

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Wyznaczenie pozycji satelity TerraSAR-X z wykorzystaniem obserwacji GPS

DAMIAN WIERZBICKI¹, KAMIL KRASUSKI²

¹WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I GEODEZJI,
ZAKŁAD FOTOGRAMETRII I TELEDETEKCJI,

²STAROSTWO POWIATOWE W RYKACH, WYDZIAŁ GEODEZJI, KARTOGRAFII I KATASTRU
NIERUCHOMOŚCI

Słowa kluczowe: GPS, TerraSAR-X, metoda SPP, dokładność, odchylenie standardowe

STRESZCZENIE:

Dzięki intensywnemu rozwojowi systemów nawigacyjnych GNSS możliwe jest określanie pozycji satelitów z niskiej orbity na podstawie pozycjonowania absolutnego (metoda Single Point Positioning). Obecnie metoda SPP jest powszechnie stosowana w dziedzinie geodezji i nawigacji oraz implementowana w wielu programach numerycznych do wyznaczenia pozycji użytkownika. W artykule przedstawiono wstępne rezultaty dotyczące wyznaczenia współrzędnych satelity radarowego TerraSAR-X według obserwacji kodowych GPS. Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzono, że przeciętna wartość dokładności dla współrzędnej X wynosi 3,3 m, dla współrzędnej Y odpowiednio 2,4 m, zaś dla współrzędnej Z równo 3,8 m.

Determination TerraSAR-X satellite position using GPS observations

Keywords: GPS, TerraSAR-X, SPP method, accuracy, standard deviation

ABSTRACT:

With the intensive development of GNSS navigation systems, it is possible to determine the position of satellites from LEO orbit based on absolute positioning (Single Point Positioning method). Currently the SPP method is widely used in the field of geodesy and navigation, and it's implemented in many numerical programs to obtain the user's position. The article presents the preliminary results concerning determination of the radar satellite TerraSAR-X coordinates using GPS code observations. Based on the survey and the results, it was indicated that average accuracy value for the X coordinate is 3.3 m, for the Y coordinate 2.4 m respectively, while for the Z coordinate equals 3.8 meters.

1. WSTĘP

Technika satelitarna GPS oraz metoda pozycjonowania SPP w ostatnim czasie znalazły zastosowanie w wyznaczaniu pozycji satelitów z niskiej orbity (LEO). Przykładem są satelity misji radarowej TanDEM-X zapoczątkowanej w 2010 r. Misja realizowana jest dzięki współpracy Niemieckiej Agencji Kosmicznej (DLR) oraz firmy EADS Astrium GmbH i Infoterra GmbH. W jej skład wchodzi dwa bliźniacze satelity: TerraSAR-X (TSX) oraz TanDEM-X (TDX) [10]. Głównym celem misji jest generowanie Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT) o zasięgu globalnym oraz jakości odpowiadającej standardowi DTED-3 (HRTI-3). Realizacja konfiguracji TanDEM-X pozwala pokryć cały glob ziemski danymi o rozdzielczości tereno-wej 12 m oraz względnej dokładności wysokościowej wynoszącej ± 2 m. Pozyskiwanie danych dla obszaru całego globu ziemskiego, tj. od 90° szerokości geograficznej północnej do 90° szerokości geograficznej południowej, zakończyło się ostatecznie w 2014 r. [9].

Satelita TerraSAR-X (Rys. 1) został wystrzelony jako pierwszy w 2007 r. z kosmodromu Bajkonur w Kazachstanie za pomocą rosyjskiej rakiety DNEPR-1. Satelita wykonuje zobrazenia radarowe w paśmie X (długość fali $\lambda=3,1$ cm oraz częstotliwość 9,65 GHz) z użyciem wysokorozdzielczej aparatury SAR (Synthetic Aperture Radar). Satelita TSX może wykonywać zobrazenia radarowe w 3 trybach akwizycji, tj. ScanSAR (rozdzielczość około 16 m), StripMap (rozdzielczość około 3 m) oraz SpotLight (rozdzielczość do 1 m) [2, 7].



