NAWIGACJA GNSS



NAWIGACJA GNSS

GNSS – Global Navigation Satellite System – jest to PODSTAWOWY sensor nawigacji obszarowej.

Pojęcie to obejmuje nie tylko GPS NAVSTAR (pierwszy w pełni funkcjonujący globalny system nawigacji satelitarnej, ale i wszystkie inne systemy o charakterze globalnym funkcjonujące częściowo lub pozostające w planach realizacji (GLONASS, GALILEO) wraz ze wspomaganiem (ABAS, SBAS, GBAS), które jest wymagane do wykorzystania tego sensora w nawigacji w lotnictwie cywilnym.

Omawiane zagadnienia:

- **Podstawowe dane systemu GPS**
- **Podstawowa zasada funkcjonowania**
- **Źródła błędów systemu nawigacyjnego**
- **Dokładność systemu nawigacyjnego**
- **Wady i zalety GPS**

PODSTAWOWE DANE SYSTEMU GPS

- **System opracowany przez Departament Obrony USA**
- **Pierwotnie – do wykorzystania wyłącznie przez wojsko**
- **Pierwszy satelita został wystrzelony na orbitę w 1978 roku**
- **Pełną funkcjonalność operacyjną system uzyskał w 1995 roku**

Konfiguracja segmentu satelitarnego:

- **24 satelity na 6 powierzchniach orbitalnych,**
- **po 4 satelity na każdej orbicie,**
- **każdy satelita wykonuje pełną orbitę w 12 godzin,**
- **Wysokość orbity 20 200km**
- **Inklinacja 55 - kąt nachylenia orbity w stosunku do płaszczyzny równikowej**
- **3 satelity zapasowe**
- **Obecnie (2013) jest dostępnych 31 satelitów**



PODSTAWOWE DANE SYSTEMU GPS

Oprócz segmentu satelitarnego (zespół satelitów) system GPS składa się również z segmentu naziemnego:

- **głównej stacji kontrolnej (Schriever USA),**
- **Stacji monitorujących.**



PODSTAWOWE ZASADY FUNKCJONOWANIA

Każdy satelita cyklicznie i stale transmituje sygnał zawierający informację o układzie satelitów (almanach), informację identyfikacyjną, dokładny czas, dane orbity satelity (efemerydy) oraz inne dodatkowe informacje dotyczące stanu systemu.

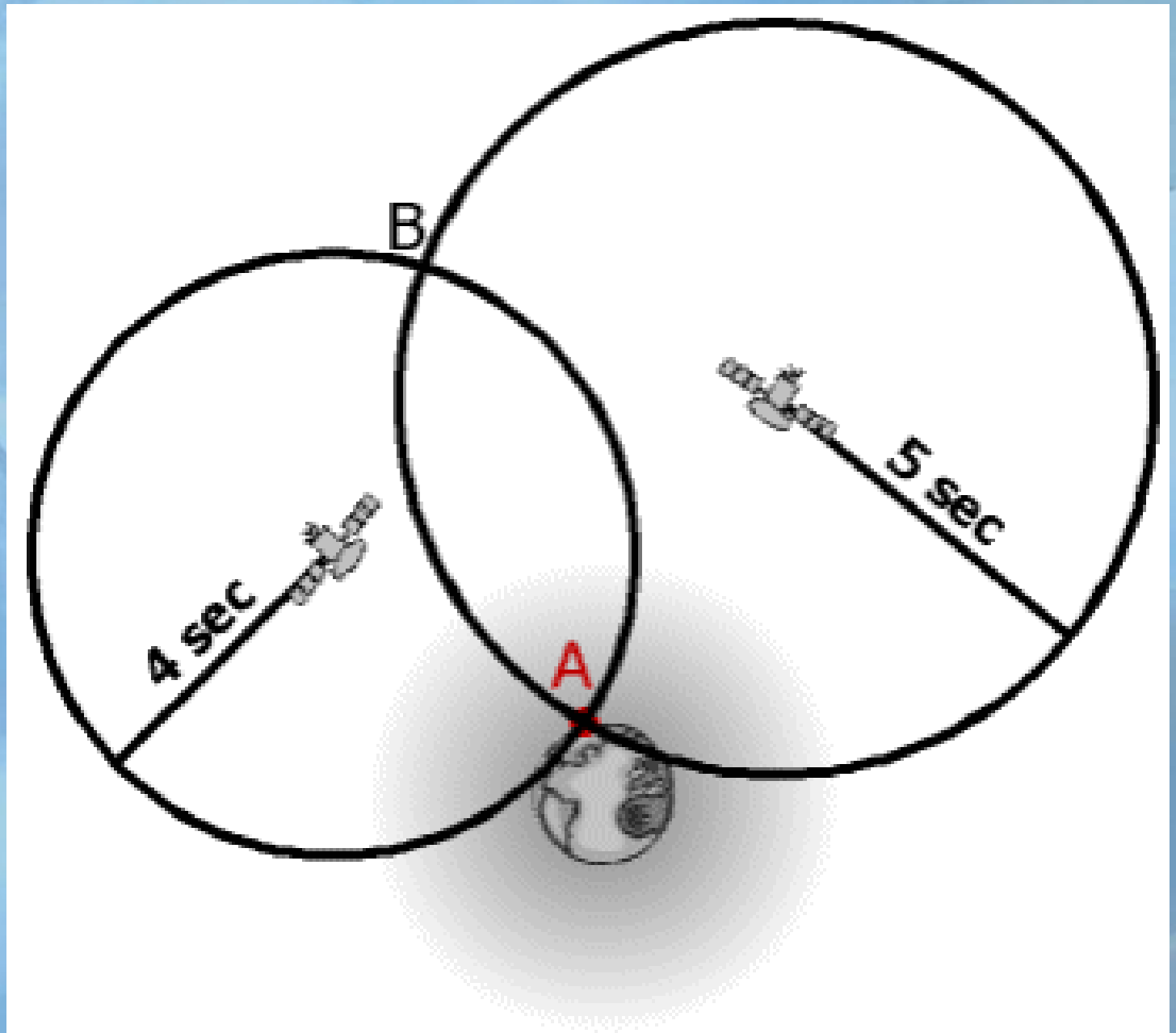
Odbiornik GPS na podstawie sygnału satelitów synchronizuje swój czas z czasem systemu GPS oraz oblicza pozycję (2D lub 3D – współrzędne geograficzne, ewentualnie wysokość) odbiornika bazując na pomiarach pseudoodległości (odl. pomierzona jednostronnie) odbiornika od poszczególnych satelitów których sygnał został odebrany.

