

- [2] Zieliński A.: *Możliwe scenariusze zmian i rozwoju rynku telewizyjnego w Polsce*, Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, nr 1–2/2014
- [3] Lemańska M.: *Darmowa telewizja na topie*, Rzeczpospolita – Telekomunikacja&IT, 01.08.2013
- [4] Zieliński A.: *Poland's Electronic Media Market – the possible changes from digitisation*, The Journal of the Institute of Telecommunications Professionals, tom 4 part 4, 2008
- [5] Zieliński A.: *Polskie media elektroniczne na rozdrożu*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 5, 2010
- [6] Streżyńska A.: *Cyfrowe żniwa w telewizji*, Rzeczpospolita B11, 10.04.2014
- [7] *Prognoza gospodarstw domowych według województw na lata 2008–2035*, GUS, 2010
- [8] Prezes UKE: *Możliwości wykorzystania drugiej dywidendy cyfrowej*, Warszawa, 24.04.2013 (www.uke.gov.pl)
- [9] Gaj M. (prezes UKE): *Wyniki konsultacji drugiej dywidendy cyfrowej w Polsce*, sierpień 2014, (www.uke.gov.pl)
- [10] UKE: *Ogłoszenie o dostępności zasobów częstotliwościowych z zakresu 174–230 MHz, które mogą być wykorzystane przez systemy telewizji cyfrowej*, <http://uke.gov.pl>, 09.11.2013
- [11] Zielińska U.: *Więcej darmowej telewizji*, Rzeczpospolita B4, 31.10 – 2.11.2014
- [12] Orłowski A.: *Problemy w związku z wykorzystaniem tzw. drugiej dywidendy cyfrowej*, referat na seminarium IŁ, 29.01.2014 (<http://www.itl.waw.pl/prace-naukowe/seminaria-naukowe>)
- [13] Domański M., Dziembowski A., Kuehn A., Meloch D.: *Telewizja swobodnego punktu widzenia – nowa usługa czy futurystyczna wizja?*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne nr 8–9, 2014
- [14] Lemańska M.: *Polacy oswojeni ze smart TV*, Rzeczpospolita B2-3, 14.03.2014
- [15] Prezes UKE: *Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2013 roku*, Warszawa, czerwiec 2013, (www.uke.gov.pl)
- [16] Raport firmy IDATE: *Television & OTT 2013* (www.eutelsat.com/files/contributed/news/media-library/brochures/Hybrid-TV-White-Paper-iDate-Eutelsat-Orange.pdf)
- [17] www.idate.org/en/News/TV-Video-Services-worldwide_893.html
- [18] Raport firmy IDATE: *Advanced TV services for all, available now with Hybrid Broadband TV solutions* (www.eutelsat.com/files/contributed/news/media_library/brochures/Hybrid-TV-White-Paper-iDate-Eutelsat-Orange.pdf)
- [19] <http://www.digitaltvresearch.com>
- [20] Zieliński A., Zieliński K.: *Mobile Telecommunication Systems Changed the Electronic Communications and ICT Market*, Journal of Telecommunications and Information Technology, No 2/2013
- [21] *Badania TNS Polska (OBOP) dla Toshiba* (www.media2.pl/technologie/104328-Polacy-chca-kupowac-nowe-telewizory.html)
- [22] www.pclab.pl/news50733.html: HEVC – nowy standard kompresji wideo nadchodzi
- [23] Stysiak M.: *Poczta ratuje TVP*, Gazeta Wyborcza – Gospodarka, 25.11.2014

Jacek JANUSZEWSKI*

DOI: 10.15199/59.2015.5.3

Integralność nawigacyjnych systemów satelitarnych, globalnych i wspomagających

Obecnie (kwiecień 2015) współrzędne pozycji są określane najczęściej za pomocą nawigacyjnych systemów satelitarnych (NSS) oraz systemów je wspomagających SBAS (*Satellite Based Augmentation System*). Od czasu powstania tych systemów do najważniejszych parametrów techniczno-eksploatacyjnych można zaliczyć ich zasięg, dostępność oraz dokładność otrzymywanej pozycji. Z czasem jednak coraz większa liczba użytkowników zaczęła sobie zadawać pytanie – czy informacje docierające do anteny odbiornika z satelitów i ewentualnie ze stacji naziemnych są poprawne i w konsekwencji czy sygnalizowane w danym momencie przez ów odbiornik współrzędne są wiarygodne. Tym samym został określony kolejny parametr każdego NSS czy też SBAS, który należy brać pod uwagę. Parametr ten to integralność (*integrity*). Dla wielu bowiem użytkowników, szczególnie transportu lotniczego, bezpieczeństwo stało się zależne od tego, czy wykorzystywane systemy zapewniają ową integralność. W artykule opisano, czy – a jeśli tak, to w jakim stopniu – systemy te, zarówno już funkcjonujące, jak i dopiero budowane, spełniają ten warunek.

W połowie ostatniej dekady XX wieku oddano oficjalnie do eksploatacji dwa globalne nawigacyjne systemy satelitarne (NSS) – amerykański GPS (*Global Positioning System*) i rosyjski GLO-NASS. W ostatnich kilkunastu latach rozpoczęto budowę dwóch kolejnych globalnych NSS – Galileo w Europie i BeiDou w Chinach. Jednocześnie wciąż zwiększa się liczba brzegowych stacji referencyjnych odmiany różnicowej systemu GPS. W kwietniu 2015 roku funkcjonowały również cztery SBAS – WAAS (USA

i Kanada), EGNOS (Europa i Afryka północna), MSAS (Japonia i wody ją okalające) oraz GAGAN (Półwysep Indyjski), piąty SDCM (Rosja) znajdował się w końcowym etapie budowy. W najbliższych latach przewiduje się oddanie do eksploatacji dwóch systemów regionalnych – QZSS w Japonii i IRNSS w Indiach. Oznacza to, że użytkownik będzie mógł korzystać z coraz większej liczby różnego rodzaju systemów satelitarnych [13], [19], [27], [30], [32], [33]. W każdym z tych systemów problem integralności wygląda inaczej.

POJĘCIE INTEGRALNOŚCI SYSTEMU SATELITARNEGO

W latach osiemdziesiątych XX wieku angielskie słowo *integrity* tłumaczono jako integralność, całość, niepodzielność (słownik Jana Stanisławskiego z 1982 roku) bądź jako termin matematyczny – całkowitość (słownik techniczny z tego samego roku). W wielkim słowniku Oxford – PWN z 2002 roku była to już tylko integralność, ale w odniesieniu do narodu, kultury i terytorium. Obecnie pojęcie *integrity* w połączeniu z systemem satelitarnym (np. *GPS integrity*, *Galileo integrity*) interpretowane jest też przez niektórych autorów, np. [20], [26], jako niezawodność tego systemu.

