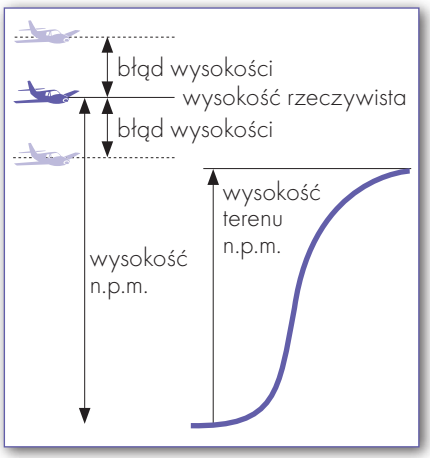
Elementy GIS-owe i geodezyjne w systemie ostrzegania samolotu przed bliskością terenu w kontekście katastrofy pod Smoleńskiem

# EGWPS

**Enhanced Ground Proximity Warning System (EGPWS) to udoskonalony system ostrzegania samolotu przed bliskością terenu, wprowadzony w 1996 roku w miejsce stosowanego od lat 70. ubiegłego wieku systemu Ground Proximity Warning System (GPWS). Dodano w nim pomiar wysokości GPS, co znacznie zwiększyło bezpieczeństwo najtrudniejszych faz lotu, do których należą start i lądowanie.**

RYSZARD PAŻUS

EGPWS ostrzega pilota samolotu przed bliskością terenu, wody i przeszkód terenowych. Spotyka się też dla niego nazwę TAWS (Terrain Awareness Warning System), co oznacza „świadomość terenową", czyli orientację. Zasadniczym celem systemu jest utrzymanie kontrolowanej wysokości w korytarzu lądowania w warunkach ograniczonej widoczności. Najczęstsze powody niebezpiecznego zbliżania się do terenu to złe warunki atmosferyczne i nieprecyzyjna nawigacja. System ostrzegania ma w takiej sytuacji uchronić przed ryzykiem wypadku CFIT (Controlled Flight Into Terrain). Statystyki mówią, że od czasu wprowadzenia EGPWS stukrotnie obniżono liczbę CFIT. W 1974 roku w lotnictwie komercyjnym jeden CFIT przypadał na 0,8 mln startów, a w 2003 roku – na 91 mln [1]. Dalsze doskonalenie tego systemu, zwłaszcza podniesienie globalnej i całodobowej niezawodności, jest w planach EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation). W perspektywie 2020 roku sytuację ma znacznie poprawić wprowadzenie GLONASS i Galileo [2]. Ocenia się, że obecnie w bazie danych EGPWS, poza globalnym numerycznym modelem terenu, jest 12 tys. lotnisk, w tym około 30 tys. pasów startowych z dokładnymi danymi dla obszarów startów i lądowania.




*Rys. 1. Wysokość geometryczna samolotu [3]*

Zostawiając aspekty systemu wykraczające poza tematykę magazynu geoinformacyjnego, jakim jest GEODETA, przejdę do omówienia tych elementów systemu EGPWS, które są podobne do pomiarów geodezyjnych i GIS-owych. Dla jasności dodam, że w lotnictwie – zgodnie ze specyfikacjami – jako jednostki stosuje się miary angielskie: 1 stopa (*foot*) równa się 0,3048 m.

