

ACCURACY ASSESSMENT OF AIRCRAFT POSITIONING BY USING THE DGLONASS METHOD IN THE GBAS SYSTEM

OCENA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA STATKU POWIETRZNEGO Z UŻYCIEM METODY DGLONASS W SYSTEMIE GBAS

Kamil Krasuski, Janusz Ćwiklak, Norbert Grzesik

Air Force Academy in Dęblin

Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Wydział Lotnictwa

Abstract: *The paper presents the accuracy results of aircraft positioning using the DGLONASS method in the GBAS augmentation system in air transport. In the research test, the coordinates of Cessna 172 aircraft were recovered on the basis of the DGLONASS technique. The calculations were executed in RTKLIB software in RTKPOST library in module "DGPS/DGNSS". The raw GLONASS data from the onboard Topcon HiperPro receiver and also from the REF1 physical reference station were utilized in the research test. In the paper, the standard deviations of aircraft coordinates and integrity HPL and VPL parameters were presented and described. In the paper, the obtained aircraft coordinates from the DGLONASS method were compared and verified with the DGPS solution. For this purpose, the RMS-3D term and difference of ellipsoidal height of aircraft were estimated in the paper. The average value of RMS-3D equals to 1.71 m, however the difference of ellipsoidal height amounts to 1.46 m, respectively.*

Keywords: GLONASS, ICAO, GBAS system, accuracy, integrity

Streszczenie: *Artykuł przedstawia rezultaty dokładności pozycjonowania samolotu z użyciem metody DGLONASS w systemie wspomagania GBAS w transporcie lotniczym. W teście badawczym odtworzono współrzędne samolotu Cessna 172 na podstawie rozwiązania DGLONASS. Obliczenia wykonano w programie RTKLIB w bibliotece RTKPOST w module „DGPS/DGNSS”. Surowe dane GLONASS z pokładowego odbiornika Topcon HiperPro i fizycznej stacji referencyjnej REF1 zostały wykorzystane w teście badawczym. W pracy przedstawiono i opisano odchylenia standardowe współrzędnych samolotu oraz poziomy wiarygodności HPL/VPL. W artykule dokonano porównania i weryfikacji uzyskanych współrzędnych samolotu z rozwiązania DGLONASS oraz DGPS. W tym celu w artykule wyznaczono parametr RMS-3D oraz różnicę wysokości elipsoidalnej samolotu. Wartość średnia parametru RMS-3D wynosi 1.71 m, zaś odpowiednio różnica wysokości elipsoidalnej samolotu wynosi 1.46 m.*

Słowa kluczowe: GLONASS, ICAO, system GBAS, dokładność, wiarygodność

ACCURACY ASSESSMENT OF AIRCRAFT POSITIONING BY USING THE DGLONASS METHOD IN THE GBAS SYSTEM

1. Introduction

In accordance with the ICAO technical standards, satellite GNSS navigation systems can be used for precise positioning of the aircraft. Currently, ICAO has identified the certification and admission into service in civil aviation of two global navigation systems - GPS and GLONASS [1]. The GPS satellite system is the property of the United States of America, whereas the navigation system GLONASS belongs to the Russian Federation. The GLONASS system can be used within the framework of the augmentation systems ABAS, SBAS and GBAS in air transport. In the framework of the ABAS system, it is possible to develop and implement the GLONASS system for the RAIM controller module of the GNSS satellite receiver. This is particularly important for continuity, reliability and accuracy of satellite positioning with the system GLONASS in civil aviation [2]. Within the SBAS augmentation component, it is possible to find a common navigation solution of the user position with the GLONASS system and geostationary GNSS systems [3]. Therefore, in the SBAS augmentation system, it is possible to integrate the observation of several GNSS navigation systems for determining the user position. Moreover, the GLONASS satellite system can be implemented in this type of a solution. At present, the GLONASS system can be used with the geostationary systems EGNOS, GAGAN, SDCM and WAAS in precision navigation positioning over a vast area of the earth. The GLONASS system is also implemented within the augmentation system GBAS for the differential techniques DGLONASS [4] and RTK-OTF [5]. In the differential technique DGLONASS, the code measurements from the reference station and the mobile receiver are used in order to determine the position of the user. On the other hand, in the differential technique RTK-OTF, the phase measurements from the reference station and the mobile receiver are used in order to determine the position of the user.

The differential technique DGLONASS can be used both in static GNSS measurements [6] as well as in the kinematic mode [7]. It is particularly important to use the differential technique DGLONASS in the kinematic mode in air navigation. In Poland the differential technique DGLONASS was used to determine the position of the aircraft for the needs of precise air navigation. The research work [8] utilizes the differential DGLONASS technique to recover the flight trajectory of a TS 11 Spark in Real Time Kinematic (RTK) mode. The air experiment was conducted in the vicinity of the military airfield in Dęblin. In the course of the experiment, the geodetic receiver GG 24 was mounted on board TS 11 Iskra aircraft, which recorded raw GPS/GLONASS observations. In addition, on the roof of the Aeronautics Faculty at the Air Force Academy in Dęblin, the receiver GG 24 was also installed for the needs of using the differential DGLONASS technique in aircraft positioning.

The difference of the horizontal coordinates of the aircraft TS 11 Iskra between the solutions DGLONASS and RTK-OTF mounted to ± 100 m for the time scale shift of 1 second. Moreover, the difference of the ellipsoidal height of the TS 11 Iskra aircraft, between the solutions DGLONASS and RTK-OTF, amounted to ± 70 m for the time scale shift of 1 second. An air experiment around the town of Powidz was similar in its character. The aim of the air experiment was to recover the real position of a Su22M4 aircraft during a flight test. For the needs of the experiment, the geodetic receiver GG 24 was mounted on board the Su22M4 aircraft, which recorded raw GPS/GLONASS observations. In the course of the experiment, however, problems connected with storing raw GLONASS data in the geodetic receiver GG 24 emerged. The consequence of this was the lack of the ability to apply the differential technique DGLONASS to recover the aircraft flight path Su22M4 [9].

The authors of this article presented, in their research work, the application of the measurement technique DGLONASS for the GBAS system in air transport. The primary objective of this article is to evaluate the accuracy of positioning a Cessna 172 aircraft by means of the differential technique DGLONASS. The paper shows the results of the standard deviations of geodetic coordinates BLh of Cessna 172 aircraft. Furthermore, the work determined the values of the levels of reliability of satellite positioning HPL and VPL. The obtained values of aircraft coordinates were compared with the differential technique DGPS in the post-processing mode. The research material for the analysis comes from an air experiment conducted in Dęblin in 2010.

2. Research method

The basic observation equation for code measurements in the differential technique DGLONASS is described as below [10]:

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{AB,1}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \nabla \Delta I_{AB,1}^{ij} + \nabla \Delta T_{AB}^{ij} + \nabla \Delta M_{P1} \\ \nabla \Delta P_{AB,2}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \nabla \Delta I_{AB,2}^{ij} + \nabla \Delta T_{AB}^{ij} + \nabla \Delta M_{P2} \end{cases} \quad (1)$$

where:

- ∇ - the operator of the dual difference for phase measurements allows comparing the difference in phase measurements for two satellites tracked by two receivers,
- Δ - the operator of a single difference for phase measurements allows determining the difference in phase measurements for two satellites tracked by one receiver,
- \overline{AB} - vector between the base station (\overline{A}) and a mobile receiver (\overline{B}) mounted on board the aircraft,

$P_{AB,1}^{ij}$ - value of dual code difference (expressed in metres) on the vector \overline{AB} between the satellites i and j on the L1 frequency in the GLONASS system;

$P_{AB,2}^{ij}$ - value of dual code difference (expressed in metres) on the vector \overline{AB} between the satellites i and j on the L2 frequency in the GLONASS system;

ρ_{AB}^{ij} - geometric distance of the vector \overline{AB} for the dual code difference (expressed in geocentric coordinates XYZ),

$I_{AB,1}^{ij}$ - value of ionospheric delay on L1 frequency for dual code difference;

$I_{AB,2}^{ij}$ - value of ionospheric delay on L2 frequency for dual code difference;

$I_{AB,2}^{ij} = \gamma \cdot I_{AB,1}^{ij}$ - relationship of ionospheric delay on L1 and L2 frequency.

$\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2$ scaling coefficient

f_1 - frequency L1 in the GLONASS system,

f_2 - frequency L2 in the GLONASS system,

T_{AB}^{ij} - value of tropospheric delay for dual code difference;

M_{P1} - multipath effect and measurement noise at frequency L1 for code measurements

M_{P2} - multipath effect and measurement noise at frequency L2 for code measurements.

The mathematical model of equation (1) is solved using the Kalman filter in a two-stage stochastic process [11]:

1) stage of prediction:

$$x_p = A \cdot x_{k-1} \quad (2)$$

$$P_p = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q_{k-1} \quad (3)$$

where:

A_0 - matrix of coefficients,

x_0 - estimating the values of the designated parametres a priori from the previous step,

P_0 - estimating the values of covariance a priori from the previous step,

x_p - prediction of state value,

P_p - predicted covariance values,

Q_0 - variance matrix of the disturbances of the measurement process.

