

Kamil KRASUSKI¹, Ewelina KOBIAŁKA¹, Janusz ĆWIKLAK¹,
 Marek GRZEGORZEWSKI¹, Adam CIEĆKO²

¹Military University of Aviation (Lotnicza Akademia Wojskowa)

²University Warmia and Mazury (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski)

RESEARCH INTO THE INTEGRITY OF GALILEO POSITIONING AT DĘBLIN AERODROME

Badanie wiarygodności pozycjonowania Galileo na lotnisku w Dęblinie

Abstract: *The paper presents the results of the integrity of Galileo satellite positioning for the area of the military aerodrome in Dęblin. The integrity parameters of the Galileo satellite positioning have been determined for en-route navigation and the precision approach. To study the integrity parameter, Galileo satellite measurements from the GNSS reference station located in the area of the Aviation Department of the Polish Air Force University, located near EPDE military aerodrome in Dęblin, were used. In particular, in the research, to determine the integrity parameter, the mean errors of the determined coordinates of GNSS reference station in the BLh ellipsoid frame were used. The research test was carried out on 11 January, 2019. The authors of the work studied the parameter of the integrity of Galileo positioning used HPL and VPL protection levels.*

Keywords: GPS, GLONASS, Galileo, integrity, GNSS reference station

Streszczenie: *W pracy przedstawiono rezultaty wiarygodności pozycjonowania satelitarnego Galileo dla terenu lotniska wojskowego w Dęblinie. Parametry wiarygodności pozycjonowania satelitarnego Galileo zostały określone dla nawigacji typu en-route oraz podejścia precyzyjnego PA. Do zbadania parametru wiarygodności wykorzystano pomiary satelitarne Galileo ze stacji referencyjnej GNSS umieszczonej na terenie Wydziału Lotnictwa Lotniczej Akademii Wojskowej, zlokalizowanej w pobliżu lotniska wojskowego EPDE w Dęblinie. W szczególności w badaniach do określenia parametru wiarygodności wykorzystano błędy średnie wyznaczonych współrzędnych stacji referencyjnej GNSS w układzie elipsoidalnym BLh. Test badawczy został przeprowadzony w dniu 11.01.2019 r. Autorzy prac do badania parametru wiarygodności pozycjonowania Galileo wykorzystali poziomy bezpieczeństwa HPL oraz VPL.*

Słowa kluczowe: GPS, GLONASS, Galileo, wiarygodność, stacja referencyjna GNSS

1. Introduction

GNSS navigation systems used in aviation must have determined and defined basic parameters of satellite positioning quality in the form of accuracy, continuity, availability and integrity [1]. The parameter of accuracy denotes the difference between determined aircraft coordinates and the actual position of the flight trajectory. The parameter of availability determines the operation of the system within a specified time while navigating. The parameter of integrity determines the measure of reliability for the obtained findings of GNSS satellite navigation. The parameter of continuity determines the operation of satellite navigation without any malfunctioning or unexpected failures [2].

At present, the GPS and GLONASS satellite systems as well as ABAS, SBAS and GBAS [3] augmentation systems feature all the above-mentioned parameters. Moreover, the parameters of GNSS satellite positioning are referenced to particular types of air operations such as en-route and terminal navigation, initial approach, intermediate approach and (NPA) GNSS non-precision approach to landing, approach with APV-I Vertical guidance, approach with APV-II Vertical guidance, (PA) precision approach Cat. I [4].

The concept of testing the parameters of Galileo positioning quality for aerodrome areas in Poland is a new solution from the point of implementation of GNSS satellite technology. So far, in Poland for the examination of the quality of GNSS satellite positioning, only the GPS, GLONASS and EGNOS systems have been used as SBAS augmentation systems [5, 6]. Therefore, the obtained findings of Galileo satellite positioning will prove very interesting for the exploitation of this navigation system in air operations in Poland.

Among the listed parameters of GNSS satellite positioning quality, integrity is the crucial element which checks the reliability of conducted navigational computations. In the context of navigational computations in aviation, reliability is defined by means of safety parameters in the HPL horizontal plane and in the VPL vertical plane, respectively. For the flight operations performed by a pilot, reliability is the guarantee of obtaining correct results of the aircraft position during a flight. Therefore, there is an increased level of confidence to the readings of onboard navigation instruments, especially to the GNSS receiver and the linked computer, managing the FMS flight.

The main aim of this paper is to investigate the integrity of the Galileo positioning on the premises of Dęblin aerodrome. The parameters of integrity were defined for en-route navigation and (PA) precision approach Cat. I For the need of testing reliability, the authors used data from the GNSS reference station in Dęblin, located on the premises of the Aeronautics Faculty at the Polish Air Force University.

2. Mathematical model

The basic algorithm for the determination of HPL and VPL reliability levels takes into account the influence of coefficients which specify the type of flight operations and the obtained average errors of the designated coordinates by the GNSS receiver. The formula specifying the HPL and VPL safety levels can be expressed as follows [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} HPL = k_H \cdot \sqrt{\frac{m_L^2 + m_B^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_L^2 - m_B^2}{2}\right)^2 + m_{BL}^2}} \\ VPL = k_V \cdot m_h \end{array} \right. \quad (1)$$

where:

k_H - coefficient defining navigation in the horizontal plane,

$k_H = 6.0$ - for (PA) precision approach,

$k_H = 6.18$ - for en-route navigation,

k_V - coefficient defining navigation in the vertical plane,

$k_V = 5.33$ - for (PA) precision approach,

m_B - standard deviation for B coordinate,

m_L - standard deviation for L coordinate,

m_{BL}^2 - variation of B and L components,

m_h - standard deviation for h coordinate.

The values of the coefficients k_H and k_V were specified for particular types of air operations, mainly en-route navigation and the procedure of (PA) precision approach. Furthermore, the values of standard deviations (mean errors) of BLh ellipsoidal coordinates were determined on the basis of the variance-covariance matrix \mathbf{m}_{BLh} , as below [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_B = \sqrt{\mathbf{m}_{BLh}(1,1)} \\ m_L = \sqrt{\mathbf{m}_{BLh}(2,2)} \\ m_h = \sqrt{\mathbf{m}_{BLh}(3,3)} \end{array} \right. \quad (2)$$

where:

\mathbf{m}_{BLh} - variance-covariance matrix of mean errors of BLh ellipsoidal coordinates,

$$\mathbf{m}_{BLh} = \begin{bmatrix} m_B^2 & m_{BL}^2 & m_{Bh}^2 \\ m_{BL}^2 & m_L^2 & m_{Lh}^2 \\ m_{Bh}^2 & m_{Lh}^2 & m_h^2 \end{bmatrix}$$

3. Research test and results

In the experimental test, the HPL and VPL reliability levels were determined for the Galileo satellite system. For the need of the research, the authors used navigation data from the GNSS reference station on the grounds of the Aeronautics Faculty at the Polish Air Force University in Dęblin, which is located in the vicinity of the technical infrastructure of EPDE military aerodrome in Dęblin. In particular, the work exploited the values of average errors of determining the coordinates by the GNSS reference station in the Galileo solution. The average errors of coordinates of the GNSS reference station in the ellipsoidal BLh frame were specified by means of the SPP code method. The experimental test was conducted on 11 January 2019 for twenty-four hour Galileo observations. The investigations and numerical calculations were conducted in the RTKLIB V.2.4.2 programme [9].