Odległość odbiornika od poszczególnych satelitów jest obliczana na podstawie pomiaru czasu przebiegu sygnału od satelity do odbiornika.

Odbywa się to przez porównanie czasu zakodowanego w każdym sygnale z czasem odbioru tego sygnału rejestrowanym przez odbiornik ($D = c \times \Delta t$)

Aby uzyskać użyteczną dokładność pozycji (przy pomiarze różnicy czasu) dokładność zegarów (pomiaru czasu) musi być bardzo duża. Sygnał rozprzestrzenia się z prędkością światła; prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w próżni c = 299 792 458 m/s

PODSTAWOWE ZASADY FUNKCJONOWANIA



PODSTAWOWE DANE SYSTEMU GPS

Stacje monitorujące śledzą satelity i zbierają w sposób ciągły dane dot. ich orbit i czasu atomowych zegarów.

Z tych danych oblicza się poprawki i korekty do danych orbit poszczególnych satelitów oraz korekty zegarów.

Te poprawki i korekty są transmitowane z kilku stacji monitorujących do satelitów i następuje uaktualnienie danych emitowanych przez satelity.



Jednak……

1. **Rozmieszczenie stacji naziemnych NIE ZAPEWNIA CIĄGŁEGO śledzenia KAŻDEGO satelity.**
2. **Korekty i poprawki są transmitowane do satelitów raz lub dwukrotnie na dobę a nie w sposób ciągły.**

Należy te cechy systemu mieć na uwadze, gdyż wpływa to na wiarygodność określanej pozycji i zapewnianą dokładność nawigacji

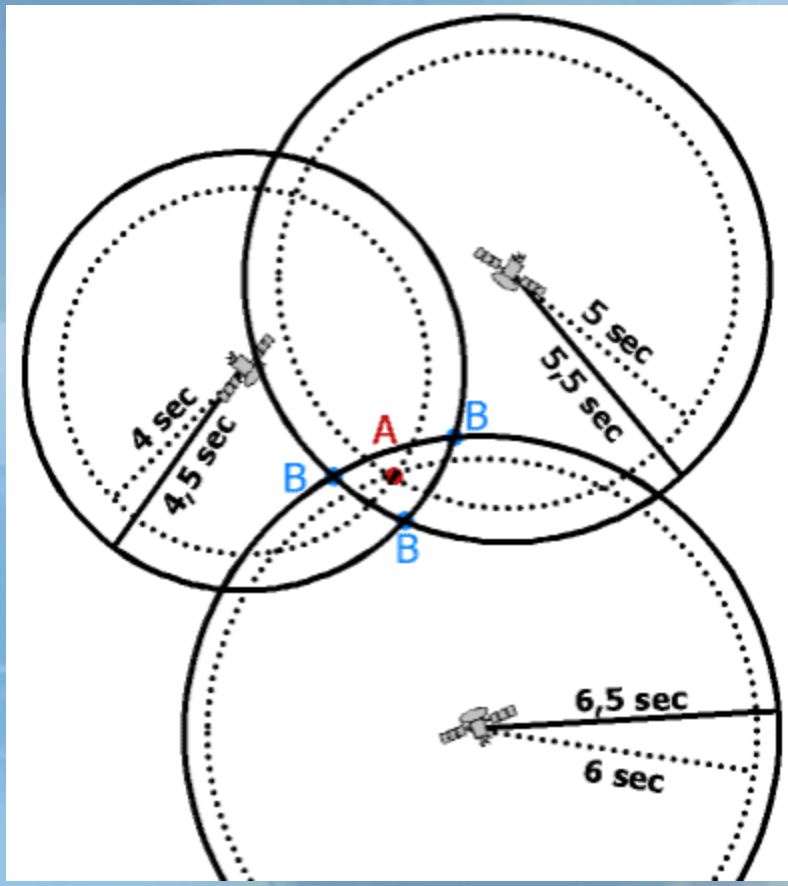
PODSTAWOWE ZASADY FUNKCJONOWANIA

Zegary atomowe instalowane na satelitach mają dokładność 1 na 10^{12} (ewentualny błąd zegara rzędu 0.01 sek daje błąd odległości 3000km!)

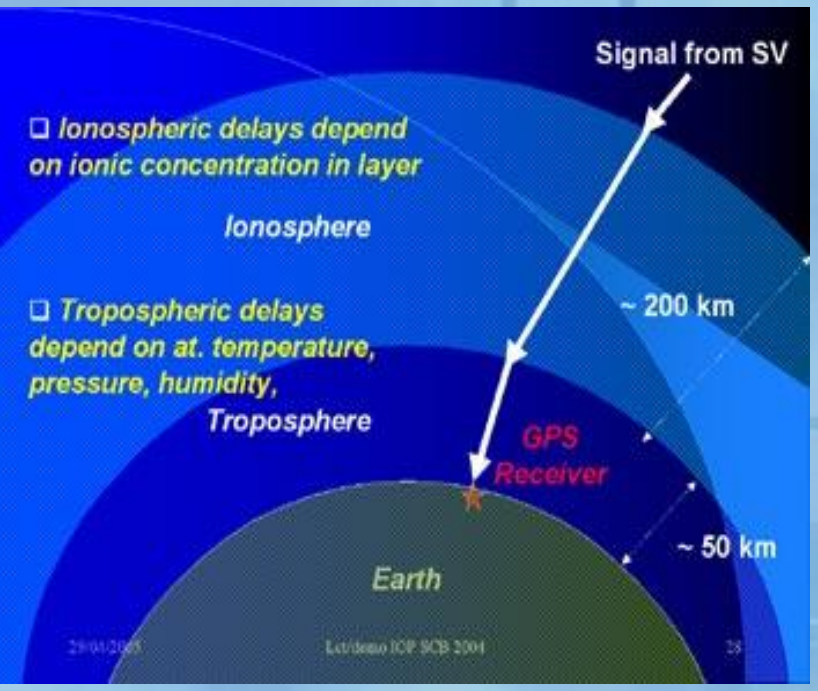
Uzyskanie pozycji w dwóch wymiarach (szerokość i długość geograficzna) wymaga śledzenia przez odbiornik co najmniej 3 satelitów