2) stage of correction:

$$K_k = P_p \cdot H^T \cdot (H \cdot P_p \cdot H^T + R)^{-1} \quad (4)$$

$$x_k = x_p + K_k \cdot (z - H \cdot x_p) \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_p \quad (6)$$

where:

R - covariance matrix of measurements

H - matrix of partial derivatives,

K_k - Kalman gain matrix,

z - vector of measured values,

I - unit matrix,

x_k - parameters determined a posteriori,

P_k - covariance matrix of parameters determined a posteriori.

The standard deviation of the coordinate system in the geocentric system of coordinates XYZ for the DGLONASS technique is described by the following dependency:

$$\begin{cases} mx_{DGLO} = P_K(1,1) \\ my_{DGLO} = P_K(2,2) \\ mz_{DGLO} = P_K(3,3) \end{cases} \quad (7)$$

where:

mx_{DGLO} - standard deviation of the X coordinate of the aircraft,

my_{DGLO} - standard deviation of the Y coordinate of the aircraft,

mz_{DGLO} - standard deviation of the Z coordinate of the aircraft,

The standard deviation of the aircraft position for the DGLONASS technique can also be expressed in the geodetic system BLh (geodetic latitude and longitude, ellipsoidal height), described as follows:

$$\begin{cases} Q = R \cdot P_k \cdot R^T \\ mB_{DGLO} = \sqrt{Q(1,1)} \\ mL_{DGLO} = \sqrt{Q(2,2)} \\ mh_{DGLO} = \sqrt{Q(3,3)} \end{cases} \quad (8)$$

where:

R - matrix of transition from the geocentric system of coordinates XYZ to the geodetic system BLh,

$$R = \begin{bmatrix} -\sin(B)\cos(L) & -\sin(B)\sin(L) & \cos(B) \\ -\sin(L) & \cos(L) & 0 \\ \cos(B)\cos(L) & \cos(B)\sin(L) & \sin(B) \end{bmatrix},$$

mB_{DGLO} - standard deviation of the geodetic latitude B,

mL_{DGLO} - standard deviation of the geodetic longitude L,

mh_{DGLO} - standard deviation of the ellipsoidal height h.

On the basis of the observation equation (1), the aircraft coordinates are determined in the geocentric system of coordinates XYZ for the differential technique DGLONASS. Due to similarity transformation, the aircraft coordinates in the geocentric system XYZ may be expressed in the geodetic system BLh [12]. In addition, the equations (7) and (8) allow specifying the positioning accuracy of the aircraft in the geocentric system XYZ and the geodetic system BLh.

3. Experiment research and test results

In the research test, the authors checked the possibility of implementation of the differential techniques DGLONASS in air transport. For this purpose, they recovered the flight path of the Cessna 172 on the basis of the solution DGLONASS. The computation uses the archive navigation data GLONASS derived from the scientific project: „System monitorowania ruchu statków powietrznych i pojazdów użytkowanych przez służby porządku publicznego z wykorzystaniem GNSS”, conducted by the Aeronautics Faculty at the Air Force Academy from 2009-2011 [13]. One of the tasks of the research carried out in the project was to recover the coordinates of the aircraft Cessna 172 during a flight test for the military airfield in Dęblin, in June 2010 (Fig. 1).

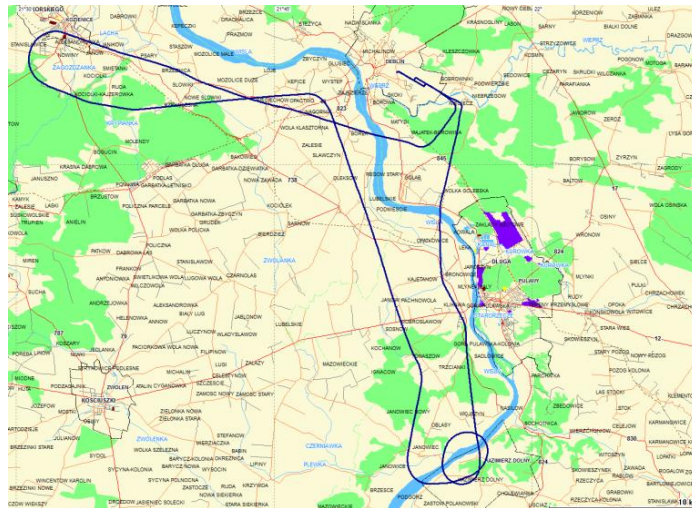


Fig. 1 Trajectory of the flight of the Cessna 172

In the framework of executing the air test, it was possible to register aircraft navigation parameters for the measurement system SAMSET, the geodetic receiver Topcon HiperPro and the receiver Thales Mobile Mapper. The dual frequency geodetic receiver Topcon HiperPro enabled recordings of raw GPS/GLONASS observations in the kinematic mode with a 1 second interval. In addition, on the roof of the Aeronautics Faculty at the Air Force Academy in Dęblin, the receiver Topcon HiperPro for the reference station REF1 with the feature of tracking the constellation of GPS /GLONASS satellites was mounted. The configuration of the technical infrastructure reference station-mobile receiver gave the possibility to apply the differential techniques DGLONASS for precise positioning of the aircraft Cessna 172.

The calculations of the Cessna 172 aircraft were made in RTKLIB programme, in RTKPOST library, in module „DGPS/DGNSS”. In the calculations there were used:

- the observation file RINEX topc152j.10o was stored on the memory card of the mobile receiver Topcon HiperPro mounted on the Cessna 172 aircraft;
- the navigation file RINEX topc152j.10n was stored on the memory card of the mobile receiver Topcon HiperPro mounted on the Cessna 172 aircraft;
- the observation file RINEX base152j.10n was stored on the memory card of the receiver Topcon HiperPro mounted on the reference station REF1 in Dęblin.

For the sake of making the calculations, the „DGPS/DGNSS” application module in RTKPOST library in RTKLB programme was configured as below [14]:

- GNSS system: GLONASS system,
- GNSS observations: code observations P1/P2 in the G GLONASS system,
- construction of observation equations: dual difference for code observations in the GLONASS system,
- data source of ephemeris GLONASS satellites: GLONASS navigation data message,
- source of GLONASS observation: RINEX 2.11 file,
- method of determining coordinates of the GPS satellites: based on RG4 (the Runge-Kutta) method,
- correction of pseudo-distance from the satellite to the receiver antenna: applied,
- effect of the Earth's rotation: applied,
- Sagnac effect: applied
- correction of satellite clock: eliminated,
- relativistic effects: eliminated,
- IFCB hardware delay for satellites: eliminated,
- IFCB hardware delay for the receiver: eliminated,
- model of troposphere: Saastamoinen,
- model of ionospheric correction: Klobuchar model,
- satellite antenna phase centre: based on the ANTEX IGS08 file,
- elevation angle: 10°,
- observation weighting: YES
- initial values of aircraft coordinates: based on the RINEX file header,
- system of coordinates: geocentric XYZ and ellipsoidal BLh (ultimately ETRF '89),

- method of calculations: Kalman filtering ahead,
- positioning method: DGPS/DGNSS,
- positioning mode: kinematic,
- computational mode: post-processing,
- interval of calculations: 1 s,
- gross error detection in GLONASS measurements: the algorithm of the RAIM module,
- number of iterations in the measurement epoch: 5,
- maximum value of the DOP coefficient: 30,
- final recording of coordinates: coordinates in the geocentric system XYZ and the ellipsoidal system BLh,
- correction of receiver clock: eliminated,
- geodynamic and tidal effects- applied,
- mobile receiver Topcon HiperPro mounted in Cessna 172 aircraft,
- base receiver Topcon HiperPro mounted on the reference station REF1 on the roof of the Aeronautics Faculty at the Air Force Academy in Dęblin.

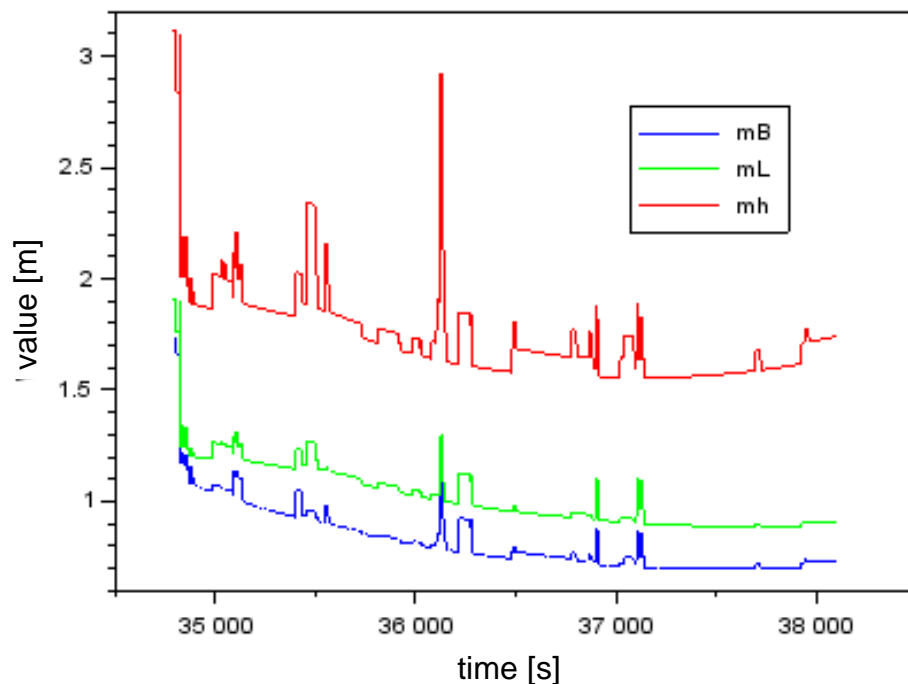


Fig. 2 Standard deviations of BLh coordinates of the aircraft

Fig. 2 shows the values of the standard deviations of geodetic coordinates BLH of the aircraft Cessna 172 on the basis of the solution of the differential technique DGLONASS (see equation 8). The average value of the parameter mB is 0.83 m and of the median it is 0.76 m. The dispersion of the results obtained of the parameter mB ranges from 0.70 m to 1.74 m. The average value of the parameter

mL equals 1.02 m, whereas of the median - 0.96 m. The dispersion of the obtained results of parameter mL ranges from 0.89 m to the level of 1.91 m. The mean value of the parametre mh ranges from 1.56 m to 3.12 m. It should be stressed that the trend of parametre results (mB, mL, mh) is on the decrease during the experiment. It can therefore be concluded that the accuracy of determining the position increases with the duration of the air test.

