

Dr. sc. Serđo Kos / *Ph.D.*  
Dr. sc. Renato Filjar / *Ph.D.*  
David Brčić, dipl. ing. / *B.Sc.*  
Sveučilište u Rijeci / *University of Rijeka*  
Pomorski fakultet u Rijeci /  
*Faculty of Maritime Studies Rijeka*  
Studentska 2  
51 000 Rijeka  
Hrvatska/Croatia

Izvorni znanstveni rad  
*Original scientific paper*

UDK / UDC: 629.056.84(497.5)

Primljeno / *Received:*  
29. ožujka 2012. / *29<sup>th</sup> March 2012*

Odobreno / *Accepted:*  
13. svibnja 2012. / *13<sup>th</sup> May 2012*

## DEGRADACIJA KVALITETE GPS SATELITSKOG ODREĐIVANJA POLOŽAJA USLIJED PREKIDA RADA SATELITA: ANALIZA SLUČAJA GPS PRN24 U HRVATSKOJ

### *GPS PERFORMANCE DEGRADATION CAUSED BY SINGLE SATELLITE OUTAGE: A GPS PRN24 CROATIA CASE STUDY*

#### SAŽETAK

Prekidi rada pojedinačnih satelita općenito imaju veliki utjecaj na kvalitetu određivanja položaja satelitskim sustavima. Privremeni prekid GPS satelita PRN24 predviđen za 12. rujna 2009. godine postao je motivom pokretanja analize utjecaja na sveukupnu dostupnost i kvalitetu određivanja položaja sustavom GPS. Temeľjena na simulaciji, analiza je usmjerena ka definiranju i utvrđivanju degradacije kvalitete GPS satelitskog određivanja položaja uslijed prekida rada satelita u Hrvatskoj, s obzirom na sve veću upotrebu satelitskih navigacijskih sustava kao sastavnog dijela nacionalne infrastrukture. Za utvrđivanje prepreka satelitskoj vidljivosti na otvorenom nebu simulirane su dvije GPS referentne lokacije u ruralnim područjima. Isto tako, za razdoblje prije i poslije planiranog prekida rada satelita definirana je vidljivost satelita i odgovarajuća prostorna degradacija točnosti (PDOP) za obje referentne lokacije. Izvršena je usporedba rezultata dobivenih simulacijom na referentnim lokacijama korištenjem emitiranog GPS almanaha s rezultatima koji se odnose na neometanu vidljivost nebeskog svoda. Analiza je pokazala kako u situacijama neometane vidljivosti nebeskog svoda privremeni prekid rada jednog GPS satelita nije prouzročio značajniju degradaciju kvalitete određivanja položaja satelitskim sustavom GPS. Međutim, zamjetan utjecaj uočen je u slučaju određivanja položaja u okruženju s prirodnim preprekama na južnom dijelu nebeskog svoda.

**Ključne riječi:** kvaliteta rada GPS sustava, prekid rada satelita, degradacija točnosti položaja (DOP), dostupnost

#### SUMMARY

Navigation satellite outage has a profound effect on the satellite navigation systems performance. A programmed temporal outage of the PRN24 satellite scheduled for 12<sup>th</sup> September 2009 motivated a simulation-based study of the satellite outage effects on the overall GPS positioning performance and signal availability. The study was focused on the identification of the GPS performance degradation due to satellite outages in Croatia due to the growing utilization of the satellite navigation systems as a component of the national infrastructure. Two GPS reference sites in rural areas were simulated for the determination of open sky view obstructions. The satellite visibility and the corresponding positioning dilution of precision (PDOP) for both sites prior and after the planned temporal outage of GPS PRN24 satellite were determined. The results obtained from simulation using broadcast GPS almanac were compared with those related to the unobstructed view of the sky. The analysis revealed no significant disruption for the unobstructed sky view, but a significant impact was identified particularly to sites with natural southward sky-view obstruction.

**Key words:** GPS performance, satellite outage, dilution of precision (DOP), availability

## 1. UVOD

Satelitski navigacijski sustavi postali su sastavni dio nacionalne infrastrukture. Operativne značajke sve većeg broja tehničkih, ekonomskih i društvenih sustava djelomično ili u potpunosti ovise o kvaliteti rada satelitskih navigacijskih sustava. Kao i ostali tehnički sustavi, satelitski navigacijski sustavi podložni su osjetljivostima i ograničenjima, što povećava rizik njihovog korištenja.

Transport, turizam i poljoprivreda, grane koje igraju značajnu ulogu u gospodarstvu Republike Hrvatske, sve više su ovisne o korištenju satelitskih navigacijskih sustava. Stoga, praćenje kvalitete rada GPS sustava i prepoznavanje degradacije kvalitete određivanja položaja javlja se kao znanstveni izazov, ali i kao pitanje očuvanja integriteta nacionalnog gospodarstva i javne sigurnosti. Brojni složeni sustavi i službe (pomorska, zračna i kopnena navigacija, operacije traganja i spašavanja, služba 112, telekomunikacije, usluge prometnih informacija, upravljanje brodskim flotama, itd.) od lokalne ili nacionalne važnosti, kao i velik broj osobnih usluga (navigacija, usluge temeljene na lokaciji, itd.) ovisni su o održivoj kvaliteti rada GPS sustava.

Dostupnost satelitskog signala i vidljivost satelita su, između ostalog, uzroci koji utječu na kvalitetu rada satelitskih sustava [6, 12]. Nedavne rasprave o održivosti GPS konstelacije od strane Sjedinjenih Američkih Država obratile su i povećale pozornost o mogućim rizicima sve brojnijih sustava u kojima je satelitska navigacija pronašla primjenu.

U radu je prikazana jedna analiza slučaja prekida rada satelita kao izvora potencijalno kritičnog poremećaja u radu sustava GPS u Republici Hrvatskoj (kontinentalna i primorska Hrvatska), temeljena na simuliranom scenariju planiranog prestanka rada GPS satelita PRN24. Posljedice ovoga prekida analizirane su iz perspektive dviju ruralnih lokacija na području Republike Hrvatske. Analizirane su opažene degradacije točnosti (DOP) određivanja položaja sustavom GPS s, odnosno bez dostupnog satelita u naselju Baška, Hrvatska (naselje s mješovitim planinsko-mediteranskim karakteristikama terena), i naselju Kalinovac, Hrvatska (kontinentalno naselje smješteno u ravničarskom području) (Slika 1). Navedene lokacije izabrane su kao karakteristični reprezentanti korištenja satelitske navigacijske tehnologije u turizmu,

## 1. INTRODUCTION

Satellite navigation systems have become components of the national infrastructure. The operational characteristics of a growing number of technical, economic and societal systems either partially or completely depend on the performance of the satellite navigation systems. Satellite navigation systems, like any other technical system, suffer from intrinsic vulnerabilities and availability limitations, which rise the level of risks caused by their utilisation.

Transport, tourism and agriculture play significant roles in the economy of the Republic of Croatia, so monitoring the GPS performance and identification of the GPS performance degradation emerge as both the scientific task and the matter of national economy and safety. Numerous complex systems and services (navigation at sea, in the air and on the roads and railways, SAR operations, 112 service, telecommunications, traffic information services, fleet management etc.) of local or national importance, as well as a plethora of personal services (personal navigation, location-based services etc.) depend on the sustainable GPS performance.

Satellite signal availability and satellite visibility are among the sources affecting satellite navigation performance [6, 12]. A recent debate on the ability of the US to maintain the GPS constellation has risen concerns on potential risks for numerous complex systems utilising satellite navigation.

The paper aims at presenting a study of the satellite outage as a source of potentially critical GPS vulnerabilities in Croatia, based on the simulated scenario of related to planned temporal cessation of the GPS satellite PRN 24 service. The PRN 24 outage effects, as seen in two different environments in Croatia, were analysed. The GPS dilution of precision (DOP) with PRN 24 available and with disabled PRN 24 service, respectively, was compared as observed in Baška, Croatia (a village in a combined mountainous and Mediterranean environment) and in Kalinovac, Croatia (a continental village set in a flat landscape) (Figure 1). The choice of simulated GPS reference sites was mainly driven by the nature of the GPS utilisation in transport, tourism and agriculture in Republic of Croatia.

transportu i poljoprivredi Republike Hrvatske. Rezultati simulacije razmotreni su sa stanovišta raznih kopnenih i pomorskih scenarija, kao i sastanovišta geometrijske degradacije točnosti. U zaključku rada prikazani su rezultati i opća procjena simulacije, kao i sažeti pregled daljnjih istraživanja, s ciljem stjecanja dubljeg uvida u moguće rizike uzrokovane ranjivošću uslijed privremenog prekida rada jednog satelita sustava GPS.