Uzyskanie pozycji również w zakresie 3 wymiaru (wysokość) wymaga śledzenia dodatkowego satelity (min. 4)

Segment użytkownika jest całkowicie bierny – nie wymienia żadnych danych z satelitami i nie łączy się z segmentem naziemnym systemu GPS



ŹRÓDŁA BŁĘDÓW SYSTEMU GPS



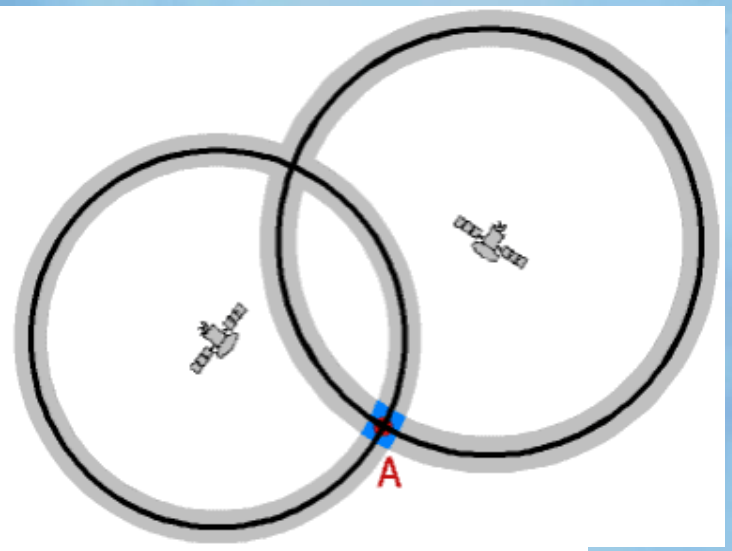
BŁĄD PRZEJŚCIA SYGNAŁU PRZEZ ATMOSFERĘ (jonosferyczny i troposferyczny)

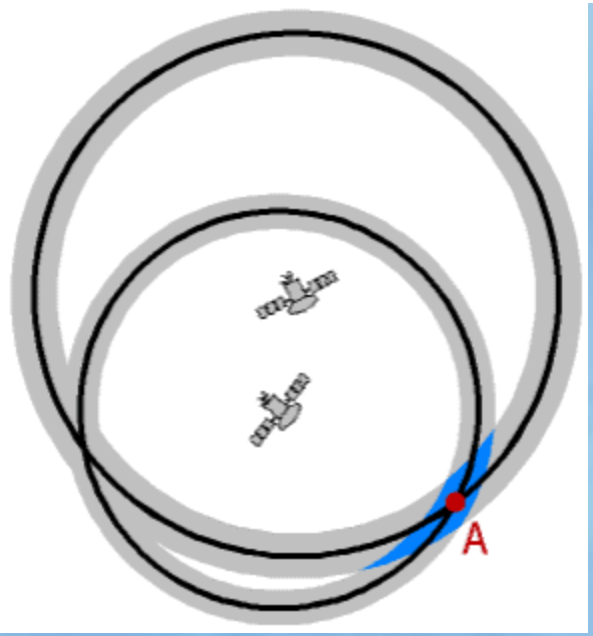
Sygnał satelity (20200km od powierzchni ziemi) potrzebuje teoretycznie 0.07 sekundy aby dotrzeć do odbiornika

Sygnał przechodząc przez atmosferę ziemską zwalnia. Zjawisko to jest dobrze znane i większość odbiorników oblicza typową poprawkę dla standardowych warunków atmosfery.

Nie są natomiast w stanie korygować nieprzewidywalnych i niestandardowych warunków (np. wynikających z silnych wiatrów słonecznych)

ŹRÓDŁA BŁĘDÓW SYSTEMU GPS





BŁĄD GEOMETRII SATELITÓW:

Pole szare – reprezentuje możliwą lokalizację odbiornika z uwzględnieniem błędów odległości dla jednego satelity

Pole niebieskie – reprezentuje pozycję odbiornika przy uwzględnieniu linii pozycyjnych z dwóch satelitów

Przy różnych kątach przecięcia linii pozycyjnych obserwujemy różną wielkość obszaru możliwych pozycji odbiornika.

Jakość geometrii systemu określana jest współczynnikiami DOP (Dilution of Precision)

ŹRÓDŁA BŁĘDÓW SYSTEMU GPS

WSPÓŁCZYNNIKI DOP DOSTĘPNE W SYSTEMIE:

- GDOP (Geometric Dilution Of Precision); kompleksowa dokładność systemu (koordynaty 3D i czas)
- PDOP (Positional Dilution Of Precision); dokładność pozycji (koordynaty 3D)
- HDOP (Horizontal Dilution Of Precision); dokładność pozioma (koordynaty 2D)
- VDOP (Vertical Dilution Of Precision); dokładność pionowa (wysokość)
- TDOP (Time Dilution Of Precision); dokładność czasu (czas)

Wartości DOP wahają się w granicach od 1 do 50, przy czym 1 oznacza wartość idealną najlepszą, zaś 50 najbardziej niekorzystną.

Przy nawigacji NPA RNAV GNSS wartość GDOP (opisująca geometrię systemu) nie powinna być większa niż 5.