Technical standards contained in ICAO 10 Annex "Radio Navigation Aids" to the Chicago Convention determine the range of exploitation of the GBAS system in air transport [1]. The GBAS system is permitted into operation provided it has clear values of technical parameters such as the accuracy or reliability of satellite positioning in aviation. Ultimately, in the GBAS system there are two measurement techniques used, i.e. DGNSS (e.g. DGPS or DGLONASS) and RTK-OTF for the GNSS navigation systems. The GBAS system is designed for the precision approach category I. The assumed horizontal accuracy of determining the position of the aircraft is 16 m in accordance with the technical ICAO standards. The obtained results during the testing of accuracy of satellite positioning for conducting horizontal navigation LNAV are above 2 m. Besides, the assumed vertical accuracy of determining the position of the aircraft ranges between 4m - 6m, maximum, in accordance with the ICAO technical standards. The obtained results during the testing of accuracy of satellite positioning for vertical navigation LNAV are above 4 m. Thus, it can be concluded that the proposed research method DGLONASS for the GBAS system meets the accuracy criteria for the exploitation of the GBAS system in air transport. It should be emphasized that the obtained results were determined in the computational post-processing mode and must be verified for real time.

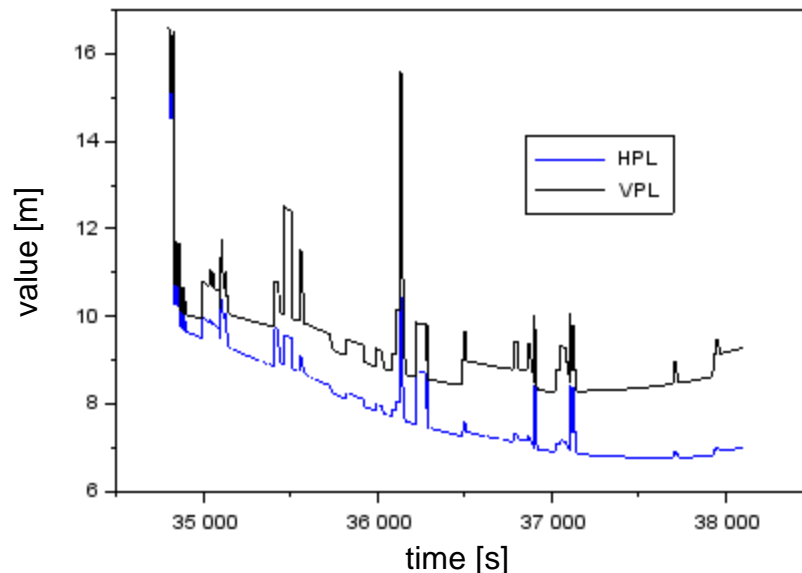


Fig. 3 Values of security levels HPL and VPL

Figure 3 depicts the values of the reliability levels of satellite positioning in aviation: HPL and VPL. The values of the parameters HPL and VPL were determined from the dependency [15]:

$$\begin{cases} HPL = k_{HPL} \cdot \sqrt{mB^2 + mL^2} \\ VPL = k_{VPL} \cdot mh \end{cases} \quad (9)$$

where:

$k_{HPL} = 6$ for horizontal navigation,

$k_{VPL} = 5.33$ for vertical navigation [16].

The average value of the parameter HPL is 7.9 m and of the median it is 7.4 m. The dispersion of the results obtained of the parameter HPL ranges from 6.8 m to 15.5 m. However, the average value of the parameter VPL equals 9.3 m, whereas of the median - 9 m. The dispersion of the obtained results of parameter VPL ranges from 8.3 m to 16.6 m.

In accordance with the technical standards of ICAO, the alert limit reliability value of satellite positioning in the horizontal plane for the precision approach category I cannot exceed 40 m. The results of reliability of satellite positioning, obtained during the tests, for navigation in the horizontal plane shall not exceed the level of 16 m. In addition, in accordance with the ICAO technical standards, the alert limit value of the reliability of satellite positioning in the vertical plane must not exceed 35 m. The results of the reliability of satellite positioning for navigation in the vertical plane, obtained during the testing, do not exceed the level of 17 m. It needs to be stressed that the obtained results of parameters VPL and HPL comply with the reliability criteria of satellite positioning for the GBAS system in air transport, in accordance with the ICAO technical regulations.

4. Discussion

The discussion centred around the comparative analysis of the determined coordinates of the Cessna 172 coordinates from the GLONASS solution and additionally from DGPS solution. The Cessna 172 aircraft position from the DGPS solution was also determined in the RTKLIB programme in RTKPOST library. In the first comparative analysis, the authors specified the parametre RMS-3D for the geocentric coordinates XYZ of the aircraft Cessna 172 (Fig. 4).

For this purpose, the authors determined the difference in the geocentric coordinates XYZ for the plane from DGPS and DGLONASS solutions and then the RMS-3D parametre was determined, as follows [17]:

$$RMS - 3D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (10)$$

where:

$\Delta X = X_{DGLONASS} - X_{DGPS}$ difference in aircraft coordinates along the X axis between solution DGLONASS and DGPS,

$\Delta Y = Y_{DGLONASS} - Y_{DGPS}$ difference in aircraft coordinates along the Y axis between solution DGLONASS and DGPS,

$\Delta Z = Z_{DGLONASS} - Z_{DGPS}$ difference in aircraft coordinates along the Z axis between solution DGLONASS and DGPS,

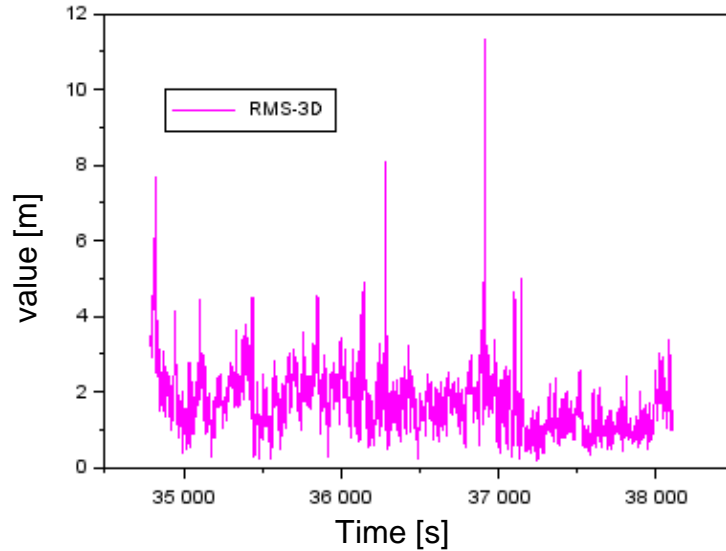


Fig. 4 Obtained values of parametre RMS-3D

The average value of the RMS-3D parameter equals 1.71 m, and of the median it is equal to 1.61 m, respectively. The dispersion of the obtained RMS-3D parameter ranges from 0.18 m to 11.32 m. It is worth noting that approximately 44% of the results of the parameter RMS-3D is less than 1.5 m, while approximately 68% of the results of the parameter RMS-3D is below 2 m. However, approximately 94% of the results of the parameter RMS-3D do not exceed the level of 3 m.

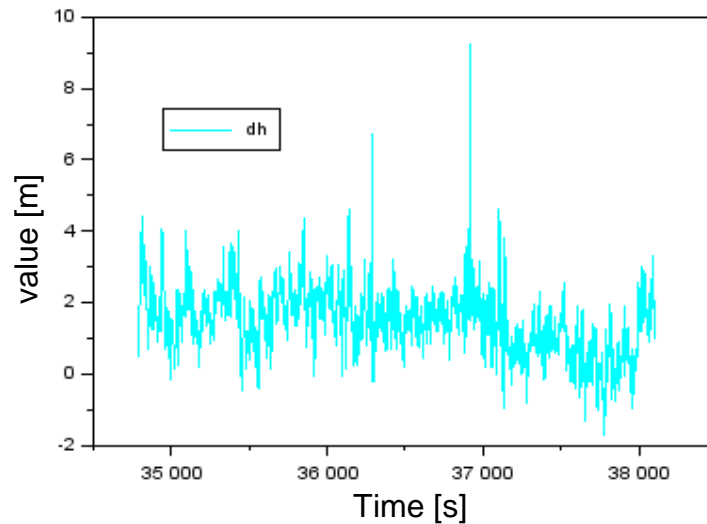


Fig. 5 Difference in ellipsoidal height of the Cessna 172 between solution DGLONASS and DGPS

The second comparative analysis defined the ellipsoidal height difference h of the Cessna 172 aircraft between the DGPS and DGLONASS solutions (Figure 5). The difference in ellipsoidal height h for the aircraft Cessna 172 between solutions DGLONASS and DGPS was determined on the basis of the dependence [18]:

$$dh = h_{DGLO} - h_{DGPS} \quad (11)$$

where:

h_{DGLO} - difference in ellipsoidal height h of the aircraft from DGLONASS solution

h_{DGPS} - difference in ellipsoidal height h of the aircraft from DGP solution

The average value of the parameter dh is equal to 1.46 m, and the parameter of the median to 1.49 m. In addition, the dispersion of parameters dh ranges from -1.76 m to +9.26 m. It must be noted that the error value RMS [19] for the results of parameter dh is 0.91 m.

