Małgorzata KIRSCHENSTEIN, Kamil KRASUSKI
Polish Air Force University (Lotnicza Akademia Wojskowa)

INTEGRATION THE METEOROLOGICAL DATA FOR MONITORING THE TROPOSPHERE CONDITION OVER THE MILITARY AERODROME IN DĘBLIN

Integracja danych meteorologicznych w celu monitorowania stanu troposfery nad lotniskiem w Dęblinie

Abstract: *The integration of meteorological and tropospheric data is extremely important in precise monitoring of the atmosphere condition over a selected aerodrome. The paper presents the results of troposphere monitoring over the military aerodrome EPDE in Dęblin in Lubelskie Voivodeship in Poland. The three sources of meteorological data were applied for troposphere monitoring, namely: GNSS satellite technique, SYNOP data, TAF data. The troposphere empirical models within the GNSS satellite technique were utilized in the designation of the meteorological parameters, e. g. temperature, pressure and relative humidity. In paper, the meteorological parameters were estimated using three deterministic model, e.g.: SA model, RTCA-MOPS model and also GPT model.*

Keywords: GNSS satellite technique, troposphere empirical models, SYNOP data, TAF data, meteorological data

Streszczenie: *Integracja danych meteorologicznych i troposferycznych jest niezwykle ważna w precyzyjnym monitorowaniu stanu atmosfery na wybranym lotnisku. W pracy przedstawiono wyniki monitorowania troposfery na lotnisku wojskowym EPDE w Dęblinie w województwie lubelskim w Polsce. Do monitorowania troposfery zastosowano trzy źródła danych meteorologicznych, a mianowicie: technikę satelitarną GNSS, dane SYNOP, dane TAF. Modele empiryczne troposfery w technice satelitarnej GNSS wykorzystano w oznaczeniu parametrów meteorologicznych, tj.: temperatura, ciśnienie i wilgotność względna. W pracy parametry meteorologiczne oszacowano za pomocą trzech modeli deterministycznych, tj.: model SA, model RTCA-MOPS, a także model GPT.*

Słowa kluczowe: technika satelitarna GNSS, empiryczne modele troposfery, depesza SYNOP, depesza TAF, dane meteorologiczne

1. Introduction

For several years around the world, research has been conducted into developing a precise model of the atmosphere, primarily using all numerical weather models. The development of such a complex system as a precise model of the atmosphere requires the assimilation and integration of multiple metrological and tropospheric data. The examples of source data for the atmosphere model are among others [6, 12]: tropospheric products designated within the GNSS satellite technique (or other space techniques), measurement and observational network system of hydrological stations, measurement and observation network system of meteorological stations, network system of aerological measurement stations, network system of actinometric measurement stations, measurement and observational system of limnological stations, measurement and observational system of evaporometric stations, system of phenological observation stations, network system of meteorological radars, network system of detection and localizing atmospheric lightning discharges, system of reception and data processing from meteorological satellites, numerical model of weather forecasts, direct measurement of atmospheric parameters "in-situ".

The integration of different meteorological and tropospheric data usually takes place with the participation of an external specialist software for a numerical analysis of the state of the atmosphere. The numerical analysis of input data for the precision model of the atmosphere is made globally, regionally or locally. Developing a model of weather locally is extremely important for poorly urbanized terrains, typically in rural or agricultural areas. Then such a model allows a distribution of tropospheric products for the local population in the near-real-time and in post-processing. In addition, the local system will provide information about hazardous weather phenomena on a continuous basis.

The main aim of the article is to present the results of integration of meteorological and tropospheric data for the needs of building a local monitoring system of the atmosphere for the military aerodrome in Dęblin. For this reason, the calculations were made to determine the meteorological parameters using: empirical models of the troposphere for the GNSS satellite technology, SYNOP message, and TAF message. The meteorological SYNOP and TAF messages were downloaded from the internet server: WWW.OGIMET.COM. Then the meteorological parameters for the GNSS satellite technique were determined for the reference station REF1 in Dęblin. In the calculations, the authors used the empirical models of the troposphere: the model of the standard atmosphere SA, the model RTCA-MOPS and the GPT model.

2. Materials and methods

In the framework of the GNSS satellite technique, it is possible to exploit the empirical models of the troposphere to determine the meteorological parameters i.e. temperature, pressure and relative humidity of the air. For the needs of the assimilation of the GNSS satellite technique in the modelling of meteorological parameters, the following empirical models of the troposphere were used: the SA model, the RTCA-MOPS model, the GPT model.

The meteorological parameters (temperature, pressure and relative humidity) in the empirical model SA were determined on the basis of mathematical formulas as below [2,5]:

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0065 \cdot (h - h_0) \\ P = P_0 \cdot \left(1 - 0.000026 \cdot (h - h_0)^{5.225}\right) \\ RH = RH_0 \cdot \exp^{-0.0006396(h-h_0)} \end{cases} \quad (1)$$

where:

T – temperature at required height in SA model, unit [K]; T_0 – mean temperature in SA model, e. g. 18°C (291 K), unit [K]; P – pressure at required height in SA model, unit [hPa]; P_0 – mean pressure in SA model, e. g. 1013.25 hPa, unit [hPa]; RH – relative humidity at required height in SA model, unit [%]; RH_0 – mean relative humidity in SA model, e. g. 50%, unit [%]; h – required height, unit [m]; h_0 – the sea level, e. g. 0 m, unit [m].

