

РАЧУНАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ЗЕМЉИНЕ КОРЕ УПОТРЕБОМ ГЕОДЕТСКЕ ТЕХНИКЕ VLBI

Горана Тодорић^{1*}, Дејан Васић² и Драгољуб Секуловић³

¹Геодетска агенција „ВиЖ“, Прњавор, Република Српска

²Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Бања Лука, Република Српска

³Универзитет одбране у Београду, Војна академија, Београд, Србија

Сажетак: Земљина кора као највиши дио у структурној грађи Земље трпи промјене под истовременим и супростављеним дејством ендеогених и егзогених процеса. Према моделу тектонике плоча подијељена је у одређен број танких, крутих плоча које се крећу једна у односу на другу и чије су границе дефинисане сеизмичком активношћу. Висока прецизност позиционирања остварена данас помоћу просторних геодетских техника VLBI, SLR, GNSS, LLR и DORIS омогућила је добијање информација о кинематици тектонских плоча на основу поновљених или континуираних опажања. У раду је описана техника VLBI (Дугобазисна интерферометрија) за квантитативно вредновање савремених помјерања и посљедичних деформација Земљине коре.

Кључне ријечи: техника VLBI (Дугобазисна интерферометрија), помјерање Земљине коре, тектоника плоча.

Original scientific paper

CALCULATIONS OF EARTH'S CRUST MOVEMENT USING GEODETIC VLBI TECHNIQUE

Gorana Todoric^{1*}, Dejan Vasic² and Dragoljub Sekulovic³

¹Geodetic agency „ViŽ“, Prnjavor, Republic of Srpska

²University of Banja Luka, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Banja Luka, Republic of Srpska

³University of Defense of Belgrade, Military Academy, Belgrade, Serbia

Abstract: The Earth's crust as the highest part in the structure of the Earth suffers changes under the simultaneous and opposing effects of endogenous and exogenous processes. According to the model of plate tectonics, it is divided into a number of thin, rigid plates that move one in relation to the other and whose boundaries are defined by seismic activity. The high positioning accuracy achieved today with the use of spatial geodetic techniques such as VLBI, SLR, GNSS, LLR and DORIS enabled obtaining information on the tectonic plates' kinematics based on repeated or continuous observations. The paper describes the technique of VLBI (Very Long Baseline Interferometry) for the quantitative evaluation of modern movements and consequent deformations of the Earth's crust.

Key words: Very Long Baseline Interferometry (VLBI) technique, the Earth's crust movement, plate tectonics.

* Аутор за кореспонденцију: Горана Тодорић, Геодетска агенција „ВиЖ“, Светог Саве 6, 78430 Прњавор, Република Српска, Босна и Херцеговина, E-mail: gorana.todoric@hotmail.com

Corresponding author: Gorana Todoric, Geodetska агенција „ViŽ“, Svetog Save 6, 78430 Prnjavor, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina, E-mail: gorana.todoric@hotmail.com

УВОД

Земља је мјесто различитих динамичких процеса узрокованих спољашњим и унутрашњим силама. Ти процеси настају и дјелују у различитим просторним и временским скалама. Као последица неких од тих процеса велика подручја Земље изложена су природним катастрофама попут земљотреса, урагана, тајфуна и поплава. Развој просторних геодетских техника омогућава опсежна праћења особина Земље и то са високом тачношћу и просторном и временском резолуцијом. Оваква геодетска опажања дају пресудне информације о геодинамичким процесима, а који узрокују природне процесе попут земљотреса, клизишта, вулканских ерупција, промјена у нивоу водених маса и водама на копну.

У склопу Међународне асоцијације за геодезију (IAG), водеће свјетске геодетске организације, развијали су се сервиси у сврху глобалне координације геодетских активности за осигурање високотачних и поузданих геодетских мјерења. Данас ти сервиси, засновани на различитим геодетским техникама и подацима, пружају услуге за широк спектар корисника, а не само за геодетску и геофизичку заједницу.

Остварена висока прецизност позиционирања просторним геодетским техникама као што су: VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), GNSS (*Global Navigation Satellite System*) и DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) омогућила је добијање информација о кинематици тектонских плоча из поновљених или континуираних опажања. Према моделу тектонике плоча Земљина кора подијељена је у одређен број танких, крутих плоча које се крећу једна у односу на другу. Границе плоча дефинисане су сеизмичком активношћу и такође могу бити карактерисане вулканима.

Просторна сателитска техника VLBI изворно је развијена крајем 1970-их година у оквиру пројекта за високопрецизна геодетска одређивања динамике Земљине коре, дизајнирана за опажање удаљених небеских радио-извора са високом угаоном резолуцијом.

INTRODUCTION

The Earth is the place of various dynamic processes caused by external and internal forces. These processes arise and operate in different spatial and temporal scales. As a consequence of some of these processes, large areas of the Earth are exposed to natural disasters such as earthquakes, hurricanes, typhoons and floods. The development of spatial geodetic techniques allows extensive monitoring of Earth's properties with high accuracy and spatial and temporal resolution. Such geodetic observations give crucial information on geodynamic processes, which cause natural processes such as earthquakes, landslides, volcanic eruptions, changes in water levels and waters on land.

Within the International Association of Geodesy (IAG), the world's leading geodetic organization, services for the purpose of global coordination of geodetic activities for providing reliable geodetic surveys with high accuracy have been developed. Today, these services, based on various geodetic techniques and data, provide services for a wide range of users, not just for geodetic and geophysical community.

The achieved high accuracy of positioning with spatial geodetic techniques of VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), GNSS (*Global Navigation Satellite System*) and DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) enabled the obtaining of information on the tectonic plates' kinematics from repeated or continuous observations. According to the model of the plate tectonics, the Earth's crust is divided into a number of thin, rigid plates that move one in relation to the other. The plate boundaries are defined by seismic activity and can also be characterized by volcanoes.

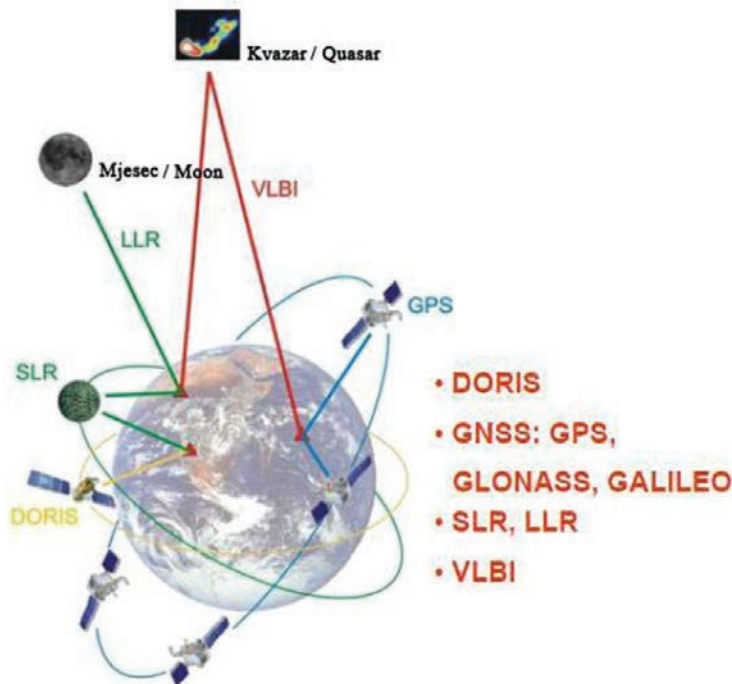
Spatial satellite VLBI technique was originally developed in the late 1970s as a part of a project for high-precision geodetic determination of the Earth's crust dynamics, designed to observe distant sky radio-sources with high angular resolution.