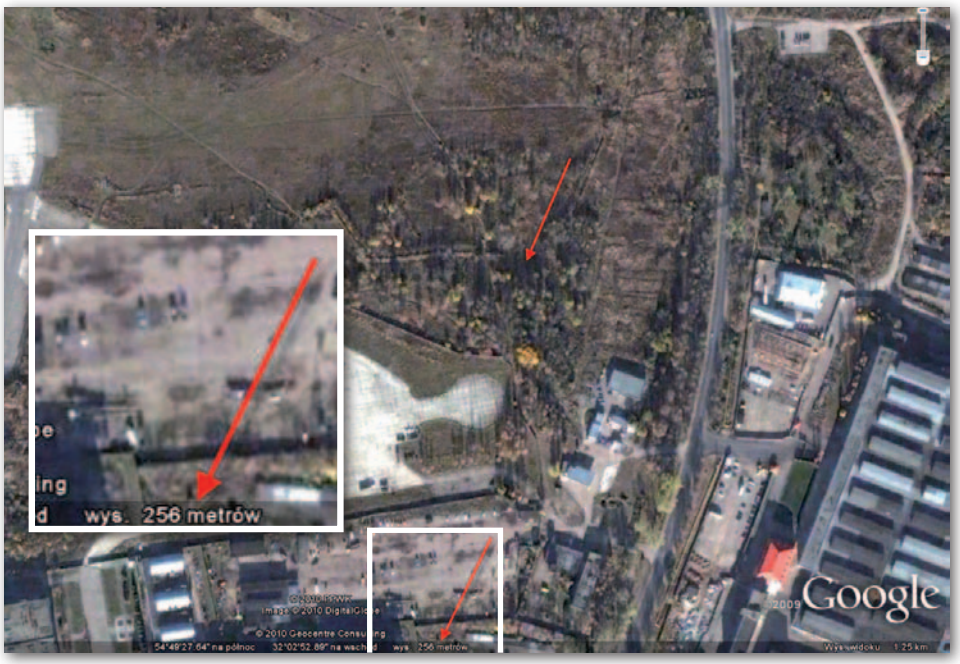
## WYSOKOŚĆ GEOMETRYCZNA

Wysokość zwaną w lotnictwie geometryczną (rys. 1) EGPWS wyznacza trzema metodami: barometryczną, radarową (radiową) i GPS. Czyli nie jeden sensor, ale kilka dostarcza danych do jej obliczenia (rys. 2). Pozycjonowanie horyzontalne (określenie długości i szerokości geograficznej) służy wyłącznie do wyznaczania wysokości samolotu nad terenem.

Wysokość geometryczna jest podstawową daną niezbędną dla monitora Awareness Display, alertu Look-Ahead i ostrzeżeń głosowych. Do jej obliczenia służy kilka danych wejściowych: skorygowana wysokość barometryczna (m.in. z tytułu błędów pomiaru ciśnienia atmosferycznego, temperatury otoczenia i błędów układu odniesienia), wysokość RA (radar altimeter, radio altimeter), wysokość GPS, a także dane wysokościowe pasa startowego. Dzięki temu komputer pokładowy ADC (Air Data Computer) podaje wysokości uwolnione od błędów ekstremalnych temperatur i niestandardowych warunków atmosferycznych, jak np. inwersja termiczna czy też nietypowe gradienty ciśnienia atmosferycznego.

Jak widać na diagramie (rys. 2), do obliczenia wysokości geometrycznej wymagane są:

- wysokość radiowa (radarowa), która jest nadrzędna, bo od niej zaczyna działać system – wysyłając alerty np. dla boeinga 727 od wysokości 2450 stóp (750 m) do 50 stóp (15 m),
- wysokość barometryczna, względna, bo związana z wysokością pasa star-




*Obraz miejsca katastrofy z Google Maps*

towego, z uwzględnieniem poprawek lokalnych ciśnienia atmosferycznego,

- wysokość z systemu GPS, czyli wysokość elipsoidalna korygowana do wysokości nad poziomem morza poprzez uwzględnienie odstępów geoidy od elipsoidy WGS-84.

Mamy więc obliczenie wysokości z sensorów o różnej dokładności VFOM (Vertical Figure of Merit). Zadanie jest o tyle proste, że realizuje się je w układzie jednowymiarowym rzędnych wysokości. Dokładności w specyfikacjach lotniczych są podawane według gaussowskiego prawa przenoszenia się błędów dla prawdopodobieństwa jego wystąpienia 95%. Stąd konieczność zastosowania kilku metod pomiaru, aby zbliżyć się do pewności. Dla zwiększenia bezpieczeństwa, poza omawianymi tu aspektami, dochodzi jeszcze warunek widoczności przez pilota punktów odniesienia, ale (jak już zastrzegłem wcześniej) nie jest to tematem tego artykułu.

Zostawmy ocenę dokładności wysokości barometrycznej i radarowej bez rozwijania tego tematu. Wypada tylko wspomnieć, o jakim rzędzie wielkości mówimy. Według wymagań ICAO (International Civil Aviation Organization) dokładność wysokości geometrycznej ASE (Altimetry System Error) musi być mniejsza lub równa (tutaj wyjątkowo z prawdopodobieństwem 99,7%):

$$\mathbf{ASE} \leq -8{,}8 \cdot 10^{-8} \cdot H^2 + 6{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot H + 50 \text{ (ft)},$$

gdzie H jest wysokością rzeczywistą.