The meteorological parameters (temperature, pressure and water vapour pressure in the empirical RTCA-MOPS model were determined on the basis of the mathematical formulas as below [2, 9]:

$$\begin{cases} T = T_0 - \beta_0 \cdot h \\ P = P_0 \cdot \left(T / T_0\right)^{(g/R \cdot \beta_0)} \\ RH = RH_0 \cdot \left(T / T_0\right)^{(g \cdot \lambda / R \cdot \beta_0) - 1} \end{cases} \quad (2)$$

where:

T – temperature at required height in RTCA-MOPS model, unit [K]; T_0 – interpolated temperature, the temperature T_0 is interpolated based on day of year, receiver latitude, average and seasonal variation of temperature from previous years, unit [K]; P – pressure at required height in RTCA-MOPS model, unit [hPa];

P_0 – interpolated pressure, the pressure P_0 is interpolated based on day of year, receiver latitude, average and seasonal variation of pressure from previous years, unit [hPa]; RH – relative humidity at required height in RTCA-MOPS model, unit [%]; RH_0 – interpolated relative humidity, the relative humidity RH_0 is interpolated based on day of year, receiver latitude, average and seasonal variation of relative humidity from previous years, unit [%]; h – required height, unit [m]; g – standard acceleration of gravity, unit [m/s²]; β_0 – interpolated temperature lapse rate, the temperature lapse rate β_0 is interpolated based on day of year, receiver latitude, average and seasonal variation of temperature lapse rate from previous years, unit [K/m]; λ_0 – interpolated water vapor lapse rate, the water vapor lapse rate λ_0 is interpolated based on day of year, receiver latitude, average and seasonal variation of water vapor lapse rate from previous years, unit [-]; R – gas constant for dry air, unit [J/K·kg].

The empirical model of the troposphere GPT allows designating only the temperature and air pressure as meteorological parameters in the form [3, 7]:

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0065 \cdot (h - h_0) \\ P = P_0 \cdot \left(1 - 0.000026 \cdot (h - h_0)^{5.225}\right) \end{cases} \quad (3)$$

where:

T – temperature at required height in GPT model, unit [K]; T_0 – interpolated temperature, the temperature T_0 is function of modified Julian date, sensor coordinates (Latitude, Longitude, ellipsoidal height), unit [K]; P – pressure at required height in GPT model, unit [hPa]; P_0 – interpolated pressure, the pressure P_0 is function of modified Julian date, sensor coordinates (Latitude, Longitude, ellipsoidal height), unit [hPa]; h – required height in orthometric system, unit [m]; h_0 – the sea level, e. g. 0 m, unit [m].

3. Results and discussion

In tab. 1, there is a comparison of the value of the meteorological parameters (T, p, RH) on the basis of empirical models of the troposphere SA, RTCA-MOPS and GPT. The values of meteorological parameters (T, p, RH) were determined for the reference station REF1 located on the grounds of the airport military EPDE in Dęblin. The numerical computations of the state of the troposphere were made for 1 June. It needs to be added that the meteorological conditions were designated for

the needs of the flight experiment, performed on this day, within the implementation of the GNSS satellite technique for the procedures of the aircraft Cessna 172 for landing at the military aerodrome in Dęblin [4]. The values of the meteorological parameters (T, p, RH) were referenced to the geodetic coordinates of the reference station REF1, as below: Latitude: 51° 33' 19.92606'' N; Longitude: 21° 52' 08.72275'' E; ellipsoidal height: 152.069 m. The value of the air temperature in the SA model equals 290.2 K, for the RTCA-MOPS model - it is 284.3 K, and for the GPT model, it is equal to 291.9 K. The value of the atmospheric pressure value in the SA model is equal to 995.2 hPa, in the model RTCA-MOPS - it is 994.6 hPa, and in the GPT it is equal to 1002.9 hPa. The relative value of air humidity in the SA model is equal to 45.4%, in the model RTCA-MOPS it is 71.1%, whereas in the GPT model it is not determined.

Table 1

Comparison of meteorological data (T, p, RH) using SA, UNB3m and GPT empirical troposphere models

Parameter	SA model	RTCA-MOPS model	GPT model
Temperature [K]	290.2	284.3	291.9
Pressure [hPa]	995.2	994.6	1002.9
Relative humidity [%]	45.4	71.1	Not available

```
#####
#  SYNOPS de 12490, Deblin / Irena (Poland) | 51-33N | 021-51E | 124 m
#####
201006012200 AAXX 01221 12490 41560 83505 10154 20136 40042 57005 76162 8753/
          555 6//89=
201006012100 AAXX 01211 12490 42560 73405 10156 20135 40045 57004 8553/
          555 6//87=
201006012000 AAXX 01201 12490 42560 73405 10160 20133 40049 54000 8453/
          555 6//84=
201006011800 AAXX 01181 12490 42560 73404 10170 20135 40049 57001 8553/
          555 6//80=
201006011700 AAXX 01171 12490 42560 73506 10178 20135 40048 57003 8553/
          555 6//76=
```

Fig. 1. Example of meteorological data of SYNOP Dęblin/Irena 12490 station

In the vicinity of the military aerodrome in Dęblin, there is a technical infrastructure of the meteorological station SYNOP Deblin/Irena 12490 for monitoring the changes in the parameters of the atmosphere in near-real-time. The SYNOP station Deblin/Irena 12490 is a civil aviation meteorological facility, owned by the Institute of Meteorology and Water Management, based in Warsaw. The meteorological station

SYNOP Deblin/Irena 12490 collects meteorological parameters with the recording frequency of 1 hour, referenced to Coordinated Universal Time (UTC) [8, 10]. Figure 1 shows part of the SYNOP message for the meteorological station Deblin/Irena 12490, which was generated from the internet service www.ogimet.com. Based on the SYNOP message for the meteorological station Deblin/Irena 12490, there are basic parameters of the atmosphere, i.e. temperature, pressure and relative humidity of the air. The values of the meteorological parameters (T, p, RH) are referenced to the coordinates of the SYNOP station Deblin/Irena, as below: Latitude: 51°33' N; Longitude: 21°51' E; height above the sea level: 124 m.