Pojęcie integralności zostało pierwotnie opracowane w ramach lotnictwa cywilnego jako część wymagań Międzynarodowej Organizacji Lotnictwa Cywilnego (ICAO) dla wykorzystywania globalnych NSS w nawigacji, łączności oraz zarządzaniu i nadzorze ruchu powietrznego. Integralność określa się mianem zdolności NSS do ostrzegania w dowolnym momencie swych użytkowników, znajdujących się w dowolnym punkcie, o niewłaściwym funkcjonowaniu samego systemu, co wiąże się z przekazywaniem, najlepiej na bieżąco, informacji o anomaliiach w pracy jego

* Akademia Morska w Gdyni, Katedra Nawigacji
e-mail: jacekjt@am.gdynia.pl

segmentu kosmicznego lub/i segmentu naziemnego. Może to być na przykład różniąca się od założonej emisja jednego lub więcej satelitów, w szczególności nieprawidłowości w depeszy nawigacyjnej. Dlatego też w przypadku NSS należy odróżnić integralność wybranego jego satelity (lub satelitów) od integralności samego systemu [33], [34].

O ile w transporcie lotniczym parametry związane z integralnością odnoszą się do płaszczyzny wertykalnej i horyzontalnej, to w transporcie morskim głównie do tej drugiej. W ostatnich jednak latach, ze względu na wzrost znaczenia różnego rodzaju operacji na morzu wymagających nieprzerwanie bardzo dużej precyzji, brana jest również pod uwagę płaszczyzna wertykalna. Można tu wymienić operacje związane z techniką offshorową, w przypadku której utrzymywanie pozycji statku jest priorytetem, a utrata integralności systemów referencyjnych wiąże się z zagrożeniem życia, zanieczyszczeniem środowiska i dużymi stratami finansowymi.

Ze względu na to, że użytkownik o integralności obydwu obecnie w pełni operacyjnych NSS, czyli GPS i GLONASS, informowany jest przez satelity SBAS jedynie w niektórych rejonach kuli ziemskiej, producenci odbiorników nawigacyjnych zdecydowali się na pośrednie rozwiązanie. W tym celu od kilku już lat we wszystkich nowo wprowadzanych na rynek modelach, przeznaczonych w szczególności dla użytkowników transportu, zastosowano technikę autonomicznego monitorowania integralności w samym odbiorniku, tzw. **RAIM** (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*).

Wszystkie wymienione rodzaje integralności omówiono na przykładzie systemu GPS.

INTEGRALNOŚĆ SYSTEMU GPS

Integralność systemu GPS zmieniała się w ciągu wielu lat; początkowo była to jedynie informacja o poprawności danych depeszy nawigacyjnej satelity, później wraz z oddawaniem do eksploatacji kolejnych stacji referencyjnych odmiany różnicowej i kolejnych systemów wspomagających była to integralność odpowiednio wybranych satelitów i samego systemu, a ostatnio pojęcie integralności związane z poprawnością funkcjonowania odbiornika użytkownika.

INFORMACJA O POPRAWNOŚCI DANYCH SYGNAŁU SATELITARNEGO

Wszystkie satelity systemu GPS od chwili znalezienia się na orbicie przekazują w podramce 1 swojej depeszy nawigacyjnej NAV liczącą sześć bitów informację o poprawności transmitowanych przez niego danych, zwaną w skrócie „zdrowiem” satelity (*Space Vehicle Health*). Najbardziej znaczący bit (pierwszy z sześciu), równy 0, oznacza, że wszystkie te dane są poprawne, a 1, że część ich lub wszystkie są błędne; z kolei 5 najmniej znaczących bitów wskazuje na jakość składowych sygnału emitowanego przez satelitę. Informacje dotyczące zdrowia wszystkich pozostałych satelitów systemu, tworzących w danym momencie segment kosmiczny, są zawarte w podramce czwartej i piątej, w których przekazywany jest almanach systemu. Informacja o zdrowiu każdego satelity definiowana jest przez segment naziemny.

W większości odbiorników nawigacyjnych informacja o zdrowiu poszczególnych satelitów sygnalizowana jest na ekranie odbiornika użytkownika przez literę *H* (bit 0 – satelita zdrowy) bądź *U* (bit 1 – satelita niezdrowy). Litera *U* przy wybranym satelicie oznacza, że nie jest on w odbiorniku brany pod uwagę w procesie określania pozycji. W praktyce świadczy to o tym, że satelita uważany jest za zdrowy, ze wszelkimi tego stwierdzenia konsekwencjami, tak długo, dopóki nie zmieni swojego statusu, a to z kolei może stać się dopiero w momencie najbliższego uaktualnienia jego pamięci przez jedną ze stacji korygujących segmentu naziemnego [11], [13], [15].

W systemie GPS depesza nawigacyjna jest uaktualniana co 2 godziny na najbliższe 4 godziny. Tym samym odbiornik użytkownika może nieświadomie przez kilkadziesiąt minut wykorzystywać w procesie określania pozycji satelitę transmitującego z jakichkolwiek powodów niepoprawne dane, będąc przekonanym, że satelita ów funkcjonuje prawidłowo.

INTEGRALNOŚĆ WYBRANYCH SATELITÓW – ODMIANA RÓŻNICOWA SYSTEMU DGPS

Ze względu na to, że informacja o zdrowiu satelity dotyczy jedynie poprawności emitowanych przez niego danych, użytkownik nie jest jakkolwiek drogą powiadamiany, czy współrzędne pozycji sygnalizowane przez odbiornik określono w sposób prawidłowy czy też nie. Częściowe rozwiązanie przyniosła odmiana różnicowa systemów satelitarnych, w szczególności systemu GPS.

Idea pomiarów różnicowych wykorzystywanych przede wszystkim w nawigacji morskiej polega na korygowaniu w czasie rzeczywistym pomiarów pseudoodległości do satelitów systemu dokonywanych przez odbiornik **DGPS** (*Differential Global Positioning System*) użytkownika za pomocą poprawek otrzymywanych drogą radiową (częstotliwość 283,5 – 325 kHz) z brzegowej stacji różnicowej (*Differential Reference Station & Broadcast Transmitter*), zwanej też stacją odniesienia lub referencyjną. Każda z takich stacji jest nieruchoma i zlokalizowana w miejscu o dokładnie znanych współrzędnych. Na bieżąco obliczane są w niej poprawki do pseudoodległości (*Pseudo Range Correction – PRC*) dla wszystkich widocznych w danym momencie satelitów systemu GPS. Od wielu już lat głównym źródłem informacji dla użytkowników o stacjach referencyjnych transmitujących poprawki PRC są znajdujące się na statkach morskich wydawnictwa Admiralicji Brytyjskiej (*Admiralty List of Radio Signals*), w szczególności ukazujący się corocznie tom drugi, zawierający bieżący wykaz wszystkich stacji operacyjnych i ich wybranych parametrów techniczno-eksploatacyjnych [1].

W bezpośrednim sąsiedztwie wielu stacji referencyjnych znajduje się stacja monitorująca (*Integrity Monitor*), składająca się z odbiornika poprawek PRC, odbiornika DGPS oraz odpowiednio oprogramowanego komputera. Stacja ta, dzięki pełnej znajomości swoich współrzędnych, na bieżąco sprawdza wiarygodność poprawek PRC docierających ze stacji referencyjnej oraz poprawność depeszy nawigacyjnej tych satelitów, dla których określono owe PRC. W razie braku pozytywnej weryfikacji PRC czy też depeszy satelity *S*, odpowiednia informacja zostaje niezwłocznie przekazana stacji referencyjnej, która może natychmiast wstrzymać transmisję jego poprawki.