## 2. POVIJESNA PODLOGA I DOSADAŠNJA OTKRIĆA

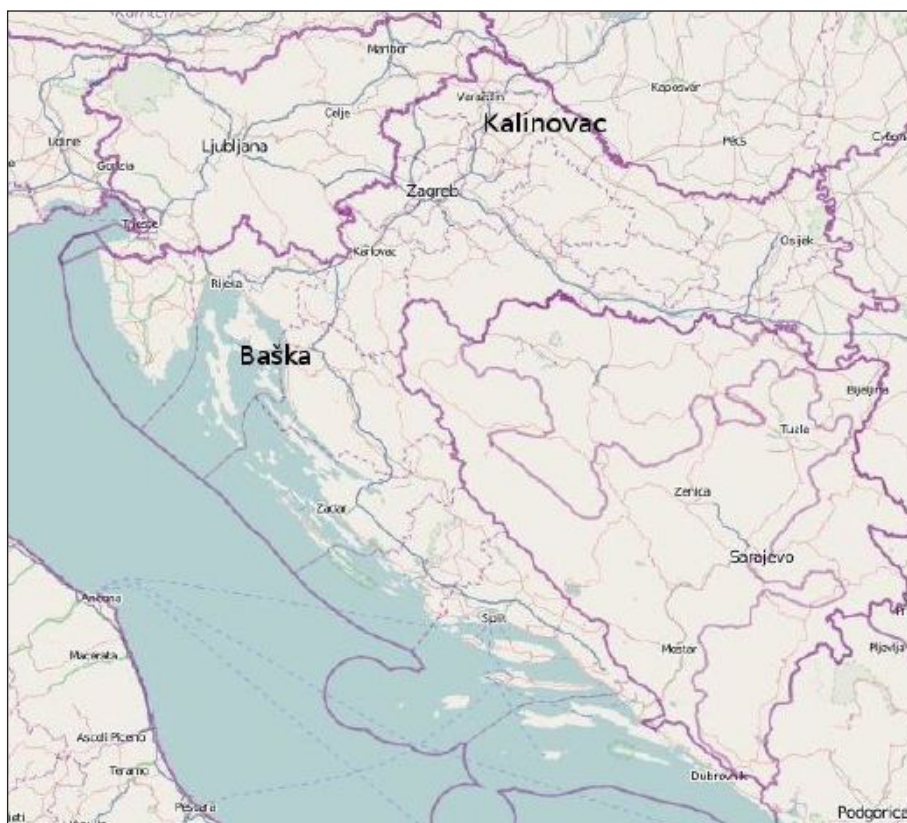
Kao sastavnica nacionalne strukture, satelitski navigacijski sustavi značajno unapređuju funkcionalnosti postojećih, te omogućavaju razvoj i upotrebu potpuno novih tehničkih, ekonomskih i socioloških sustava. Međutim, ograničenja i ranjivost satelitskih navigacijskih sustava povećavaju rizike svih sustava koji koriste satelitske navigacijske usluge.

The results of the simulation performed were discussed from the perspective of various land and maritime positioning and navigation scenarios, and from the perspective of the geometric dilution of precision (GDOP) deterioration due to satellite outage.

This paper concludes with a general assessment of the simulation results, and an outline of the near-time research activities aimed at providing a deeper insight into potential risks caused by GPS satellite outage vulnerabilities.

## 2. BACKGROUND

Being a part of the national infrastructure, satellite navigation systems considerably improve the operation of the existing and allow for the development and deployment of entirely new technical, economic and social systems. However, the limitations and vulnerabilities of satellite navigation systems add their contribution to the risk budget of all systems that utilise satellite navigation services.



**Slika 1:** Baška (Hrvatska) i Kalinovac (Hrvatska), izabrane lokacije za analizu slučaja  
*Figure 1* Baška (Croatia) and Kalinovac (Croatia) were chosen as two case-study sites

**Izvor:** OpenStreetMap [5] / **Source:** OpenStreetMap [5]

Američki GPS (engl. Global Positioning System) i ruski Glonass trenutno su jedini potpuno operativni satelitski navigacijski sustavi, uz Beidou i Galileo satelitske sustave, čija se infrastruktura postepeno gradi. Planiranje satelitskih navigacijskih sustava obavlja se korištenjem preciznih procedura u okvirima međunarodne suradnje. Integracijom pojedinačnih sustava satelitske navigacije u Globalni satelitski navigacijski sustav (GNSS) će se postići pouzdanost koju će pružati široka dostupnost satelitskog signala i zadovoljavajuća satelitska vidljivost. Unatoč tome, pojedini prekidi rada satelita i dalje predstavljaju opasan potencijalni rizik.

Rasprava o održivosti kvalitete rada GPS sustava, održana 2009. godine na najvišoj državnoj razini u Sjedinjenim Američkim Državama [13, 14, 11] potaknula je ponovnu detaljnu procjenu rizika širom svijeta.

Broj vidljivih satelita i njihova prostorna raspodjela na vidljivom dijelu neba izravno utječu na degradaciju točnosti (DOP) kao jednu od dvije komponente GPS pogreške, kako je prikazano u nastavku [6,1,2]:

$$\text{GPS pogreška točnosti} = \text{UERE} \times \text{DOP} \quad (1)$$

gdje je:

UERE ... ekvivalentna korisnička pogreška udaljenosti

DOP ... degradacija točnosti

Degradacija točnosti određuje ukupnu pogrešku određivanja položaja sustavom GPS, te njenu vremensku i prostorne komponente, kako je prikazano u tablici 1.

The American Global Positioning System (GPS) and Russian Glonass are currently the only fully operational satellite navigation systems, with Beidou and Galileo gradually building their infrastructures. Satellite navigation systems are carefully planned and, with their eventual integration into the Global Navigation Satellite System (GNSS), will provide a reliable system capable to offer good satellite signal availability and satellite visibility. Still, the satellite outages remain a potential cause of risk concerns.

A debate on the ability to sustain the GPS performance held on the highest governmental level in the US [13, 14, 11] in 2009, has added to concerns and re-initiated detailed risk assessment studies worldwide.

The number of visible satellites and their spatial distribution across the visible sky directly affect the dilution of precision (DOP), as the one of the two components of the GPS positioning error, as presented below [6, 1, 2]:

$$\text{GPS positioning error} = \text{UERE} \times \text{DOP} \quad (1)$$

where:

UERE ... User Equivalent Range Error

DOP ... Dilution of Precision

Dilution of Precision can be related to either the total GPS positioning error or its components, as presented in Table 1.