ОСНОВЕ VLBI ТЕХНИКЕ

Техника VLBI (Дугобазисна интерферометрија) метода је мјерења сателитске геодезије која, заједно са GNSS, SLR, LLR и DORIS техником, представља један од основних извора података у савременим глобалним геодетским истраживањима (Сл. 1). Примјењује се како у радио-астрономији, за астрофизику и астрометрију, тако и у геодезији. Астрономска и геодетска VLBI техника разликују се у распореду сесија терестричког и небеског опажања, у погледу броја опажаних радио-извора, у броју и учесталости опажања према радио-изворима и у научним циљевима. Циљ радио-астрономије је истраживање различитих астрономских објеката са становишта њихових астрофизичких карактеристика. Насупрот томе, геодетска и астрометријска VLBI техника служе за прецизно одређивање: 1) положаја небеских тијела, 2) релативних положаја тачака на Земљи, 3) параметара Земљине ротације и оријентације и 4) помјерања тектонских плоча.

FUNDAMENTALS OF VLBI TECHNIQUE

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) technique is a measurement method of satellite geodesy, which, in addition to GNSS, SLR, LLR and DORIS technique, is one of the main data sources in modern global geodetic research (Fig. 1). This technique is used both in radio-astronomy for astrophysics and astrometrics, and in geodesy. Astronomical and geodetic VLBI technique differ in schedule of sessions of terrestrial and celestial observations, in terms of the number of observations of radio-sources, as well as the number and frequency of observations towards radio-sources, and in the scientific goals. The aim of the radio-astronomy is to examine a huge variety of astronomical objects and their astrophysical characteristics. In contrast, geodetic and astrometric VLBI technique emphasize on precise positioning of: 1) positions of celestial objects, 2) relative positions of points on Earth, 3) parameters of Earth's rotation and orientation and 4) the movement of continental plates.



Сл. 1. Савремени мјерни системи у сателитској геодезији и астрометрији (Шпољарић, 2017)
Fig. 1. Modern measurement systems in satellite geodesy and astrometrics (Шпољарић, 2017)

Техника VLBI пружа поуздане резултате високе тачности. Због тога има широку примјену у оквиру различитих истраживања из области геодезије.

VLBI води поријекло од локалне интерферометрије коју су астрономи користили за проучавање положаја и структуре удаљених космичких објеката. Примјењује се више од 50 година, од средине 1960-их година (Schuh & Behrend, 2012).

Развој атомских часовника 1970-их година омогућио је потпуно раздвајање двије антене, тако да се интерферометријски подаци примају независно на обје станице након чега се врши њихова корелација синхронизацијом часовника. Убрзо након првих опажања 1967. године, VLBI је привукла интересовање геодета. Данас VLBI има важну улогу у мјерењу помјерања тектонских плоча, одређивању Земљине оријентације у инерцијалном референтном оквиру и уопште има велику примјену у радио-астрономији и геодезији (Campbell, 2004; Plank, 2013; Sovers, Fanselow, & Jacob, 1998).

Геодетска VLBI напредна је техника сателитске геодезије којом се одређују растојања између антена постављених на површи Земље, с тачношћу од неколико милиметара. У основи, мјере се временске разлике пристизања радио-таласа које емитују квазари, удаљени и до неколико милијарди свјетлосних година ("What is VLBI," 2017). Основни принцип рада VLBI технике приказан је на Сл. 2.

За геодетско мјерење помјерања континената, на свакој антени (Сл. 3) подаци са удаљених квазара примљени су и означени са веома тачним одређивањем времена помоћу водоничног масерског атомског часовника чија грешка износи секунду на сваких милион година.

Приликом VLBI мјерења, истовремено се на двије антене прима радио-сигнал са удаљеног космичког извора. Због различитог положаја пријемних антена, пријем сигнала на једној станици ће каснити у односу на другу. Временско кашњење може се одредити крос-корелацијом два сигнала. Опажањем више радио-извора и мјерењем временског

VLBI technique gives reliable results of high accuracy, and is therefore one of the most frequently used techniques for various research in the field of geodesy.

VLBI originates from local interferometry used by astronomers to study the position and structure of distant cosmic objects. It has been applied for more than 50 years, since the mid-1960s (Schuh & Behrend, 2012).

The development of atomic clocks in the 1970s made it possible to completely separate two antennas, so that the interferometric data were received independently on both stations, after which their correlation by synchronizing the clocks was done. Soon after the first observations in 1967, the VLBI attracted the interest of the surveyors. Today, the VLBI plays a significant role in measuring the movement of tectonic plates, determining the Earth's orientation in the inertial reference frame, and generally has great application in radio-astronomy and geodesy (Campbell, 2004; Plank, 2013; Sovers, Fanselow, & Jacob, 1998).

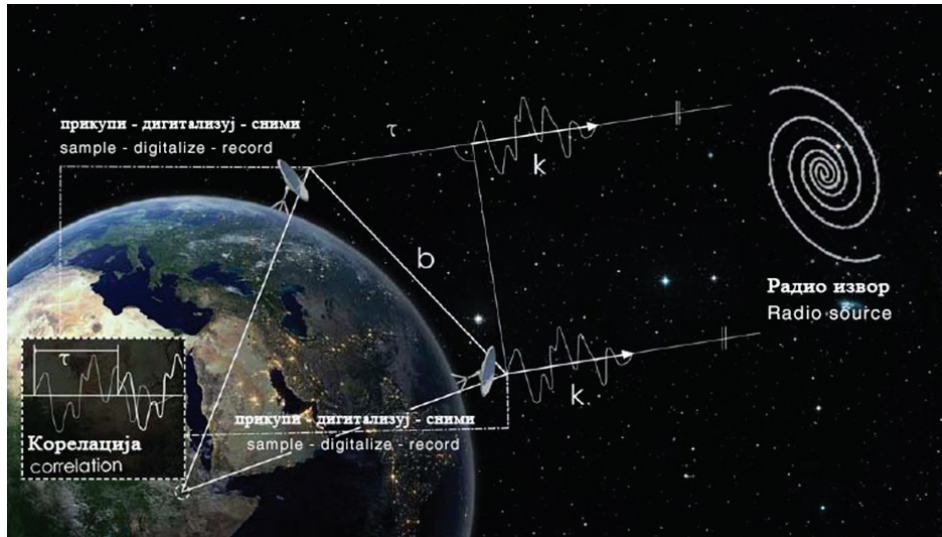
Geodetic VLBI is an advanced technique of satellite geodesy, with which the distance between the antennas placed on the surface of the Earth is determined with an accuracy of a few millimeters, by measuring the time difference of arrival of a radio waves which are emitted by quasars distant up to several billion light-years ("What is VLBI," 2017). The basic working principle of the VLBI technique is shown in Fig. 2.