Liczba stacji referencyjnych kontrolowanych przez stację monitorującą nieprzerwanie rośnie. W 2010 roku na 260 stacji, mających status operacyjny, takich stacji było 162 (62%), w 2014 roku na 288 stacji było już ich 236 (82%). W niektórych państwach są to wszystkie stacje znajdujące się na ich terytoriach, np. 27 w Japonii czy też 22 w Chinach, a w niektórych tylko część, np. w USA 14 stacji (na 37) było pozbawionych jakichkolwiek informacji na temat integralności. Przy stacjach, w których nie przewidziano funkcji monitorowania, figuruje krótka informacja *No*. W 2014 roku dotyczyło to wszystkich 11 stacji operacyjnych w Brazylii. W Polsce obie stacje referencyjne, Dziwnów i Rozewie, już od kilku lat są operacyjne i monitorowane [1].

Na morskich jednostkach pływających, głównych użytkowników brzegowych stacji referencyjnych, jest zainstalowany co najmniej jeden stacjonarny odbiornik systemu GPS, a jeśli są dwa lub więcej, to w większości przypadków co najmniej jeden z nich jest również odbiornikiem DGPS.

W praktyce jednak znaczna część oficerów pokładowych, szczególnie na konwencjonalnych statkach handlowych, korzystając z takiego odbiornika, całkowicie pomija odmianę różnicową. Dzieje się tak dlatego, że wielu z nich nie zna zalet tej odmiany, nie

ma na temat integralności wystarczającej wiedzy oraz ze względu na powszechnie istniejące przekonanie, że skoro system GPS zapewnia dokładność horyzontalnej pozycji użytkownika rzędu 5-10 m (95%), a odmiana różnicowa zwiększa tę dokładność do rzędu 2-3 m, to na statku o długości przekraczającej 100 m fakt ten nie może mieć większego znaczenia. Problem integralności jest tym samym całkowicie pomijany.

Użytkownik, z chwilą odbioru poprawek ze stacji referencyjnej, w szczególności nadzorowanej przez stację monitorującą, może być pewien, że te satelity, których owe poprawki dotyczą, funkcjonują poprawnie. Zdaniem więc niektórych użytkowników, odmiana różnicowa systemu satelitarnego oferuje funkcję *integrity*, zdaniem zaś innych jedynie niepełną jej wersję, gdyż wykazana wiarygodność dotyczy tylko niektórych satelitów, a konkretnie tych, których sygnały w danym momencie wykorzystano w odbiorniku do określenia pozycji, a nie samego systemu.

Oceniając przydatność odmiany DGPS w skali globalnej, należy wziąć pod uwagę, że nominalny zasięg przeważającej większości niemal 300 operacyjnych stacji referencyjnych nie przekracza kilkudziesięciu mil morskich oraz fakt, że stacje te nie są zlokalizowane na wszystkich wybrzeżach, brak ich jest na przykład na zachodnim wybrzeżu Ameryki Południowej czy też na południu kontynentu afrykańskiego. Oznacza to, że z odmiany tej użytkownicy morscy mogą korzystać tylko w niektórych rejonach świata.

INTEGRALNOŚĆ WSZYSTKICH SATELITÓW SYSTEMU GPS – SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE

W celu zwiększenia obszaru, w którym informacja o integralności będzie mogła być wykorzystywana, zdecydowano, że informacja taka znajdzie się w depeszy nawigacyjnej transmitowanej przez satelity geostacjonarne systemów wspomagających SBAS.

Pojęcie integralności (*integrity*) systemu satelitarnego pojawiło się na rynku dopiero z chwilą oficjalnego uruchomienia pierwszego satelitarnego systemu wspomagającego (SBAS), czyli w 2007 roku, kiedy to ogłoszono pełną zdolność operacyjną (*Full Operational Capability – FOC*) systemu WAAS [13]. Dwa lata później oddano do eksploatacji pierwszy z trzech serwisów europejskiego systemu wspomagającego EGNOS – serwis otwarty (*Open Service*), a w 2011 roku serwis bezpieczeństwa życia *SoL* (*Service of Life*), który wymaga od użytkownika wcześniejszego uzyskania odpowiedniego certyfikatu. W dniu 19 grudnia 2014 roku Komisja Europejska opublikowała trzecią już wersję dokumentacji tego serwisu oznaczoną symbolem 2.1 [10].

Funkcjonowanie systemu EGNOS, w szczególności serwisu *SoL*, zapewnia segment naziemny, w skład którego wchodzi 39 stacji pomiarowo-obszaryjnych *RIMS* (*Ranging and Integrity Monitoring Station*), zlokalizowanych w zdecydowanej większości w Europie i północnej Afryce. Każda z tych stacji ma jeden, dwa lub trzy niezależne kanały pomiarowe, oznaczone dużymi literami *A*, *B* i *C*. Jedyna polska stacja *RIMS* znajdująca się w Warszawie ma dwa tory *A* i *B*.

Wyniki pomiarów z kanału *C* są wykorzystywane w procesie określania integralności, w szczególności w detekcji uszkodzenia satelity *SFD* (*Satellite Failure Detection*). W kanał *C* wyposażono nie mniej niż 15 stacji *RIMS*, co umożliwia nieprzerwaną obserwację wszystkich monitorowanych satelitów systemu GPS przez co najmniej 3 stacje. Odbiornik użytkownika systemu EGNOS składa się z odbiornika systemu GPS oraz odbiornika odbierającego sygnały z satelitów geostacjonarnych. Informacje z satelitów geostacjonarnych są przekazywane z prędkością 250 bit/s w 64 wiadomościach (numeracja od 0 do 63). Dane o integralności wszystkich satelitów systemu GPS zawierają wiadomości o numerze 6. Więcej szczegółów na temat tej informacji podano we fragmencie dotyczącym integralności systemu SDCM.

Dostępny od 2011 roku serwis *SoL* jest już wykorzystywany (kwiecień 2015) przez około 140 europejskich portów lotniczych,

najwięcej we Francji (66) i Niemczech (41) oraz w Szwajcarii (6), Włoszech (5), Czechach (4), Wielkiej Brytanii (3), Słowacji (2), Austrii (2), Holandii (2), Norwegii (2), Szwecji (2), Hiszpanii (1), Finlandii (1) i Polsce (1 – Katowice-Pyrzowice). W planach są kolejne porty w wymienionych krajach; w Polsce: w Gdańsku, Goleniowie, Krakowie, Lublinie, Łodzi, Poznaniu, Radomiu, Rzeszowie, Wrocławiu i obydwu w Warszawie. Wykorzystanie serwisu *SoL* przewiduje się również w innych krajach, między innymi w wytypowanych już portach Belgii, Danii, Grecji i dwóch państw północno-afrykańskich – Maroko i Tunezji, natomiast w takich krajach, jak Bułgaria, Cypr, Malta, Ukraina czy Węgry, planów nie ma [28].

Plany dalszej rozbudowy systemu EGNOS obejmują również segment naziemny, do 39 obecnie funkcjonujących stacji *RIMS* ma już niedługo dołączyć kolejnych 7 zlokalizowanych w rejonie Morza Śródziemnego [29].

