

Zastosowanie metody pozycjonowania SBAS/EGNOS do wyznaczenia współrzędnych BSP

Using the SBAS / EGNOS positioning method to determine BSP coordinates



Henryk Jafernik

Dr inż.

Państwowa Wyższa Szkoła
Zawodowa w Chełmie

henrykj21@interia.pl



Kamil Krasuski

Dr inż.

Lotnicza Akademia Wojskowa,
Deblin

k.krasuski@law.mil.pl



Janusz Ćwiklak

dr hab inż., prof. LAW

Lotnicza Akademia Wojskowa,
Deblin

j.cwiklak@law.mil.pl



Damian Wierzbicki

Dr hab. inż., prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna,
Warszawa

damian.wierzbicki@wat.edu.pl

Streszczenie: W artykule dokonano przedstawienia wyników badań dotyczących wyznaczenia pozycji BSP (Bezzałogowy Statek Powietrzny) z użyciem metody pozycjonowania SBAS (Satellite Based Augmentation System) dla systemu wspomaganego EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). W eksperymencie wykorzystano jednoczęstotliwościowy odbiornik AsteRx-m2 UAS, który rejestrował obserwacje satelitarne GPS (Global Positioning System) oraz poprawki EGNOS. Lot testowy wykonano w 2020 r. w okolicach Warszawy. Obliczenia nawigacyjne dla określenia pozycji BSP podczas lotu wykonano w oprogramowaniu gLAB v.5.5.1. Na podstawie wykonanych obliczeń wyznaczono: współrzędne BSP w układzie elipsoidalnym BLh, błędy średnie współrzędnych BSP, wartości współczynników geometrycznych DOP (Dilution of Precision). Ponadto w trakcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że wartości błędów średnich wyznaczonych współrzędnych BSP nie przekraczają 3.6 m, zaś maksymalna wartość współczynnika geometrycznego GDOP (Geometric DOP) jest mniejsza niż 3.5.

Słowa kluczowe: SBAS; EGNOS; BSP; błędy średnie; DOP

Abstract: The article presents the results of research on the determination of the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) position using the SBAS (Satellite Based Augmentation System) positioning method for the EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) support system. The experiment used a single-frequency AsteRx-m2 UAS receiver, which recorded GPS (Global Positioning System) satellite observations and EGNOS corrections. The test flight was made in 2020 near Warsaw. Navigation calculations for determining the UAV position during the flight were made in the gLAB v.5.5.1 software. On the basis of the performed calculations, the following were determined: BSP coordinates in the ellipsoidal system BLh, mean errors of the BSP coordinates, values of the geometric coefficients DOP (Dilution of Precision). Moreover, during the performed calculations, it was found that the mean errors of the determined UAV coordinates do not exceed 3.6 m, and the maximum value of the Geometric DOP coefficient is lower than 3.5.

Keywords: SBAS; EGNOS; BSP; mean errors; DOP

Wstęp

W XXI wieku nastąpił gwałtowny rozwój platform bezzałogowych, dla których podstawowym wyposażeniem nawigacyjnym stał się odbiornik satelitarne GNSS. Dotyczy to zarówno bu-

dowy i implementacji jedno- i dwuczęstotliwościowych odbiorników satelitarnych GNSS. W przypadku odbiorników jednoczęstotliwościowych GNSS (Global Navigation Satellite System), podstawową metodą pozycjonowania jest metoda SPP (Single

Point Positioning), w której wykorzystujemy obserwacje kodowe C/A na częstotliwości L1 oraz depezę nawigacyjną w danym systemie satelitarnym GNSS [1]. Wadą tej metody jest niska dokładność pozycjonowania, chociaż jest ona najbardziej rozpo-

wszechniona i używana w zastosowaniach lotniczych. W związku z tym poszukuje się ulepszonych rozwiązań nawigacyjnych dla poprawy wyznaczenia pozycji BSP z użyciem odbiorników jednocześnie GNSS. Jednym ze sposobów poprawy wyznaczenia pozycji BSP jest zastosowanie metody pozycjonowania SBAS [2]. W ramach metody pozycjonowania SBAS wykorzystujemy poprawki różnicowe określone dla danego systemu nawigacyjnego GNSS. Rozwijając pojęcie poprawki różnicowe rozumiemy przez to poprawki do współrzędnych satelity GNSS, poprawki do błędu zegara satelity GNSS, poprawkę jonosferyczną w postaci parametrów VTEC (Vertical TEC) oraz poprawkę troposferyczną obliczoną z modelu RTCA-MOPS (Radio Technical Commission for Aeronautics - Minimum Operational Performance Standards) oraz szybkie poprawki SBAS. Poprawki SBAS do pozycji satelity i błędu zegara satelity GNSS są określone jako długoterminowe poprawki SBAS, zaś poprawka jonosferyczna i troposferyczna jako poprawki atmosferyczne [3].

