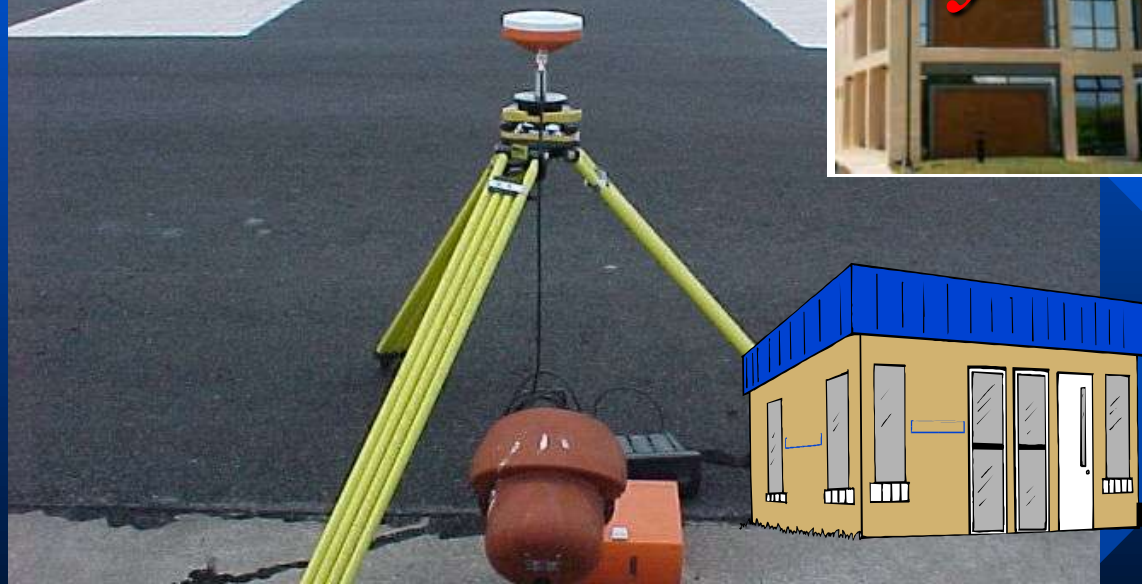
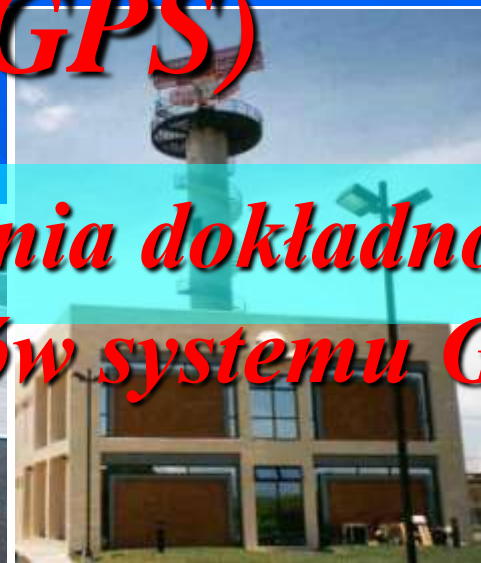
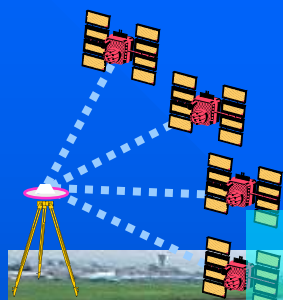


Global Positioning System (GPS)

Ograniczenia dokładności odbiorników systemu GPS



Hard Surface

Błędy pozycji

- **Niezależne od zasady działania systemu**
- **Metodyczne wynikające z zasady działania systemu**
- **Pomiaru powstające w urządzeniach odbiorczych**
- **Ograniczonego dostępu, celowo wprowadzane przez właściciela systemu**

Błędy niezależne od działania systemu

- Wynikają z faktu propagacji w ośrodku materialnym, w którym zmienia się prędkość fali, częstotliwość i polaryzacja sygnału.
- Przyczyny błędu:
 - Refrakcja (opóźnienie) jonosferyczne,
 - Refrakcja (opóźnienie) troposferyczne,
 - Efekty relatywistyczne,
 - Wielotorowość i zanik sygnału ze względu na przeszkody terenowe.