FUNKCJA AUTONOMICZNEGO MONITOROWANIA W ODBIORNIKU SYSTEMU – RAIM

Jedną z głównych wad omówionych wyżej sposobów weryfikacji integralności NSS jest opóźnienie między momentem wykrycia niepoprawności w odbieranym sygnale satelitarnym, czy też określonej w odbiorniku pozycji użytkownika, a momentem przekazania o tym fakcie informacji. Nowym rozwiązaniem zapewniającym praktycznie eliminację tego opóźnienia jest wspomniana już technologia, zwana *RAIM*. Technologia ta polega na zastosowaniu takiego algorytmu monitorowania, który bierze pod uwagę pomiary odnoszące się do jednego tylko NSS. Konwencjonalne algorytmy *RAIM* są przeznaczone do ochrony użytkownika przed powstaniem błędów dotyczących w danym momencie jednego satelity. Ze względu na to, że wykrywalność tych błędów wiąże się z konkretnymi wymaganiami nawigacyjnymi, należy ustalić stopień wykrywalności, który w danym momencie zależy od jakości pomiarów oraz geometrii NSS, czyli rozmieszczenia w danym momencie wykorzystywanych satelitów.

Tradycyjna technika *RAIM* opiera się na dwóch podstawowych funkcjach – detekcji błędu i wykluczenia błędu *FDE* (*Fault Detection – FD* i *Fault Exclusion – FE*) oraz poziomie ochrony *PL* (*Protection Level*) [34]. Funkcja *FE* ma zastosowanie tylko wtedy, gdy funkcja *FD*, odpowiadająca za sprawdzenie spójności pomiarów, wykaże detekcję błędu. Celem *FE* jest natomiast ustalenie, który pomiar z danej grupy pomiarów odpowiada za wykrycie błędu w poprzednim etapie.

Ustalenie poziomu *PL* jest ściśle związane z konkretną pozycją w danym momencie. Współrzędne tej pozycji z uwzględnieniem przypisanego jej poziomu *PL* są następnie ponownie obliczane, ale już z użyciem tylko tych pomiarów, które test *FE* przeszedł pomyślnie. W klasycznej technice *RAIM*, przeznaczonej dla użytkowników nawigacji morskiej i lotnictwa cywilnego, założono, że w danym momencie może być uszkodzony tylko jeden pomiar, ostatnio jednak technika ta może być stosowana również w przypadku większej liczby uszkodzonych pomiarów.

Zakładając, że satelitą awaryjnym, nadającym fałszywe informacje, jest satelita o najgorszej zdolności detekcyjnej błędu, w obliczeniach wartości *PL* używa się dwóch metod, z których każda jest oparta na tzw. nachyleniu (*slope*) satelity o najmniejszym poziomie detekcji błędu. Nachylenie to jest parametrem geometrycznym, zależnym od geometrii systemu, czyli współrzędnych satelity i współrzędnych użytkownika w odniesieniu do płaszczyzny horyzontalnej i wertykalnej. Wartość nachylenia w obu tych płaszczyznach może zostać obliczona za pomocą odpowiednich zależności dostępnych w literaturze specjalistycznej, np. [6], [9]. W przypadku korzystania w odbiorniku z satelitów dwóch NSS w obliczeniach nachylenia należy wziąć pod uwagę parę satelitów, po jednym z każdego NSS, o najtrudniejszym stopniu wykrycia. Należy tu też podkreślić, że dobrana w tym celu para satelitów prowadząca do największego błędu pozycji nie musi składać się z dwóch satelitów o największym nachy-

leniu [2], [7]. Dlatego też w zależności od rodzaju użytkownika ryzyko utraty integralności oraz prawdopodobieństwo pominiętej detekcji może być związane z jedną tylko płaszczyzną, poziomą lub pionową. W nawigacji lotniczej podczas fazy lądowania jest to płaszczyzna pionowa.

Ze względu na to, że w odbiorniku użytkownika bezpośredni pomiar błędu określonej pozycji nie jest możliwy, stosuje się rozwiązania opierające się na próbach testowych. Współrzędne pozycji określa się za pomocą jednoczesnego pomiaru pseudo-odległości do co najmniej czterech satelitów spełniających ustalone wcześniej kryteria. W odbiornikach obecnej generacji tego pomiaru dokonuje się do wszystkich widocznych satelitów, których może być nawet kilkanaście. W takich odbiornikach mamy wówczas do czynienia z układem nieokreślonym, do obliczenia którego zastosowano metodę najmniejszych kwadratów.

W każdej próbie testowej zostaje określony próg alarmowy TD (*Threshold*). W odbiorniku użytkownika NSS moduł obliczeń nawigacyjnych, po uwzględnieniu błędów mierzonej pseudo-odległości UERE (*User Equivalent Range Error*), określa błąd pozycji PE (*Position Error*) i przekazuje go do algorytmu RAIM, który z kolei po uwzględnieniu prawdopodobieństwa pominiętej detekcji oraz fałszywego alarmu określa poziom ochrony PL, parametry próby testowej TS oraz wartość progową TD. Algorytm ten metodą ważonych najmniejszych kwadratów oblicza następnie na dany moment błąd PE [9].

Biorąc pod uwagę zdefiniowane wyżej wartości TS, TD, PE i PL, użytkownik może się znaleźć w jednej z czterech możliwych sytuacji (tabela 1).

■ Tabela 1. Algorytm RAIM dla różnych parametrów wejściowych (TS – próba testowa, TD – wartość progowa, PE – błąd pozycji, PL – poziom ochrony [9])

Parametry wejściowe	Stan wyjściowy
TS > TD oraz PE < PL	nominalna praca systemu
TS > TD oraz PE < PL	pominięta detekcja błędu
TS < TD oraz PE < PL	alarm fałszywy
TS < TD oraz PE > PL	alarm prawdziwy

Po wybraniu przez użytkownika opcji zwanej RAIM Status stacjonarne odbiorniki obecnej generacji, ale wyższej klasy, np. Simrad MX 512, Leica MX 420, Kongsberg Seapath 320, na swoich kilkucalowych monitorach sygnalizują kilkanaście parametrów związanych z tą technologią. Oprócz współrzędnych geograficznych określonej pozycji, jej wysokości nad przyjętą elipsoidą odniesienia, współczynnika geometrycznego DOP, numerów PRN wszystkich wykorzystywanych w danym momencie satelitów i ich wysokości topocentrycznych, użytkownik informowany jest na bieżąco o kilku parametrach dotyczących bezpośrednio technologii RAIM, w szczególności o:

- szacowanym w metrach (z dokładnością do 0,1 m) błędzie szerokości, długości i wysokości nad elipsoidą określonej pozycji, odpowiednio LAT, LON i HT EST (*Estimated*) ERR,
- błędzie standardowym STD ERR, wyrażonym w metrach,
- prawdopodobieństwie pominiętej detekcji błędu (%MISS), wyrażonym w procentach (z dokładnością do 0,1%),
- ustawionym wcześniej przez użytkownika zakresie dokładności (A), w niektórych odbiornikach ACC RNG, wyrażonym w metrach,
- numerze PRN satelity o najgorszym stopniu wykrycia, największym nachyleniu (SAT ID),
- błędzie systematycznym (BIAS) dotyczącym satelity o najgorszym stopniu wykrycia,
- błędach resztkowych wszystkich wykorzystywanych w danym momencie satelitów (RESID). Błąd ten występuje w przypadku satelity o najgorszym stopniu wykrycia (SAT ID).

