

Satelitarne Systemy Nawigacyjne

Zasada działania GPS

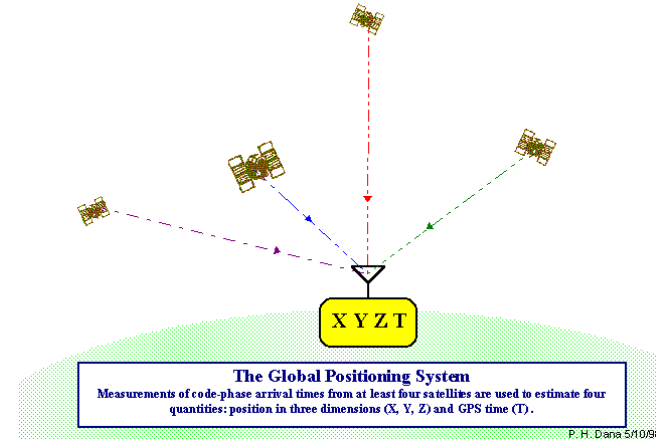
dr inż. Stefan Jankowski
s.jankowski@am.szczecin.pl

Wyznaczanie pozycji

- GPS zapewnia pozycję 3D:
 - φ, λ, h - współrz. geograficzne
 - x, y, z - ECEF (Earth Centered Earth Fix)
- Pozycja jest określana na podstawie pomiaru odległości do satelitów GPS
- Odległość d jest obliczana na podstawie czasu propagacji sygnałów radiowych z satelity do odbiornika:

$$d = c \cdot \Delta t$$

- c – prędkość światła; Δt – czas propagacji (SV – R)



Pseudoodległość (pseudo-range)

- Z powodu braku synchronizacji zegara odbiornika z czasem GPS (zegar satelity), tak obliczona odległość jest nazywana pseudoodległością
- **Pseudoodległość** (parametr nawigacyjny) – odległość pomiędzy satelitą a odbiornikiem obliczona na podstawie czasu propagacji sygnału radiowego zmierzonego przez zegar odbiornika, który jest przesunięty względem czasu GPS (clock offset)

Odległość jako parametr nawigacyjny

- Pozycja 1D
- Pozycja 2D
- Pozycja 3D



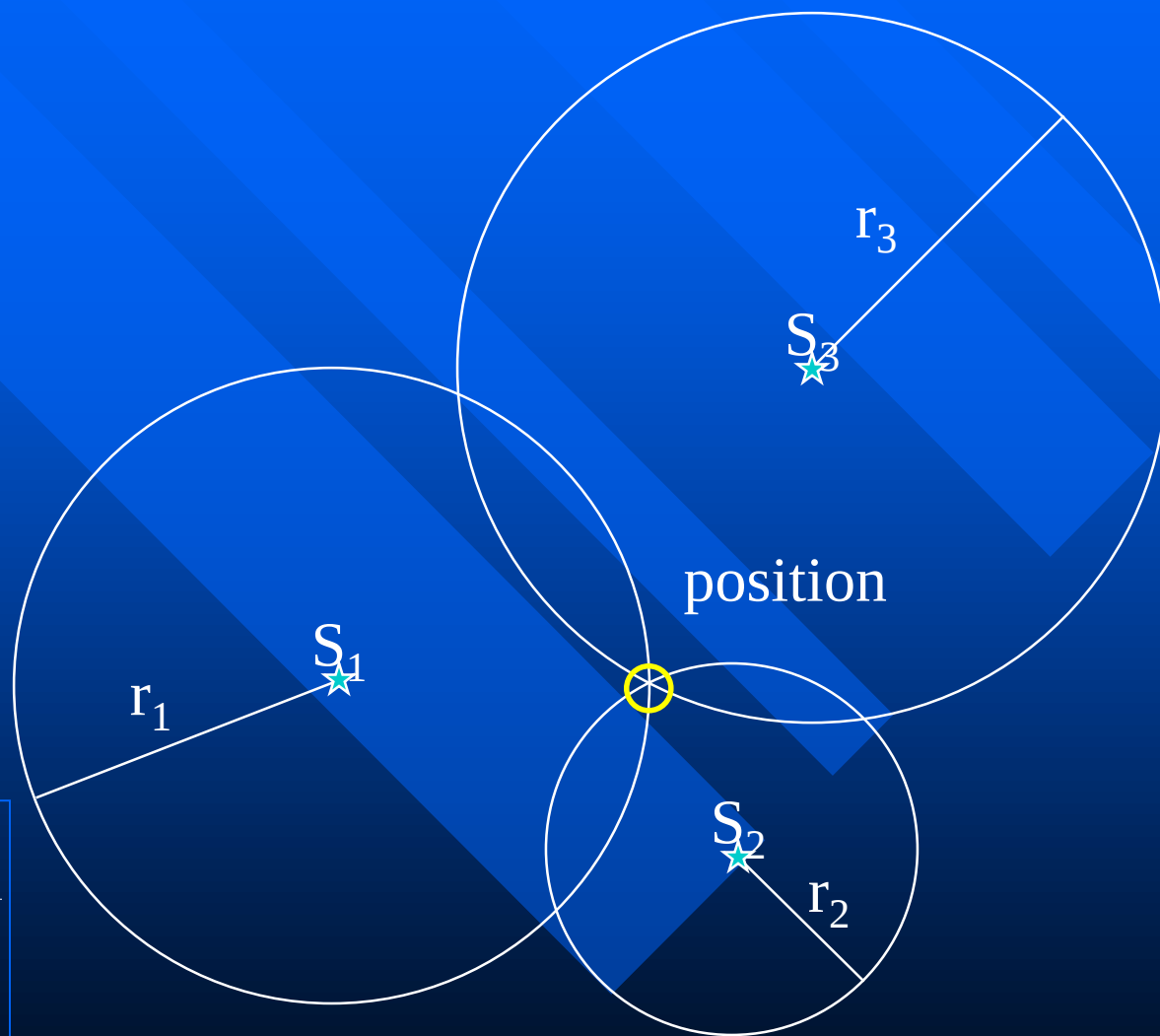
$$r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2}$$

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

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

Odległość jako parametr nawigacyjny

- Position 1D
- Position 2D
- Position 3D

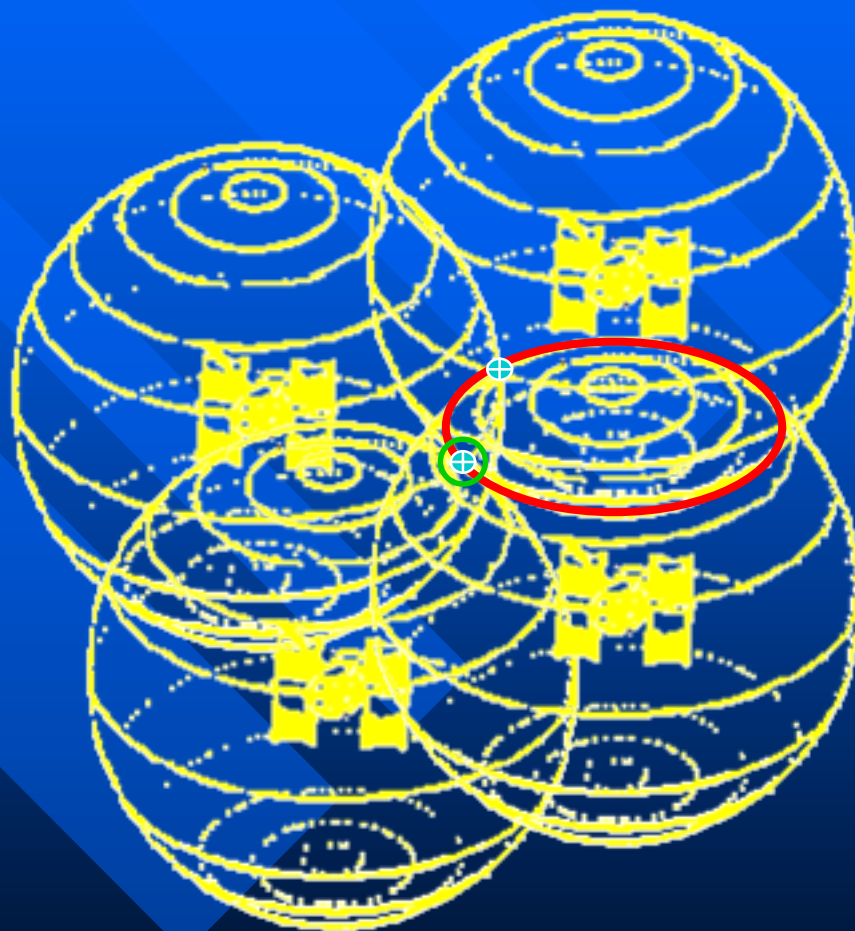


$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \end{cases}$$

Odległość jako parametr nawigacyjny

- Position 1D
- Position 2D
- Position 3D

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



Odległość jako parametr nawigacyjny / GPS

- GPS jest systemem pozycjonowania przeznaczonym dla określania pozycji blisko powierzchni Ziemi +/- 300 km
- Przy trzech pomiarach odległości tylko jedno rozwiązanie znajduje się w zakresie pozycjonowania, drugie rozwiązanie jest poza tym zakresem (odległość od powierzchni Ziemi większa niż 300 km) i może być odrzucone
- Jednak w dalszym ciągu niezbędny jest czwarty pomiar w celu określenia przesunięcia zegara odbiornika (clock offset)