Figure 2 shows a daily temperature change of the air, as registered by the meteorological sensor at the SYNOP station Deblin/Irena 12490. The minimum temperature on 1 June equalled 13.4°C at 03:00:00 UTC, whereas the maximum temperature was 18.4°C at 15:00:00 UTC. Moreover, the average temperature on this day was 15.9°C, whereas the median was equal to 15.8°C. From 02 UTC until 15 UTC, it is clear that the values of the temperature parameter are constantly increasing, on the basis of the meteorological data from the SYNOP message. Then from 15 UTC until 22 UTC, it is possible to conclude that the values of the temperature parameter are constantly decreasing, on the basis of the meteorological data from the SYNOP message. It should be stressed that at 01, 19 and 23 UTC, the meteorological sensor at the SYNOP Deblin/Irena station 12490 did not record any numerical data relating to the temperature parameter.

Fig. 2. Temperature data of SYNOP Deblin/Irena 12490 station

Figure 3 shows a daily temperature change of the air, as registered by the meteorological sensor at the SYNOP station Deblin/Irena 12490. The minimum

pressure value, on 1 June, equalled 1004.2 hPa at 22:00:00 UTC, whereas the maximum one was equal to 1005.5 hPa at 09:00:00 UTC. Furthermore, the average pressure value on that day was approximately 1,005 hPa, with the median also being equal to 1,005 hPa. From 02 UTC until 09 UTC, it is clear that the values of the pressure parameter are constantly increasing, on the basis of the meteorological data from the SYNOP message. On the other hand, from 09 UTC until 22 UTC, it is possible to conclude that the values of the pressure parameter are constantly decreasing, on the basis of the meteorological data from the SYNOP message. It should be stressed that at 01, 19 and 23 UTC, the meteorological sensor at the SYNOP Deblin/Irena station 12490 did not record any numerical data relating to the atmospheric pressure parameter.

Fig. 3. Pressure data of SYNOP Deblin/Irena 12490 station

Fig. 4. Relative humidity data of SYNOP Deblin/Irena 12490 station

Figure 4 shows a daily relative humidity of the air, as registered by the meteorological sensor at the SYNOP station Deblin/Irena 12490. The minimum relative humidity value on 1 June was approximately 73% at 13:00:00 UTC, whereas the maximum one was 94.3% at 02:00:00 UTC. Furthermore, the average relative humidity value on that date was 81.2%, while the median was approximately 79%. From 02 UTC until 15 UTC, it is clear that the values of the relative humidity parameter are constantly decreasing, on the basis of the meteorological data from the SYNOP message. Then from 15 UTC until 22 UTC, it is possible to conclude that the values of the relative parameter are constantly decreasing, on the basis of the meteorological data from the SYNOP message. It should be noted that at 01, 19 and 23 UTC, the meteorological sensor at the SYNOP station Deblin/Irena 12490 did not record any numerical data relating to the parameter of the air relative humidity.

short TAF from EPDE, ()

```

FC 01/06/2010 11:00-> TAF EPDE 011100Z 0112/0121 34010KT 9999 BKN017 OVC070
                        PROB30 TEMPO 0117/0121 36010KT 6000 SHRA SCT010CB BKN017
                        OVC070=

FC 01/06/2010 08:00-> TAF EPDE 010800Z 0109/0118 33010KT 8000 -RA SCT008 BKN017 OVC070
                        BECMG 0110/0111 33010KT 8000 -RA BKN017 OVC070
                        PROB30 TEMPO 0109/0115 4000 SHRA BKN017CB OVC070=

FC 01/06/2010 05:00-> TAF EPDE 010500Z 0106/0115 32010KT 7000 -RA SCT008 BKN017
                        BECMG 0108/0109 9999 BKN017 BKN070=
    
```

No large TAF reports from EPDE during solicited interval in the database.

Fig. 5. Example of TAF meteorological data for the EPDE military aerodrome, source: www.ogimet.com

For military aerodromes, there is a specially developed format of meteorological data TAF [1] that allows forecasting weather for a given airport. The TAF format is of two kinds: The short TAF and the large TAF [11]. In the analyzed example for the military airport EPDE in Dęblin on 1 June, a short TAF message was registered (see Figure 5). The TAF message was generated and downloaded from the internet service www.ogimet.com. It should be added that the short TAF message was updated for the EPDE aerodrome at 05, 08 and 11 Coordinated Universal Time (UTC). At 05 UTC time, in the TAF message, the following information was present: estimated mean wind direction being equal to 320°, medium speed 10kt; estimated prevailing visibility equals approximately 7000 m, restricted by a low rainfall; the extent of