The determination of Geometric Dilution of Precision (GDOP) and its components results from the procedure for the GPS single-point

**Tablica 1:** Degradacija točnosti

*Table 1 Dilution of precision*

| Degradacija točnosti<br><i>Dilution of precision</i>   | Definira<br><i>Determines</i>   |
|--|---|
| geometrijska degradacija točnosti (GDOP)<br><i>geometric dilution of precision (GDOP)</i>                    | ukupnu GPS pogrešku položaja<br><i>total GPS positioning error</i>                            |
| prostorna degradacija točnosti (PDOP)<br><i>positioning dilution of precision (PDOP)</i>                     | prostornu (3D) GPS pogrešku položaja<br><i>spatial (3D) GPS positioning error</i>             |
| vremenska degradacija točnosti (TDOP)<br><i>time dilution of precision (TDOP)</i>                            | GPS pogrešku mjerenja vremena<br><i>GPS time-keeping error</i>                                |
| horizontalna degradacija točnosti (HDOP)<br><i>horizontal dilution of precision (HDOP)</i>                   | horizontálnu GPS pogrešku položaja<br><i>horizontal GPS positioning error</i>                 |
| sjeverna komponenta horizontalne degradacije točnosti (NDOP)<br><i>northing dilution of precision (NDOP)</i> | sjevernu komponentu horizontalne GPS pogreške<br><i>northing GPS positioning error</i>        |
| istočna komponenta horizontalne degradacije točnosti (EDOP)<br><i>easting dilution of precision (EDOP)</i>   | istočnu komponentu horizontalne GPS pogreške<br><i>easting GPS positioning error</i>          |
| vertikalna degradacija točnosti (VDOP)<br><i>vertical dilution of precision (VDOP)</i>                       | vertikalnu (visinsku) GPS pogrešku položaja<br><i>vertical (height) GPS positioning error</i> |

Određivanje geometrijske degradacije točnosti (GDOP) i njenih pripadajućih komponentata proizlazi iz postupka određivanja položaja sustavom GPS. Pod pretpostavkom da je položaj dobiven pomoću najmanje četiri satelita i pripadajućim pseudoudaljenostima, može se utvrditi skup jednadžbi (2):

$$\rho_i = \sqrt{(x_{s_i} - x_u)^2 + (y_{s_i} - y_u)^2 + (z_{s_i} - z_u)^2} + c \cdot b, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

gdje je:

$(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ ... položaj  $i$ -tog GPS satelita

$(x_u, y_u, z_u)$ ... položaj korisnika (nepoznata vrijednost)

$b$  ... pogreška korisničkog sata (nepoznata vrijednost)

$c$  ... brzina širenja radiovalova

$\rho_i$ ... pseudoudaljenost između korisnika i  $i$ -tog GPS satelita.

Nakon linearizacije (2), skup jednadžbi može biti prikazan u matičnom obliku:

$$\Delta \rho = G \cdot x \quad (3)$$

gdje je matrica  $G$  definirana kao:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{x_u - x_1}{\rho_1} & \frac{y_u - y_1}{\rho_1} & \frac{z_u - z_1}{\rho_1} & 1 \\ \frac{x_u - x_2}{\rho_2} & \frac{y_u - y_2}{\rho_2} & \frac{z_u - z_2}{\rho_2} & 1 \\ \frac{x_u - x_3}{\rho_3} & \frac{y_u - y_3}{\rho_3} & \frac{z_u - z_3}{\rho_3} & 1 \\ \frac{x_u - x_4}{\rho_4} & \frac{y_u - y_4}{\rho_4} & \frac{z_u - z_4}{\rho_4} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Matrica  $G$  je takozvana položajna matrica. Njeni elementi sadržavaju informacije o vidljivosti satelita u odnosu na azimut i elevacijske kutove, gledano iz perspektive promatrača (GPS korisnika). Elementi matrice određeni su na sljedeći način:

$$G = \begin{bmatrix} d_{xx}^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_{yy}^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_z^2 & d_{zt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Primjenom položajne matrice  $G$  moguće je definirati tzv. matricu raspršenja točnosti  $D$ , prema (6):

$$D = [G^T G]^{-1} \quad (6)$$

Pri čemu je transponirana matrica položajne matrice  $G$ .

solution determination. Assuming the positions of at least four GPS satellites and the given measured pseudoranges, a set of equations in a form (2) can be established:

$$\rho_i = \sqrt{(x_{s_i} - x_u)^2 + (y_{s_i} - y_u)^2 + (z_{s_i} - z_u)^2} + c \cdot b, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

where:

$(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ ... position of the  $i$ -th GPS satellite

$(x_u, y_u, z_u)$ ... position of the user (un-known)

$b$  ... user clock error (un-known)

$c$  ... velocity of radio wave propagation

$\rho_i$ ... pseudorange between the user and the  $i$ -th GPS satellite

After linearisation of (2), the solution of the set of equations can be represented in a matrix form as:

$$\Delta \rho = G \cdot x \quad (3)$$

where matrix  $G$  is defined as:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{x_u - x_1}{\rho_1} & \frac{y_u - y_1}{\rho_1} & \frac{z_u - z_1}{\rho_1} & 1 \\ \frac{x_u - x_2}{\rho_2} & \frac{y_u - y_2}{\rho_2} & \frac{z_u - z_2}{\rho_2} & 1 \\ \frac{x_u - x_3}{\rho_3} & \frac{y_u - y_3}{\rho_3} & \frac{z_u - z_3}{\rho_3} & 1 \\ \frac{x_u - x_4}{\rho_4} & \frac{y_u - y_4}{\rho_4} & \frac{z_u - z_4}{\rho_4} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Matrix  $G$  is the so-called positioning matrix. Its elements comprise the satellite visibility information, related to azimuth and elevation angles, as seen from the observer's (GPS user's) perspective. The elements of matrix are designated as follows:

$$G = \begin{bmatrix} d_{xx}^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_{yy}^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_z^2 & d_{zt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Applying the positioning matrix  $G$ , it is possible to yield the so-called dilution-of-precision matrix  $D$ , according to (6):

$$D = [G^T G]^{-1} \quad (6)$$

Where  $G^T$  represents the transposing matrix of the positioning matrix  $G$ .

**D** matrica obuhvaća elemente degradacije točnosti kao što je prikazano u (7):

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} NDOP & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & EDOP & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & VDOP & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & TDOP \end{bmatrix} \quad (7)$$

Horizontalna degradacija točnosti proračunava se iz (8):

$$HDOP = \sqrt{NDOP^2 + EDOP^2} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (8)$$

Prostorna degradacija točnosti proračunava se iz (9):

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (9)$$

Vertikalna (visinska) degradacija točnosti proračunava se iz (10):

$$VDOP = \sqrt{d_z^2} \quad (10)$$

Vremenska degradacija točnosti proračunava se iz (11):

$$TDOP = \sqrt{d_t^2} \quad (11)$$

Geometrijska degradacija točnosti proračunava se iz (12):

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad (12)$$

### 3. METODOLOGIJA

Planirani prekid rada GPS satelita PRN24 dogodio se 12. rujna 2009. godine. Studija, kojom se željelo procijeniti potencijalne kritične učinke ovoga događaja, temeljena je na simulaciji vidljivosti satelita *s* i *bez* dostupnosti satelita PRN24 na dvije pokusne referentne lokacije (Baška (Hrvatska) i Kalinovac (Hrvatska), Slika 1).

Ove lokacije izabrane su zbog svoje geostrateške i geoekonomske vrijednosti, kao i zbog utjecaja GPS kvalitete rada na sociološko-ekonomski razvoj (Baška je poznato turističko odredište, dok se Kalinovac nalazi u ruralnom području s poljoprivrednom proizvodnjom, proizvodnjom energenata (plin) i razvijenim šumarstvom).

Korišteni programski paketi otvorenog koda za simulaciju analize slučaja detaljno su opisani u [7, 8, 9]. Ovdje je dan opsežan metodološki opis. Kreiranje okoliša za satelitsko određiva-

**D** matrix comprises the DOP components as presented in (7):

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} NDOP & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & EDOP & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & VDOP & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & TDOP \end{bmatrix} \quad (7)$$

Horizontal dilution of precision can be calculated from (8):

$$HDOP = \sqrt{NDOP^2 + EDOP^2} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (8)$$

Position dilution of precision can be calculated from (9):

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (9)$$

Vertical dilution of precision can be calculated from (10):

$$VDOP = \sqrt{d_z^2} \quad (10)$$

Time dilution of precision can be calculated from (11):

$$TDOP = \sqrt{d_t^2} \quad (11)$$

Geometric dilution of precision can be calculated from (12):

