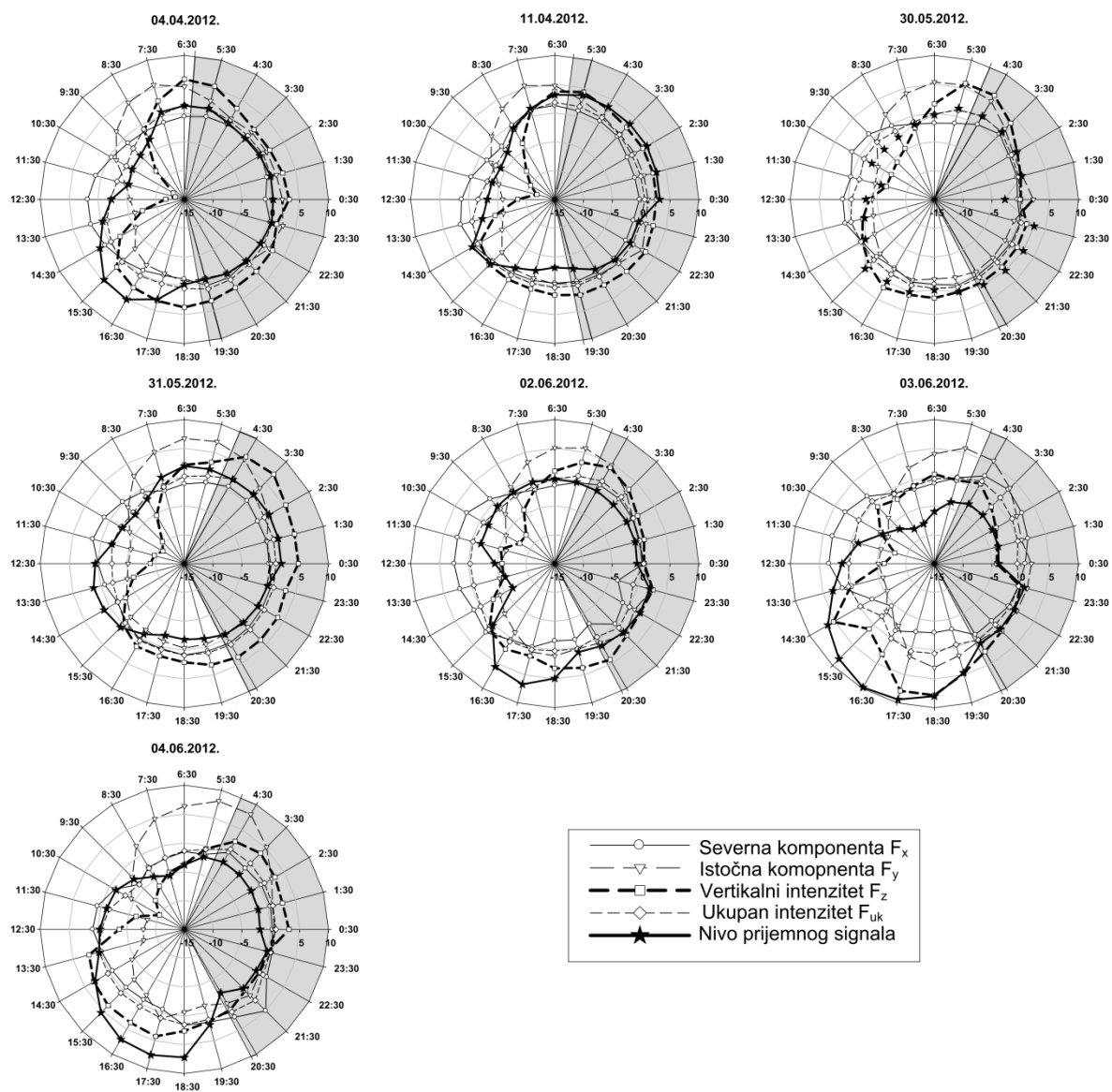
## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

vrednosti komponentata geomagnetskog polja u koje spadaju severna ( $F_x$ ) i istočna ( $F_y$ ), kao i vertikalni ( $F_z$ ) i ukupni intenzitet ( $F_{uk}$ ), upotrebom izraza (6.1) formirani su uporedni grafici (Sl. 6-5) na kojima se mogu uočiti odnosi između časovnih promena komponentata geomagnetskog polja i nivoa snage radio signala noseće frekvencije 5 GHz na mestu prijemne antene.



Sl. 6-4: Dnevne promene nivoa prijemnog signala na 5 GHz za sedam referentnih dana.

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije



Sl. 6-5: Relativne dnevne promene nivoa prijemnog signala i komponentata geomagnetskog polja [%] u odnosu na srednju dnevnu vrednost za sedam referentnih dana.

Na Sl. 6-5 prikazane su karakteristične promene varijacije normalizovanih vrednosti nivoa prijemnog signala, nivoa severne i istočne komponente geomagnetskog polja, kao i vertikalni i ukupni intenzitet geomagnetskog polja na području ostvarene usmerene mikrotalasne komunikacije. Prikazane vrednosti su procentualne promene merenih vrednosti u odnosu na srednju dnevnu vrednost posmatranog dana. Analizirajući korelaciju promene navedenih parametara primenom izraza:

6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

$$PPMCC = \frac{\sum_{i=1}^{480} (a_i - |\overline{R_x}|)(F_i - |\overline{F}|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{480} (a_i - |\overline{R_x}|)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{480} (F_i - |\overline{F}|)^2}}, \quad (6.2)$$

gde  $F$  uzima vrednost svake konkretne komponente geomagnetskog polja, primećen je visok nivo korelacije između varijacija nivoa prijemnog signala i vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja (Tab. 6-3).

Tab. 6-3: Pirsonov koeficijent korelacije (PPMCC) promene nivoa prijemnog signala i komponentata geomagnetskog polja.

| Datum<br>(2012.g.) | PPMCC                                                            |                                                                  |                                                                     |                                                                    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                    | Nivo prijemnog signala vs. severna komponenta GM polja ( $F_x$ ) | Nivo prijemnog signala vs. istočna komponenta GM polja ( $F_y$ ) | Nivo prijemnog signala vs. vertikalni intenzitet GM polja ( $F_z$ ) | Nivo prijemnog signala vs. ukupni intenzitet GM polja ( $F_{uk}$ ) |
| 4.4.               | -0.117000                                                        | 0.021100                                                         | <b>0.710000</b>                                                     | 0.706000                                                           |
| 11.4.              | 0.343000                                                         | 0.551000                                                         | <b>0.720000</b>                                                     | 0.759000                                                           |
| 30.5.              | -0.155000                                                        | 0.308000                                                         | <b>0.829000</b>                                                     | 0.803000                                                           |
| 31.5.              | -0.503000                                                        | 0.450000                                                         | <b>0.538000</b>                                                     | 0.388000                                                           |
| 2.6.               | -0.513000                                                        | 0.454000                                                         | <b>0.590000</b>                                                     | 0.237000                                                           |
| 3.6.               | -0.562000                                                        | -0.215000                                                        | <b>0.654000</b>                                                     | -0.000576                                                          |
| 4.6.               | 0.196000                                                         | -0.319000                                                        | <b>0.555000</b>                                                     | 0.446000                                                           |

Amplituda vertikalne komponente geomagnetskog polja koja se vektorski poklapa sa magnetskom komponentom horizontalno polarizovanog emitovanog radio talasa menjala se u toku merenja u domenu od 41,911 do 41,957  $\mu\text{T}$ . Promena je bila u opsegu od 25 do 38 nT, u zavisnosti od dana kada je vršeno merenje (Tab.6-4). Na osnovu prikazanih rezultata uočava se značajna korelacija vrednosti promene vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja i varijacije nivoa prijemnog signala horizontalno polarizovanog radio talasa frekvencije 5 GHz usmerene radio komunikacije. Srednja vrednost Pirsonovog koeficijenta korelacije je 0,656.

6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

Tab. 6-4: Vrednosti vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja i apsolutne promene nivoa prijemnog signala u toku dana.

| Datum<br>(2012.g.) | Vertikalni intenzitet GM polja<br>(F <sub>z</sub> ) [nT] |       |    | Apsolutna dnevna promena nivoa<br>prijemnog signala<br>(Domen varijacije) [dB] |
|--------------------|----------------------------------------------------------|-------|----|--------------------------------------------------------------------------------|
|                    | MIN                                                      | MAX   | Δ  |                                                                                |
| 4.4.               | 41911                                                    | 41949 | 38 | 6.36                                                                           |
| 11.4.              | 41911                                                    | 41942 | 31 | 4.97                                                                           |
| 30.5.              | 41928                                                    | 41955 | 27 | 3.45                                                                           |
| 31.5.              | 41915                                                    | 41950 | 35 | 2.12                                                                           |
| 2.6.               | 41925                                                    | 41950 | 25 | 5.74                                                                           |
| 3.6.               | 41938                                                    | 41971 | 33 | 7.26                                                                           |
| 4.6.               | 41926                                                    | 41957 | 31 | 5.07                                                                           |