Rysunek 1 Przykładowe zdjęcie satelity TerraSAR-X [12]
Figure 1 The example image of TerraSAR-X Satellite

Satelita TerraSAR-X posiada możliwość zmiany orientacji oraz pozycji, dzięki czemu możliwe jest pozyskiwanie danych na kierunku orbitalnym oraz poprzecznym. Dane z satelity TerraSAR-X, oprócz przeznaczenia do budowy Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu oraz Numerycznego Modelu Terenu, znajdują także zastosowanie w geologii (kartowanie geologiczne, tektonika, wulkany), glaciologii (badanie lodu oraz śniegu), badaniach środowiskowych, oceanografii (kartowanie prądów morskich, kartowanie strefy brzegowej) oraz monitoringu różnego rodzaju celów, zarówno na lądzie, jak i morzu [4].

Satelita TSX został umieszczony na orbitach heliosynchronicznych na wysokości 514 km przy kącie inklinacji $97,44^\circ$ [7]. Czas rewizyty satelity TSX nad tym samym obszarem wynosi około 11 dni. Pozycja satelity TerraSAR-X jest wyznaczana w oparciu o system nawigacyjny GPS. W tym celu satelita TSX został wyposażony w 3 odbiorniki GPS: 2 odbiorniki jednoczęstotliwościowe typu MosaicGNSS oraz 1 odbiornik dwuczęstotliwościowy GPS IGOR. Standardowa dokładność wyznaczenia pozycji satelity TSX dla odbiornika MosaicGNSS wynosi do 10 m, a w najlepszym wypadku do 1 m (opracowanie w post-processingu). Z kolei odbiornik GPS IGOR jest stosowany do precyzyjnego wyznaczenia pozycji satelity TSX oraz do określenia parametrów atmosfery (głównie jonosfery). Typowa dokładność wyznaczenia pozycji satelity dla odbiornika GPS IGOR wynosi do 10 cm (błąd RMS-3D) [5] z przeznaczeniem dla zastosowań interferometrii radarowej InSAR [2].

W prezentowanej pracy przedstawiono metodę wyznaczenia współrzędnych geocentrycznych XYZ satelity radarowego TerraSAR-X z wykorzystaniem kodowych obserwacji GPS. Model matematyczny wyznaczenia pozycji satelity TerraSAR-X oparty został o metodę Single Point Positioning (SPP) z użyciem kodu C/A na częstotliwości L1. Obliczenia pozycji satelity TerraSAR-X (łącznie z napisaniem kodów źródłowych aplikacji) wykonano w edytorze numerycznym Scilab 5.4.1. Całość artykułu podzielono na 4 części: wstęp, model matematyczny wyznaczenia pozycji satelity TerraSAR-X, eksperyment badawczy i wstępne rezultaty, wnioski końcowe. Przedstawioną pracę kończy wykaz literatury dotyczący omawianej tematyki badawczej.

2. MODEL MATEMATYCZNY WYZNACZENIA WSPÓŁRZĘDNYCH SATELITY TERRASAR-X

Model matematyczny wyznaczenia pozycji satelity TerraSAR-X został oparty o zastosowanie metody pozycjonowania absolutnego (Single Point Positioning) dla obserwacji kodowych C/A na częstotliwości L1 w systemie GPS. Metoda SPP jest powszechnie stosowana w dziedzinie geodezji i nawigacji oraz implementowana w wielu programach numerycznych do wyznaczenia pozycji użytkownika. Podstawowe równanie metody SPP przyjmuje postać [8]:

$$l = d + C \cdot (dtr - dts) + Ion + Trop + Rel + TGD + RDCB + M_{CA} + \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

l – pomiar kodowy C/A (pseudoodległość) na częstotliwości L1 w systemie GPS,

d – odległość geometryczna pomiędzy anteną satelity GPS a anteną odbiornika; uwzględnia efekt Sagnaca, efekt obrotu Ziemi, poprawki geodynamiczne i pływowe oraz parametry centrum fazowego anteny satelity i odbiornika:

$$d = \sqrt{(x - X_{GPS})^2 + (y - Y_{GPS})^2 + (z - Z_{GPS})^2},$$

gdzie:

(x, y, z) – pozycja satelity TerraSAR-X w układzie geocentrycznym ECEF,

$(X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS})$ – pozycja satelity GPS na orbicie;

C – prędkość światła,

dtr – poprawka chodu zegara odbiornika,

dts – poprawka chodu zegara satelity,

Ion – poprawka jonosferyczna,

$Trop$ – poprawka troposferyczna,

Rel – poprawka relatywistyczna,

TGD – opóźnienie sprzętowe satelity GPS: opóźnienie czasu wysłania obserwacji kodowej od oscylatora pokładowego do anteny satelity; parametr zawarty w depeszy nawigacyjnej GPS,

$RDCB$ – opóźnienie sprzętowe odbiornika GPS: opóźnienie czasu przebiegu obserwacji kodowej od anteny odbiornika do hardware'u odbiornika,

M_{CA} – efekt wielotorowości,

ε – szum pomiarowy.