Błędy wynikające z zasad działania systemu

- Błędy efemeryd (orbitalne),
- Błędy określenia czasu (zegarów) na satelitach,
- Błędy geometryczne wzajemnego ustawienia satelitów (DOP)

Błędy orbit satelitarnych (perturbacje satelitarne):

- pole grawitacyjne Ziemi,
- opór atmosfery,
- grawitacyjne oddziaływanie Słońca i Księżyca oraz innych ciał niebieskich,
- ciśnienie promieniowania słonecznego,
- pływy skorupy ziemskiej i pływy oceaniczne,
- oddziaływanie sił elektromagnetycznych,
- efekty relatywistyczne.

Zakłócenia propagacyjne

- refrakcja jonosferyczna i troposferyczna,
- szумы atmosfery i kosmiczne,
- interferencja fal wtórnych,

Aparatura odbiorcza

- niestabilność wzorców częstotliwości,
- szумы własne odbiornika,
- wariacje centrum fazowego anten GPS.

Błędy i nieznanomość modeli zjawisk geofizycznych krótko i długookresowych

- **pływy skorupy ziemskiej,**
- **pływy oceaniczne,**
- **pływy atmosferyczne,**
- **model ruchu płyt kontynentalnych.**

Intencjonalne ograniczenia dokładności i dostępu

- **AS, Anti-Spoofing, system zapobiegania intencjonalnym próbom zakłócenia pracy systemu, SA, Selective Availability, system ograniczania dostępu.**

Błędy systematyczne obserwacji fazowych

- nieoznaczoność fazy,
- nieciągłości fazy.

Offset zegara satelitarnego dt

- **Offset zegara satelitarnego jest spowodowany niedokładną synchronizacją wzorców satelitarnych do czasu GPS.**
- **Poprawki zegarów satelitów GPS są wyznaczone przez segment kontrolny GPS na podstawie opracowania danych pochodzących ze stacji śledzących.**
- **Współczynniki wielomianu aproksymującego są retransmitowane przez satelity GPS do użytkowników w depeszy nawigacyjnej.**
- **Parametry te umożliwiają obliczenie wartości poprawki zegara satelitarnego z dokładnością do pojedynczych metrów.**

Offset zegara satelitarnego dt

- Poprawka jest obliczana ze wzoru:

$$dt = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

gdzie:

a_0, a_1, a_2 - współczynniki wielomianu transmitowane w depeszy satelitarnej.

t - moment , na który wyznaczamy poprawkę,

t_0 - epoka poprawki.

- W obliczeniach poprawki zegara satelity uwzględniane są również efekty relatywistyczne wynikające z ruchu wzorca częstotliwości w polu grawitacyjnym Ziemi.
- Orbity satelitów GPS charakteryzują się niewielką ekscentrycznością, mimo to zmiany potencjału pola grawitacyjnego mają znaczenie dla wyznaczania poprawki zegara.
- Efekty relatywistyczne mogą osiągać wielkość rzędu kilku metrów.

Offset zegara satelitarnego dt

- Wynikiem ruchu satelity w zmiennym polu grawitacyjnym jest zmiana wskazań wzorca, będąca funkcją ekscentryczności jak i współrzędnych satelity.
- Poprawka ta obliczana jest ze wzoru:

$$dt = Fe\sqrt{a} \sin E$$

gdzie:

F – stała systemowa $4.442809305(10)^{-10}$ [s m^{-1/2}]

e – mimośród orbity satelity

a – promień dużej półosi orbity

E – anomalia mimośrodowa

Offset zegara odbiornika dT

- **Offset skali czasu odbiornika dT wynika z braku synchronizacji zegara odbiornika do skali czasu GPS.**
- **Jest on zwykle traktowany jako dodatkowa niewiadoma i w procesie obliczeniowym prawie całkowicie usuwany.**
- **Fizyczna realizacja skali czasu odbiornika charakteryzuje się często dużym błędem, dochodzącym niekiedy do kilkudziesięciu milisekund.**

Opóźnienie troposferyczne

- Opóźnienie troposferyczne wynika ze zmian prędkości sygnału przy przejściu przez troposferę - dolną warstwę atmosfery rozciągającą się od powierzchni Ziemi do wysokości około 10 km.
- Sygnały radiowe GPS, tak jak i inne sygnały radiowe o częstotliwościach poniżej 30 GHz, nie podlegają zjawisku dyspersji przy przejściu przez troposferę co oznacza, iż wielkość opóźnienia jest niezależna od częstotliwości fali radiowej.
- Troposfera powoduje opóźnienie sygnału i dlatego wyznaczona poprawka troposferyczna jest odejmowana od rejestrowanej pseudoodległości lub fazy.

Opóźnienie troposferyczne

- Znaczna część całkowitego opóźnienia, około 90%, jest spowodowana poprzez oddziaływanie fali elektromagnetycznej z suchym powietrzem, podczas gdy pozostałe 10% przez oddziaływanie z parą wodną.
- Część sucha opóźnienia może być oszacowana z błędem od 2 - 5 % za pomocą odpowiedniego modelu atmosfery.
- Część mokra opóźnienia troposferycznego może być wyznaczana przy pomocy radiometrów mikrofalowych WVR (Water Vapor Radiometer).
- Główną przeszkodą ich praktycznego wykorzystania jest ich wysoka cena oraz złożoność.
- Dlatego zazwyczaj błąd powodowany przez część mokrą atmosfery jest w praktyce pomijany.
- Modele pozwalające obliczyć wielkość opóźnienia troposferycznego uwzględniają wysokość satelity nad horyzontem, jak również od parametrów meteorologicznych w miejscu obserwacji - temperaturę, ciśnienie i wilgotność.
- W praktyce często zamiast wyników aktualnych pomiarów meteorologicznych używa się parametrów standardowych.

Błąd jonosferyczny

- **Zmienność opóźnienia jonosferycznego jest jednym z najpoważniejszych obiektywnych źródeł błędu wyznaczania pozycji.**
- **Duża zmienność warunków jonosferycznych, zarówno dobowa jak i długookresowa, powoduje, iż model opóźnienia jonosferycznego transmitowany przez satelitę pozwala na redukcję odpowiedniego błędu co najwyżej w 50 procentach.**
- **Dokładniejszą wartość opóźnienia jonosferycznego obliczyć można w oparciu o rezultaty pomiarów wykonywanych jednocześnie na częstotliwościach L1 i L2.**
- **Wymaga to użycia odbiornika dwuczęstotliwościowego.**

Błąd jonosferyczny

- **Efekt jonosferyczny wynika z wpływu jonosfery, górnej warstwy atmosfery rozciągającej się od wysokości 50 - 1000 km nad powierzchnią Ziemi. Zjonizowane gazy w jonosferze, powstałe w wyniku ultrafioletowego promieniowania Słońca i oddziaływania wiatru słonecznego, powodują zmianę prędkości fal elektromagnetycznych.**
- **Ta zmiana prędkości jest zależna, przeciwnie niż w przypadku troposfery od częstotliwości fali elektromagnetycznej.**
- **Zjawisko zależności prędkości fali od częstotliwości jest nazywane dyspersją.**
- **W jonosferze, w przypadku fal elektromagnetycznych o częstotliwościach powyżej 30 MHz, czoło fali ulega opóźnieniu, podczas gdy faza fali przyspieszeniu.**
- **Konsekwencją tego zjawiska są zmiany rejestrowanej fazy i pseudoodległości. Efekty przyspieszenia fazy i opóźnienia czoła fali mają w takim środowisku zbliżoną wielkość lecz przeciwny znak.**
- **Wielkość efektu jonosferycznego jest proporcjonalna do liczby swobodnych elektronów TEC (ang. Total Electron Content), mieszczących się w jednostkowym prostopadłościanie od odbiornika do satelity.**