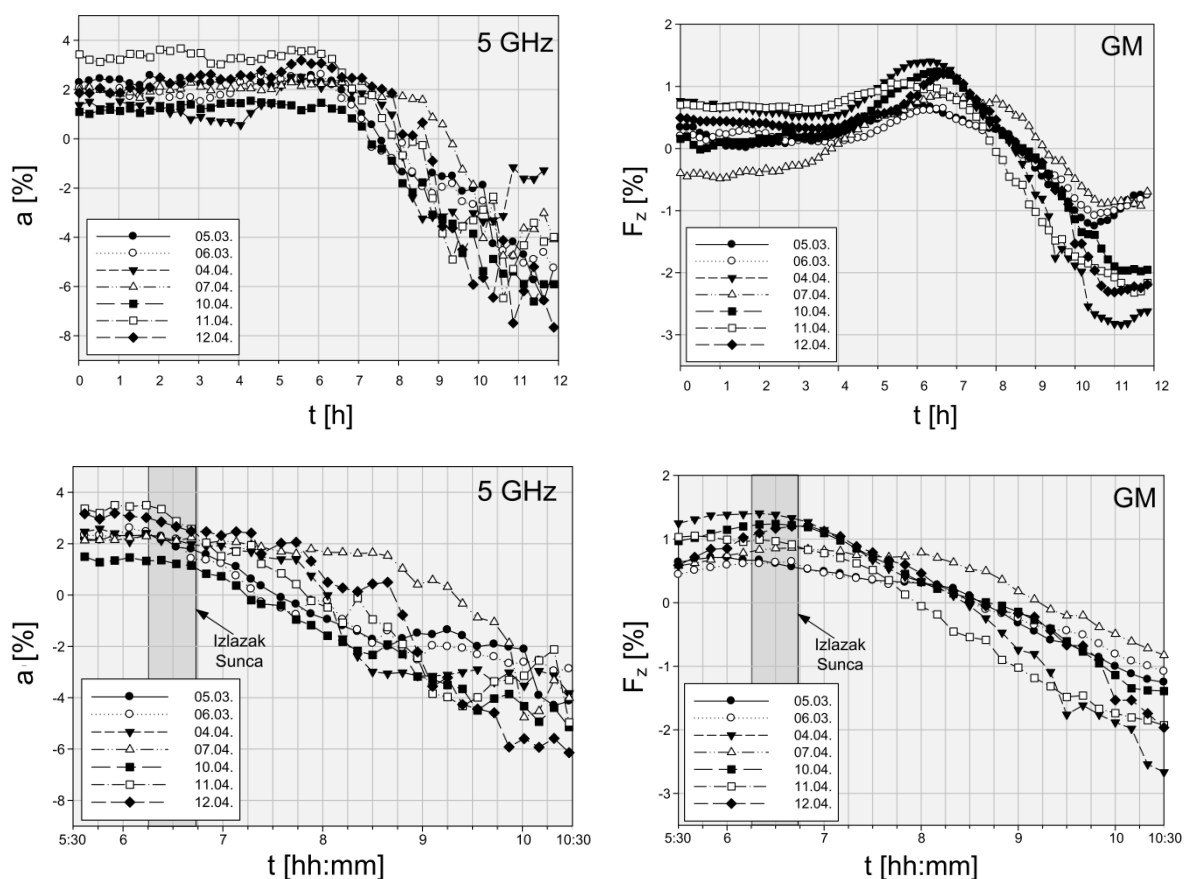
**Analiza u toku jutarnjih časova za noseće frekvencije od 5 i 2,4 GHz**

Kao što je ranije prikazano, u toku merenja sprovedenog od februara do juna 2012. godine na prijemnom signalu frekvencije 5 GHz, značajna promena nivoa prijemnog signala je uočavana u toku trajanja obdanice, dok je u noćnom periodu nivo signala ostajao približno konstantan. Intenzivnija dnevna promena nivoa signala u odnosu na onu koja se dešava u toku noći se može uočiti na SL. 6-3 za sve prikazane referentne frekvencije. Dnevna promena počinje sa trenutkom izlaska Sunca i ima trend slabljenja do određenog trenutka u toku jutarnjih časova, nakon čega varira u zavisnosti od posmatranog dana. Zanimljivo je bilo primetiti da je varijacija nivoa signala, koja se ispoljavala kao intenzivno slabljenje dobijala na intenzitetu od trenutka izlaska Sunca, pa do približno 10:30 časova u toku prepodneva, da bi se kasnija varijacija manifestovala u zavisnosti od promena vertikalne komponente geomagnetskog polja, kao jednog od faktora koji bi posredno mogao biti pokazatelj direktnog uticaja činioca merene varijacije.

Da bi se detaljnije ispitala korelacija promena nivoa prijemnog signala sa promenama vertikalne komponente geomagnetskog polja tokom jutarnjeg perioda, dalje je u analizi pored merenog radio signala noseće frekvencije od 5 GHz uvršten i radio signal na 2,4 GHz. Radi efikasnog prikazivanja i analize dnevne promene nivoa prijemnog signala izraženog u dBm i vrednosti vertikalne komponente geomagnetskog polja (F<sub>z</sub>)

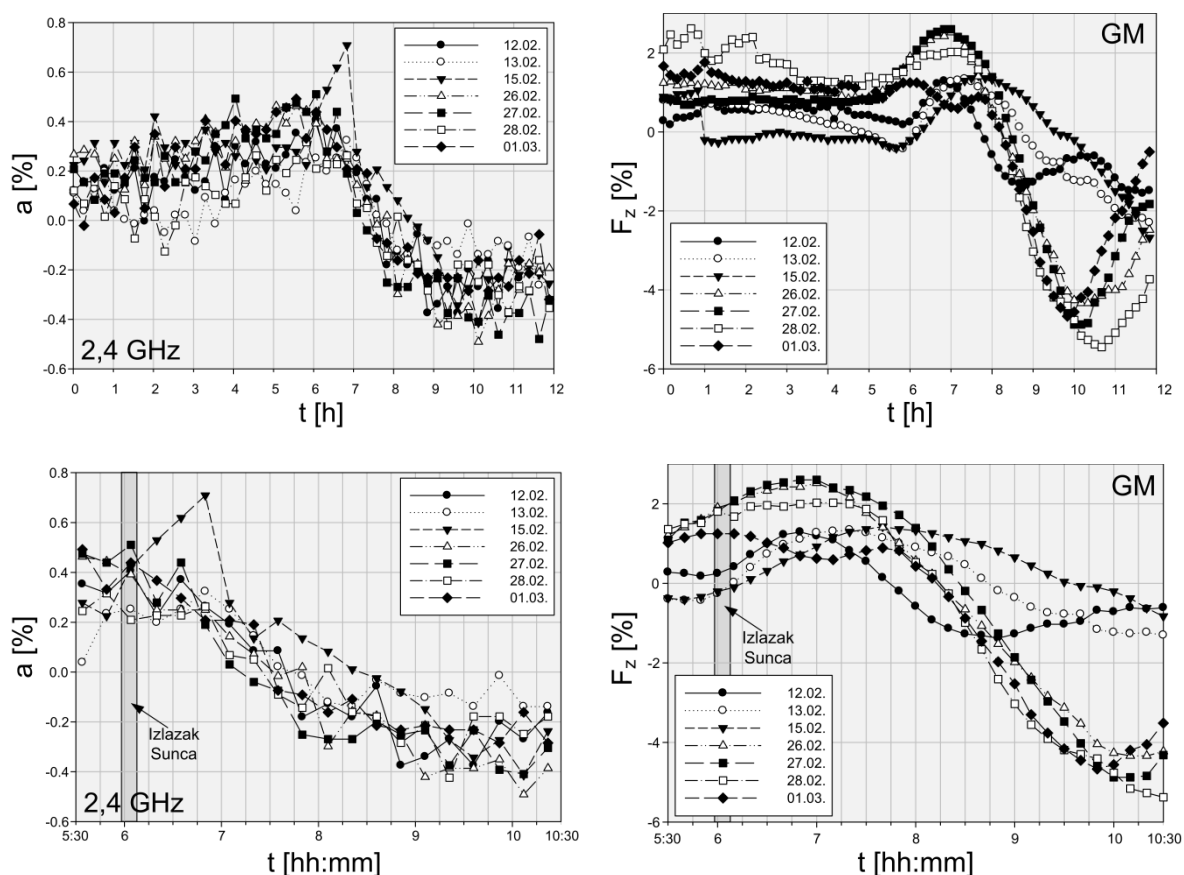
## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

izraženog u nT, a koje su različitih redova veličine, iskorišćen je izraz (6.1). Obe fizičke veličine merene su u toku dana različitom vremenskom rezolucijom. Nivo prijemnog signala je meren na svaka 3 minuta, a vrednost vertikalne komponente geomagnetskog polja je merena na geomagnetskoj opservatoriji Grocka na svaki minut. U toku intervala dana od ponoći do podneva, kod kojeg je uočljiva karakteristična promena jedne i druge vrednosti, na (Sl. 6-6 i Sl. 6-7) su prikazane obe veličine u 238 (nivo prijemnog signala na 2,4 i 5 GHz) i 720 ( $F_z$ ) tačaka.



Sl. 6-6: Promena nivoa prijemnog signala na 5 GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja za period od 00:00 do 12:00 (gornja dva panela) i od 05:30 do 10:30 (donja dva panela).

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

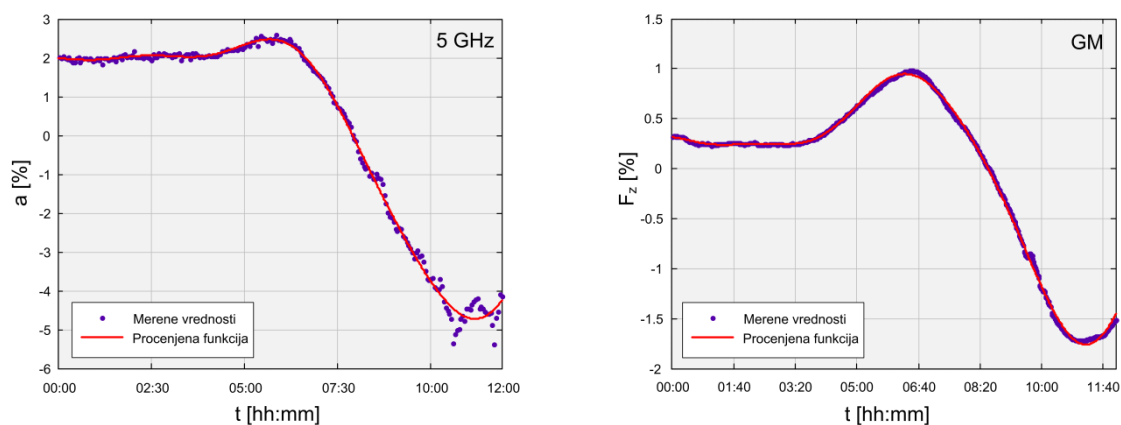


Sl. 6-7: Promena nivoa prijemnog signala na 2,4 GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja za period od 00:00 do 12:00 (gornja dva panela) i od 05:30 do 10:30 (donja dva panela).