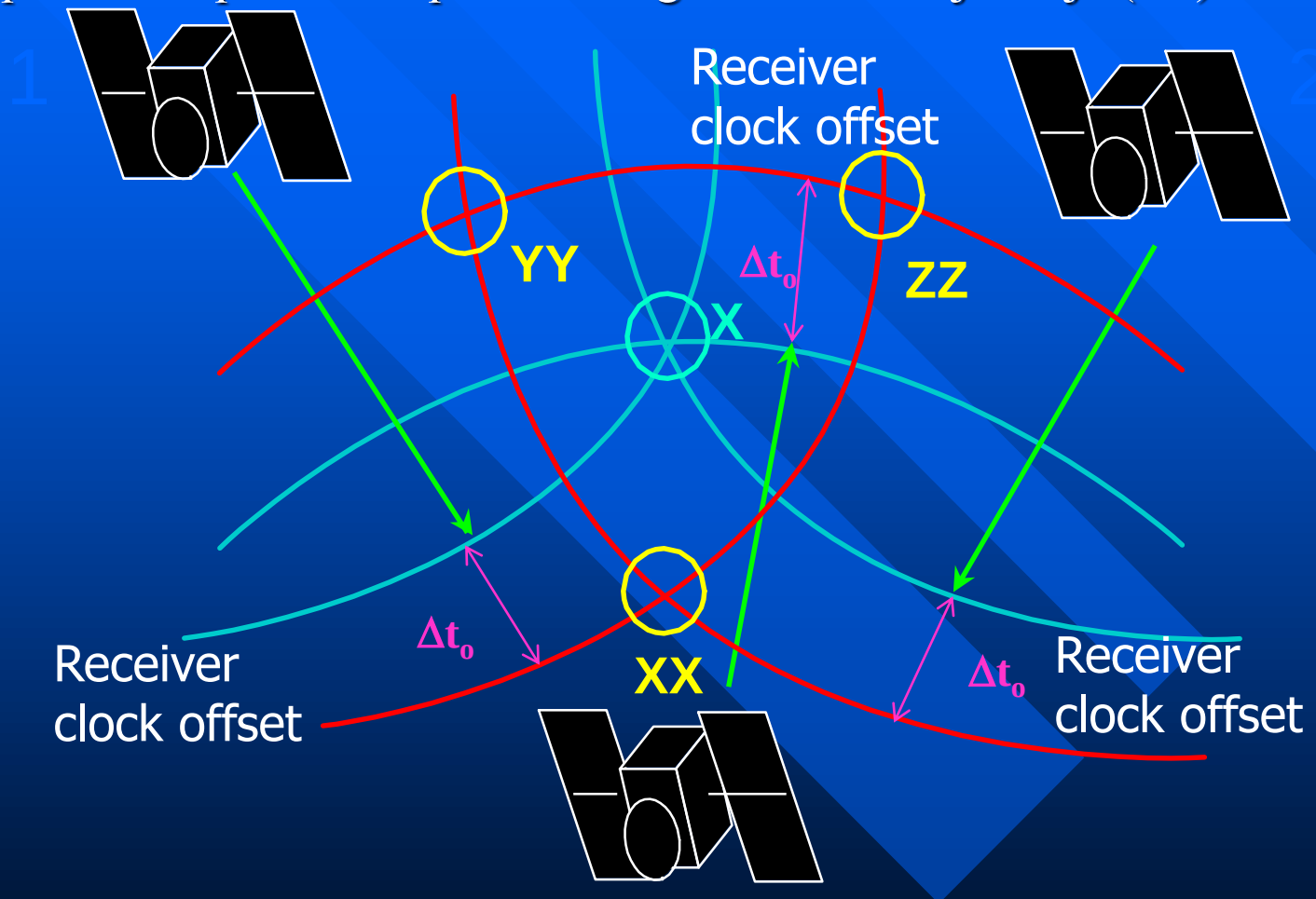
Czas propagacji sygnału satelitarnego

Czas propagacji sygnału satelitarnego SiS (signal in space) składa się z:

- Δt_p – czasu propagacji pomiędzy SV and R (odległość, c)
- Δt_o – przesunięcie zegara odbiornika
- Δt_s – przesunięcia zegara satelity
- Δt_i – opóźnienia sygnału w jonosferze
- Δt_t – opóźnienie sygnału w troposferze
- Δt_r – innych czynników jak
 - Nierównomierny obrót Ziemi
 - Wielokrotność sygnału
 - Celowe zakłócenia lub
 - Celowe obniżenie dokładności

Wyznaczanie przesunięcia zegara odbiornika – Δt_o

Δt_o jest traktowane jako kolejna zmienna i obliczana równocześnie z pozostałymi na podstawie pomiarów pseudoodległości do co najmniej 3(2D) lub 4 (3D) satelitów



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

Metoda wyznaczania pozycji

Biorąc pod uwagę układ równań dla pozycji 3D oraz przesunięcie zegara odbiornika, otrzymujemy:

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

gdzie:

(x, y, z) – współrzędne odbiornika (to co jest szukane)

$\Delta t_o c$ – przesunięcie zegara odbiornika wyrażone w metrach

(x_i, y_i, z_i) – współrzędne satelity

p_i – pseudoodległość pseudo-range

dla $i = 1..4$

Metoda wyznaczania pozycji

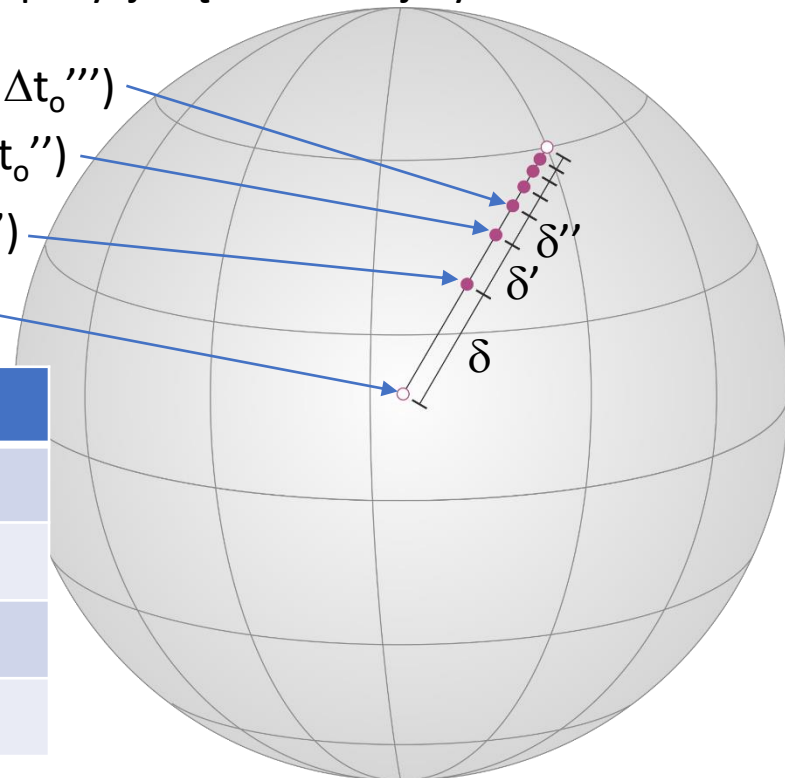
- Do rozwiązywania układu równań wykorzystuje się metody linearyzacji i iteracyjne:
 - Zredukowanie układu równań do postaci funkcji liniowej poprzez rozwinięcie ich w szereg Taylora
 - Powtarzanie (iteracje) obliczeń z wykorzystaniem funkcji liniowej do momentu, w którym przyrost współrzędnych pozycji będzie mniejszy od akceptowanego δ_{acc}
 - δ_{acc} zazwyczaj wynosi 0.5 m

$(x''', y''', z''', \Delta t_o''')$

$(x'', y'', z'', \Delta t_o'')$

$(x', y', z', \Delta t_o')$

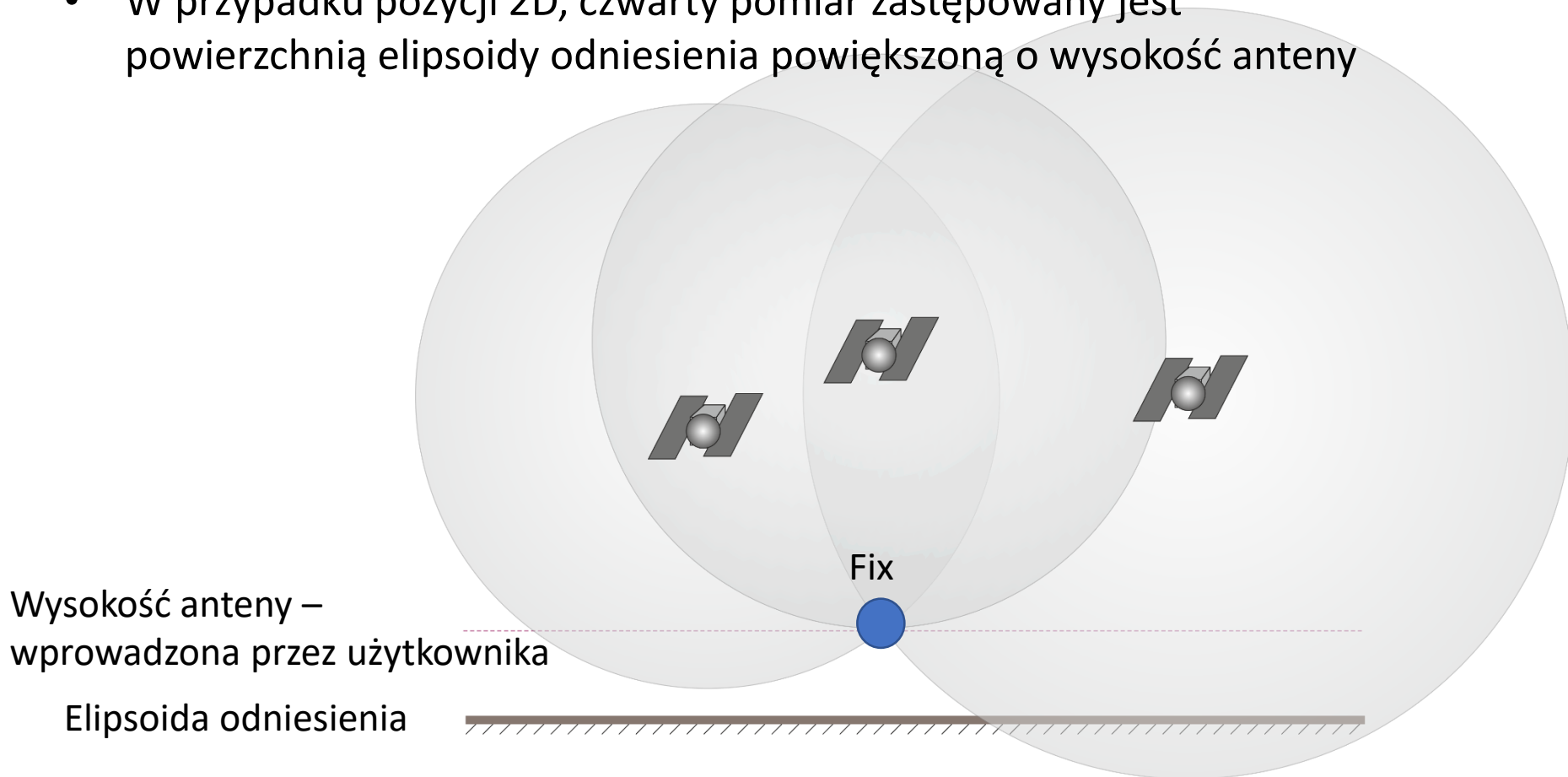
$(x, y, z, \Delta t_o)$



No	Funkcja (wejście)	wyjście	Sprawdzenie warunku
1	$f(x, y, z, \Delta t_o)$	$(x', y', z', \Delta t_o')$	$\delta < \delta_{acc}$
2	$f(x', y', z', \Delta t_o')$	$(x'', y'', z'', \Delta t_o'')$	$\delta' < \delta_{acc}$
3	$f(x'', y'', z'', \Delta t_o'')$	$(x''', y''', z''', \Delta t_o''')$	$\delta'' < \delta_{acc}$
...	...	...	...