Uwzględniając wyrażenie na odległość geometryczną „ d ” za pomocą współrzędnych oraz rozdzielając wyznaczone parametry od modeli, równanie (1) można zapisać jak poniżej:

$$l + C \cdot dts - Ion - Trop - Rel - TGD - RDCB = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2} + C \cdot dtr \quad (2)$$

Należy dodać, że w równaniu (2) pominięto wpływ efektu wielotorowości oraz szumu pomiarowego ze względu na brak dobrego modelu opisującego zmienność wartości obu parametrów.

Na tym etapie równanie (2) może być rozwiązane metodą najmniejszych kwadratów z warunkami początkowymi narzuconymi na wyznaczone parametry. Równanie (2) należy poddać procesowi linearyzacji szeregiem Taylora w celu wyznaczenia niewiadomych parametrów (nieliniowe równanie {2} ulega przekształceniu w równanie liniowe), jak poniżej:

$$l_{obs} - d = \frac{x_0 - X_{GPS}}{d} \delta x + \frac{y_0 - Y_{GPS}}{d} \delta y + \frac{z_0 - Z_{GPS}}{d} \delta z + C \cdot dtr \quad (3)$$

gdzie:

$$l_{obs} = l + C \cdot dts - Ion - Trop - Rel - TGD - RDCB,$$

(x_0, y_0, z_0) – przybliżone współrzędne satelity TerraSAR-X w układzie geocentrycznym ECEF (na podstawie nagłówka pliku obserwacyjnego RINEX).

$$\begin{cases} x = x_0 + \delta x \\ y = y_0 + \delta y \\ z = z_0 + \delta z \end{cases}$$

$(\delta x, \delta y, \delta z)$ – przyrosty do przybliżonych współrzędnych satelity TerraSAR-X (x_0, y_0, z_0) .

Wyznaczenie niewiadomych parametrów z równania (3) sprowadza się do rozwiązania równania:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} - \mathbf{dl} = \mathbf{v} \quad (4)$$

gdzie:

\mathbf{A} – macierz pochodnych cząstkowych po wyznaczonych parametrach,

\mathbf{dx} – wektor szukanych parametrów,

$$\mathbf{dx} = [\delta x, \delta y, \delta z, C \cdot dtr]^T,$$

\mathbf{dl} – wektor wyrazów wolnych,

$$\mathbf{dl} = l_{obs} - d,$$

\mathbf{v} – wektor poprawek.

Szukane parametry \mathbf{dx} z równania (4) wyznacza się stosując układ równań normalnych, jak poniżej:

$$\mathbf{dx} = \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{L} \quad (5)$$

gdzie:

$\mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})$, macierz układu równań normalnych,

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{dl}.$$

Z równania (5) wyznaczane są przyrosty do przybliżonych współrzędnych satelity TerraSAR-X (3 parametry) oraz błąd zegara odbiornika wyrażony w metrach (1 parametr). Odchylenia standardowe wyznaczonych współrzędnych satelity TerraSAR-X w układzie geocentrycznym ECEF opisuje zależność [1]:

$$\begin{cases} \mathbf{C}_x = m_0 \cdot \mathbf{N}^{-1} \\ mx = \sqrt{\mathbf{C}_x(1,1)} \\ my = \sqrt{\mathbf{C}_x(2,2)} \\ mz = \sqrt{\mathbf{C}_x(3,3)} \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

\mathbf{C}_x – macierz wariancyjno-kowariancyjna,
 m_0 – odchylenie standardowe poprawek,

$$m_0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n-k}},$$

n – liczba obserwacji, $n > 4$,

k – liczba wyznaczanych parametrów, $k = 4$,

mx – odchylenie standardowe współrzędnej X,

my – odchylenie standardowe współrzędnej Y,

mz – odchylenie standardowe współrzędnej Z.