cloud cover is equal to 3-4/8, at the base of the cloud of approximately 800 ft (250 m); the extent of cloud cover is equal to 5/8-7/8, at the base of the clouds of approximately 1700ft (520 m); on 01 June from 08 to 09 UTC the estimated prevailing visibility is 10000 m and above, the lowest layer of the extent of cloud cover being equal to 5-7/8, at the base of the cloud of approximately 1700 ft (520 m), another layer of the extent of cloud cover being equal to 5-7/8 at the base of the cloud of approximately 7000 ft (2100 m). At 08 UTC time, in the TAF message the following information was contained: estimated mean wind direction was equal to 330°, medium speed 10kt; estimated prevailing visibility equals approximately 8000 m, restricted by a low rainfall; the lowest layer of cloud cover is equal to 3-4/8, at the base of the cloud of approximately 800 ft (250 m), the next layer of cloud cover is 5-7/8, at the base of the cloud 1700 ft (520 m), the highest layer of cloud cover is equal to 8/8, at the base of the cloud approximately 7000 ft (2100 m); on 01 June between 10-11 UTC the estimated mean wind direction was equal to 330°, medium speed 10kt, estimated prevailing visibility was approximately 8000 m, restricted by a low rainfall, the predominant cloud cover is equal to 5-7/8 at the base of the cloud 1700 ft (520 m), the highest layer of the sky cover is equal to 8/8, at the base of the clouds of approximately 7000 ft (2100 m); on 01 June, at 09-15 UTC, with a probability of 30%, there is a likelihood of periodic changes in the visibility and cloud cover to the level of 4000 m, a shower, sky cover is equal to 5/8-7/8, at the base of the cloud approximately 1700 ft (520 m), a cumulonimbus cloud, the highest layer of the sky cover is equal to 8/8, at the base of the clouds of approximately 7000 ft (2100 m). At 11 UTC in the TAF message, the following information was given: estimated mean wind direction is equal to 340°, medium speed 10kt; estimated prevailing visibility is equal to 10000 m and above; sky cover is equal to 5/8-7/8, at the base of the clouds of approximately 1700 ft (520 m), sky covered by the cloud cumulonimbus, the highest layer of the sky cover is equal to 8/8, at the base of the clouds of approximately 7000 ft (2100 m); on 01 June, between 18-21 UTC with a likelihood of 30% forecasting possible periodic changes in mean wind direction to 360°, medium speed 10kt, visibility and cloud cover to the level of 6000 m, a shower, the lowest layer of cloud cover is equal to 3-4/8, at the base of clouds of approximately 800 ft (250 m) a cumulonimbus cloud, the next layer of the cloud cover is equal to 5-7/8 at the base of the clouds 1700 ft (520 m), the highest layer of sky cover is equal to 8/8, at the base of the clouds of approximately 7000 ft (2100 m).

4. Conclusions

The article is an example of an integration and exchange of data on the state of the troposphere for the military aerodrome EPDE in Dęblin, Poland. With regard to determining the state of the atmosphere for the military aerodrome EPDE, three empirical models were used to determine the meteorological parameters within the GNSS satellite technique, i.e. the SA model, the UNB3m model and the GPT model. The empirical models of the troposphere were used to determine the meteorological parameters (temperature, pressure and relative humidity) at the reference station REF1 in Dęblin. In addition, the article uses real meteorological data recorded by weather sensors and stored in universal formats SYNOP and TAF. The message SYNOP provided information about daily changes in the values of the temperature, pressure and relative humidity parameters. The TAF message provided data for forecasting the parameters of visibility, cloud cover and height, direction and speed of the wind.

Acknowledgements

The authors would like to thank the OGIMET service for the available meteorological data.

This paper has been supported by the Polish Air Force University, Faculty of Aeronautics, Department of Air Navigation.

5. References

1. Bąkowski R.: Impact of meteorological services for civil aviation on flight safety in the Polish airspace. *Logistyka*, nr 6, 2011.
2. Bosy J.: Precise processing of satellite GPS observations in local networks located in mountain areas. *Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, Nr 522, 2005.
3. Böhm J., Möller G., Schindelegger M., Pain G., Weber R.: Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, vol. 19, no. 3, 2015, DOI 10.1007/s10291-014-0403-7.
4. Ćwiklak J., Krasuski K., Jafarnik H.: Designation the velocity of Cessna 172 aircraft based on GPS data in flight test. *Proceedings of 23rd International Conference Engineering Mechanics 2017*. Svratka, Czech Republic, 15–18 May 2017.
5. Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M.: *Bernese GPS software version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.
6. Bosy J., Kapłon J., Rohm W., Sierny J.: GNSS Meteorology. *TransNav*, vol. 5, no. 1, 2011.

7. INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE: Petit G. and Luzum B. (eds.), IERS Conventions (2010), IERS Technical Note, No. 36, Frankfurt, Germany 2010.
8. Kotarba A.: Evaluation of MODIS data as a source for a cloud amount estimation. PhD thesis. Jagiellonian University, Cracow 2011.
9. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M.: GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms. Publisher: ESA Communications. ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 2013.
10. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: Manual on codes, Volume II, Regional codes and national coding practices – No. 306. Geneva, Switzerland, 1998.
11. <http://awiacja.imgw.pl/index.php?product=taf-opis>, current on 2019.
12. <http://www.imgw.pl/meteorologia-i-gospodarka-wodna/panstwowa-sluzba-hydrologiczno-meteorologiczna/>, current on 2019.

INTEGRACJA DANYCH METEOROLOGICZNYCH W CELU MONITOROWANIA STANU TROPOSFERY NAD LOTNISKIEM W DĘBLINIE

1. Wprowadzenie

Od kilkunastu lat na całym świecie prowadzone są badania naukowe mające na celu opracowanie precyzyjnego modelu atmosfery z wykorzystaniem przede wszystkim numerycznych modeli pogody. Opracowanie tak rozbudowanego systemu, jakim jest precyzyjny model atmosfery, wymaga asymilacji i integracji wielu danych metrologicznych i troposferycznych. Przykładowymi danymi źródłowymi do modelu atmosfery są m.in. [6, 12]: produkty troposferyczne wyznaczone z użyciem techniki satelitarnej GNSS (lub innych technik kosmicznych), system pomiarowo-obserwacyjny sieci stacji hydrologicznych, system pomiarowo-obserwacyjny sieci stacji mereologicznych, system sieci stacji pomiarów aerologicznych, system sieci stacji pomiarów aktywnometrycznych, system pomiarowo-obserwacyjny sieci stacji limnologicznych, system pomiarowo-obserwacyjny sieci stacji ewaporometrycznych, system sieci obserwacji fenologicznych, system sieci radarów meteorologicznych, system sieci stacji wykrywania i lokalizacji wylądowań atmosferycznych, system odbioru i przetwarzania danych z satelitów meteorologicznych, numeryczny model prognozy pogody, pomiar bezpośredni parametrów atmosferycznych in-situ w terenie.