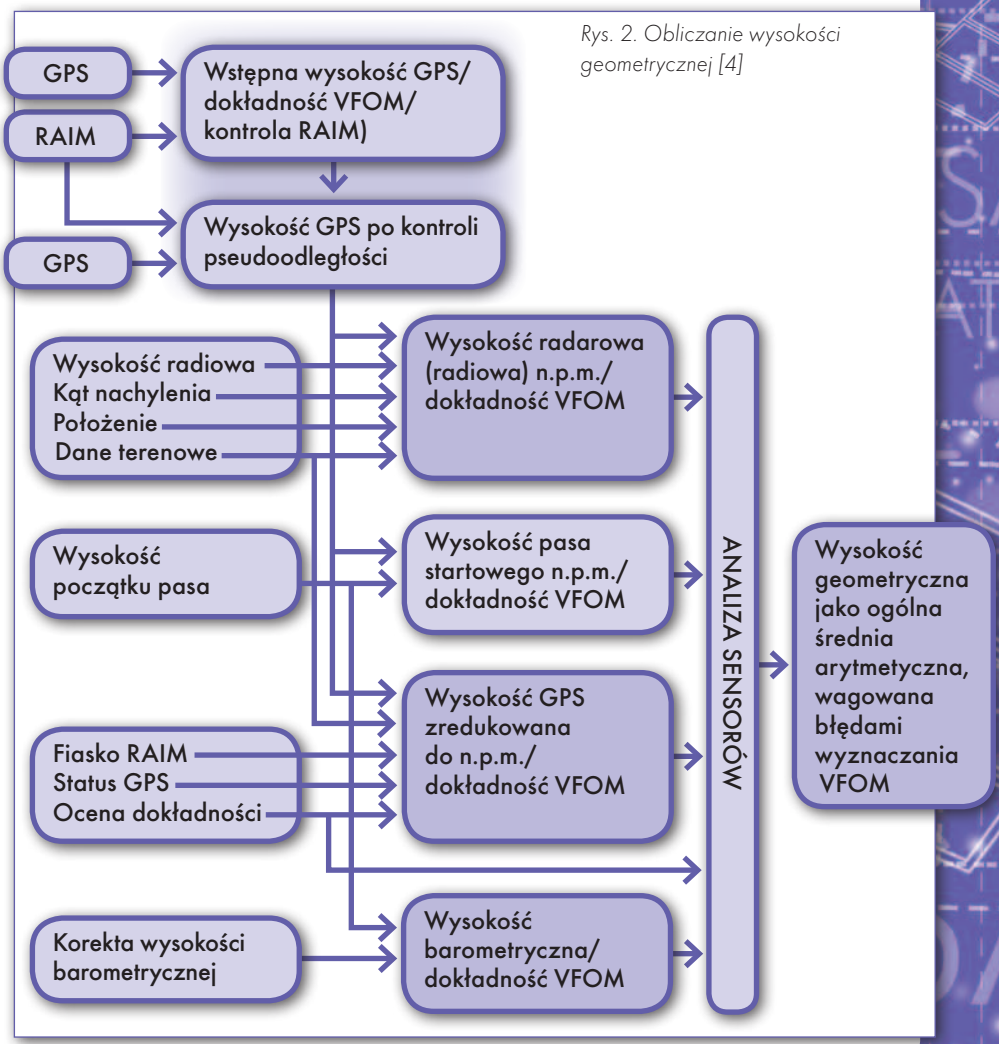
To znaczy, że system powinien gwarantować przy podejściu do lądowania dokładność 50 stóp (15,2 m). Takiej dokładności nie daje sama wysokość barometryczna z dwóch altimetrów pokładowych (Baro-VNAV), nawet przy zastosowaniu ściśle określonych rutynowych czynności sprawdzania i komparacji. Z kolei wysokość radiowa (radarowa) ma bardzo zróżnicowane dokładności VFOM w zależności od podłoża, od którego odbija się fala radiowa.