5. Conclusions

The scientific article has made an analysis of a possibility of applying the differential DGLONASS technique for precise positioning of the aircraft in GBAS augmentation system, in air transport. The article recovered the coordinates of the aircraft Cessna 172 during a flight test in the vicinity of the military airfield in Dęblin. The recovery of the coordinates of the Cessna 172 aircraft was performed in RTKLIB programme, in RTKPOST library, in the computational module „DGPS/DGNSS”. The article describes the differential technique DGLONASS as well as providing the results of the accuracy and reliability of positioning the aircraft Cessna 172. Therefore, the authors presented the parameters of the standard deviation for the geodetic coordinates BLh of the aircraft Cessna 172, describing the parameters of security levels HPL/VPL. The obtained results of the accuracy and reliability of aircraft positioning were compared with ICAO technical standards for the augmentation system GBAS. The article also compares the coordinates of the aircraft Cessna 172 for the solutions DGLONASS and DGPS. Thus, two comparative analyses of the geocentric coordinates geocentric XYZ and geodetic coordinates BLh for the airplane Cessna 172 were made. In the first comparative analysis, the authors determined the value of the parameter RMS-3D. The average value of the parameter RMS-3D equals 1.71 m, whereas of the median - 1.61 m. In the second comparative analysis, the authors determined the difference in ellipsoidal height h of the aircraft Cessna 172 between the solution DGLONASS and DGPS. The average value of the parameter dh is 1.46 m and the error RMS is equal to 0.91 m. The research material, exploited in this article, comes from the air experiment conducted in Dęblin in the year 2010.

6. References

- [1] International Civil Aviation Organization: ICAO standards and recommended practices (SARPS), Annex 10 volume I (Radio navigation aids), 2006, The paper is available at website:
<http://www.ulc.gov.pl/pl/prawo/prawomi%20C4%99dzynarodowe/206-konwencje>, current version: 27 January 2015. (in Polish)
- [2] Jafernik H., Krasuski K., Michta J.: Assessment of suitability of radionavigation devices used in air, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2016, 90, pp. 99-112. ISSN: 0209-3324. DOI:10.20858/sjsutst.2016.90.9. (in Polish)
- [3] Januszewski J.: Satellite navigation systems in coastal navigation, *Scientific Journal Maritime University of Szczecin*, 2012, 29(101), pp. 45-52.
- [4] Przestrzelski P., Bakula M., Tanajewski D.: Differential code GPS+GLONASS Positioning, *Logistyka*, 2014, nr 3, pp. 5323-5329. (in Polish)
- [5] Tsujii T., Harigae M., Inagaki T., Kanai T.: Flight test of GPS/GLONASS precise Positioning versus dual frequency KGPS profile, *Earth Planets Space*, vol. 52, pp. 825-829, 2000.
- [6] Przestrzelski P., Bakula M.: Study of differential code GPS/GLONASS positioning, *Annual of Navigation*, no. 21, 2014, DOI: 10.1515/aon-2015-0010, pp. 117-132.
- [7] Joon-Mook K., Young-Wook L., Joung-Hyun P., Eun-Soo L.: Application of GPS/GLONASS Combination to the Revision of Digital Map, FIG XXII International Congress, TS5.7 Integration of Techniques for Digital Mapping, Washington, D.C. USA, April 19-26 2002, pp. 1-12.
- [8] Grzegorzewski M., Jaruszewski W., Fellner A., Oszczak S., Wasilewski A., Rzepecka Z., Kapcia J., Poplawski T.: Preliminary results of DGPS/DGLONASS aircraft positioning in flight approaches and landings, *Annual of Navigation*, no. 1, pp. 41-53, 1999.
- [9] Grzegorzewski M.: Navigating an aircraft by means of a position potential in three dimensional space, *Annual of Navigation*, no. 9, pp. 1-111, 2005.
- [10] Bosy J.: Precise processing of satellite GPS observations in local networks located in mountain areas, *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2005, no. 522, pp. 13-16 (in Polish).
- [11] Choi B., Roh K., Cho S., Park J., Park P., Lee S.: Development of the kinematic Global Positioning System Precise Point Positioning method using 3-pass filter, *J. Astron. Space Sci.* 29(3), pp. 269-274, <http://dx.doi.org/10.5140/JASS.2012.29.3.269>, 2012.
- [12] Osada E.: *Geodezja*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, ISBN 83-7085-663-2, pp. 237-241, 2001. (in Polish)
- [13] Ćwiklak J., Jafernik H.: The monitoring system for aircraft and vehicles of public order services based on GNSS, *Annual of Navigation*, no. 16, pp. 15-24, 2010.
- [14] Takasu T.: RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, pp. 29-49, 2013, Available at website: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf.

- [15] Jokinen A., Feng S., Milner C., Schuster W., Ochieng W., Hide C., Moore T., Hill C.: Precise Point Positioning and integrity monitoring with GPS and GLONASS, Conference: European Navigation Conference at London, United Kingdom, 2011.
- [16] Grunwald G., Ciećko A., Bakula M., Kaźmierczak R.: Examination of GPS/EGNOS integrity in north-eastern Poland, IET Radar, Sonar & Navigation, 10 (1), pp. 114-121, doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0053, 2016.
- [17] Krasuski K.: Utilization IONEX file for positioning correction over Ryki district area, Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska, nr 2/2015, pp. 30-34. (in Polish)
- [18] Krasuski K.: Application of GAPS software for kinematic positioning, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, 7, 2 (24), 2016, str. 117-130. (in Polish)
- [19] Przestrzelski P., Bakula M.: Performance of real time network code DGPS services of ASG-EUPOS in north-eastern Poland, Technical Sciences, 17(3), 2014, pp. 191-207.

OCENA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA STATKU POWIETRZNEGO Z UŻYCIEM METODY DGLONASS W SYSTEMIE GBAS

1. Wprowadzenie

Zgodnie ze standardami technicznymi ICAO satelitarne systemy nawigacyjne GNSS mogą być wykorzystywane w precyzyjnym pozycjonowaniu statku powietrznego. Obecnie ICAO określiła certyfikację i dopuszczenie do eksploatacji w lotnictwie cywilnym dwa globalne systemy nawigacyjne GPS i GLONASS [1]. System satelitarny GPS stanowi własność USA, zaś system nawigacyjny GLONASS jest własnością Federacji Rosyjskiej. System GLONASS może być stosowany w ramach systemów wspomagania ABAS, SBAS i GBAS w transporcie lotniczym. W ramach systemu ABAS możliwe jest opracowanie i implementacja systemu GLONASS do modułu kontrolera RAIM odbiornika satelitarnego GNSS. Szczególnie jest to istotne dla ciągłości, niezawodności, wiarygodności i dokładności pozycjonowania satelitarnego z użyciem systemu GLONASS w lotnictwie cywilnym [2]. W ramach komponentu wspomagania SBAS możliwe jest wspólne rozwiązanie nawigacyjne pozycji użytkownika z zastosowaniem systemu GLONASS oraz geostacjonarnych systemów GNSS [3]. Zatem w systemie wspomagania SBAS istnieje możliwość integracji obserwacji z kilku systemów nawigacyjnych GNSS w celu wyznaczenia pozycji użytkownika. Również system satelitarny GLONASS może być implementowany w tego typu rozwiązaniach. Obecnie system GLONASS może być stosowany z systemami geostacjonarnymi EGNOS, GAGAN, SDCM oraz WAAS w precyzyjnym pozycjonowaniu nawigacyjnym na znacznym obszarze kuli ziemskiej. System GLONASS jest również implementowany w ramach systemu wspomagania GBAS dla techniki różnicowej DGLONASS [4] oraz RTK-OTF [5]. W technice różnicowej DGLONASS wykorzystuje się pomiary kodowe ze stacji referencyjnej i odbiornika ruchomego w celu wyznaczenia pozycji użytkownika. Natomiast w technice różnicowej RTK-OTF wykorzystuje się pomiary fazowe ze stacji referencyjnej i odbiornika ruchomego w celu wyznaczenia pozycji użytkownika.

Technika różnicowa DGLONASS może być wykorzystywana zarówno w pomiarach statycznych GNSS [6], jak i w trybie kinematycznym [7]. Szczególnie bardzo ważne jest zastosowanie techniki różnicowej DGLONASS w trybie kinematycznym w nawigacji lotniczej. W Polsce technika różnicowa DGLONASS była wykorzystywana do określenia pozycji statku powietrznego na potrzeby precyzyjnej nawigacji lotniczej. W pracy badawczej [8] wykorzystano technikę różnicową DGLONASS do odtworzenia trajektorii lotu samolotu TS 11 Iskra w trybie Real Time Kinematic (RTK). Eksperyment lotniczy został przeprowadzony w okolicach lotniska wojskowego w Dęblinie.