Pozycja 2D vs pozycja 3D

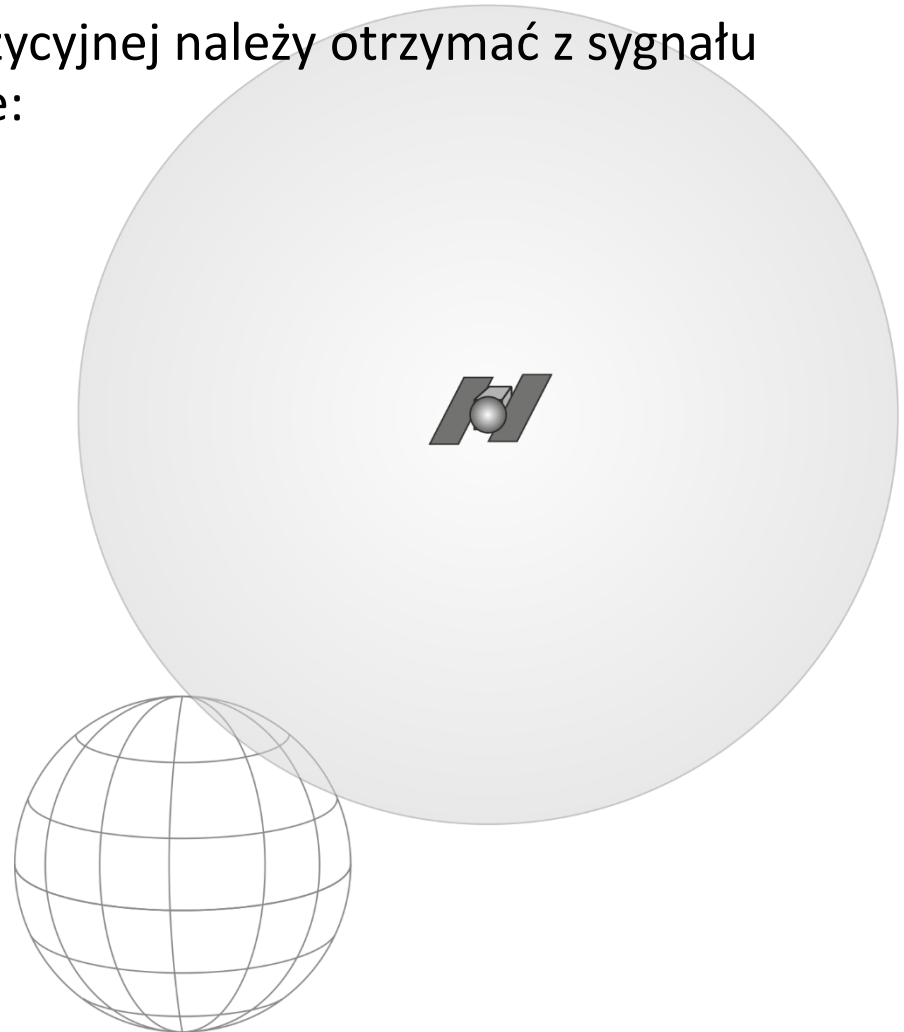
- W celu określenia pozycji 3D wymagany jest odbiór sygnałów z co najmniej 4 satelitów
- W przypadku pozycji 2D, czwarty pomiar zastępowany jest powierzchnią elipsoidy odniesienia powiększoną o wysokość anteny



Powierzchnia pozycyjna

W celu wyznaczenia powierzchni pozycyjnej należy otrzymać z sygnału satelitarnego następujące informacje:

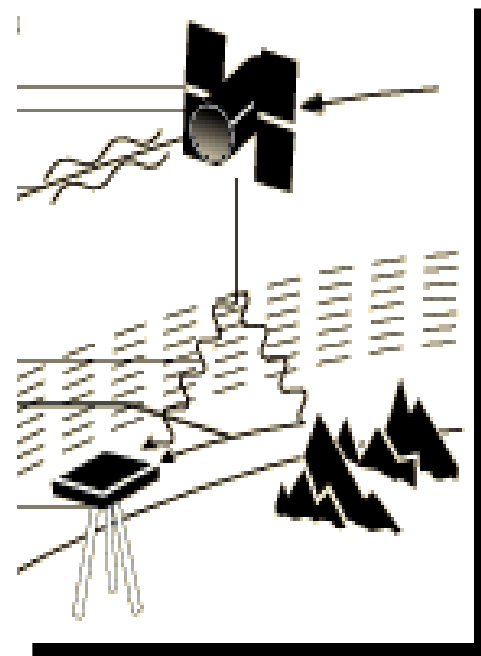
- Kiedy sygnał został wysłany;
obliczenie czasu propagacji
- Gdzie znajdował się satelita
w momencie wysłania sygnału
- Dlatego depesza nawigacyjna musi
zostać odebrana i odkodowana



Sygnał satelitarny (signals in space)

SV transmitują następujące sygnały:

- S band – dwa kanały do zapewnienia komunikacji pomiędzy segmentami kontrolnym i kosmicznym
- L band – dwa kanały przeznaczone dla użytkowników, zawierające kody satelitów i depesze nawigacyjną

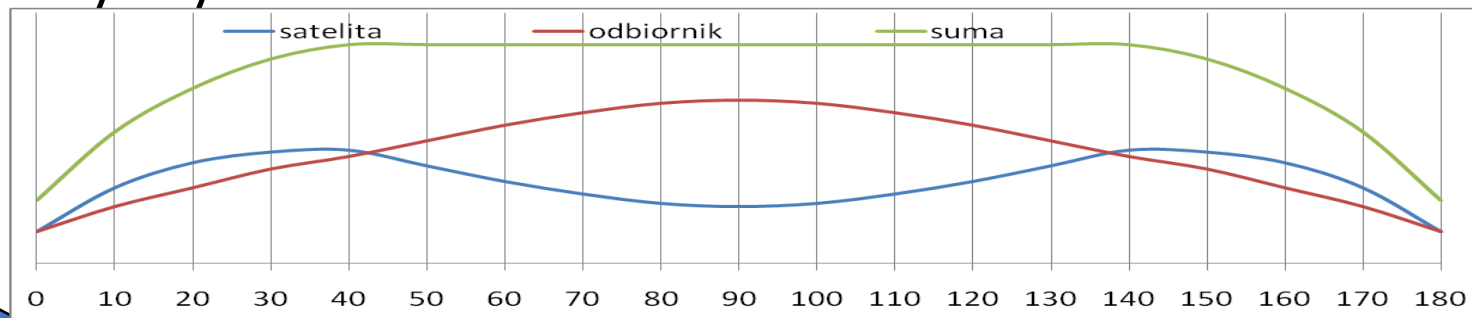


Sygnały przeznaczone dla użytkownika

Częstotliwość nośna:

- Podstawowa częstotliwość: 10.23 Mhz
- Utworzono dwa kanały poprzez zwielokrotnienie częstotliwości podstawowej
 - $L1 = 154F = 1575.42 \text{ MHz}$
 - $L2 = 120F = 1227.60 \text{ MHz}$
- Długość fali tak utworzonych kanałów radiowych umożliwia pomiar odległości z dokładnością lepszą niż 0.2 m
- Odbiór sygnałów na dwóch częstotliwościach umożliwia obliczenie bieżących poprawek na opóźnienie jonosferyczne
 - Wykorzystanie zjawiska dyspersji
 - Większa dokładność