For geodetic measurement of continental plates movement, on each antenna (Fig. 3) data from distant quasars have been received and marked with a very accurate determination of the time, using the hydrogen maser atomic clock whose error is 1 second every million years.

During the VLBI measurements, at the same time, a radio-signal from a distant cosmic source is received on two antennas. Due to the different position of receiving antennas, signal reception at one station will be delayed relative to the other. The time delay can be determined by cross-correlation of two signals. By observing more radio-sources and measuring the time delay, source positions, baseline

кашњења, могу се одредити положаји извора, вектор базне линије између антена и Земљини оријентациони параметри, као што су UT1 и компоненте кретања полова (Molinder, 1978).

vector between antennas and Earth's orientation parameters, such as UT1 and components of poles' movement, can be determined (Molinder, 1978).



Сл. 2. Основни принцип рада VLBI технике (Borisov, Govedarica, & Orihan, 2015)

Fig. 2. The basic working principle of the VLBI technique (Borisov, Govedarica, & Orihan, 2015)

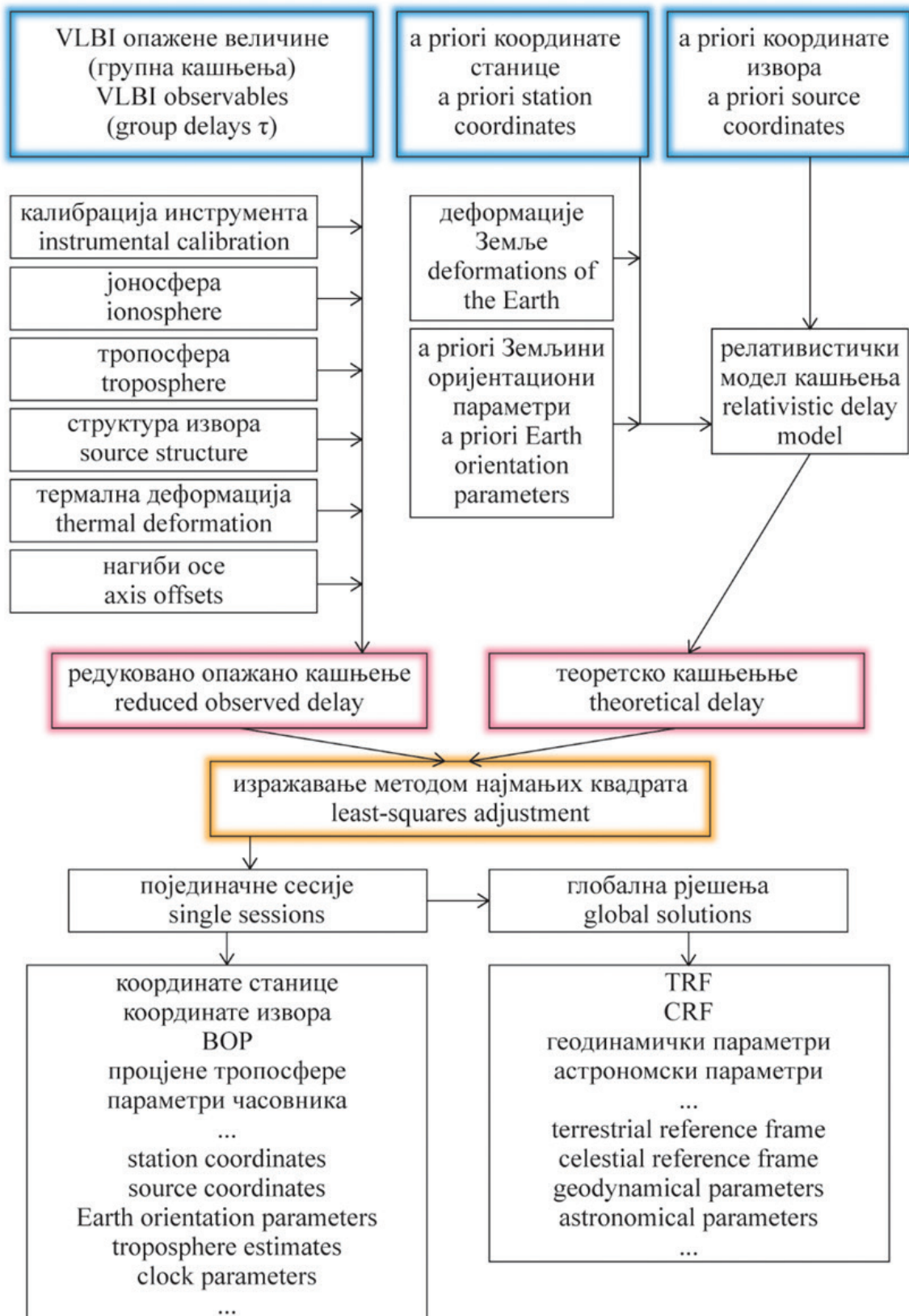


Сл. 3. Радио-телескоп пречника 100 m у близини Ефелсберга у Њемачкој (Sušić, 2014)

Fig. 3. Radio-telescope with a 100 m diameter near Effelsberg in Germany (Sušić, 2014)

Графички приказ фаза у поступку VLBI анализе, почев од опажаних величина до коначних појединачних и глобалних рјешења, приказан је на Сл. 4.

The graphical representation of the phases in the VLBI analysis, starting from the observed values to the final individual and global solutions, is shown in Fig. 4.



Сл. 4. Дијаграм VLBI анализе (Mayer & Scharner, 2017)
 Fig. 4. The VLBI analysis diagram (Mayer & Scharner, 2017)

Кашњење опажања може се одредити примјеном слједећег израза (Brouwer, 1985):

$$\tau = t_b - t_a, \quad (1)$$

гдје је t_a вријеме пристизања радио-таласа на антену a , а t_b вријеме пристизања радио-таласа на антену b (Сл. 5).

Кашњење сигнала τ најједноставније може се описати као негативан количник производа вектора базне линије B и јединичног вектора у смјеру радио-извора U , и брзине свјетлости $c = 299.792458$ km/s (Brouwer, 1985):

$$\tau = -\frac{\vec{B} \cdot \vec{U}}{c}. \quad (2)$$

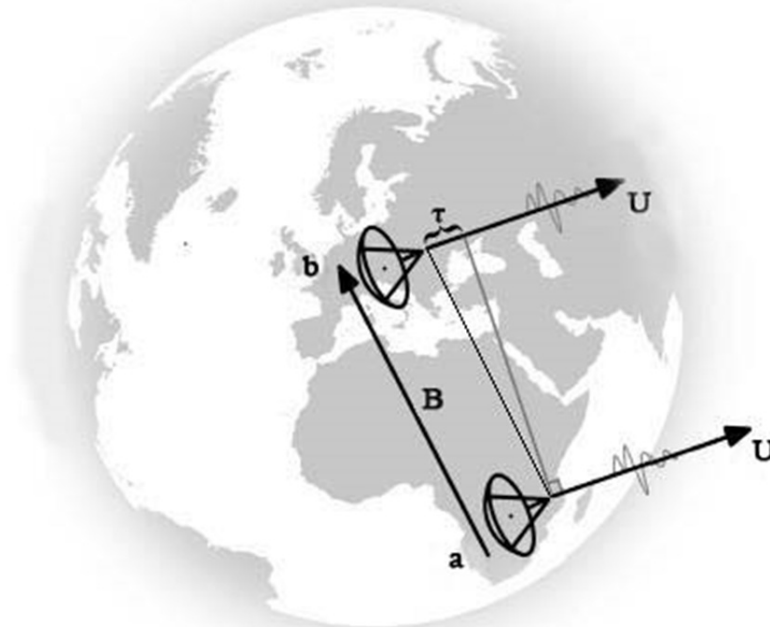
Observation delay can be determined using the following expression (Brouwer, 1985):

$$\tau = t_b - t_a, \quad (1)$$

where t_a is the time of arrival of the radio-wave on the antenna a , and t_b is the time of arrival of the radio-wave on the antenna b (Fig. 5).