W trakcie eksperymentu zainstalowano na pokładzie samolotu TS 11 Iskra odbiornik geodezyjny GG 24, który rejestrował surowe obserwacje GPS/GLONASS. Ponadto na dachu Wydziału Lotnictwa WSOSP w Dęblinie zainstalowano również odbiornik GG 24 na potrzeby zastosowania techniki różnicowej DGLONASS w pozycjonowaniu statku powietrznego. Różnica współrzędnych horyzontalnych samolotu TS 11 Iskra pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz RTK-OTF dochodziła do ± 100 m dla przesunięcia skali czasu 1 sekundy. Ponadto różnica wysokości elipsoidalnej samolotu TS 11 Iskra pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz RTK-OTF dochodziła do ± 70 m dla przesunięcia skali czasu 1 sekundy. Podobny charakter miał eksperyment lotniczy w okolicach miasta Powidz. Celem eksperymentu lotniczego było odtworzenie rzeczywistej pozycji samolotu Su22M4 podczas lotu testowego. Na potrzeby eksperymentu lotniczego zainstalowano na pokładzie samolotu Su22M4 odbiornik geodezyjny GG 24, który rejestrował surowe obserwacje GPS/GLONASS. W trakcie trwania eksperymentu pojawiły się jednak problemy z zapisem surowych danych GLONASS w odbiorniku geodezyjnym GG 24. Konsekwencją tego był brak możliwości zastosowania techniki różnicowej DGLONASS do odtworzenia trasy lotu samolotu Su22M4 [9].

Autorzy artykułu przedstawili w swojej pracy badawczej zastosowanie techniki pomiarowej DGLONASS dla systemu GBAS w transporcie lotniczym. Głównym celem artykułu jest ocena dokładności pozycjonowania samolotu Cessna 172 z użyciem techniki różnicowej DGLONASS. W pracy przedstawiono rezultaty odchyłek standardowych współrzędnych geodezyjnych BLh samolotu Cessna 172. Ponadto w pracy określono wartości poziomów wiarygodności pozycjonowania satelitarne HPL oraz VPL. Uzyskane wartości współrzędnych statku powietrznego zostały porównane z techniką różnicową DGPS w trybie post-processingu. Materiał badawczy do analizy pochodzi z eksperymentu lotniczego z Dębina z 2010 r.

2. Metoda badawcza

Podstawowe równanie obserwacyjne dla pomiarów kodowych w techniki różnicowej DGLONASS jest opisane jak poniżej [10]:

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{AB,1}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \nabla \Delta I_{AB,1}^{ij} + \nabla \Delta T_{AB}^{ij} + \nabla \Delta M_{P1} \\ \nabla \Delta P_{AB,2}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \nabla \Delta I_{AB,2}^{ij} + \nabla \Delta T_{AB}^{ij} + \nabla \Delta M_{P2} \end{cases} \quad (1)$$

Gdzie:

∇ - operator podwójnej różnicy dla pomiarów fazowych, umożliwia porównanie różnicy pomiarów fazowych od dwóch satelitów śledzonych przez dwa odbiorniki,

Δ - operator pojedynczej różnicy dla pomiarów fazowych, umożliwia wyznaczenie różnicy pomiarów fazowych od dwóch satelitów śledzonych przez jeden odbiornik,

- \overline{AB} - wektor pomiędzy stacją bazową (\overline{A}) oraz odbiornikiem ruchomym (\overline{B}) zamontowanym na pokładzie samolotu,
- $P_{AB,1}^{ij}$ - wartość podwójnej różnicy kodowej (wyrażona w metrach) na wektorze \overline{AB} pomiędzy satelitami i oraz j na częstotliwości L1 w systemie GLONASS,
- $P_{AB,2}^{ij}$ - wartość podwójnej różnicy kodowej (wyrażona w metrach) na wektorze \overline{AB} pomiędzy satelitami i oraz j na częstotliwości L2 w systemie GLONASS,
- ρ_{AB}^{ij} - odległość geometryczna wektora \overline{AB} dla podwójnej różnicy kodowej (wyrażona we współrzędnych geocentrycznych XYZ),
- $I_{AB,1}^{ij}$ - wartość opóźnienia jonosferycznego na częstotliwości L1 dla podwójnej różnicy kodowej,
- $I_{AB,2}^{ij}$ - wartość opóźnienia jonosferycznego na częstotliwości L2 dla podwójnej różnicy kodowej,
- $I_{AB,2}^{ij} = \gamma \cdot I_{AB,1}^{ij}$ - relacja opóźnienia jonosferycznego na częstotliwości L1 i L2,
- $\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2$ współczynnik skalujący,
- f_1 - częstotliwość L1 w systemie GLONASS,
- f_2 - częstotliwość L2 w systemie GLONASS,
- T_{AB}^{ij} - wartość opóźnienia troposferycznego dla podwójnej różnicy kodowej,
- M_{P1} - efekt wielotorowości i szum pomiarowy na częstotliwości L1 dla pomiarów kodowych,
- M_{P2} - efekt wielotorowości i szum pomiarowy na częstotliwości L2 dla pomiarów kodowych.

Model matematyczny z równania (1) jest rozwiązywany z użyciem Filtru Kalmana w dwuetapowym procesie stochastycznym [11]:

1) etap predykcji:

$$x_p = A \cdot x_{k-1} \quad (2)$$

$$P_p = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q_{k-1} \quad (3)$$

gdzie:

- A_0 - macierz współczynników,
- x_0 - oszacowane wartości wyznaczanych parametrów a priori z kroku poprzedniego,
- P_0 - oszacowane wartości kowariancji a priori z kroku poprzedniego,
- x_p - prognoza wartości stanu,

P_p - prognozowane wartości kowariancji,

Q_0 - macierz wariancji zakłóceń procesu pomiarowego;

2) etap korekcji:

$$K_k = P_p \cdot H^T \cdot (H \cdot P_p \cdot H^T + R)^{-1} \quad (4)$$

$$x_k = x_p + K_k \cdot (z - H \cdot x_p) \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_p \quad (6)$$

gdzie:

R - macierz kowariancji pomiarów,

H - macierz pochodnych cząstkowych,

K_k - macierz wzmocnienia Kalmana,

z - wektor wielkości pomierzonych,

I - macierz jednostkowa,

x_k - wyznaczone parametry a posteriori,

P_k - macierz kowariancji wyznaczanych parametrów a posteriori.

Odchylenia standardowe wyznaczonych współrzędnych w układzie geocentrycznym XYZ dla techniki DGLONASS opisuje poniższa zależność:

$$\begin{cases} mx_{DGLO} = P_K(1,1) \\ my_{DGLO} = P_K(2,2) \\ mz_{DGLO} = P_K(3,3) \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

mx_{DGLO} - odchylenie standardowe współrzędnej X statku powietrznego,

my_{DGLO} - odchylenie standardowe współrzędnej Y statku powietrznego,

mz_{DGLO} - odchylenie standardowe współrzędnej Z statku powietrznego.

Odchylenia standardowe pozycji samolotu dla techniki DGLONASS mogą być również wyrażone w układzie geodezyjnym BLh (szerokość i długość geodezyjna, wysokość elipsoidalna) i opisane w następujący sposób:

$$\begin{cases} Q = R \cdot P_K \cdot R^T \\ mB_{DGLO} = \sqrt{Q(1,1)} \\ mL_{DGLO} = \sqrt{Q(2,2)} \\ mh_{DGLO} = \sqrt{Q(3,3)} \end{cases} \quad (8)$$

gdzie:

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

$$R = \begin{bmatrix} -\sin(B) \cos(L) & -\sin(B) \sin(L) & \cos(B) \\ -\sin(L) & \cos(L) & 0 \\ \cos(B) \cos(L) & \cos(B) \sin(L) & \sin(B) \end{bmatrix},$$

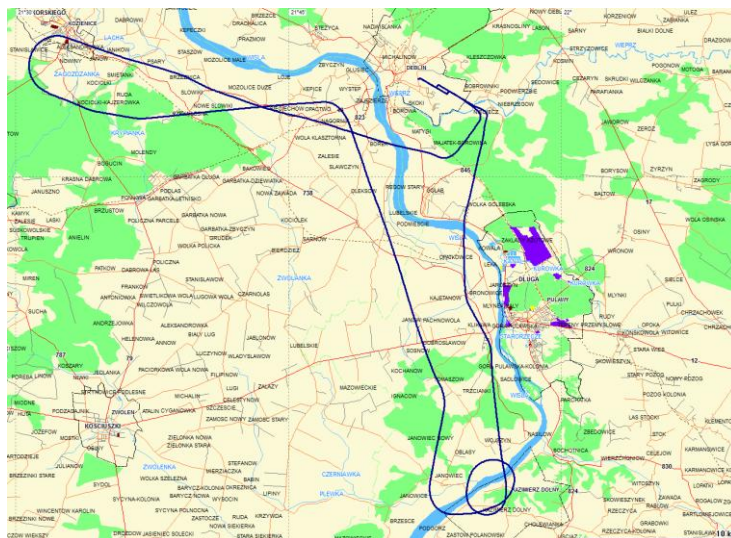
- mB_{DGLO} - odchylenie standardowe szerokości geodezyjnej B,
- mL_{DGLO} - odchylenie standardowe długości geodezyjnej L,
- mh_{DGLO} - odchylenie standardowe wysokości elipsoidalnej h.