W Europie systemem wspomagania SBAS jest system geostacjonarny EGNOS. System EGNOS składa się z segmentu kosmicznego (3 satelity), segmentu naziemnego (stacje: RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations), NLES (Navigation Land Earth Stations) oraz MCC (Mission Control Centers)), segmentu użytkownika (odbiorniki satelitarne). System EGNOS obecnie wypracowuje poprawki różnicowe dla systemu nawigacyjnego GPS. W przyszłości EGNOS będzie kompatybilny i międzyoperacyjny z systemem Galileo (European Navigation Satellite System) [4, 5].

Głównym celem pracy jest pokazanie wyników badań dotyczących wyznaczenia współrzędnych BSP w

ramach przykładowego lotu. W tym celu wykorzystano obserwacje kodowe GPS, depezę nawigacyjną GPS oraz poprawki EGNOS. W obliczeniach wykorzystano nowy pakiet oprogramowania gLAB v.5.5.1 z modulem pozycjonowania SBAS. Całość pracy podzielono na 5 części, tj. 1. Wstęp, 2. Metoda badawcza, 3. Test badawczy, 4. Wyniki badań i dyskusja, 5. Wnioski. Na zakończenie pracy dodano zwarty spis literatury.

Metoda badawcza

W niniejszej części pokazano algorytmy wyznaczenia pozycji BSP oraz wartości błędów średnich wyznaczonych współrzędnych. Podstawowe równanie obserwacyjne dla metody pozycjonowania SBAS/EGNOS przyjmuje postać, jak zapisano poniżej [6]:

$$l = d + c \cdot (dtr - dts) + lon + Trop + TGD + Rel + Mp + PRC \quad (1)$$

gdzie:

l - pomiar kodowy, czyli pseudoodległość w systemie GPS,
 d - odległość geometryczna pomiędzy satelitą a odbiornikiem, uwzględnia pozycję satelity GPS (X_s, Y_s, Z_s), uwzględnia poprawki długoterminowe orbity EGNOS,
 $d = \sqrt{(X-X_s)^2 + (Y-Y_s)^2 + (Z-Z_s)^2}$,
 (X, Y, Z) - współrzędne anteny odbiornika, szukane parametry,
 dtr - błąd zegara odbiornika, niewiadomy parametr,
 dts - błąd zegara satelity, obliczany na podstawie depezy nawigacyjnej GPS i poprawek długoterminowych EGNOS,
 c - prędkość światła,
 lon - poprawka jonosferyczna, obliczana na podstawie modelu jonosfery SBAS/EGNOS,
 $Trop$ - poprawka troposferyczna, obliczana na podstawie modelu RTCA-

-MOPS dla systemów wspomagania SBAS,
 TGD - opóźnienie sprzętowe, obliczana na podstawie depezy nawigacyjnej GPS,
 Rel - poprawka relatywistyczna, obliczana na podstawie depezy nawigacyjnej GPS
 Mp - efekt wielotorowości dla obserwacji kodowych GPS,
 PRC - szybkie poprawki EGNOS.