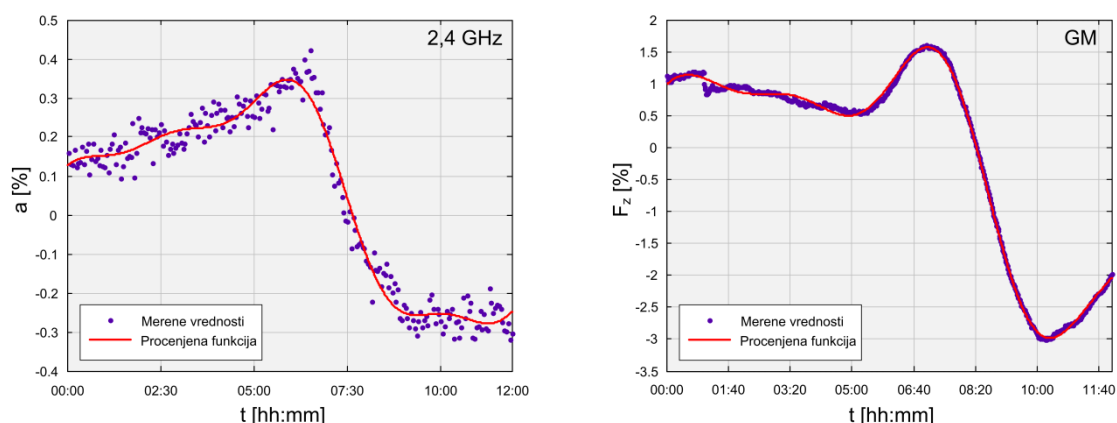
U oba slučaja se može primetiti početak slabljenja nivoa prijemnog signala koji počinje u trenutku svitanja, a traje do približno 10:30 časova u toku prepodneva. Prosečna vrednost slabljenja signala na frekvenciji od 5 GHz je 6,62 dB, dok je za signal na 2,4 GHz prosečno slabljenje iznosilo 0,57 dB. Koeficijent korelacije između srednje vrednosti promena nivoa prijemnog signala i promena vertikalne komponente geomagnetskog polja za prikazanih sedam dana je iznosio 0,875.

U sledećem koraku je srednja vrednost izmerenih rezultata za prezentovanih sedam dana opisana procenjenom funkcijom – Furijeovim redom četvrtog stepena (6.3) sa intervalom poverenja od 95 %, (Sl. 6-8 i Sl. 6-9).

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije



Sl. 6-8: Izmerene vrednosti i procenjena funkcija promene nivoa prijemnog signala na 5 GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja.



Sl. 6-9: Izmerene vrednosti i procenjena funkcija promene nivoa prijemnog signala na 2,4GHz i vertikalne komponente geomagnetskog polja.

Svaka od prikazanih procenjenih funkcija ima odgovarajuće koeficijente u skladu sa izmerenim vrednostima fizičkih veličina. Varijacija reziduala oko dobijene funkcije je u svakom od prikazanih slučajeva bila veoma mala, a vrednosti koje prikazuju koliko procenjena funkcija odgovara izmerenim vrednostima geomagnetskog polja (GMP) i nivou prijemnog signala (NPS) prikazane su u Tab. 6-5.

Tab. 6-5: Vrednosti R-square i RMSE za procenjene funkcije.

| Funkcija       | R-square | RMSE   |
|----------------|----------|--------|
| GMP za 2,4 GHz | 0.9988   | 0.0528 |
| GMP za 5 GHz   | 0.9992   | 0.0239 |
| NPS za 2,4 GHz | 0.9741   | 0.0376 |
| NPS za 5 GHz   | 0.9963   | 0.1609 |

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

---

Na osnovu izmerenih rezultata je predstavljena funkcija (6.3) koja opisuje trend promene nivoa prijemnog signala i vertikalne komponente geomagnetskog polja od ponoći do podneva. Koeficijenti funkcije koja opisuje trend promene nivoa prijemnog signala u navedenom periodu dati su u Tab. 6-6.

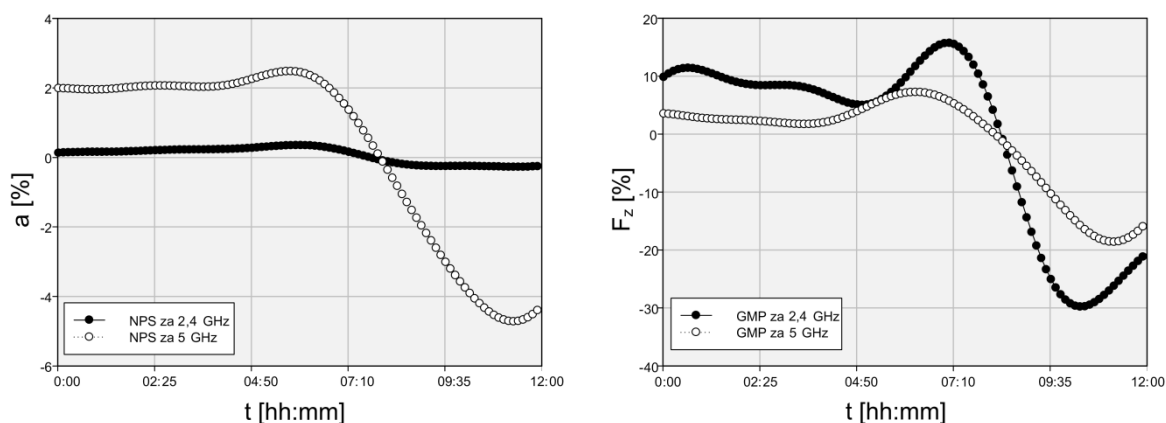
$$\begin{aligned} f(x) = & a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot \omega) + b_1 \cdot \sin(x \cdot \omega) + \\ & a_2 \cdot \cos(2x \cdot \omega) + b_2 \cdot \sin(2x \cdot \omega) + \\ & a_3 \cdot \cos(3x \cdot \omega) + b_3 \cdot \sin(3x \cdot \omega) + \\ & a_4 \cdot \cos(4x \cdot \omega) + b_4 \cdot \sin(4x \cdot \omega) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Tab. 6-6: Koeficijenti procenjene funkcije za period od 00:00 do 12:00.

|          | <b>2,4 GHz</b> | <b>5 GHz</b> |
|----------|----------------|--------------|
| $a_0$    | 0.0404         | 0.0963       |
| $a_1$    | -0.0280        | 1.035        |
| $b_1$    | 0.2817         | 3.009        |
| $a_2$    | 0.0851         | 1.101        |
| $b_2$    | -0.0516        | -1.001       |
| $a_3$    | 0.0042         | -0.0821      |
| $b_3$    | 0.0388         | -0.2048      |
| $a_4$    | 0.0247         | -0.1653      |
| $b_4$    | -0.0322        | -0.1076      |
| $\omega$ | 0.0222         | 0.0200       |

Da bi se izračunao koeficijent korelacije između dobijenih funkcija, one su predstavljene u 500 ekvidistantnih tačaka. Na Sl. 6-10 uporedno su predstavljene promene nivoa prijemnog signala za dane kada je vršeno merenje za obe frekvencije, i promena vertikalne komponente geomagnetskog polja u danima kada je vršeno merenje nivoa prijemnog signala na obe frekvencije. Apcisa na graficima predstavlja vremenski interval od ponoći do podneva, a na ordinati je prikazana funkcija promene nivoa prijemnog signala i vertikalne komponente geomagnetskog polja.

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

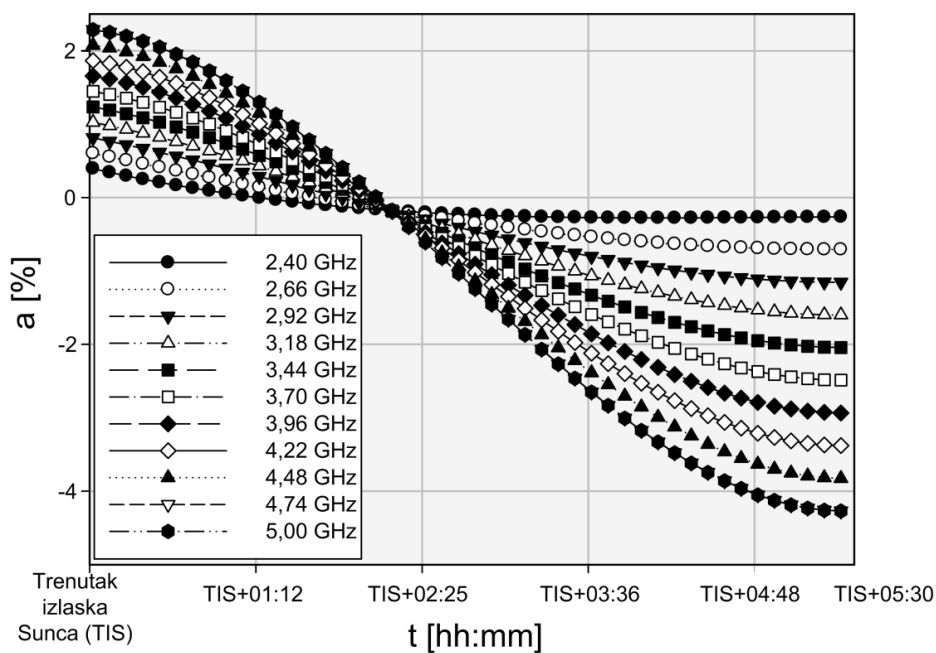


Sl. 6-10: Promena nivoa prijemnog signala (NPS - levi panel) i vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja (GMP - desni panel).

### 6.4.3. Modelovanje jutarnje promene nivoa prijemnog signala za proizvoljne frekvencije opsega od 2,4 do 5 GHz

Vrednosti funkcija koje opisuju karakterističnu promenu nivoa prijemnog signala bez normalizacije za analizirane noseće frekvencije prikazane na Sl. 6-10 (levi panel) su za vremenski interval od trenutka izlaska Sunca, na osnovu eksperimentalno prikupljenih rezultata iskorišćene za modelovanje jutarnjeg slabljenja nivoa prijemnog signala. Funkcije prikazane na Sl. 6-11 su predstavljene za vremenski interval od trenutka izlaska Sunca do 5 sati i 30 minuta nakon izlaska.

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije



Sl. 6-11: Modelovane funkcije promene nivoa prijemnog signala za referentne noseće frekvencije u opsegu od 2,4 do 5 GHz.

Prikazane modelovane funkcije oblika su polinomijalne funkcije trećeg stepena oblika:

$$f(x) = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4, \quad (6.4)$$

a parametri ovih funkcija za konkretne noseće frekvencije su prikazani u Tab. 6-7.

