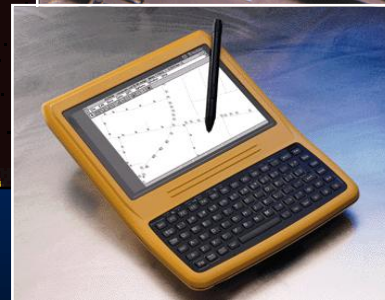
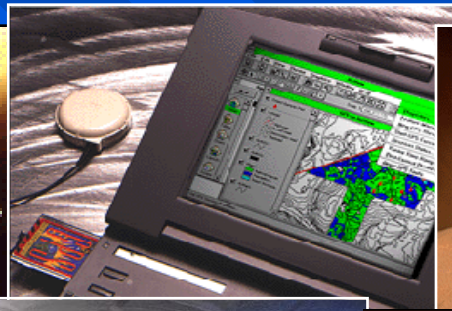
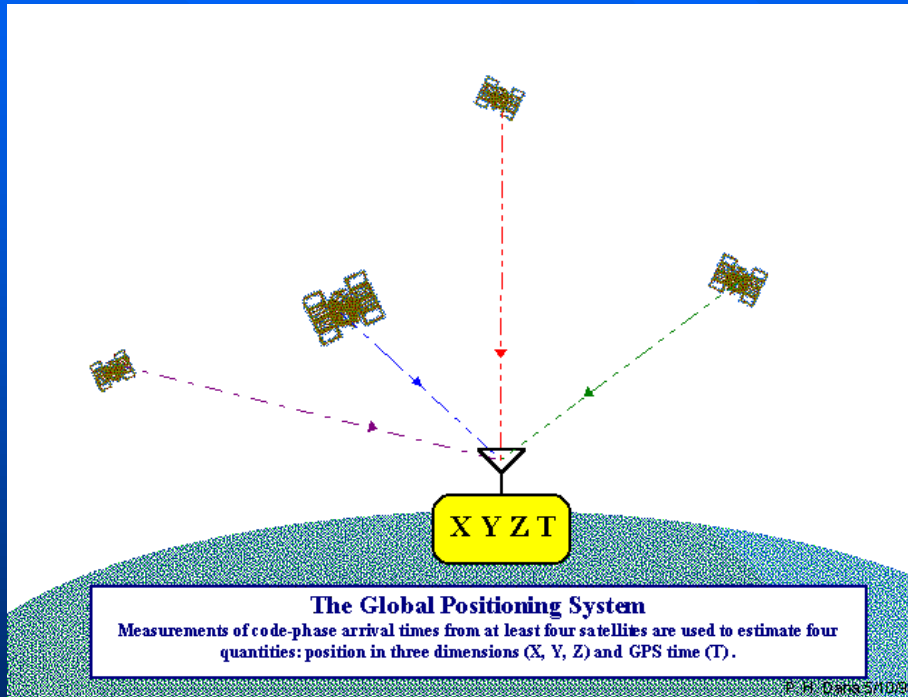


Global Positioning System (GPS) – zasada działania



Metoda wyznaczania pozycji



- GPS zapewnia pozycję 3D - φ , λ , H.
- Parametr nawigacyjny – odległość odbiornika od SV.
- Odległość od – SV – wyliczana na podstawie pomiaru czasu podczas przebytej drogi SV – OD.
- Pseudoodległość – wynik pomiaru odległości z błędami w pomiarze czasu.

Odległość jako parametr nawigacyjny

- Pozycja jednowymiarowa
- Pozycja dwuwymiarowa (2D)
- Pozycja trójwymiarowa (przestrzenna, 3D)



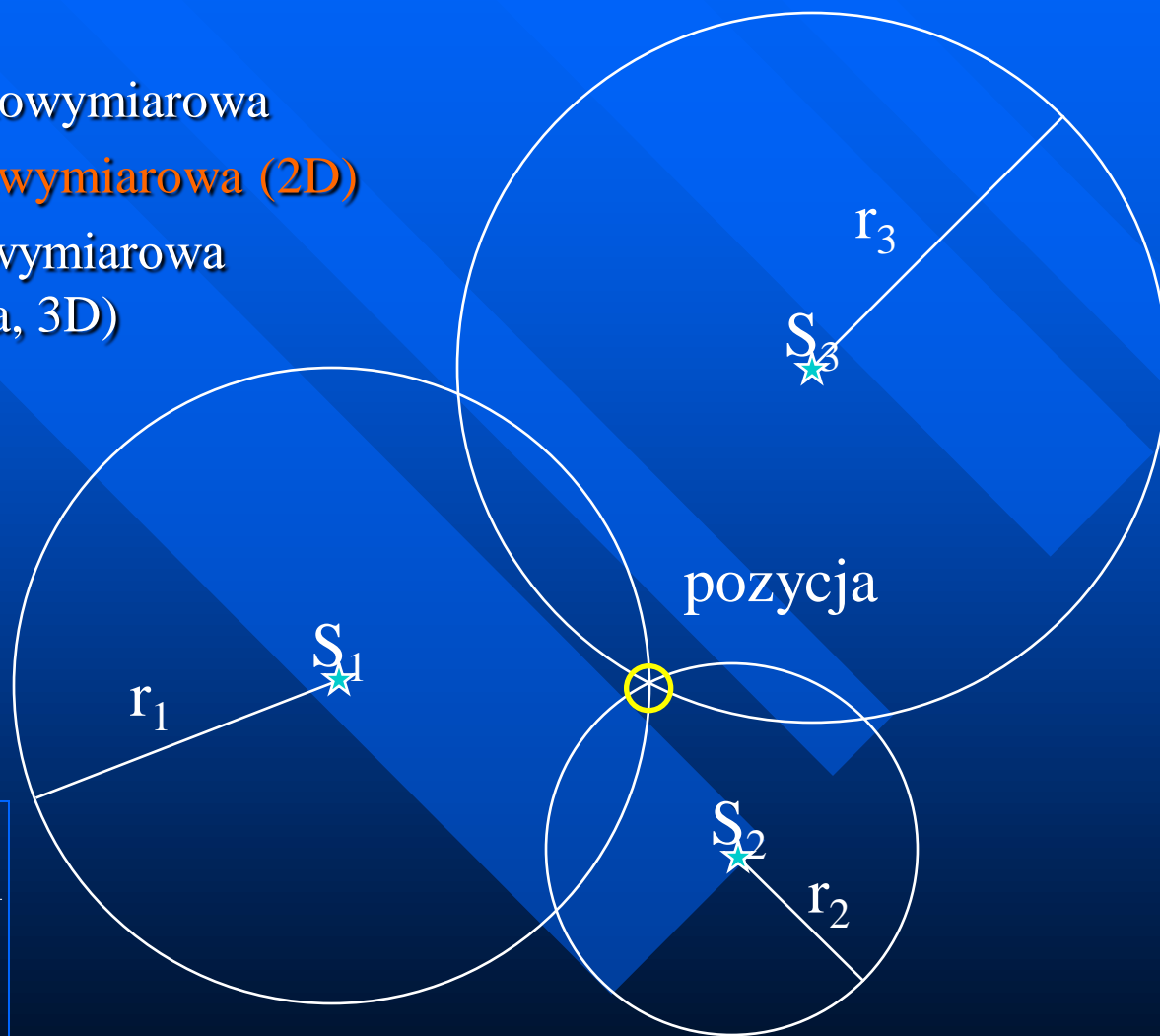
$$r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2}$$

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 \Rightarrow (x - x_1)^2 - r_1^2 = 0 \Rightarrow x^2 - 2x_1x + x_1^2 - r_1^2 = 0$$

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2} \end{cases}$$

Odległość jako parametr nawigacyjny

- Pozycja jednowymiarowa
- Pozycja dwuwymiarowa (2D)
- Pozycja trójwymiarowa (przestrzenna, 3D)