W odbiornikach wykorzystujących technologię RAIM, w tym również tych trzech wymienionych, użytkownik, niezależnie od rodzaju informacji widocznej na ekranie, w każdym momencie

może obserwować sygnalizowany w jego górnym prawym rogu jeden z trzech komunikatów:

- R + (RAIM SAFE), wszystkie warunki zostały spełnione, pozycja jest w pełni prawidłowa, przez niektórych zwana bezpieczną,
- R – (RAIM UNSAFE), algorytm wykrył błąd, w wyniku którego dokładność pozycji (A) jest mniejsza niż wcześniej założono, pozycja nie jest w pełni prawidłowa, przez niektórych uznawana za niebezpieczną, zagrażającą wręcz dalszej nawigacji,
- R ? (RAIM CAUTION), algorytm wykorzystuje sygnały z mniej niż 5 satelitów i nie może prawidłowo przeprowadzać dalszych obliczeń.

Jeżeli z jakichkolwiek powodów liczba satelitów spełniających określone wcześniej warunki zmniejszy się, może nastąpić wzrost poszczególnych składowych błędów pozycji, błędów standardowego i systematycznego oraz współczynnika DOP. Jeśli liczba tych satelitów zmniejszy się do czterech, następuje wyzerowanie wartości wszystkich wymienionych błędów, wzrost prawdopodobieństwa pominiętej detekcji do 100% oraz – co najważniejsze – pojawienie się komunikatu R ? z wszelkimi dla niego konsekwencjami. W odbiorniku Simrad, jeśli %MISS wzrośnie do 5 % lub więcej, na ekranie pojawia się komunikat R ? i może się on utrzymywać dopóty, dopóki %MISS nie przyjmie wartości mniejszej od 5.

Zdecydowana większość stacjonarnych odbiorników NSS, w tym również tych wyższej klasy, o dokładności określonej pozycji informuje użytkownika jedynie w sposób pośredni, najczęściej przez współczynnik DOP. Technologia RAIM gwarantuje natomiast prawidłowość określonej pozycji i znajomość parametrów dokładnościowych.

INTEGRALNOŚĆ NAWIGACYJNYCH SYSTEMÓW SATELITARNYCH W PRZYSZŁOŚCI

Modernizacja już funkcjonujących NSS oraz budowa kolejnych oznacza, że pozycja użytkownika, zarówno stacjonarnego, jak i przemieszczającego się, jest określana obecnie, i będzie też w przyszłości, najczęściej za pomocą NSS. W nawigacji morskiej i lotniczej stanowi to w wielu przypadkach jedyne źródło, z jakiego może korzystać użytkownik. Dlatego też problem zapewnienia poprawności, wiarygodności i szeroko rozumianej integralności samego systemu oraz otrzymywanej za jego pomocą pozycji uwzględniono również we wszystkich powstających NSS i SBAS.

SYSTEM GPS TRZECIEJ GENERACJI

Budowa systemu GPS trzeciej generacji zostanie rozpoczęta wprowadzeniem na orbitę pierwszego satelity tego bloku w 2016 roku. Według opublikowanych założeń, zarządzający systemem ma uzyskać możliwość dwustronnej łączności z poszczególnymi satelitami, a te z kolei będą mogły wymieniać między sobą informacje. Dzięki temu nawiązanie kontaktu z jednym satelitą zapewni kontakt również ze wszystkimi pozostałymi. Oznacza to, że parametry depezy nawigacyjnej będą mogły być uaktualniane praktycznie na bieżąco, a nie, jak w satelitach obecnej generacji, jedynie okresowo.

Trzecia generacja systemu GPS to także modernizacja jego segmentu naziemnego, który po jej zakończeniu będzie funkcjonował pod nazwą OCX (*Operational Control Segment of Next Generation*). Pierwsze prace nad integralnością GPS III były związane z analizą rodzajów i skutków błędów integralności IFMEA (*Integrity Failure Mode and Effects Analysis*) oraz definicją integralności określoną przez najbardziej zainteresowaną organizację ICAO. Prace te wykazały, że głównymi zagrożeniami dla integralności sygnału w przestrzeni (SiS) są błędy zegarów poszczególnych satelitów oraz błędy parametrów przesyłanych w depezy nawigacyjnej przez segment naziemny. Dlatego też przyjęto, że integralność GPS III będzie polegać przede wszyst-

kim na ochronie przed możliwością wystąpienia błędów sygnału satelitarnego w przestrzeni, a nie, jak dotychczas, na wykrywaniu błędów i ostrzeganiu o tym fakcie użytkownika przez wykorzystywanie wymienionych SBAS [12], [32].

Satelita trzeciej generacji będzie miał możliwość informowania segmentu OCX o zaistniałych problemach, monitorowania czasu systemu oraz anomalii własnego zegara, a także podjęcia kroków w przypadku wykrycia błędów przez wstrzymanie emisji błędnych informacji. Zaprzestanie tej emisji będzie polegać na rozpoczęciu transmisji niestandardowego kodu zamiast identyfikującego satelitę pseudoprzypadkowego szumu **PRN** (*Pseudo Random Noise*). Z kolei stacje segmentu OCX będą na bieżąco weryfikowały ważność i poprawność wszystkich obliczonych przez siebie danych jesczże przed momentem ich wysłania do satelity [17].

Depesza NAV satelitów bloku III będzie zawierała nie tylko parametr opisujący dokładność pomiaru pseudoodległości **URA** (*User Range Accuracy*), ale również jednobitowy status integralności **ISF** (*Integrity Status Flag*) przeznaczony dla każdego pojedynczego sygnału. Warunkiem korzystania z funkcji ostrzegania o możliwości otrzymywania fałszywych danych lub dysfunkcjonalności systemu GPS będzie używanie przez odbiornik użytkownika algorytmu integralności opartego na standardach RTCM/DO-236 [35].

Koncepcja integralności będzie się opierała na poziomach ochrony PL i progach alarmowania **AL** (*Alert Limit*). Poziom PL będzie obliczany w odbiorniku dla danej pozycji w czasie rzeczywistym i jeśli jego wartość przekroczy lub będzie równa wartości progu AL, odbiornik ów wygeneruje odpowiedni alarm.

Sygnały informujące użytkownika o utracie integralności wykorzystywanego systemu będą emitowane przez satelity bloku III w czasie określonej granicy alarmu. Ponadto satelity te będą wysyłały wiadomości o obecnym stanie integralności systemu **ISM** (*Integrity Status Message*) [24], [31].

SYSTEM GALILEO

Ze względu na to, że pierwsze dwa globalne NSS, czyli GPS i GLONASS, nie zapewniały informacji o integralności, twórcy mającego powstać w Europie systemu Galileo już w chwili rozpoczęcia nad nim prac zdecydowali, że informacja taka będzie przekazywana w ramach jednego z jego pięciu serwisów. Pierwsze publikacje na ten temat ukazały się w 2004 roku na jednej z konferencji amerykańskiego instytutu nawigacji, czyli zaledwie w dwa lata po podjęciu decyzji o budowie nowego systemu.

W systemie Galileo wprowadzono pojęcie integralności jako ciągłą kontrolę informacji dostarczanych przez satelitę, co ma na celu zapewnienie prawidłowego obliczania bieżącej pozycji użytkownika i wysyłania właściwego alarmu, jeśli błąd tej pozycji przekroczy ustaloną dla konkretnego zastosowania wartość graniczną. Alarm ten pojawi się w momencie, w którym system przestał być funkcjonalny, jego praca stała się nienominalna, a wiadomość z satelity zawiera komunikat, *Not-Ok* lub *Not-Monitored*, czyli że jest on odpowiednio niesprawny lub niemonitorowany [8], [23].