Tab. 6-7: Koeficijenti modelovanih funkcija za reprezentativne noseće frekvencije u opsegu od 2,4 do 5 GHz za period od TIS do TIS+5:30.

| f (GHz)     | p <sub>1</sub>        | p <sub>2</sub>        | p <sub>3</sub>        | p <sub>4</sub>       |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>2,40</b> | $-8,32 \cdot 10^{-8}$ | $5,19 \cdot 10^{-5}$  | $-1,04 \cdot 10^{-2}$ | $4,06 \cdot 10^{-1}$ |
| <b>2,66</b> | $4,11 \cdot 10^{-8}$  | $8,22 \cdot 10^{-6}$  | $-9,81 \cdot 10^{-3}$ | $6,15 \cdot 10^{-1}$ |
| <b>2,92</b> | $1,65 \cdot 10^{-7}$  | $-3,55 \cdot 10^{-5}$ | $-9,18 \cdot 10^{-3}$ | $8,25 \cdot 10^{-1}$ |
| <b>3,18</b> | $2,90 \cdot 10^{-7}$  | $-7,91 \cdot 10^{-5}$ | $-8,56 \cdot 10^{-3}$ | 1,03                 |
| <b>3,44</b> | $4,14 \cdot 10^{-7}$  | $-1,23 \cdot 10^{-4}$ | $-7,94 \cdot 10^{-3}$ | 1,24                 |
| <b>3,70</b> | $5,38 \cdot 10^{-7}$  | $-1,67 \cdot 10^{-4}$ | $-7,31 \cdot 10^{-3}$ | 1,45                 |
| <b>3,96</b> | $6,63 \cdot 10^{-7}$  | $-2,10 \cdot 10^{-4}$ | $-6,69 \cdot 10^{-3}$ | 1,66                 |
| <b>4,22</b> | $7,87 \cdot 10^{-7}$  | $-2,54 \cdot 10^{-4}$ | $-6,07 \cdot 10^{-3}$ | 1,87                 |
| <b>4,48</b> | $9,11 \cdot 10^{-7}$  | $-2,98 \cdot 10^{-4}$ | $-5,44 \cdot 10^{-3}$ | 2,08                 |
| <b>4,74</b> | $1,04 \cdot 10^{-6}$  | $-3,41 \cdot 10^{-4}$ | $-4,82 \cdot 10^{-3}$ | 2,29                 |
| <b>5,00</b> | $1,16 \cdot 10^{-6}$  | $-3,85 \cdot 10^{-4}$ | $-4,20 \cdot 10^{-3}$ | 2,50                 |

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

Na bazi modelovanih funkcija, može se izvesti izraz koji prikazuje relativnu promenu nivoa prijemnog signala u jutarnjim časovima  $a_{jut}$  u odnosu na srednju dnevnu vrednost nivoa posmatranog prijemnog signala:

$$a_{jut}(t) = p_1 \cdot t^3 + p_2 \cdot t^2 + p_3 \cdot t + p_4. \quad (6.5)$$

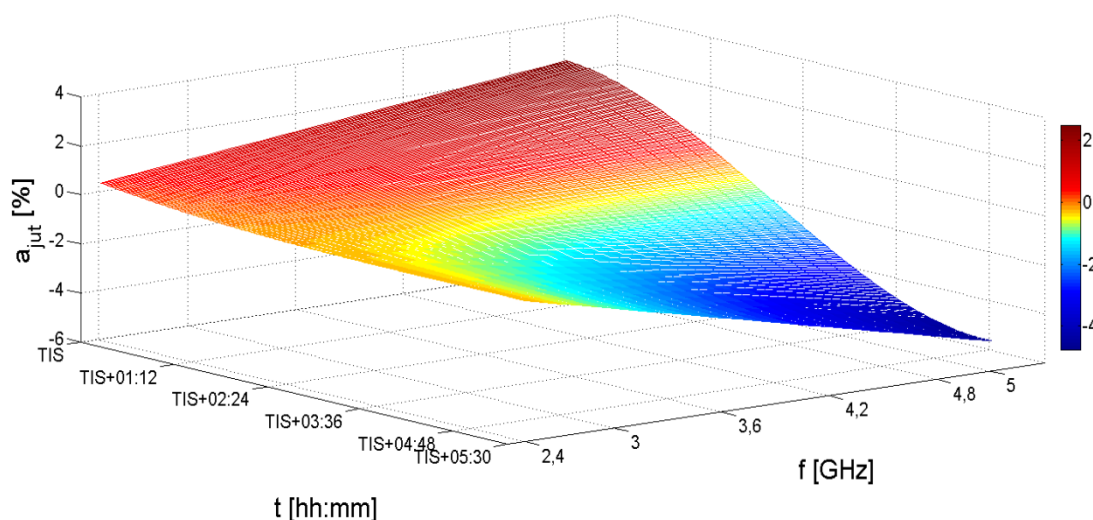
Za izračunavanje konkretnih vrednosti promene nivoa prijemnog signala u intervalu vremena od svitanja do 5 sati i 30 minuta nakon toga, koeficijenti prikazane funkcije zavise od frekvencije nosećeg signala  $f$ , relativnog vremena u odnosu na trenutak izlaska Sunca  $t$  i vrednosti konstanti  $C_i$  i  $p_{i_0}$  za  $i \in [1, 4]$  prikazane u Tab. 6-8 i dobijaju se kao:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{1_0} + C_1 \cdot \left( \frac{f - 2,4}{2,6} \right) \\ p_2 &= p_{2_0} + C_2 \cdot \left( \frac{f - 2,4}{2,6} \right) \\ p_3 &= p_{3_0} + C_3 \cdot \left( \frac{f - 2,4}{2,6} \right) \\ p_4 &= p_{4_0} + C_4 \cdot \left( \frac{f - 2,4}{2,6} \right). \end{aligned} \quad (6.6)$$

Vrednosti modelovane funkcije za opseg vrednosti frekvencija  $f$  od 2,4 do 5 GHz sa rezolucijom od 100 MHz i vremenskim intervalom od trenutka izlaska Sunca do kraja vremenskog intervala od 5 sati i 30 minuta su predstavljeni na Sl. 6-12.

Tab. 6-8: Vrednost konstanti za izračunavanje koeficijenata modelovanih funkcija za noseće frekvencije u opsegu od 2,4 do 5 GHz za period od TIS do TIS+5:30.

| $C_1$                 | $C_2$                 | $C_3$                 | $C_4$                |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| $1,24 \cdot 10^{-6}$  | $-4,37 \cdot 10^{-4}$ | $6,23 \cdot 10^{-3}$  | 2,10                 |
| $p_{1_0}$             | $p_{2_0}$             | $p_{3_0}$             | $p_{4_0}$            |
| $-8,32 \cdot 10^{-8}$ | $5,19 \cdot 10^{-5}$  | $-1,04 \cdot 10^{-2}$ | $4,06 \cdot 10^{-1}$ |



Sl. 6-12: Relativna promena nivoa prijemnog signala dobijena na osnovu modelovane funkcije.

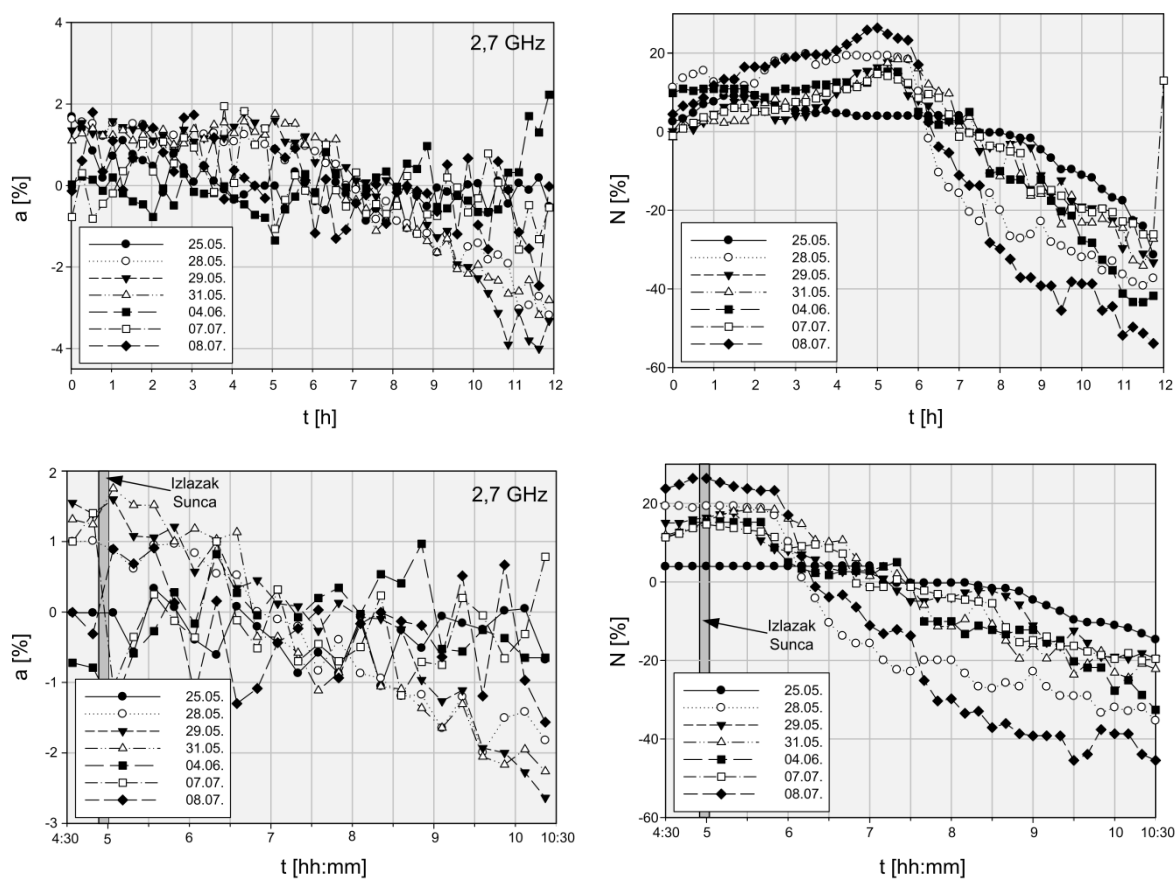
#### 6.4.4. Komparativna analiza promene meteoroloških parametara i nivoa prijemnog signala

U ovom delu je predstavljeno istraživanje uzroka jutarnjeg slabljenja signala mikrotalasnog opsega na radio-relejnjoj mikrotalasnoj komunikaciji noseće frekvencije 2,7 GHz formiranoj na već opisan način. Analizirani su rezultati merenja nivoa prijemnog signala navedene radio komunikacije i rezultati merenja meteoroloških parametara u prostoru ostvarenja usmerene radio komunikacije. Izvršena je analiza korelisanosti promene nivoa prijemnog signala sa promenama faktora refraktivnosti  $N$  (3.26) izračunatog na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata merenja relativnog vazdušnog pritiska, temperature i vlažnosti vazduha. Kao što je ranije prikazano, početak slabljenja signala na mestu prijema nastupa od trenutka kada Sunce počne da se pojavljuje na horizontu i kontinuirano traje do kasnih prepodnevničkih časova. Ova uočena periodična doslednost u jutarnjem slabljenju signala usmerene mikrotalasne radio komunikacije je podstakla nastavak istraživanja u pravcu identifikovanja korelacije između promena nivoa signala na prijemu i promene meteoroloških parametara usled intenzivne promene Sunčevog zračenja u trenutku izlaska Sunca i nekoliko sati nakon toga. Normalizovane

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

vrednosti intenziteta promene relativnog vazdušnog pritiska, temperature i pritiska vodene pare koji su predstavljeni kroz faktor refraktivnosti  $N$ , a uticajni su na prostiranje radio talasa, upoređeni su sa normalizovanom vrednošću nivoa prijemnog signala u periodu od ponoći do podneva, kao u periodu od izlaska Sunca, pa do trenutka do kad traje ustanovljeno karakteristično slabljenje radio signala na prijemu.