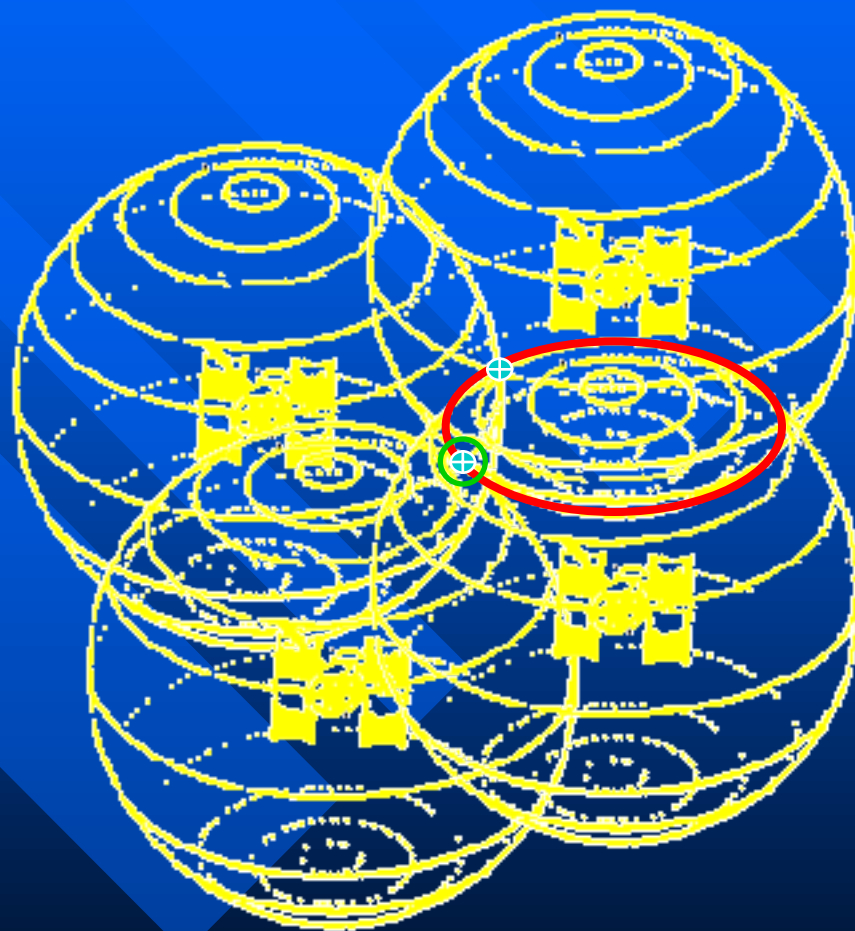


$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} \end{cases}$$

Odległość jako parametr nawigacyjny

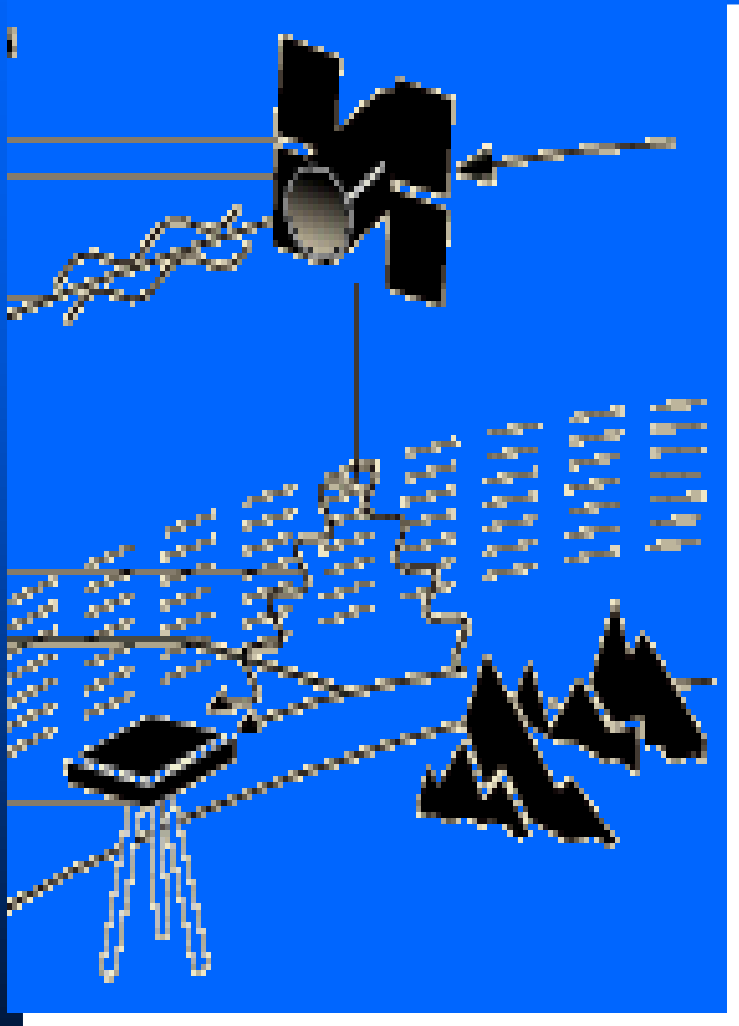
- Pozycja jednowymiarowa
- Pozycja dwuwymiarowa (2D)
- **Pozycja trójwymiarowa (przestrzenna, 3D)**

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \\ r_4 = \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} \end{cases}$$



W przypadku trzech powierzchni pozycyjnych jedno z rozwiązań znajduje się w pobliżu powierzchni Ziemi, a drugie jest od niej znacznie oddalone.

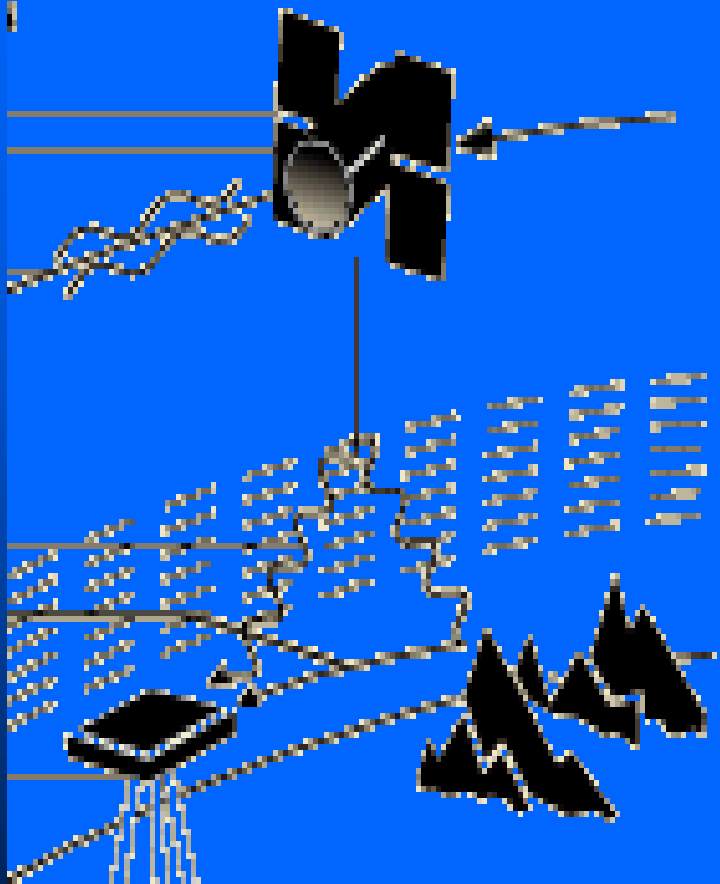
Metoda wyznaczania pozycji



Do wyznaczenia jednej powierzchni pozycyjnej:

- **Odebrać sygnał z satelity.**
- **Określić położenie satelity w chwili nadania sygnału.**
- **Wyznaczyć czas przebiegu sygnału od satelity do odbiornika.**
- **Obliczyć odległość.**

Metoda wyznaczania pozycji – określenie czasu



Mierzony czas Δt składa się z:

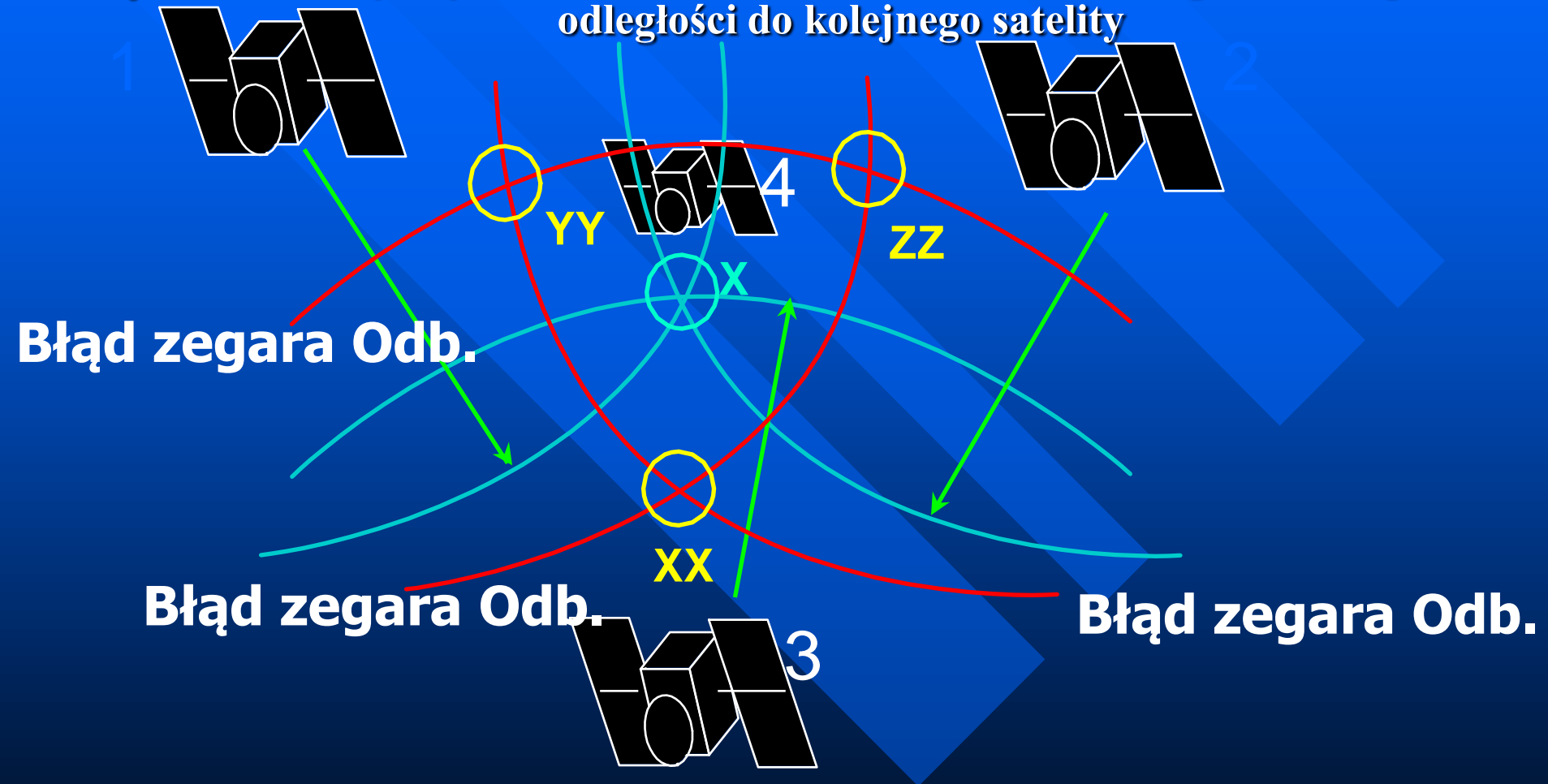
- Czasu propagacji sygnału: SV – OD (Δt_p)
- Różnicy wskazań zegarów SV (Δt_s)
- OD (Δt_o) – odchyłki zegara odbiornika od czasu GPS
- Opóźnienia sygnału w jonosferze (Δt_j)
- Opóźnienia sygnału w troposferze (Δt_t)
- Innych czynników (Δt_r):
 - nierównomierny obrót Ziemi,
 - wielokrotność sygnału,
 - celowe zakłócenia lub
 - celowe obniżenie dokładności