Z równania (1) wyznaczane są jako niewiadome parametry, tj. 3 składowe pozycji (X, Y, Z) oraz błąd zegara odbiornika dtr . Niewiadome parametry są wyznaczane metodą najmniejszych kwadratów w procesie stochastycznym [7]:

$$\begin{cases} Qx = N^{-1} \cdot L \\ v = A \cdot Qx - dl \\ m0_{post} = \sqrt{\frac{[pvv]}{n-k}} \\ C_{Qx} = m0_{post}^2 \cdot N^{-1} \\ m_{Qx} = diag(\sqrt{C_{Qx}}) \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

Q_x - wektor wyznaczanych parametrów,
 $N = A^T \cdot p \cdot A$ - macierz układu równań normalnych,
 A - macierz współczynników,
 p - macierz wag,
 $p = 1/(m0_{post}^2 \cdot ml^2)$,
 $m0_{post}$ - błąd średni jednostkowy a posteriori,
 ml - macierz z błędami średnimi pseudoodległości,
 $ml^2 = (ml_{CIA}/\sin(EI))^2 + m_{SBAS}^2$,
 EI - kąt elewacji,
 ml_{CIA} - odchylenie standardowe pomiarów kodowych w systemie GPS,
 m_{SBAS} - błąd modelu poprawek SBAS/EGNOS,
 $L = A^T \cdot p \cdot dl$,
 dl - wektor wyrazów wolnych,
 n - liczba obserwacji,
 k - liczba wyznaczanych parametrów,

v – wektor poprawek,
 C_{Qx} – macierz wariancyjno–kowariancyjna zawierająca wartości błędów średnich wyznaczanych parametrów,
 m_{Qx} – błędy średnie wyznaczanych parametrów, odniesione do układu geocentrycznego ECEF.

Ze względu na to, iż w nawigacji lotniczej pozycja BSP jest wyrażana za pomocą współrzędnych elipsoidalnych BLh (szerokość geodezyjna B, długość geodezyjna L, wysokość elipsoidalna h), w równaniu (3) zaprezentowano model transformacji współrzędnych XYZ do BLh [8]:

$$\begin{bmatrix} B \\ L \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{Z}{\rho} + \frac{\delta_1 \cdot tg B_{i-1}}{\sqrt{\delta_2 \cdot tg^2 B_{i-1}}}\right) \\ \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ \frac{\rho}{\cos B} - R \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

(a,b) – wielka oraz mała półoś elipsoidy,

e – mimośród pierwszy,

$$e = \sqrt{((a^2 - b^2)/a^2)},$$

R – promień krzywizny pierwszego wertykału elipsoidy,

$$R = 1/\sqrt{(1 - e^2 \cdot \sin^2 B)},$$

$$\rho = \sqrt{(X^2 + Y^2)},$$

$$\delta_1 = (a \cdot e) / (\rho \cdot \sqrt{(1 - e^2)}),$$

$$\delta_2 = 1 / (1 - e^2),$$

$i-1$ – poprzednia iteracja,

(B,L,h) – współrzędne elipsoidalne statku powietrznego,

B – szerokość geodezyjna,

L – długość geodezyjna,

h – wysokość elipsoidalna.

Ponadto wartości błędów średnich m_{Qx} obliczonych dla geocentrycznych współrzędnych XYZ, mogą być wyrażone także w układzie elipsoidalnym BLh [7, 8]:

$$\begin{bmatrix} mB \\ mL \\ mh \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{m_{BLh}(1,1)} \\ \sqrt{m_{BLh}(2,2)} \\ \sqrt{m_{BLh}(3,3)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

m_{BLh} – macierz wariancyjno-kowariancyjna wyznaczanych parametrów w układzie elipsoidalnym BLh,

$$m_{BLh} = R \cdot C_{Qx} \cdot R^T,$$

R – macierz przejścia z układu geocentrycznego XYZ do układu geodezyjnego BLh,

mB – błąd średni wyznaczenia szerokości geodezyjnej B ,

mL – błąd średni wyznaczenia długości geodezyjnej L ,

mh – błąd średni wyznaczenia wysokości elipsoidalnej h .

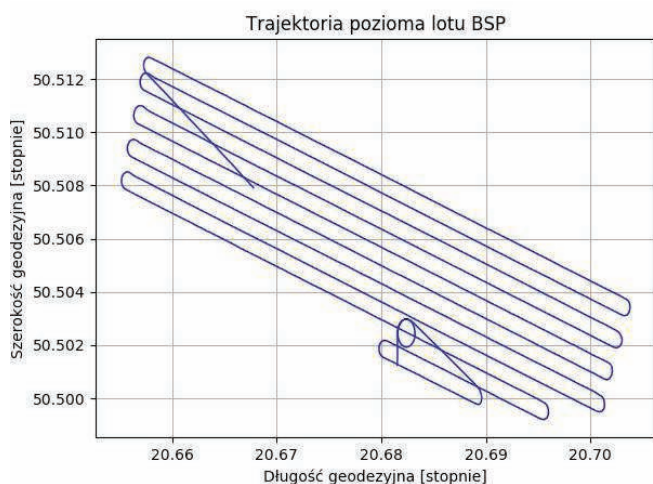
Test badawczy

Test badawczy do pracy został podzielony na 2 etapy. Pierwszy etap dotyczył lotu testowego platformy BSP, na której zamontowano odbiornik satelitarne GPS. Lot testowy odbył