Integracja różnych danych meteorologicznych i troposferycznych odbywa się zazwyczaj z udziałem zewnętrznego pakietu specjalistycznego oprogramowania do analizy numerycznej stanu atmosfery. Analiza numeryczna danych wejściowych dla precyzyjnego modelu atmosfery jest wykonywana w ujęciu globalnym, regionalnym lub lokalnym. Opracowanie modelu pogody o zasięgu lokalnym jest niezwykle istotne dla terenów słabo zurbanizowanych, wiejskich lub typowo rolniczych. Wówczas taki model pogody umożliwia dystrybucję produktów troposferycznych dla miejscowej ludności w czasie prawie rzeczywistym, jak i post-processingu. Ponadto lokalny system pogody zapewni ciągle informowanie o niebezpiecznych zjawiskach atmosferycznych.

Głównym celem prezentowanej pracy jest przedstawienie rezultatów integracji danych meteorologicznych i troposferycznych na potrzeby budowy lokalnego systemu monitoringu atmosfery dla lotniska wojskowego Dęblin. W tym celu w obliczeniach dokonano określenia parametrów meteorologicznych z użyciem: empirycznych modeli troposfery dla techniki satelitarnej GNSS, depeszy SYNOP oraz depeszy TAF. Depesze meteorologiczne SYNOP i TAF zostały pobrane z serwera internetowego: www.ogimet.com. Z kolei parametry meteorologiczne dla techniki satelitarnej GNSS zostały określone dla stacji referencyjnej REF1 w Dęblinie. W obliczeniach wykorzystano modele empiryczne troposfery: model atmosfery standardowej SA, model RTCA-MOPS oraz model GPT.

2. Materiały oraz metoda badawcza

W ramach techniki satelitarnej GNSS możliwe jest zastosowanie empirycznych modeli troposfery do określenia parametrów meteorologicznych, tj. temperatury, ciśnienia oraz wilgotności względnej powietrza. Na potrzeby asymilacji techniki satelitarnej GNSS w modelowaniu parametrów meteorologicznych wykorzystano następujące empiryczne modele troposfery, jak poniżej: model SA, model RTCA-MOPS, model GPT.

Parametry meteorologiczne (temperatura, ciśnienie i wilgotność względna) w modelu empirycznym SA zostały określone na podstawie formuł matematycznych, jak poniżej [2, 5]:

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0065 \cdot (h - h_0) \\ P = P_0 \cdot \left(1 - 0.000026 \cdot (h - h_0)^{5.225}\right) \\ RH = RH_0 \cdot \exp^{-0.0006396(h-h_0)} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

T – temperatura wyznaczana w modelu SA, jednostka [K]; T_0 – średnia temperatura w modelu SA, np. 18°C (291 K), jednostka [K]; P – ciśnienie wyznaczane w modelu SA, jednostka [hPa]; P_0 – średnie ciśnienie w modelu SA, np. 1013.25 hPa, jednostka [hPa]; RH – wilgotność względna wyznaczana w modelu SA, jednostka [%]; RH_0 – średnia wilgotność względna w modelu SA, np. 50%, jednostka [%]; h – określona wysokość, jednostka [m]; h_0 – poziom morza, np. 0 m, jednostka [m].

Parametry meteorologiczne (temperatura, ciśnienie i wilgotność względna) w modelu empirycznym RTCA-MOPS zostały określone na podstawie formuł matematycznych, jak poniżej [2, 9]:

$$\begin{cases} T = T_0 - \beta_0 \cdot h \\ P = P_0 \cdot (T / T_0)^{(g/R \cdot \beta_0)} \\ RH = RH_0 \cdot (T / T_0)^{(g \cdot \lambda / R \cdot \beta_0) - 1} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

T – wyznaczana temperatura w modelu RTCA-MOPS, jednostka [K]; T_0 – interpolowana temperatura, temperatura T_0 jest interpolowana na podstawie dnia roku, szerokości geodezyjnej odbiornika, średniej i sezonowej zmiany temperatury z poprzednich lat, jednostka [K]; P – wyznaczane ciśnienie w modelu RTCA-MOPS, jednostka [hPa]; P_0 – interpolowane ciśnienie, ciśnienie P_0 jest interpolowane na podstawie dnia roku, szerokości geodezyjnej odbiornika, średniej i sezonowej zmienności ciśnienia z poprzednich lat, jednostka [hPa]; RH – względna wilgotność w modelu RTCA-MOPS, jednostka [%]; RH_0 – interpolowana wilgotność względna, wilgotność względna RH_0 jest interpolowana na podstawie dnia roku, szerokości geodezyjnej odbiornika, średniej i sezonowej zmienności wilgotności względnej z poprzednich lat, jednostka [%]; h – określona wysokość, jednostka [m]; g – standardowe przyspieszenie grawitacyjne, jednostka [m/s^2]; β_0 – interpolowana zmienność temperatury, współczynnik zmiany temperatury β_0 jest interpolowany na podstawie dnia roku, szerokości geodezyjnej odbiornika, średniej i sezonowej zmienności współczynnika zmiany temperatury z poprzednich lat, jednostka [K/m]; λ_0 – interpolowana zmienność zawartości pary wodnej, współczynnik zmiany zawartości pary wodnej λ_0 jest interpolowany na podstawie dnia roku, szerokości geodezyjnej odbiornika, średniej i sezonowej zmienności współczynnika zmiany zawartości pary wodnej z poprzednich lat, jednostka [-]; R – stała gazowa, jednostka [J/K·kg].