W celu zachowania integralności, system Galileo dodatkowo będzie zapewniać:

- dokładność sygnału w przestrzeni **SISA** (*Signal In Space Accuracy*), określaną na podstawie długoterminowych obserwacji i uwzględniającą prawdopodobieństwo błędów zegara satelity i efemeryd;
- flagi integralności **IF** (*Integrity Flags*), które są ostrzeżeniem dla satelity transmitującego sygnał o nadmiernym błędzie i określają stan satelity (*healthy*); wyróżniane są trzy stany: *Use*, *Don't Use*, *Not Monitored*; IF opiera się na krótkoterminowych obserwacjach błędów zegara, efemeryd i częstotliwości radiowej;
- monitorowanie dokładności sygnału w przestrzeni **SISMA** (*Signal In Space Monitoring Accuracy*), mające na celu ocenę dokładności błędu sygnału w przestrzeni **SISE** (*Signal In Space Error*).

Wymienione parametry umożliwiają użytkownikowi sprawdzenie zdarzenia integralności. Poziom ochrony systemu, usta-

lany za pomocą parametrów SISA i SISMA, jest porównywany nieprzerwanie z progiem alarmowym. Odbierane sygnały są wolne od błędów, o ile parametr SISA nie przekroczy wartości SISA. W przypadku gdy status systemu ukazany w kolumnie *Wiadomość z satelity dla użytkownika* sygnalizuje *Not-OK* lub *Not Monitored*, wówczas kalkulacja kolejnych pozycji zostanie przez system zaprzestana.

Integralność systemu Galileo opiera się na koncepcji poziomu ochrony, którego głównym celem jest wyliczanie i szacowanie błędów związanych z określaniem bieżącej pozycji tak, by móc kontrolować ów błąd na odpowiednim poziomie ufności. Odbiornik użytkownika, dzięki znajomości numerów i geometrii wykorzystywanych satelitów, określa dokładność obliczanej pozycji z punktu widzenia poziomu ochrony PL w płaszczyźnie wertykalnej i horyzontalnej, dodatkowo szacując błędy całego systemu oraz błędy lokalne.

Z założenia definicja integralności odnosi się do samej pozycji, w rzeczywistości można ją jednak odnieść również do parametru **SIS** (*Signal In Space*). Błąd pozycji PE zostanie wówczas zastąpiony przez błąd sygnału w przestrzeni SISE, a za poziom ochrony PL można przyjąć dokładność sygnału w przestrzeni SISA. Odpowiedni alarm zostaje uruchomiony przez ustawienie IF w odniesieniu do satelity nadającego błędną informację. Satelita taki nie może wówczas zostać ponownie wykorzystany przez użytkownika w obliczeniach poziomu ochrony ani w algorytmie określania pozycji. Kombinacja pomiędzy flagami IF oraz poziomem ochrony PL może zapewnić integralność odbieranych informacji w odniesieniu do pozycji, zaś wdrożenie algorytmów RAIM wspomaga monitorowanie integralności systemu, w celu eliminacji błędów spowodowanych warunkami lokalnymi, czyli wielodrogowością, zakłóceniami, zagłuszeniem oraz opóźnieniem jonosferycznym [8], [23].

Ostrzeżenia o utracie integralności systemu w czasie ustalonej granicy alarmu czasowego będą przekazywane w serwisie **SoL** (*Service of Life*), zwanym niekiedy *Open Service + Integrity Data*. Integralność danych zawartych w serwisie otwartym może być zaszyfrowana, co otwiera możliwość korzystania z danych o integralności systemu również przez serwisy komercyjne. Wielką zaletą serwisu SoL będzie możliwość przesyłania zintegrowanych informacji ostrzegających użytkowników o spodziewanym zmniejszeniu dokładności. W serwisie tym przewidziano dwa poziomy ryzyka:

- krytyczny, znajdujący zastosowanie w lotnictwie, w szczególności w operacjach związanych z lądowaniem; dokładność pozycji w płaszczyźnie horyzontalnej i wertykalnej ma wynosić nie mniej niż odpowiednio 4 m i 8 m;
- niekrytyczny, znajdujący zastosowanie w operacjach o mniejszym ryzyku, np. nawigacji morskiej w akwenach otwartych.

Wymagania wybranych parametrów serwisu związanych z bezpieczeństwem różnych użytkowników transportu są różne [25]. Ryzyko integralności IR ma być mniejsze od $2,0 \cdot 10^{-7}$ na każde 150 s, ryzyko utraty ciągłości CR od $8,0 \cdot 10^{-6}$ na każde 15 s, dostępność serwisu ma wynosić 100% przy nominalnej pracy systemu, 99,5% w przypadku najgorszej możliwej lokalizacji użytkownika **WUL** (*Worst possible User Location*), zaś czas do ogłoszenia alarmu TTA nie większy niż 5,2 s.

SYSTEMY GLONASS I SDCM

Obecnie system GLONASS, podobnie jak GPS, nie ma zdolności ostrzegania swych użytkowników o nieprawidłowym funkcjonowaniu samego systemu czy też nadawaniu przez satelity błędnych informacji. Sytuacja może ulec zmianie dopiero w chwili, w której segment kosmiczny będzie się składał z satelitów nowej generacji, oznaczonej symbolem *K*. W kwietniu 2015 roku na orbicie znajdował się jeden tylko satelita tego bloku o statusie testowy. Przewiduje się, że informacje dotyczące integralności będą przekazywane w zmodernizowanej depeszy nawigacyjnej emitowanej przez satelity bloku *K* na częstotliwości L3 (pasmo

1198–1208 MHz) z wykorzystaniem techniki **CDMA** (*Code Division Multiple Access*) [13].

Wszystko jednak wskazuje na to, że wiodącą rolę w zapewnianiu integralności odegra powstający obecnie rosyjski system wspomagający **SDCM** (*System for Differential Corrections and Monitoring*), przy czym należy tu wyraźnie podkreślić, że w systemie tym, jako jedynym spośród wszystkich SBAS, zarówno tych już funkcjonujących, jak i tych dopiero budowanych, przekazywana przez trzy satelity GEO na częstotliwości L1 = 1575,42 MHz informacja o integralności będzie dotyczyć dwóch systemów – GLONASS i GPS. Segment naziemny systemu SDCM obejmuje centrum monitorowania i kontroli poprawek różnicowych **CDCM** (*Center of Differential Correction and Monitoring*), centrum kontrolno-korygujące **MUCC** (*Mission Uplink and Control Center*) oraz sieć kilkudziesięciu zlokalizowanych w różnych miejscach na świecie stacji różnicowych, zapewniających już integralności dla niebezpiecznych operacji i lądowań typu LPV–200 [36].

Informacje o integralności w satelitach GPS i GLONASS będą przekazywane przez satelity GEO systemu SDCM w wiadomości o numerze 6 (*Integrity parameters of fast and long-term corrections*), jednej z 64 przesyłanych w 250-bitowych blokach. Każdy z tych bloków zawiera preambułę (8 bitów), rozpoznanie rodzaju lub numeru wiadomości (6 bitów), wiadomość właściwą (212 bitów) oraz sprawdzenie ważności odebranych informacji (24 bity).