ŹRÓDŁA BŁĘDÓW SYSTEMU GPS

INNE ŹRÓDŁA BŁĘDÓW:

- Niedokładności lotu po nominalnej orbicie (lot po orbicie jest kontrolowany i korygowany – dlatego wynikowy błąd pozycji nie powinien być większy niż 2m),
- Interferencja sygnału (odbiór sygnału odbitego od obiektu/góry/budynku) itp.
- Błąd zegara,
- Błąd obliczeń pozycji – wynika ze stosowanych zaokrągleń w obliczeniach – nie przekracza 1m
- Błędy wynikające z teorii względności (ruchu satelity i odbiornika, czasu oraz mniejszego pola grawitacyjnego działającego na satelity).

Wynikowy błąd całkowity nie powinien przekraczać 15m

DOKŁADNOŚĆ SYSTEMU GPS

Sygnał GPS zawiera trzy ciągi danych:

- Kod C/A
- Kod P
- Ciąg danych nawigacyjnych i systemu (NAV/system data)

Kod C/A zapewnia standardową usługę pozycjonowania i jest dostępny dla wszystkich użytkowników.

Kod P zapewnia precyzyjną usługę pozycjonowania – jego użycie jest limitowane dla sił zbrojnych USA oraz innych autoryzowanych użytkowników. Niedostępny dla lotnictwa cywilnego.

NAV/system data – kod zawierający dane orbit, poprawki: orbit, zegara inne dane nawigacyjne oraz informacje o statusie satelitów. Odbiór pełnego zestawu danych (sygnał 50Hz) wymaga 12.5 minuty. Jest to wymagany czas konfiguracji odbiornika GPS przy „pierwszym” użyciu.

DOKŁADNOŚĆ SYSTEMU GPS

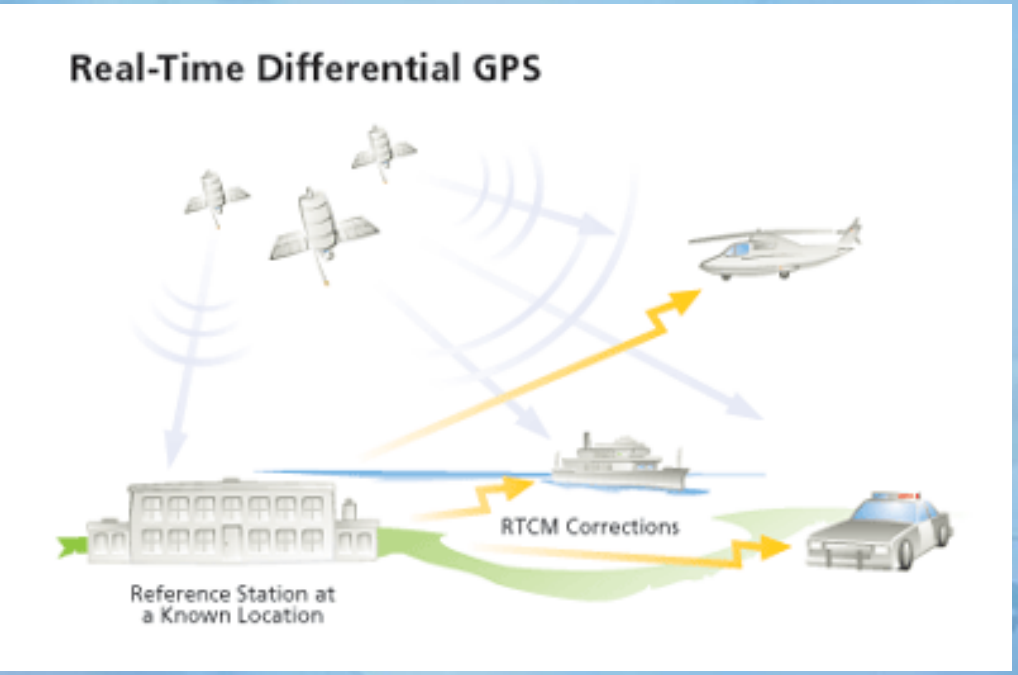
Selective Availability (S/A)

Do maja 2000 stosowany był przez USA dodatkowy kod zakłócający tzw. Selective Availability (S/A). Jego zadaniem była redukcja dokładności pozycjonowania GPS w celu eliminacji wykorzystania sygnału GPS do potencjalnie wrogich zastosowań. Wprowadzany pseudolosowo dodatkowy błąd zegara i informacji nawigacyjnej powodował zmniejszenie dokładności pozycji **do 100m**. Częściowo – efekt stosowania S/A można niwelować poprzez stosowanie DGPS.

Od maja 2000 (wyłączenia S/A) nominalna dokładność pozycji wynosi **10-15m**.

Rząd USA gwarantuje dokładność dla SIS (signal in space - bez uwzględniania błędów odbiornika) w normalnych warunkach (brak awarii): **36m poziomo, 77m pionowo**.

DOKŁADNOŚĆ SYSTEMU GPS



RÓŻNICOWY GPS (DIFFERENTIAL GPS)

Polega na umieszczeniu dodatkowego odbiornika GPS w dokładnie określonej i znanej pozycji. Odbiornik ten określa pozycję na podstawie sygnału satelitów i porównuje ją z danymi własnej znanej lokalizacji – określając poprawkę.

Następnie – poprawka (korekta pozycji dla każdego satelity) jest udostępniana radiowo dla wszystkich odbiorników GPS znajdujących się w zasięgu.

Metoda ta pozwalała na eliminację zakłócania S/A oraz pozwala na znaczącą eliminację błędów przejścia sygnału przez atmosferę, błędów zegara, orbity – umożliwiając uzyskanie dokładności pozycji **poniżej 5m**.

DOKŁADNOŚĆ SYSTEMU GPS

ZAGROŻENIA GPS – ZAKŁÓCANIE/ZMIANA SYGNAŁU SATELITÓW

Oprócz niezależnych interferencji czy błędów sygnału GPS istnieją proste i łatwo dostępne metody jego celowego zakłócenia czy zmiany.

Najprostszą z nich jest – zakłócanie (jamming). Sygnał GPS jest na tyle słaby, że niewielkiej mocy urządzenie zakłócające (wielkości pudełka zapałek) może spowodować zakłócenia uniemożliwiające odbiór sygnałów GPS w promieniu kilku do kilkudziesięciu kilometrów od urządzenia zakłócającego.