Model empiryczny troposfery GPT umożliwia wyznaczenie tylko temperatury i ciśnienia powietrza jako parametrów meteorologicznych w postaci [3, 7]:

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0065 \cdot (h - h_0) \\ P = P_0 \cdot \left(1 - 0.000026 \cdot (h - h_0)^{5.225}\right) \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

T – temperatura wyznaczana w modelu GPT, jednostka [K]; T_0 – interpolowana temperatura, temperatura T_0 jest funkcją daty juliańskiej oraz współrzędnych odbiornika, jednostka [K]; P – ciśnienie wyznaczane w modelu GPT, jednostka [hPa]; P_0 – ciśnienie interpolowane, ciśnienie P_0 jest funkcją daty juliańskiej oraz współrzędnych odbiornika, jednostka [hPa]; h – wysokość wyznaczana w systemie ortometrycznym, jednostka [m]; h_0 – poziom morza, np. 0 m, jednostka [m].

3. Rezultaty oraz dyskusja

W tab. 1 dokonano porównania wartości parametrów meteorologicznych (T , p , RH) na podstawie modeli empirycznych troposfery SA, RTCA-MOPS oraz GPT. Wartości parametrów meteorologicznych (T , p , RH) zostały określone dla stacji referencyjnej REF1 zlokalizowanej na terenie lotniska wojskowego EPDE w Dęblinie. Obliczenia numeryczne stanu troposfery zostały wykonane dla 1 czerwca. Należy dodać, że warunki meteorologiczne zostały wyznaczone na potrzeby wykonywanego w tym dniu eksperymentu lotniczego w ramach implementacji techniki satelitarnej GNSS dla procedur podejścia samolotu Cessna 172 do lądowania na lotnisku wojskowym w Dęblinie [4]. Wartości parametrów meteorologicznych (T , p , RH) odniesiono do współrzędnych geodezyjnych stacji referencyjnej REF1, jak poniżej: Szerokość: $51^{\circ} 33' 19,92606''$ N; Długość: $21^{\circ} 52' 08,72275''$ E; wysokość elipsoidalna: 152,069 m. Wartość temperatury powietrza w modelu SA wynosi 290,2 K, w modelu RTCA-MOPS odpowiednio 284,3 K, zaś w modelu GPT jest równa 291,9 K. Wartość ciśnienia atmosferycznego w modelu SA wynosi 995,2 hPa, w modelu RTCA-MOPS odpowiednio 994,6 hPa, zaś w modelu GPT jest równa 1002,9 hPa. Wartość względna wilgotności powietrza w modelu SA wynosi 45,4%, w modelu RTCA-MOPS odpowiednio 71,1%, zaś w modelu GPT nie jest po prostu wyznaczana.

Tabela 1

Porównanie danych meteorologicznych (T , p , RH) z użyciem empirycznych modeli troposfery SA, UNB3m oraz GPT

Parametr	SA model	RTCA-MOPS model	GPT model
Temperatura [K]	290.2	284.3	291.9
Ciśnienie [hPa]	995.2	994.6	1002.9
Wilgotność względna [%]	45.4	71.1	Nie dostępny

```
#####
#  SYNOPS de 12490, Deblin / Irena (Poland) | 51-33N | 021-51E | 124 m
#####
201006012200 AAXX 01221 12490 41560 83505 10154 20136 40042 57005 76162 8753/
                    555 6//89=
201006012100 AAXX 01211 12490 42560 73405 10156 20135 40045 57004 8553/
                    555 6//87=
201006012000 AAXX 01201 12490 42560 73405 10160 20133 40049 54000 8453/
                    555 6//84=
201006011800 AAXX 01181 12490 42560 73404 10170 20135 40049 57001 8553/
                    555 6//80=
201006011700 AAXX 01171 12490 42560 73506 10178 20135 40048 57003 8553/
                    555 6//76=
```

Rys. 1. Przykładowe dane meteorologiczne z depeszy SYNOP 12490

W okolicach lotniska wojskowego w Dęblinie istnieje infrastruktura techniczna stacji meteorologicznej SYNOP Dęblin/Irena 12490 do monitoringu zmian parametrów atmosfery w czasie prawie rzeczywistym. Stacja meteorologiczna SYNOP Dęblin/Irena 12490 jest obiektem cywilnym i stanowi własność Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej z siedzibą w Warszawie. Stacja meteorologiczna SYNOP Dęblin/Irena 12490 gromadzi parametry meteorologiczne z częstotliwością zapisu co 1 godz., odniesioną do czasu uniwersalnego UTC [8, 10]. Na rys. 1 przedstawiono fragment depeszy SYNOP dla stacji meteorologicznej Dęblin/Irena 12490, który został wygenerowany z serwisu internetowego www.ogimet.com. Z depeszy SYNOP dla stacji meteorologicznej Dęblin/Irena 12490 zostały przedstawione i zaprezentowane podstawowe parametry atmosfery, tj. temperatura, ciśnienie i wilgotność względna powietrza. Wartości parametrów meteorologicznych (T, p, RH) są odniesione do współrzędnych stacji SYNOP Dęblin/Irena, jak poniżej: Szerokość: 51°33' N; Długość: 21°51' E; wysokość nad poziomem morza: 124 m.

Na rys. 2 pokazano dzienną zmianę temperatury powietrza zarejestrowaną przez sensor meteorologiczny na stacji SYNOP Dęblin/Irena 12490. Minimalna temperatura w dniu 1 czerwca wyniosła 13,4°C o godzinie 03:00:00 czasu UTC, zaś maksymalna wyniosła 18,4°C o godzinie 15:00:00 czasu UTC. Ponadto średnia wartość temperatury w tym dniu wyniosła 15,9°C, zaś mediana jest równa 15,8°C. Od godziny 02 UTC do godziny 15 UTC wyraźnie widać, że wartości parametru temperatury stale wzrastają na podstawie danych meteorologicznych z depeszy SYNOP. Z kolei od godziny 15 UTC do godziny 22 UTC można stwierdzić, że wartości parametru temperatury stale maleją na podstawie danych meteorologicznych z depeszy SYNOP. Należy zaznaczyć, że o godzinie 01, 19 i 23 czasu UTC sensor meteorologiczny na stacji SYNOP Dęblin/Irena 12490 nie zapisał żadnych danych liczbowych dotyczących parametru temperatury.