Na podstawie równania obserwacyjnego (1) wyznaczane są współrzędne statku powietrznego w układzie geocentrycznym XYZ dla techniki różnicowej DGLONASS. W wyniku transformacji Helmerta współrzędne statku powietrznego w układzie geocentrycznym XYZ mogą zostać wyrażone w układzie geodezyjnym BLh [12]. Ponadto równania (7) oraz (8) umożliwiają określenie dokładności pozycjonowania statku powietrznego w układzie geocentrycznym XYZ oraz geodezyjnym BLh.

3. Eksperyment badawczy oraz wyniki badań

W teście badawczym dokonano sprawdzenia możliwości implementacji techniki różnicowej DGLONASS w transporcie lotniczym. W tym celu dokonano odtworzenia trasy lotu samolotu Cessna 172 na podstawie rozwiązania DGLONASS. W obliczeniach wykorzystano archiwalne dane nawigacyjne GLONASS z projektu naukowego: „System monitorowania ruchu statków powietrznych i pojazdów użytkowanych przez służby porządku publicznego z wykorzystaniem GNSS”, realizowanego przez Wydział Lotnictwa WSOSP w latach 2009-2011 [13]. Jednym z zadań badawczych w realizowanym projekcie było odtworzenie współrzędnych statku powietrznego Cessna 172 podczas lotu testowego dla lotniska wojskowego w Dęblinie w czerwcu 2010 (rys. 1).

W ramach wykonywanego testu lotniczego dokonano rejestracji parametrów nawigacyjnych samolotu dla systemu pomiarowego SAMSET, odbiornika geodezyjnego Topcon HiperPro oraz odbiornika Thales Mobile Mapper.



Rys. 1 Trajektoria lotu samolotu Cessna 172

Dwuczęstotliwościowy odbiornik geodezyjny Topcon HiperPro umożliwił rejestrację surowych obserwacji GPS/GLONASS w trybie kinematycznym z interwałem 1 sekundy. Ponadto na dachu Wydziału Lotnictwa WSOSP w Dęblinie zainstalowano również odbiornik Topcon HiperPro na stacji referencyjnej REF1 z opcją śledzenia konstelacji satelitów GPS/GLONASS. Konfiguracja infrastruktury technicznej stacji referencyjnej-odbiornik ruchomy zapewniła możliwość zastosowania techniki różnicowej DGLONASS w precyzyjnym pozycjonowaniu statku powietrznego Cessna 172.

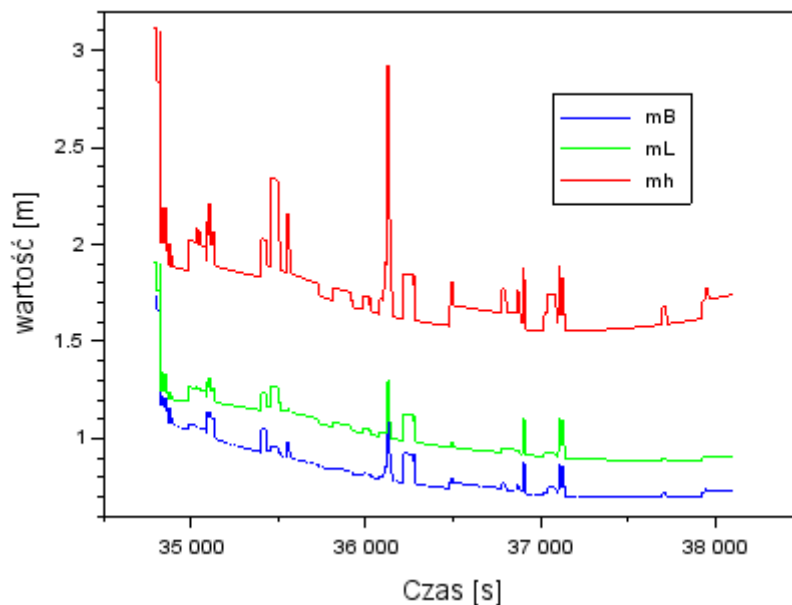
Obliczenia pozycji statku powietrznego Cessna 172 zostały wykonane w programie RTKLIB w bibliotece RTKPOST w module „DGPS/DGNSS”. W obliczeniach wykorzystano:

- plik obserwacyjny RINEX topc152j.10o, zapisany na karcie pamięci odbiornika ruchomego Topcon HiperPro umieszczonego samolocie Cessna 172;
- plik nawigacyjny RINEX topc152j.10n, zapisany na karcie pamięci odbiornika ruchomego Topcon HiperPro umieszczonego samolocie Cessna 172;
- plik obserwacyjny RINEX base152j.10n, zapisany na karcie pamięci odbiornika Topcon HiperPro umieszczonego na stacji referencyjnej REF1 w Dęblinie.

Na potrzeby wykonywanych obliczeń moduł aplikacyjny „DGPS/DGNSS” w bibliotece RTKPOST w programie RTKLIB został skonfigurowany jak poniżej [14]:

- system GNSS: system GLONASS,
- obserwacje GNSS: obserwacje kodowe P1/P2 w systemie G GLONASS,
- konstrukcja równań obserwacyjnych: podwójna różnica dla obserwacji kodowych w systemie GLONASS,
- źródło danych efemerydalnych satelitów GLONASS: depesza nawigacyjna GLONASS,
- źródło obserwacji GLONASS: plik RINEX 2.11,
- metoda wyznaczenia współrzędnych satelity GPS: na podstawie metody 4-rzędu Runge-Kutta,
- korekcja przebiegu pseudoodległości od satelity do anteny odbiornika: zastosowana,
- efekt obrotu Ziemi: zastosowany,
- efekt Sagnaca: zastosowany,
- poprawka chodu zegara satelity: eliminowana,
- efekty relatywistyczne: eliminowane,
- opóźnienie sprzętowe IFCB dla satelitów: eliminowane,
- opóźnienie sprzętowe IFCB dla odbiornika: eliminowane,
- model troposfery: Saastamoinen,
- model poprawki jonosferycznej: model Klobuchara,
- centrum fazowe anteny odbiornika: na podstawie pliku ANTEX IGS08,
- maska elewacji: 10°,
- wagowanie obserwacji: TAK,

- wartości początkowe współrzędnych samolotu: na podstawie nagłówka pliku RINEX,
- układ współrzędnych: geocentryczny XYZ i elipsoidalny BLh (docelowo ETRF'89),
- metoda obliczeń: filtr Kalmana w przód,
- metoda pozycjonowania: DGPS/DGNSS,
- tryb pozycjonowania: kinematyczny,
- tryb obliczeń: post-processing,
- interwał obliczeń: 1 s,
- detekcja błędów grubych w pomiarach GLONASS: algorytm modułu RAIM,
- liczba iteracji w epoce pomiarowej: 5,
- maksymalna wartość współczynnika DOP: 30,
- format końcowy zapisu współrzędnych: współrzędne w układzie geocentrycznym XYZ i elipsoidalnym BLh,
- poprawka chodu zegara odbiornika: eliminowana,
- efekty geodynamiczne i pływowe: zastosowano,
- odbiornik ruchomy: Topcon HiperPro umieszczony w samolocie Cessna 172,
- odbiornik bazowy: Topcon HiperPro umieszczony na stacji referencyjnej REF1 na dachu Wydziału Lotnictwa WSOSP w Dęblinie.



Rys. 2 Odchylenia standardowe współrzędnych BLh statku powietrznego

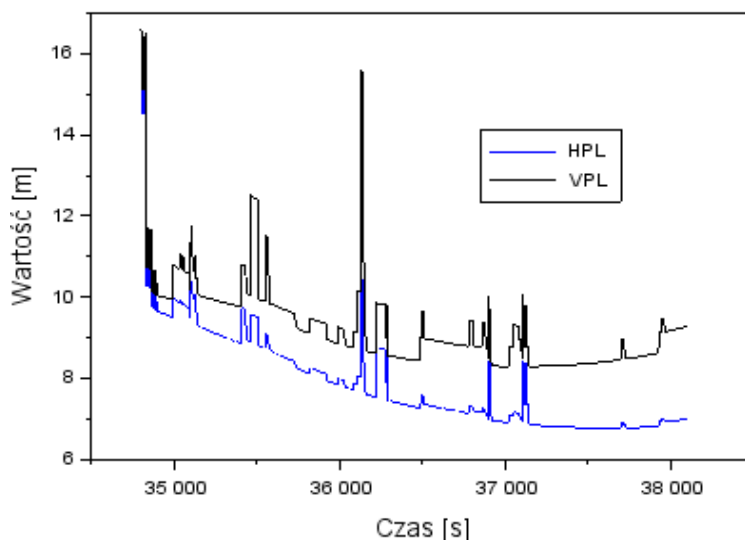
Na rys. 2 przedstawiono wartości odchyłeń standardowych współrzędnych geodezyjnych BLh statku powietrznego Cessna 172 na podstawie rozwiązania z techniki różnicowej DGLONASS (patrz równanie 8).

Wartość średnia parametru mB wynosi 0.83 m, zaś mediana wynosi 0.76 m. Rozrzut uzyskanych wyników parametru mB wynosi od 0.70 m do 1.74 m.