Warto dodać, że zakłócanie i wynikowe znaczące odchylenie pozycji GPS w stosunku do rzeczywistego położenia może nastąpić również w okolicy pracy innych urządzeń emitujących silne pola elektromagnetyczne: radarów, stacji nadawczych itp.

Planowana sieć komórkowej transmisji danych 4G, zdaniem specjalistów od GPS, może spowodować całkowite zagłuszenie sygnałów GPS w odległości 8-10km od nadajnika.

DOKŁADNOŚĆ SYSTEMU GPS

ZAGROŻENIA GPS – ZAKŁÓCANIE/ZMIANA SYGNAŁU SATELITÓW



Inne techniki celowej zmiany/zakłócania sygnału GPS to:

- **tzw. spoofing** – nadawanie zafałszowanego sygnału GPS
- **tzw. meaconing** – opóźnienie i retransmisja sygnałów GPS

Zdarzają się też błędy ludzkie i awarie sprzętu w znaczny sposób wpływające na dokładność pozycjonowania GPS. Przykłady??

1.28.07.2001. Satelita PRN22 miał awarię zegara powodującą błąd pozycji kilkaset kilometrów!! Mimo że satelita był w zasięgu stacji monitorujących i kontrolnych jego sygnał został wyłączony z użytku po ponad godzinie (1:48).

2.01.01.2004. Satelita PRN23 miał również awarię zegara. Transmitował błędny sygnał przez ponad 2 godziny.

3.Od 28.05 do 02.06 2002 wprowadzono błędną poprawkę jonosferyczną – skutek – degradacja dokładności pozycji o ok. 16m

WADY i ZALETY GPS

WNIOSKI:

1. **Pomimo - wydawałoby się - dużej dokładności systemu GPS jego sygnał nie spełnia warunków wymaganych w nawigacji lotniczej w zakresie integralności (zdolność do przekazania w odpowiednim czasie ostrzeżenia, że używanie systemu nie jest odpowiednio dokładne).**
2. **Zarówno dostępność jak i dokładność jako cechy systemu nawigacyjnego mogą zostać ograniczone w wyniku ograniczonej liczby dostępnych satelitów i chwilowej ich geometrii.**
3. **Istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia niezamierzonej (wpływ wiatrów słonecznych) oraz zamierzonej degradacji osiągów systemu poprzez celowe zakłócenie, zniekształcenie, opóźnienie sygnału satelitów.**
4. **GPS jest wojskowym systemem, kontrolowanym przez rząd USA. System jest co prawda wykorzystywany w skali światowej do celów cywilnych, ale pamiętać należy o tym, że priorytet zawsze mieć będą cele wojskowe.**

WADY i ZALETY GPS

ZALETY GPS:

1. **System o globalnym zasięgu, zapewniający pożądaną dokładność nawigacji.**
2. **Pozwala na pozycjonowanie w 2 i 3 wymiarach – również w zakresie prowadzenia pionowego.**
3. **Zapewnia nawigację w każdych warunkach atmosferycznych (niewrażliwy na zjawiska atmosferyczne w troposferze), na dowolnej trajektorii i w każdej fazie lotu statku powietrznego.**
4. **Nie wymaga stosowania zróżnicowanej awioniki (wyposażenia) i eliminuje konieczność kosztownych inwestycji w sieć naziemnych pomocy radionawigacyjnych.**

To są tylko wybrane bezpośrednie zalety systemu… Można by w tym miejscu wymieniać szereg zalet pośrednich jak np.: zwiększenie pojemności przestrzeni, możliwość budowy zoptymalizowanej sieci dróg lotniczych, możliwość redukcji minimów separacji, poprawa świadomości sytuacji w kokpicie i wiele innych.

SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE

GPS (lub GLONASS) jest systemem nawigacyjnym spełniającym w lotnictwie cywilnym wymogi systemu pomocniczego (supplementary).

Aby można było uznać go za system podstawowy (jakim jest GNSS) – konieczne było poprawienie osiągów systemów źródłowych (GPS/GLONASS) – szczególnie w zakresie ich integralności, dostępności i ciągłości. Osiąga się to poprzez wspomaganie GPS dodatkową funkcjonalnością i/lub dodatkowymi systemami.

Stosowane są obecnie trzy rodzaje wspomagania GPS:

ABAS – Aircraft Based Augmentation System – system wspomagania oparty na dodatkowej funkcjonalności wyposażenia pokładowego,

SBAS - Space Based Augmentation System – system wspomagania oparty o dodatkowe sygnały satelitarne,

GBAS – Ground Based Augmentation System – system wspomagania oparty o dodatkowy system naziemny.

SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE - ABAS

ABAS jest oparty na funkcjonalności RAIM (Receiver Autonomus Integrity Monitoring) odbiornika GNSS.



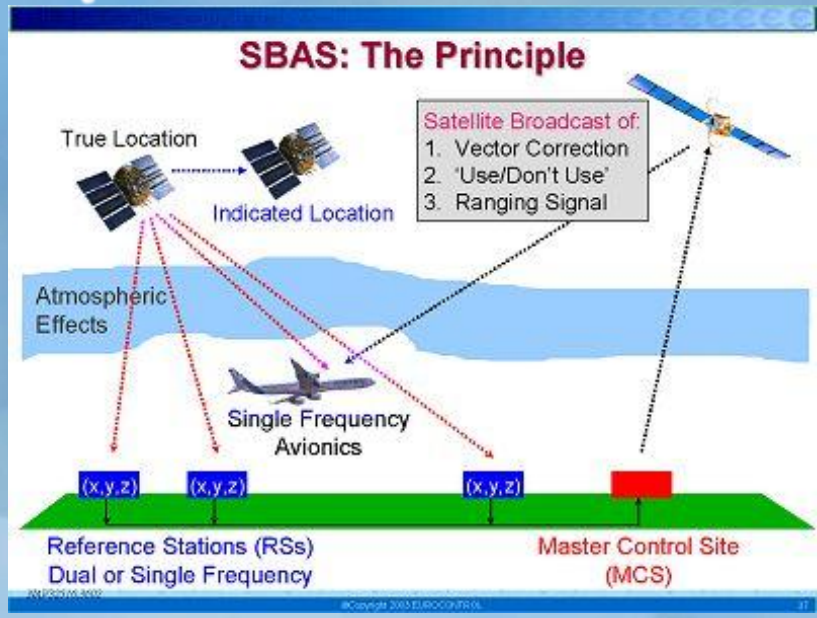
RAIM – monitoruje spójność sygnałów GPS; alarmuje w sytuacji utraty wymaganej dokładności nawigacji w danej fazie lotu (trasa/dolot/podejście). Oparty jest o algorytm FD – Fault Detection – pozwalający na wykrycie błędnych wskazań jednego z satelitów przyjętych do obliczenia pozycji.