Na Sl. 6-13 su prikazane promene normalizovanih vrednosti nivoa prijemnog signala noseće frekvencije 2,7 GHz i refraktivnosti, respektivno za reprezentativnih sedam dana merenja u periodima od ponoći do podneva i u toku jutarnjih časova.

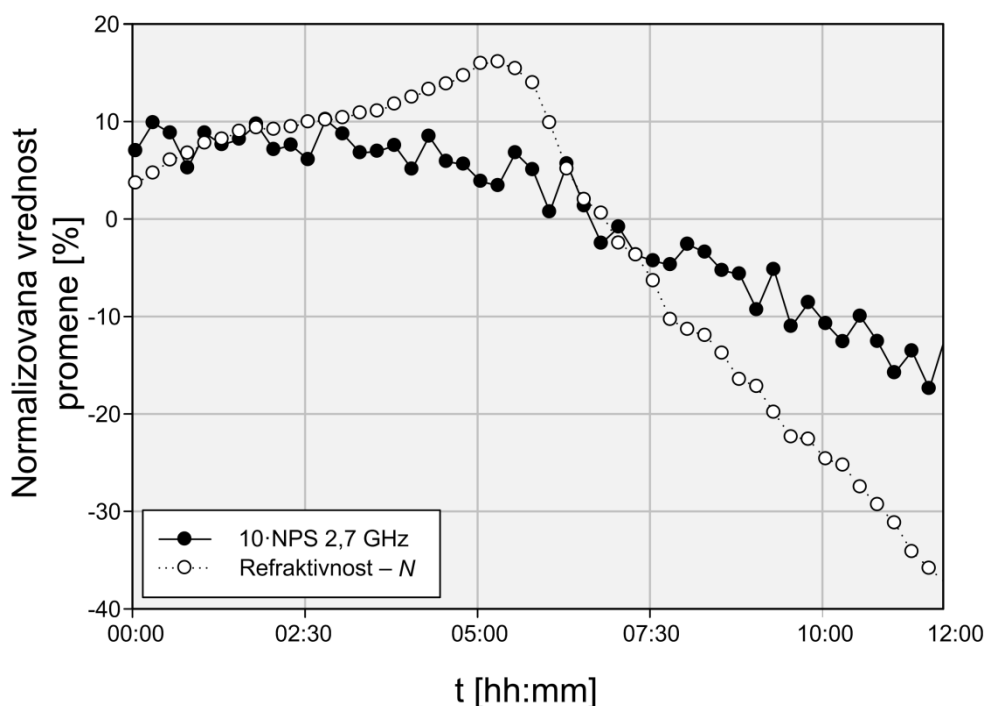


Sl. 6-13: Promena nivoa prijemnog signala na 2,7 GHz i refraktivnosti za period od 00:00 do 12:00 (gornja dva panela) i od 04:30 do 10:30 (donja dva panela).

Sa grafika se uviđa da analizirane veličine imaju vidno korelisanu promenu (opadanje konkretne vrednosti) u periodu od nekoliko sati od trenutka izlaska Sunca. Na osnovu prikazanog se može zaključiti da se promena karakteristika sredine izražena kroz vrednost refraktivnosti ( $N$ ) koja je uslovljena intenzivnim pojačanim sveukupnim fluksom

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

zračenja sa Sunca u jutarnjim časovima, odražava na smanjenje nivoa prijemnog signala na mestu prijema. Uzimajući u obzir apsolutnu promenu nivoa signala u odnosu na celodnevnu srednju vrednost, promena vrednosti refraktivnosti koja je u prikazanom slučaju u periodu od ponoći do podneva varirala u domenu od 41 do 84 % uslovaljava promenu nivoa signala noseće frekvencije od 2,7 GHz u opsegu od 1,6 do 6,5 %. Ova relativna promena u toku jutarnjih časova je po apsolutnoj vrednosti u saglasju sa modelovanom funkcijom promene datom kroz (6.4).



Sl. 6-14: Promena srednje vrednosti nivoa prijemnog signala noseće frekvencije 2,7 GHz i refraktivnosti  $N$  u periodu od 00:00 do 12:00.

Sl. 6-14 prikazuje odnos promene srednje vrednosti prikazanih veličina za analizirane dane. Da bi se uvidela ustanovljena posledična promena nivoa prijemnog signala (NPS) usled promene refraktivnosti sredine ( $N$ ), na grafiku je NPS predstavljen sa desetostruko uvećanom vrednošću.

### 6.5. Zaključak

U ovom poglavlju su na bazi eksperimentalnih merenja nivoa prijemnog signala usmerene mikrotalasne radio komunikacije predstavljeni rezultati koji ukazuju na

## 6. Analiza dnevnih promena nivoa prijemnog signala i modelovanje jutarnjeg slabljenja mikrotalasne usmerene radio komunikacije

---

periodičnu promenu izazvanu Sunčevim zračenjem. Na reprezentativnim frekvencijama u opsegu frekvencija od 2,4 do 5 GHz vršena su merenja u različitim periodima godine i utvrđena je korelacija promena između nivoa prijemnog signala i intenziteta vertikalne komponente geomagnetskog polja što ukazuje na istovremeni uticaj Sunca na obe merene veličine. Numerički je modelovana promena nivoa radio signala u navedenom opsegu frekvencija u periodu od trenutka izlaska Sunca do kasnih jutarnjih časova i prikazano je istraživanje korelacije promena meteoroloških parametara i nivoa prijemnog signala radi određivanja pojave koja neposredno utiče na promenu nivoa signala na prijemu.

Rezultati sprovedenog istraživanja pokazuju da:

- Periodična promena nivoa prijemnog signala usmerene mikrotalasne radio komunikacije u opsegu frekvencija od 2,4 do 5 GHz, pod uslovima prikazanim u eksperimentu, izazvana je povećanim Sunčevim zračenjem od trenutka kada se Sunce pojavi na horizontu (svitanje).
- Ova promena nivoa prijemnog signala je u visokoj korelaciji sa promenama vertikalnog intenziteta geomagnetskog polja.
- Tendencija jutarnjeg slabljenja koje nastupa u periodu od približno 5 sati i trideset minuta od trenutka svitanja je prisutna na svim referentnim frekvencijama na kojima je vršeno merenje.
- Na bazi ustanovljene doslednosti je predložena funkcija koja numerički opisuje ovu pojavu.
- Promena faktora refraktivnosti ( $N$ ) sredine kroz koju se prostire mikrotalasni radio signal je značajan neposredni činilac promena nivoa prijemnog signala.

## 7. Zaključak

Rezultati istraživanja koje je trajalo prethodnih osam godina omogućili su da se ustanove činjenice i formiraju modeli koji će podstaći mali pomak ka unapređenju najpre radio-komunikacija, a zatim i pojedinih grana astro i geofizike. Za ovaj mali doprinos je bilo neophodno uložiti veliki napor u osmišljavanju i pravilnom i doslednom sprovođenju eksperimenata, kao i biti upoznat sa aktuelnostima vezanim za ovu multidisciplinarnu oblast istraživanja. Upotrebom softverskih alata za obradu rezultata i njihovu interpretaciju došlo se do modela koji prikazuju uticaj neperiodičnih i periodičnih zračenja sa Sunca na dve različite sredine prostiranja radio talasa u Zemljinoj atmosferi – jonizovana sredina D-sloja jonosfere i prizemni sloj atmosfere u kojem se ostvaruju usmerene mikrotalasne radio komunikacije.

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji predstavljaju studiju uticaja Sunčevog zračenja na sredinu prostiranja radio talasa baziranu na eksperimentalno prikupljenim podacima. Rad obuhvata analizu jonosferske D-oblasti na osnovu podataka registrovanih prijemnikom radio signala vrlo niskih frekvencija lociranim na Institutu za fiziku u Zemunu i podataka prikupljenim eksperimentalnom postavkom mikrotalasne usmerene radio komunikacije na Vojnoj akademiji u Beogradu.

U uvodnim poglavljima su sistematizovana saznanja potrebna za spoznaju osnovnih principa fizičko-hemijskog svojstva sredine kroz koju se posmatra prostiranje radio talasa. Takođe je prikazana postavka sistema VLF predajnika i AWESOME prijemnika i opisan uređaj kojim su izvršena prikazana merenja. Pored toga, opisane su osnovne karakteristike jonizovane sredine D-sloja koje se odnose na njen sastav, navedene su pojave koje dovode do periodičnih i neperiodičnih poremećaja sastava ovog sloja, kao i metoda merenja parametara sloja u toku poremećaja.

U predstavljenom istraživanju je pažnja bila usmerena u dva pravca:

- modelovanje prostorno-vremenske zavisnosti parametara D-sloja jonosfere u toku neperiodičnog poremećaja koji se odnose na konkretan posmatrani prostor, a koji su od značaja za prostiranje radio talasa i
- modelovanje periodičnih promena nivoa prijemnog signala mikrotalasne usmerene komunikacije koje se događaju u toku jutarnjih časova na radio signalu frekvencijskog opsega 2,4 – 5 GHz.

Prvi pravac istraživanja se odnosio na D-sloj jonosfere u slučaju intenzivnog neperiodičnog poremećaja koje izaziva Sunčev X-fler. Studija je rađena na konkretnom slučaju X-flera koji se dogodio 5. maja 2010. godine. Zbog kompleksnosti fizičko-hemijskih procesa, analiza nekih od posmatranih parametara jonizovane sredine je vršena za pojedine faze flera kada je moguće izvršiti aproksimacije potrebne za adekvatnu analizu. Jedan od karakterističnih trenutaka bio je kratak vremenski interval maksimalnog intenziteta zračenja X-flera, dok je u drugom delu vršena analiza u toku relaksacionog perioda.