The signal delay τ can be described as negative ratio of the product of the base line vector B and the unit vector in the direction of the radio-source U , and the velocity of light $c = 299.792458$ km/s (Brouwer, 1985):

$$\tau = -\frac{\vec{B} \cdot \vec{U}}{c}. \quad (2)$$



Сл. 5. Основни VLBI троугао (Mayer, Böhm, Combrinck, Botai, & Böhm, 2014)
 Fig. 5. The basic VLBI triangle (Mayer, Böhm, Combrinck, Botai, & Böhm, 2014)

Негативан предзнак слиједи из чињенице да је τ дефинисано као позитивна величина ако сигнал пристигне касније на станици b у односу на станицу a (Brouwer, 1985).

Удаљеност се потом може срачунати из геометрије, тј. директном триангулацијом. Множењем кашњења и брзине радио-таласа (брзина свјетлости c), може се одредити компонента удаљености између антена у смјеру

The negative sign follows from the fact that τ is defined as a positive value if the signal arrives later at station b in relation to the station a (Brouwer, 1985).

Distance can then be calculated from the geometry, which is a direct triangulation. Multiplying the delay and velocity of radio-waves (the velocity of light c), the distance between the antennas viewed from the direction of radio-

радио-таласа (Тодорић, Васић, & Васиљевић, 2016).

Опрема VLBI система дефинише геодетску референтну тачку у простору и времену. Сложеност VLBI система захтијева детаљну анализу његових особина (Hase, Corey, Koyama, Shaffer, Petrachenko, & Schlüter, 2005). Опрема се карактерише односом сигнал-шум који се може дефинисати изразом:

$$SNR = f \cdot V \cdot \sqrt{\frac{T_{a_1} \cdot T_{a_2}}{T_{s_1} \cdot T_{s_2}} \cdot 2\Delta\nu \cdot \tau}, \quad (3)$$

гдје је $f = 0.5$ VLBI фактор процеса за једнобитно прикупљање, $V=1$ је нормализована видљивост извора, T_{s_1} је температура антене, T_{s_2} је температура система, $2\Delta\nu$ је Никвистова стопа прикупљања, а τ је временски интервал интеграције.

Захтјеви тачности за генератор фреквенције и атомски часовник могу бити оцијењени из опште VLBI једначине, која се проширује параметрима часовника, временским кашњењем и фреквенцијом (Hase et al., 2005):

$$c\tau = \frac{1}{c} \vec{s}\vec{b} + c\Delta T + c(T - T_0) \frac{\Delta f}{f} + \dots, \quad (4)$$

Затим се добија:

$$cd\tau = cd\Delta T + c(T - T_0) \frac{d\Delta f}{f}, \quad (5)$$

гдје је c брзина свјетлости, τ временско кашњење, ΔT помјерај часовника, $d\Delta T$ грешка помјераја часовника, $T - T_0$ временски интервал, $\Delta f/f$ помјерај релативне фреквенције и $d\Delta f/f$ грешка помјераја фреквенције.

Пошто је прецизност мјерења временске разлике неколико пикосекунди, VLBI одређује релативне положаје кооперишућих телескопа са прецизношћу од неколико милиметара и положаје радио-извора са прецизношћу од неколико лучних милисекунди. VLBI подаци прикупљају се најчешће током периода од 24 сата, при чему се опажања врше према

waves can be determined (Тодорић, Васић, & Васиљевић, 2016).

The instrumentation of a VLBI system is defining the geodetic reference point in space and time. The complexity of a VLBI system requests an detailed analysis of various features in the system (Hase, Corey, Koyama, Shaffer, Petrachenko, & Schlüter, 2005). The instrumentation is characterized by a signal-noise-relation that can be defined by the expression:

$$SNR = f \cdot V \cdot \sqrt{\frac{T_{a_1} \cdot T_{a_2}}{T_{s_1} \cdot T_{s_2}} \cdot 2\Delta\nu \cdot \tau}, \quad (3)$$

where $f = 0.5$ is the VLBI processing factor for one bit sampling, $V=1$ is the normalized visibility of the source, T_{s_1} is the antenna temperature, T_{s_2} is the system temperature, $2\Delta\nu$ is the Nyquist sample rate, and τ is the integration time interval.

The accuracy requirements for the clock and frequency generator can be estimated from the basic VLBI equation, with the extension due to the clock parameters, time offset and frequency (Hase et al., 2005):

$$c\tau = \frac{1}{c} \vec{s}\vec{b} + c\Delta T + c(T - T_0) \frac{\Delta f}{f} + \dots, \quad (4)$$

Then it is obtained:

$$cd\tau = cd\Delta T + c(T - T_0) \frac{d\Delta f}{f}, \quad (5)$$

where c is the velocity of light, τ is the time delay, ΔT is the clock offset, $d\Delta T$ the error of the clock offset, $T - T_0$ the elapsed time interval, $\Delta f/f$ the relative frequency offset and $d\Delta f/f$ the error of the frequency offset.

Because the precision of the time difference measurement is of a few picoseconds, VLBI determines the relative positions of cooperating telescopes with a precision of a few millimeters and the positions of radio-sources with a precision of a few milliseconds of arc. VLBI data is usually collected over a period of 24 hours at about 30 quasars in about 300 different directions

приближно 30 квазара, у око 300 различитих смјерова ("Projects VLBI," 2017).

За потребе VLBI технике најчешће се користе фреквенције између 0.5 GHz и 22 GHz што одговара таласним дужинама од 75 cm до 1.3 cm, респективно. Овај опсег припада радиоталасима (Todoric, Vasic, & Sekulovic, 2017).

Ако већи број глобално распоређених VLBI антена врши истовремена опажања више радиоизвора распоређених на небу, истовремено се могу одредити положај извора, релативни тродимензионални положај сваке антене и оријентација Земље у свемиру ("Projects VLBI," 2017).

ОСНОВЕ ТЕОРИЈЕ ПОМЈЕРАЊА КОНТИНЕНАТА

Алфред Вегенер, њемачки метеоролог и геофизичар, изнио је 1912. године своју претпоставку да су сви континенти некад били дио једног великог континента, од кога су се одвојили и помјерали до мјеста гдје су сада. Вегенерова претпоставка прво је била заснована на начину на који се континенти међусобно уклапају, и изведена из резултата упоређивања структуре стијена и композиције обалних линија. Вегенер је такође проучавао распоред фосила, локације и сличност, и поново нашао јаку повезаност ("Introduction to," 2017).