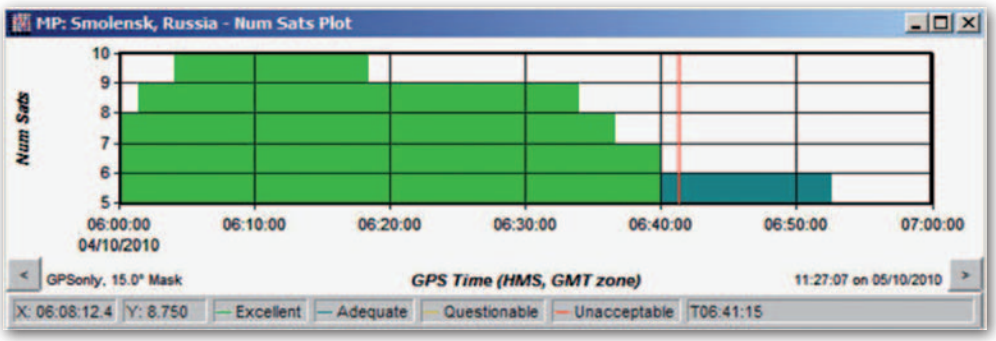
## WYSOKOŚĆ GPS

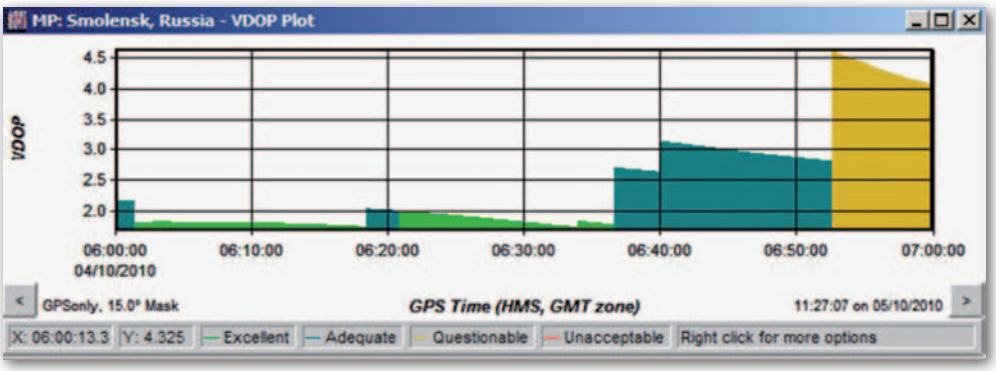
Dla potrzeb analizy dokładności całego systemu, przy założeniu zgodności z wytycznymi ICAO (AC 20-138), przyjmuje się, że dokładność sensora GPS powinna być lepsza od 2 m (7 stóp) [5]. Widać z tego, jak znaczną poprawę wyznaczenia wysokości geometrycznej daje GPS. Ale wyznaczenie to musi być wiarygodne, co oznacza konieczność dodatkowej kontroli. Mowa tu o ABAS (Aircraft-Based Augmentation System), w którym zwiększenie wiarygodności, poza porównaniem z wysokością barometryczną, bierze się z monitorowania nadmiarowych pomiarów pseudoodległości do satelitów.

Kilka elementów diagramu (rys. 2) jest wspólnych dla pomiarów geodezyjnych i GIS-owych (bardziej tych drugich). Są to przede wszystkim: parametr VFOM dla GPS, wysokość GPS ze składowymi (wy-

*Rys. 2. Obliczanie wysokości geometrycznej [4]*





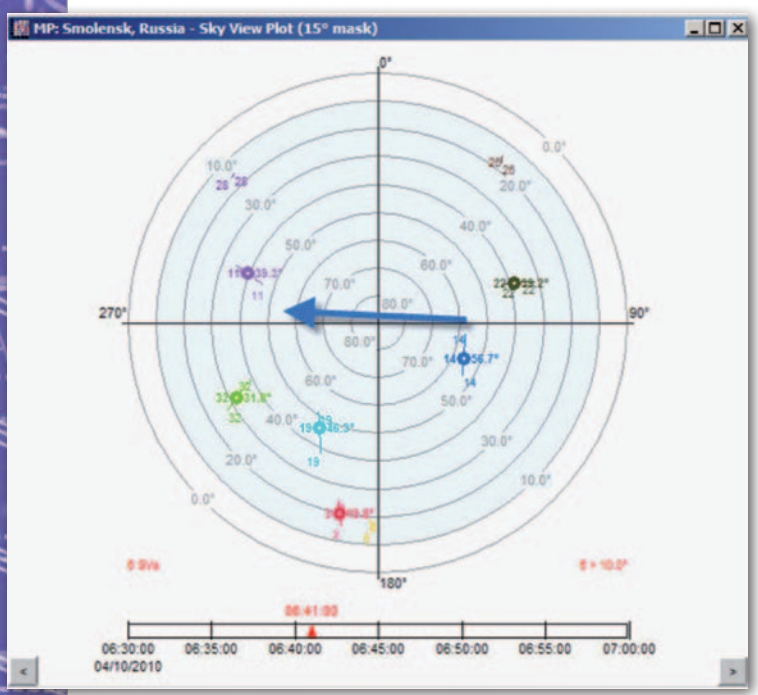

*Rys. 3. Liczba widocznych satelitów i VDOP dla Smoleńska 10 kwietnia 2010 r. o godz. 6:41:00 GMT*

sokością elipsoidalną i odstępem geoidy od elipsoidy) oraz proces monitorowania niezawodności wyznaczenia wysokości poprzez RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring).