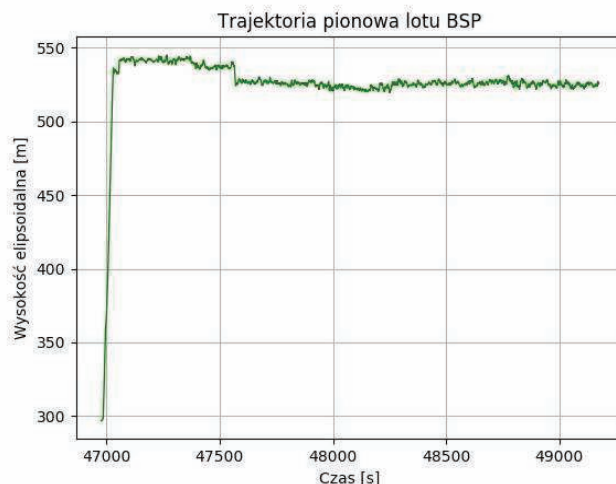
się w kwietniu 2020 r. w okolicach Warszawy w Polsce. Na pokładzie platformy BSP zamontowany został jednocześnie odbiornik AsteRx-m2 UAS, który rejestrował surowe obserwacje satelitarne GPS oraz poprawki z systemu wspomagania EGNOS od satelity S123. Lot trwał od godziny 13:02:55 do godziny 13:39:35 według czasu systemu GPST (GPS Time). Na Rys. 1 pokazano szkic trajektorii poziomej lotu BSP, zaś na Rys. 2 przedstawiono szkic trajektorii pionowej lotu. Wysokość lotu nie przekraczała 550 m.

Drugi etap eksperymentu dotyczył wykonania obliczeń nawigacyjnych i analiz numerycznych uzyskanych wyników badań. Na tym etapie obliczenia zostały wykonane w oprogramowaniu gLAB v.5.5.1 w module pozycjonowania SBAS [9]. W trakcie wykonywania obliczeń moduł pozycjonowania SBAS został skonfigurowany w następujący sposób:

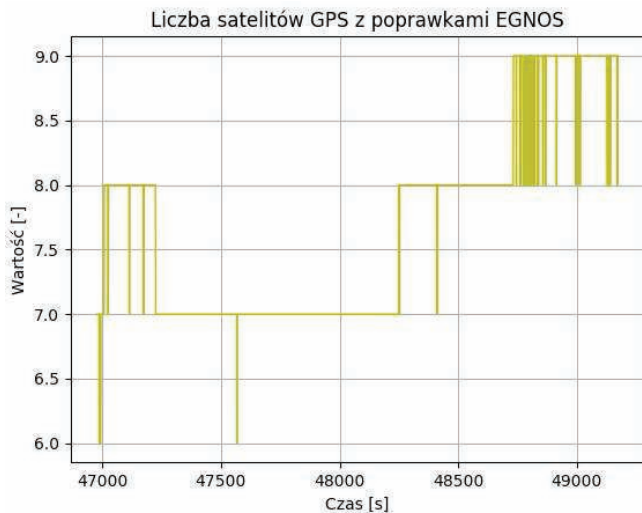
- dane obserwacyjne: plik obserwacyjny RINEX w formacie 2.11,
- źródło danych orbitalnych i zegar satelity: depesza nawigacyjna GPS + poprawki EGNOS,
- źródło poprawek SBAS: poprawki EGNOS w formacie EMS,
- interwał obliczeń: 1 s,
- maska obcięcia obserwacji: 50,
- tryb pozycjonowania: kinema-