3. EKSPERYMENT BADAWCZY I REZULTATY

W części badawczej prezentowanej pracy przedstawiono wstępne rezultaty wyznaczenia pozycji satelity radarowego TerraSAR-X z użyciem obserwacji kodowych GPS. Surowe obserwacje GPS zostały pobrane z serwisu internetowego [12] należącego do Centrum Analizy GFZ w Poczdamie w Niemczech. Na serwerze udostępnione są również dane z misji satelitarnych CHAMP oraz GRACE. Jedynym warunkiem dostępu do danych internetowych jest założenie konta przez indywidualnego użytkownika. Na serwerze opublikowano wiele cennych informacji dotyczących m.in.: zmienności pola grawitacyjnego i magnetycznego Ziemi, parametrów orbit satelitów czy stanu atmosfery ziemskiej (głównie jonosfery).

W przypadku prezentowanego artykułu naukowego wykorzystano obserwacje GPS w formacie RINEX 2.10 z dwuczęstotliwościowego odbiornika IGOR [5] umieszczonego na satelicie TerraSAR-X (Rys. 2). Plik RINEX 2.10 z odbiornika GPS IGOR zawiera standardową strukturę pliku RINEX, tj. nagłówek i część z danymi liczbowymi (obserwacje).

```

2.10 OBSERVATION DATA GPS RINEX VERSION / TYPE
BJ2Level-1 wolfk 20110101 17:23:58CETPGM / RUN BY / DATE
Terrasar-Satellite MARKER NAME
unknown GeoForschungsZentrum OBSERVER / AGENCY
Main Blackjack 2.0.9 REC # / TYPE / VERS
Main_POD unknown ANT # / TYPE
0.0000 0.0000 0.0000 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
10.000 INTERVAL
1 1 0 WAVELENGTH FACT L1/2
9 L1 L2 C1 P1 P2 LP1 SA S1 S2# / TYPES OF OBSERV
2011 1 1 15 10 20.0000000 TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
11 1 1 15 10 20.0000000 0 6 24 17 23 20 11 31
-3495697.086 -2723900.324 21108288.503 21108288.138 21108294.243
-3495696.839 557.000 184.000 203.000
-6847209.336 -5335474.689 22943124.915 22943124.744 22943129.041
-6847209.094 281.000 55.000 76.000
2092523.652 1630553.430 21954431.708 21954431.255 21954433.862
2092523.901 491.000 126.000 131.000
-21303040.061 -16599759.418 19778135.668 19778134.942 19778139.702
-21303039.816 724.000 380.000 485.000
3039133.099 2368174.086 22061681.551 22061680.996 22061685.420
3039133.347 378.000 81.000 95.000
-15516127.593 -12090477.242 21444589.740 21444589.922 21444593.566
-15516127.348 561.000 211.000 233.000
11 1 1 15 10 30.0000000 0 8 32 31 17 23 14 11 24 20

```

Rysunek 2 Plik RINEX 2.10 z odbiornika GPS IGOR [12]

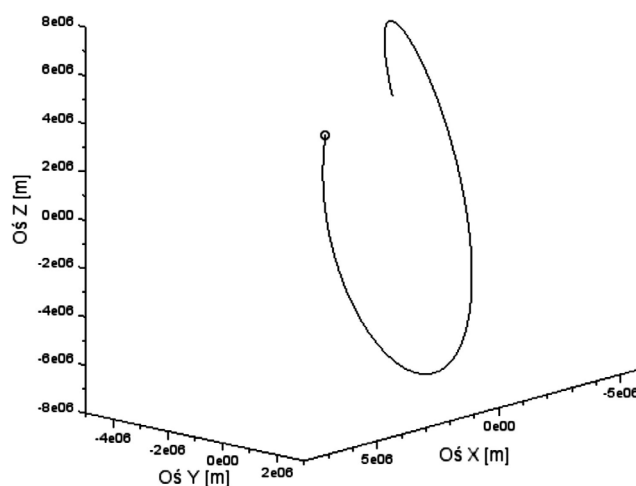
Figure 2 The RINEX 2.10 file from IGOR GPS receiver

W części nagłówkowej uwagę użytkownika powinny zwrócić przybliżone wartości współrzędnych satelity TerraSAR-X ($x_0 = 0 \text{ m}; y_0 = 0 \text{ m}; z_0 = 0 \text{ m}$), parametry centrum fazowego anteny odbiornika ($dN = 0 \text{ m}; dE = 0 \text{ m}; dU = 0 \text{ m}$) oraz interwał zapisu obserwacji ($\Delta t = 10 \text{ s}$). Ponadto w części z danymi liczbowymi możemy wyróżnić obserwacje kodowe (P1, C1, P2), fazowe (L1, L2, LP1) oraz stosunek sygnału do szumu w systemie GPS (SA, S1, S2). Dość ciekawym rozwiązaniem w misji TerraSAR-X jest pomiar fazowy LP1, który określa uśrednioną wartość obserwacji P1 oraz L1 w systemie GPS.