Błąd jonosferyczny

- **TEC jest funkcją wielu zmiennych czynników:**
 - pory dnia,
 - aktywności słonecznej,
 - położenia geograficznego
 - wysokości zenitalnej satelity.
- **Efekt jonosferyczny przybiera największą wartość w strefie równika magnetycznego. Obszar ten nie obejmuje Polski.**
- **Typowa wielkość efektu jonosferycznego dla satelity GPS w zenicie osiąga 5 m lecz może dochodzić nawet do 100m w okresach wzmożonej aktywności słonecznej lub burz jonosferycznych.**
- **Wielkość efektu jonosferycznego jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu częstotliwości fali. Taka zależność umożliwia wykorzystanie odbiorników dwuczęstotliwościowych do eliminacji opóźnienia poprzez porównanie pseudoodległości PL1 i PL2, zmierzonych odpowiednio w pasmach L1 i L2.**

Błąd jonosferyczny

- W przypadku obserwacji fazowych eliminacja wpływu jonosfery jest możliwa zarówno za pomocą odbiorników dwuczęstotliwościowych korzystających z kodu P jak i bezkodowych.
- W odbiornikach jednoczęstotliwościowych przybliżona poprawka obliczona jest za pomocą modelu, którego parametry transmitowane są przez satelitę.

Błąd orbitalny

- Błąd orbitalny, występujący w postaci niejawnej w odległości d pomiędzy antena satelity a anteną stacją odbiorczą, jest rezultatem dwóch czynników:
 - Po pierwsze, wyznaczenie i predykcja orbit satelitów przez segment kontrolny są obarczone błędem.
 - Po drugie, właściciel systemu wprowadza celową degradację informacji orbitalnej transmitowanej w depechy satelitarnej. Zniekształcenie informacji orbitalnej jest jednym z narzędzi polityki Ograniczonego Dostępu S.A.
- Błąd współrzędnych satelitów GPS, obliczonych z użyciem danych z efemerydy pokładowej może dochodzić do 50m.
- Wpływ błędu orbity jest znacząco redukowany w metodach różnicowych wyznaczania pozycji. Jednak przy większych odległościach pomiędzy punktami pomiarowymi - rzędu setek kilometrów - wpływ nie wyeliminowanych błędów orbitalnych zaczyna wzrastać.
- W przypadku precyzyjnych opracowań należy korzystać z efemeryd precyzyjnych, które są dostępne już po około 12 godzinach po zakończeniu obserwacji i są udostępniane przez różne placówki naukowe.

Nieoznaczoność fazy

- Nieoznaczoność pomiaru fazy N jest arbitralną liczbą całkowitą.
- Wielkość ta może być interpretowana jako różnica wielkości początkowej zintegrowanej fazy i odległości. Jest to wielkość różna dla każdego obserwowanego satelity.
- Nieoznaczoność N zachowuje stałą wartość podczas pomiarów, jeżeli nie nastąpi zaburzenie procesu śledzenia sygnału satelitarne.
- Wystąpienie takiego zaburzenia powoduje powstanie nieciągłości fazy (ang. Cycle Slip), czyli skokowej zmiany rejestrowanej fazy o całkowitą liczbę cykli.
- Wykrycie i poprawienie nieciągłości fazy jest krytyczne dla precyzyjnych pomiarów geodezyjnych z wykorzystaniem obserwacji fazowych, w tym szczególnie techniki RTK.