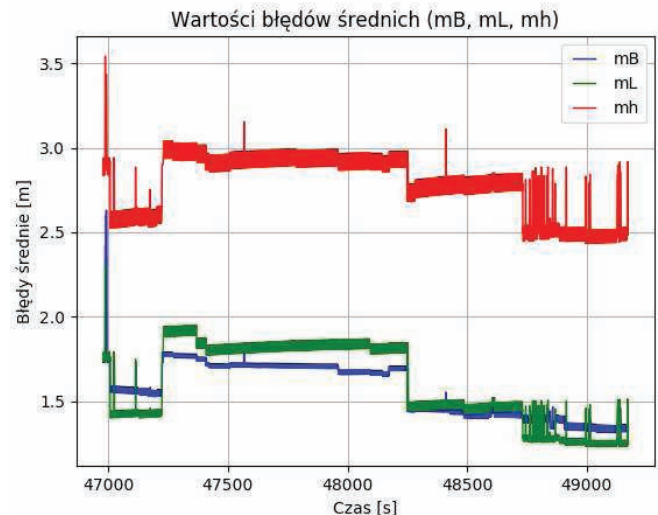
1. Trajektoria pozioma lotu BSP [opr. wł.]



2. Trajektoria pionowa lotu BSP [opr. wł.]



3. Liczba satelitów GPS, dla których wypracowano poprawki EGNOS [opr. wł.]



4. Błędy średnie wyznaczenia pozycji BSP z rozwiązaniami SBAS/EGNOS [opr. wł.]

- metody,
 - metoda wyznaczenia niewiadomych parametrów: filtracja Kalmana w przód,
 - rodzaj obserwacji GPS: obserwacje kodowe L1-C/A,
 - model jonosfery: model SBAS/EGNOS,
 - model troposfery: model RTCA-MOPS dla system EGNOS,
 - układ współrzędnych: układ WGS-84.

Wyniki badań i dyskusja

Prezentację wyników badań rozpoczęto od określenia liczby satelitów GPS, dla których określono poprawki EGNOS. Na Rys. 3 pokazano liczbę satelitów GPS dla rozwiązania nawigacyjnego pozycji BSP. Należy zaznaczyć, że wyniki pokazane na Rys. 3 dotyczą satelitów GPS, dla których program gLAB obliczył poprawki z systemu EGNOS. Liczba satelitów GPS podczas lotu wynosiła od 6 do 9. Przy czym najmniejsza liczba satelitów GPS była widoczna w początkowej fazie lotu i wynosiła od 6 do 8. Natomiast największa liczba satelitów GPS była widoczna w końcowej fazie lotu i wyniosła od 8 do 9.

Na Rys. 4 przedstawiono wyniki błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP, zgodnie ze wzorem (4). W

szczegółowości pokazano wyniki obliczenia parametrów (mB,mL,mh). Wartości błędów średnich wyznaczenia składowej B pozycji BSP wynoszą od 1,3 m do 2,7 m. Z kolei wartości błędów średnich wyznaczenia składowej L pozycji BSP wynoszą od 1,2 m do 2,3 m. Natomiast wartości błędów średnich wyznaczenia składowej h pozycji BSP wynoszą od 2,5 m do 3,6 m. Jak można zauważyć wysokość elipsoidalna jest wyznaczana z największym błędem średnim. Z kolei współrzędne horyzontalne B i L są najlepiej wyznaczane.

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla płaszczyzny 2D, obliczonych zgodnie ze wzorem (5) [8]:

$$DR = \sqrt{mB^2 + mL^2} \quad (5)$$

Wartości wypadkowych błędów średnich w płaszczyźnie 2D zależą głównie od parametrów (mB,mL). Wartości wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP w płaszczyźnie poziomej 2D wynoszą od 1,8 m do 3,3 m. Najgorsze wyniki parametru DR są zauważalne w początkowej fazie lotu. Z kolei najlepsze wyniki parametru DR są widoczne w końcowej fazie, na co wpływ ma liczba satelitów GPS w rozwiązaniu nawigacyjnym pozycji

BSP.

