

**АНАЛИЗА ЈОНОСФЕРСКОГ УТИЦАЈА НА БАЗНИМ ЛИНИЈАМА СРЕДЊЕ ДУЖИНЕ****ANALYSIS OF IONOSPHERIC INFLUENCE ON BASELINES OF MEDIUM LENGTH**

Миомир Миленковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОМАТИКА**

**Kratak sadržaj** – Тродимензионално GNSS позиционирање се данас примењује у бројним областима где је потребна висока тачност просторних података. Велики напори улажу се како би се што прецизније моделовали различити извори грешака позиционирања са циљем даљег побољшања тачности. У оквиру рада анализиран је утицај различитих начина моделовања јоносфере на тачност GNSS позиционирања. Испитивање је урађено на базним линијама средње дужине користећи три модела јоносфере имплементираних у програму отвореног кода RTKLib. Мерења су извршена током три различита дана, и то тако да су формирана два полигона. Упоредна анализа извршена је на основу незатварања полигона пре и након изравнања GNSS мерења.

**Кључне речи:** јоносфера, GNSS, изравнање, RTK Lib

**Abstract** – Three-dimensional GNSS positioning is applied today in many areas where high accuracy of spatial data is required. Great efforts are being made to model as accurately as possible the various sources of positioning errors with the aim of further improving accuracy. The paper analyzes the influence of different ways of ionosphere modeling on the accuracy of GNSS positioning. The test was performed on medium-length baselines using three ionosphere models implemented in the RTKLib open source program. The measurements were performed during three different days, so that two polygons were formed. The comparative analysis was performed on the basis of non-closing of the polygon before and after the alignment of the GNSS measurements.

**Keywords:** ionosphere, GNSS, adjustment, RTK Lib**1. УВОД**

Глобални навигациони системи (GNSS – Global Navigation Satellite System) су системи сателита у орбити око Земље где се сателити користе као референтне тачке за позиционирање.

Данас постоје следећи GNSS системи:

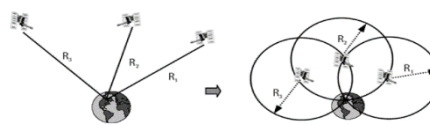
- NAVSTAR GPS
- GLONASS
- Compass (BeiDou2)
- Galileo

**НАПОМЕНА:**

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Булатовић, ред. проф.

Тренутно једини функционални GNSS системи су GPS (Global Positioning System), најчешће коришћен, и GLONASS (Global Navigation Satellite System), засновани на комуникацији са сателитима (корисници примају информације са сателита, без могућности слања истих ка сателиту).

GPS је заснован на трилатерационој методи позиционирања и одређивању позиције тачке у тродимензионалном простору. Трилатерација је математичка метода којом се израчунава пресечна тачка три сфере када су познати полупречници и центри сфера. Тачка се налази у пресеку најмање три сфере чији су полупречници измерена растојања од пријемника до сателита, а центри сфера су сателити [1].



Слика 1. Трилатерациона метода позиционирања

**2. ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАЦИ GPS МЕРЕЊА И ОСНОВНИ ИЗВОРИ ГРЕШАКА**

Предности GNSS методе позиционирања у односу на традиционалне методе премера су бројне:

- Међусобно догледање тачака није потребно,
- Може бити коришћен у било које време дана или ноћи,
- Више послова може бити урађено за мањи временски период и са мањим бројем људи,
- Пружа резултате високе тачности,
- Одређивање тачке на било којој позицији за потребе снимања детаља када у том подручју немамо или је уништена геодетска основа.

Као главни недостаци GNSS мерења могу се издвојити:

- Немогућност мерења у затвореном простору, док тачност значајно опада уколико се приближимо објектима, дрвећем или било којим објектом који заклања небом,
- Губитак иницијализације.

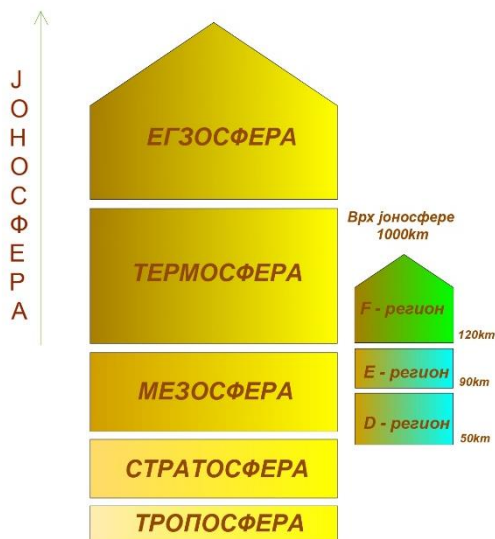
Основни извори грешака GNSS позиционирања могу се поделити у неколико категорија:

- Грешке сателитског порекла

- Грешке које потичу од средине кретања сигнала
- Грешке чије је порекло у пријемнику или антени односно њиховој непосредној средини

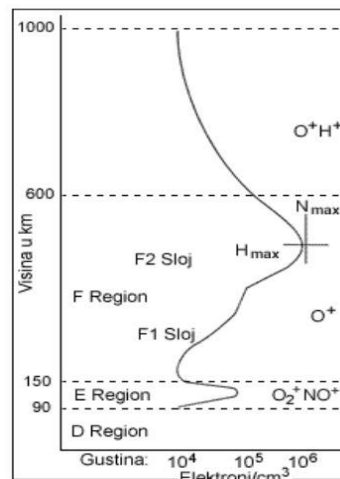
## 2.2. Утицај јоносфере на простирање GNSS сигнала

Утицај јоносфере на простирање таласа је већи и може унети грешку и до 5 метара. Јоносфера утиче на пропацију радио таласа у зависности од фреквенције зрачења и дужине пута којом таласи пролазе кроз њу. Обрадом сигнала се установљава разлика у кашњењу сигнала модулисаног са L1 и сигнала модулисаног са L2 и на основу тога се израчунава утицај јоносфере. Нови сателити, Blok IR-M генерације имају L2C код који је модулисан на фреквенцију L2, да би се исти метод детекције јоносферског ефекта и његове корекције могао употребити и на цивилним пријемницима. Опсег у атмосфери у ком је значајан утицај јоносфере приказан је на слици 2.



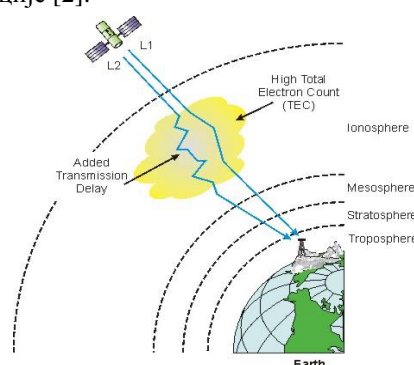
Слика 2. Атмосферски модел и подела

Значај познавања јоносфере као медијума јесте тај да се високо фреквентни таласи простиру од једне до друге локације тако што се рефлектују о границе јоносфере. Критични параметри јесу максимално употребљива фреквенција и минимално употребљива фреквенција, коју јоносфера може да подржи. Једна глобална подела јоносфере би била на D, E и F област. У одређеним условима, јоносфера се може поделити и на слојеве (слика 3). MUF (Maximum Usable Frequency) највише зависи од максимума електронске густине (концентрације) у F региону. LUF (Lowest Usable Frequency) је контролисан величином апсорпције радио таласа у D и E региону, и доста је афектиран ефектом соларних флорова. У низу јоносферских промена наводи се и тзв. Децембарска аномалија која престава појаву високих вредности foF2 у децембру односно чињеницу да су дневне критичне фреквенције у општем случају више у децембру него у јуну. Ова појава се истиче као један од значајних феномена у физици јоносфере и доводе у везу са термалним процесима.



Слика 3. Јоносферске области у функцији висине

Постојање слободних електрона у јоносфери, делује на простирање радио таласа, што проузрокује кашњење GNSS сигнала и директно утиче на прецизност GNSS позиционирања. Број електрона са којима се сусрећу електромагнетни таласи путујући кроз јоносферу је укупни садржај електрона (енг. Total Electron Content - TEC) и представља интегралну густину електрона дуж путање сигнала између сателита и GNSS пријемника у колони попречног пресека површине 1m<sup>2</sup>. Кашњење сигнала при великом садржају електрона приказано је на слици 4. Јоносферско кашњење је готово сразмерно TEC дуж путање сигнала и обрнуто пропорционално квадрату фреквенције [2].