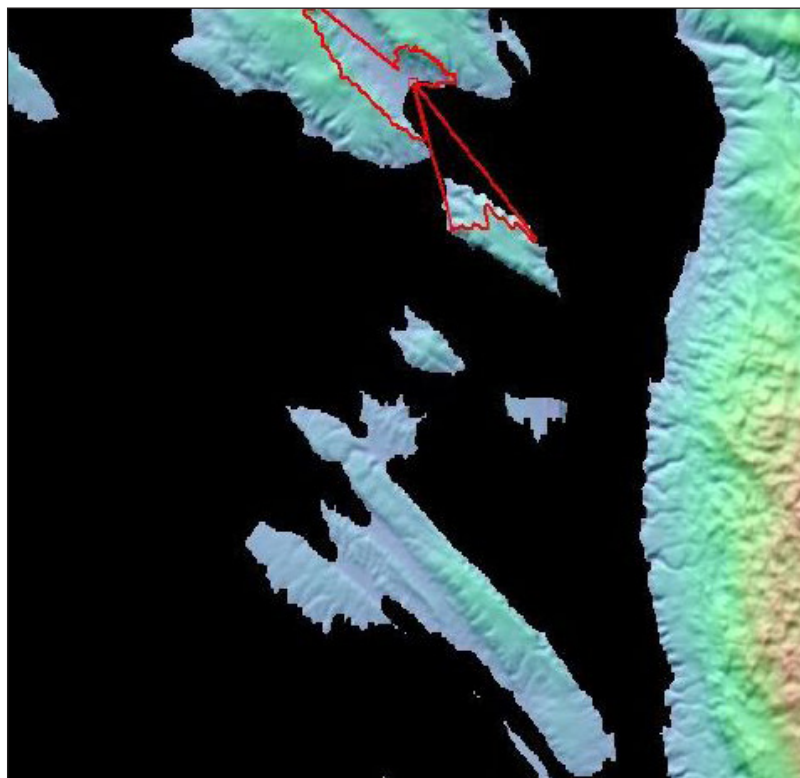
$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad (12)$$

### 3. METHODOLOGY

The planned GPS PRN24 satellite outage occurred on 5<sup>th</sup> September 2009. A study aimed to assess potentially critical effects of the GPS PRN 24 satellite outage was based on a simulation of the satellite visibility with and without the PRN 24 at the two chosen experimental sites (Baška, Croatia and Kalinovac, Croatia, Figure 1).

The experimental sites were chosen due to their geostrategic and geoeconomic values, as well as for the GPS performance impact on the socio-economic development (Baška, Croatia, is a well-known tourist resort, while Kalinovac, Croatia is located in a large rural area with agricultural and energy production and forestry).

The utilization of the open source and freely available software packages for case-study simulations is described in detail elsewhere [7, 8, 9]. A comprehensive methodology description is given here. The creation of the positioning



**Slika 2:** Baška (Hrvatska) – DEM geoprostorni okoliš  
**Figure 2** Baška (Croatia) – DEM-based geospatial environment

**Izvor:** Izradili autori korištenjem MicroDEM programskog paketa [3] i DEM podataka [4]  
**Source:** Made by the authors using MicroDEM software [3] and DEM data [4]

nja položaja potrebnog za simulaciju izvršeno je korištenjem podataka SRTM<sup>1</sup> 90-metarskog digitalnog elevacijskog modela (DEM), pripremljenog od strane CGIAR<sup>2</sup>, konzorcija za prostorne informacije i dostupnih putem interneta [4].

Korištenjem MicroDEM programskog paketa [3] izvršena je trodimenzionalna rekonstrukcija obje eksperimentalne lokacije (Slike 2 i 3), ostvarujući virtualni geoprostorni okoliš za određivanje položaja temeljen na DEM modelu (Slika 4). Linije obrisa označene crvenom bojom (Slika 4) prikazuju preglednost obzora, s parametrom vidljivosti postavljenim na 10 000 m, te parametrom kuta maskiranja GPS signala postavljenim na 10°.

Procjena vidljivosti satelita temeljena je na podacima iz emitiranog satelitskog almanaha, preuzetih s internetskih arhiva Središnjice za navigaciju obalne straže Sjedinjenih Američkih Država [15].

environment necessary for the simulation was performed by the utilization of the SRTM<sup>1</sup> 90 m Digital Elevation Model (DEM) data provided on the internet by the CGIAR<sup>2</sup> Consortium for Spatial Information [4].

Using the MicroDEM software package [3], a 3D reconstruction of both experimental sites was performed (Figures 2 and 3, respectively), providing DEM-based geospatial environments for positioning (Figure 4). The contour lines marked in red on Figure 4 depict the horizon visibility, with the horizon parameter set at the visibility of 10,000 m, and with a mask angle for the GPS signal set at 10°.

The satellite visibility estimation was based on the broadcasted satellite almanac data, collected from the internet-based archive maintained by the US Coast Guard Navigation Center [15].

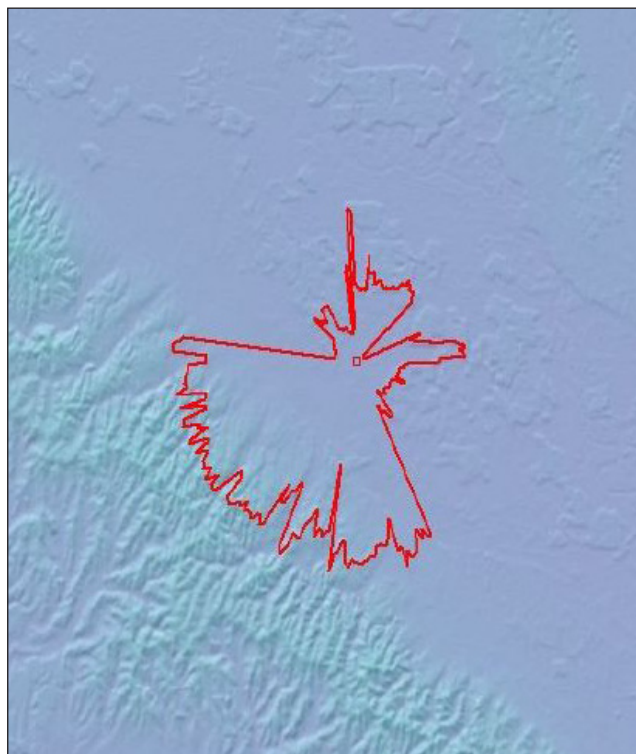
A campaign-planning commercial Mission Planning Software [10] was used for the satel-

<sup>1</sup> Shuttle Radar Topography Mission

<sup>2</sup> Consultative Group on International Agricultural Research

<sup>1</sup> Shuttle Radar Topography Mission

<sup>2</sup> Consultative Group on International Agricultural Research



**Slika 3:** Kalinovac, Hrvatska – DEM geoprostorni okoliš  
**Figure 3** Kalinovac, Croatia - DEM-based geospatial environment

**Izvor:** Izradili autori korištenjem MicroDEM programskog paketa [3] i DEM podataka [4]  
**Source:** Made by the authors using MicroDEM software [3] and DEM data [4]

Za procjenu vidljivosti satelita korišten je komercijalni programski paket MissionPlanningSoftware [10]. Kao jednu od opcija, ovaj program nudi rekonstrukciju trodimenzionalnog okoliša satelitskog određivanja položaja. Za ulazne podatke programa korištene su digitalizirane geoprostorne okoline temeljene na DEM modelu, ostvarene pomoću MicroDEM programskog paketa. Programski paket kreira dnevne grafove vidljivosti satelita, uz numeričke podatke dostupne za daljnju obradu. Simulacijom su obrađena dva temeljna scenarija: aktivan PRN24 (puna operativnost GPS satelitske komponente), neaktivan PRN24 (broj operativnih satelita umanjen za jedan). Statističkom analizom simuliranih skupova podataka dobivena je komparativna analiza geometrijske degradacije točnosti (GDOP) u oba scenarija dostupnosti satelita PRN24.