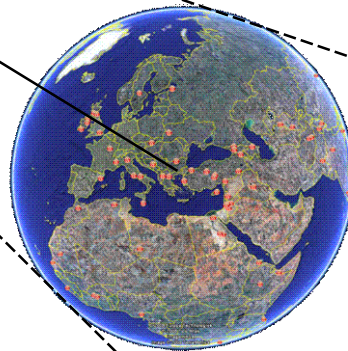
Charakterystyki antenowe



27.8°

42.6 ° dla L1

46.8 ° dla L2

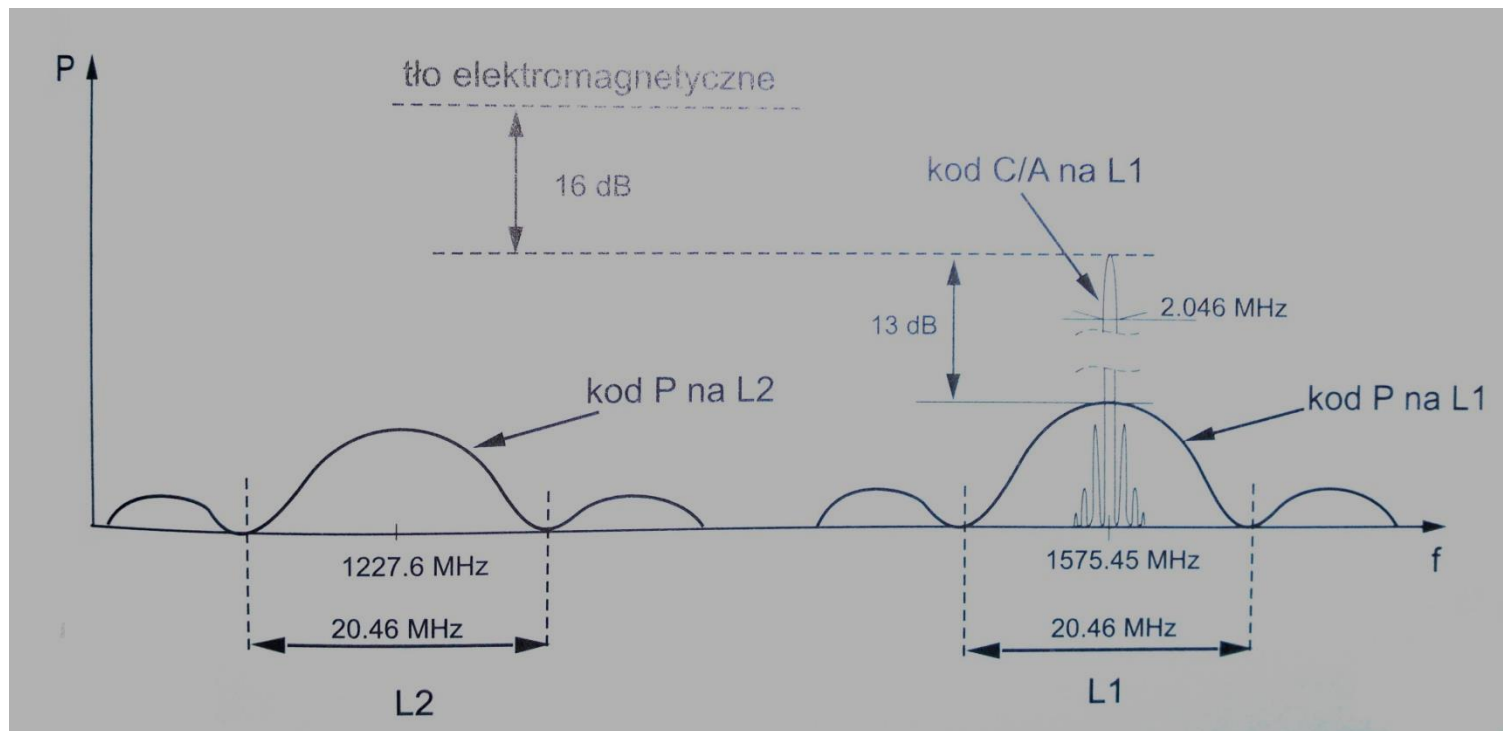


Minimalny poziom sygnałów GPS,

- Antena satelity:
 - Maksimum przy elewacji 40°,
 - Słabsze wzmocnienie w środku charakterystyki
- Antena odbiornika
 - Większe wzmocnienie w zenicie (2.1 dBm)

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

Szerokości pasm transmisji



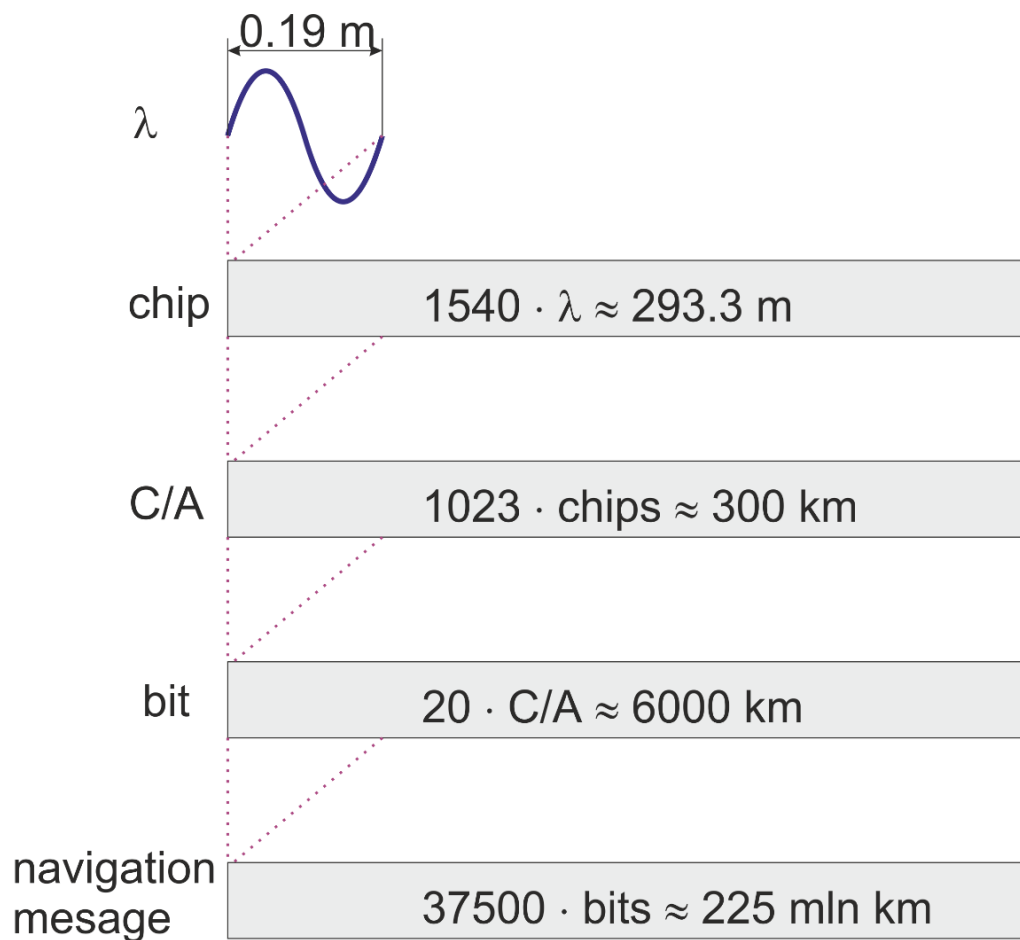
Szerokość pasma transmisji dla poszczególnych sygnałów:

- C/A ➔ 2.046 MHz
- P ➔ 20.46 MHz

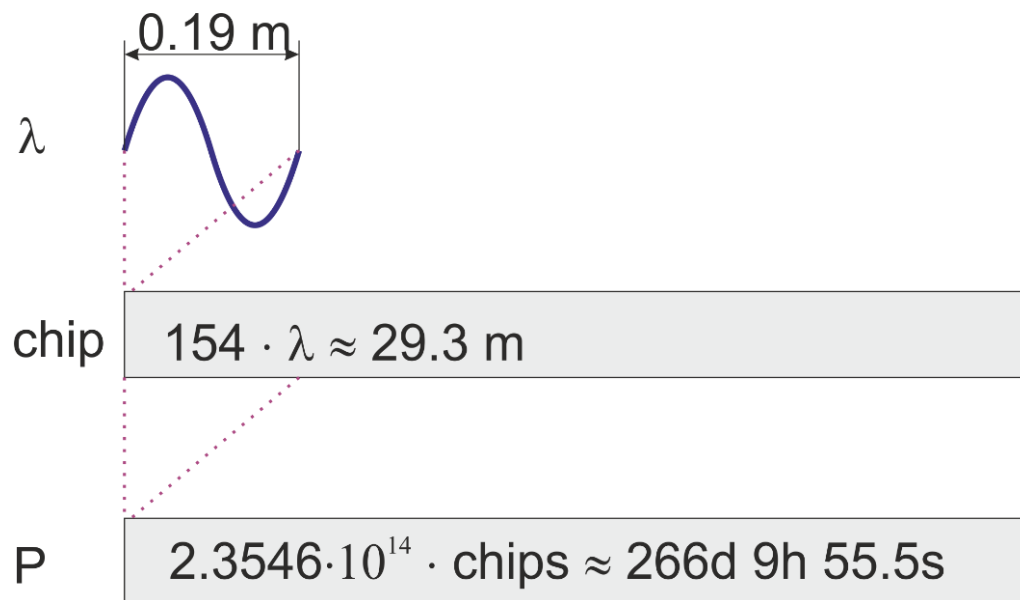
Struktura sygnału

- L1
 - kod C/A
 - kod P
 - Depesz nawigacyjna
- L2
 - kod P
 - Depesz nawigacyjna

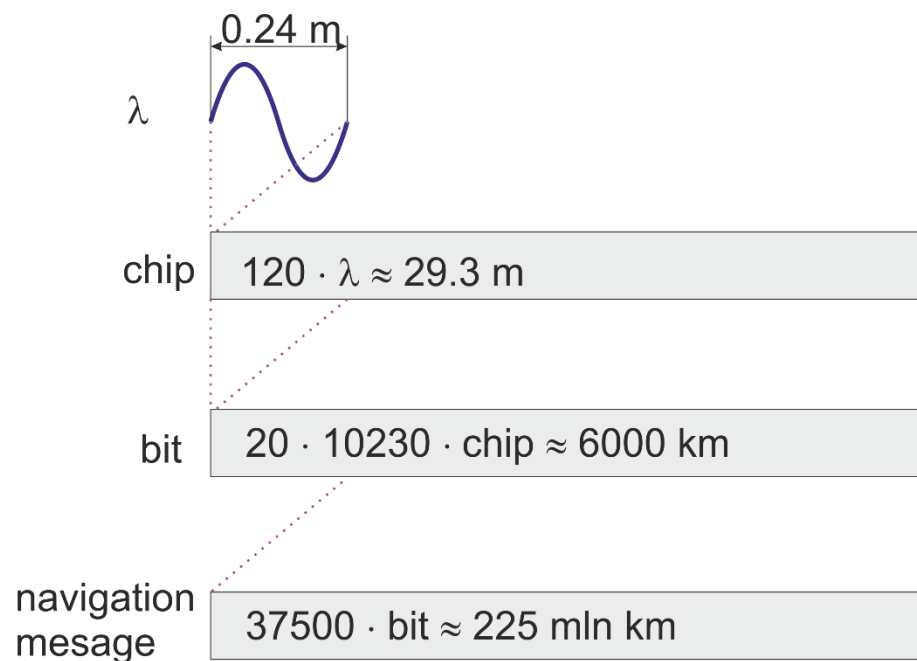
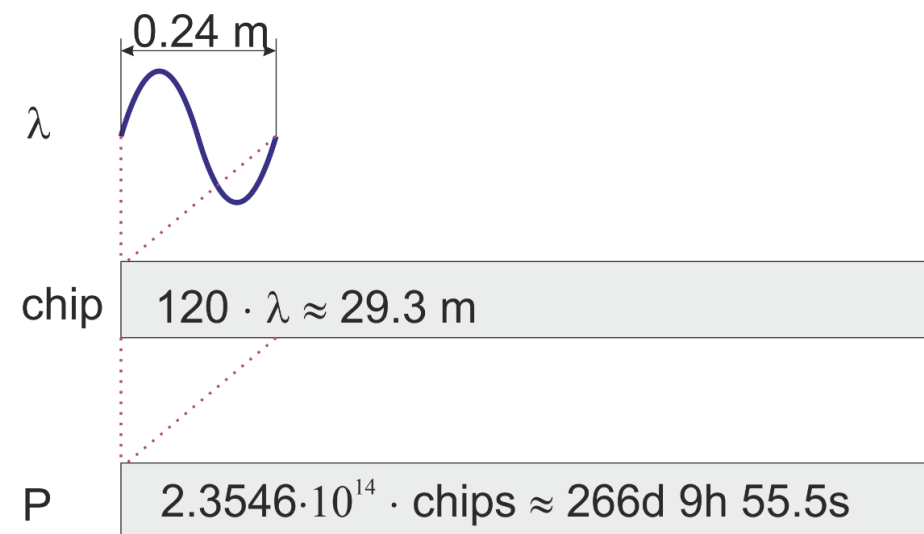
Struktura sygnału - L1 C/A