Слика 4. Јоносферско кашњење

## 3. МОДЕЛИ ЗА ОЦЕНУ УТИЦАЈА АТМОСФЕРЕ

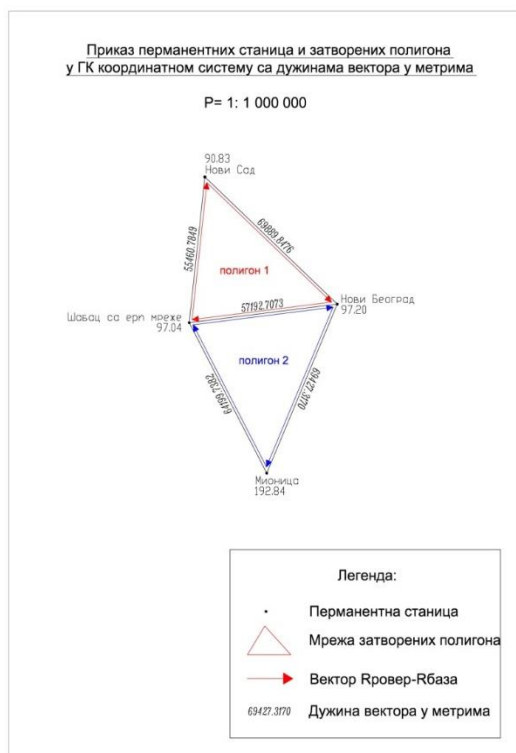
Када је у питању релативно GPS позиционирање, од примарног интереса су промене у јоносфери, то јесте разлика у кашњењу сигнала која се јавља на оба краја базне линије (Georgiadou and Kleusberg, 1988a). Двофреквентни GPS пријемници могу искористити дисперзиону природу јоносфере и формирањем линеарних комбинација од оригиналних L1 и L2 фазних опажања, уклонити последице јоносферског кашњења дуж базне линије. Овај метод обезбеђује најефикасније средство елиминисања јоносферског утицаја, посебно при поремећеним јоносферским условима [3]. За GPS кориснике су на располагању бројни јоносферски модели за корекцију јоносферског кашњења сигнала, тамо где двофреквентни пријемници нису доступни. Они се користе и за решавање фазних неодређености код прецизног

геодетског позиционирања (Memarzadeh, 2009). Различите врсте јоносферских модела могу се категоризовати на следећи начин:

- Емпиријски модел
- Аналитички модел
- Физички модел
- Klobucar модел
- International Reference Ionosphere (IRI) модел

#### 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

Циљ експерименталног истраживања представљеног у раду јесте да се испита утицај три различита начина моделовања јоносфере на GNSS позиционирање. У том циљу, прикупљени су RINEX формати са станица које формирају два полигона. Први полигон конструисан је од три фиксне тачке на подручју Србије, и то: *Нови Сад – Шабац – Нови Београд*, а други *Мионица – Шабац – Нови Београд* (слика 5). Трајање опажања на свакој станици је 24h, а опажања су вршена током четири различита дана.



Слика 5. Мрежа перманентних станица и затворених полигона

Употребом програма отвореног кода RTKLib процесирани су прикупљени RINEX фајлови без коришћења јоносферског модела (OFF) и коришћењем три имплементираних модела јоносфере – Broadcast, Ionex и Estimate. RTKlib је софтверски пакет отвореног кода (open source) за стандардно и прецизно позиционирање за GNSS системе. Предности RTKlib-а су следеће:

- прецизно позиционирање, које подржава различите режиме за GNSS у реалном времену као и за рад у накнадној обради података
- подржава различите стандарде, формате и протоколе за GNSS.

Као улазни податак приликом процесирања у RTKLib-у за станицу Шабац коришћен је RINEX фајл са сајта EUREF-а, док су за станице Нови Сад, Нови Београд и Мионица фајлови преузети са сајта <http://www.geosolutions.co.rs/>. Први корак био је преузети навигационе фајлове са званичног сајта (NASA) <https://cddis.nasa.gov/>, податке о ексцентрицитету фазног у односу на геометријски центар антене, као и прецизне ефемериде, које су доступне након две недеље од дана опажања (нпр. igs21426\_6.sp3). Преузети навигациони подаци су резултат 24-часовног опажања за четири различита датума, у мају, 2021. године (тип MIXED).

Испитивање утицаја јоносфере на тачност позиционирања врши се за стратегију Broadcast, а затим Estimate и Ionex, као и у случају без моделовања јоносферског утицаја. Одабране су прецизне ефемериде, а за сателите GPS и GLONASS.

Након поменутог процесирања израчунато је незатварање оба полигона у све четири варијанте током четири дана. Незатварање је рачунато сабирањем вредности добијених вектора након процесирања у RTKLib-у за сваки полигон посебно. Незатварање након процесирања свих вектора приказано је у Табели 1 и 2.