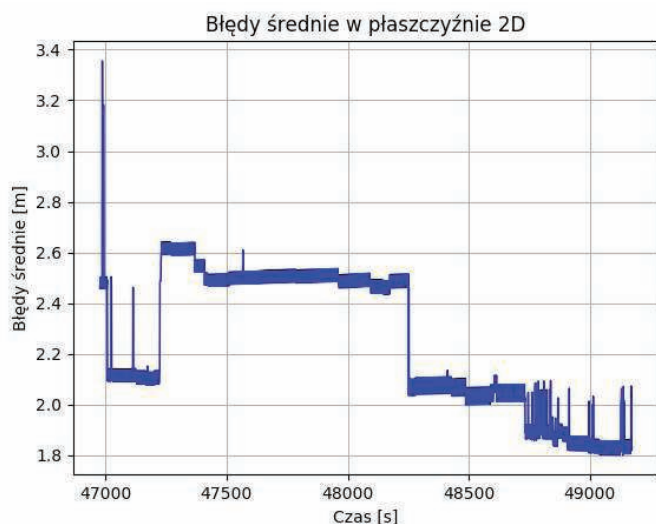
Na Rys. 6 przedstawiono wyniki wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla przestrzeni 3D, obliczonych zgodnie ze wzorem (6) [8]:

$$DS = \sqrt{mB^2 + mL^2 + mh^2} \quad (6)$$

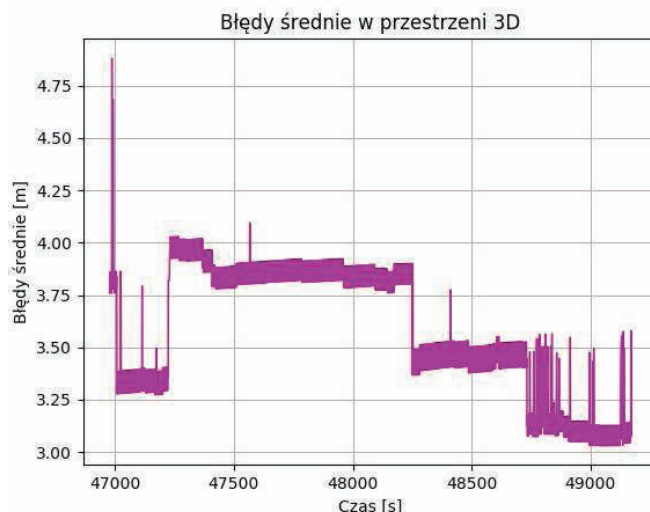
Wartości wypadkowych błędów średnich w płaszczyźnie 2D zależą głównie od parametrów (mB,mL,mh). Wartości wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP w przestrzeni 3D wynoszą od 3,1 m do 4,8 m. Najgorsze wyniki parametru DS są zauważalne w początkowej fazie lotu, kiedy liczba satelitów GPS wynosi od 6 do 8. Z kolei najlepsze wyniki parametru DS są widoczne w końcowej fazie, na co wpływ ma liczba satelitów GPS w rozwiązaniu nawigacyjnym pozycji BSP.

Na Rys. 7 przedstawiono wyniki współczynników geometrycznych DOP (Dilution of Precision), obliczonych zgodnie ze wzorem (6) [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} HDOP = \sqrt{N^{-1}(1,1) + N^{-1}(2,2)} \\ VDOP = \sqrt{N^{-1}(3,3)} \\ TDOP = \sqrt{N^{-1}(4,4)} \\ GDOP = \sqrt{N^{-1}(1,1) + N^{-1}(2,2) + N^{-1}(3,3) + N^{-1}(4,4)} \end{array} \right. \quad (7)$$