Pseudoodległość „ p ” – odległość wyznaczona na podstawie czasu Δt

Metoda wyznaczania pozycji – określenie

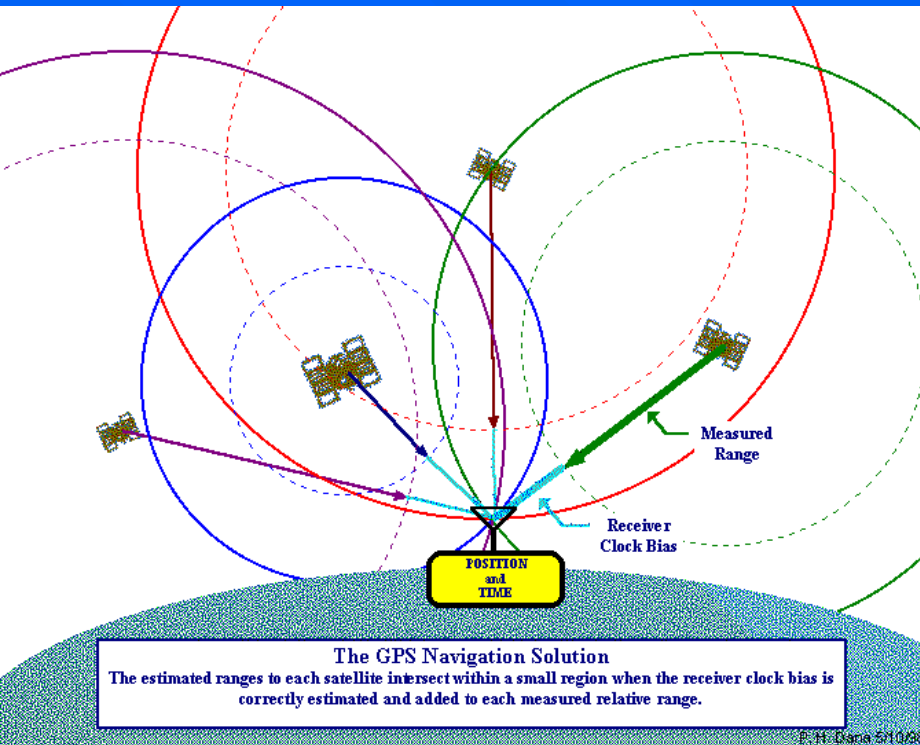
czasu Δt_o

Δt_o traktowana jest jako dodatkowa zmienna i obliczana na podstawie pomiaru odległości do kolejnego satelity



$$c\Delta t_o = p_i - r_i \Rightarrow r_i = p_i - c\Delta t_o$$

Metoda wyznaczania pozycji – równanie pozycji

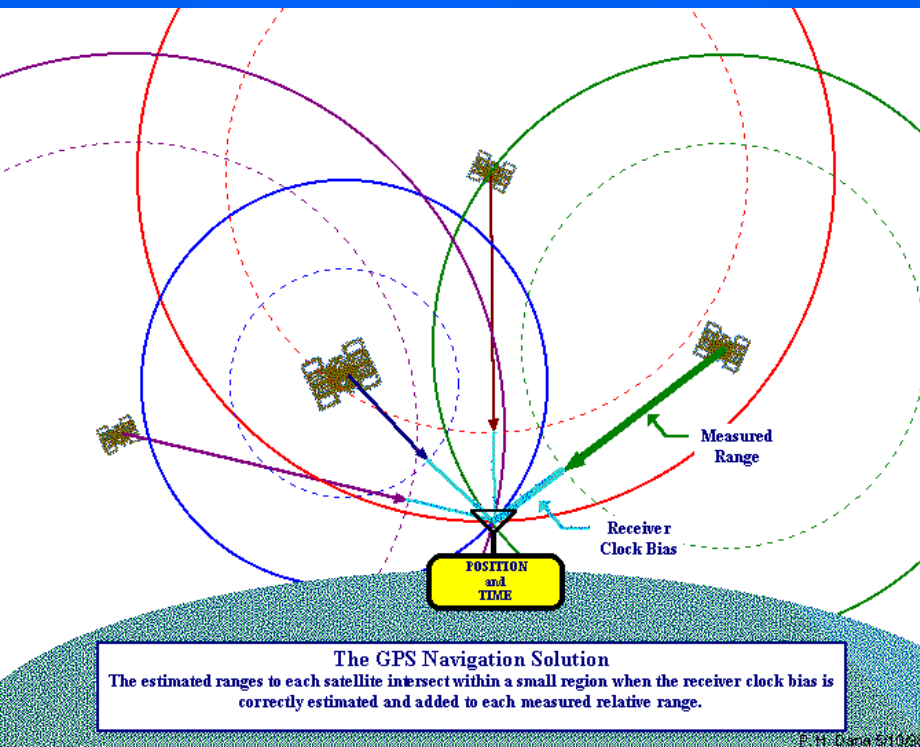


$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \\ r_4 = \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} \end{cases}$$

$$r_i = p_i - c\Delta t_o$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = p_1 - \Delta t_o c \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} = p_2 - \Delta t_o c \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} = p_3 - \Delta t_o c \\ \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} = p_4 - \Delta t_o c \end{cases}$$

Metoda wyznaczania pozycji – równanie pozycji



Do rozwiązania równań stosuje się:

- Metody linearyzacji – sprowadzenie funkcji do postaci liniowej poprzez rozwinięcie ich w szereg Taylora .
- Metody iteracyjne – wyznaczanie przyrostów współrzędnych pozycji obserwowanej w stosunku do znanych współrzędnych pozycji początkowej.