Informacja właściwa w wiadomości o integralności zawiera cztery dwubitowe parametry **IODF** (*Issue of Data Fast*), mogące przyjmować wartości 0, 1, 2 lub 3 oraz liczący po 4 bity dla każdego z 51 satelitów parametr **UDRE** (*User Differential Range Error*). Parametr IODF równy 3 oznacza brak integralności satelity, gdy jest to IODF₂, jest (są) to satelita (satelity) o numerze (numerach) z przedziału 1–13, gdy IODF₃ z przedziału 14–26, IODF₄ przedziału 27–39, a gdy IODF₅ przedziału 40–51 [36].

Ze względu na to, że łączna liczba satelitów operacyjnych GPS i GLONASS wynosi nominalnie 56 (obecnie najczęściej jest ich 55), a przekazywana w wymieniony sposób informacja o integralności może dotyczyć maksymalnie 51 satelitów, zastosowano odpowiednią technikę dynamicznego maskowania kodów. W związku z tym użytkownik odbiera dane wyłącznie o satelitach widocznych w danym momencie nad horyzontem [22]. Satelity niezapewniające integralności są identyfikowane przez parametr UDRE, a konkretnie przez charakteryzującą go liczbę całkowitą z przedziału 1–15, przy czym każdej przyporządkowany jest z kolei określony błąd pomiaru pseudoodległości satelita-użytkownik po uwzględnieniu poprawek szybko- i długoterminowych, ale bez uwzględnienia poprawki jonosferycznej. Parametr ten definiuje górną granicę błędu pseudoodległości i jest pewnego rodzaju kryterium w ocenie integralności.

O ile odbiorniki jednoczesnościowe będą wymagały odebrania parametru **UIRE** (*User Ionospheric Range Error*), uwzględniającego błąd resztkowy związany z opóźnieniem jonosferycznym, to w odbiornikach dwuczesnościowych samo odebranie parametru UDRE będzie już wystarczające, gdyż opóźnienie jonosferyczne zostanie wyeliminowane przez jednoczesny pomiar pseudoodległości na dwóch częstotliwościach [36].

SYSTEM BeiDou

W powstającym w Chinach systemie BeiDou informacja o integralności wszystkich 27 satelitów MEO i 3 satelitów IGSO ma być przekazywana w depeszy nawigacyjnej D2 przez satelity geostacyjne tegoż systemu. Informacja ta obejmuje [14]:

- wskaźnik „zdrowie” (poprawności) dotyczący integralności danego satelity,
- identyfikację satelitów określającą, które z nich transmitują dane o integralności,
- indeks UDRE_i określający w metrach błąd poprawki zegara *i*-tego satelity UDRE,
- indeks RURAI_i określający w metrach dokładność pomiaru odległości (RURA) do *i*-tego satelity,
- ekwiwalentną poprawkę zegara *i*-tego satelity.

Szczegółowe informacje o depeszy D2 można znaleźć w [3], [4]. Należy tu jednak podkreślić, że informacje te z założenia są dostępne jedynie w tych rejonach kuli ziemskiej, do których docierają sygnały z satelitów geostacyjnych systemu BeiDou, czyli w Chinach i rejonach sąsiednich. Oznacza to, że system ten, mimo faktu, iż z chwilą oddania do eksploatacji już w niedalekiej przyszłości wszystkich 27 satelitów MEO stanie się systemem o zasięgu globalnym, nie będzie zapewniał informacji o integralności swych satelitów w większości rejonów świata, w tym niestety również w Europie.

ZAAWANSOWANA TECHNOLOGIA RAIM – ARAIM

W ostatnich kilku latach liczne ośrodki i instytucje naukowo-badawcze związane z lotnictwem cywilnym rozpoczęły intensywne prace nad innowacyjnymi technikami, które umożliwiłyby zwiększenie możliwości wykorzystywania NSS podczas podejścia samolotu do lądowania. Już w 2010 roku opublikowano obszerny raport z badań nad ewolucyjnością struktury systemu GPS, w którym przedstawiono ogólną koncepcję stworzenia zaawansowanej technologii autonomicznego monitorowania integralności w odbiorniku, tzw. **ARAIM** (*Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) [21].

Koncepcja ta ma na celu zwiększenie poziomu integralności systemowej i opiera się na zmniejszeniu uzależnienia użytkownika odbierającego sygnały na różnych częstotliwościach z satelitów więcej niż jednego NSS od infrastruktury naziemnej tychże systemów [18]. W proponowanej technologii zakłada się otrzymywanie przez użytkownika dodatkowej wiadomości o integralności, tzw. **ISM** (*Integrity Support Message*), która będzie uaktualniana i transmitowana z odpowiednim opóźnieniem. Wiadomość ta może być zaliczana do długoterminowych, kiedy dotyczy nominalnych warunków pracy wszystkich wykorzystywanych systemów bądź krótkoterminowych, kiedy wysyłana jest w celu wykrycia anomalii w pracy jednego z tych systemów [5], [16].

O ile wymienione klasyczne monitorowanie integralności w odbiorniku RAIM opiera się na analizie właściwości sygnału w przestrzeni, to w technologii ARAIM segment naziemny nieprzerwanie monitoruje strukturę GNSS i dostosowuje parametry integralności do aktualnego stanu funkcjonowania systemu. W zależności od infrastruktury naziemnej częstość aktualizacji informacji o integralności ISM może wynosić od 60 do kilku minut [18].

INTEGRALNOŚĆ MULTISYSTEMOWA

Obecnie integralność systemu GPS zapewniają jedynie systemy wspomagające SBAS. Główną wadą takiego rozwiązania jest opóźnienie związane z różnicą czasu między detekcją błędu a przekazaniem i otrzymaniem przez użytkownika informacji o jego zaistnieniu. Z kolei stosowana już w wielu odbiornikach technologia RAIM odnosi się do jednego tylko wybranego NSS, a praktycznie rzecz biorąc do jednego satelity tegoż systemu.

Dlatego też w sytuacji, w której funkcjonują z powodzeniem cztery SBAS, a oddanie do eksploatacji systemu Galileo, który w serwisie SoL zapewni informację o swojej integralności, nastąpi już za kilka lat, narodził się pomysł stworzenia multisystemowej integralności umożliwiającej wykorzystywanie w odbiorniku użytkownika sygnałów z satelitów dwu i więcej NSS, satelitów SBAS oraz wymienionej technologii RAIM. Proponowane rozwiązania dotyczą w szczególności jednoczesnego korzystania z satelitów systemu Galileo i systemu EGNOS, a głównym celem powinno być nieprzerwane zapewnianie integralności przez więcej niż jeden system.

Pierwsze z tych rozwiązań, nazwane wspomaganie integralności jednego systemu (*one system based integrity*), opiera się na stosowaniu wspólnego algorytmu dla obu systemów. W przypadku, w którym integralność opiera się na systemie Galileo, algorytm ten nosi nazwę **GBIA** (*Galileo Based Integrity Algorithm*), a gdy na systemie EGNOS – nazwę **EBIA** (*EGNOS Based Integrity Algorithm*).