Za celokupan period trajanja efekata flera je izvršeno prostorno-vremensko modelovanje sledećih karakteristika D-sloja jonosfere:

- elektronske koncentracije i elektronske plazmene frekvencije kao parametra jonizovane sredine koji predstavljaju uticajne faktore sredine kroz koju se radio talas prostire,
- indeksa refrakcije radio signala u LF, MF i HF frekvencijskim domenima u toku celog perioda poremećaja,
- simulacija putanja radio talasa u zavisnosti od frekvencije i ugla emisije.

U trenutku maksimuma X-zračenja izvedeni su analitički izrazi koji su primenjeni na posmatrani slučaj za računanje:

- brzine proizvodnje i gubitaka elektrona,
- efektivnog rekombinacionog koeficijenta,
- koeficijenta proporcionalnosti brzine fotojonizacije X-zračenjem i zabeleženog fluksa X-zračenja na satelitu i

- odnosa brzina fotojonizacije uzrokovane  $Ly\alpha$  i X-zračenjem.

Za period relaksacije su predstavljene procedure koje su primenjene na konkretne vrednosti za računanje:

- brzine gubitaka elektrona,
- temperature i
- efektivnog rekombinacionog koeficijenta.

Drugi pravac istraživanja je bio usmeren ka rezultatima do kojih se došlo istraživanjem Sunčevih efekata na prizemni sloj atmosfere sa aspekta uticaja sredine pogođene Sunčevim zračenjem na prostiranje radio talasa mikrotalasnog frekvencijskog opsega. Prikazana je dnevna promena nivoa prijemnog signala eksperimentalne usmerene mikrotalasne radio komunikacije na različitim reprezentativnim frekvencijama, u različitim periodima godine. Predstavljena je ustanovljena korelacija promena nivoa merenog prijemnog signala sa promenama vertikalne komponente geomagnetskog polja što indukuje zaključak o direktnom periodičnom uticaju Sunčevog zračenja na obe merene veličine. S obzirom na ustanovljeno karakteristično slabljenje koje nastupa u jutarnjim časovima, razvijen je model koji opisuje to slabljenje u funkciji od frekvencije nosećeg signala i trenutka izlaska Sunca za frekvencijski opseg 2,4 – 5 GHz. Na kraju je izvršena analiza uzroka ovog slabljenja sa aspekta promena karakteristika nejonizovane sredine prostiranja.

Rezultati koji su prikazani u ovoj disertaciji pružaju dobru osnovu za detaljniji razvoj predloženih modela. U domenu analize prostiranja radio talasa u jonosferi pruža se mogućnost proširenja istraživanja sa aspekta uticaja geomagnetskih promena, kako bi predloženi model bio adekvatan i za geografske širine kod kojih je uticaj geomagnetskih promena od značaja u prostiranju radio talasa. Apsorpcija energije radio talasa u procesu prostiranja kroz jonizovanu sredinu u skladu sa vrednošću kolizione frekvencije sredine je domen istraživanja koji nije obuhvaćen ovom disertacijom, ali pruža mogućnost proširenja u tom smeru. Istraživanje ima perspektivu proširenja i na E i F sloj jonosfere što bi omogućilo integralno shvatanje procesa koji utiču na prostiranje radio talasa kroz celokupnu jonosfersku oblast što će imati značaja posebno za satelitske komunikacione

sisteme. Tehnološka primena ovog modela se uviđa u oblasti razvoja preciznije predikcije prostiranja komunikacionih i izviđačkih radio sistema analiziranih frekvencijskih područja (npr. goniometara na bazi jedne goniometarske stanice (*Single Station Location* – SSL)) što omogućuje primenu u vojnim radio sistemima. Dalje istraživanje u smeru detaljnijeg razvoja modela jutarnjeg slabljenja usmerene mikrotalasne komunikacije biće usmereno ka validaciji dobijenih rezultata, sprovođenju merenja na više različitih prostornih lokacija i vremenskih intervala godine, kao i na preciznijem određenju modela koji će eventualno postati standard za predikciju prostiranja radio talasa u ovom frekvencijskom domenu.

## 8. Literatura

- [1] Jovan Bajčetić, Aleksandra Nina, Vladimir M. Čadež, and Branislav M. Todorović, "Ionospheric D-region temperature relaxation and its influences on radio signal propagation after solar X-flares occurrence," *Thermal Science*, vol. 19, pp. S299-S309, 2015.
- [2] A. Nina, V. M. Čadež, and J. Bajčetić, "Contribution of Solar Hydrogen Ly $\alpha$  Line Emission in Total Ionization Rate in Ionospheric D-region During the Maximum of Solar X-flare," *Serbian Astronomical Journal*, pp. 51-57, 2015.
- [3] M. Todorović Drakul et al., "Behaviour of electron content in the ionospheric D-region during solar X-ray flares," *Serbian Astronomical Journal*, vol. In press, pp. N-N, 2016.
- [4] J. Bajčetić, M. Andrić, B. M. Todorović, B. Pavlović, and V. Suša, "The correlation of geomagnetic component disturbances and 5 GHz LOS received signal daily variation," *Microwave Review*, vol. 19, no. 1, pp. 31-35, September 2013.
- [5] Barbara B. Poppe and Kristen P. Jorden, *Sentinels of the Sun: Forecasting Space Weather*. Boulder, Colorado: Johnson Books, 2006.
- [6] H. M. Antia, Arvind Bhatnagar, and Peter Ulmschneider, *Lectures on Solar Physics - The Physics of Chromospheres and Coronae*, 2003.
- [7] International Telecommunication Union, "ITU-R reference ionospheric characteristics," ITU-R Radiocommunication Sector of ITU, Geneva, Recommendation ITU-R P.1239-3, 2012.
- [8] D. Bilitza and R. Williamson, "Towards a Better Representation of the IRI Topside Based on ISIS and Alouette Data," *Advances in Space Research*, pp. 149-152, 2000.
- [9] J. A. Klobuchar and C. L. Rino, "Trans-ionospheric propagation measurements using signals from the GPS satellites," in *IN: International Symposium on Beacon Satellite Studies of the Earth's Environment*, New Delhi, India, 1984, pp. 505-509.
- [10] Kaare Aksnes, "High Latitude Measurements of the Total Electron Content (TEC) Using the Faraday Technique and Comparisons with TEC Estimates from NAVSTAR-GPS Data," Kjeller, Norway, 1981.
- [11] B.W. Parkinson, E.M. Lassiter, and Cretcher C.K., "Ionospheric Effects in NAVSTAR GPS," in *Propagation Limitations of Navigation and Positioning Systems*, Istanbul, 1977, pp. 1-13.
- [12] J. Benedicto, S.E. Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, and M. Lugert, "GALILEO: Satellite System Design and Technology Developments," 2000.
- [13] Gustav Lindstrom and Giovanni Gasparini, *The Galileo satellite system and its security implications*, April 2003.
- [14] Dale E. Gary and Christoph U. Keller, *Solar and space weather radiophysics - Current status and future developments*. Dodrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [15] A. Farris, R. Marson, and J. Kern, "The ALMA Telescope Control System," in *10th ICALEPCS Int. Conf. on Accelerator & Large Expt. Physics Control Systems.*

- Geneva, 2005, pp. 1-6.
- [16] M. Matsuura et al., "ALMA Observations of Supernova 1987A," in *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year*, Tokyo, 2014, p. 323.
  - [17] J. M. Goodman, *Space Weather & Telecommunications*. New York: Springer Science+BusinessMedia, Inc., 2005.
  - [18] Arnold Hanslmeier, *The Sun and Space Weather, 2nd Edition*. Dordrecht: Springer, 2007.
  - [19] J. P. Wild, S. F. Smerd, and A. A. Weiss, "Solar Bursts," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, pp. 291-366, 1963.
  - [20] T. S. Bastian, A. O. Benz, and D. E. Gary, "Radio Emission from Solar Flares," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, pp. 131-188, 1998.
  - [21] J. W. Warwick, "Solar Radio Bursts of Type V Interpreted as Type III's in Superheated Coronal Streamers," *Astrophysical Journal*, p. 1081, 1967.
  - [22] Frederick A. Hanser and Francis B. Sellers, "Design and calibration of the GOES-8 solar x-ray sensor: the XRS," in *Proceedings of the SPIE*, 1996, pp. 344-352.
  - [23] Janet Machol and Viereck Rodney, "GOES X-ray Sensor (XRS) Measurements," Silver Spring, Maryland, U.S., 2016.
  - [24] C. Muller, "The Carrington Solar Flares of 1859: Consequences on Life," *Orig Life Evol Biosph.*, pp. 185-195, 2014.
  - [25] Peter R. Wilson, *Solar and Stellar Activity Cycles.*: Cambridge University Press, 2003.
  - [26] Harlan True Stetson, *Man and the stars*. New York: Whittlesey house, 1930.
  - [27] Louis J. Lanzerotti, "Solar and Solar Radio Effects on Technologies," in *Solar and Space Weather Radiophysics - Curretn Status and Future Developments*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 1-15.
  - [28] Committee for Space Weather, "National Space Weather Program," National Space Weather Program Council, Washington, DC, Implementation Plan, 2nd Edition 2000.
  - [29] A. Ghasemi, A. Abedi, and F. Ghasemi, *Propagation Engineering in Wireless Communications*. New York: Springer, 2012.
  - [30] Bo Xiong et al., "Ionospheric response to the X-class solar flare on 7 September 2005," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, p. A11317, 2011.
  - [31] Richard P. Feynman, *QED - The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1983.
  - [32] Milinko Šaranović, *O suštini fizičkih teorija Faradeja i MAksvela*. Beograd: Izdavačko-grafički zavod, 1971.
  - [33] Constantine A. Balanis, *Antenna theory - analysis and design*, 2nd ed., Steven Elliot, Ed. New York, USA: John Wiley & sons, inc., 1997.
  - [34] K. Davies, "Reflection of high-frequency radiowaves in inhomogeneous ionospheric layers," *Radio Science*, pp. 303-309, 1985.
  - [35] IET, *Propagation of Radiowaves, 3rd Edition*. London: IET - The Institution of Engineering and Technology, 2013.