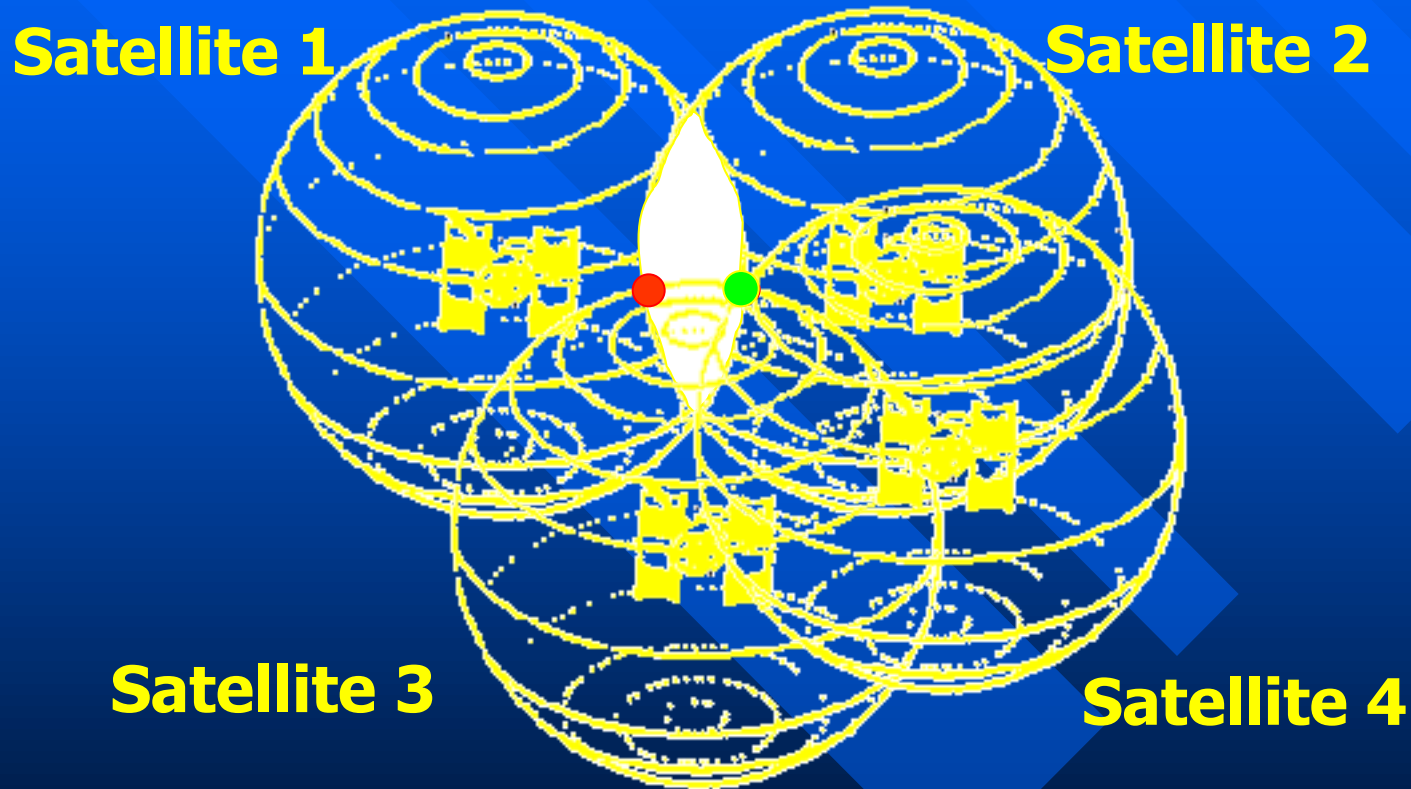
Metoda wyznaczania pozycji 2D

Pozycja 2D – wymaga przynajmniej 3 powierzchni pozycyjnych (pseudoodległości)

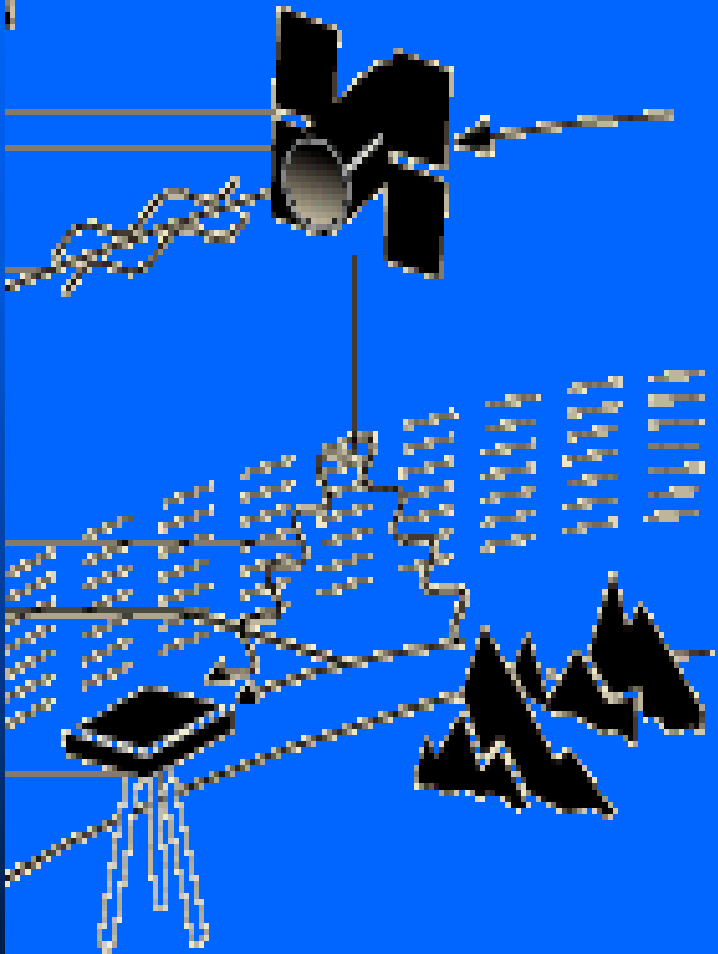


Metoda wyznaczania pozycji 3D

Pozycja 3D – wymaga przynajmniej 4 linii pozycyjnych (pseudoodległości)



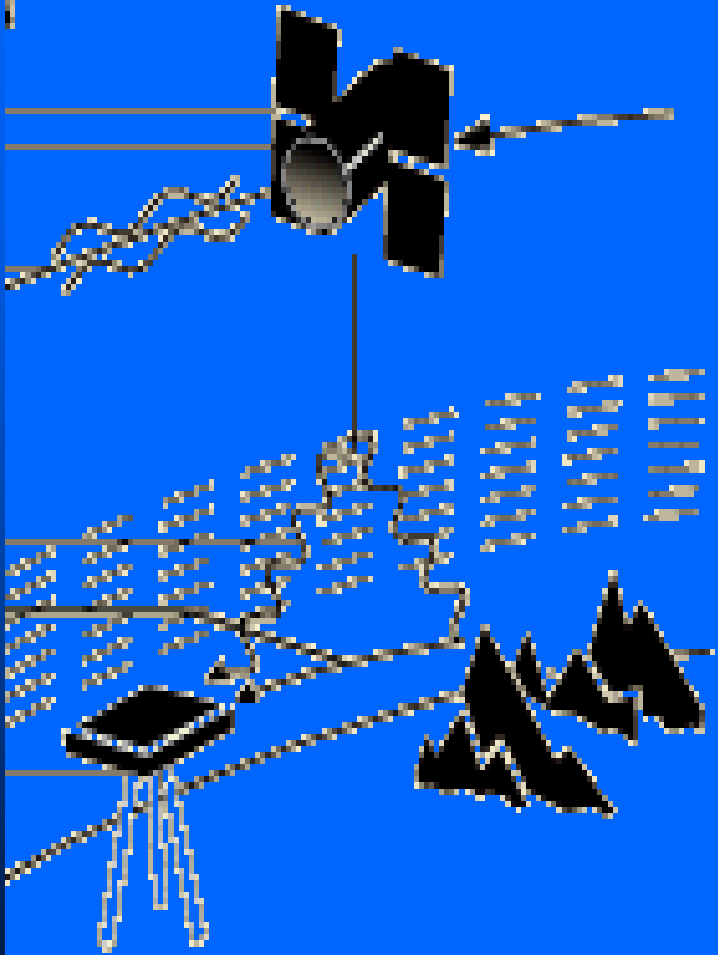
Sygnaty nadawane przez satelitę



Aby wyznaczyć powierzchnię pozycyjną trzeba znać następujące informacje odczytywane z sygnału satelity:

- Czas, w którym został nadany sygnał,
- Miejsce na orbicie gdzie znajdował się satelita w momencie wysyłania sygnału,
- Depeszę nawigacyjną.

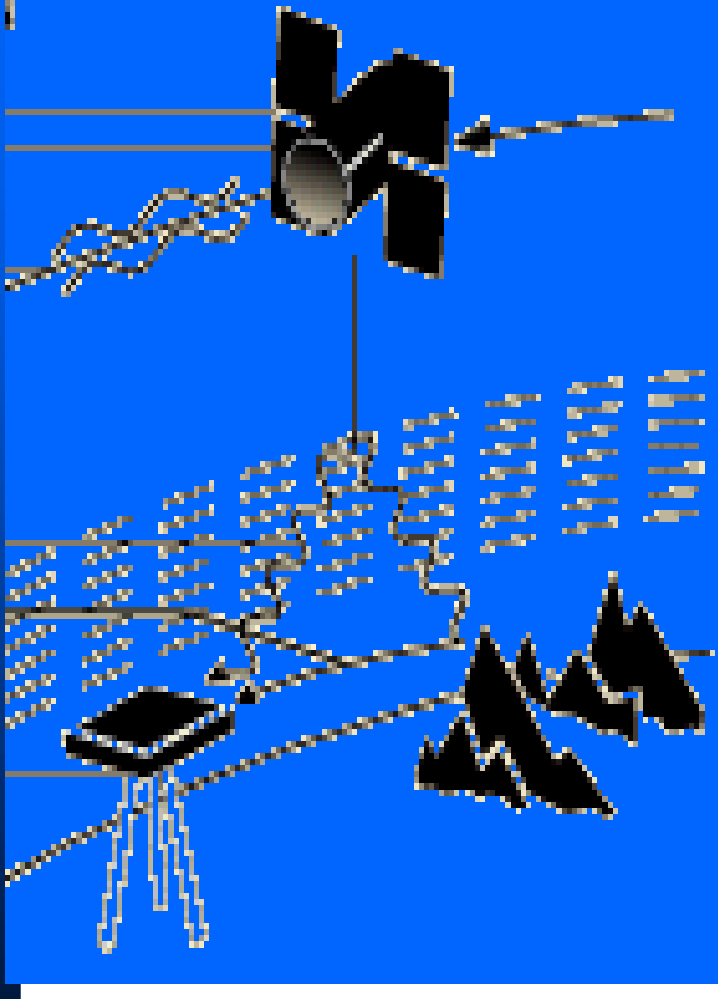
Sygnaly nadawane przez satelitę



SV transmitują sygnały w pasmach:

- **S:** dwa kanały służące do przekazywania informacji dotyczących obsługi samego systemu
- **L:** dwa kanały służące do przesyłania depechy nawigacyjnej.