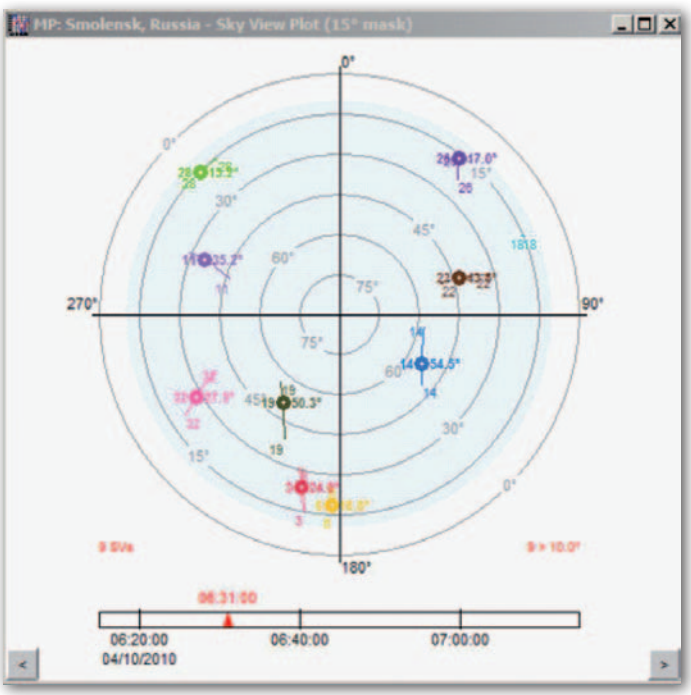
RAIM to autonomiczny (wewnątrz odbiornika GPS) monitoring zgodności danych. Ta samokontrola jakości pomiarów wymaga co najmniej 5 satelitów z dobrą geometrią określaną wskaźnikiem niemianowanym VDOP (rys. 3). Wyznaczenie podwójnego błędu średniego wysokości – w specyfikacji technicznej systemu używa się określenia VFOM – odpowiada po prostu oszacowaniu błędu z 95-procentowym prawdopodobieństwem jego nieprzekroczenia.

Dla wykrycia błędnego pomiaru pseudoodległości do satelity i jego usunięcia z obliczeń wymagania RAIM są większe – potrzeba co najmniej 6 satelitów. Można tu dodać, że od niedawna, bo dopiero od połowy 2009 roku FAA (US Federal Aviation Administration) wymaga wykonania przed lotem analizy, czy na trasie lotu i na lotniskach, włączając lotnisko zapasowe, będzie widoczna wymagana liczba satelitów GPS [6]. Dotyczy to jednak procedur, w których GPS jest wyłącznym źródłem nawigacji samolotu. Sytuacja jest więc podobna do planowania pomiarów geodezyjnych odbiornikami GNSS, których wytrawny geodeta nie rozpocznie bez sprawdzenia spodziewanego PDOP (Position Dilution of Precision). Poza wspomnianym FAA [7] również EUROCONTROL dostarcza na swoich stronach internetowych [8] niezbędnych danych do takiego planowania. Inna jest trochę prezentacja graficzna, bo dotyczy ona trasy, nie miejsca.