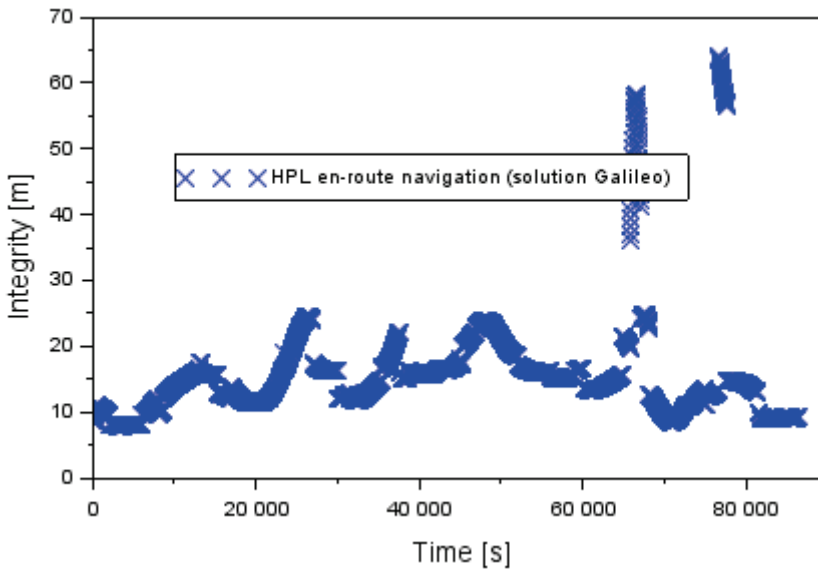


Fig. 1. HPL values for en-route navigation in the Galileo solution

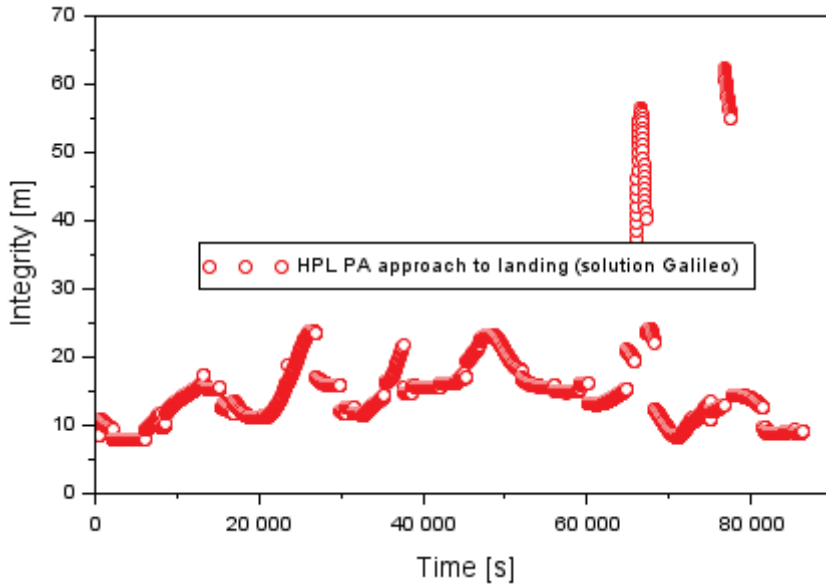


Fig. 2. HPL values for (PA) precision approach in the Galileo solution

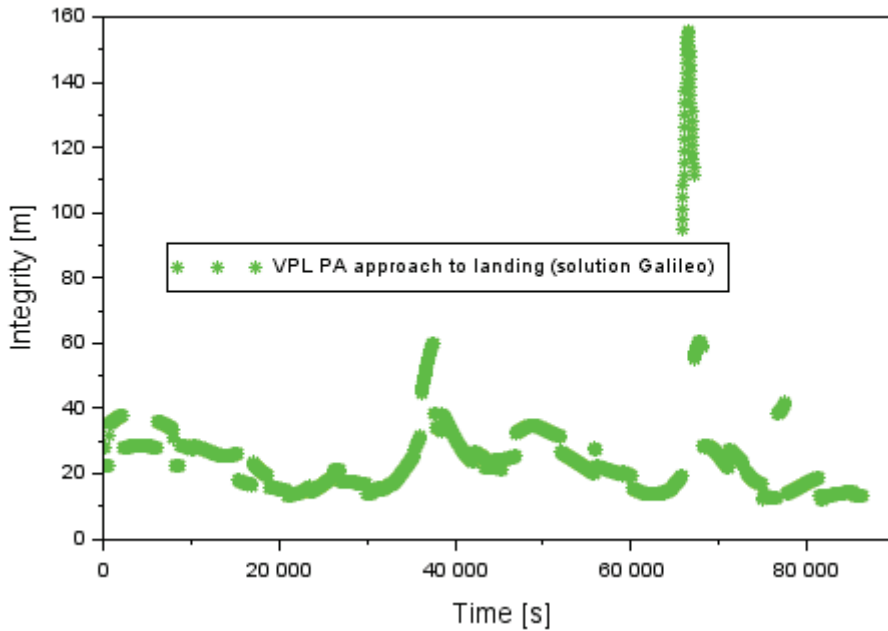


Fig. 3. VPL values for (PA) precision approach in the Galileo solution

Figure 1 shows the results of values of the HPL levels of safety in the Galileo solution for en-route navigation. The obtained results for the HPL parameter range accordingly from 7.9 m to 64.2 m. In addition, the average value of the HPL parameter is equal to 15.6 m, and of the median it equals 14.6 m. Approximately 15% of all the HPL findings are less than 10 m. Besides, over 85% of all the HPL parameter findings are below 20 m. In addition, more than 97% of all the HPL results are less than 30 m. For en-route-type navigation, in accordance with the ICAO recommendation, the maximum HPL safety levels equal respectively: 7,400 m during a flight over the oceans; 3,700 m during a flight over the continents; and 1,850 m in the phase of a terminal operation [4]. Therefore, it can be observed that the obtained findings of examining the HPL parameter do not exceed the boundary values of safety alerts for the execution of en-route operations.

Figure 2 shows the results of values of the HPL safety levels in the Galileo solution, for (PA) precision approach Cat. I. The obtained results for the HPL parameter range accordingly from 7.7 m to 62.4 m. In addition, the average value of the HPL parameter is equal to 15.1 m, and of the median, it equals 14.2 m. Approximately 17% of all the HPL findings are less than 10 m. Besides, over 75% of all the HPL parameter findings are below 20 m. Additionally, over 97% of all the HPL parameter findings are below 30 m. For (PA) precision approach Cat. I, in accordance with the ICAO recommendation, the maximum HPL safety level is 40 m [4]. Therefore, it can be seen that for 76 measurement epochs the obtained results for the examination of the HPL parameter exceed the boundary alert level of 40 m. For the rest of the measurement epochs the safety levels are under 40 metres.

Figure 3 shows the results of values of the VPL safety levels in the Galileo solution for (PA) precision approach Cat. I. The obtained results for the VPL parameter range accordingly from 11.9 m to 155.7 m. In addition, the average value of the VPL parameter is equal to 25.1 m, and of the median, it equals 22 m. Approximately 81% of all the VPL findings are less than 30 m. Besides, over 95% of all the VPL parameter findings are below 40 m. Additionally, over 96% of all the VPL parameter findings are below 50 m. For (PA) precision approach Cat. I in accordance with the ICAO recommendation, the maximum VPL safety level is 35 m [4]. Therefore, it can be seen that, for 268 measurement epochs the obtained results for the examination of the VPL parameter exceed the boundary alert level of 35 m. For the rest of the measurement epochs, the safety levels are under 35 m.

4. Discussion

Within the discussion, the authors compared the obtained results of integrity of the Galileo solution, and accordingly of the GPS and GLONASS solution. The scientific test was conducted for the GNSS reference station in Dęblin, taking advantage of twenty-four hour GPS and GLONASS code observations, on 11 January 2019. The coordinates and average coordinate errors in the GPS and GLONASS solution were also determined in the absolute SPP method in the ellipsoidal BLH coordinate system.