5. Wypadkowa wartość błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla płaszczyzny 2D [opr. wł.]



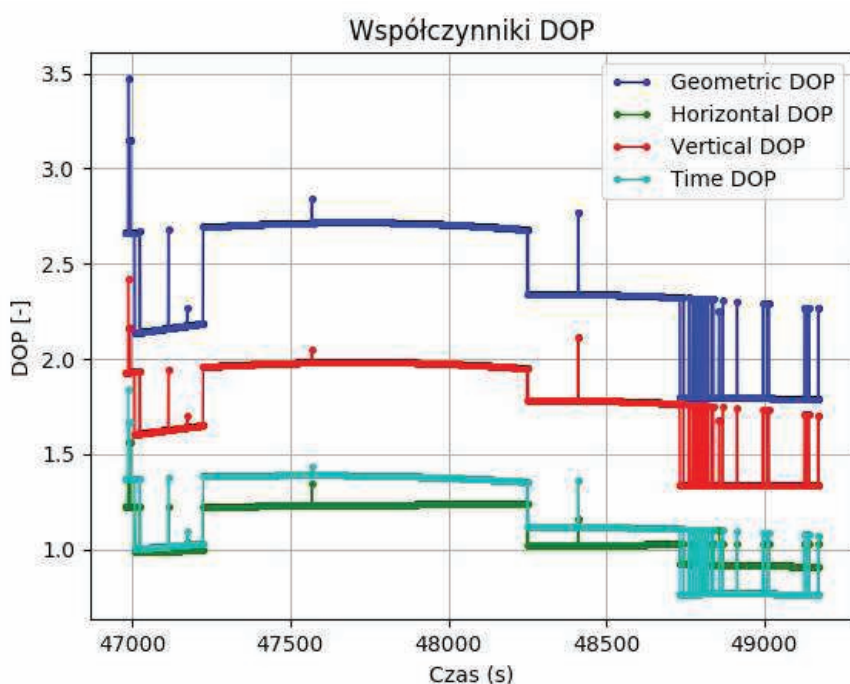
6. Wypadkowa wartość błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla przestrzeni 3D [opr. wł.]

W trakcie badań wyznaczono następujące współczynniki DOP: GDOP (Geometric DOP), HDOP (Horizontal DOP), VDOP (Vertical DOP) oraz TDOP (Time DOP). Wartości współczynników DOP wynoszą odpowiednio: 1,8 do 3,5 dla GDOP, 0,9 do 1,5 dla HDOP, 1,3 do 2,4 dla VDOP oraz 0,7 do 1,8 dla TDOP. Należy zaznaczyć, że największe wartości współczynników DOP są w początkowej fazie lotu BSP, kiedy liczba satelitów GPS wynosi od 6 do 8. Z kolei w końcowej fazie lotu BSP, wartości współczynników DOP są mniejsze niż 2,4.

Wnioski

W pracy dokonano przedstawienia wyników badań dotyczących wyznaczenia pozycji BSP z użyciem metody SBAS/EGNOS. W badaniach wykorzystano dane GPS i poprawki EGNOS zarejestrowane przez jednoznacznościowy odbiornik AsteRx-m2 UAS zamontowany na platformie bezzałogowej BSP. Lot testowy odbył się w kwietniu 2020 r. w okolicach Warszawy w Polsce i trwał od godziny 13:02:55 do godziny 13:39:35 według czasu GPST. Obliczenia nawigacyjne

do badań wykonano w programie gLAB v.5.5.1. W szczególności w pracy wyznaczono współrzędne lotu BSP, błędy średnie wyznaczenia współrzędnych pozycji BSP, liczbę satelitów GPS z dostępnymi poprawkami EGNOS oraz współczynniki geometryczne DOP. W trakcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że wartości błędów średnich wyznaczonych współrzędnych BSP nie przekraczają 3,6 m, zaś maksymalna wartość współczynnika geometrycznego GDOP jest mniejsza niż 3,5. ◀