Wartość średnia parametru mL wynosi 1.02 m, zaś mediana jest równa 0.96 m. Rozrzut uzyskanych wyników parametru mL wynosi od 0.89 m do poziomu 1.91 m. Wartość średnia parametru mh wynosi 1.74 m, zaś mediana jest równa 1.68 m. Rozrzut uzyskanych wyników parametru mh wynosi od 1.56 m do 3.12 m. Należy podkreślić, że trend wyników parametrów (mB, mL, mh) jest malejący w czasie trwania eksperymentu. W związku z tym można stwierdzić, że dokładność wyznaczenia pozycji wzrasta wraz z upływem czasu trwania testu lotniczego.

Standardy techniczne zawarte w aneksie 10 ICAO „Pomoce Radionawigacyjne” do konwencji Chicagowskiej określają przedział eksploatacji systemu GBAS w transporcie lotniczym [1]. W ramach dopuszczenia do eksploatacji systemu GBAS musi mieć sprecyzowane wartości parametrów technicznych, jak dokładność czy wiarygodność pozycjonowania satelitarnego w lotnictwie. Docelowo w systemie GBAS są stosowane 2 techniki pomiarowe, tj. DGNSS (np. DGPS lub DGLONASS) oraz RTK-OTF dla systemów nawigacyjnych GNSS. System GBAS jest przeznaczony dla podejścia precyzyjnego PA kategorii I. Zakładana dokładność pozioma wyznaczenia pozycji samolotu wynosi 16 m wg standardów technicznych ICAO.

Uzyskane w trakcie badań rezultaty dokładności pozycjonowania satelitarnego dla prowadzenia nawigacji poziomej LNAV są wyższe niż 2 m. Ponadto zakładana dokładność pionowa wyznaczenia pozycji samolotu wynosi maksymalnie od 4 m do 6 m wg standardów technicznych ICAO. Uzyskane w trakcie badań rezultaty dokładności pozycjonowania satelitarnego dla prowadzenia nawigacji pionowej VNAV są wyższe niż 4 m. Można zatem wysunąć wniosek, że zaproponowana metoda badawcza DGLONASS dla systemu GBAS spełnia kryteria dokładnościowe do eksploatacji systemu GBAS w transporcie lotniczym. Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty zostały wyznaczone w trybie obliczeniowym post-processingu i muszą zostać zweryfikowane dla czasu rzeczywistego.



Rys. 3 Wartości poziomów bezpieczeństwa HPL oraz VPL

Na rys. 3 przedstawiono wartości poziomów wiarygodności pozycjonowania satelitarnego w lotnictwie: HPL oraz VPL. Wartości parametrów HPL oraz VPL zostały wyznaczone z zależności [15]:

$$\begin{cases} HPL = k_{HPL} \cdot \sqrt{mB^2 + mL^2} \\ VPL = k_{VPL} \cdot mh \end{cases} \quad (9)$$

gdzie:

$k_{HPL} = 6$ dla nawigacji poziomej,

$k_{VPL} = 5.33$ dla nawigacji pionowej [16].

Wartość średnia parametru HPL wynosi 7.9 m, zaś mediana wynosi 7.4 m. Rozrzut uzyskanych wyników parametru HPL wynosi od 6.8 m do 15.5 m. Natomiast wartość średnia parametru VPL wynosi 9.3 m, zaś mediana jest równa 9 m. Rozrzut uzyskanych wyników parametru VPL wynosi od 8.3 m do 16.6 m.

Zgodnie ze standardami technicznymi ICAO graniczna wartość wiarygodności pozycjonowania satelitarnego w płaszczyźnie poziomej dla podejścia PA kat. I wynosić maksymalnie może 40 m. Uzyskane w trakcie badań rezultaty wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla prowadzenia nawigacji w płaszczyźnie poziomej nie przekraczają poziomu 16 m. Ponadto wg standardów technicznych ICAO graniczna wartość wiarygodności pozycjonowania satelitarnego w płaszczyźnie pionowej wynosić maksymalnie może 35 m. Uzyskane w trakcie badań rezultaty wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla prowadzenia nawigacji w płaszczyźnie pionowej nie przekraczają poziomu 17 m. Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty parametrów HPL oraz VPL spełniają kryteria wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla systemu GBAS w transporcie lotniczym wg przepisów technicznych ICAO.

4. Dyskusja

W ramach dyskusji dokonano analizy porównawczej wyznaczonych współrzędnych statku powietrznego Cessna 172 z rozwiązania GLONASS oraz dodatkowo DGPS. Pozycja samolotu Cessna 172 z rozwiązania DGPS została również wyznaczona w programie RTKLIB w bibliotece RTKPOST. W pierwszej analizie porównawczej określono parametr RMS-3D dla współrzędnych geocentrycznych XYZ statku powietrznego Cessna 172 (rys. 4).

W tym celu określono różnicę współrzędnych geocentrycznych XYZ samolotu z rozwiązania DGPS oraz DGLONASS a następnie wyznaczono parametr RMS-3D, jak poniżej [17]:

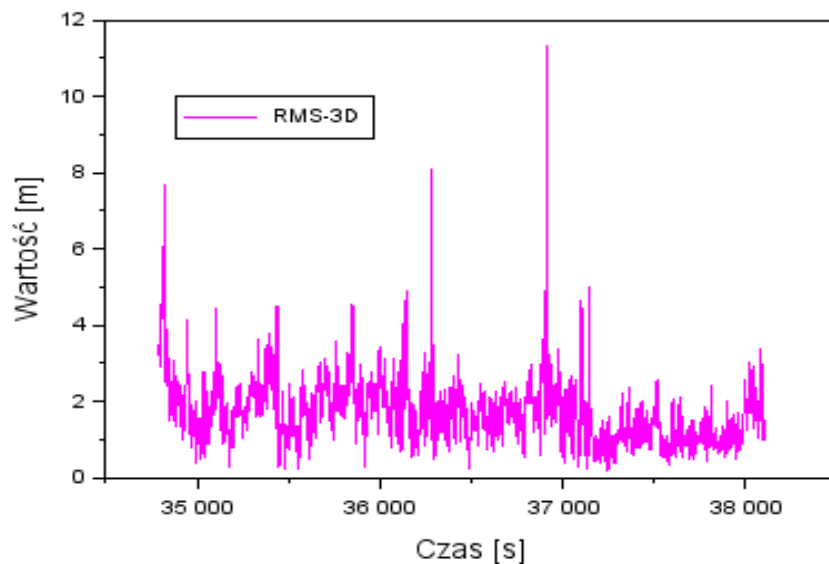
$$RMS - 3D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (10)$$

gdzie:

$\Delta X = X_{DGLO} - X_{DGPS}$, różnica współrzędnych statku powietrznego wzdłuż osi X pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz DGPS,

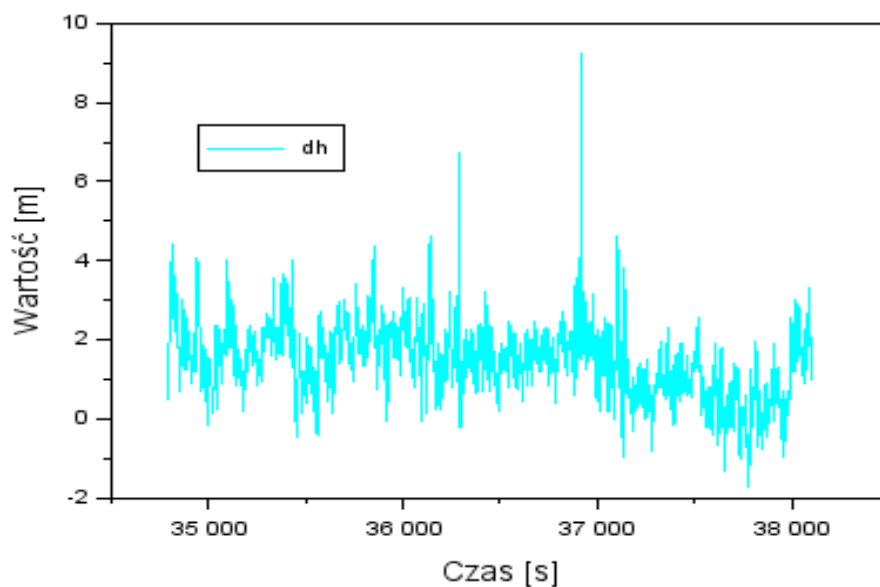
$\Delta Y = Y_{DGLO} - Y_{DGPS}$, różnica współrzędnych statku powietrznego wzdłuż osi Y pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz DGPS,

$\Delta Z = Z_{DGLO} - Z_{DGPS}$, różnica współrzędnych statku powietrznego wzdłuż osi Z pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz DGPS.



Rys. 4 Uzyskane wartości parametru RMS-3D

Wartość średnia parametru RMS-3D wynosi 1.71 m, zaś mediana wynosi 1.61 m. Rozrzut uzyskanych wyników parametru RMS-3D wynosi od 0.18 m do 11.32 m. Warto zaznaczyć że około 44% wyników parametru RMS-3D jest mniejsza niż 1.5 m. Z kolei około 68% wyników parametru RMS-3D jest mniejsza niż 2 m. Natomiast około 94% wyników parametru RMS-3D nie przekracza poziomu 3 m.