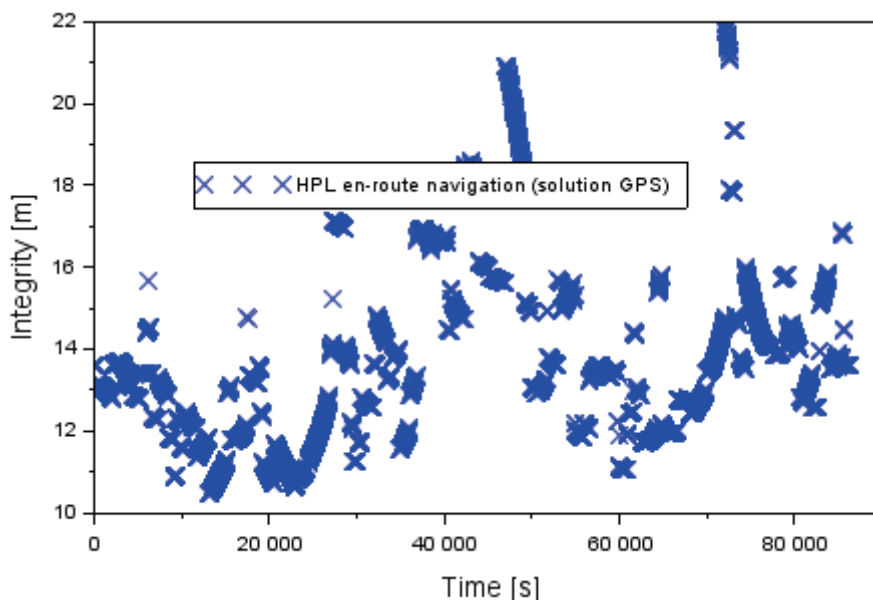


Fig. 4. HPL values for en-route navigation in the GPS solution

Figure 4 shows the results of values of the HPL safety levels in the GPS solution for en-route navigation. The obtained results for the HPL parameter range accordingly from 10.5 m to 22 m. In addition, the average value of the HPL parameter is equal to 13.7 m, and of the median, it equals 13.5 m. Approximately 75% of all the HPL findings are less than 15 m. Besides, over 98% of all the HPL parameter findings are below 20 m.

Fig. 5 shows the results of values of the HPL safety levels in the GLONASS solution, for en-route navigation. The obtained results for the HPL parameter range accordingly from 18.7 m to 42.5 m. In addition, the average value of the HPL parameter is equal to 26.6 m, and of the median, it equals 25.6 m. Approximately 84% of all the HPL findings are less than 30 m. Besides, over 98% of all the HPL parameter findings are below 40 m.

Fig. 6 shows the results of values of the HPL safety levels in the GPS solution for (PA) precision approach Cat. I. The obtained results for the HPL parameter range accordingly from 10.2 m to 21.3 m. In addition, the average value of the HPL parameter is equal to 13.3 m, and of the median, it equals 13 m. Approximately 82% of all the HPL findings are less than 15 m. Besides, over 98% of all the HPL parameter findings are below 20 m.

Figure 7 shows the results of values of the HPL safety levels in the GLONASS solution for the (PA) precision approach Cat. I. The obtained results for the HPL parameter range accordingly from 18.1 m to 41.2 m. In addition, the average value of the HPL parameter is equal to 25.8 m, and of the median, it equals 24.8 m. Approximately 87% of all the HPL findings are less than 30 m. Besides, over 98% of all the HPL parameter findings are below 40 m.