Rys. 2. Temperatura dla stacji SYNOP 12490

Na rys. 3 pokazano dzienną zmianę ciśnienia powietrza zarejestrowaną przez sensor meteorologiczny na stacji SYNOP Dęblin/Irena 12490. Minimalna wartość ciśnienia 1 czerwca wyniosła 1004.2 hPa o godzinie 22:00:00 czasu UTC, zaś maksymalna wyniosła 1005.5 hPa o godzinie 09:00:00 czasu UTC. Ponadto średnia wartość ciśnienia w tym dniu wyniosła około 1005 hPa, zaś mediana jest również równa 1005 hPa. Od godziny 02 UTC do godziny 09 UTC wyraźnie widać, że wartości parametru ciśnienia stale wzrastają na podstawie danych meteorologicznych z depeszy SYNOP. Z kolei od godziny 09 UTC do godziny 22 UTC można stwierdzić, że wartości parametru ciśnienia stale maleją na podstawie danych meteorologicznych z depeszy SYNOP. Należy zaznaczyć, że o godz. 01, 19 i 23 czasu UTC sensor meteorologiczny na stacji SYNOP Dęblin/Irena 12490 nie zapisał żadnych danych liczbowych dotyczących parametru ciśnienia atmosferycznego.

Rys. 3. Ciśnienie dla stacji SYNOP 12490

Rys. 4. Wilgotność względna dla stacji SYNOP 12490

Na rys. 4 pokazano dzienną zmianę wilgotności względnej powietrza zarejestrowaną przez sensor meteorologiczny na stacji SYNOP Dęblin/Irena 12490. Minimalna wartość wilgotności względnej w dniu 1 czerwca wyniosła około 73% o godzinie 13:00:00 czasu UTC, zaś maksymalna wyniosła 94,3% o godzinie 02:00:00 czasu UTC. Ponadto średnia wartość wilgotności względnej w tym dniu wyniosła 81.2%, zaś mediana wynosiła około 79%. Od godziny 02 UTC do godziny 15 UTC wyraźnie widać, że wartości parametru wilgotności względnej stale maleją na podstawie danych meteorologicznych z depeszy SYNOP. Z kolei od godziny 15 UTC do godziny 22 UTC można stwierdzić, że wartości parametru wilgotności względnej stale wzrastają na podstawie danych meteorologicznych z depeszy SYNOP. Należy zaznaczyć, że o godzinie 01, 19 i 23 czasu UTC sensor meteorologiczny na stacji SYNOP Dęblin/Irena 12490 nie zapisał żadnych danych liczbowych dotyczących parametru wilgotności względnej powietrza.

short TAF from EPDE, ().

```

FC 01/06/2010 11:00-> TAF EPDE 011100Z 0112/0121 34010KT 9999 BKN017 OVC070
                        PROB30 TEMPO 0117/0121 36010KT 6000 SHRA SCT010CB BKN017
                        OVC070=

FC 01/06/2010 08:00-> TAF EPDE 010800Z 0109/0118 33010KT 8000 -RA SCT008 BKN017 OVC070
                        BECMG 0110/0111 33010KT 8000 -RA BKN017 OVC070
                        PROB30 TEMPO 0109/0115 4000 SHRA BKN017CB OVC070=

FC 01/06/2010 05:00-> TAF EPDE 010500Z 0106/0115 32010KT 7000 -RA SCT008 BKN017
                        BECMG 0108/0109 9999 BKN017 BKN070=
    
```

No large TAF reports from EPDE during solicited interval in the database.