Sygnaty nadawane przez satelitę

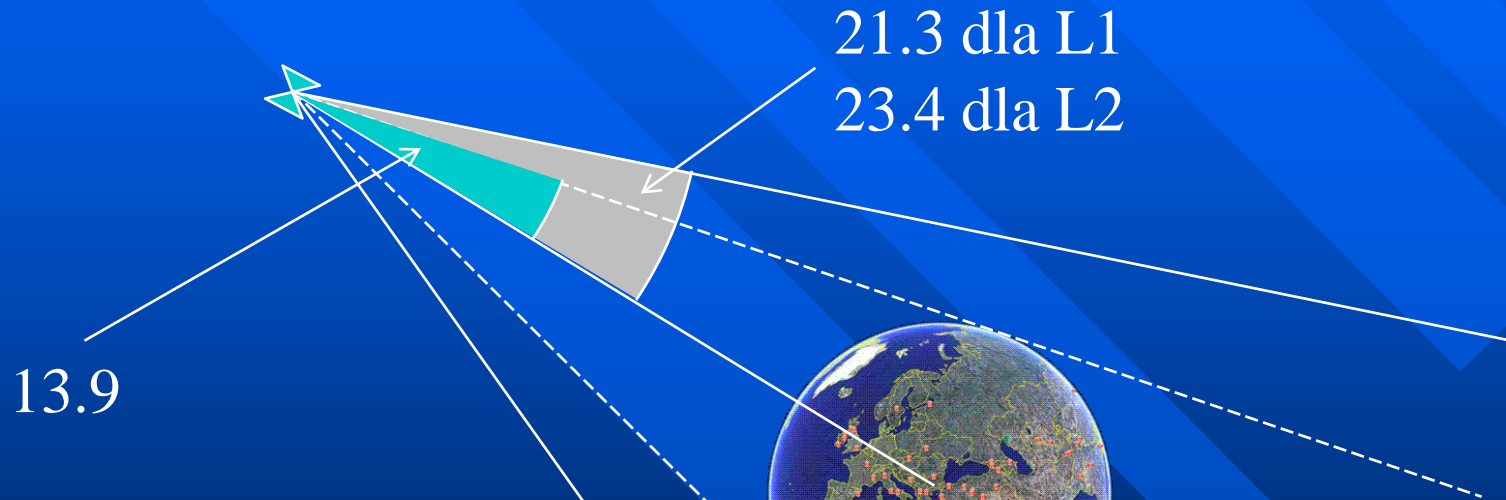


Częstotliwość fali nośnej:

- F podstawowa: 10,23 MHz
- Dwa kanały transmisji:
 - $L1=154F= 1575,42$ MHz
 - $L2=120F=1227,60$ MHz
- W/w F pozwalają na pomiar odległości z dokładnością mniejszą niż 0.2 m.
- Dwa kanały transmisji umożliwiają wyliczenie aktualnych poprawek na refrakcję jonosferyczną w celu zwiększenia dokładności pomiaru

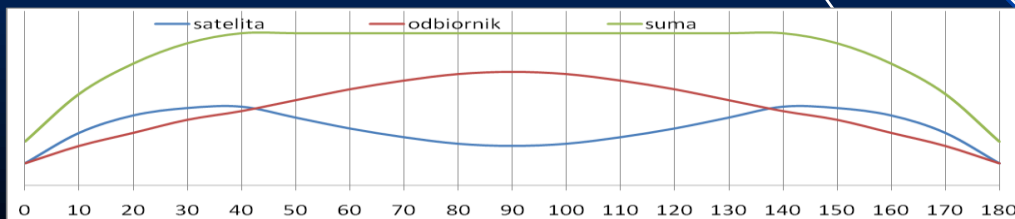
Charakterystyka anten

	P	C/A
L1	-163 dBm	-160 dBm
L2	-166 dBm	-166 dBm

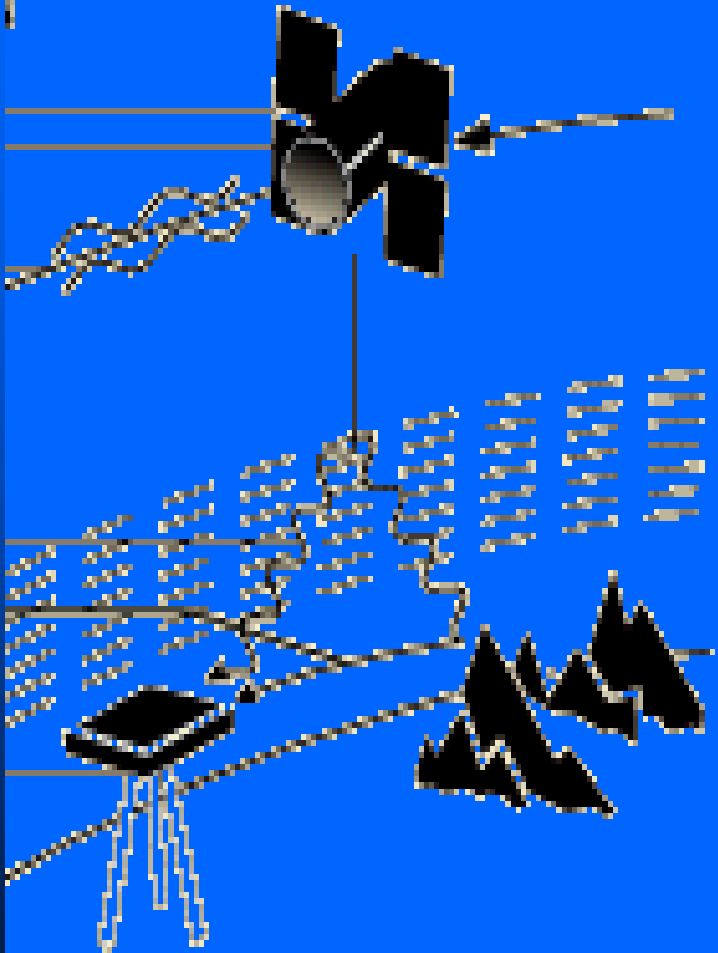


Minimalny poziom sygnału GPS,

- Antena satelity:
 - Maksimum przy 40,
 - słabsze wzmocnienie w centrum charakterystyki
- Antena odbiornika
 - większe wzmocnienie w zenicie (2.1 dBm)



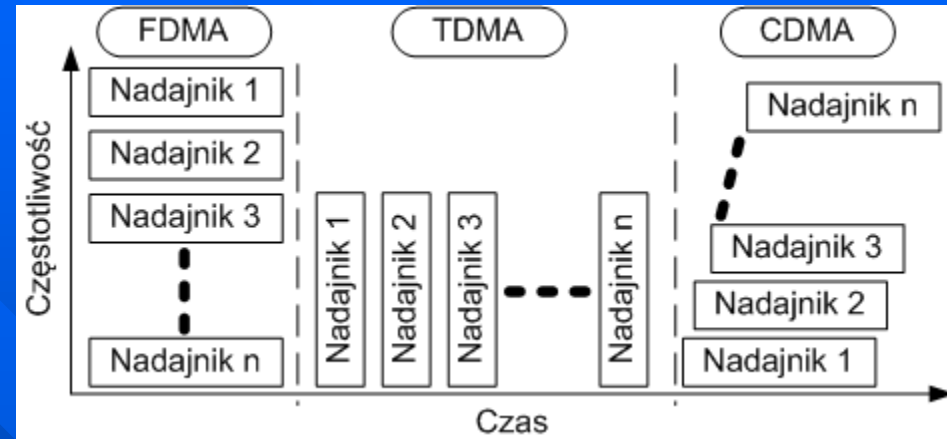
Sygnaty nadawane przez satelitę



Sygnal emitowany przez satelity jest modulowany:

- **Impulsowo – umożliwia odtworzenie informacji nawigacyjnej z sygnału bardzo słabego, zmniejsza możliwość zakłóceń i zniekształceń, pozwala na transmisję sygnałów ze wszystkich satelitów na tych samych częstotliwościach.**
- **Sposób modulacji nazywany jest kodem**

Dostęp do pasma radiowego



FDMA – frequency division multiple access

Dostęp wielokrotny z podziałem częstotliwościowym. Sygnały są transmitowane na różnych częstotliwościach.

TDMA – time division multiple access

Dostęp wielokrotny z podziałem czasowym. Sygnały są transmitowane na tej samej częstotliwości lecz w odpowiednio przyporządkowanym momencie czasu.

CDMA – code division multiple access

Dostęp wielokrotny z podziałem kodowym. Do transmisji sygnału wykorzystywane jest to samo pasmo częstotliwości. Identyfikacja nadajnika na podstawie charakterystycznego kodu identyfikacyjnego.

Pasmo transmisji

Bezpośrednio z techniką dostępu do kanału radiowego związana jest szerokość pasma transmisji.