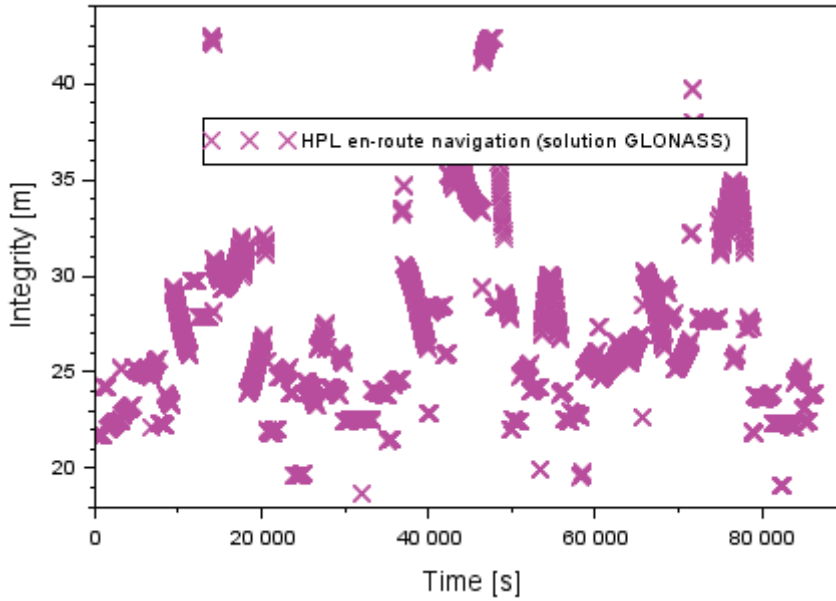


Fig. 5. HPL values for en-route navigation in the GLONASS solution

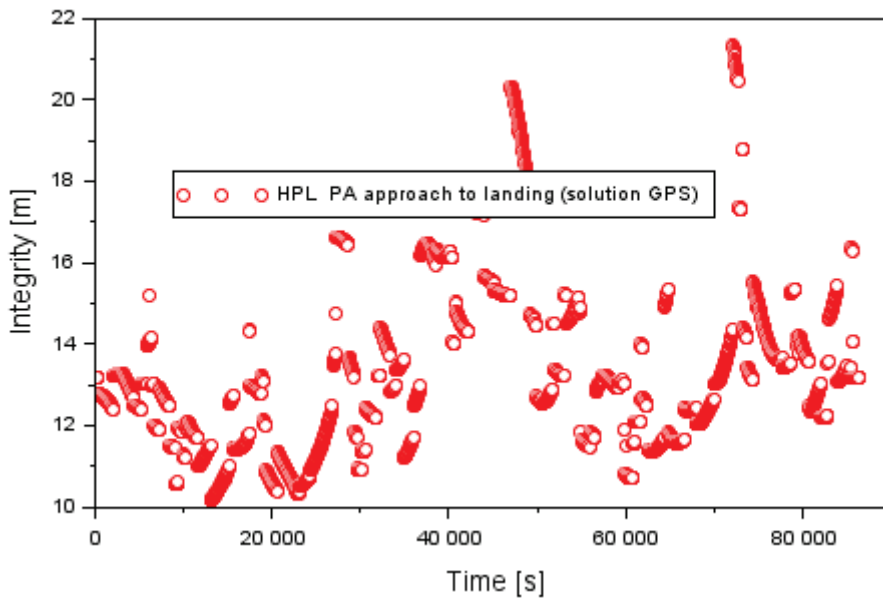


Fig. 6. HPL values for (PA) precision approach in the GPS solution

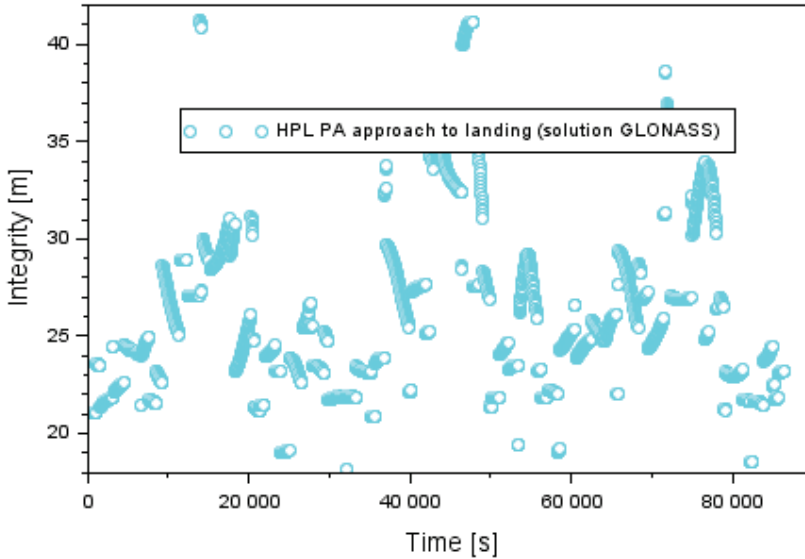


Fig. 7. HPL values for (PA) precision approach in the GLONASS solution

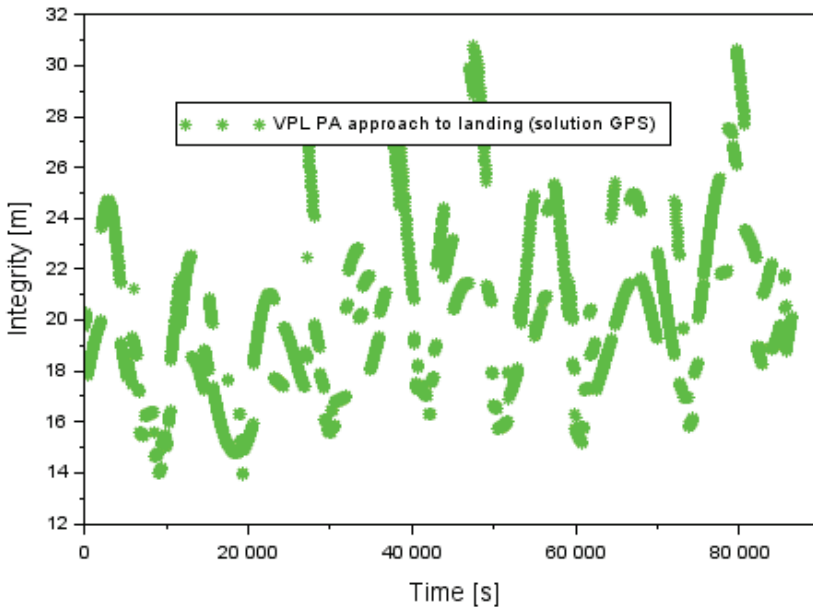


Fig. 8. VPL values for (PA) precision approach in the GPS solution

Figure 8 shows the results of values of the VPL safety levels in the GPS solution for the (PA) precision approach Cat. I. The obtained results for the VPL parameter range

accordingly from 14 m to 30.8 m. In addition, the average value of the VPL parameter is equal to 20.3 m, and of the median, it equals 20 m. Approximately 50% of all the HPL findings are less than 20 m. Besides, over 99% of all the VPL parameter findings are below 30 m.

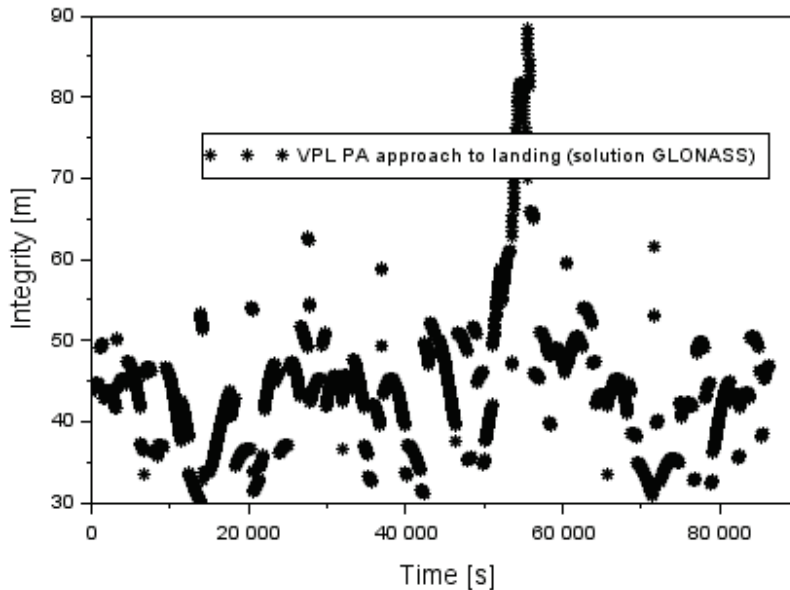


Fig. 9. VPL values for (PA) precision approach in the GLONASS solution

Figure 9 shows the results of values of the VPL safety levels in the GLONASS solution for the (PA) precision approach Cat. I. The obtained results for the VPL parameter range accordingly from 30.1 m to 88.3 m. In addition, the average value of the VPL parameter is equal to 44.1 m, and of the median, it equals 43.8 m. Approximately 29% of all the VPL findings are less than 40 m. Besides, over 84% of all the VPL parameter findings are below 50 m. Additionally, over 95% of all the VPL parameter findings are below 60 m.

5. Conclusions

The article presents the results of determining the levels of integrity of the Galileo positioning for EPDE military aerodrome in Dęblin. The integrity of the Galileo positioning was determined by means of HPL and VPL parameters, for different types of air operations. In the research, the authors used navigation data from the GNSS reference station on the grounds of the Aeronautics Faculty at the Polish Air Force University in Dęblin, located in the vicinity of EPDE military aerodrome. The experimental test was conducted on 11 January 2019. In the framework of the experimental test, the authors determined the

coordinates and average errors of the GNSS reference station coordinates, in the Galileo solution, for the SPP absolute positioning method. The obtained average errors of the Galileo coordinates were used for determining the levels of HPL and VPL reliability. On the basis on the conducted investigations, it was found that

- the average values of the HPL parameter, for en-route navigation in the Galileo solution, are higher than in the GPS solution, but lower than in the GLONASS solution;
- the average values of the HPL parameter, for the (PA) precision approach Cat. I in the Galileo solution, are higher than in the GPS solution, but lower than in the GLONASS solution;
- the average values of the VPL parameter, for the (PA) precision approach Cat. I in the Galileo solution, are higher than in the GPS solution, but lower than in the GLONASS solution;
- there is a need for further testing of the Galileo system for EPDE aerodrome in Dęblin, particularly with regard to accuracy, availability and continuity of the system services.

6. References

1. Malarski M., Banaszek K.: Wpływ precyzyjnej nawigacji obszarowej na przepustowość portu lotniczego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 4, 80, 2011.
2. Banaszek K.: *Analiza metod SIS i koncepcja ich wykorzystania podczas podejścia do lądowania według GNSS*, PWZS Chełm, 2005.
3. Jaferník H., Krasuski K., Michta J.: Assessment of suitability of radionavigation devices used in air. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, z. 90, 2016.
4. International Civil Aviation Organization: *ICAO standards and recommended practices (SARPS), Annex 10 volume I (Radio navigation aids)*, 2006.
5. Grzegorzewski M.: Navigating an aircraft by means of a position potential in three dimensional space. *Annual of Navigation*, no. 9, 2005.
6. Krasuski K.: Application of the GPS/EGNOS solution for the precise positioning of an aircraft vehicle. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, 2017, z. 96, pp 81-93.
7. Cieńko A., Grunwald G.: Examination of autonomous GPS and GPS/EGNOS integrity and accuracy for aeronautical applications, *Periodica Polytechnica Civil-Engineering*, vol. 61(4), 2017, DOI 10.3311/PPci.10022.
8. Osada E.: *Geodezja*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
9. Takasu T.: *RTKLIB ver. 2.4.2 Manual*, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, 2013, Paper available at website: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf, current on 2019.

BADANIE WIARYGODNOŚCI POZYCJONOWANIA GALILEO NA LOTNISKU W DĘBLINIE

1. Wprowadzenie

Systemy nawigacyjne GNSS wykorzystywane w lotnictwie muszą posiadać wyznaczone i określone podstawowe parametry jakości pozycjonowania satelitarnego w postaci dokładności, ciągłości, dostępności i wiarygodności [1]. Parametr dokładności oznacza różnicę pomiędzy wyznaczanymi współrzędnymi statku powietrznego a rzeczywistą pozycją odniesienia trajektorii lotu. Parametr dostępności określa funkcjonowanie systemu w określonym wymiarze czasu podczas prowadzenia nawigacji. Parametr wiarygodności określa miarę zaufania dla uzyskanych wyników nawigacji satelitarnej GNSS. Parametr ciągłości określa działania systemu nawigacji satelitarnej bez usterek i nieplanowanych awarii [2].