- 
- [36] P Debye, *Polar molecules*. New York: Dover Publications, 1957.
- [37] S. E. Falodun and M. O. Ajewole, "Radio refractive index in the lowest 100-m layer of the troposphere in Akure, South Western Nigeria," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 236-243, 2006.
- [38] International Telecommunication Union, "The radio refractive index: its formula and refractivity data," ITU-R Radiocommunication Sector of ITU, Geneva, Recommendation ITU-R P.453-11, 2015.
- [39] B.R. Bean and E.J. Dutton, *Radio meteorology*. Washington: U.S.Govt.Print.Off., 1966.
- [40] Milan M. Šunjevarić and Branislav M. Todorović, *Radio-relejne i satelitske komunikacije*. Novi Sad: FTN Izdavaštvo, 2012.
- [41] Jovan Surutka, *Elektromagnetika*. Beograd: Akademska misao, 2006.
- [42] K. G. Budden, *The propagation of radio waves*. New York: Cambridge University Press, 1984.
- [43] W. Webber, "The Production of Free Electrons in the Ionospheric D Layer by Solar and Galactic Cosmic Rays and the Resultant Absorption of Radio Waves," *Journal of Geophysical Research*, pp. 5091-5106, 1962.
- [44] H. G. Booker and W. Walkinshaw, "The mode theory of tropospheric refraction and its relation to wave-guides and diffraction," London, 1946.
- [45] K. G. Budden, *The waveguide mode theory of wave propagation.*: Logos Press, 1961.
- [46] J. R. Wait and K. P. Spies, "Internal guiding of microwave by an elevated tropospheric layer," *Radio Science*, pp. 319-326, 1969.
- [47] K. Davies, *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990.
- [48] Narinder. Nath and C. S. G. K. Setty, "The D-region ion composition," *Pure and applied geophysics*, pp. 891--908, 1976.
- [49] A. Kull, E. Kopp, C. Granier, and G. Brasseur, "Ions and electrons of the lower-latitude D region," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, pp. 9705–9716, 1997.
- [50] M. McEwan and Phillips F., *Chemistry of the Atmosphere*. Moscow: Mir Publishers, 1978.
- [51] A. P. Mitra and J. N. Rowe, "Ionospheric effects of solar flares-VI. Changes in D-region ion chemistry during solar flares," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 795-806, 1972.
- [52] U. S. Inan, T. E. Bell, and J. V. Rodriguez, "Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning," *Geophysical Research Letters*, pp. 705-708, 1991.
- [53] D.K. Sharma, M.S. Khurana, and Rai J., "Ionospheric heating due to solar flares as measured by SROSS-C2 satellite," *Advances in Space Research*, pp. 12-18, 2011.
- [54] T. N. Woods, W. K. Tobiska, G. J. Rottman, and J. R. Worden, "Improved solar Lyman  $\alpha$  irradiance modeling from 1947 through 1999 based on UARS observations," *Journal of Geophysical Research*, pp. 27195–27215, 2000.
- [55] C. Fröhlich, "Evidence of a long-term trend in total solar irradiance," *Astronomy and Astrophysics*, pp. L27-L30, 2009.

- 
- [56] J. Y. Liu, C.S. Chiu, and C. H. Lin, "The solar flare radiation responsible for sudden frequency deviation and geomagnetic fluctuation," *Journal of Geophysical Research*, pp. 10855–10862, 1996.
- [57] G. H. Stonehocker, "Advanced telecommunication forecasting technique," in *AGY, 5th.: Ionospheric forecasting*, 1970, pp. 27-1.
- [58] A. Kolarski and D. Grubor, "Comparative Analysis of VLF Signal Variation along Trajectory Induced by X-ray Solar Flares," *Journal of Astrophysics and Astronomy*, pp. 565-579, 2015.
- [59] R. F. Donnelly, "Extreme ultraviolet flashes of solar flares observed via sudden frequency deviations: experimental results," *Solar physics*, pp. 188–203, 1971.
- [60] A.P. Mitra and R.E. Jones, "Determination of the location of the ionospheric current system responsible for geomagnetic effects of solar flares," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 141-147, 1953.
- [61] K. Sao, M. Yamashita, S. Tanahashi, H. Jindoh, and K. Ohta, "Sudden enhancements (SEA) and decreases (SDA) of atmospherics," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 1567–1576, 1970.
- [62] B. T. Tsurutani and i drugi, "The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event," *Geophysical Research Letters*, p. L03S09, 2005.
- [63] E. L. Afraimovich, A. T. Altynsev, V.V. Grechnev, and L. A. Leonovich, "Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data," *Advances in Space Research*, pp. 1333-1338, 2001.
- [64] J. Y. Liu and C. H. Lin, "Ionospheric solar flare effects monitored by the ground-based GPS receivers: Theory and observation," *Journal of Geophysical Research*, pp. 10855–10862, 2004.
- [65] C. D. Weidman and E. P. Krider, "The amplitude spectra of lightning radiation fields in the interval from 1 to 20 MHz," *Radio Science*, pp. 964–970, 1986.
- [66] S.A. Cummer and U.S. Inan, "Ionospheric D-region remote sensing using VLF radio atmospherics," *Radio Science*, pp. 1781–1792, 1998.
- [67] C. P. Burke and D. L. Jones, "An experimental investigation of ELF attenuation rates in the Earth-ionosphere duct," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 243–250, 1992.
- [68] H. T. Sampath, U. S. Inan, and M. P Johnson, "Recovery signatures and occurrence properties of lightning-associated subionospheric VLF perturbations," *Journal of Geophysical Research*, pp. 183–191, 2000.
- [69] M. P. Johnson and U. S. Inan, "Sferic clusters associated with early/fast VLF events," *Geophysical Research Letters*, pp. 1391–1394, 2000.
- [70] C. P. Barrington-Leigh, U. S. Inan, and M. Stanley, "Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry," *Journal of Geophysical Research*, pp. 1741–1750, 2001.
- [71] C. J. Rodger, "Subionospheric VLF perturbations associated with lightning discharges," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 591-606, 2003.

- 
- [72] S. A. Cummer, U. S. Inan, and T. F. Bell, "Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics," *Radio Science*, pp. 1781-1792, 1998.
- [73] R. H. Helliwell, *Whistlers Related Ionospheric Phenomena*. Stanford: Stanford University Press, 1965.
- [74] Robert C. Duncan and Christopher Thompson, "Formation of very strongly magnetized neutron stars: implications for gamma-ray bursts," *The Astrophysical Journal*, pp. L9-L13, 1992.
- [75] A. I. MacFadyen and S. E. Woosley, "Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in "Failed Supernovae"," *The Astrophysical Journal*, p. 262, 1999.
- [76] D.A. Russell, "The enigma of the extinction of the dinosaurs," *Annual Reviews of Earth & Planetary Science*, pp. 163–182, 1979.
- [77] S.E. Thorsett, "Terrestrial implications of cosmological gamma-ray burst models," *Astrophysical Journal Letters*, p. L53, 1995.
- [78] G. Fishman and U. S. Inan, "Observation of an ionospheric disturbance caused by a gamma-ray burst," *Nature*, pp. 418–420, 1988.
- [79] U. S. Inan et al., "Massive disturbance of the day time ionosphere by the giant gamma-ray flare from magnetar SGR 1806-20," *Geophysical Research Letters*, p. 8103, 2007.
- [80] Aleksandra Nina, Saša Simić, Vladimir A. Srećković, and Luka Č. Popović, "Detection of short-term response of the low ionosphere on gamma ray bursts," *Geophysical Research Letters*, pp. 8250–8261, 2015.
- [81] W. Jones and J. Jones, "Oblique scattering of radio waves from meteor trains: theory," *Planetary and Space Science*, pp. 55-66, 1990.
- [82] M. Hayakawa et al., "On the correlation between ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF signals and earthquakes as characterized by seismic intensity," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 982–987, 2010.
- [83] Seiya Uyeda, Toshiyasu Nagao, and Masashi Kamogawa, "Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics," *Tectonophysics*, pp. 205-213, 2009.
- [84] M. P. Hickey, G. Schubert, and R. L. Walterscheid, "Propagation of tsunami-driven gravity waves into the thermosphere and ionosphere," *Journal of Geophysical Research*, p. A08304, 2009.
- [85] V.V. Hegai, V.P. Kim, and J.Y. Liu, "The ionospheric effect of atmospheric gravity waves excited prior to strong earthquake," *Advances in Space Research*, pp. 653–659, 2006.
- [86] M. Friedrich and K. M. Torkar, "FIRI: A semiempirical model of the lower ionosphere," *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, pp. 21409-21418, October 2001.
- [87] Aroh Barjatya, Langmuir Probe Measurements In The Ionosphere, 2007, All Graduate Theses and Dissertations. Paper 274.
- [88] J.V. Evans, "Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar," in *Proceedings of the IEEE* 57(4), 1969, pp. 496 - 530.

- 
- [89] J. S. Belrose and M. J. Burke, "Study of the lower ionosphere using partial reflection: 1. Experimental technique and method of analysis," *Journal of Geophysical Research*, vol. 69, p. 2799, 1964.
- [90] E. R. Swanson, "Omega," in *Proceedings of the IEEE*, 1983, pp. 1140-1155.
- [91] Martin Füllekrug et al., "Array analysis of electromagnetic radiation from radio transmitters for submarine communication," *Geophysical Research Letters*, pp. 9143-9149, 2014.
- [92] A. Nina, V. Čadež, V. A. Srećković, and D. Šulić, "The Influence of Solar Spectral Lines on Electron Concentration in Terrestrial Ionosphere," *Baltic Astronomy*, pp. 609-612, 2011.
- [93] E. D. Schmitter, "Modeling solar flare induced lower ionosphere changes using VLF/LF transmitter amplitude and phase observations at a midlatitude site," *Annales Geophysicae*, pp. 765-773, 2013.
- [94] R. Singh et al., "D-region ionosphere response to the total solar eclipse of 22 July 2009 deduced from ELF-VLF tweek observations in the Indian sector," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, pp. 2156-2202, 2011.
- [95] U. S. Inan, D. C. Shafer, W. Y. Yip, and R. E. Orville, "Subionospheric VLF signatures of nighttime D region perturbations in the vicinity of lightning discharges," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, pp. 11455-11472, 1988.
- [96] K. Jilani, A. M. Mirza, and T. A. Khan, "Ion-acoustic solitons in pair-ion plasma with non-thermal electrons," *Astrophysics and Space Science*, pp. 135-143, 2013.
- [97] I. Strelnikova and M. Rapp, "Studies of polar mesosphere summer echoes with the EISCAT VHF and UHF radars: Information contained in the spectral shape," *Advances in Space Research*, pp. 247-259, 2010.
- [98] J. L. Chau, J. Rottger, and M. Rapp, "PMSE strength during enhanced D region electron densities: Faraday rotation and absorption effects at VHF frequencies," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 113-118, 2014.
- [99] F. S. Mozer and D. L. Carpenter, "Balloon and VLF whistler measurements of electric fields, equatorial electron density, and precipitating particles during a barium cloud release in the magnetosphere," *Journal of Geophysical Research*, pp. 5736-5744, 1973.
- [100] T. Ushio, T. Wu, and S. Yoshida, "Review of recent progress in lightning and thunderstorm detection techniques in Asia," *Atmospheric Research*, pp. 89-102, 2014.
- [101] Abram R. Jacobson and Mathew J. Heavner, "Comparison of Narrow Bipolar Events with Ordinary Lightning as Proxies for Severe Convection," *American Meteorological Society*, pp. 1144-1154, 2005.
- [102] A. Nina and V. M. Čadež, "Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves," *Geophysical Research Letters*, pp. 4803-4807, 2013.
- [103] J. R. Wait and K. P. Spies, "Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves," 1964.
- [104] N. R. Thomson, "Experimental daytime VLF ionospheric parameters," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 173-184, 1993.