Obliczenia współrzędnych satelity TerraSAR-X wykonano w edytorze numerycznym Scilab 5.4.1, łącznie z napisaniem kodów źródłowych algorytmu pod metodę SPP. Kod źródłowy napisanej aplikacji ma charakter „open source” i może być w łatwy sposób modyfikowany przez potencjalnego użytkownika. Podstawowe dane początkowe aplikacji bazują na implementacji pliku obserwacyjnego RINEX (plik z obserwacjami) oraz efemerydy precyzyjnej „SP3” (zawiera współrzędne satelitów GPS w układzie globalnym w rozdzielczości czasowej 15 minut). Kod źródłowy aplikacji obliczeniowej na potrzeby wyznaczenia współrzędnych satelity TerraSAR-X został skonfigurowany w następujący sposób:

- plik RINEX: wersja 2.10,
- źródło danych efemerydalnych satelitów GPS: efemeryda precyzyjna „SP3” z Centrum Analizy CODE w Szwajcarii [11],
- metoda wyznaczenia współrzędnych satelitów GPS: wielomian interpolacyjny Lagrange’a 9 stopnia (na 10 węzłów orbitalnych) [3],
- efekt obrotu Ziemi i wpływ przebiegu sygnału od satelity do odbiornika: Tak,
- źródło danych o błędach zegara satelitów GPS: efemeryda precyzyjna „SP3”,
- metoda wyznaczenia błędu zegara satelity GPS: wielomian interpolacyjny Lagrange’a 9 stopnia (na 10 węzłów orbitalnych) [3],
- efekty relatywistyczne: Tak,
- opóźnienie jonosferyczne: model Klobuchara,
- opóźnienie troposferyczne: $Trop = 0$; sygnał nie dociera do powierzchni Ziemi, a więc nie przecina warstwy troposfery,
- opóźnienia sprzętowe dla satelitów GPS: parametr TGD z depeszy nawigacyjnej,
- opóźnienie sprzętowe dla odbiornika: $RDCB = 0$, nie uwzględniono w obliczeniach,
- centrum fazowe anteny satelity GPS: pominięto,

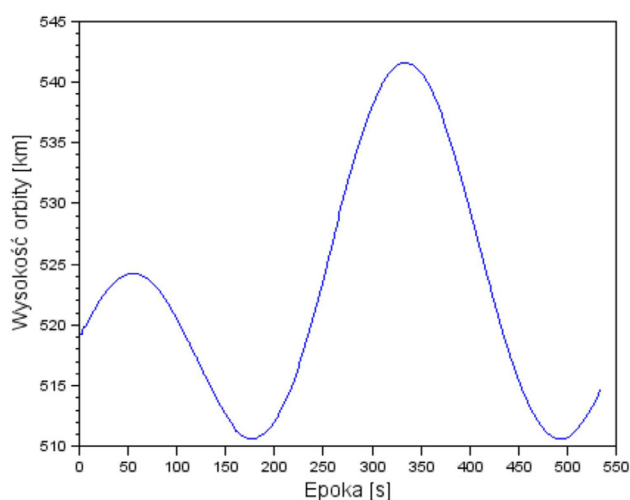
- centrum fazowe anteny odbiornika GPS IGOR: na podstawie pliku RINEX,
- efekt wielotorowości: pominięto,
- szum pomiarowy: pominięto,
- tryb pozycjonowania: kinematyczny,
- metoda pozycjonowania: pozycjonowanie absolutne (SPP),
- obserwacje: kod C/A na częstotliwości L1,
- model matematyczny wyznaczenia pozycji: metoda najmniejszych kwadratów w procesie iteracyjnym,
- wagowanie obserwacji: Nie,
- maksymalna ilość iteracji w pojedynczej epoce pomiarowej: $N=100$,
- wartości początkowe (x_0, y_0, z_0, dtr) przyjęto za 0,
- ilość epok pomiarowych: około $540 \div 550$,
- ilość wyznaczanych parametrów: $k=4$,
- minimalna liczba obserwacji do wyznaczenia pozycji: $n>4$
- skrypt jest przerywany, gdy błąd średni wyznaczenia pozycji $m0 < 100 \text{ m}$ i $m0 > 0,01 \text{ m}$,
- interwał obliczeń: 10 s,
- układ współrzędnych: układ geocentryczny IGS’05 [11],
- czas systemu: czas GPST, data: 01-01-2011, od godziny 15:20:10 do 16:40:50,
- błąd zegara odbiornika: wyznaczany,
- zapis otrzymanych wyników do pliku tekstowego: Tak.