Rys. 5 Różnica wysokości elipsoidalnej samolotu Cessna 172 pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz DGPS

W drugiej analizie porównawczej określono różnicę wysokości elipsoidalnej h statku powietrznego Cessna 172 pomiędzy rozwiązaniem DGPS oraz DGLONASS (rys. 5). Różnica wysokości elipsoidalnej h dla statku powietrznego Cessna 172 pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz DGPS została określona na podstawie zależności [18]:

$$dh = h_{DGLO} - h_{DGPS} \quad (11)$$

gdzie:

h_{DGLO} - wysokość elipsoidalna h samolotu z rozwiązania DGLONASS,

h_{DGPS} - wysokość elipsoidalna h samolotu z rozwiązania DGPS.

Wartość średnia parametru dh jest równa 1.46 m, zaś parametr mediany wynosi 1.49 m. W dodatku dyspersja wyników parametru dh wynosi od -1.76 m do +9.26 m. Warto zauważyć, że wartość błędu RMS [19] dla wyników parametru dh wynosi 0.91 m.

5. Wnioski

W artykule naukowym dokonano analizy możliwości zastosowania techniki różnicowej DGLONASS w precyzyjnym pozycjonowaniu samolotu w systemie wspomagania GBAS w transporcie lotniczym. W artykule odtworzono współrzędne samolotu Cessna 172 podczas próbnego lotu testowego w okolicach lotniska wojskowego w Dęblinie. Odtworzenie współrzędnych statku powietrznego Cessna 172 zostało wykonane w programie RTKLIB w bibliotece RTKPOST w module obliczeniowym „DGPS/DGNSS”. W artykule opisano techniką różnicową DGLONASS oraz przedstawiono rezultaty dokładności oraz wiarygodności pozycjonowania statku powietrznego Cessna 172. W związku z tym zaprezentowano parametry odchylenia standardowego dla współrzędnych geodezyjnych BLh statku powietrznego Cessna 172 oraz przedstawiono parametry poziomów bezpieczeństwa HPL/VPL. Uzyskane rezultaty parametrów dokładności i wiarygodności pozycjonowania statku powietrznego porównano ze standardami technicznymi ICAO dla systemu wspomaganie GBAS. W artykule dokonano również porównania współrzędnych statku powietrznego Cessna 172 dla rozwiązania DGLONASS i DGPS. W tym celu wykonano 2 analizy porównawcze współrzędnych geocentrycznych XYZ oraz geodezyjnych BLh samolotu Cessna 172. W pierwszej analizie porównawczej wyznaczono wartości parametru RMS-3D. Wartość średnia parametru RMS-3D wynosi 1.71 m, zaś mediana wynosi 1.61 m. W drugiej analizie porównawczej wyznaczono różnicę wysokości elipsoidalnej h samolotu Cessna 172 pomiędzy rozwiązaniem DGLONASS oraz

DGPS. Wartość średnia parametru dh wynosi 1.46 m, zaś błąd RMS jest równy 0.91 m. Zastosowany w artykule naukowym materiał badawczy pochodzi w eksperymencie lotniczego z Dębina z 2010 r.

6. Bibliografia

- [1] International Civil Aviation Organization: ICAO standards and recommended practices (SARPS), Annex 10 volume I (Radio navigation aids), 2006, The paper is available at website:
<http://www.ulc.gov.pl/pl/prawo/prawomi%20C4%99dzynarodowe/206-konwencje>,
current version: 27 January 2015. (in Polish)
- [2] Jaferník H., Krasuski K., Michta J.: Assessment of suitability of radionavigation devices used in air, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2016, 90, pp. 99-112. ISSN: 0209-3324. DOI:10.20858/sjsutst.2016.90.9. (in Polish)
- [3] Januszewski J.: Satellite navigation systems in coastal navigation, *Scientific Journal Maritime University of Szczecin*, 2012, 29(101), pp. 45-52.
- [4] Przestrzelski P., Bakula M., Tanajewski D.: Differential code GPS+GLONASS Positioning, *Logistyka*, 2014, nr 3, pp. 5323-5329. (in Polish)
- [5] Tsujii T., Harigae M., Inagaki T., Kanai T.: Flight test of GPS/GLONASS precise Positioning versus dual frequency KGPS profile, *Earth Planets Space*, vol. 52, pp. 825-829, 2000.
- [6] Przestrzelski P., Bakula M.: Study of differential code GPS/GLONASS positioning, *Annual of Navigation*, no. 21, 2014, DOI: 10.1515/aon-2015-0010, pp. 117-132.
- [7] Joon-Mook K., Young-Wook L., Joung-Hyun P., Eun-Soo L.: Application of GPS/GLONASS Combination to the Revision of Digital Map, FIG XXII International Congress, TS5.7 Integration of Techniques for Digital Mapping, Washington, D.C. USA, April 19-26 2002, pp. 1-12.
- [8] Grzegorzewski M., Jaruszewski W., Fellner A., Oszczak S., Wasilewski A., Rzepecka Z., Kapcia J., Poplawski T.: Preliminary results of DGPS/DGLONASS aircraft positioning in flight approaches and landings, *Annual of Navigation*, no. 1, pp. 41-53, 1999.

- [9] Grzegorzewski M.: Navigating an aircraft by means of a position potential in three dimensional space, *Annual of Navigation*, no. 9, pp. 1-111, 2005.
- [10] Bosy J.: Precise processing of satellite GPS observations in local networks located in mountain areas, *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2005, no. 522, pp. 13-16 (in Polish).
- [11] Choi B., Roh K., Cho S., Park J., Park P., Lee S.: Development of the kinematic Global Positioning System Precise Point Positioning method using 3-pass filter, *J. Astron. Space Sci.* 29(3), pp. 269-274, <http://dx.doi.org/10.5140/JASS.2012.29.3.269>, 2012.
- [12] Osada E.: *Geodezja*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, ISBN 83-7085-663-2, pp. 237-241, 2001. (in Polish)
- [13] Ćwiklak J., Jaferník H.: The monitoring system for aircraft and vehicles of public order services based on GNSS, *Annual of Navigation*, no. 16, pp. 15-24, 2010.
- [14] Takasu T.: RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, pp. 29-49, 2013, Available at website: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf.
- [15] Jokinen A., Feng S., Milner C., Schuster W., Ochieng W., Hide C., Moore T., Hill C.: Precise Point Positioning and integrity monitoring with GPS and GLONASS, Conference: European Navigation Conference at London, United Kingdom, 2011.
- [16] Grunwald G., Ciećko A., Bakula M., Kaźmierczak R.: Examination of GPS/EGNOS integrity in north-eastern Poland, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 10 (1), pp. 114-121, doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0053, 2016.
- [17] Krasuski K.: Utilization IONEX file for positioning correction over Ryki district area, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, nr 2/2015, pp. 30-34. (in Polish)
- [18] Krasuski K.: Application of GAPS software for kinematic positioning, *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, 7, 2 (24), 2016, str. 117-130. (in Polish)
- [19] Przestrzelski P., Bakula M.: Performance of real time network code DGPS services of ASG-EUPOS in north-eastern Poland, *Technical Sciences*, 17(3), 2014, pp. 191-207.



Dr hab. inż. pil. Janusz Ćwiklak związany jest z lotnictwem od 1976 roku. Jest absolwentem kierunku „pilot samolotu odrzutowego” Wyższej Oficerskiej Szkoły Lotniczej. Ukończył studia magisterskie na Politechnice Lubelskiej. W 2002 roku na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim obronił rozprawę doktorską uzyskując stopień doktora nauk technicznych w zakresie geodezji i kartografii. Zajmuje się działalnością naukową, związaną z zastosowaniem systemów satelitarnych w lotnictwie. Prowadzi badania poświęcone zagadnieniom bezpieczeństwa lotów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki zapobiegania kolizjom statków powietrznych z ptakami. Uczestnik wielu konferencji międzynarodowych i krajowych. Od 2008 roku pracuje w WSOSP jako cywilny nauczyciel akademicki, pełniąc funkcję prodziekana Wydziału Lotnictwa (Udział 30%).



Płk dr hab. inż. Norbert Grzesik, Wydział Lotnictwa Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 1999 roku na Wydziale Elektromechanicznym (obecnie Mechatroniki i Lotnictwa) Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Doktorat ze specjalności budowa i eksploatacja maszyn uzyskał w 2006 roku na Politechnice Rzeszowskiej. Habilitację w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w 2016 r. Specjalizacja to wykorzystanie rozmytych systemów eksperckich w lotniczych systemach pokładowych w zakresie wspomaganie eksploatacji, bezpieczeństwa i oceny niezawodności. Jest certyfikowanym specjalistą w zakresie eksploatacji uzbrojenia i awioniki wielu typów statków powietrznych (F-16, MiG-29, Su-22, Ts-11, Mi-2, W-3W i inne). Członek Europejskiego Stowarzyszenia Logiki Rozmytej i Centrum Naukowego Lotnictwa (współpraca naukowa WSOSP i ITWL) oraz Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego (Udział 20%).



mgr inż. Kamil Krasuski Absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT w Warszawie. Doktorant na Wydziale Lotnictwa WSOSP w Dęblinie. Pracownik w Wydziale Geodezji, Kartografii i Katastru Nieruchomości w Starostwie Powiatowym Ryki. Autor ponad 60 publikacji naukowych. Zainteresowania naukowe: geodezja i kartografia, nawigacja, transport lotniczy, programowanie, metody numeryczne, fizyka jonosfery, geofizyka, opracowanie obserwacji GNSS (Udział 50%).