RAIM jest dostępny, jeśli jest widocznych / dostępnych minimum 5 satelitów zapewniających satysfakcjonującą geometrię do obliczenia pozycji (FD).

Nowocześniejsze wersje RAIM wykorzystują algorytm FDE – Fault Detection & Exclusion, dostępny przy minimum 6 dostępnych satelitach; który pozwala nie tylko na wykrycie błędnych wskazań satelity, ale również na ich wykluczenie z obliczeń pozycji nawigacyjnej – co umożliwia kontynuację nawigacji bez alarmu RAIM.

SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE - SBAS

SBAS – jest oparty na wykorzystaniu dodatkowych danych przesyłanych przez satelitę geostacjonarnego (innego systemu niż GPS) zwiększających dokładność i spójność nawigacji.



W Europie wspomaganie SBAS jest zapewniane przez system EGNOS.

W dużym uproszczeniu - naziemne stacje referencyjne systemu zbierają dane do korekt GPS, przekazują te dane do głównej stacji kontrolnej, która transmituje je do swego satelity geostacjonarnego. Satelita retransmituje te dane do użytkownika; zapewniając dodatkowo również pomiar odległości i informację o użyteczności nawigacyjnej satelitów GPS.

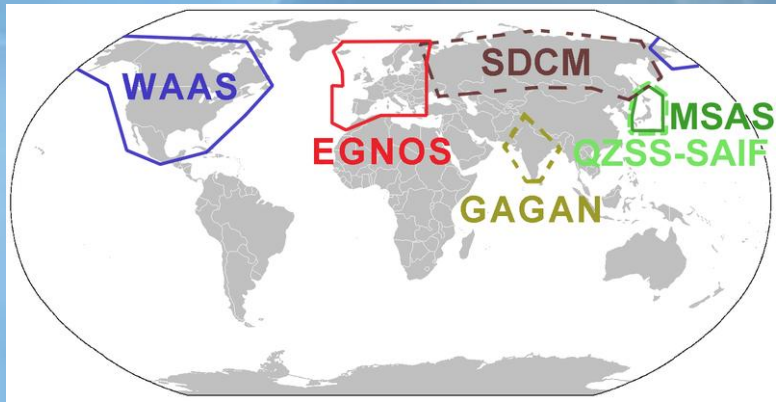
Pozwala to na zwiększenie dokładności nawigacji; dzięki zwiększeniu dokładności w płaszczyźnie pionowej możliwość zastosowania prowadzenia pionowego GNSS w podejściach do lądowania (APV).

SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE - SBAS

Parametry GNSS przy wspomaganiu EGNOS (APV):

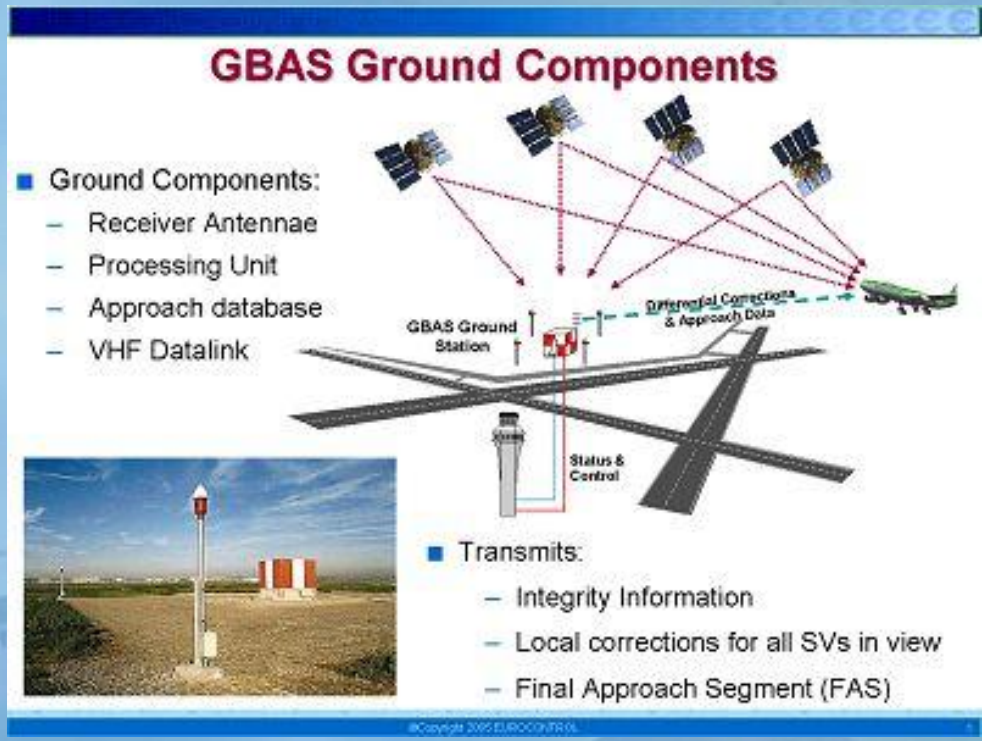
OSIĄGI EGNOS	APV-I (minima LPV)
Dokładność pozioma (95%)	16m
Dokładność pionowa (95%)	20m
Czas do alarmu (TTA)	10s
Poziom alarmu – horyzontalny	40m
Poziom alarmu - pionowy	50m

Systemy SBAS są systemami lokalnymi. Na terenie Ameryki Północnej funkcjonuje system - WAAS, w Japonii - MSAS, w Indiach – GAGAN.



SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE - GBAS

GBAS – jest oparty na wykorzystaniu dodatkowych danych przesyłanych przez dedykowany system naziemny zwiększających dokładność i spójność nawigacji do poziomu porównywalnego z systemem ILS (do podejść precyzyjnych).

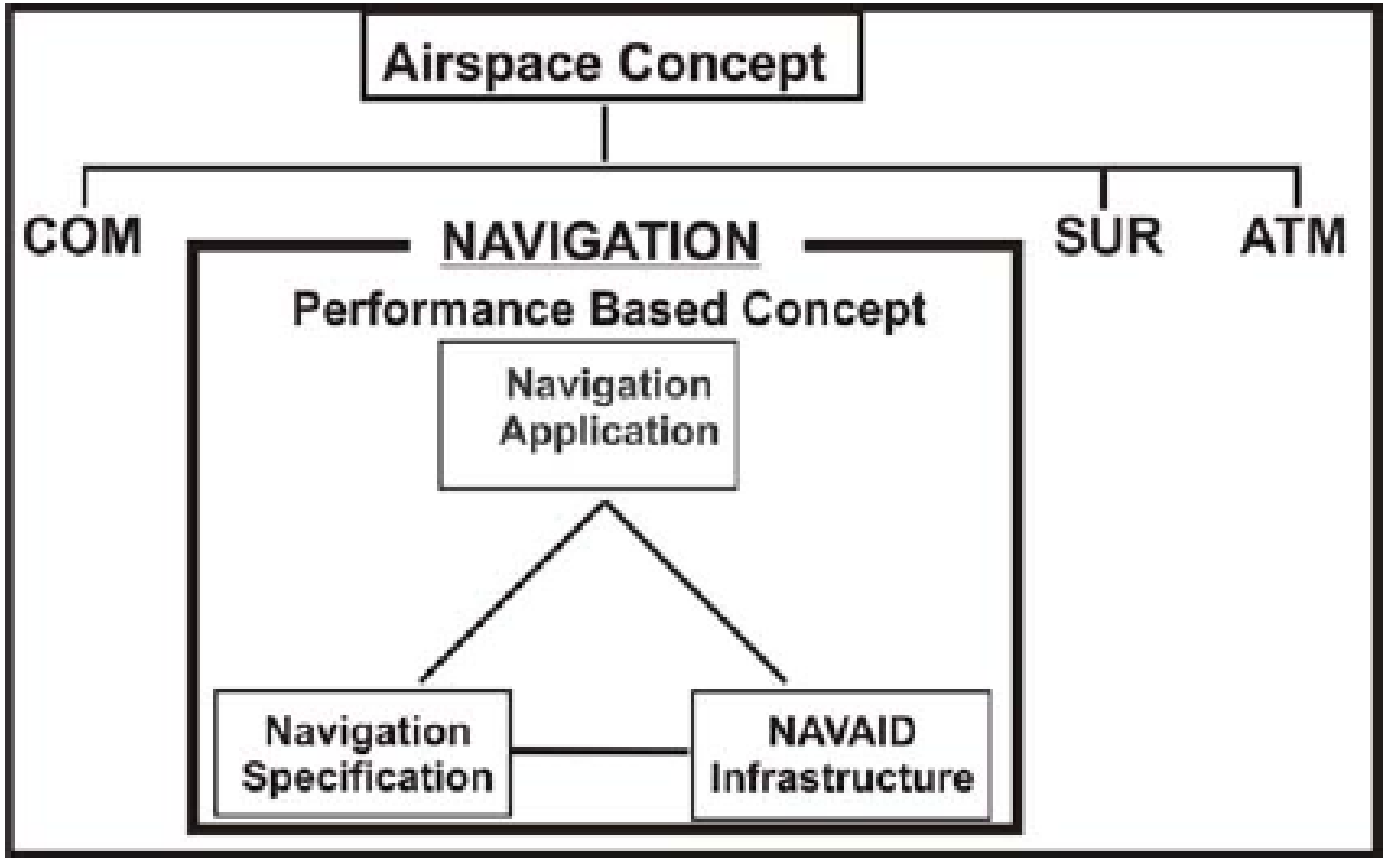


Naziemne anteny zbierają sygnały GPS, przekazują je do jednostki centralnej, która oblicza i transmituje na pokład statku powietrznego dane dot. ścieżki podejścia, bieżące korekty do sygnałów GPS oraz informacje dot. użyteczności satelitów.

Stosowany wyłącznie w zakresie podejść do lądowania. Jeden system zainstalowany na lotnisku jest w stanie „oprzyrządować” w podejścia precyzyjne wszystkie drogi startowe.

INSTRUMENTALNE PROCEDURY LOTU GNSS

Obecnie obowiązuje w tym zakresie koncepcja PBN (Performance Based Navigation). Zakłada ona przechodzenie z dotychczasowej nawigacji opartej o sensor na nawigację opartą o wymagane osiągi (dokładność nawigacji).