Табела 1. Незатварање у оквиру првог полигона

	стратегија	X [m]	Y [m]	Z [m]
16.5.2021.	Broadcast	-0,0007	0,0048	0,0010
	Ionex	0,0383	0,0370	0,0450
	Estimate	0,0030	0,0043	0,0032
	Off	-0,0007	0,0048	0,0010
17.5.2021.	Broadcast	-0,0100	0,0022	0,0025
	Ionex	0,0677	-0,0022	0,0285
	Estimate	0,0117	-0,0062	0,0047
	Off	0,0035	0,0022	0,0025
22.5.2021.	Broadcast	0,0001	0,0027	0,0013
	Ionex	0,0130	-0,0096	0,0041
	Estimate	0,0130	-0,0096	0,0041
	Off	0,0001	0,0027	0,0013
24.5.2021.	Broadcast	0,0333	0,0429	0,1260
	Ionex	0,0131	0,0081	0,0033
	Estimate	0,0131	-0,0081	0,0033
	Off	0,0333	0,0429	0,1260

Табела 2. Незатварање у оквиру другог полигона

	стратегија	X [m]	Y [m]	Z [m]
16.5.2021.	Broadcast	0,0084	0,0025	0,0025
	Ionex	0,0137	0,0255	0,0077
	Estimate	0,0046	-0,0283	-0,0080
	Off	0,0084	0,0025	0,0025
17.5.2021.	Broadcast	0,0142	0,0026	0,0131
	Ionex	-0,0482	-0,0140	0,0302
	Estimate	0,0090	-0,0154	0,0015
	Off	0,0142	0,0026	0,0131
22.5.2021.	Broadcast	0,0591	0,0035	-0,0159
	Ionex	0,0198	-0,0204	0,0154
	Estimate	0,0198	-0,0204	0,0154
	Off	0,0591	0,0029	-0,0179
24.5.2021.	Broadcast	0,0597	0,0497	-0,0373
	Ionex	0,0011	-0,0054	0,0063
	Estimate	0,0011	-0,0054	0,0063
	Off	0,0597	0,0497	-0,0373

Упоређивањем резултата у Табелама 1 и 2, уочено је да су у оба полигона идентична решења за стратегију Broadcast и Off, за сва четири датума процесирања. Трећег и четвртог дана примећено је да су Estimate и Ionex дали исте резултате у оба полигона, док се решења у прва два дана знатно разликују у опсегу од 3 до 4 cm. Највећа разлика примећена је четвртог дана мерења, између стратегије Broadcast/Off и Ionex/Estimate. Ту је уочено и највеће незатварање по x и y-оси (6cm и 5cm). Такво одступање по z-оси забележено је још и другог дана, при корекцији Ionex у првом полигону, као и одступање по z-оси последњег дана мерења, за Broadcast/Off.

Прикупљени и процесирани подаци су затим изравнати методом најмањих квадрата и поново је израчунато незатварање оба полигона у свим варијантама током сва четири дана. Циљ изравнања је био смањити или потпуно елиминисати незатварање, што је и постигнуто.

## 5. ЗАКЉУЧАК

За примене у геодезији, GPS је револуционарна техника, која је омогућила да се једноставније и брже премере разне области. По ефикасности и тачности снимања и позиционирања предности GPS технологије се огледају у могућности коришћења у свако доба дана и ноћи, као и рачунања координата тачака у реалном времену, комуникације два суседна пријемника без међусобне оптичке видљивости. Развојем GPS технологије јавила се потреба за израдом различитих софтверских пакета, чија би функција била праћење мреже и комуникације перманентних станица, а самим тим постизање апсолутно тачних и прецизних резултата. Неке од грешака GPS технологије односе се и на ефемериде, о којима је било речи кроз сам рад.

Кроз овај задатак испитан је један такав open source софтвер, који је већ дуги низ година у коришћењу, као и типови јоносферских утицаја, без утицаја тропосфере, па је запажено да су резултати слични, али ипак не са идентичним решењима. Циљ овог процесирања је био и изравнати мерења GPS вектора средњих дужина, како би се незатварање полигона елиминисало или svelo на минимум. Генерално, посматрајући табелу, процесирање при коришћењу корекције Estimate показало је најмање незатварање и једног, и другог полигона (максимално 2cm) па се може тумачити као препоручено решење.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.grf.bg.ac.rs/> (приступљено у марту 2021.)
- [2] Миљана С. Тодоровић Дракул, „Моделовање јоносфере за потребе одређивања утицаја на ГПС сигнале у мрежном РТК окружењу“ – докторска дисертација, Грађевински факултет, 2016.
- [3] J. A. Klobuchar, "Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-23, no. 3, pp. 325-331, May 1987.
- [4] GentooARS (приступљено у мају 2021.)
- [5] Сајт CDDIS (приступљено у мају 2021.)
- [6] National Geodetic Survey (приступљено у мају 2021.)
- [7] EUREF Permanent GNSS Network (приступљено у мају 2021.)

### Кратка биографија:



**Миомир Миленковић**, рођен у Лесковцу 1991. године. Средњу Грађевинску техничку школу „Неимар“ завршио је у Нишу 2010. године, када уписује Високу грађевинско - геодетску школу у Београду. По завршетку, студије наставља на Факултету техничких наука, област геодезија и геоматика, где дипломира 2017. године.