Obecnie wyżej wymienione parametry charakteryzują systemy satelitarne GPS i GLONASS, systemy wspomagania ABAS, SBAS i GBAS [3]. Ponadto parametry jakości pozycjonowania satelitarnego GNSS są odniesione do poszczególnych rodzajów operacji lotniczych, takich jak: nawigacja trasowa i terminalna, podejście początkowe, podejście pośrednie i podejście nieprecyzyjne NPA GNSS do lądowania, podejście z prowadzeniem pionowym APV-I, podejście z prowadzeniem pionowym APV-II, podejście precyzyjne PA kategorii I [4].

Koncepcja badania parametrów jakości pozycjonowania Galileo dla lotnisk w Polsce stanowi nowe rozwiązanie z punktu widzenia implementacji techniki satelitarnej GNSS. W Polsce dotychczas do badania jakości pozycjonowania satelitarnego GNSS były stosowane tylko systemy GPS, GLONASS i EGNOS jako system wspomagania SBAS [5, 6].

Z wymienionych parametrów jakości pozycjonowania satelitarnego GNSS to wiarygodność stanowi kluczowy element sprawdzający niezawodność przeprowadzonych obliczeń nawigacyjnych. W kontekście obliczeń nawigacyjnych w lotnictwie, wiarygodność jest określona za pomocą parametrów poziomu bezpieczeństwa w płaszczyźnie poziomej HPL oraz odpowiednio w płaszczyźnie pionowej VPL. Dla wykonywanych przez pilota operacji lotniczych, wiarygodność jest gwarancją uzyskania prawidłowych wyników pozycji statku powietrznego w czasie lotu. W związku z tym wzrasta zaufanie pilota do odczytów z pokładowych urządzeń nawigacyjnych, tym bardziej do odbiornika GNSS oraz sprzężonego z nim komputera zarządzającego lotem FMS.

Głównym celem prezentowanej pracy jest badanie wiarygodności pozycjonowania Galileo na terenie lotniska w Dęblinie. Wartości wiarygodności zostały określone dla

nawigacji typu *en-route* oraz podejścia precyzyjnego PA kat. I. Do badań wiarygodności wykorzystano dane ze stacji referencyjnej GNSS w Dęblinie, zlokalizowanej na terenie Wydziału Lotnictwa Lotniczej Akademii Wojskowej.

2. Model matematyczny

Podstawowe algorytm wyznaczenia poziomów wiarygodności HPL oraz VPL uwzględnia wpływ współczynników określających typ operacji lotniczej oraz uzyskane błędy średnie wyznaczonych współrzędnych odbiornika GNSS. Wzór określający poziomy bezpieczeństwa HPL oraz VPL można przedstawić jak poniżej [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} HPL = k_H \cdot \sqrt{\frac{m_L^2 + m_B^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_L^2 - m_B^2}{2}\right)^2 + m_{BL}^2}} \\ VPL = k_V \cdot m_h \end{array} \right. \quad (1)$$

gdzie:

- k_H – współczynnik określający nawigację w płaszczyźnie poziomej,
- $k_H = 6.0$ – dla podejścia precyzyjnego PA,
- $k_H = 6.18$ – dla nawigacji typu *en-route*,
- k_V – współczynnik określający nawigację w płaszczyźnie pionowej,
- $k_V = 5.33$ – dla podejścia precyzyjnego PA,
- m_B – odchylenie standardowe dla współrzędnej B,
- m_L – odchylenie standardowe dla współrzędnej L,
- m_{BL}^2 – wariancja składowych B i L,
- m_h – odchylenie standardowe dla współrzędnej h.

Wartości współczynników k_H oraz k_V zostały określone dla poszczególnych rodzajów operacji lotniczych, głównie nawigacji trasowej oraz procedury precyzyjnego podejścia PA. Ponadto wartości odchyłeń standardowych (błędów średnich) współrzędnych elipsoidalnych BLh zostały określone na podstawie macierzy wariancyjno-kowariancyjnej \mathbf{m}_{BLh} , jak poniżej [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_B = \sqrt{\mathbf{m}_{BLh}(1,1)} \\ m_L = \sqrt{\mathbf{m}_{BLh}(2,2)} \\ m_h = \sqrt{\mathbf{m}_{BLh}(3,3)} \end{array} \right. \quad (2)$$

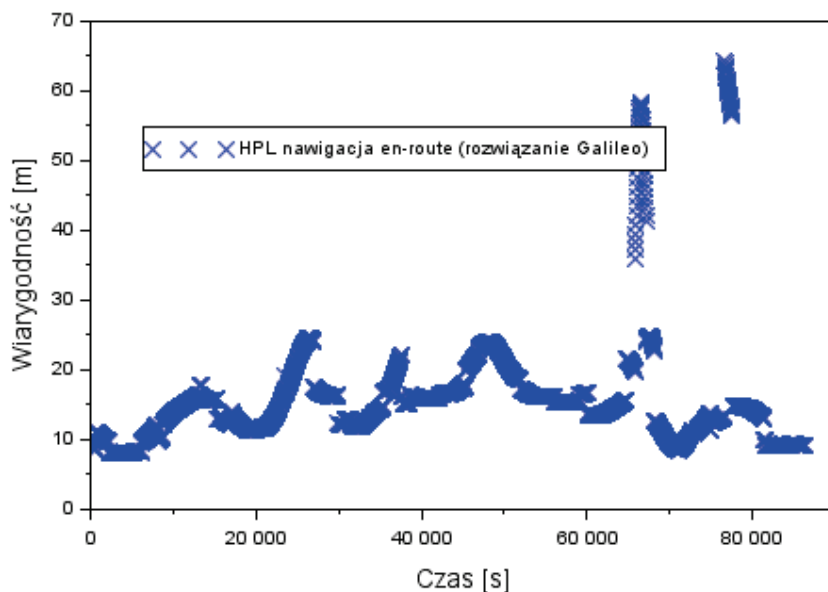
gdzie:

\mathbf{m}_{BLh} – macierz wariancyjno-kowariancyjna błędów średnich współrzędnych elipsoidalnych BLh,

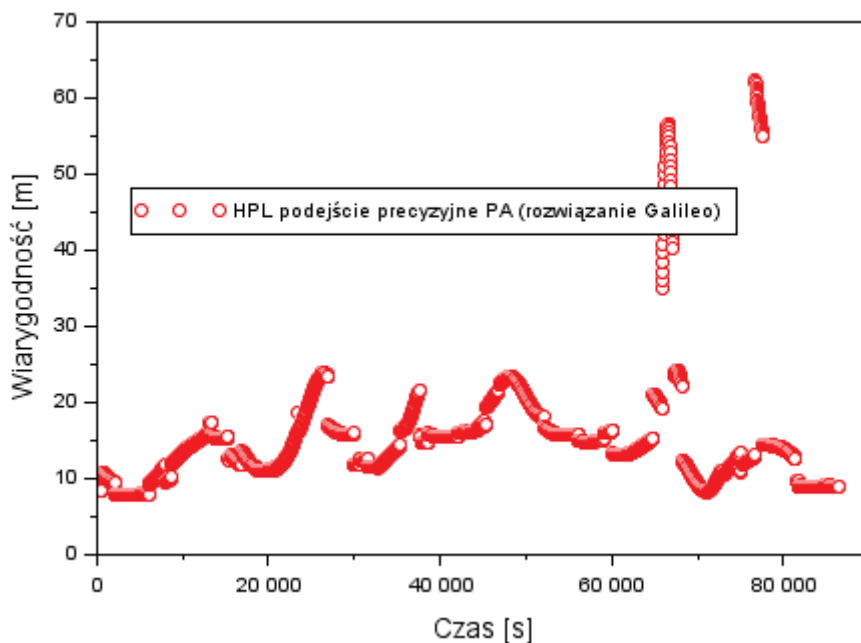
$$\mathbf{m}_{BLh} = \begin{bmatrix} m_B^2 & m_{BL}^2 & m_{Bh}^2 \\ m_{BL}^2 & m_L^2 & m_{Lh}^2 \\ m_{Bh}^2 & m_{Lh}^2 & m_h^2 \end{bmatrix}$$