Развоју Вегенерове теорије допринос су дали и јужноафрички геолог Александер Ду Тои проучавањем геологије и биљних и животињских фосила уграђених у стијенама, те два научника са Кембрица, Друмонд Матјувс и Фредерик Вајн, британски морски геолози и геофизичари, који су своје истраживање засновали на палеомагнетизму. Коначно, током 1960-их година теорија помјерања континента је универзално прихваћена.

Према овој теорији, физичка површ Земље састоји се од низа танких, тврдих плоча које су у сталном покрету. Површ сваке плоче састављена је од океанске или континенталне коре. Плоче могу бити дебеле до 70 km ако су састављене од океанске коре или 150 km ако садрже континенталну

("Projects VLBI," 2017).

For the purposes of VLBI technique, commonly used frequencies are between 0.5 GHz and 22 GHz which corresponds to wavelengths of 75 cm to 1.3 cm, respectively. This band belongs to the radio waves (Todoric, Vasic, & Sekulovic, 2017).

By observing a number of sources arranged in the sky with more VLBI antennas distributed on the Earth's surface, which perform observations together, at the same time the position of the source, a three-dimensional position of each antenna and orientation of the Earth in space can be determined ("Projects VLBI," 2017).

BASICS OF THE THEORY OF CONTINENTAL DRIFT

Alfred Wegener, a German meteorologist and geophysicist, in 1912, presented his hypothesis that all continents once formed a part of one great continent, from which they separated and moved away to the point where they are now. First, Wegener's hypothesis was based on the way the continents fit together, comparing the structure of rocks and composition of the shorelines. Wegener also studied fossils distribution, locations and similarity and again found a strong connection ("Introduction to," 2017).

The South African geologist Alexander Du Toit, who studied geology and plant and animal fossils embedded in rocks, and two scientists from Cambridge, Drummond Matthews and Frederick John Vine, British sea geologists and geophysicists, whose research was based on palaeomagnetism, gave a significant contribution to the development of Wegener's theory. Finally, during the 1960s, the theory of continental drift was universally accepted.

According to this theory, surface of the Earth consists of a series of thin, solid plates that are in constant motion. Surface of each plate is made of oceanic or continental crust. The plates can be up to 70 km thick if made of oceanic crust or 150 km if they contain continental crust. Plates move at different velocities ("Introduction

кору. Плоче се крећу различитим брзинама ("Introduction to," 2017). Земљина тектонска, сеизмичка и вулканска активност јавља се на границама сусједних плоча. Тренутно се сматра да се плоче крећу услед струјања топлог ваздуха узрокованог хлађењем језгра и радиоактивношћу растопљене магме испод плоча. Најбољи примјер је расјед Сан Андреас у Калифорнији. Двије плоче крећу се бочно једна поред друге, при чему се не ствара нити се уништава океанска кора. VLBI мјерења указују да Пацифичка плоча клизи поред Сјеверноамеричке плоче брзином од око 5 cm годишње ("Introduction to," 2017).

ПРИМЈЕНА VLBI ЗА МЈЕРЕЊЕ ПОМЈЕРАЊА КОНТИНЕНТАЛНИХ ПЛОЧА

Одређивањем релативног тродимензионалног положаја глобално распоређених телескопа, с прецизношћу од неколико милиметара, кретања Земљиних тектонских плоча могу се директно мјерити. Двадесетогодишња историја мјерења растојања између антене Вестфорд у Масачусетсу и антене Ветцел у Њемачкој, показала је да се растојање између Сјеверне Америке и Европе повећава сталном брзином од око 17 mm годишње.

Приближно 20 радио-телескопа, постављених широм Земљине кугле, међусобно су повезани и координисани тако да створе еквивалент једне велике кохерентне антене.

Интерферометри веома тачно мјере таласне дужине свјетлости и удаљености. Они шаљу два радио-сигнала и користе интерференцију таласа да изврше мјерења. Телескопи у Вестфорду и Ветцелу удаљени су око 6,000 km. Из високо прецизних VLBI мјерења могуће је утврдити милиметарске промјене у тој удаљености.

Земљина кора састоји се од седам већих и неколико мањих тектонских плоча. Највеће плоче приказане су у Таб. 1. Све веће плоче су континенталне, осим Пацифичке плоче која је океанска. У значајне мање плоче спадају: Арабијска, Карипска, Хуан де Фука, Наска, Филипинска и Шкотска плоча (Сл. 6).

to," 2017). The Earth's tectonic, seismic and volcanic activity occurs at the borders of adjacent plates. Current theory is that the plates move due to the flow of warm air caused by the cooling of core and radioactivity of melted magma beneath the plates. The best example is the San Andreas Fault in California. Two plates move sideways next to each other whereby the oceanic crust is not being formed or damaged. VLBI measurements show that the Pacific plate slides along the North American plate at a rate of about 5 centimeters per year ("Introduction to," 2017).

VLBI APPLICATION FOR MEASUREMENT OF CONTINENTAL PLATES MOVEMENT

By determining the relative three-dimensional position of globally distributed telescopes with a precision of a few millimeters, the movement of Earth's tectonic plates can be directly measured. Twenty-year history of the distance between Westford, antenna in Massachusetts, and Wettzell, antenna in Germany, showed that the distance between North America and Europe is increasing with steady rate of about 17 millimeters per year.

Approximately 20 radio-telescopes located throughout the Earth's globe, are interconnected and coordinated to create the equivalent of one large coherent antenna.

Interferometers very accurately measure the wavelengths of light and distances. They send two radio-signals and use the wave interference to execute the measurements. Two telescopes in Westford and Wettzell are distant around 6,000 km. From high precision VLBI measurements, it is possible to see a millimeter difference in that distance.

The Earth's crust consists of seven major and several minor tectonic plates. The largest plates are shown in Tab. 1. All major plates are continental, except for the Pacific plate which is oceanic. Some significant minor plates are: Arabian plate, Caribbean plate, Juan de Fuka plate, Naska plate, Philippines plate and Scotland plate (Fig. 6).

Таб. 1. Највеће тектонске плоче (Станковић, 2011.)
 Tab. 1. The biggest tectonic plates (Станковић, 2011)

Назив плоче / The name of the plate	Површина (10^6km^2)/ Area (10^6km^2)	Континент / Continent
Тихоокеанска (Пацифичка) плоча / The Pacific plate	103.3	Тихи океан / The Pacific
Сјеверноамеричка плоча / The North American plate	75.9	Сјеверна Америка и сјевероисточни Сибир / North America and northeastern Sibir
Евроазијска плоча / The Eurasian plate	67.8	Европа и Азија / Europe and Asia
Афричка плоча / The African plate	61.3	Африка / Africa
Антарктичка плоча / The Antarctic plate	60.9	Антарктик / Antarctic
Индо-аустралијска плоча / The Indo-Australian plate	47.2	Аустралија и Индија / Australia and India
Јужноамеричка плоча / The South American plate	43.6	Јужна Америка / South America



Сл. 6. Тектонске плоче на Земљиној површи (Сушић, 2014)
 Fig. 6. Tectonic plates on the Earth surface (Сушић, 2014)

Индиректни докази различитих врста показују да се ове плоче крећу једна у односу на другу брзинама од неколико центиметара годишње (засновано на дугорочним рачунањима просјечних вриједности података праћења). У посљедњих неколико деценија, геолози су дошли до закључка да Земљина кора није чврста и несавитљива, и да се спољашње карактеристике Земље мијењају усљед интеракција између ових плоча (Morabito, Claflin, & Steinberg, 1980).