Struktura sygnału - L1P



Struktura sygnału - L2P

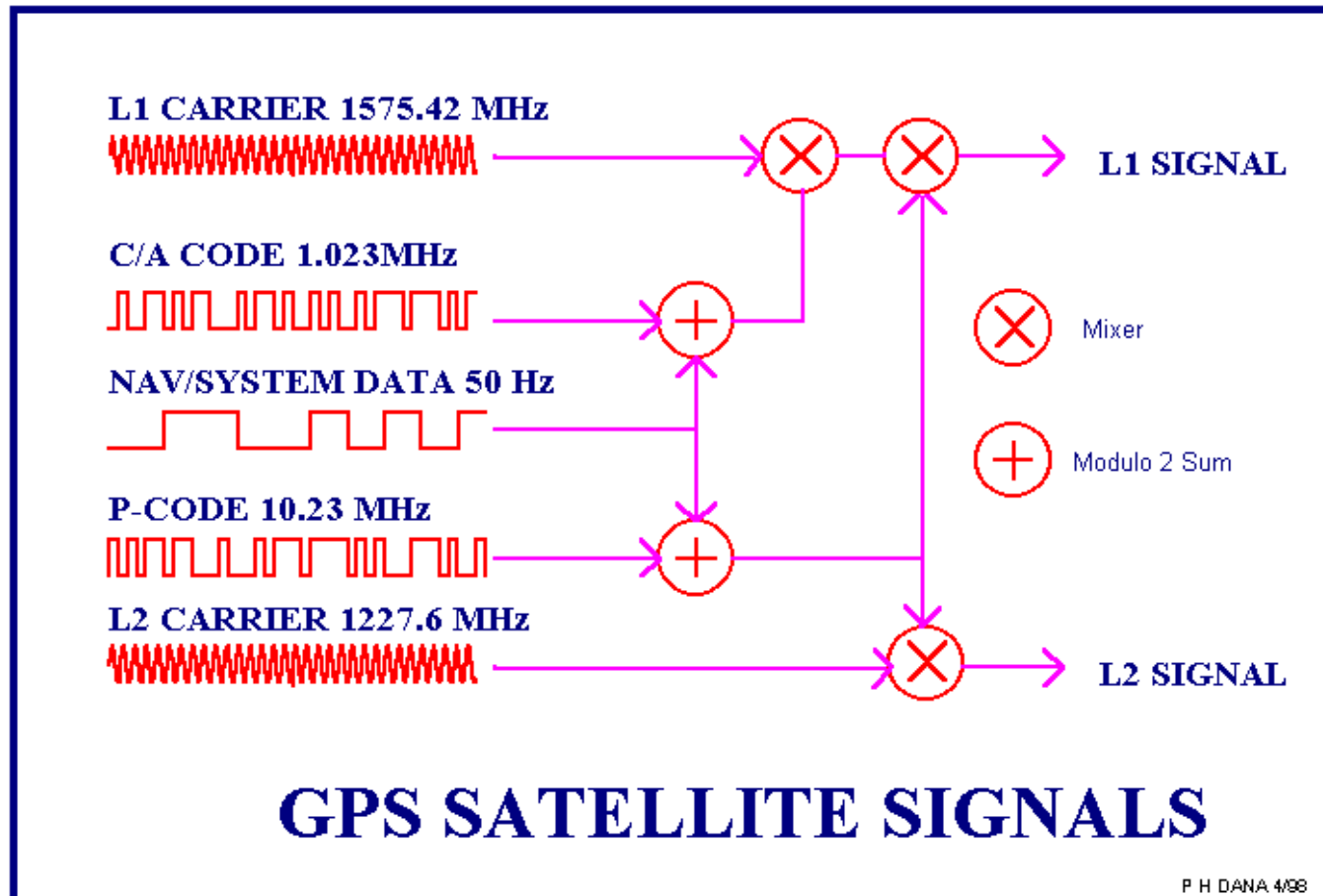


Struktura sygnału

Sygnały wysyłane przez satelity GPS mają postać fali nośnej kodowanej fazowo (BPSK - Binary Phase Shift Keying) sygnałami:

- informacyjnym (navigation message) z częstotliwością 50 Hz
50 b/s (bits per second)
- Pseudolosowym kodem C/A z częstotliwością 1.023 MHz
1.023 Mb/s
- Pseudolosowym kodem P z częstotliwością 10.23 MHz
10.23 Mb/s
- Pseudolosowym kodem Y z częstotliwością 0.5 Hz
dodatkowa ochrona kodu P $\Rightarrow$ P(Y), anti-spoofing (przeciw fałszowaniu sygnału)

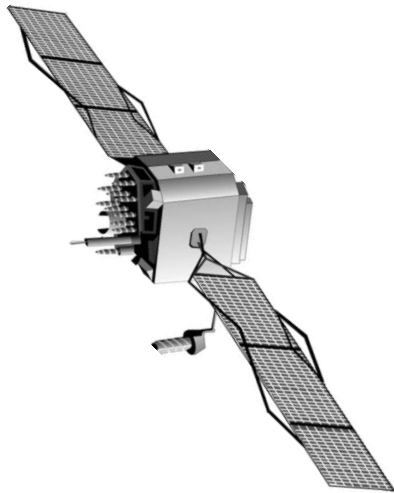
Sygnal satelitarny (signals in space)



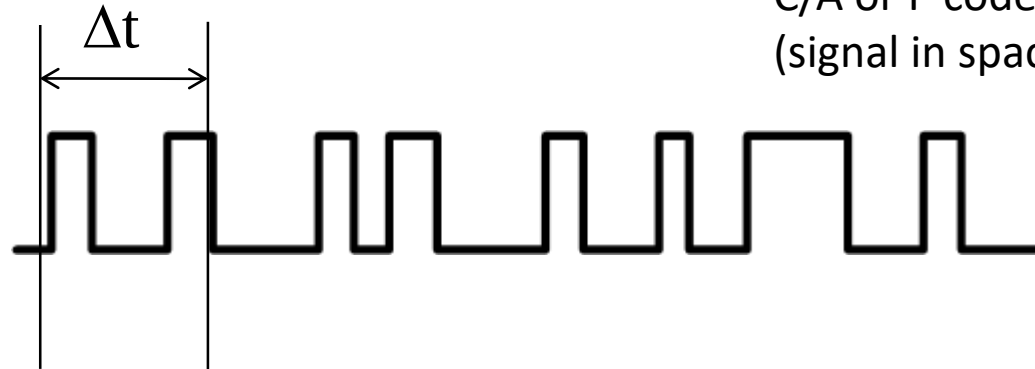
Sygnały transmitowane przez satelity – C/A, P

- Kody pseudolosowe są generowane jako kody Golda
- Każdy satelita ma przypisany własny odcinek kodu pseudolosowego (C/A, P), który umożliwia jego identyfikację
- Odcinek kodu przypisany danemu SV nie jest skorelowany z żadnym innym odcinkiem kodu
- Współczynnik autokorelacji danego odcinka kodu, przypisanego satelicie posiada tylko jedno maksimum
- Czas propagacji sygnału Δt jest mierzony poprzez przesuwanie repliki kodu generowanemu w odbiorniku do momentu osiągnięcia maksymalnego współczynnika korelacji z kodem zawartym w sygnale satelitarnym.
- Czas propagacji sygnału satelitarnego z satelity do odbiornika wynosi od 60 do 81 ms

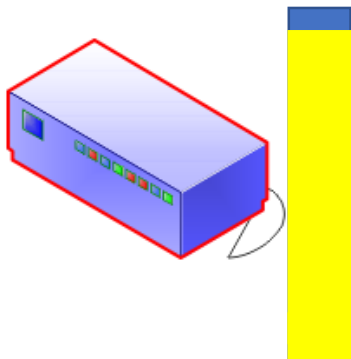
Pomiar czasu propagacji Δt – metoda kodowa



C/A or P code
(signal in space)



C/A or P code
(replica in a receiver)



Correlation
coefficient

C/A code

- Kod publiczny C/A c - a coarse acquisition; transmitowany tylko na L1
- Każdy satelita posiada różny kod (różny odcinek kodu Golda)
- Bit kodu nazywany jest chip ($1 \mu\text{s}$ - 300 m)
- Długość kodu C/A przypisanego jednemu satelicie to 1023 bits
- Szybkość transmisji 1.023 Mbit / s
- Powtarzalność odcinka kodu danego satelity – 1ms co umożliwia szybką synchronizację kodu generowanego w odbiorniku z kodem zawartym w transmitowanym sygnale satelitarnym
- 20 odcinków kodu to 1 bit depeszy nawigacyjnej
- Pomiar czasu dotarcia sygnału do odbiornika z rozdzielczością 1% chipa, co oznacza: 0,01 μs przy prędkości fali 300000 km/s – umożliwia dokładność pomiaru do 3m
- SPS – standard positioning serwis

Kod P

- P - precise – precyzyjny, kod dokładny, dostępny jedynie dla autoryzowanych użytkowników
- Nadawany na obu kanałach L1, L2
- Modulowany w odcinkach o długości jednego tygodnia, części całego trwającej 267 dni sekwencji ciągu pseudolosowego kodu Golda
- Każdemu SV ma przypisany jednotygodniowy segment tego kodu
- Wznowienie powtarzania odcinka ciągu następuje w sobotę po północy.
- Szybkość transmisji - $10.23 \text{ MHz} (10 * C / A)$
- Zwiększenie dziesięciokrotnie dokładności wyznaczania pseudoodległości (0.30 m)

Kod Y

- Nadawany w sytuacjach szczególnych – podczas włączenia systemu zapobiegania próbom zakłóceń pracy urządzeń GPS – anti-spoofing
- W takich sytuacjach kod P jest modulowany kodem Y (0.5 Hz) w celu zapewnienia usługi PPS (Precise Positioning Service)

Podsumowanie

Założenia systemu działają w odniesieniu do:

- Dokładność pozycji- 10m,
- Dokładność określania prędkości 0.1 m/s,
- Dokładność czasu 1 μ s.