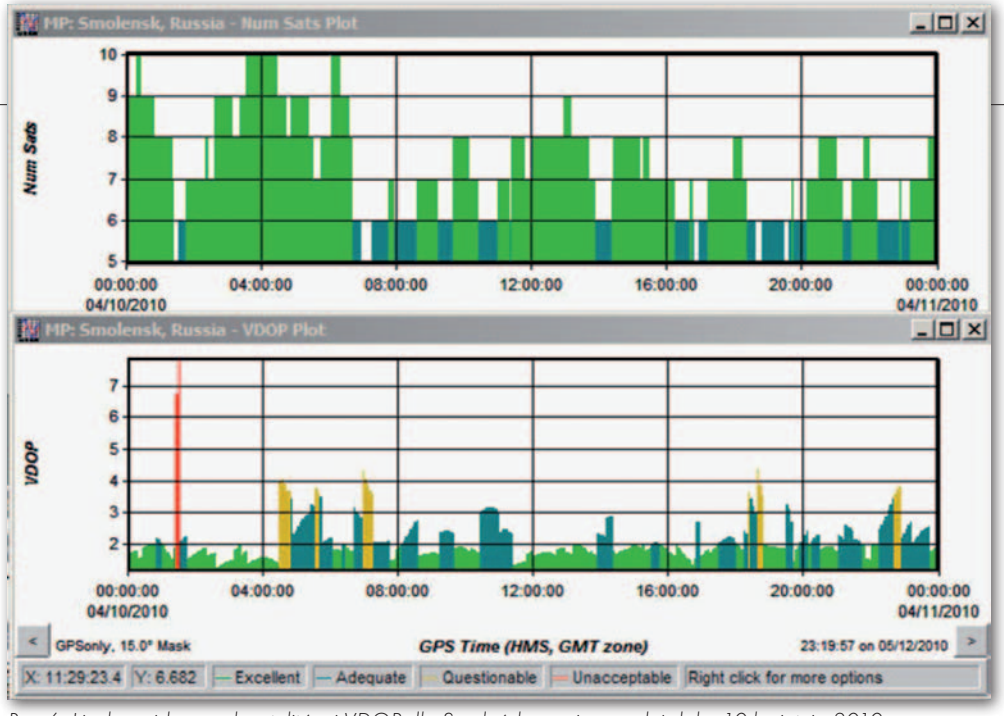
Nadmiarowa liczba widocznych satelitów i dobra ich geometria na nieboskłonie to istotny element poprawnego działania RAIM. Ma to znaczenie przede wszystkim podczas fazy startu i lądowania, bo na trasie przelotu samolot ma bardzo dobre warunki wyznaczania położenia GPS, „widząc" satelity




*Rys. 4. Szkic konfiguracji satelitów dla Smoleńska 10 kwietnia 2010 r. o godz. 6:41:00 GMT*




*Rys. 5. Szkic konfiguracji satelitów dla Smoleńska 10 kwietnia 2010 r. dziesięć minut przed katastrofą*




*Rys. 6. Liczba widocznych satelitów i VDOP dla Smoleńska w ciągu całej doby 10 kwietnia 2010 r.*

nawet poniżej kąta elewacji 0°. Ale według zaleceń EUROCONTROL domyślnie przyjmuje się maskę elewacji równą 5° z możliwością wybrania opcji: 7,5°, 10° i 12,5° [9]. Jest to zasadne przy prostym podejściu do lądowania, ale kiedy dolot jest w niecce doliny, należy raczej przyjmować bezpieczną maskę elewacji rzędu 15°. Takiej opcji w tym programie planowania lotu jednak nie ma. Jeżeli system ma dostęp do modelu terenu, to oczywiście prognozowanie możemy wykonać zdecydowanie dokładniej, ale dotyczy to prostego dolotu do pasa startowego. W podejściu do lądowania z nawrotem przeszkodami w odbiorze satelitów w strefie niskiej elewacji mogą być elementy samolotu [10].

## SMOLEŃSK

Dopiero po tym rozbudowanym wstępie można odwołać się do diagramów pokazujących sytuację w Smoleńsku w czasie katastrofy. Przyjmując, że doszło do niej o godzinie 2010-04-10 6:41:00 GMT, na rys. 3 pokazano, że od 6:35 GMT gwałtownie pogarszały się warunki monitoringu RAIM oraz nastąpiło zwiększenie wskaźnika VDOP. Z kolei na szkicu konfiguracji satelitów (rys. 4) widać, jak ważny był niezakłócony odbiór z satelity SVN3 (kolor czerwony), bo bez tej obserwacji pozostałe satelity nie dawały dobrego VFOM, co mogło skutkować przekroczeniem dopuszczalnego limitu dla tej fazy lotu i wysłaniem sygnału „RAIM failure". Wykluczenie wysokości GPS z obliczeń powoduje skokową zmianę (pogorszenie) dokładności określania wysokości geometrycznej. Na rysunku tym strzałka pokazuje kierunek lotu.