#### 4. SIMULACIJA ANALIZE SLUČAJA

Simulacija dva scenarija dostupnosti PRN24 satelita (PRN24 dostupan i PRN24 neaktivan) izvršena je za obje pokusne lokacije, s rezultati-

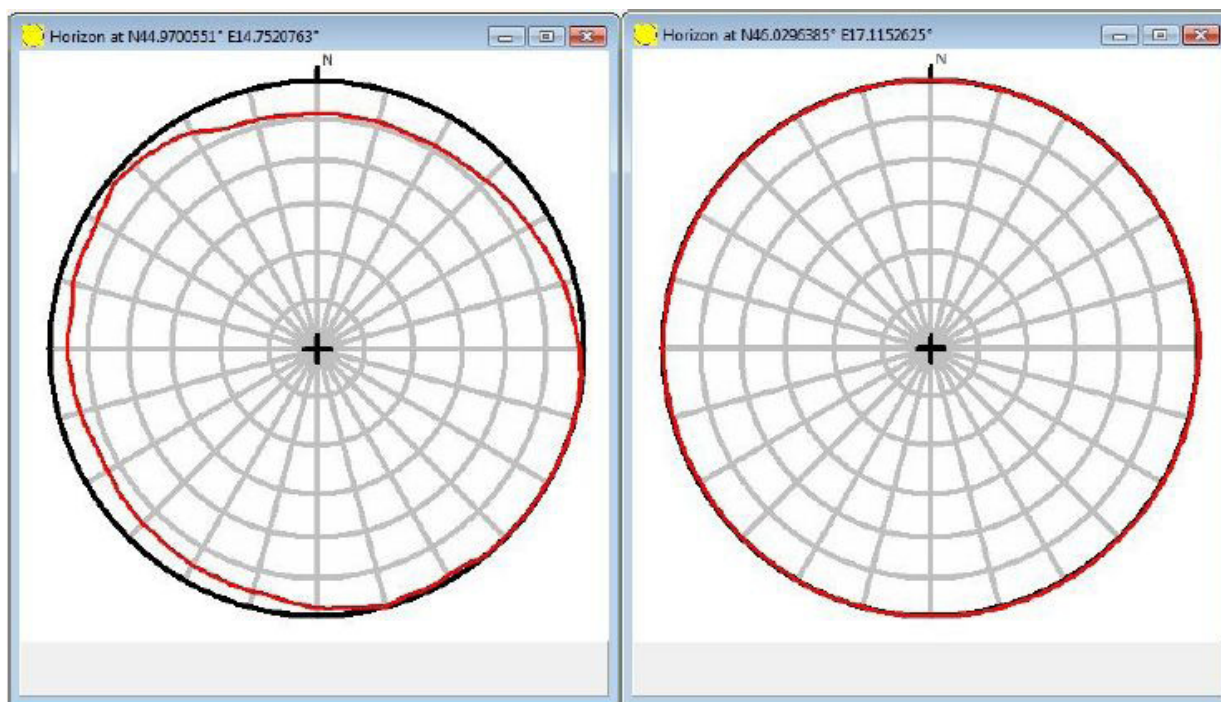
lite visibility estimation. The Mission Planning Software allows for the definition of the 3D geospatial environment positioning as an option. DEM-based geospatial environments for positioning obtained by the MicroDEM package was used as the input for the Mission Planning Software. The software package yields daily satellite visibility charts, with numerical data available for further processing. Simulations were conducted for two scenarios: PRN 24 active and PRN 24 disabled.

A statistical analysis of the simulation data sets allowed a comparative analysis of the GDOP in both PRN 24 availability scenarios.

#### 4. CASE-STUDY SIMULATIONS

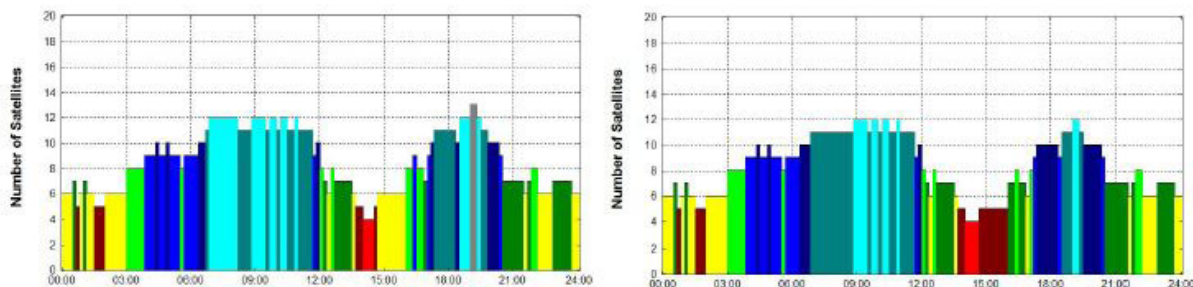
Simulations of the two PRN24 availability scenarios (PRN24 active and PRN24 disabled) were performed for both experimental sites, with the satellite availability results presented on Figures 5 and 6, for Baška and Kalinovac, respectively.





**Slika 4:** Stvarna udaljenost horizonta nasuprot azimutu (lijevo – Baška, Hrvatska, desno – Kalinovac, Hrvatska)  
**Figure 4** Actual horizon distance vs azimuth (left - Baška, Croatia, right - Kalinovac, Croatia)

**Izvor:** Izradili autori korištenjem MicroDEM programskog paketa [3] i DEM podataka [4]  
**Source:** Made by the authors using the MicroDEM software [3] and the DEM data [4]



**Slika 5:** Vidljivost satelita u Baški, Hrvatska, dan 255. u 2009. godini (lijevo – sa PRN24 satelitom; desno – bez PRN24 satelita)

**Figure 5** Satellite visibility in Baška, Croatia on 255<sup>th</sup> day in the year 2009 (left – with PRN 24; right – without PRN 24)

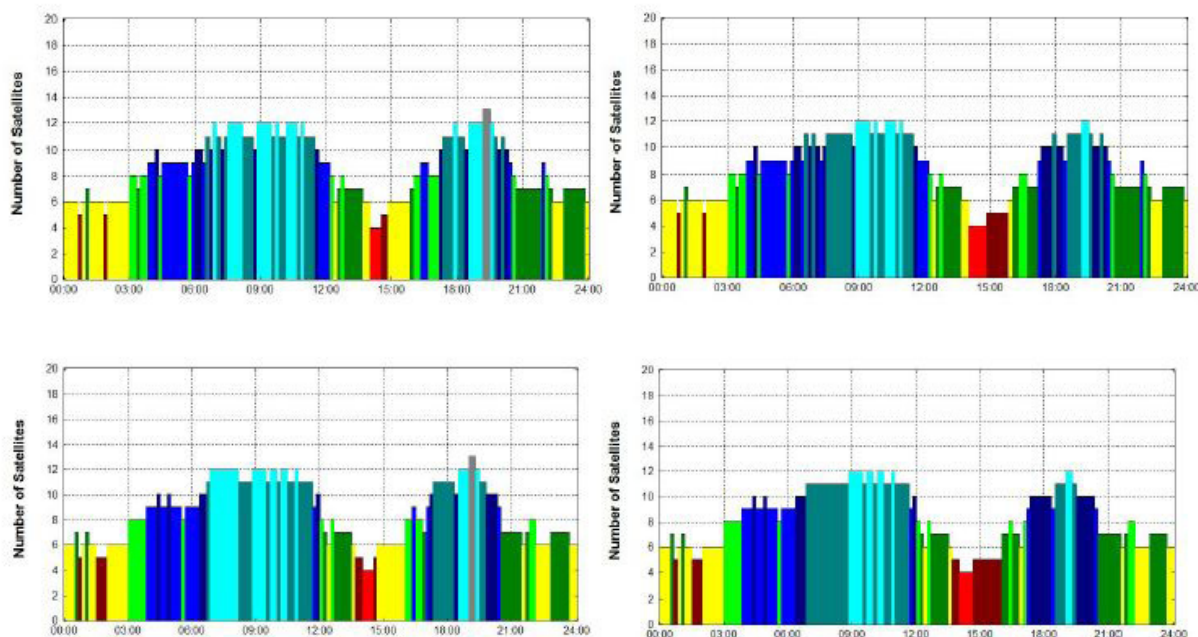
**Izvor programskog paketa:** Trimble Mission Planning Software, 2007 [10], analizu proveli autori  
**Software source:** Trimble Mission Planning Software, 2007 [10], analysis conducted by the authors

ma dostupnosti satelita prikazanim na slici 5 za Bašku, odnosno na slici 6 za Kalinovac. Simulacije pokazuju da je, u oba scenarija i na obje lokacije, bilo vidljivo preko 6 satelita. Tijekom dana, utvrđena su dva minimuma broja vidljivih satelita: prvi oko 02:00 KSV<sup>3</sup>, koji je imao manji socio-ekonomski učinak, i drugi oko 14:00 KSV, s mogućim značajnim učinkom na sustave koji koriste GPS.