Drugie natomiast rozwiązanie polega na zastosowaniu dwóch niezależnych algorytmów, jednego przypisanego systemowi Galileo, drugiego systemowi EGNOS. Analiza integralności może być realizowana przez monitorowanie wartości dwóch parametrów: ryzyka integralności IR i poziomu ochrony PL. Jeśli będzie monitorowana zmienna IR, wówczas stosowana metoda przyjmie nazwę **IR-PIA** (*Integrity Risk Parallel Integrity Algorithm*), jeśli zaś zmienna PL – nazwę **PL-PIA**. W literaturze specjalistycznej, np. [8], [9], można znaleźć szczegółowe scenariusze postępowania przy różnych relacjach między parametrami wymienionych SISA, SISMA i URA w przypadku jednoczesnego korzystania z systemów GPS i GLO-NASS oraz tylko z jednego z nich.

* * *

Obecnie (kwiecień 2015) żaden z funkcjonujących nawigacyjnych systemów satelitarnych o zasięgu globalnym (GPS, GLO-NASS) nie zapewnia w pełni integralności. Kryterium to będzie spełnione, kiedy segment kosmiczny systemu GPS będzie liczył co najmniej 24 satelity trzeciej generacji, a system GLO-NASS co najmniej 24 satelity bloku K1. Według ostatnich prognoz może to nastąpić dopiero w trzeciej dekadzie wieku.

W systemie Galileo koncepcja integralności opiera się na równaniu ryzyka integralności oraz na zależnościach pomiędzy poszczególnymi parametrami wykorzystywanymi przez algorytm RAIM. System ten, w serwisie SoL, ma zapewnić prawidłowe obliczanie bieżącej pozycji użytkownika i wystanie odpowiedniego alarmu, jeśli tylko błąd pozycji przekroczy ustalony wcześniej próg alarmowania.

W systemie BeiDou informacja o integralności przekazywana w depeszy nawigacyjnej przez satelity geostacjonarne tegoż systemu dotyczy jedynie czterech funkcjonujących obecnie satelitów MEO i dostępna jest tylko w rejonach leżących w zasięgu owych satelitów geostacjonarnych. Sytuacja nie ulegnie zmianie w momencie, w którym system BeiDou stanie się systemem o zasięgu globalnym.

Integralność systemu GPS zapewniają obecnie: cztery satelitarne systemy wspomagające (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN), ale jedynie w tych rejonach półkuli północnej, w których bez jakichkolwiek ograniczeń mogą być odbierane sygnały z satelitów geostacjonarnych tychże systemów; integralność wybranych satelitów GPS stacje referencyjne odmiany różnicowej tego systemu, zaś integralność rozumianą jako poprawność określanej w odbiorniku użytkownika pozycji funkcja RAIM, niezależnie od tego, gdzie użytkownik ów się znajduje.

Prace nad integralnością trwają nieprzerwanie, wciąż pojawiają się coraz to nowe technologie, np. ARAIM, która przyczyni się do zmniejszenia kosztów eksploatacji wykorzystywanych nawigacyjnych systemów satelitarnych, czy też nowe przyszłościowe rozwiązania wielosystemowe, oparte na jednoczesnym wykorzystaniu satelitów dwóch i więcej systemów, w szczególności GPS i Galileo, satelitów geostacjonarnych SBAS oraz algorytmów RAIM, co umożliwi nie tylko utrzymanie ciągłości określania pozycji użytkownika, ale również zwiększenie jej dokładności i zapewnienie wiarygodności odbieranych danych.

LITERATURA

[1] Admiralty List of Radio Signals (ALRS), The United Kingdom Hydrographic Office, vol. 2, 2014/2015
 [2] Angus J.E.: *RAIM with Multiple Faults*, *Navigation*, Journal of the Institute of Navigation, vol. 53, No 4, 2006
 [3] BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0), China Satellite Navigation Office, December 2013

[4] BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 1.0), China Satellite Navigation Office, December 2013
 [5] Blanch J. et al.: *Critical Elements for a Multi-Constellation Advanced RAIM*, *NAVIGATION*, Journal of the Institute of Navigation, vol. 60, No 1, 2013
 [6] Brown R.G., Chin G.Y.: *Calculation of Threshold and Protection Radius Using Chi-Square Methods – A Geometric Approach*, The Institute of Navigation, Red Books, vol. V, RAIM: Requirements, Algorithms and Performance, paper 10, 1998
 [7] Brown R.G.: *Solution of the Two-failure GPS RAIM Problem Under Worst-Case Bias Conditions: Parity Space Approach*, *Navigation*, Journal of the Institute of Navigation, vol. 44, No 4, 1997
 [8] Calamia M., Dore G., Mori A.: *Evolution of Integrity Concept – From Galileo to Multisystem*, University of Florence, 2012
 [9] Ciollaro M.: *GNSS Multisystem Integrity for Precision Approaches in Civil Aviation*, Università Degli Studi Di Napoli "Federico II", Anno Accademico, 2007–2008
 [10] EGNOS Safety of Life Service Definition Document 2.1, European Commission, 2014
 [11] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H, Wasle E.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer, Wien NewYork, 2008
 [12] Januszewski J.: *Systemy satelitarne GPS, Galileo i inne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010
 [13] Januszewski J.: *Perspektywy rozwoju nawigacyjnych i wspomagających systemów satelitarnych w bliskiej i dalszej przyszłości*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 5/2014
 [14] Januszewski J.: *BeiDou, chiński globalny nawigacyjny system satelitarny wchodzi na rynek światowy*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 11/2014
 [15] Kaplan E.D., Hegarty C.J.: *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House, Boston/London, 2006
 [16] Khanafseh S. et al.: *ARAIM Integrity Support Message Parameter Validation by Online Ground Monitoring*, *The Journal of Navigation*, vol.68, No 2, 2015
 [17] Kovach K. et al.: *GPS III Integrity Concept*, Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah, 2008
 [18] Martini I., Rippl M., Meurer M.: *Advanced RAIM Architecture Design and User Algorithm Performance in Real GPS, GLONASS and Galileo scenario*, Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+2013), Nashville, 2013
 [19] Munich Satellite Navigation Summit, Munich, 2009–2012, 2014–2015
 [20] Narkiewicz J.: *GPS i inne satelitarne systemy nawigacyjne*, WKiŁ, Warszawa, 2007
 [21] Phase II of the GNSS Evolutionary Architecture Study, Federal Aviation Administration Report, 2010
 [22] Sakai T., Yamada H., Hoshinoo K.: *GPS/GLONASS Multi-Constellation SBAS Trial and Preliminary Results for East-Asia Region*, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, 2012
 [23] Salos A., Carlos D.: *Integrity monitoring applied to the reception of GNSS signals in urban environments*, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013
 [24] Shaw S.: *GPS III Signal Integrity and Aviation Applications*, Lockheed Martin Corporation, 2013
 [25] Simsky A., Boon F.: *Galileo Integrity Concept – user level*, The Technical University of Munich, Septentrio, Munich, 2010
 [26] Specht C.: *System GPS*, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin, 2007
 [27] www.beidou.gov.cn
 [28] www.egnos-user-support.essp-sas.eu
 [29] www.essp-sas.eu
 [30] www.glonass-ianc.rsa.ru
 [31] www.gps.gov
 [32] www.gpsworld.com
 [33] www.insidegnss.com
 [34] www.navipedia.net
 [35] www.rtca.org
 [36] www.sdcm.ru