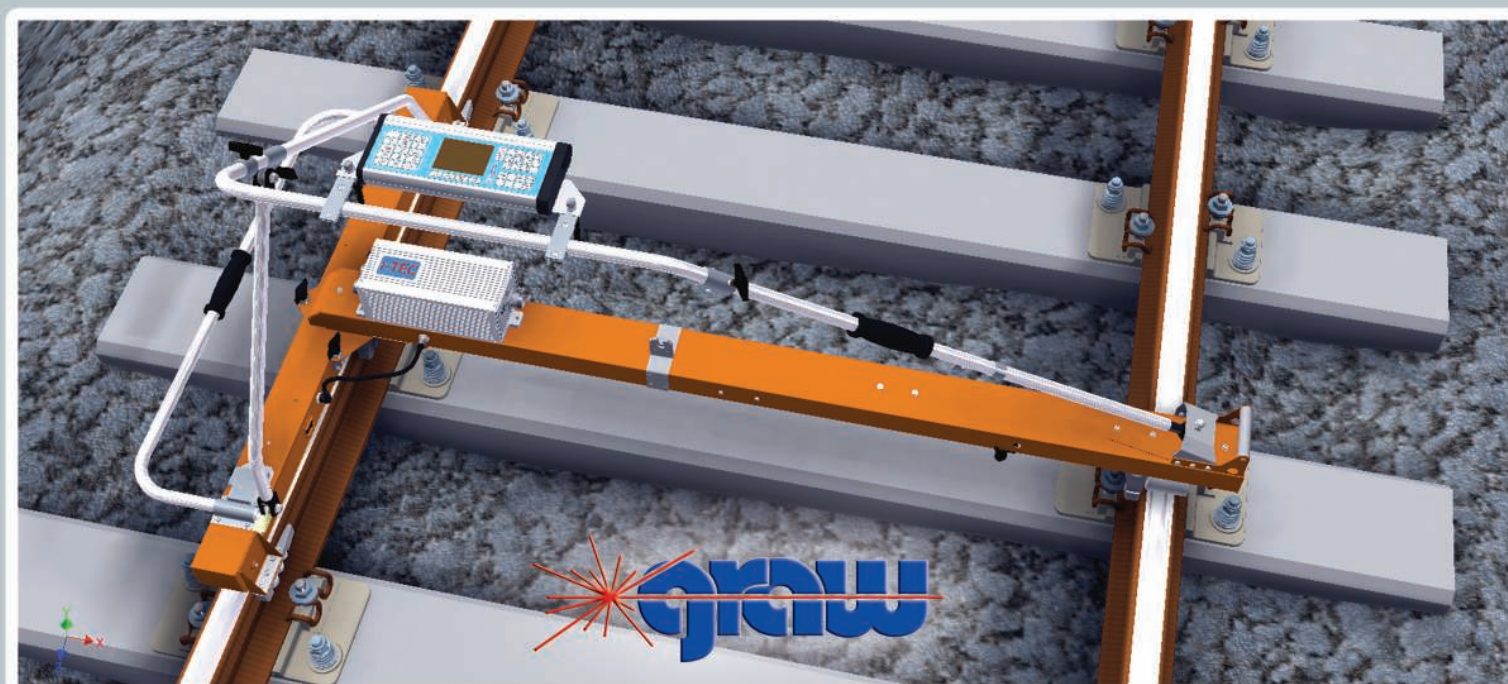
7. Współczynniki geometryczna DOP dla wyznaczonej pozycji BSP [opr. wł.]

Materiały źródłowe

- [1] Krasuski K., Wierzbicki D., Application the SBAS/EGNOS Corrections in UAV Positioning. *Energies*, 2021, 14, 739. <https://doi.org/10.3390/en14030739>.
- [2] Ciećko A., Grunwald G., Examination of Autonomous GPS and GPS/EGNOS Integrity and Accuracy for Aeronautical Applications. *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 2017, 61, 920–928, <https://doi.org/10.3311/PPci.10022>.
- [3] Krasuski K., Wierzbicki D., Bakula M., Improvement of UAV Positioning Performance Based on EGNOS+SDCM Solution. *Remote Sens.*, 2021, 13, 2597. <https://doi.org/10.3390/rs13132597>.
- [4] Grunwald G., Kaźmierczak R., Rozkład poprawek EGNOS w czasie, *Logistyka*, 2012, nr 3, str. 995-1000.
- [5] Krzykowska K., Siemieńczyk M., Signal monitoring as a part of maintenance of navigation support system in civil aviation, *Archives of Transport System Telematics*, vol. 7, 2014, pp. 36-40.
- [6] Krasuski K., Wierzbicki D., Monitoring Aircraft Position Using EGNOS Data for the SBAS APV Approach to the Landing Procedure. *Sensors*, 2020, 20, 1945. <https://doi.org/10.3390/s20071945>.
- [7] Krasuski K., The Research of Accuracy of Aircraft Position Using SPP Code Method. Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2019; pp. 1–106. (In Polish).
- [8] Osada E., *Geodesy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej: Wrocław, Poland, 2001; Volume 92, ISBN 83-7085-663-2. (In Polish)
- [9] <https://gage.upc.edu/gLAB/>, [dostęp: 01.03.2021].
- [10] Specht C., Mania M., Skóra M., Specht M., Accuracy of the GPS positioning system in the context of increasing the number of satellites in the constellation. *Pol. Marit. Res.*, 2015, 22, 9–14, DOI: 10.1515/pomr-2015-0012.

REKLAMA

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC Dokładny pomiar strzałek



www.graw.com