Rys. 5. Przykładowa depesza TAF dla lotniska EPDE w Dęblinie, źródło: ogimet.com

Dla lotnisk wojskowych został specjalnie opracowany format danych meteorologicznych TAF [1], umożliwiający prognozę pogody dla danego lotniska. Format TAF ma dwa podstawowe rodzaje: TAF krótki (ang. *short TAF*) oraz duży TAF (ang. *large TAF*) [11]. W analizowanym przykładzie dla lotniska wojskowego EPDE w Dęblinie 1 czerwca została zarejestrowana krótka depesza TAF (patrz rys. 5). Depesza TAF została wygenerowana i pobrana z serwisu internetowego www.ogimet.com. Należy dodać, że krótka depesza TAF została aktualizowana dla lotniska EPDE o godz. 05, 08 i 11 czasu uniwersalnego UTC. O godz. 05 czasu UTC w depeszy TAF zawarte były następujące informacje: prognozowany średni kierunek wiatru jest równy 320° , o średniej prędkości 10KT; prognozowana widzialność przeważająca wynosi około 7000 m, ograniczona przez słaby opad deszczu; niebo pokryte chmurami w stopniu 3-4/8, przy podstawie chmur ok. 800 ft (250 m); niebo pokryte chmurami w stopniu 5/8-7/8, przy podstawie chmur ok. 1700 ft (520 m); w dniu 1 czerwca w godz. od 08 do 09 czasu UTC prognozowana widzialność przeważająca wynosi 10 000 m i więcej, najniższa warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 5-7/8, przy podstawie chmur ok. 1700 ft (520 m), kolejna warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 5-7/8 i podstawie chmur ok. 7000 ft (2100 m). Z kolei o godzinie 08 czasu UTC w depeszy TAF zawarte były następujące informacje: prognozowany średni kierunek wiatru jest równy 330° , o średniej prędkości 10KT; prognozowana widzialność przeważająca wynosi ok. 8000 m, ograniczona przez słaby opad deszczu; najniższa warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 3-4/8 podstawie chmur około 800 ft (250 m), kolejna warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 5-7/8 i podstawie chmur 1700 ft (520 m), najwyższa warstwa nieba pokryta chmurami w stopniu 8/8, przy podstawie chmur ok. 7000 ft (2100 m); w dniu 1 czerwca w godz. od 10 do 11 czasu UTC prognozowany średni kierunek wiatru jest równy 330° , o średniej prędkości 10KT, prognozowana widzialność przeważająca wynosi ok. 8000 m, ograniczona przez słaby opad deszczu, przeważająca warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 5-7/8 i podstawie chmur 1700 ft (520 m), najwyższa warstwa nieba pokryta chmurami w stopniu 8/8, przy podstawie chmur ok. 7000 ft (2100 m); w dniu 1 czerwca, w godzinach 09-15 czasu UTC, z prawdopodobieństwem 30% prognozowana jest możliwość okresowych zmian widzialności i zachmurzenia do poziomu 4000 m, przelotny opad deszczu, niebo pokryte chmurami w stopniu 5/8-7/8, przy podstawie chmur ok. 1700 ft (520 m) przez chmurę cumulonimbus, najwyższa warstwa nieba pokryta chmurami w stopniu 8/8, przy podstawie chmur około 7000 ft (2100 m). O godz. 11 czasu UTC w depeszy TAF zawarte były następujące informacje: prognozowany średni kierunek wiatru jest równy 340° , o średniej prędkości 10KT; prognozowana widzialność przeważająca wynosi 10000 m i więcej; niebo pokryte

chmurami w stopniu 5/8-7/8, przy podstawie chmur około 1700 ft (520 m) przez chmurę cumulonimbus, najwyższa warstwa nieba pokryta chmurami w stopniu 8/8, przy podstawie chmur ok. 7000 ft (2100 m); w dniu 1 czerwca, w godzinach 18-21 czasu UTC, z prawdopodobieństwem 30% prognozowana jest możliwość okresowych zmian średniego kierunku wiatru do 360°, o średniej prędkości 10KT, widzialności i zachmurzenia do poziomu 6000 m, przelotny opad deszczu, najniższa warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 3-4/8 podstawie chmur około 800 ft (250 m) przez chmurę cumulonimbus, kolejna warstwa zachmurzenia o wielkości pokrycia nieba 5-7/8 i podstawie chmur 1700 ft (520 m), najwyższa warstwa nieba pokryta chmurami w stopniu 8/8, przy podstawie chmur ok. 7000 ft (2100 m).

4. Wnioski

W artykule przedstawiono przykład integracji i wymiany danych o stanie troposfery dla lotniska wojskowego EPDE w Dęblinie w Polsce. W ramach określenia stanu atmosfery dla lotniska wojskowego EPDE wykorzystano 3 modele empiryczne troposfery stosowane do określenia parametrów meteorologicznych w technice satelitarnej GNSS, tj.: model SA, model UNB3m oraz model GPT. Empiryczne modele troposfery zostały wykorzystane do określenia parametrów meteorologicznych (temperatury, ciśnienia i wilgotności względnej) na wysokości stacji referencyjnej REF1 w Dęblinie. Ponadto w artykule wykorzystano rzeczywiste dane meteorologiczne zarejestrowane przez sensory pogodowe i zapisane do uniwersalnych formatów SYNOP oraz TAF. Z depeszy SYNOP zostały wykorzystane informacje na temat dziennej zmiany wartości parametrów temperatury, ciśnienia i wilgotności względnej. Z depeszy TAF wykorzystano dane na temat prognozy parametrów widoczności, pokrycia chmur i wysokości, kierunku i prędkości wiatru.

Podziękowania

Podziękowania dla serwisu OGIMET za udostępnienie danych meteorologicznych. Artykuł został sfinansowany przez Lotniczą Akademię Wojskową w ramach badań statutowych na 2019 rok.

5. Literatura

1. Bąkowski R.: Impact of meteorological services for civil aviation on flight safety in the Polish airspace. *Logistyka*, nr 6, 2011.
2. Bosy J.: Precise processing of satellite GPS observations in local networks located in mountain areas. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Nr 522, 2005.
3. Böhm J., Möller G., Schindelegger M., Pain G., Weber R.: Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, vol. 19, no. 3, 2015, DOI 10.1007/s10291-014-0403-7.
4. Ćwiklak J., Krasuski K., Jaferník H.: Designation the velocity of Cessna 172 aircraft based on GPS data in flight test. *Proceedings of 23rd International Conference Engineering Mechanics 2017*. Svratka, Czech Republic, 15–18 May 2017.
5. Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M.: *Bernese GPS software version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.
6. Bosy J., Kapłon J., Rohm W., Sierny J.: GNSS Meteorology. *TransNav*, vol. 5, no. 1, 2011.
7. INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE: Petit G. and Luzum B. (eds.), *IERS Conventions (2010)*, IERS Technical Note, No. 36, Frankfurt, Germany 2010.
8. Kotarba A.: Evaluation of MODIS data as a source for a cloud amount estimation. PhD thesis. Jagiellonian University, Cracow 2011.
9. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M.: *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*. Publisher: ESA Communications. ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 2013.
10. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *Manual on codes, Volume II, Regional codes and national coding practices – No. 306*. Geneva, Switzerland, 1998.
11. <http://awiacja.imgw.pl/index.php?product=taf-opis>, current on 2019.
12. <http://www.imgw.pl/meteorologia-i-gospodarka-wodna/panstwowa-sluzba-hydrologiczno-meteorologiczna/>, current on 2019.