<sup>3</sup> Koordinirano svjetsko vrijeme

Simulations reveal that most of the time number of visible satellites exceeds 6 for both scenarios and at both experimental sites. Two minima of the visible satellite number during the course of the day can be identified: one around 02:00 UTC<sup>3</sup>, with minor socio-economic effect, and the other around 14:00 UTC, with possible significant effects on the systems utilizing GPS.

<sup>3</sup> Universal Time Coordinated



**Slika 6:** Vidljivost satelita u Kalinovcu, Hrvatska, dan 255. u 2009. godini (lijevo – sa PRN24 satelitom; desno – bez PRN24)

**Figure 6** Satellite visibility in Kalinovac, Croatia on 255<sup>th</sup> day in the year 2009 (left – with PRN 24; right – without PRN 24)

**Izvor programskog paketa:** Trimble Mission Planning Software, 2007 [10], analizu proveli autori  
**Software source:** Trimble Mission Planning Software, 2007 [10], analysis conducted by the authors

## 5. RAZMATRANJA

Vrijednosti parametara degradacije točnosti položaja (DOP) određeni su za dan 255. u 2009. godini (12. rujna 2009), kada se dogodio planirani, privremeni prekid rada satelita PRN24. Parametri degradacije točnosti DOP izračunati su za oba scenarija (PRN24 dostupan i PRN24 neaktivan) i za obje referentne lokacije. Dnevne vrijednosti geometrijske i prostorne degradacije položaja prikazane su na slikama 7 i 8 za Bašku, odnosno Kalinovac.

Vrijednosti geometrijske degradacije točnosti položaja analizirane su kako bi se kvantitativno opisalo povećanje geometrijskog raspšenja točnosti uslijed prekida rada satelita PRN24. Ovo povećanje degradacije točnosti definirano je kroz postotnu pogrešku u odnosu na geometrijsku degradaciju točnosti s aktivnim PRN24 satelitom, kako slijedi:

$$p = \frac{GDOP_{bez\ PRN24} - GDOP_{sa\ PRN24}}{GDOP_{sa\ PRN24}} \quad (13)$$

Rezultati povećane geometrijske degradacije točnosti prikazani su na slici 9 za Bašku, odnosno na slici 10 za Kalinovac. Rezultati opisne

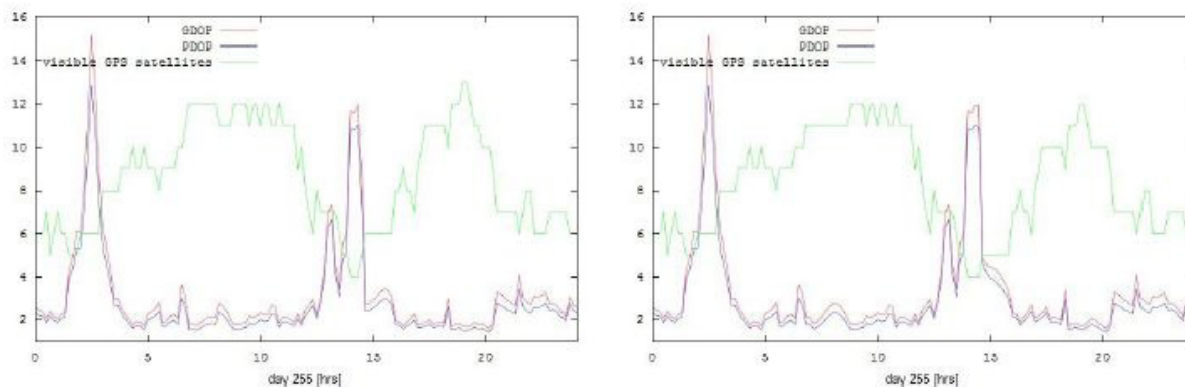
## 5. DISCUSSION

The dilution-of-precision parameters' values were determined for the 255<sup>th</sup> day in the year 2009 (12<sup>th</sup> September 2009), when the planned temporal outage of the PRN 24 occurred. The DOP parameters were calculated for both scenarios (PRN24 active and PRN 24 disabled) and for both reference sites. Daily values of the GDOP and PDOP are presented in Figures 7 and 8, for Baška, Croatia and Kalinovac, Croatia, respectively.

The GDOP values were analysed in order to quantitatively describe the GDOP deterioration due to PRN24 satellite outage. The GDOP deterioration was defined through percentage error with reference to GDOP with PRN 24 active, as follows:

$$p = \frac{GDOP_{without\ PRN24} - GDOP_{with\ PRN24}}{GDOP_{with\ PRN24}} \quad (13)$$

The GDOP deterioration results are presented in Figures 9 and 10, for Baška, Croatia and Kalinovac, Croatia, respectively. The results of the descriptive statistical analysis of the GDOP deterioration due to the satellite outage

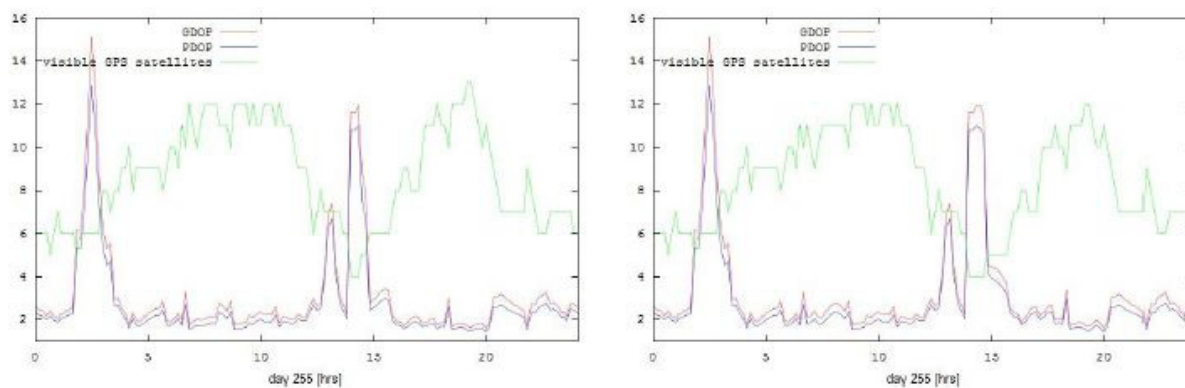


**Slika 7:** GDOP, PDOP i broj vidljivih GPS satelita opaženih u Baški, Hrvatska, dan 255. u 2009. godini (lijevo – sa PRN24 satelitom; desno – bez PRN24 satelita)

**Figure 7** GDOP, PDOP and the number of visible GPS satellites observed in Baška, Croatia, on 255<sup>th</sup> day in the year 2009 (left – with PRN 24, right – without PRN 24)

**Izvor:** Izradili autori uz korištenje programskog okruženja R

**Source:** Analysis conducted by the authors, using the R programmable environment



**Slika 8:** GDOP, PDOP i broj vidljivih GPS satelita opaženih u Kalinovcu, Hrvatska, dan 255. u 2009. godini (lijevo – sa PRN24 satelitom; desno – bez PRN24 satelita)

**Figure 8** GDOP, PDOP and the number of visible GPS satellites observed in Kalinovac, Croatia, on 255<sup>th</sup> day in theyear 2009 (left – with PRN 24, right – without PRN 24)