Rysunek 3 Trajektoria lotu satelity TerraSAR-X
Figure 3 The flight trajectory of TerraSAR-X satellite

Na Rysunkach 3 i 4 zaprezentowano wstępne rezultaty wyznaczonych współrzędnych XYZ dla satelity TerraSAR-X. Rysunek 3 przedstawia trajektorię lotu satelity w przestrzeni 3D dla współrzęd-

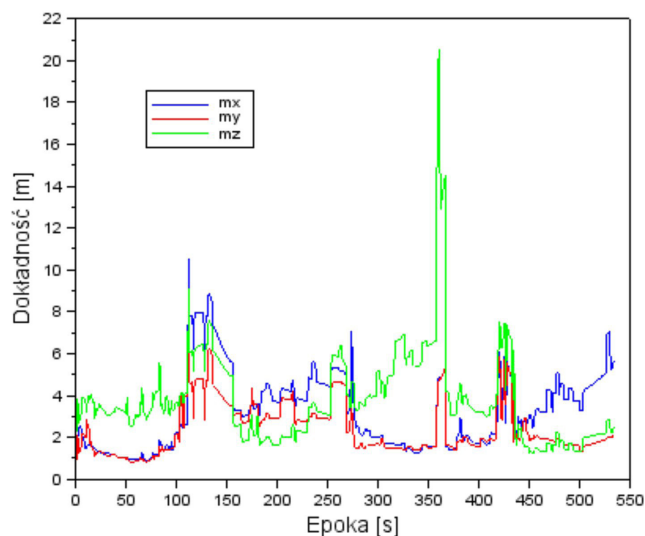
nych geocentrycznych XYZ, zaś Rysunek 4 określa wysokość orbity satelity TerraSAR-X w funkcji czasu.



Rysunek 4 Wysokość orbity satelity TerraSAR-X
Figure 4 The orbital height of TerraSAR-X satellite

W przypadku satelity TerraSAR-X nominalna wysokość orbity wynosi około 514 km nad powierzchnią Ziemi. Z kolei w analizowanym eksperymencie badawczym wysokość orbity satelity TerraSAR-X wynosiła od 511 km do 542 km (rozzrzt wyników do 31 km). Średnia różnica pomiędzy wysokością nominalną orbity a uzyskanymi wynikami wynosi około -8,5 km z odchyleniem standardowym na poziomie 9,8 km.

Na Rysunku 5 przedstawiono odchylenia standardowe (m_x , m_y , m_z) współrzędnych satelity TerraSAR-X w układzie geocentrycznym XYZ. Kolorem niebieskim zaznaczono dokładność współrzędnej X, kolorem czerwonym oznaczono dokładność współrzędnej Y, zaś kolorem zielonym dokładność współrzędnej Z. Dyspersja błędów średnich dla współrzędnej X wynosi od 0,8 m do 10,5 m, dla współrzędnej Y odpowiednio od 0,8 m do 7,7 m, zaś dla współrzędnej Z odpowiednio od 1,3 m do 20,5 m. Przeciętna wartość dokładności dla współrzędnej X wynosi 3,3 m, dla współrzędnej Y odpowiednio 2,4 m, zaś dla współrzędnej Z równo 3,8 m. Na podstawie Rysunku 5 można zauważyć, że najwyższą dokładność pozycji otrzymano dla współrzędnej Y, zaś najmniejszą dla współrzędnej Z. Warto również odnotować, że dokładność współrzędnej Y jest wyższa o około 38% względem dokładności współrzędnej Z. Ponadto dokładność współrzędnej Y jest wyższa o około 26% względem dokładności współrzędnej X.