Zostały spełnione

Depesza nawigacyjna

- Dostępna na L1 oraz L2
- Dane zawierają informacje wymagane do określenia:
 - Czasu satelity w momencie transmisji
 - Lokalizacji satelity
 - Statusu satelity (health)
 - Poprawki na wskazania zegara satelity
 - Opóźnienia jonosferycznego
 - Transfer czasu GPS do Coordinated Universal Time zgodnie z the U.S. Naval Observatory [UTC(USNO)]
 - Status konstelacji (almanach)
- Szybkość transmisji 50 b/s
- Składa się z 25 ramek po 1500 bitów każda
- Każda ramka podzielona jest na 5 subframes po 300 bitów każda, 10 słów 30 bitowych
- Odbiór jednej ramki trwa 30 s, całej depeszy (25 ramek) 12.5 minut

Depesza nawigacyjna

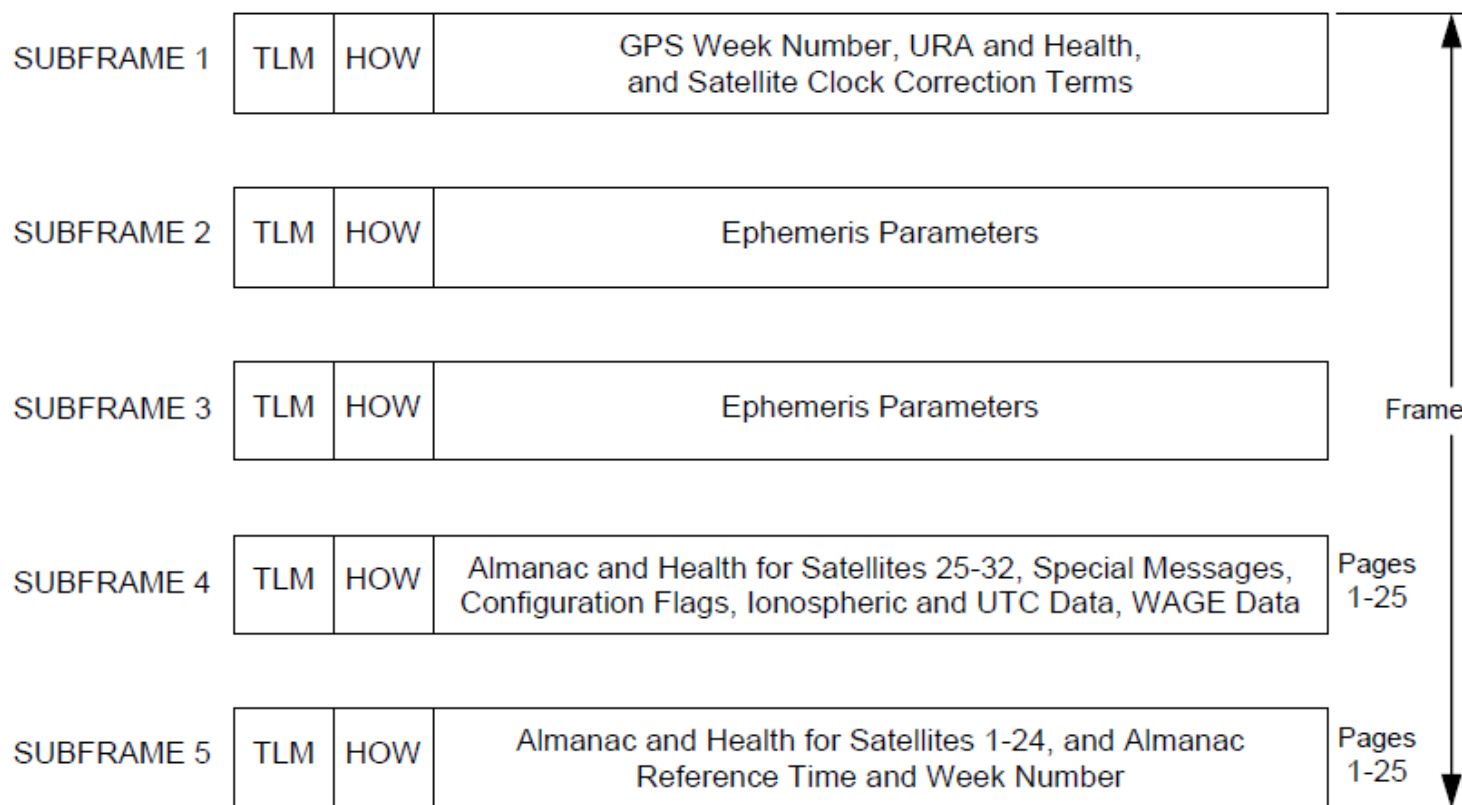
- Podramki 1,2 and 3 powtarzają te same 900 bitó danych we wszystkich 25 ramkach, co umożliwia odbiór krytycznych danych w ciągu 30 sekund
- Krytyczne dane są aktualizowane co 1-2 godzin
- Cała depesza nawigacyjna aktualizowana jest co 4 godziny

Pojedyncza ramka składa się:

- 1,2,3 podramki – parametry orbity danego satelity (dane krytyczne)
- 4,5 podramki – dane do obliczenia
 - Czasu UTC
 - Poprawek na opóźnienie jonosferyczne
 - Almanach konstelacji satelitów GPS