Celem tego artykułu jest wskazanie pewnych szczegółów, które prawdopodobnie normalnie nie są przedmiotem analiz. Autorowi nie chodzi tu o rozwiązywanie zagadek, w których jest więcej pytań niż odpowiedzi. Faktem jest jednak, że mieliśmy tu przypadek wyjątkowego zbiegu nieszczęśliwych okoliczności, bo np. 10 minut wcześniej warunki wyznaczenia wysokości GPS były korzystne, widocznych było dziewięć satelitów przy masce elewacji 15° (9SVs > 10,0°), co widać na diagramie (rys. 5). Dawało to możliwość niezakłóconego monitoringu RAIM.

Na rys. 6 pokazano liczbę satelitów i wskaźnik VDOP na całą dobę 10.04.2010 z zaznaczeniem kolorem czerwonym okresów nie do zaakceptowania (Unacceptable) i okresów wątpliwych, niepewnych (Questionable).

Ten znany problem jest obecnie przedmiotem specjalnej troski U.S. Air Force Global Positioning Systems Wing, które zapowiedziało na początku 2010 roku modernizację systemu, polegającą na przesunięciu kilku satelitów na orbitach dla poprawienia dokładności [patrz NAWI 3/2010, dodatek miesięcznika GEODETA].

## UNDULACJA GEOIDY

Pozostaje jeszcze do omówienia, jak istotne jest uwzględnienie poprawnych dla miejsca lądowania odstępów geoidy od elipsoidy. Wystarczy skorzystać np. z ogólnodostępnego kalkulatora National Geospatial-Intelligence Agency NGA EGM96 Geoid Calculator [11]. Dla potrzebnych tu dokładności model geoidy EGM96 w zupełności wystarcza. Dla Smoleńska różnica wysokości elipsoidalnych i wysokości n.p.m. (undulacja) to wielkość 57 stóp (17,4 m), tzn. od wysokości elipsoidalnej otrzymanej z GPS należy odjąć 57 stóp, aby otrzymać poprawną wysokość nad poziomem morza (n.p.m.). Dla lotniska w Warszawie undulacja wynosi 103 stopy. Mamy więc sytuację, w której nieuwzględnienie tej różnicy spowoduje, że system będzie z wysokości GPS obliczał wysokość geometryczną w Smoleńsku niżej o 46 stóp niż w rzeczywistości, co w systemie ABAS w konsekwencji opóźni wysyłanie sygnałów ostrzegawczych niebezpiecznego zbliżania się do terenu.

DR RYSZARD PAŻUS
(GeoDigitalGPS)

W prezentacji graficznej wykorzystano program Waypoint Tool Box 1.002506 OEMV/SPAN Trajectory and Raw Data Analysis Software, Copyright NovAtel Inc. 2009

Literatura

•[1] Just How Effective is EGPWS? http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/EG PWS-Effectiveness.pdf
•[2] The Navigation Application & Navaid Infrastructure Strategy for the ECAC Area up to 2020, European Organisation for the Safety of Air Navigation http://www.ecacnav.com/downloads/NAV%20Application%20+%20NAVAID%20Infrastructure%20Strategy%20 15MAY08%20Agreed%20at%20SCG-8.pdf
•[3] Geometric Altitude, Honeywell http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/Geomentric-Altitude.pdf
•[4] Description of Geometric Altitude for the EGPWS, AlliedSignal Electronic & Avionics System, 1998 http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/Geomentric-Altitude-Paper.pdf
•[5] ICAO Performance Based Navigation Manual, RNP Special Operational Requirements Study Group (RNPSO RSG , ) Final Working Draft, 7th March 2007
•[6] GPS RAIM Prediction, AIR ROUTING INTERNATIONAL, A Rockwell Collins Company, http://www.airrouting.com/gps-raimprediction.html
•[7] AC90-100A GPS RAIM PREDICTION, U.S. Federal Aviation Administration, http:// www. raimprediction.net/ac90-100
•[8] AUGUR GPS RAIM Prediction Tool - GPS Status, EUROCONTROL http://augur.ecacnav.com/augur/app/home
•[9] AUGUR GPS RAIM Prediction Tool – Help, EUROCONTROL http://augur.ecacnav.com/augur/app/help
•[10] http://www.pilotpedia.com/wiki/index.php?title=RAIM&redirect=no&printable=yes&printable=yes
•[11] National Geospatial- Intelligence Agency NGA EGM96 Geoid Calculator http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html