ПРАКТИЧНА РАЧУНАЊА

На основу података преузетих са интернет странице Међународне VLBI службе за геодезију и астрометрију – <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/index.html>, извршена је анализа промјене координата неколико VLBI станица за период од десет година, од 2004. до 2014. године.

Разматране станице су:

- радио-телескоп пречника 20 m у Ветцелу у Њемачкој (*Wettzell*) (Сл. 7),
- радио-телескоп пречника 20 m у Новом Алесунду, на острву Спитсберген у Норвешкој (*Ny-Alesund*),
- радио-телескоп пречника 32 m у Светлоу у Русији (*Svetloe*),
- радио-телескоп пречника 32 m у Бадарију у Русији (*Badary*),
- радио-телескоп пречника 32 m у Зеленчукскаји у Русији (*Zelenchukskaya*),
- радио-телескоп пречника 14.2 m смјештен око 30 km источно од Форталезе у Бразилу (*Fortaleza*),
- радио-телескоп пречника 6 m у Концепсиону у Чилеу (*TIGO Concepcion*), и
- радио-телескоп пречника 26 m у Хобарту у Аустралији (*Hobart*).

Indirect evidences of different types show that these plates move relative to one another at a rate of a few centimeters per year (based on long-term calculations of average values of monitoring data). In the last few decades, geologists have come to the conclusion that the Earth's crust is not firm and rigid, and that the external characteristics of the Earth change as a result of interactions between these plates (Morabito, Claflin, & Steinberg, 1980).

PRACTICAL CALCULATIONS

Based on the data taken from the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry website – <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/index.html>, an analysis of the change of coordinates on some of the VLBI stations for the past ten years, more precisely in the period from 2004 to 2014 has been executed.

Stations that were discussed are:

- radio-telescope with 20 m diameter in Wettzell in Germany (*Wettzell*) (Fig. 7),
- radio-telescope with 20 m diameter in the New Ålesund, on the island Spitsbergen in Norway (*Ny-Alesund*),
- radio-telescope with 32 m diameter in Svetloe in Russia (*Svetloe*),
- radio-telescope with 32 m diameter in Badary in Russia (*Badary*),
- radio-telescope with 32 m diameter in Zelenchukskaya in Russia (*Zelenchukskaya*),
- radio-telescope with 14.2 m diameter located about 30 km east of Fortaleza in Brazil (*Fortaleza*),
- radio-telescope with 6 m diameter in Concepcion in Chile (*TIGO Concepcion*), and
- radio-telescope with 26 m diameter in Hobart in Australia (*Hobart*).



Сл. 7. Радио-телескопи пречника 20 m у геодетској опсерваторији у Ветцелу у Њемачкој (Schuh & Behrend, 2012)

Fig. 7. Radio-telescopes with 20 m diameters in geodetic observatory in Wettzell in Germany (Schuh & Behrend, 2012)

У склопу обраде података, прво су Декартове геоцентричне координате (X, Y, Z) у Међународном терестричком референтном систему (ITRS) трансформисане у геодетске координате (геодетска ширина B и геодетска дужина L) референтног елипсоида GRS 1980, према изразима Врачарић и Алексић (2007):

$$L = \arctg \frac{Y}{X}, \quad (6)$$

$$B = \arctg \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \left(1 - \frac{Ne^2}{N+h} \right)^{-1} \right), \quad (7)$$

гдје је N полупречник кривине елипсоида по првом вертикалу, e први нумерички ексцентрицитет, а h елипсоидна висина (Mihailović & Aleksić, 2008).

Пошто полупречник кривине N зависи од геодетске ширине B , израз (9), примјењује се итеративни поступак за рачунање ширине, заснован на довољно добром приближењу. Како је елипсоидна висина h много мања од полупречника кривине N , може се узети да је $h=0$. Сада израз (7) има облик:

As part of data processing, first the transformation of coordinates from Cartesian geocentric coordinates (X, Y, Z) in International Terrestrial Reference System (ITRS) to geodetic coordinates (latitude B and longitude L) of reference ellipsoid GRS 1980 was obtained, according to following expressions Врачарић and Алексић (2007):

$$L = \arctg \frac{Y}{X}, \quad (6)$$

$$B = \arctg \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \left(1 - \frac{Ne^2}{N+h} \right)^{-1} \right), \quad (7)$$

where N is the radius of the ellipsoid curvature along the first vertical, e is the first numerical eccentricity, and h is the ellipsoid height (Mihailović & Aleksić, 2008).

Since the radius of curvature N depends on the geodetic width B , the expression (9), iterative method for calculating the width is applied, based on a sufficiently good approximation. Since the ellipsoid height h is much smaller than the radius of curvature N , it can be taken that $h=0$. Now the expression (7) has the form:

$$B = \arctg \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot (1 - e^2)^{-1} \right), \quad (8)$$

те се B може израчунати. Геодетска ширина одређена из (8) означава се са B_0 јер представља ширину из нулте апроксимације. Сљедећи корак је да се B_0 уврсти у изразе:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (9)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N, \quad (10)$$

како би се срачунали N и h , тј. N_0 и h_0 . Потом се ове вриједности N_0 и h_0 уврштавају у израз (7) како би се добила ширина B_i . Поступак се наставља тако што се на основу B_i рачунају N_i и h_i , итд. Рачунање се прекида када је разлика између B и h из i -те итерације и B и h из $i-1$ итерације мања од неке претходно утврђене вриједности (Mihailović & Aleksić, 2008).

Потом су на основу геодетских израчунате правоугле UTM (Universal Transverse Mercator) координате (x, y) (Snyder, 1987):

$$x = \frac{1}{2} Rk_0 \ln \left[(1 + B)(1 - B) \right], \quad (11)$$

или:

$$x = Rk_0 \arctgh B,$$

$$y = Rk_0 \left[\arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos(\lambda - \lambda_0)} \right] - \varphi_0 \right], \quad (12)$$

$$k = k_0 / (1 - B^2)^{1/2},$$

гдје је:

$$B = \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0), \quad (13)$$

k_0 је фактор размјере дуж централног меридијана λ_0 .

Добијене координатне разлике у датом периоду представљене су графички у виду графикона и вектора на Сл. 8 и нумерички у Таб. 2. Годишња помјерања између појединих континенталних плоча су реда величине центиметра.

Помјерање појединих станица добијено

$$B = \arctg \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot (1 - e^2)^{-1} \right), \quad (8)$$

and B can be calculated. The geodetic width determined from (8) is denoted by B_0 because it represents the width from the zero approximation. The next step is to put B_0 in the following expressions:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (9)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N, \quad (10)$$

in order to calculate N and h , i.e. N_0 and h_0 . Then, these values of N_0 and h_0 are included in the expression (7) in order to obtain the width B_i . The procedure proceeds by calculating N_i and h_i based on B_i , etc. Calculation is interrupted when the difference between B and h from the i -th iteration, and B and h from the $i-1$ iteration is less than some previously determined value (Mihailović & Aleksić, 2008).