3. Test badawczy oraz wyniki

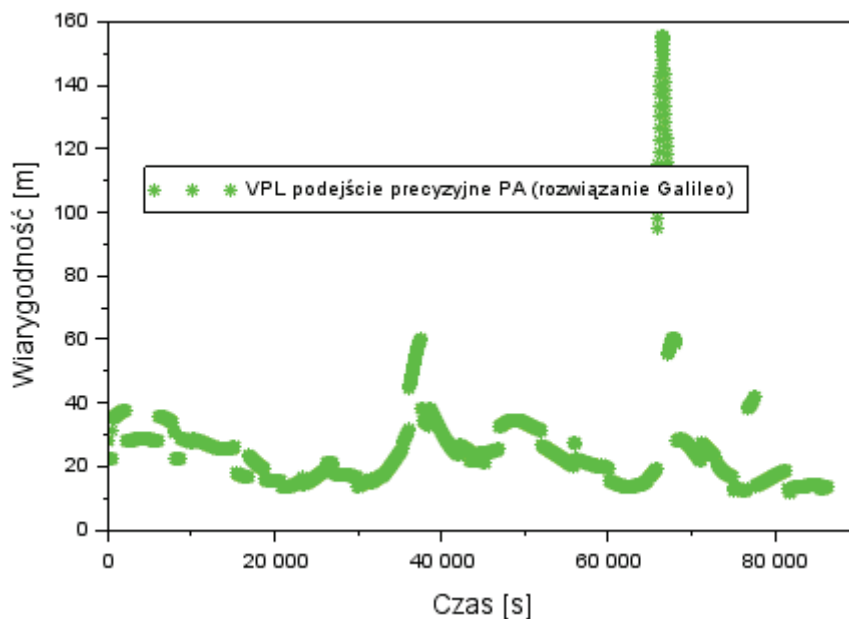
W teście badawczym wyznaczono poziomy wiarygodności HPL oraz VPL dla systemu satelitarnego Galileo. Wykorzystano dane nawigacyjne ze stacji referencyjnej GNSS zlokalizowanej na terenie Wydziału Lotnictwa Lotniczej Akademii Wojskowej w Dęblinie, położonej nieopodal infrastruktury technicznej lotniska wojskowego EPDE w Dęblinie. W szczególności w pracy wykorzystano wartości błędów średnich wyznaczenia współrzędnych stacji referencyjnej GNSS z rozwiązania Galileo. Błędy średnie współrzędnych stacji referencyjnej GNSS w układzie elipsoidalnym BLh zostały określone metodą kodową SPP. Test badawczy został przeprowadzony 11.01.2019 r. dla dobowych obserwacji Galileo. Badania oraz obliczenia numeryczne przeprowadzono w programie RTKLIB v.2.4.2 [9].



Rys. 1. Wartości HPL na nawigacji en-route z rozwiązania Galileo



Rys. 2. Wartości HPL na podejście precyzyjne PA z rozwiązania Galileo



Rys. 3. Wartości VPL na podejście precyzyjne PA z rozwiązania Galileo

Na rys. 1 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa HPL z rozwiązania Galileo na nawigacji typu *en-route*. Uzyskane wyniki parametru HPL wynoszą odpowiednio od 7,9 m do 64,2 m. Ponadto wartość średnia parametru HPL jest równa 15,6 m, zaś mediana wynosi 14,6 m. Około 15% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 10 m. Z kolei ponad 85% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 20 m. Ponadto ponad 97% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 30 m. Dla nawigacji typu *en-route* zgodnie z rekomendacją ICAO maksymalne poziomy bezpieczeństwa HPL wynoszą odpowiednio: 7400 m podczas lotu nad oceanami, 3700 m podczas lotu nad kontynentami oraz 1850 m w fazie operacji terminalnej [4]. W związku z tym można zauważyć, że uzyskane wyniki badań parametru HPL nie przekraczają granicznych wartości alertów bezpieczeństwa dla wykonywania operacji lotniczej typu *en-route*.

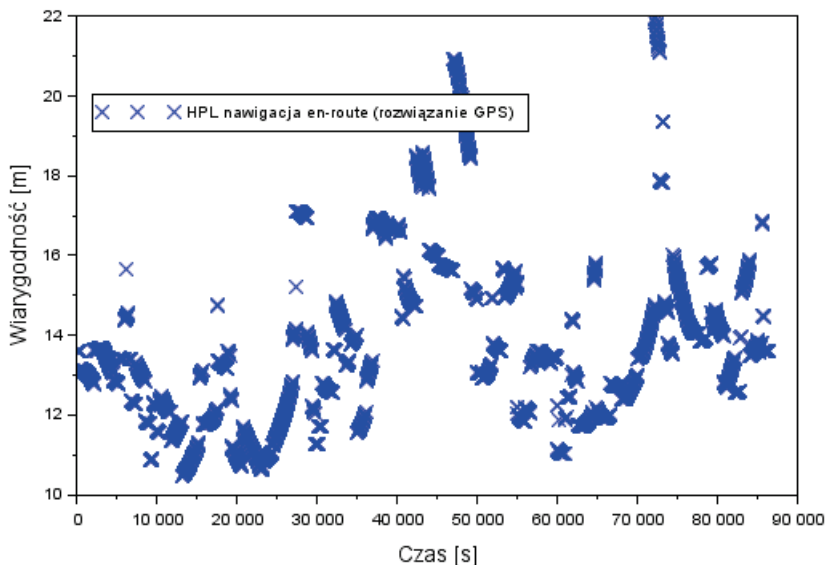
Na rys. 2 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa HPL z rozwiązania Galileo na operacji lotniczej podejścia precyzyjnego PA kat. I samolotu do lądowania. Uzyskane wyniki parametru HPL wynoszą odpowiednio od 7,7 m do 62,4 m. Ponadto wartość średnia parametru HPL jest równa 15,1 m, zaś mediana wynosi 14,2 m. Około 17% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 10 m. Z kolei ponad 75% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 20 m. Ponadto ponad 97% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 30 m. Dla podejścia precyzyjnego PA kat. I zgodnie z rekomendacją ICAO maksymalny poziom bezpieczeństwa HPL wynosi 40 m [4]. Można zauważyć, że uzyskane wyniki badań parametru HPL dla 76 epok pomiarowych przekraczają poziom alertu granicznego 40 m. Dla reszty epok pomiarowych wartości poziomów bezpieczeństwa są mniejsze od 40 m.

Na rys. 3 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa VPL z rozwiązania Galileo na operacji lotniczej podejścia precyzyjnego PA kat. I samolotu do lądowania. Uzyskane wyniki parametru VPL wynoszą odpowiednio od 11,9 m do 155,7 m. Ponadto wartość średnia parametru VPL jest równa 25,1 m, zaś mediana wynosi 22 m. Około 81% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 30 m. Z kolei ponad 95% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 40 m. Ponadto ponad 96% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 50 m. Dla podejścia precyzyjnego PA kat. I zgodnie z rekomendacją ICAO maksymalny poziom bezpieczeństwa VPL wynosi do 35 m [4]. Można zatem zauważyć, że uzyskane wyniki badań parametru VPL dla 268 epok pomiarowych przekraczają poziom alertu granicznego 35 m. Dla reszty epok pomiarowych wartości poziomów bezpieczeństwa są mniejsze od 35 m.