Błędy pomiarowe pseudoodległości i fazy

- Błędy pomiaru pseudoodległości są zależne od odbiornika i wahają się w przedziałach od 1 do 3m dla kodu C/A i od 10 do 30 cm dla kodu P.
- Błąd pomiaru fazy jest zazwyczaj nie większy niż kilka milimetrów.
- Wysoka dokładność pomiaru fazowego może być wykorzystana do filtrowania szumu pomiarowego pseudoodległości, jeżeli są dostępne oba rodzaje obserwacji.

Interferencja fal wtórnych

- Interferencja fal wtórnych, powstałych na skutek odbić (ang. multipath), powoduje zmianę rejestrowanej fazy i pseudoodległości.
- Wpływ interferencji fal wtórnych jest szczególnie groźny dla pomiaru pseudoodległości.
- Błąd powodowany tym zjawiskiem może osiągnąć w skrajnych przypadkach wielkość długości chipu kodu, czyli 293m dla kodu C/A i 29.3m dla kodu P.
- Teoretyczna wielkość błędu fazy spowodowanego interferencją nie przekracza pojedynczej długości fali, jednak już wielkości centymetrowe mogą całkowicie uniemożliwić wyznaczenie nieoznaczoności.
- W takim przypadku nie otrzymamy żadnego rozwiązania.
- Skonstruowanie anten i układów elektronicznych które byłyby odporne na interferencję jest obecnie jednym z głównych problemów stojących przed konstruktorami sprzętu GPS.

Zmienność i niejednoznaczność centrów fazowych anten GPS

- Odpowiednie poprawki uzyskuje się podczas procedur kalibracyjnych, a następnie po sprawdzeniu wprowadza się do opracowanych wyników pomiaru.
- Złożoność problemu ukazała się w całej okazałości, gdy przeprowadzono i opracowano precyzyjne pomiary GPS na długich cięciwach odbiornikami różnych producentów.
- W skrajnych wypadkach, stosując anteny różnych typów na końcach mierzonego wektora o długości kilku tysięcy kilometrów możemy się spodziewać wystąpienia błędu systematycznego rzędu 10 cm.

Zmienność i niejednoznaczność centrów fazowych anten GPS

- Okazało się, że wszystkie anteny GPS wykazują zmienność położenia centrum fazowego w zależności od kierunku z jakiego dociera do nich sygnał satelitarny, czyli od jego azymutu i wysokości.
- Wykazano również, że położenie centrum fazowego przemieszcza się różnie dla częstotliwości L1 i L2 tej samej anteny.
- Dla najlepszych anten wartości przemieszczenia pionowego są rzędu 11 mm dla L1 i 8 mm dla L2.
- Poziome przemieszczenia są na poziomie 1 mm i można je pominąć.
- Obecnie większość dobrych programów służących do opracowania obserwacji geodezyjnych zawiera wbudowane modele powierzchni stałej fazy dla anten różnych producentów.

Parametry charakteryzujące błąd pozycji

Parametrami używanymi przy charakteryzowaniu błędu pozycji wyznaczonej przez odbiornik są:

- **SEP (Spherical Error Probable)** - 50% pozycji wyznaczanych trójwymiarowo znajduje się w sferze o promieniu SEP,
- **CEP (Circular Error Probable)** - 50% pozycji wyznaczanych dwuwymiarowo znajduje się wewnątrz okręgu o promieniu CEP.

Parametry charakteryzujące błąd pozycji

Ocena przewidywanej dokładności dokonywana jest zazwyczaj poprzez znajomość:

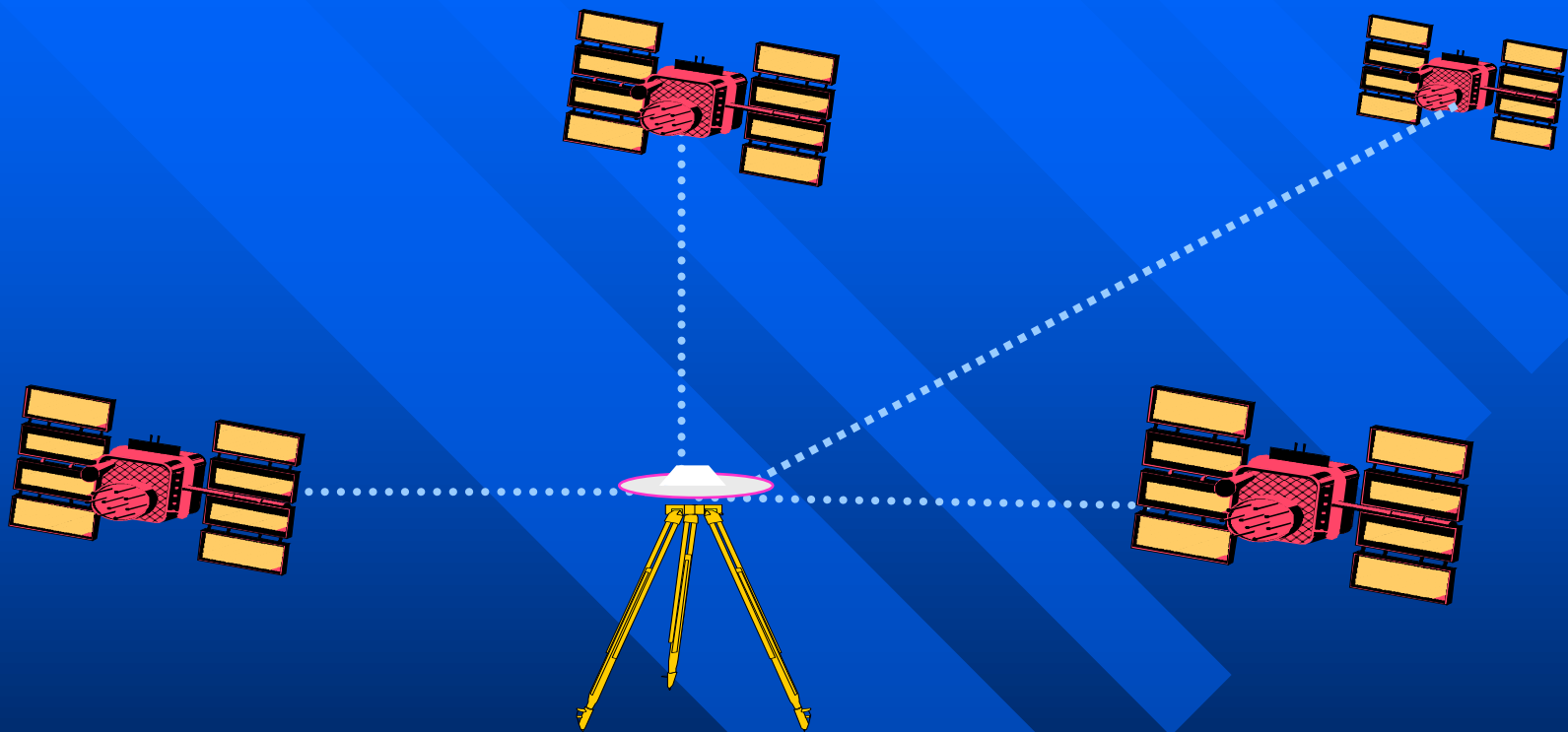
- **UERE (User Estimate Range Error)**- estymowane odchylenie standardowe pomiaru odległości satelita-odbiornik, parametr ten jest transmitowany przez satelitę,
- **DOP** - współczynników wiążących błąd pomiaru odległości do satelity z błędem wyznaczenia pozycji, wielkości DOP są pochodną konfiguracji geometrycznej układu satelity-odbiornik.

Parametry charakteryzujące błąd pozycji

Spośród współczynników DOP wyróżnić należy:

- **GDOP** - Geometrical Dilution of Precision, geometryczne rozmycie dokładności, współczynnik ten jest odwrotnie proporcjonalny do objętości bryły, której wierzchołkami są pozycje obserwowanych satelitów i odbiornika,
- **PDOP** - Position Dilution of Precision, trójwymiarowe rozmycie dokładności, w pierwszym przybliżeniu wielkość PDOP jest nieco mniejsza od GDOP,
- **HDOP** - Horizontal Dilution of Precision, poziome rozmycie dokładności,
- **VDOP** - Vertical Dilution of Precision, pionowe rozmycie dokładności,
- **TDOP** - Time Dilution of Precision, rozmycie dokładności czasu.