INSTRUMENTALNE PROCEDURY LOTU GNSS

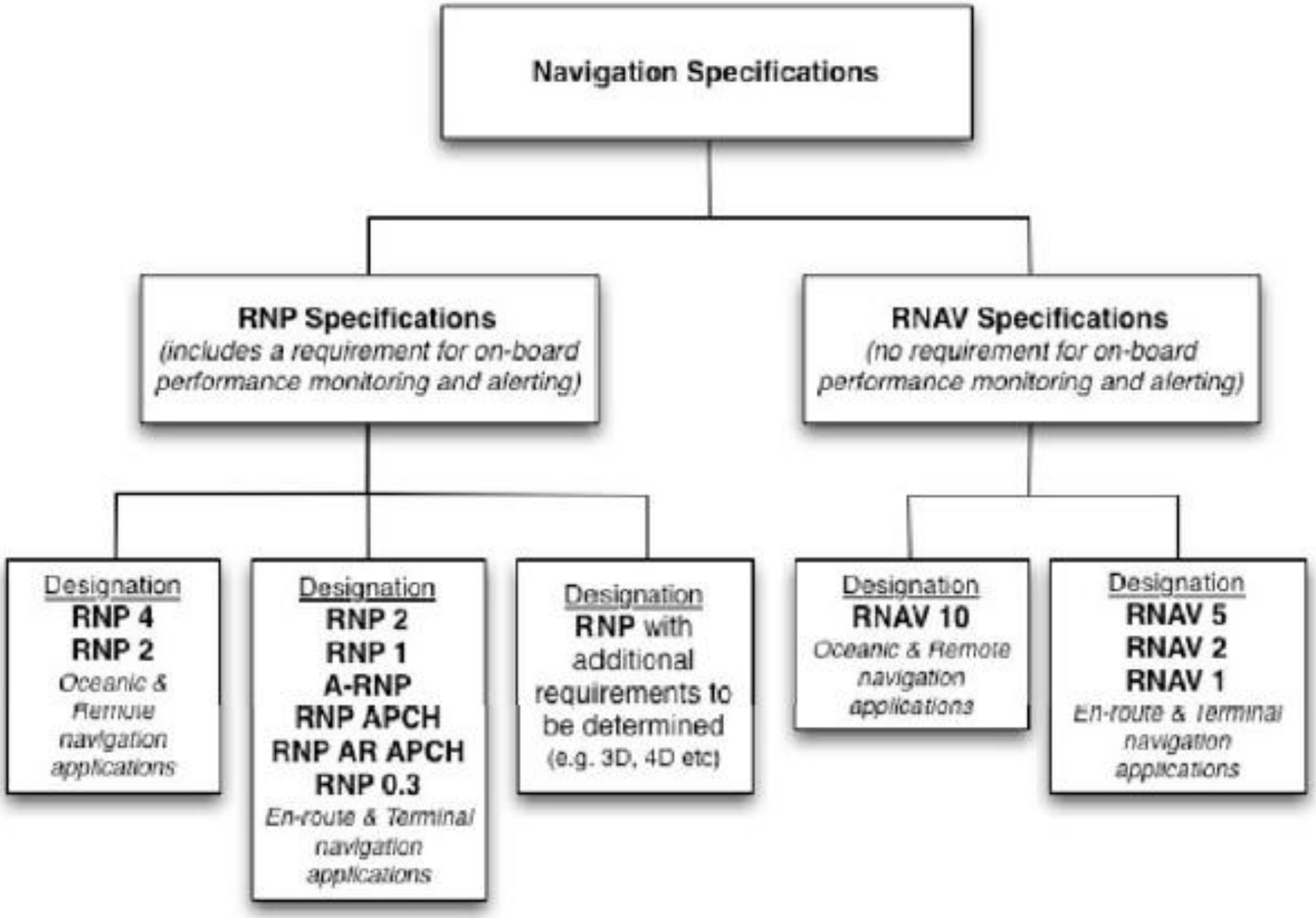
W PBN wyróżnia się dwie specyfikacje nawigacyjne stanowiące zestaw wymogów niezbędnych do wykonania operacji lotniczej w danej strukturze przestrzeni powietrznej:

Specyfikację RNAV – zakłada m.in. konieczność utrzymania wymaganej dokładności nawigacji wyrażonej liczbowo z prefixem RNAV (np. RNAV 5, RNAV 1). Inne wymogi określają kryteria spójności i ciągłości oraz wymogi funkcjonalne np. związane z posiadaniem pokładowej bazy danych.

(ciągłość – zdolność systemu do funkcjonowania bez przerw w czasie zamierzonej operacji,
spójność / intergalność) – zdolność systemu do funkcjonowania z wymaganą dokładnością w czasie zamierzonej operacji)

Specyfikację RNP – która dodatkowo do wymagań RNAV dodaje wymóg pokładowego monitoringu dokładności nawigacji oraz alarmowania (np. RNP 4)

INSTRUMENTALNE PROCEDURY LOTU GNSS



INSTRUMENTALNE PROCEDURY LOTU GNSS

Navigation Specification	Flight Phase								EASA Material
	En route		Arrival	Approach				Departure	
	Oceanic/ Remote	Continental		Initial	Intermediate	Final	Missed		
RNAV 10	10								AMC-20-12
RNAV 5		5	5						AMC-20-04
RNAV 2		2	2						To be developed
RNAV 1			1	1	1		1	1	To be developed
RNP 4	4								To be developed
RNP 2	2	2							To be developed
RNP 1			1	1	1		1	1	To be developed
A-RNP	2	2 or 1	1	1	1	0.3	1	1	To be developed
RNP APCH				1	1	0.3	1		AMC-20-27 AMC-20-28
RNP AR APCH				1-0.1	1-0.1	0.3-0.1	1-0.1		AMC-20-26
RNP 0.3		0.3	0.3	0.3	0.3				To be developed

INSTRUMENTALNE PROCEDURY LOTU GNSS

W interesującym nas zakresie – podejść do lądowania obowiązuje aplikacja nawigacyjna RNP APCH. Obejmuje ona 4 typy / rodzaje podejść do lądowania i charakteryzuje się 4 typami minimów:

1. NPA GNSS (ABAS) – podejście nieprecyzyjne z prowadzeniem GNSS wspomaganym ABAS wyłącznie 2D (poziomym) – minima LNAV.
2. NPA GNSS (SBAS) – podejście nieprecyzyjne z prowadzeniem GNSS wspomaganym SBAS, nawigacja 2D – minima LP.
3. APV Baro-VNAV – podejście nieprecyzyjne z prowadzeniem GNSS ABAS (2D) i pionowym (wysokościomierz barometryczny); nawigacja 3D – minima LNAV/VNAV.
4. LPV – podejście nieprecyzyjne (localizer performance with vertical guidance) z prowadzeniem GNSS SBAS 3D – minima LPV.

Pytania??

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