Then, from geodetic coordinates, the rectangular UTM (Universal Transverse Mercator) coordinates (x, y) are calculated (Snyder, 1987):

$$x = \frac{1}{2} Rk_0 \ln \left[(1 + B)(1 - B) \right], \quad (11)$$

or:

$$x = Rk_0 \arctgh B,$$

$$y = Rk_0 \left[\arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos(\lambda - \lambda_0)} \right] - \varphi_0 \right], \quad (12)$$

$$k = k_0 / (1 - B^2)^{1/2},$$

where is:

$$B = \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0), \quad (13)$$

k_0 is the factor of scale along the central meridian λ_0 .

The coordinate differences obtained in the given period are presented graphically by graph and vectors in Fig. 8 and numerically in Tab. 2. Annual movements between individual continental plates are of the order of a centimeter.

Movement of individual stations was obtained from the coordinate differences Δx

је из разлика координата Δx и Δy у појединим епохама, према изразу за дужину:

$$d = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2}. \quad (14)$$

Азимути вектора на Сл. 8 срачунати су коришћењем израза:

$$\theta = \arctg \frac{\Delta x}{\Delta y}.$$

and Δy in individual epochs, according to the expression for the length:

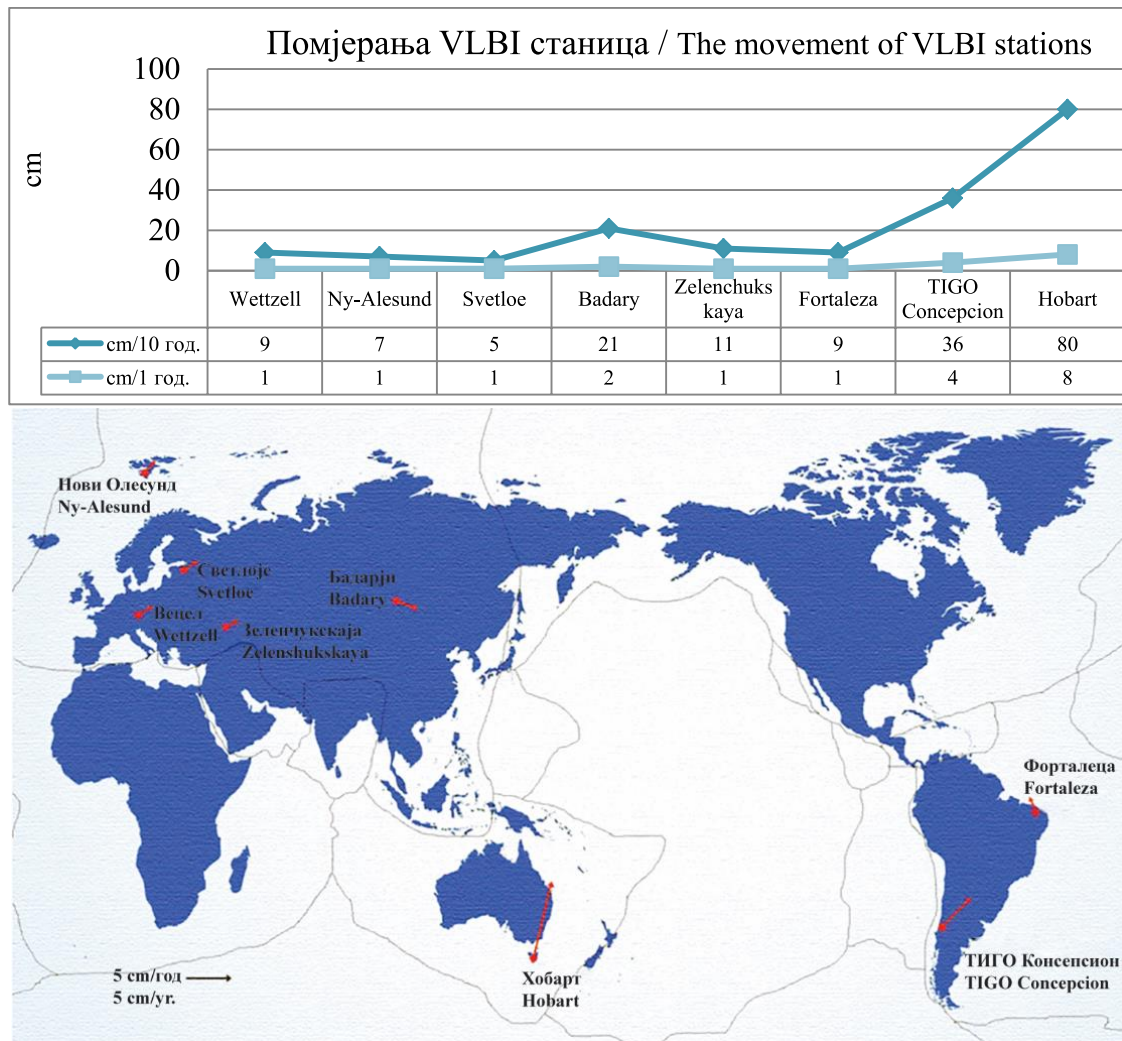
$$d = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2}. \quad (14)$$

The azimuths of the vector in Fig. 8 are calculated using the expression:

$$\theta = \arctg \frac{\Delta x}{\Delta y}.$$

Таб. 2. Помјераји VLBI станица на годишњем нивоу и у периоду од 2004. до 2014. године
Tab. 2. Movement of VLBI stations annually and in the period from 2004 to 2014

Назив VLBI станице / The name of VLBI station	Континент на којем се станица налази / Continent on which the station is located	Помјерај (у cm) за период од 10 година / Movement (in cm) for the period of 10 years	Помјерај (у cm) за период од 1 године / Movement (in cm) for the period of 1 year
Wetzell	Европа / Europe	9	1
Ny-Alesund	Европа / Europe	7	1
Svetloe	Европа / Europe	5	1
Badary	Азија / Asia	21	2
Zelenchukskaya	Европа / Europe	11	1
Fortaleza	Јужна Америка / South America	9	1
TIGO Concerpcion	Јужна Америка / South America	36	4
Hobart	Аустралија / Australia	80	8



Сл. 8. Графички (горе) и векторски приказ (доле) помјерања континенталних плоча на годишњем нивоу

Fig. 8. Graphic (upper) and vector display (down) of annual movement of continental plates

ЗАКЉУЧАК

CONCLUSION

Главни доприноси научних истраживања на основу опажања изведених VLBI техником обухватају:

- једнозначне параметре оријентације Земље за повезивање терестричког и небеског референтног оквира,
- обезбјеђивање стабилне размјере глобалног терестричког референтног оквира, и
- обезбјеђивање најпрецизнијих мјерења дуго-таласне дужине деформације Земље, чиме се обезбјеђује стабилност глобалног оквира и даје увид у ограничења која долазе од геодинамичких процеса као

The main contributions of scientific research based on observations of VLBI techniques include:

- unambiguous Earth orientation parameters for connecting the terrestrial and the celestial reference frame,
- providing the stable scale of the global terrestrial reference frame, and
- providing the most accurate measurements of the long-wavelength deformation of the Earth, which ensures the stability of the global frame and provides insight into the limitations arising from geodynamic

што су тектоника плоча и постгледерска издизања.

На основу анализе промјена координата VLBI станица за период од 10 година, према подацима Међународне VLBI службе за геодезију и астрометрију, утврђено је да помјерања станица на годишњем нивоу износе неколико центиметара.