**Izvor:** Izradili autori uz korištenje programskog okruženja R

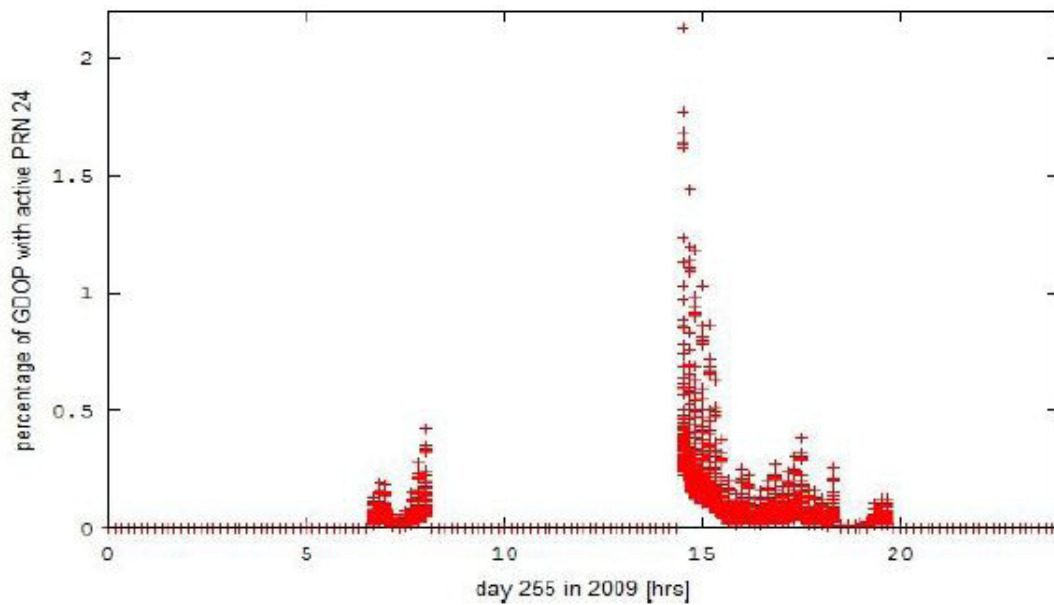
**Source:** Analysis conducted by the authors, using the R programmable environment

statističke analize povećanja degradacije uslijed prekida rada satelita opažene na obje referentne stanice u Hrvatskoj sažeti su u tablici 2.

Uslijed prekida rada satelita PRN24, opaženo je povećanje geometrijske degradacije točnosti od 4,29% u Baški, dok je ista degradacija u Kalinovcu dosegla 4,80%. Uz pretpostavku da je ekvivalentna korisnička pogreška udaljenosti (UERE) dosegla svoju gornju granicu od 12,8 m kako je definirano u [12], geometrijska degradacija točnosti će, uslijed prekida rada satelita, povećati ukupnu pogrešku određivanja

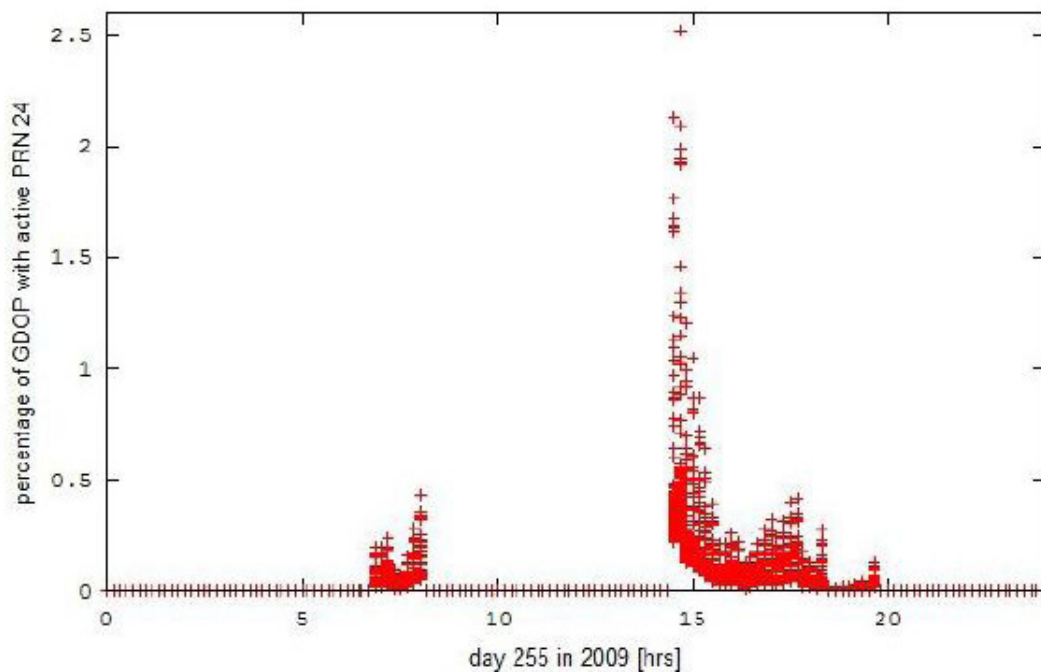
observed at both reference sites in Croatia are summarised in Table 2.

The increase of 4.29% in the GDOP due to the PRN 24 outage was observed in Baška, Croatia, while in Kalinovac, Croatia, the GDOP increase amounts to 4.80%. Assuming the amount of the UERE reached the upper limit at 12.8 m set in the GPS Standard Positioning Service Performance Standard [12], the GDOP degradation, due to a single satellite outage, will increase the total GPS positioning error by 1.74 m and 1.92 m in Baška and Kalinovac, respectively.



**Slika 9:** Povećanje geometrijske degradacije točnosti u Baški, Hrvatska, dan 255. 2009. godine uslijed prekida rada PRN24 satelita, sa aktivnim satelitom  
*Figure 9 GDOP deterioration in Baška, Croatia, on 255<sup>th</sup> day in the year 2009 due to the PRN 24 outage, with the PRN24 active*

**Izvor:** Izradili autori uz korištenje programskog okruženja R  
*Source:* Analysis conducted by the authors, using the R programmable environment



**Slika 10:** Povećanje geometrijske degradacije točnosti u Kalinovcu, Hrvatska, dan 255. 2009. godine, uslijed prekida rada PRN24 satelita, sa aktivnim satelitom  
*Figure 10 The GDOP deterioration in Kalinovac, Croatia, on 255<sup>th</sup> day in the year 2009 due to the PRN 24 outage, with PRN24 active*

**Izvor:** Izradili autori uz korištenje programskog okruženja R  
*Source:* Analysis conducted by the authors, using the R programmable environment

**Tablica 2:** Komparativna analiza geometrijske degradacije točnosti (GDOP) na referentnim lokacijama u Hrvatskoj uslijed prekida rada satelita GPS PRN24**Table 2** Comparative analysis of the GDOP degradation at test sites in Croatia due to the PRN 24 outage

| GDOP   | Baška (Croatia)              |                                   | Kalinovac (Croatia)          |                                   |
|--|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|  | s PRN24<br><i>with PRN24</i> | bez PRN24<br><i>without PRN24</i> | s PRN24<br><i>with PRN24</i> | bez PRN24<br><i>without PRN24</i> |
| srednja vrijednost<br><i>mean</i>                  | 3.1753                       | 3.3114                            | 3.1245                       | 3.2746                            |
| standardna devijacija<br><i>standard deviation</i> | 2.3703                       | 2.4243                            | 2.3786                       | 2.4957                            |

**Izvor:** Temeljeno na vlastitim rezultatima

**Source:** Based on own results

položaja sustavom GPS za 1,74 m u Baški, odnosno za 1,92 m u Kalinovcu.

Iako lokalni reljef Baške predstavlja neprikladniji okoliš za satelitsko određivanje položaja, na lokaciji Kalinovac opažena je izraženija degradacija točnosti uslijed prekida rada satelita PRN24 zbog brdovitog područja južno od referentne lokacije.

Za sustave/usluge koji zahtijevaju veći broj vidljivih satelita od standardnog opažen je još jedan učinak privremene nedostupnosti jednog satelitskog GPS signala. Kako se vrijeme tijekom kojeg su dostupni signali s barem četiri GPS satelita značajno ne mijenja u slučaju prekida rada jednog satelita, sustavi i usluge koji zahtijevaju neprekidnu vidljivost više od najmanjeg broja potrebnih satelita mogu iskusiti bitna ograničenja. Za obje elaborirane lokacije, kritično razdoblje minimalnog broja satelita u vremenu oko 14:00 KSV značajno se povećava u slučaju kvara GPS satelita. Na primjer, sustavi/usluge koji zahtijevaju minimalan broj od šest vidljivih satelita iskusit će produljeno kritičnorazdoblje od približno 200% za Bašku, odnosno 175% za Kalinovac.