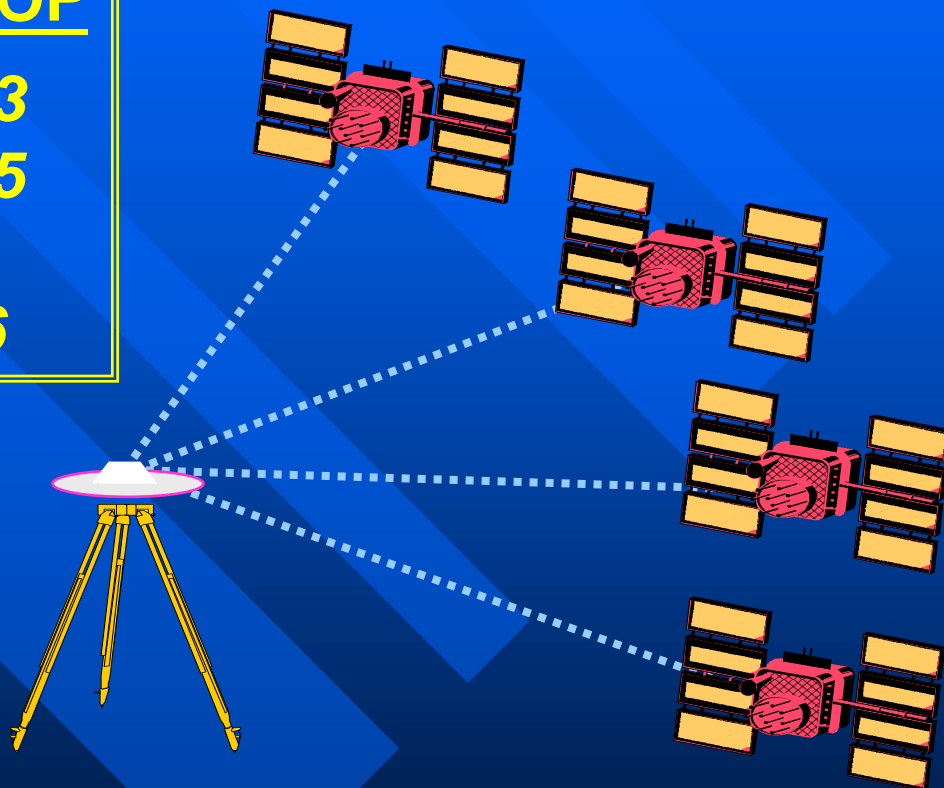
Parametry charakteryzujące błąd pozycji



Good DOP

Parametry charakteryzujące błąd pozycji

<u>QUALITY</u>	<u>DOP</u>
<i>Very Good</i>	1-3
<i>Good</i>	4-5
<i>Fair</i>	6
<i>Suspect</i>	>6



Poor DOP

Dokładność gps

PPS	CEP/50 %	DRMS	2DRMS/95%
Position			
Horizontal	8 m	10.5 m	21 m
Vertical	9 m	14 m	28 m
Spherical	16 m	18 m	36 m
Velocity			
Any Axis	0.07 m/sec	0.1 m/sec	0.2 m/sec
Time			
GPS	17 nsec	26 nsec	52 nsec
UTC	68 nsec	100 nsec	200 nsec

Dokładność gps

◆ SPS (C/A Code Only)

–S/A On:

- Horizontal: 100 meters radial**
- Vertical: 156 meters**
- Time: 340 nanoseconds**

–S/A Off:

- Horizontal: 22 meters radial**
- Vertical: 28 meters**
- Time: 200 nanoseconds**