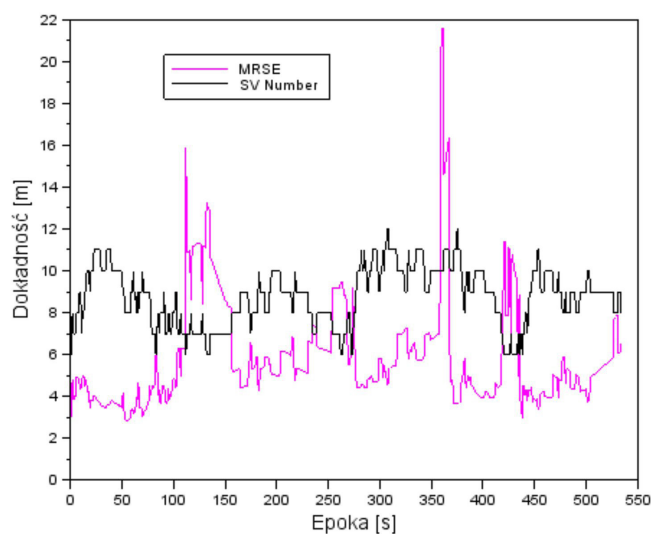


Rysunek 5 Dokładność współrzędnych satelity TerraSAR-X
Figure 5 The coordinates accuracy of TerraSAR-X satellite

Wyznaczone odchylenia standardowe współrzędnych XYZ dla satelity TerraSAR-X umożliwiają określenie błędu położenia satelity w przestrzeni 3D, jak poniżej [6]:

$$MP = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (7)$$

Na Rysunku 6 pokazano wstępne rezultaty parametru MP na tle liczby widocznych satelitów GPS w czasie trwania eksperymentu badawczego. Średnia wartość parametru MP wyniosła 5,8 m dla dyspersji wyników od 2,8 m do 21,7 m, przy liczbie widocznych satelitów GPS od 6 do 12. Warto zauważyć, że najniższa dokładność parametru MP jest widoczna przy małej liczbie satelitów GPS (zazwyczaj 6), zaś najwyższa przy liczbie satelitów powyżej 10.

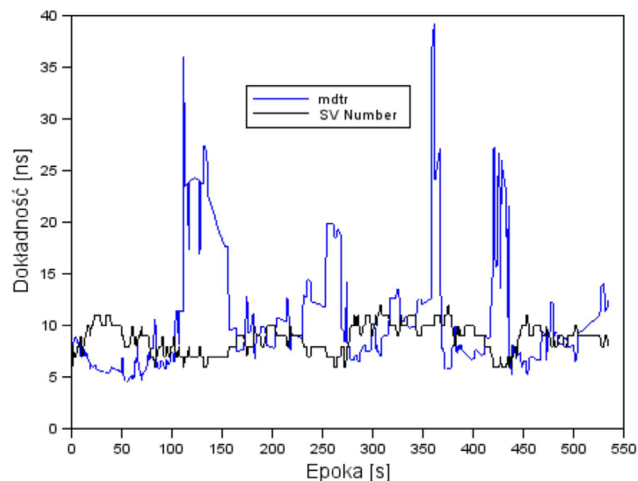


Rysunek 6 Dokładność parametru MRSE
Figure 6 Accuracy of MRSE parameter

Na Rysunku 7 zaprezentowano wartości odchylenia standardowego dla parametru chodu zegara odbiornika m_{dtr} na tle liczby dostępnych satelitów GPS. Odchylenie standardowe poprawki chodu zegara odbiornika jest wyznaczane ze wzoru [1, 8]:

$$m_{dtr} = \sqrt{C_x(4,4)} \quad (8)$$

Parametr m_{dtr} stanowi czwarty element z głównej przekątnej macierzy wariancyjno-kowariancyjnej C_x dla rozwiązania nawigacyjnego pozycji w układzie współrzędnych geocentrycznych XYZ.