NAV Message Przegląd treści i formatu

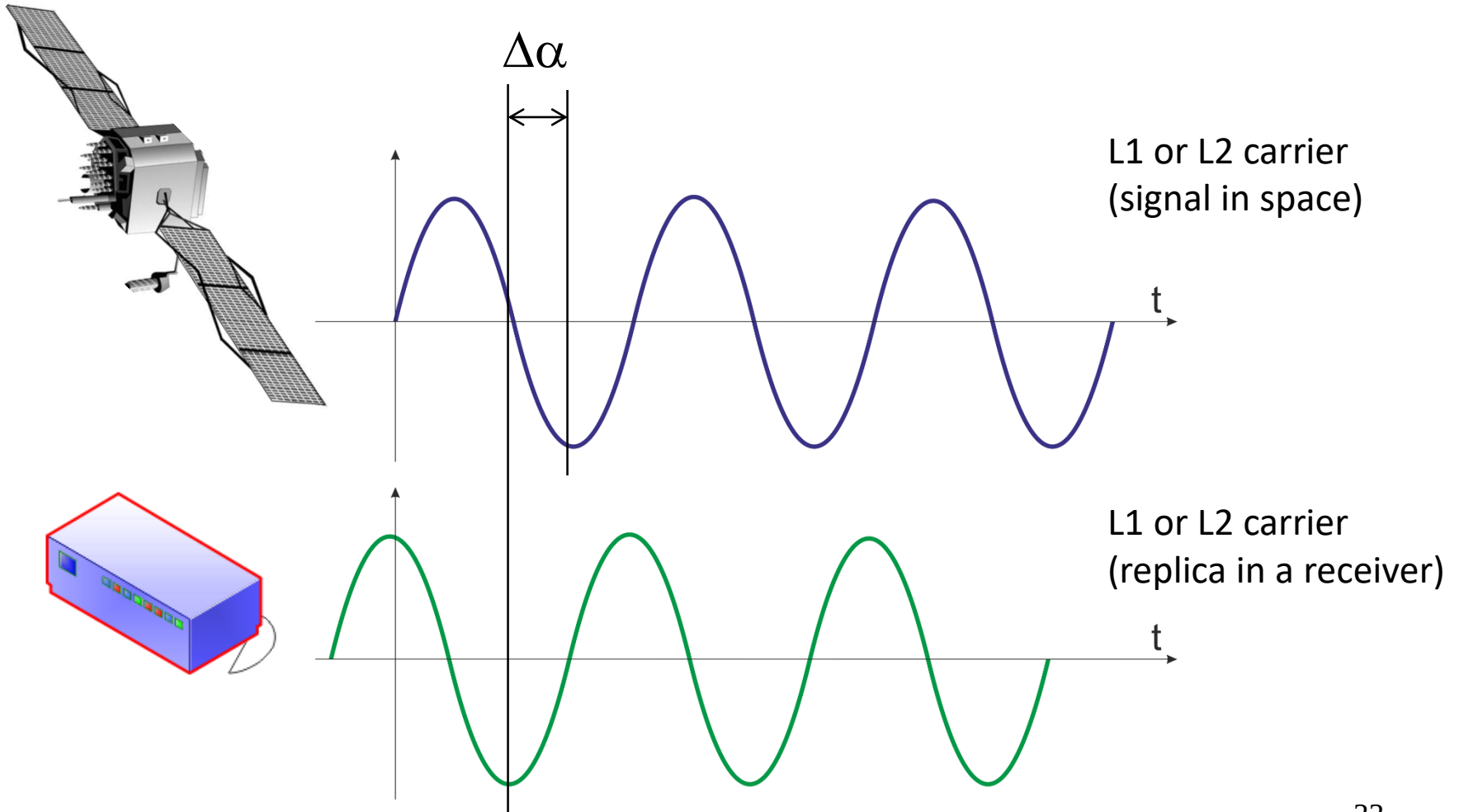
Significant Subframe Contents



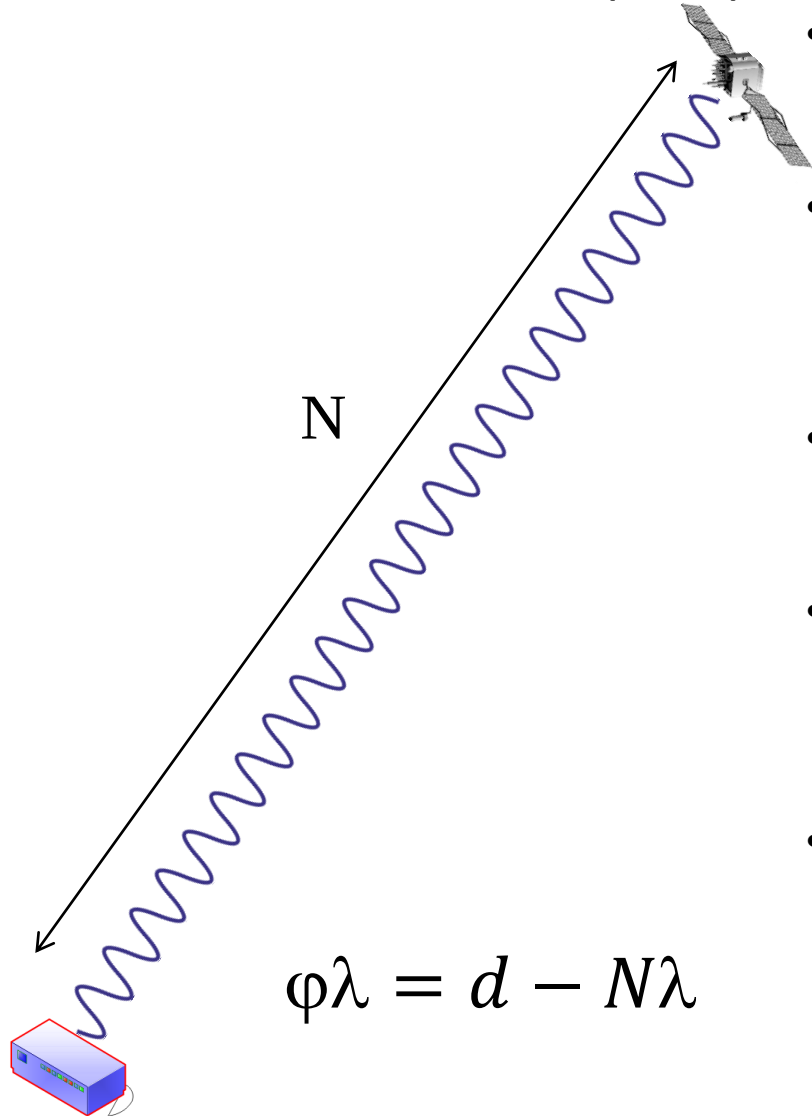
Depesza Nawigacyjna

- Podramka zaczyna się od słów
 - TLM – telemetric information – które umożliwia identyfikację SV oraz synchronizację kodów pseudolosowych generowanych w odbiornikach z zawartymi w sygnale satelitarnym (z danego satelity)
 - HOW – hand over word – które umożliwia precyzyjne dostrojenie sygnałów generowanych w odbiornikach z satelitarnymi, rozpoznanie kodów pseudolosowych oraz przejście do odbioru kodu P w przypadku odbiorników autoryzowanych
- Kody pseudolosowe są restartowane o północy w soboty każdego tygodnia.

Pomiar czasu propagacji $\Delta\alpha$ – metoda fazowa



Pomiar czasu propagacji $\Delta\alpha$ – metoda fazowa



- N – całkowita liczba długości fali elektromagnetycznej λ (nieoznaczoność pomiaru fazy)
- Ta liczba może być interpretowana jako różnica między wartością początkową fazy zintegrowanej a odległością od danego satelity. Nieoznaczoność pomiaru fazy jest inna dla każdego satelity
- Nieoznaczoność N pozostaje stała w trakcie pomiarów, jeśli proces śledzenia sygnału satelitarne nie zostanie zakłócony
- Wystąpienie takiego zakłócenia (np.. multipath) powoduje nieciągłość fazy (cycle slip), tj. Skokową zmianę zarejestrowanej fazy o całkowitą liczbę cykli (długości fal)
- Wykrywanie i korygowanie nieciągłości fazy ma kluczowe znaczenie dla precyzyjnych pomiarów geodezyjnych z wykorzystaniem obserwacji fazowych, w szczególności technik RTK (real time kinematic)

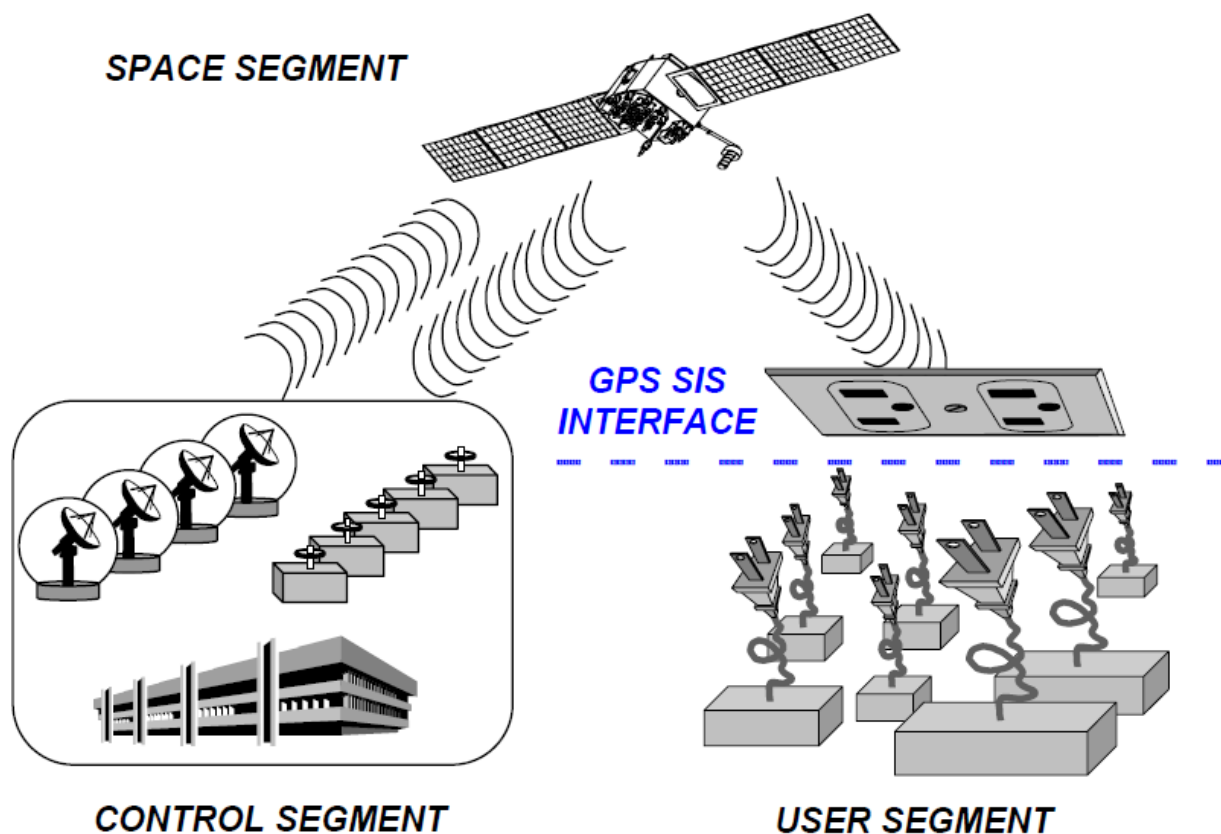
Positioning services (serwisy pozycjonowania)

- SPS – Standard Positioning Service – standardowa dokładność, dostępna dla wszystkich użytkowników. Budżet błędów składa się z:
 - SA – selective availability – intencjonalne wprowadzane zakłócenia, przez właściciela systemu w celu zdegradowania sygnału satelitarnego. Procedura zakończona w 2000
 - Błędu zegara satelity
 - Opóźnienia jonosferycznego (wartość określona przy pomocy modelu jonosfery)
 - Opóźnienia troposferycznego
 - Szumów odbiornika i jego rozdzielczość (dokładność)
 - wielotorowości
 - pozostałych
- PPS – Precise Positioning Service – większa dokładność, dostępny dla autoryzowanych użytkowników. Budżet błędów składa się z:
 - Błędu zegara satelity
 - Opóźnienia jonosferycznego (wartość określona poprzez zjawisko dyspersji)
 - Opóźnienia troposferycznego
 - Szumów odbiornika i jego rozdzielczość (dokładność)
 - wielotorowości
 - pozostałych

Dokładność GPS

Obecnie dokładność systemu GPS opisana jest przy pomocy parametrów sygnału satelitarne (signal in space SiS). Dlatego z perspektywy organizacyjnej system GPS ma tylko dwa segmenty:

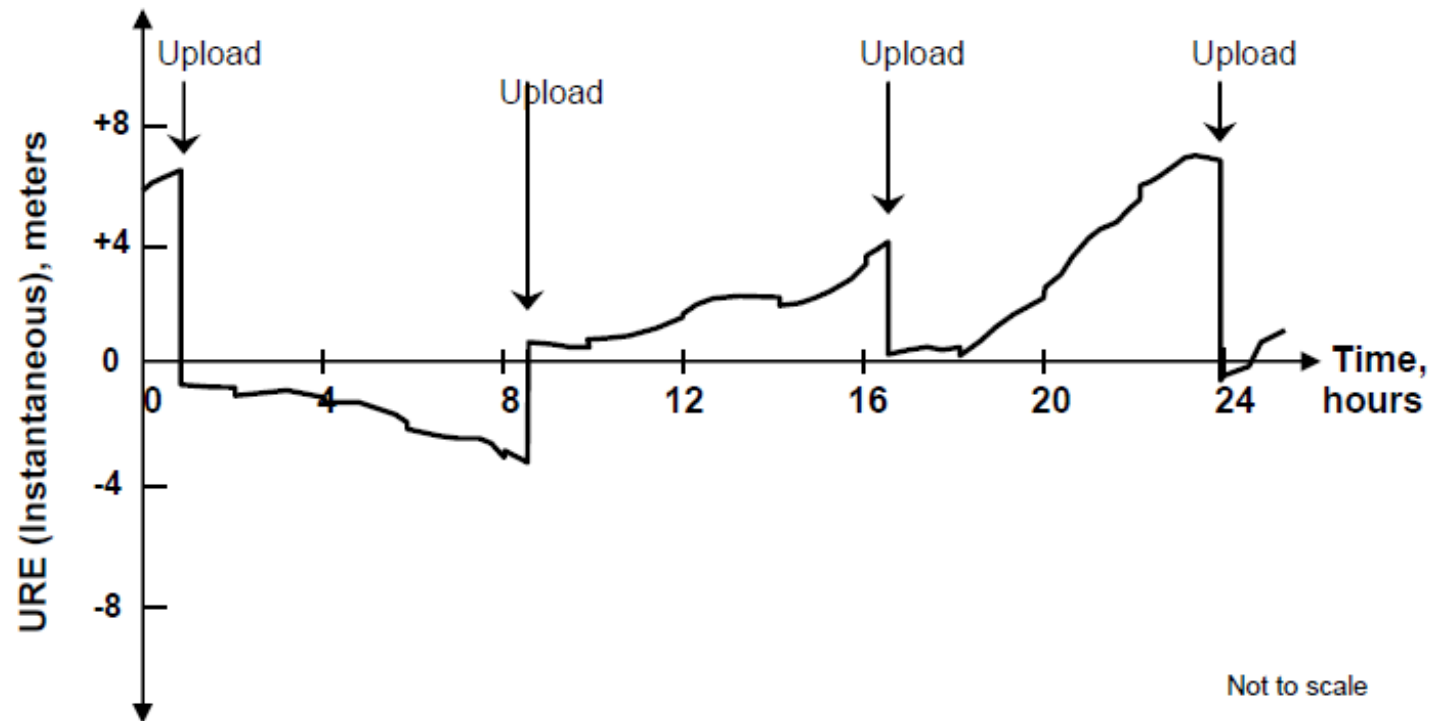
- kosmiczny
- kontrolny



Budżet UERE sygnału L1 pojedynczej częstotliwości z kodem C/A

Segment	Error Source	UERE Contribution (95%) (meters)		
		Zero AOD	Max. AOD in Normal Operation	14.5 Day AOD
Space	Clock Stability	0.0	8.9	257
	Group Delay Stability	3.1	3.1	3.1
	Diff'l Group Delay Stability	0.0	0.0	0.0
	Satellite Acceleration Uncertainty	0.0	2.0	204
	Other Space Segment Errors	1.0	1.0	1.0
Control	Clock/Ephemeris Estimation	2.0	2.0	2.0
	Clock/Ephemeris Prediction	0.0	6.7	206
	Clock/Ephemeris Curve Fit	0.8	0.8	1.2
	Iono Delay Model Terms	9.8-19.6	9.8-19.6	9.8-19.6
	Group Delay Time Correction	4.5	4.5	4.5
	Other Control Segment Errors	1.0	1.0	1.0
User*	Ionospheric Delay Compensation	N/A	N/A	N/A
	Tropospheric Delay Compensation	3.9	3.9	3.9
	Receiver Noise and Resolution	2.9	2.9	2.9
	Multipath	2.4	2.4	2.4
	Other User Segment Errors	1.0	1.0	1.0
95% System UERE (SPS)		12.7-21.2	17.0-24.1	388
* For illustration only, actual SPS receiver performance varies significantly -- see Table B.2-1				

Chwilowy SPS SIS URE



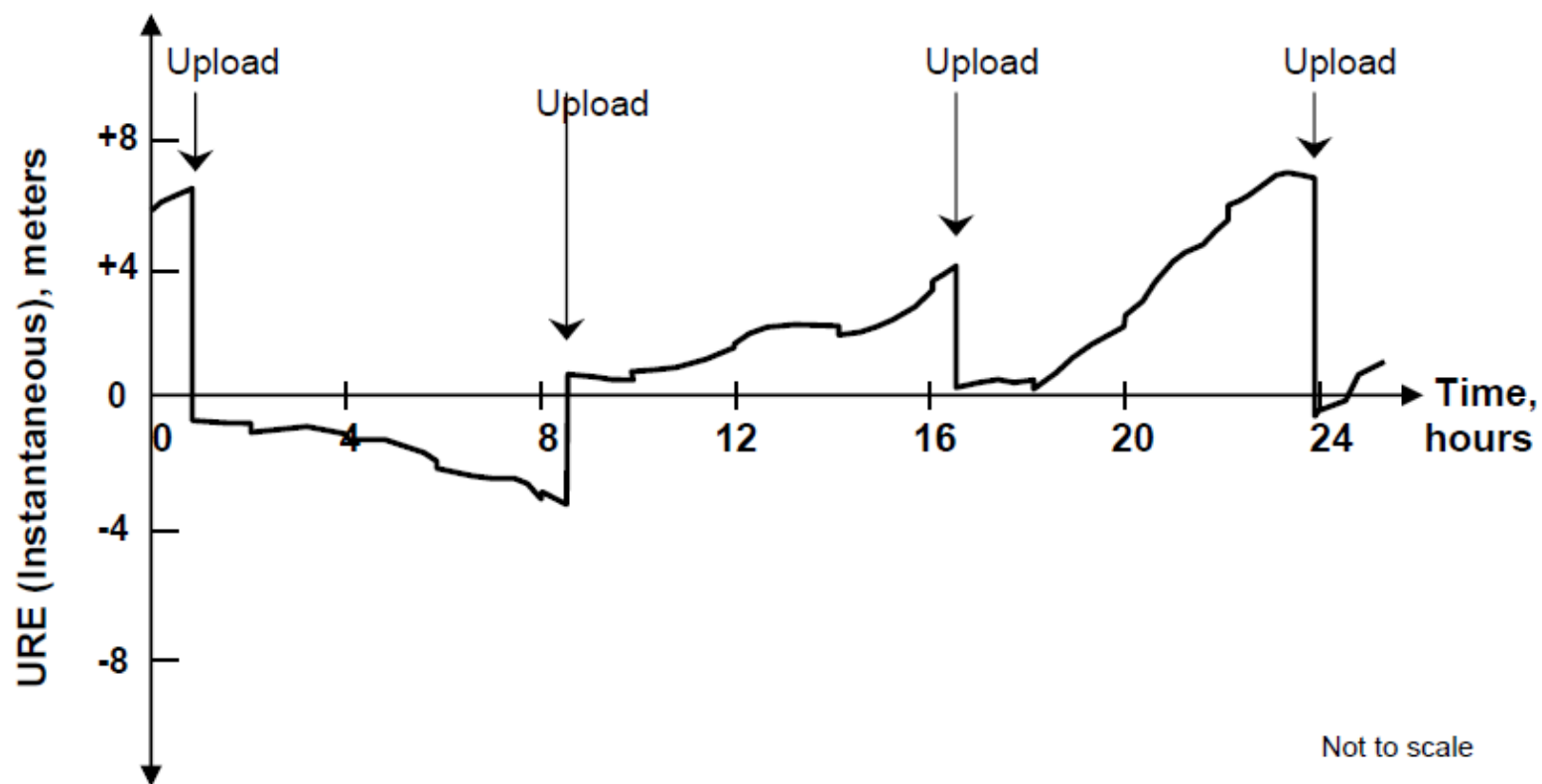
Budżet UERE kodu P(Y) z wykorzystaniem obu częstotliwości

Segment	Error Source	UERE Contribution (95%) w/o WAGE (meters)		
		Zero AOD	Max. AOD in Normal Operation	14.5 Day AOD
Space	Clock Stability	0.0	8.9	257
	Group Delay Stability	0.0	0.6	0.6
	Diff'l Group Delay Stability	0.0	2.0	2.0
	Satellite Acceleration Uncertainty	0.0	2.0	204
	Other Space Segment Errors	1.0	1.0	1.0
Control	Clock/Ephemeris Estimation	2.0	2.0	2.0
	Clock/Ephemeris Prediction	0.0	6.7	206
	Clock/Ephemeris Curve Fit	0.8	0.8	1.2
	Iono Delay Model Terms	N/A	N/A	N/A
	Group Delay Time Correction	N/A	N/A	N/A
	Other Control Segment Errors	1.0	1.0	1.0
User*	Ionospheric Delay Compensation	4.5	4.5	4.5
	Tropospheric Delay Compensation	3.9	3.9	3.9
	Receiver Noise and Resolution	2.9	2.9	2.9
	Multipath	2.4	2.4	2.4
	Other User Segment Errors	1.0	1.0	1.0
95% System UERE (PPS)		7.5	13.8	388
* For illustration only, actual PPS receiver performance varies significantly -- see Table B.2-1				

Budżet UERE sygnału L1 pojedynczej częstotliwości z kodem P(Y)

Segment	Error Source	UERE Contribution (95%) w/o WAGE (meters)		
		Zero AOD	Max. AOD in Normal Operation	14.5 Day AOD
Space	Clock Stability	0.0	8.9	257
	Group Delay Stability	1.6	1.6	1.6
	Diff'l Group Delay Stability	0.0	0.0	0.0
	Satellite Acceleration Uncertainty	0.0	2.0	204
	Other Space Segment Errors	1.0	1.0	1.0
Control	Clock/Ephemeris Estimation	2.0	2.0	2.0
	Clock/Ephemeris Prediction	0.0	6.7	206
	Clock/Ephemeris Curve Fit	0.8	0.8	1.2
	Ionospheric Delay Model Terms	9.8-19.6	9.8-19.6	9.8-19.6
	Group Delay Time Correction	4.5	4.5	4.5
	Other Control Segment Errors	1.0	1.0	1.0
User*	Ionospheric Delay Compensation	N/A	N/A	N/A
	Tropospheric Delay Compensation	3.9	3.9	3.9
	Receiver Noise and Resolution	2.9	2.9	2.9
	Multipath	2.4	2.4	2.4
	Other User Segment Errors	1.0	1.0	1.0
95% System UERE (PPS)		12.5-21.1	16.8-23.9	388
* For illustration only, actual PPS receiver performance varies significantly -- see Table B.2-1				

Chwilowy PPS SIS URE



Podstawowe formuły dla obliczenia dokładności PVT

W celu obliczenia dokładności PVT (Position - pozycji, Velocity - predkości, oraz Time - czasu) można wykorzystać poniższe formuły:

- Dokładność = UERE x DOP
 - UERE – user equivalent range error
- UHNE = User Horizontal Navigation Error (rms)
 - $UHNE = UERE \times HDOP$
- UVNE = User Vertical Navigation Error (rms)
 - $UVNE = UERE \times VDOP$
- UHVE = User Horizontal Velocity Error (rms)
 - $UHVE = URRE \times HDOP$
- UVVE = User Vertical Velocity Error (rms)
 - $UVVE = URRE \times VDOP$
- UTE = User Time Error (rms)
 - $UTE = UERE \times TDOP / c$

URRE – User Range Rate Error

SPS PS Global-Average Position Accuracy Standards

- 13 m 95% Horizontal Error
- 22 m 95% Vertical Error

The end