4. Dyskusja

W ramach dyskusji porównano uzyskane wyniki wiarygodności z rozwiązania Galileo oraz odpowiednio z rozwiązania GPS i GLONASS. Test badawczy przeprowadzono dla stacji referencyjnej GNSS w Dęblinie z użyciem dobowych obserwacji kodowych GPS i GLONASS 11.01.2019 r. Współrzędne i błędy średnie współrzędnych z rozwiązania

GPS i GLONASS zostały wyznaczone również z metody absolutnej SPP w układzie współrzędnych elipsoidalnych BLh.

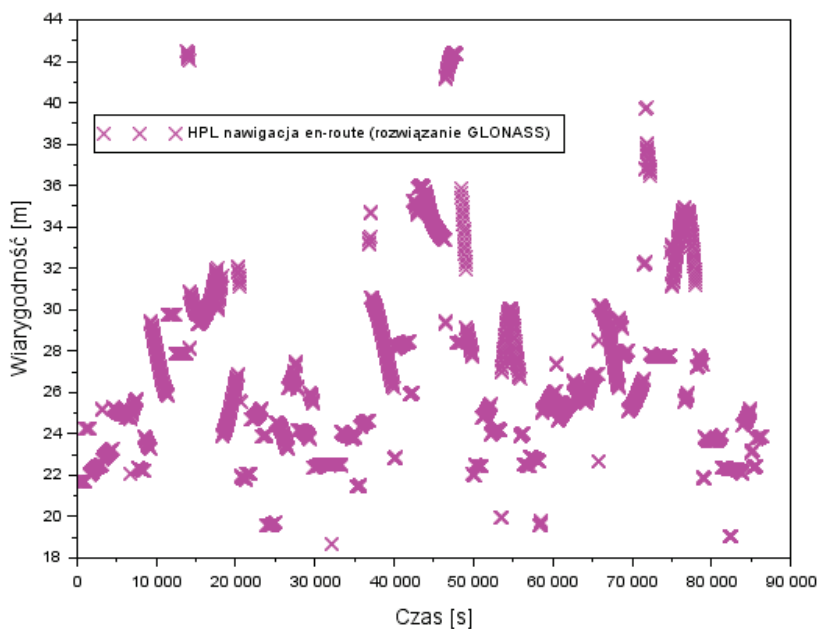


Rys. 4. Wartości HPL na nawigacji en-route z rozwiązania GPS

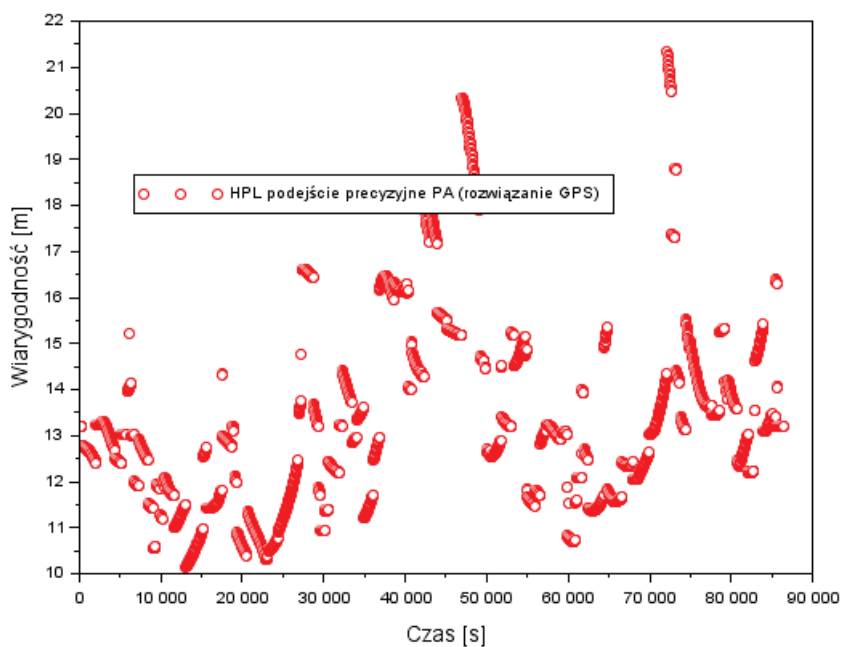
Na rys. 4 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa HPL z rozwiązania GPS na nawigacji typu *en-route*. Uzyskane wyniki parametru HPL wynoszą odpowiednio od 10,5 m do 22 m. Ponadto wartość średnia parametru HPL jest równa 13,7 m, zaś mediana wynosi 13,5 m. Około 75% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 15 m. Z kolei ponad 98% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 20 m.

Na rys. 5 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa HPL z rozwiązania GLONASS na nawigacji typu *en-route*. Uzyskane wyniki parametru HPL wynoszą odpowiednio od 18,7 m do 42,5 m. Ponadto wartość średnia parametru HPL jest równa 26,6 m, zaś mediana wynosi 25,6 m. Około 84% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 30 m. Z kolei ponad 98% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 40 m.

Na rys. 6 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa HPL z rozwiązaniem GPS dla podejścia precyzyjnego PA kat. I. Uzyskane wyniki parametru HPL wynoszą odpowiednio od 10,2 m do 21,3 m. Ponadto wartość średnia parametru HPL jest równa 13,3 m, zaś mediana wynosi 13 m. Około 82% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 15 m. Z kolei ponad 98% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 20 m.