Евроазијска континентална плоча помјера се од запада ка истоку просјечном брзином од 1.2 cm годишње. Помјерање Јужноамеричке плоче усмјерено је према сјевероистоку, а просјечна брзина помјерања је 2.5 cm годишње. Индо-аустралијска плоча помјера се ка сјеверу просјечном брзином од 8.0 cm годишње. Због недостатка података на интернет страници Међународне VLBI службе за геодезију и астрометрију, није разматрано помјерање Тихоокеанске, Сјеверноамеричке, Афричке и Антарктичке плоче.

VLBI представља изврстан алат за мјерење геодинамичких појава, јер обезбјеђује високу тачност мјерења и дуге временске серије опажања и прикупљања података. Мјерење помјерања континенталних плоча ће унаприједити теорију помјерања континента, а мјерење деформација ће дати значајне информације о структури плоча. На тај начин ће се формирати представа о глобалним и локалним помјерањима у функцији времена.

Даљи развој VLBI технике требало би да омогући повећање тачности мјерења, а може се спровести кроз побољшање опреме, опажачких стратегија, рефракционих модела и аналитичких метода, што укључује геодетско праћење референтних тачака радио-телескопа, као и примјену поправака за атмосферски утицај и за термалне деформације телескопа. За будуће потребе и примјене ове технике, тежи се проширењу и погушћавању свјетске мреже VLBI станица.

processes such as plate tectonics and postglacier elevations.

Based on the analysis of changes in the coordinates of VLBI stations for a period of 10 years, according to International VLBI Service for Geodesy and Astrometry data, it can be concluded that the annual station movements are of an order of a few centimeters.

The Eurasian continental plate is moving from west to east at an average velocity of 1.2 cm per year. Movement of the South American plate is oriented to the northeast, and the average velocity of displacement is 2.5 cm per year. The Indo-Australian plate is moving towards the north at an average velocity of 8 cm per year. Due to lack of data on website of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, movement of the Pacific, North American, African and Antarctic plates is not considered.

VLBI is an excellent tool for measuring geodynamic phenomena because it provides high accuracy of measurements and long time series of observations and data collection. Measurement of continental plates movement will develop the continents movement theory, and deformation measurement will provide important information about the structure of the plates. In this way it will be possible to know what global and local movements occur over time.

With further development of VLBI technique, the aim is to increase the level of accuracy of measurement, by improving the equipment, observation strategies, refractive models and analytical methods, including the geodetic monitoring of reference points of radio-telescopes, as well as the application of corrections for the atmospheric effect and the thermal deformation of the telescopes. For future needs and applications of this technique, the aim is to expand and to increase the density of the world net of VLBI stations.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Borisov, M., Govedarica, M., & Orihan, M. (2015). Rotacija Zemlje i određivanje parametara Zemljine rotacije. *Geodetski glasnik*, 46, 75–90.
- Brouwer, F. J. J. (1985). *On the Principles, Assumptions and Methods of Geodetic Very Long Baseline Interferometry*. Delft, the Netherlands: Netherlands Geodetic Commission.
- Campbell, J. (2004). VLBI for Geodesy and Geodynamics. In F. Mantovani & A. Kus (Eds.), *The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy* (pp. 359–381). Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Hase, H., Corey, B., Koyama, Y., Shaffer, D., Petrachenko, B., & Schlüter, W. (2005). Preliminary Results of the VLBI2010 subgroup „RF/IF, frequency and time”. Retrieved from https://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/wg/wg3/2_rf_if_freq_time.pdf
- Introduction to Plate Tectonic Theory, Geodesy and VLBI. (2017, August). Retrieved from: <http://www.haystack.mit.edu/index.html>
- Mayer, D., Böhm, J., Combrinck, L., Botai, J., & Böhm, S. (2014). Importance of the Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory for the VLBI network. *Journal of Geodesy*, 88(5), 449–461.
- Mayer, D., & Schartner, M. (2017). *Introduction to Geodetic VLBI*. Vienna, Austria: Technische Universität Wien, Department for Geodesy and Geoinformation. Retrieved from http://avntraining.hartrao.ac.za/images/Schools/2017March/introduction_to_geodetic_vlbi.pdf
- Mihailović, K., & Aleksić, I. (2008). *Koncepti mreža u geodetskom premeru*. Beograd, Srbija: Privredno društvo za kartografiju Geokarta d.o.o. Beograd.
- Molinder, J. I. (1978). *A Tutorial Introduction to Very Long Baseline Interferometry (VLBI) Using Bandwidth Synthesis* (The Deep Space Network Progress Report 42–46). Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory.
- Morabito, D. D., Claflin, E. S., & Steinberg, C. J. (1980). *VLBI Detection of Crustal Plate Motion Using DSN Antennas as Base Stations* (The Deep Space Network Progress Report, DSN PR 42–56). Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Plank, L. (2013). *VLBI Satellite Tracking for the Realization of Frame Ties* (Doctoral Dissertation). Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Wien.
- Projects VLBI. (2017, August). Retrieved from: <http://www.cpi.com/projects/vlbi.html>,
- Schuh, H., & Behrend, D. (2012). VLBI: A Fascinating Technique for Geodesy and Astrometry. *Journal of Geodynamics*, 61, 68–80.
- Snyder, J. (1987). *Map Projections – A Working Manual* (U.S. Geological Survey Professional Paper 1395, Supersedes USGS Bulletin 1532). Washington, DC: United States Government Printing Office.
- Sovers, O. J., Fanselow, L. J., & Jacob, S. C. (1998). Astrometry and Geodesy with Radio Interferometry: Experiments, Models, Results. *Reviews of Modern Physics*, 70(4), 1393–1454. doi:10.1103/RevModPhys.70.1393
- Станковић, Ч. (2011, април 14). Тектонске плоче. Преузето са: <http://www.astronomija.co.rs/nauka/geologija/4204-tektonske-ploe.html>
- Sušić, Z. (2014). Geodinamička analiza pomeranja Zemljine kore regionalnog karaktera (Doktorska disertacija). Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

- Шпољарић, Д. (2017, јануар 17). Астрономска мјерења у геодезији. Преузето са: <http://www.astronomija.co.rs/nauka/geologija/4204-tektonske-ploe.html>
- Todorić, G., Vasić, D., & Sekulović, D. (2017). Tehnika VLBI – Osnove, status i ciljevi. U G. Ćirković (Ur.), *Zbornik radova XLIV Simpozijuma o operacionim istraživanjima Sym-Op-Is 2017* (str. 122–127). Beograd, Srbija: Visoka građevinsko-geodetska škola.
- Тодорић, Г., Васић, Д., & Васиљевић, С. (2016). Примјена VLBI технике при рачунању помјерања континенталних плоча. У Б. Антуновић (Ур.), *Зборник радова XII Међународне научно-стручне конференције „Савремена теорија и пракса у градитељству“* (стр. 389–396). Бања Лука, Босна и Херцеговина: Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањој Луци.
- Врачарић, К., & Алексић, И. (2007). *Практична геодезија*. Београд, Србија: Савез геодета Србије.
- What is VLBI. (2017, August). Retrieved from: <http://www.spacegeodesy.go.jp/vlbi/en/index.html>