Iako je korištenjem SRTM podataka omogućeno kreiranje modeliranog simuliranog okoliša, u ovom istraživanju se ne dovodi u pitanje kvaliteta simuliranja krajolika baziranog na SRTM modelu, već ista ostaje tema za daljnje vrednovanje.

## 6. ZAKLJUČAK

Prikazana Hrvatska analiza slučaja za dvije lokacije u Hrvatskoj, temeljena na simulaciji prekida rada GPS satelita pokazala je mjerljive učinke prekida rada jednog satelita na geome-

Although the local terrain around Baška, Croatia, provides a more challenging environment for the satellite positioning, a more pronounced GDOP degradation due to the PRN 24 outage was observed in Kalinovac, due to hilly terrain south of the reference site.

The additional effect of a single GPS satellite outage on services that require more than a necessary number of visible satellites was observed. As the time of at least four satellites visibility does not change significantly in case of a single GPS satellite outage, systems and services demanding a continuous visibility of more than the necessary four satellites may experience significant limitations. For both reference sites examined, a critical period of a minimum number of visible satellites around 14:00 UTC considerably extends in case of a single GPS satellite failure. For instance, systems and services demanding at least six visible satellites will experience the extension of a 14:00 hrs critical period of approximately 200% and 175% in Baška and Kalinovac, respectively.

Although the utilisation of the SRTM data allows the creation of the modelled simulation environment, the quality of the SRTM-based landscape re-creation was not challenged in this research, and remains the subject of further evaluation.

## 6. CONCLUSION

The Croatian simulation-based GPS outage case-study presented here revealed the measurable effects of a single GPS satellite outage on the DOP and GPS performance degradation, that potentially affects the performance of numerous systems relying on satellite navigation services. The Croatian PRN 24 case-study anal-

trijisku degradaciju točnosti i kvalitetu određivanja položaja sustavom GPS, što potencijalno utječe na učinkovitost brojnih tehnoloških i društveno-ekonomskih sustava koji se temelje na korištenju satelitskih navigacijskih sustava. Također, ova je analiza pokazala kako prekid rada jednog GPS satelita uzrokuje kako povećanje degradacije točnosti, tako i produljenje razdoblja sa smanjenim brojem vidljivih GPS satelita.

Povećana pogreška GPS pozicije uslijed prekida rada satelita procijenjena je na 1,74 m (Baška, Hrvatska), odnosno 1,92 m (Kalinovac, Hrvatska). Analiza ističe učinke prekida rada satelita iz perspektive krajnjeg korisnika, do kojih je u ovome slučaju došlo na južnoj strani neba. Pored toga, produljeno razdoblje malog broja vidljivih satelita opažen je na obje pokušne lokacije.

Budući da se učinci degradacije GPS kvalitete satelitskog određivanja položaja mogu promatrati širom zemlje, potrebno je uzeti u obzir utjecaj na nacionalnu infrastrukturu i s time povezane aktivnosti u cilju održavanja integriteta sustava (praćenje i obavijesti o prekidima rada satelita, pružanje podrške i poboljšanja sustava satelitskog određivanja položaja itd.).

Daljnja istraživanja bit će usredotočena na analiziranje učinaka istovremenog prekida rada više satelita, te na aktivnosti i razvojne postupke koji umanjuju privremene utjecaje ovih prekida. SRTM podaci pokazali su se prikladnim izvorom informacija za modeliranje krajolika. Međutim, kvalitetatih modela razmotrit će se u dogledno vrijeme.

## ZAHVALE

Prikazana istraživanja izvršena su pod okriljem znanstvenih projekata "Istraživanje korelacije maritimno-transportnih elemenata u pomorskom prometu" i "Okruženje satelitskog određivanja položaja" uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori zahvaljuju na pristupu SRTM DEM podacima za Hrvatsku, omogućenim od strane CGIAR-a, te na programskim paketima otvorenog koda dostupnim za korištenje znanstvenoj zajednici: MicroDEM (omogućio prof. Peter Gith, Vojnopomorska akademija Sjedinjenih Američkih Država) i Mission Planning Software (omogućeno od strane Trimble Navigation Ltd.)

ysis reveals that a single GPS satellite outage causes both the DOP degradation and the extension of periods with a lower GPS satellites visibility.

The increased GPS positioning error, due to a single satellite outage, was estimated at 1.74 m and 1.92 m in Baška, Croatia, and Kalinovac, Croatia, respectively. The analysis emphasised the effects of satellite outage seen from the end-user perspective as occurring on the southern side of the sky. Additionally, the extended periods of a low number of visible satellites were observed at both experimental sites.

Since the effects of the GPS performance degradation can be observed nation-wide, an impact on the national infrastructure and related actions in sustaining the system integrity should be considered (outage monitoring and notification, provision of assistance and augmentation to positioning etc.).

A further research will focus on the analysis of the effects of multi-satellite outages, and the actions and procedure development that mitigate the temporal effects of the GPS satellite outages. The SRTM data appeared at an appropriate source of the data for landscape modelling. However, the quality of such landscape models will be challenged in the foreseeable time.

## ACKNOWLEDGMENTS

Research activities presented in this paper were conducted under the research projects *Research into the Correlation of Maritime-transport Elements in Marine Traffic and Environment for Satellite Positioning*, supported by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia.

The authors appreciate very much the access to the SRTM DEM data for Croatia provided by CGIAR, and software packages freely provided to the scientific community: MicroDEM (provided by Prof Peter Gith, US Naval Academy) and Mission Planning Software (provided by Trimble Navigation Ltd.).

**LITERATURA / REFERENCE**

- [1] Farrell, J. A., "Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors", McGraw-Hill, San Francisco, CA, 2008.
- [2] Ghilani C. D. and P. R. Wolf, "Adjustment Computations: Spatial Data Analysis", 4th edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
- [3] Guth, P., "MicroDEM software package. US Naval Academy". Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/6X9etn>, pristup stranici/accessed on: 31.10.2009.
- [4] Jarvis, A., H. I. Reuter, A. Nelson and E. Guevara, "Hle-filled seamless SRTM data V4", International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), 2008. Dostupno na/Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org>, pristup stranici/accessed on: 13.10.2009.
- [5] OpenStreetMap, 2009. Dostupno na/Available at: <http://www.openstreetmap.org/>, pristup stranici/accessed on: 13.10.2009.
- [6] Parkinson, B. W. and J. J. Spilker, Jr. (eds), "Global Positioning System: Theory and Applications", (Vol. I.), AIAA. Washigton, DC, 1996.
- [7] Pawlowicz, L., "Determining Terrain Effects on GPS Accuracy", 2007. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/8rgVxw>, pristup stranici/accessed on: 31.10.2009.
- [8] Pawlowicz, L., "Determining Local GPS Satellite Geometry Effects on Position Accuracy", 2007. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/1mCbCj>, pristup stranici/accessed on: 31.10.2009.
- [9] Pawlowicz, L., "MicroDEM: A Swiss Army Knife of Terrain and GIS Tools", 2007. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/7NI4Be>, pristup stranici/accessed on: 31.10.2009.
- [10] Trimble Mission Planning Software, 2007. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/6XKJH7>, pristup stranici/accessed on: 31.10.2009.
- [11] US Air Force Space Command, "AFSPC exceeds Global Positioning System (GPS) standard", 2009. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/6iHdXP>, pristup stranici/accessed on: 13.10.2009.
- [12] US Department of Defense, "Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard", 2008. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/6vpMnh>, pristup stranici/accessed on: 13.10.2009.
- [13] US Department of Transportation, "Global Positioning System (GPS) Civil Monitoring Performance Specification", 2009. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/26dJaH>, pristup stranici/accessed on: 30.10.2009.
- [14] US Government Accountability Office (US GAO), "Global Positioning System: Significant Challenges in Sustaining and Upgrading Widely Used Capabilities", 2009. Dostupno na/Available at: <http://bit.ly/49wwh3>, pristup stranici/accessed on: 30.10.2009.
- [15] NAVCEN (2012). US Coast Guard Navigation Center GPS Almanac archives. Dostupno na/Available at: <http://1.usa.gov/de3Iza>, pristup stranici/accessed on: 26. 03. 2012.