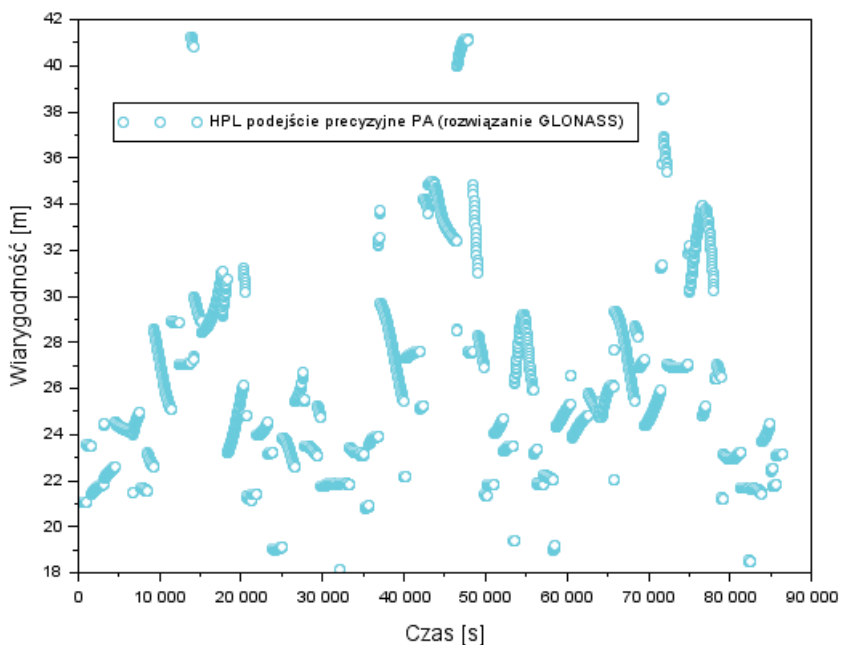


Rys. 5. Wartości HPL na nawigacji en-route z rozwiązania GLONASS



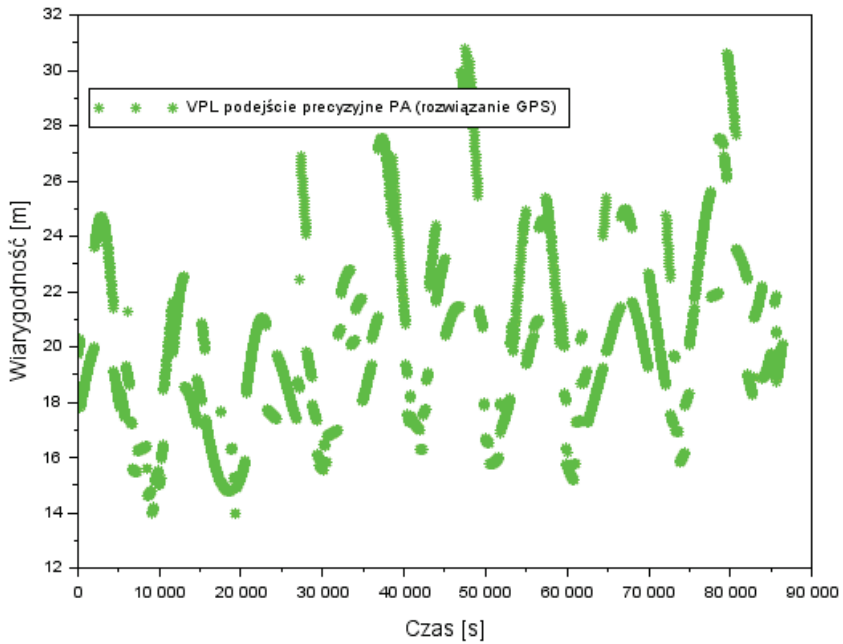
Rys. 6. Wartości HPL na podejścia precyzyjnego PA z rozwiązania GPS

Na rys. 7 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa HPL z rozwiązania GLONASS dla podejścia precyzyjnego PA kat. I. Uzyskane wyniki parametru HPL wynoszą odpowiednio od 18,1 m do 41,2 m. Ponadto wartość średnia parametru HPL jest równa 25,8 m, zaś mediana wynosi 24,8 m. Około 87% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 30 m. Z kolei ponad 98% wszystkich wyników parametru HPL jest mniejsza niż 40 m.

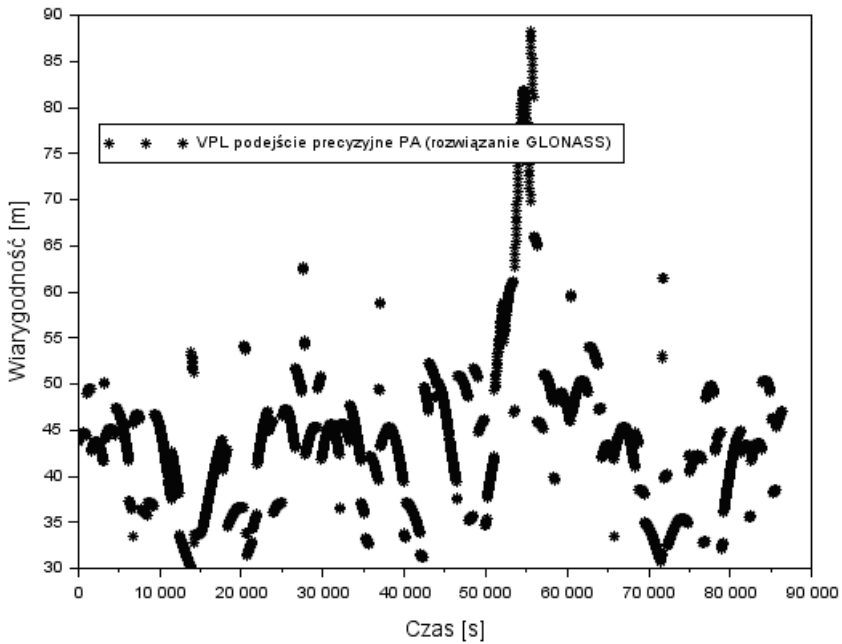


Rys. 7. Wartości HPL na podejścia precyzyjnego PA z rozwiązania GLONASS

Na rys. 8 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa VPL z rozwiązania GPS dla podejścia precyzyjnego PA kat. I. Uzyskane wyniki parametru VPL wynoszą odpowiednio od 14 m do 30,8 m. Ponadto wartość średnia parametru VPL jest równa 20,3 m, zaś mediana wynosi 20 m. Około 50% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 20 m. Z kolei ponad 99% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 30 m.



Rys. 8. Wartości VPL na podejścia precyzyjne PA z rozwiązania GPS



Rys. 9. Wartości VPL na podejścia precyzyjne PA z rozwiązania GLONASS

Na rys. 9 pokazano wyniki wartości poziomów bezpieczeństwa VPL z rozwiązania GLONASS dla podejścia precyzyjnego PA kat. I. Uzyskane wyniki parametru VPL wynoszą odpowiednio od 30,1 m do 88,3 m. Ponadto wartość średnia parametru VPL jest równa 44,1 m, zaś mediana wynosi 43,8 m. Około 29% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 40 m. Z kolei ponad 84% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 50 m. Dodatkowo ponad 95% wszystkich wyników parametru VPL jest mniejsza niż 60 m.

5. Wnioski

W artykule przedstawiono rezultaty wyznaczenia poziomów wiarygodności pozycjonowania Galileo dla lotniska wojskowego EPDE w Dęblinie. Wiarygodność pozycjonowania Galileo została określona przy pomocy parametrów HPL oraz VPL dla różnych typów operacji lotniczych. W badaniach wykorzystano dane nawigacyjne ze stacji referencyjnej GNSS zlokalizowanej na terenie Wydziału Lotnictwa Lotniczej Akademii Wojskowej w Dęblinie, położonej w pobliżu lotniska wojskowego EPDE. Test badawczy został przeprowadzony w dniu 11.01.2019 r. W ramach testu badawczego określono współrzędne i błędy średnie współrzędnych stacji referencyjnej GNSS z rozwiązania Galileo dla metody pozycjonowania absolutnego SPP. Uzyskane błędy średnie współrzędnych Galileo posłużyły do określenia poziomów wiarygodności HPL oraz VPL. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że

- średnie wartości parametru HPL dla nawigacji typu en-route z rozwiązania Galileo są większe niż z rozwiązania GPS, ale mniejsze niż z rozwiązania GLONASS,
- średnie wartości parametru HPL dla podejścia precyzyjnego PA kat. I z rozwiązania Galileo są większe niż z rozwiązania GPS, ale mniejsze niż z rozwiązania GLONASS,
- średnie wartości parametru VPL dla podejścia precyzyjnego PA kat. I z rozwiązania Galileo są większe niż z rozwiązania GPS, oraz mniejsze niż z rozwiązania GLONASS,
- potrzeba dalszych testów systemu Galileo dla lotniska EPDE w Dęblinie, szczególnie pod kątem dokładności, dostępności i ciągłości usługi systemu.

6. Literatura

1. Malarski M., Banaszek K.: Wpływ precyzyjnej nawigacji obszarowej na przepustowość portu lotniczego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 4, 80, 2011.
2. Banaszek K.: *Analiza metod SIS i koncepcja ich wykorzystania podczas podejścia do lądowania według GNSS*, PWZS Chełm, 2005.

3. Jaferník H., Krasuski K., Michta J.: Assessment of suitability of radionavigation devices used in air. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, z. 90, 2016.
4. International Civil Aviation Organization: ICAO standards and recommended practices (SARPS), Annex 10 volume I (Radio navigation aids), 2006.
5. Grzegorzewski M.: Navigating an aircraft by means of a position potential in three dimensional space. *Annual of Navigation*, no. 9, 2005.
6. Krasuski K.: Application of the GPS/EGNOS solution for the precise positioning of an aircraft vehicle. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, 2017, z. 96, pp 81-93.
7. Ciećko A., Grunwald G.: Examination of autonomous GPS and GPS/EGNOS integrity and accuracy for aeronautical applications, *Periodica Polytechnica Civil-Engineering*, vol. 61(4), 2017, DOI 10.3311/PPci.10022.
8. Osada E.: *Geodezja*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
9. Takasu T.: RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, 2013, Paper available at website: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf, current on 2019.