- 
- [105] D. P. Grubor, D. M. Šulić, and V. Žigman, "Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile," *Annales Geophysicae*, pp. 1731–1740, 2008.
  - [106] A. M. Nina, PhD Thesis - Diagnostic of plasma of ionospheric D region by electromagnetic VLF waves, 2014, University of Belgrade, Faculty of Physics.
  - [107] A. Nina, V. Čadež, D. Šulić, V. Srećković, and V. Žigman, "Effective electron recombination coefficient in ionospheric D-region during the relaxation regime after solar flare from February 18, 2011," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, pp. 106-109, 2012.
  - [108] A. Nina and V. M. Čadež, "Electron production by solar Ly- $\alpha$  line radiation in the ionospheric D-region," *Advances in Space Research*, pp. 1276–1284, 2014.
  - [109] W. J. G. Beynon and E. R. Williams, "Rocket measurements of D-region electron density profiles," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 1319-1325, 1976.
  - [110] Zhenggang Cheng, Steven A. Cummer, Daniel N. Baker, and Shrikanth G. Kanekal, "Nighttime D region electron density profiles and variabilities inferred from broadband measurements using VLF radio emissions from lightning," *Journal of Geophysical Research*, p. A05302, 2006.
  - [111] A. D. Danilova, N. V. Smirnovab, T. A. Blix, E. V. Thrane, and L.B. Vanina, "Some features of electron density behaviour in the high latitude D-region derived from in situ measurements," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 417 – 427, 2003.
  - [112] K. Igarashi, Y. Murayama, M. Nagayama, and S. Kawana, "D-region electron density measurements by MF radar in the middle and high latitudes," *Advances in Space Research*, pp. 25-32, 2000.
  - [113] D. G. Morfitt and C. H. Shellman, "MODESRCH: An improved computer program for obtaining ELF/VLF/LF propagation data," San Diego, 1976.
  - [114] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics*., Academic Press, 2009.
  - [115] Morris B. Cohen, Umran S. Inan, and Evans W. Paschal, "Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception With the AWESOME Instrument," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 3-17, 2010.
  - [116] Sarah K. Harriman, Evans W. Paschal, and Umran S. Inan, "Magnetic Sensor Design for Femtotesla Low-Frequency Signals," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 396-402, 2010.
  - [117] Belden, 1217B Multi-Conductor - Flexible, Low-Capacitance Cable.
  - [118] Motorola, M12+ GPS Receiver User's Guide.
  - [119] J. A. Ferguson, "Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0," San Diego, 1998.
  - [120] Steven A. Cummer, "Modeling Electromagnetic Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide," *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, pp. 1420-1429, 2000.
  - [121] R. R. Morgan, "World-wide VLF effective conductivity map, Report 8013F-1,"

- Pittsburgh, 1968.
- [122] T. A. Khan, M. Ayub, and K. Jilani, "E-polarized plane wave diffraction by an impedance loaded parallel-plate waveguide located in cold plasma," *Physica Scripta*, p. 095207, 2014.
  - [123] B. W. Reinisch et al., "Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar," *Radio Science*, pp. 1681–1694, 1997.
  - [124] X. Zhang, Y. Liang, Z. Wang, and F. Yang, "Joint estimation of target state and ionosphere state of over-the-horizon radar," in *Inform. Fusion (FUSION), 2013 16th International Conference on*, 2013, pp. 1066-1071.
  - [125] National Oceanic and Atmospheric Administration, USA. GOES data. [Online]. <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>
  - [126] S. Mikhailov and V. Grozov, "Recovery of the nonmonotonic altitude profile of the plasma frequency based on the ionospheric oblique sounding data," *Radiophysics and Quantum Electronics*, pp. 399–412, 2013.
  - [127] C. Chen et al., "Diurnal specification of the ionospheric f0f2 parameter using a support vector machine," *Radio Science*, pp. 1–13, 2010.
  - [128] C. G. Smithtro, J. J. Sojka, T. Berkey, D. Thompson, and R. W. Schunk, "Anomalous F region response to moderate solar flares," *Radio Science*, pp. 1-11, 2006.
  - [129] V. Žigman, D. Grubor, and D. Šulić, "D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 775–792, 2007.
  - [130] A. Kolarski, D. Grubor, and D. Šulić, "Diagnostics of the Solar X-Flare Impact on Lower Ionosphere through Seasons Based on VLF-NAA Signal Recordings," *Baltic Astronomy*, pp. 591-595, 2011.
  - [131] A. Nina, V. Čadež, V. Srećković, and D. Šulić, "Altitude distribution of electron concentration in ionospheric D-region in presence of time-varying solar radiation flux," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, pp. 110-113, 2012.
  - [132] W. M. McRae and N. R. Thomson, "VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 62, pp. 609-618, May 2000.
  - [133] F. Han, S. A. Cummer, J. Li, and G. Lu, "Daytime ionospheric D region sharpness derived from VLF radio atmospheric," *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, vol. 116, p. 5314, May 2011.
  - [134] A. P. Mitra, *Ionospheric effects of solar flares*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974.
  - [135] M. McEwan and F. Phillips, *Chemistry of the Atmosphere*. New York: Wiley, 1978.
  - [136] N. Blaunstein and C. Christodoulou, *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
  - [137] S. William and C. I. Foley, "Steady-state Multi-ion Disturbed D-region Model,"

- 1978.
- [138] Jean-Pierre Raulin et al., "Response of the low ionosphere to X-ray and Lyman- $\alpha$  solar flare emissions," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 118, no. 1, pp. 570-575, Jan. 2013.
  - [139] C. J. Rodger, O. A. Molchanov, and N. R. Thomson, "Relaxation of transient ionization in the lower ionosphere," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, pp. 6969-6975, 1998.
  - [140] D. Bilitza, "International reference ionosphere," *Planetary and Space Science*, pp. 544-544, 1992.
  - [141] A. K. Maurya et al., "Nighttime D region electron density measurements from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, pp. 1-13, 2012.
  - [142] N. R. Thomson, M. A. Clilverd, and C. J. Rodger, "Low-latitude ionospheric D region dependence on solar zenith angle," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, pp. 6865-6875, 2014.
  - [143] A. C. B. Swamy, "A new technique for estimating D-region effective recombination coefficients under different solar flare conditions," *Astrophysics and Space Science*, pp. 153-164, 1991.
  - [144] Phillip C. Chamberlin, Thomas N. Woods, and Francis G. Eparvier, "Flare Irradiance Spectral Model (FISM): Flare component algorithms and results," *Space Weather*, vol. 6, p. S05001, May 2008.
  - [145] J. K. Hargreaves, "A new method of studying the relation between ionization rates and radio-wave absorption in polar-cap absorption events," *Annales Geophysicae*, pp. 359-369, 2005.
  - [146] J. Bajčetić, M. Andrić, B. Todorović, B. Pavlović, and V. Suša, "Korelacija između promene nivoa horizontalno polarizovanog elektromagnetnog talasa frekvencije 5 GHz i vertikalnog intenziteta geomagnetnog polja," in *ETRAN 2013*, Zlatibor, 2013.
  - [147] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons LTD, 2000.
  - [148] Theodore S. Rappaport, *Wireless communications principles and practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, N. J., USA: Prentice Hall PTR, 2002.
  - [149] Andrei B. Petrin, "Transmission of Microwaves Through Magnetoactive Plasma," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 29, no. 3, pp. 471-478, 2001.
  - [150] M. Kaur, S. Kakar, and D. Mandal, "Electromagnetic interference," in *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference on*, Kanyakumari, 2011, pp. 1-5.
  - [151] Roger L. Freeman, *Radio system design for telecommunications*, 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
  - [152] M. K. Simon and M-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels: a unified approach to performance analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
  - [153] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization," *IEEE Communications Magazine*, pp. 90-100, 1997.

- [154] B. Sklar, *Digital Communications, sec.ed.* New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [155] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II: Mitigation," *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-109, 1997.
- [156] HAMEG Instruments GmbH®, 3 GHz RF-Synthesizer HM8135.
- [157] Mišo Planojević and Jovan Bajčetić, Pravilo radio-relejni uređaj GRC-408E/34, 2010.
- [158] Tektronix, Inc., Spectrum Analyzer H600 / SA2600 Series Data Sheet, Oct. 2, 2010.
- [159] Inc. The MathWorks, "MATLAB and Statistics Toolbox Release 2013b".
- [160] M. Grábner and V. Kvičera, "Refractive index measurements in the lowest troposphere in the Czech Republic," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 1334-1339, 2006.
- [161] P. Valtr, P. Pechac, V. Kvicera, and M. Grabner, "A Terrestrial Multiple Receiver Radio Link Experiment at 10.7 GHz – Comparisons of Results with Parabolic Ewuation Calculations," *Radioengineering*, pp. 117-121, 2010.
- [162] O. E. Eyo, A. I. Menkiti, and S. O. Udo, "Microwave Signal Attenuation in Harmattan Weather Along Calabar-Akampkpa Line-of-Sight Link," *Turkish Journal of Physics* , pp. 153-160, 2003.
- [163] A. T. Adediji and M. O. Ajewole, "Vertical profile of radio refractivity gradient in Akure south-west Nigeria," *Progress In Electromagnetics Research C*, pp. 157-168, 2008.
- [164] T. R. Rao, S. V. B. Rao, M. V. S. N. Prasad, S. K. Sarkar, and D. R. Lakshmi, "Effect of sea breeze on propagation characteristics over a LOS microwave link located in Indian south-east coast," *Indian Journal of Radio & Space Physics*, pp. 113-118, 1999.