Rysunek 7 Dokładność chodu zegara odbiornika
Figure 7 Accuracy of receiver clock bias

Średnia wartość parametru m_{dtr} wyniosła 10,8 ns dla dyspersji wyników od 4,6 ns do 39,1 ns, przy liczbie widocznych satelitów GPS od 6 do 12. Trzeba zauważyć, że 1 ns to około 0,3 m. Niska dokładność (ponad 20 ns) parametru m_{dtr} jest spowodowana małą liczbą widocznych satelitów GPS (zazwyczaj 5 lub 6). W przypadku widocznych oko-

ło 10 satelitów GPS, dokładność parametru m_{dtr} wynosi około 10 ns lub lepiej (ponad 3 m).

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wstępne rezultaty wyznaczenia współrzędnych satelity radarowego TerraSAR-X na podstawie obserwacji kodowych GPS. Obliczenia zostały wykonane w programie Scilab 5.4.1, w którym napisano kod źródłowy algorytmu obliczeniowego. W eksperymencie badawczym wykorzystano dane obserwacyjne w formacie RINEX 2.10 udostępnione przez Centrum Analizy GFZ w Poczdamie. Współrzędne satelity zostały wyznaczone w oparciu o metodę pozycjonowania SPP z użyciem rozwiązania obliczeniowego metody najmniejszych kwadratów. W pracy przedstawiono również ogólną charakterystykę misji satelity radarowego TerraSAR-X wraz z potencjalnymi zastosowaniami. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i testów wyciągnięto następujące wnioski:

- średnia różnica pomiędzy wysokością nominalną orbity satelity TerraSAR-X a uzyskanymi wynikami wynosi około -8,5 km;
- przeciętna wartość dokładności dla współrzędnej X wynosi 3,3 m, dla współrzędnej Y odpowiednio 2,4 m, zaś dla współrzędnej Z równo 3,8 m;
- dyspersja dokładności współrzędnych XYZ wynosi od prawie 1 m do ponad 20 m;
- średnia wartość parametru MP wyniosła 5,8 m dla dyspersji wyników od 2,8 m do 21,7 m, przy liczbie widocznych satelitów GPS od 6 do 12;
- przeciętna dokładność parametru m_{dtr} wyniosła 10,8 ns dla dyspersji wyników od 4,6 ns do 39,1 ns, przy liczbie widocznych satelitów GPS od 6 do 12.

LITERATURA

- [1] Kaplan E. D., Hegarty C. J., Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd edition, Publisher at Artech House, INC, Norwood, USA, ISBN-10 1-58053-894-0, 2006.
- [2] Koza P., Różycki S., Ocena dokładności ortorektifikacji obrazów SSC z satelity TerraSAR-X oraz weryfikacja geometrii przetworzonych obrazów dostarczonych przez dystrybutora, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 18, s. 293-304, 2008.
- [3] Krasuski K., Wierzbicki D., Utilization L2C Code for determination of user's position, Geodetski Vestnik, vol. 59, no. 4, pp. 789-808, DOI 10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.789-808, 2015.

- [4] Kurczyński Z., Fotogrametria, wyd. PWN, Warszawa, 2014, ISBN 978-83-01-17560-3.
- [5] Montenbruck O., Garcia-Fernandez M., Williams J., Performance comparison of semicodeless GPS receivers for LEO satellites, *GPS Solutions*, vol. 10, pp. 249-261, 2006, DOI 10.1007/s10291-006-0025-9.
- [6] Osada E., Geodezja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN 83-7085-663-2, 2001.
- [7] Perski Z., Krawczyk A., Marcinkovic P., Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) wysokiej rozdzielczości z wykorzystaniem danych TerraSAR-X, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18, s. 499-507, 2008.
- [8] Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 2013, ISBN 978-92-9221-886-7.
- [9] Wiśniowski J., Projekt Tandem-X radarowych obserwacji powierzchni Ziemi prowadzonych z pułapu satelitarnego – założenia i status misji, *Biuletyn WAT*, Vol. LXIV, Nr 1, s. 13-32, 2015, DOI: 10.5604/12345865.1145415.
- [10] Woroszkiewicz M., Numeryczne dane wysokościowe misji TanDEM-X, *Biuletyn WAT*, Vol. LXIV, Nr 1, s. 33-46, 2015, DOI: 10.5604/12345865.1145420.
- [11] URL1: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2011/>, aktualna na 2016 r.
- [12] URL2: <http://isdc.gfz-potsdam.de/index.php?module=pagesetter&funk=viewpub&tid=1&pid=42>, aktualna na 2016 r.