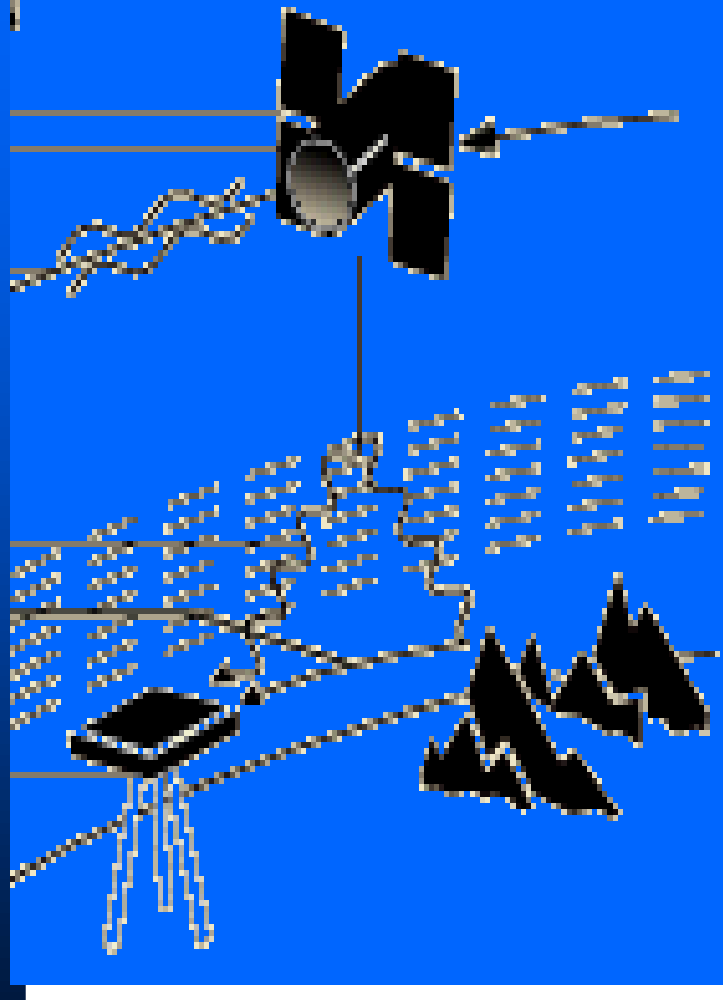
W celu przesłania sygnału danych o szerokości pasma B należy wykorzystać pasmo częstotliwości radiowej o szerokości P :

$$P = 2kB$$

gdzie: k – współczynnik poszerzenia pasma.



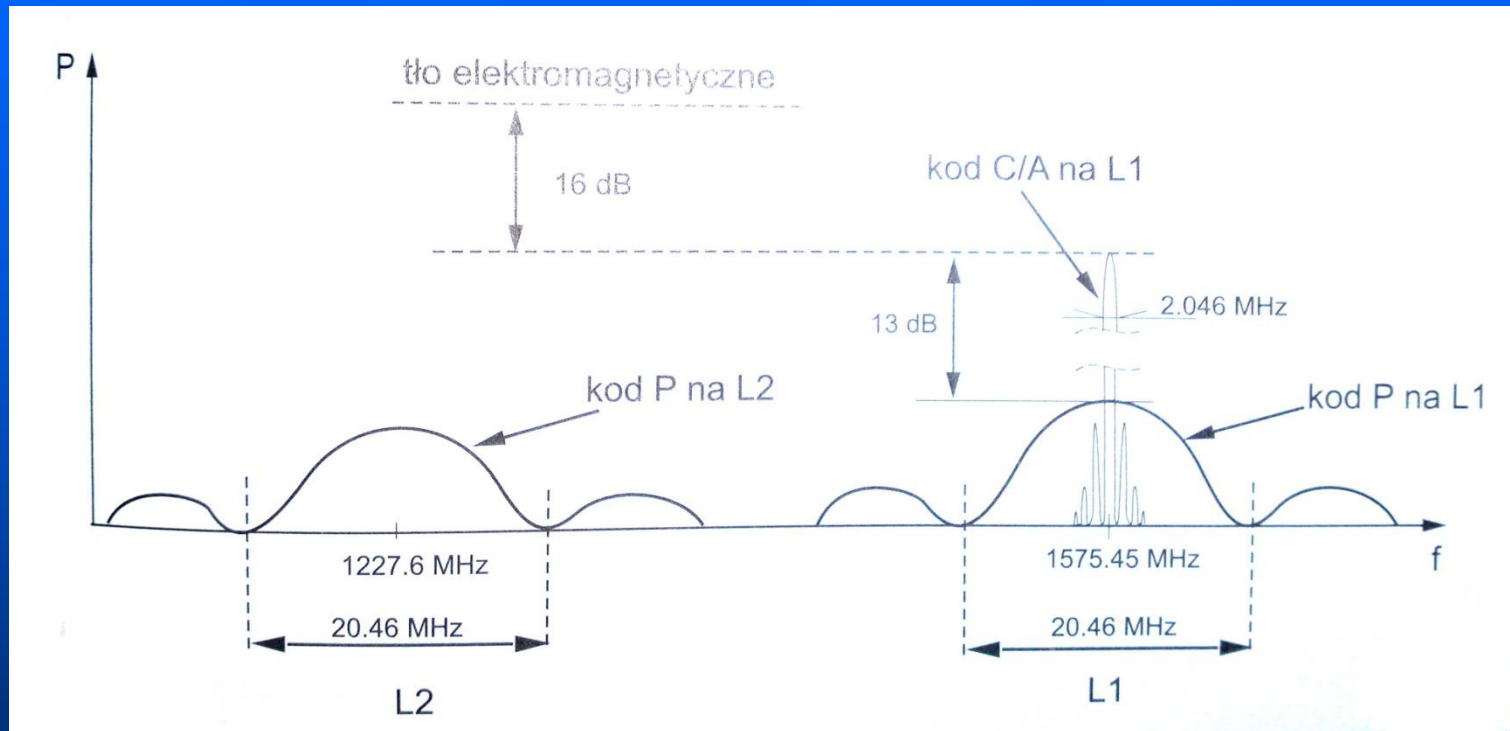
Sygnaty nadawane przez satelitę



Sygnal emitowany przez satelity GPS ma postać fali nośnej, kodowanej fazowo sygnałami:

- informacyjnym, o prędkości 50 bitów na sekundę,
- pseudolosowym kodem C/A, taktowanym częstotliwością 1,023 MHz,
- pseudolosowym kodem P, taktowanym częstotliwością 10,23 MHz,
- pseudolosowym kodem Y, taktowanym częstotliwością około 0.5 Hz.

Szerokość pasma transmisji dla GPS

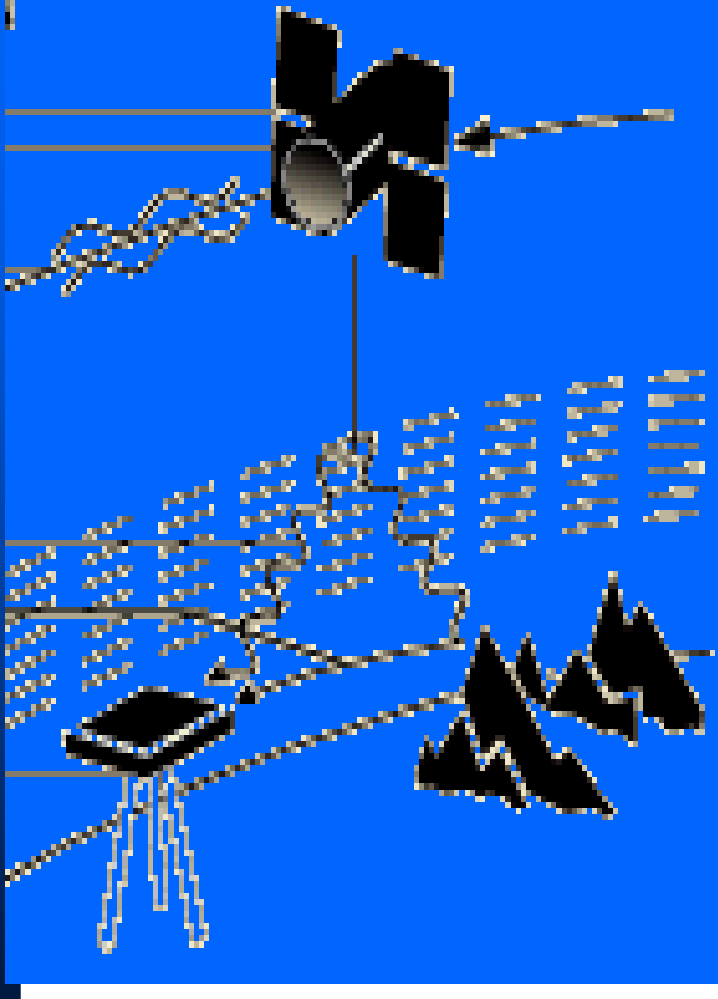


Szerokość pasma transmisji przy wykorzystaniu kodu:

- C/A wynosi 2.046 MHz – $k = 2 \cdot 10^4$

- P wynosi 20.46 MHz – $k = 2 \cdot 10^5$

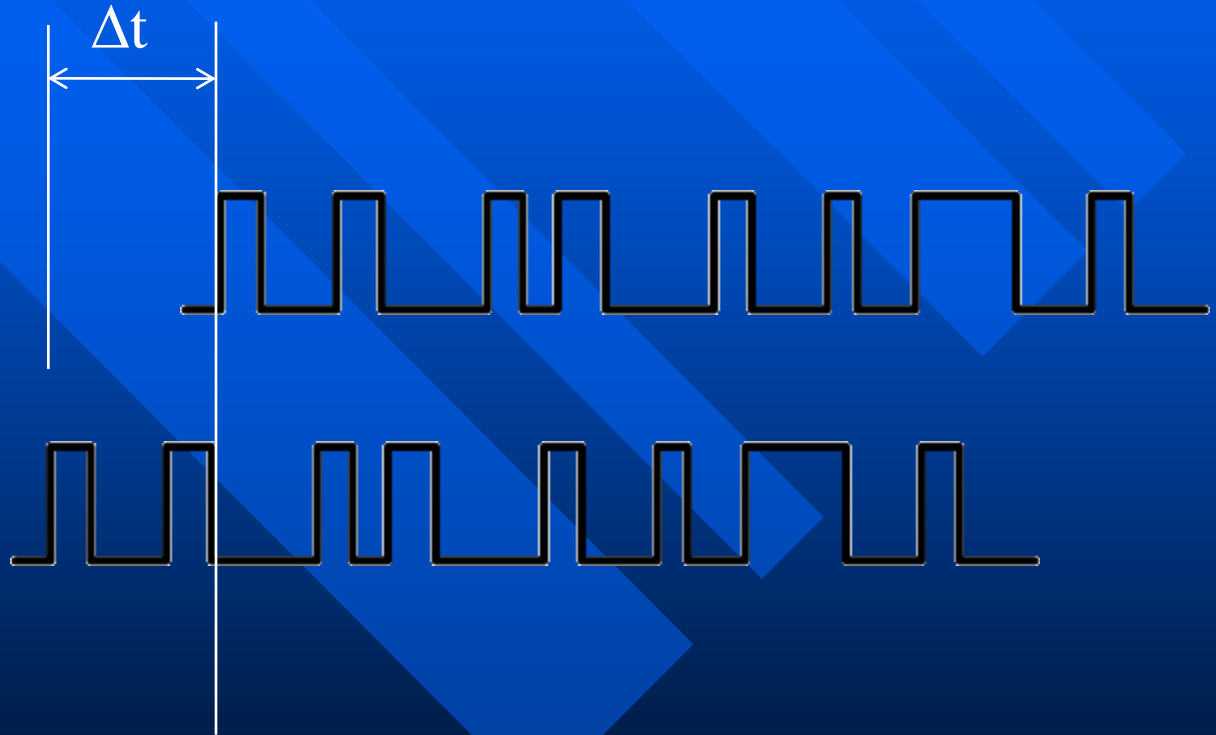
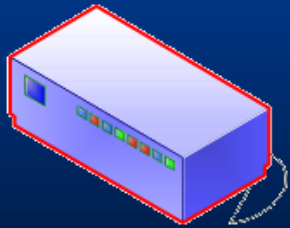
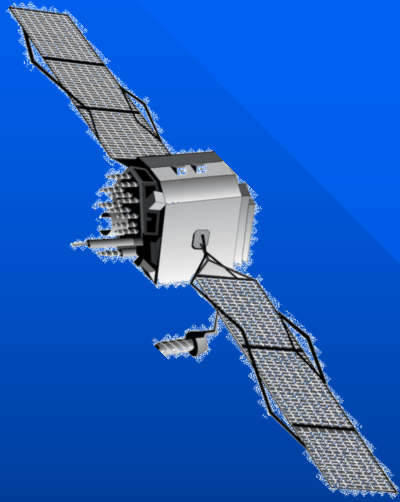
Sygnaly nadawane przez satelitę



Sygnaly pseudolosowe:

- Modulowane impulsowo z fazą ± 1 z 1032 ciąg pseudolosowy Golda.
- Każdy SV nadaje inny odcinek ciągu losowego co umożliwia identyfikację satelity.
- Sekwencję odcinków ciągów przypisano SV tak aby sygnały z innych SV nie były ze sobą skorelowane.
- Współ. autokorelacji dla jednego satelity posiada jedno maksimum
- Czas dojścia sygnału do OB. z SV wynosi 60 – 81 ms

Pomiar czasu propagacji Δt



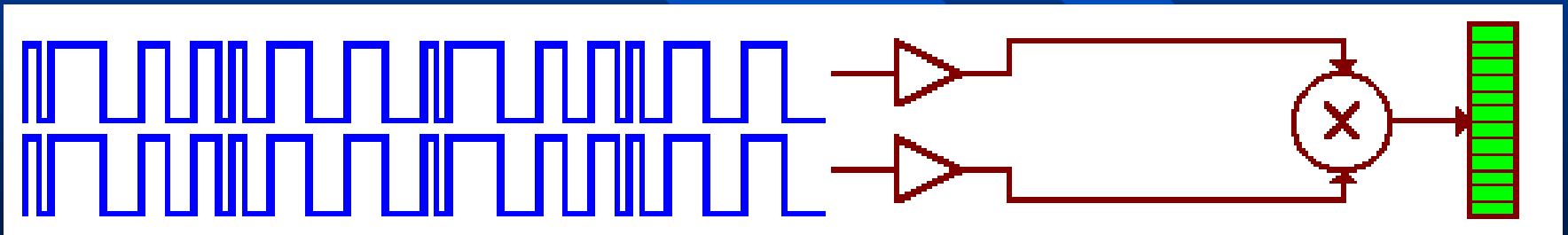
Sygnaty nadawane przez satelitę



GPS C/A Code Chips (Rows = PRN Signal Numbers 1-32)

Peter H. Dana 6/16/96

Obieranie sygnału przez odbiornik

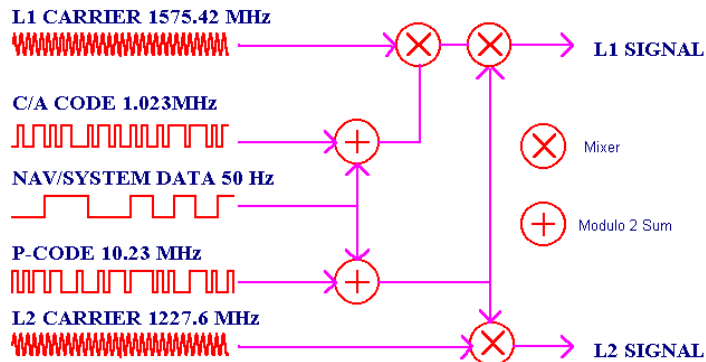


Sygnaty nadawane przez satelitę

Sygnaty satelitarne są sygnałami o widmie rozproszonym. Poziom mocy sygnału satelitarnego jest o około 30 dB niższy od poziomu szumów wzmacniacza antenowego.

Używane są dwa czynniki rozpraszające:

- kod C/A (coarse/acquisition-akwizycji zgrubnej) tylko na L1
- kod P (precise-dokładny) na L1 i L2.
Minimalna moc sygnału odbieranego przez antenę odbiornika:
 - 160 dBW L1 C/A
 - 163 dBW L1 P
 - 166 dBW L2 P.



GPS SATELLITE SIGNALS

P H DANIA 4/98

Sygnaly nadawane przez satelitę – kod C/A

- **Ogólnodostępny kod C/A –coarse acquisition-akwizycji zgrubnej.**
- **Każdy satelita posiada inny kod.**
- **Bity kodu nazywane są chipami**
- **Nadawany na L1**
- **Odcinki modulacji kodem psdl. o dł. 1023 bity**
- **Szybkość transmisji 1,023 Mbit/s**
- **Powtarzalność odcinka kodu danego satelity – 1ms co umożliwia szybką synchronizację kodu w odbiorniku z nadawanym sygnałem.**
- **Powtarzanie modulacji co 1ms przy prędkości fali 300000 km/s– umożliwia rozdzielczość pomiaru ok. 3000m przy błędzie równym odcinkowi kodu.**
- **W praktyce dokładność pseudoodległości jest większa niż 20 do 30 m.**

Sygnaly nadawane przez satelitę – kod P

- Dostępny dla autoryzowanych użytkowników kod P - precise-dokładny
- Nadawany na obu kanałach L1, L2
- Modulowany w odcinkach o długości jednego tygodnia, części trwającej 267 dni sekwencji ciągu psdl.
- SV ma przypisany jednotygodniowy segment tego kodu
- Wznowienie powtarzania odcinka ciągu następuje w sobotę po północy.
- Szybkość transmisji – 10,23 MHz ($10 * C/A$)
- Zwiększenie dziesięciokrotnie dokładności wyznaczania pseudoodległości.

Sygnaty nadawane przez satelitę – kod Y

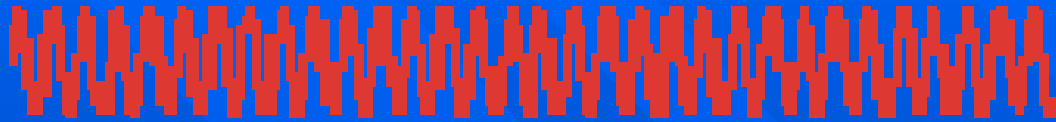
- **Nadawany w sytuacjach szczególnych – podczas włączenia systemu zapobiegania próbom zakłóceń pracy urządzeń GPS – anti-spoofing.**
- **Kod P – szyfrowany z częstotliwością modulacji 0.5 Hz co dodatkowo zabezpiecza serwis PPS**

Wnioski:

Spełnione założenia pracy systemu odnoszące się do dokładności 10m, 0.1 m/s, 1 μ s.

Sygnaly nadawane przez satelitę – L1

L1 Carrier Wave 1575.42MHz



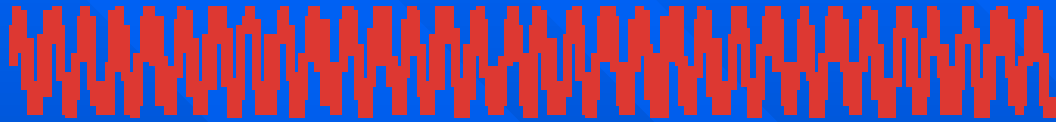
**C/A Code
1.023 MHz**

**Navigation Message
50Hz**

**Precise Code
10.23 MHz**

Sygnaly nadawane przez satelitę – L2

L2 Carrier Wave 1227.6MHz



**Navigation Message
50 Hz**

**Precise Code
10.23 MHz**

Sygnaly nadawane przez satelitę – L2

L1 CARRIER 1575.42 MHz



C/A CODE 1.023MHz



NAV/SYSTEM DATA 50 Hz



P-CODE 10.23 MHz



L2 CARRIER 1227.6 MHz



L1 SIGNAL

Modulo 2 Sum

L2 SIGNAL



Mixer

Modulo 2 Sum

GPS SATELLITE SIGNALS

Poziomu dokładności

GPS zapewnia dwa poziomy dokładności:

- **Dokładny Serwis Pozycyjny (PPS - Precise Positioning Service)**
- **Standardowy Serwis Pozycyjny (SPS - Standard Positioning Service).**
- **PPS zapewnia dane o pozycji i czasie o wysokiej dokładności, dostępne tylko dla autoryzowanych użytkowników.**
- **SPS jest mniej dokładny, lecz dostępny dla wszystkich użytkowników.**

Poziomu dokładności - PPS

PPS dostarcza informacji o pozycji:

- **z dokładnością nie gorszą niż 16 metrów (50%,3D)**
- **informacji o czasie z dokładnością nie gorszą niż 100 nanosekund (1 sigma) w stosunku do czasu UTC(USNO) (Universal Coordinated Time US Naval Observatory.**
- **dostępny jest jedynie dla autoryzowanych użytkowników**
- **przeznaczony głównie dla celów wojskowych**
- **do autoryzowanych użytkowników należą: Siły Zbrojne USA i NATO. O autoryzacji użytkownika decyduje Departament Obrony USA.**

Poziomu dokładności - PPS

Dostęp do PPS kontrolowany jest dwiema metodami:

- **Ograniczony Dostęp (SA - Selective Availability)** pozwala na zmniejszenie dokładności pozycji i czasu dostępnych dla nieautoryzowanych użytkowników.
- SA działa poprzez wprowadzanie kontrolowanych błędów do sygnałów satelity i depeczy satelitarnej.
- Departament Obrony zadeklarował, iż w czasie pokoju SA zmniejszy dokładność pozycji dla użytkowników SPS do 100 metrów (95%, 2D).
- Anti-spoofing (A-S) jest włączany bez ostrzeżenia by uniemożliwić imitowanie sygnałów PPS przez nieprzyjaciela.
- Nie ma to wpływu na odbiór kodu C/A. Klucz do szyfru dostępny jest wyłącznie autoryzowanym użytkownikom umożliwiając im usunięcie wpływu SA i A-S. W ten sposób uzyskują oni maksymalną dostępną dokładność.

Poziomu dokładności - PPS

Odbiorniki PPS mogą używać:

- kodu P(Y),
- kodu C/A
- obydwu.
- Największa dokładność uzyskiwana jest przy użyciu kodu P(Y) sygnałów o częstotliwościach L1 i L2.
- Różnica w czasie propagacji sygnałów o różnych częstotliwościach używana jest do wyznaczenia poprawki jonosferycznej.
- Zazwyczaj odbiorniki PPS używają kodu C/A w celu inicjacji śledzenia sygnałów satelitów i wyznaczenia przybliżonej fazy kodu P(Y).
- *ON 1 MAY 2000: SA WAS DISABLED BY DIRECTIVE*

Poziomu dokładności - SPS

Standardowy serwis pozycyjny dostarcza informacji o pozycji:

- z dokładnością nie gorszą niż 100 metrów (95%,2D) w rozwiązaniach dwuwymiarowych
- 156 metrów (95%,3D) w rozwiązaniach trójwymiarowych.
- Dokładność informacji o czasie określona jest na nie gorszą niż 337 nanosekund (95%) w stosunku do skali UTC(USNO).
- SPS przeznaczony jest głównie dla użytkowników cywilnych.
- Wymieniona dokładność zawiera wpływ SA, który jest głównym źródłem błędów SPS.
- Rozkład błędów wyznaczenia pozycji przypomina rozkład normalny z długookresową średnią równą zeru.

Poziomu dokładności - SPS

- **A-S uniemożliwia użytkownikom SPS dostęp do kodu Y.**
- **użytkownicy SPS nie mogą opierać się na bezpośrednim pomiarze kodu P, by zmierzyć dokładnie różnice w propagacji częstotliwości L1 i L2, a zatem określić wielkość poprawki jonosferycznej - kod C/A nadawany jest tylko na częstotliwości L1.**
- **Typowy odbiornik SPS do wyznaczenia poprawek jonosferycznych używa modelu jonosfery transmitowanego w depeczy satelitarnej**
- **Jest to procedura znacznie mniej dokładna niż pomiar na dwóch częstotliwościach.**
- **Dokładność pozycji przy użyciu SPS uwzględnia też błąd modelowania jonosfery.**
- **Odbiorniki geodezyjne używają rozmaitych wyrafinowanych metod do określenia różnicy czasów propagacji, bez jawnej znajomości transformacji kodu P do Y.**

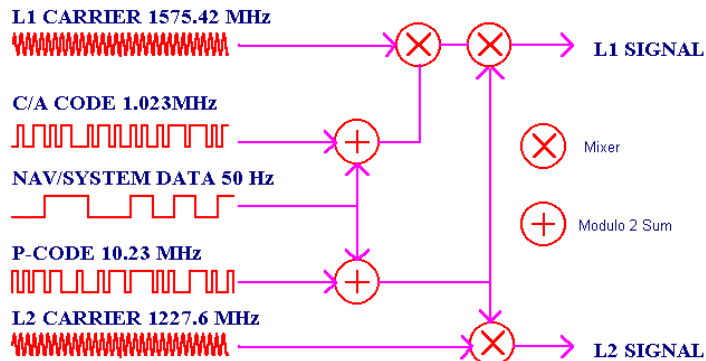
Poziomu dokładności - SPS

- Sztucznie wprowadzone i niektóre naturalne ograniczenia dokładności mogą być w dużym stopniu wyeliminowane przy użyciu technik różnicowych.
- Techniki te polegają na wykorzystaniu poprawek wyznaczanych przez precyzyjnie zlokalizowane odbiorniki, zwane stacjami referencyjnymi.
- Poprawki różnicowe mogą być wprowadzane po pomiarze, lub w czasie rzeczywistym, w tym ostatnim wypadku do ich transmisji wykorzystuje się łącza radiowe.
- W najbliższym czasie przewiduje się upowszechnienie systemów dystrybucji poprawek różnicowych z pokładu satelitów komunikacyjnych.

Depesza nawigacyjna

Depesza nawigacyjna:

- Nałożona na sygnał satelitarny w obu kodach C/A i P.
- Identyfikację i wyznaczenie położenia SV z którego odebrano sygnał.
- Określenie czasu wysłania sygnału.
- Ustalenie czasu systemu GPS.
- Określenie konfiguracji całego systemu na podstawie informacji dotyczących wszystkich satelitów.
- Zawiera almanach - dane dotyczące aktualnego stanu systemu, w tym przybliżone elementy orbitalne wszystkich satelitów, których znajomość przyspiesza proces akwizycji



GPS SATELLITE SIGNALS

P H DANIA 4/98

Depesza nawigacyjna

Depesza nawigacyjna:

- **Szybkość transmisji wynosi 50 bitów na sekundę.**
- **Składa się ona z 25 ramek (frame), każda złożona z 1500 bitów.**
- **Każda ramka podzielona jest na 5 podramek (subframe), po 300 bitów każda, zawiera 10 słów 30-bitowych.**
- **Dane w ramce aktualizowane co 1-2 godziny**
- **Odebranie jednej ramki danych zajmuje więc 30 sekund, a odebranie wszystkich 25 ramek zajmuje 12.5 minuty.**
- **Podramki 1,2 i 3 powtarzają te same 900 bitów danych we wszystkich 25 ramkach, umożliwia to odbiornikowi odebranie krytycznych danych w ciągu 30 sekund.**
- **Dane depeszy nawigacyjnej uaktualniane są co cztery godziny.**

Depesza nawigacyjna

Zawartość jednej ramki:

- 1,2,3 podramka – informacje dotyczące orbity danego satelity,
- 4,5 podramka – informacje umożliwiające:
 - Obliczenie czasu UTC,
 - Obliczenie poprawek jonosferycznych
 - Almanach systemu GPS
 - Almanach zawiera 25 stron w dwu podramkach nazywany również superramką

Depesza nawigacyjna

Zawartość podramki:

- **Rozpoczyna się słowem z informacja telemetrycznymi (TLM),**
 - **Pozwala na identyfikację SV oraz synchronizację ciągów losowych satelity i odbiornika.**
- **Słowo HOW (Hand Over Word)**
 - **Umożliwia dostrojenie sygnałów OB. Do nadawanych z SV,**
 - **Rozpoznanie kodów pseudolosowych,**
 - **Przejście od odbioru kodu C/A do kodu P.**

Depesza nawigacyjna

Aktualizacja kodów satelitów następuje co tydzień w sobotę o północy.

Koniec