

Źródła błędów w pomiarach GNSS

(na podstawie Bosy J., 2005)



dr hab. inż. Paweł Zalewski, prof. AM
Akademia Morska w Szczecinie

Źródła błędów w pomiarach GNSS:

Błędy wyznaczania pozycji w systemach zaliczanych do GNSS można podzielić na następujące grupy:

1. Błędy pozycji satelitów.
2. Błędy w wyniku zakłóceń propagacyjnych.
3. Błędy urządzeń nadawczych i odbiorczych.
4. Błędy pozycji stacji obserwacyjnej i stacji nawiązania.
5. Błędy parametrów ruchu obrotowego Ziemi.
6. Błędy opracowania obserwacji GNSS.
7. Błędy wynikające z celowego ograniczenia precyzji.

plus geometria satelitów mająca wpływ na parametry rozkładu wielowymiarowego błędów na powierzchni Ziemi.

Błędy pozycji satelitów:

Błędy pozycji satelitów spowodowane są takimi czynnikami, jak:

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

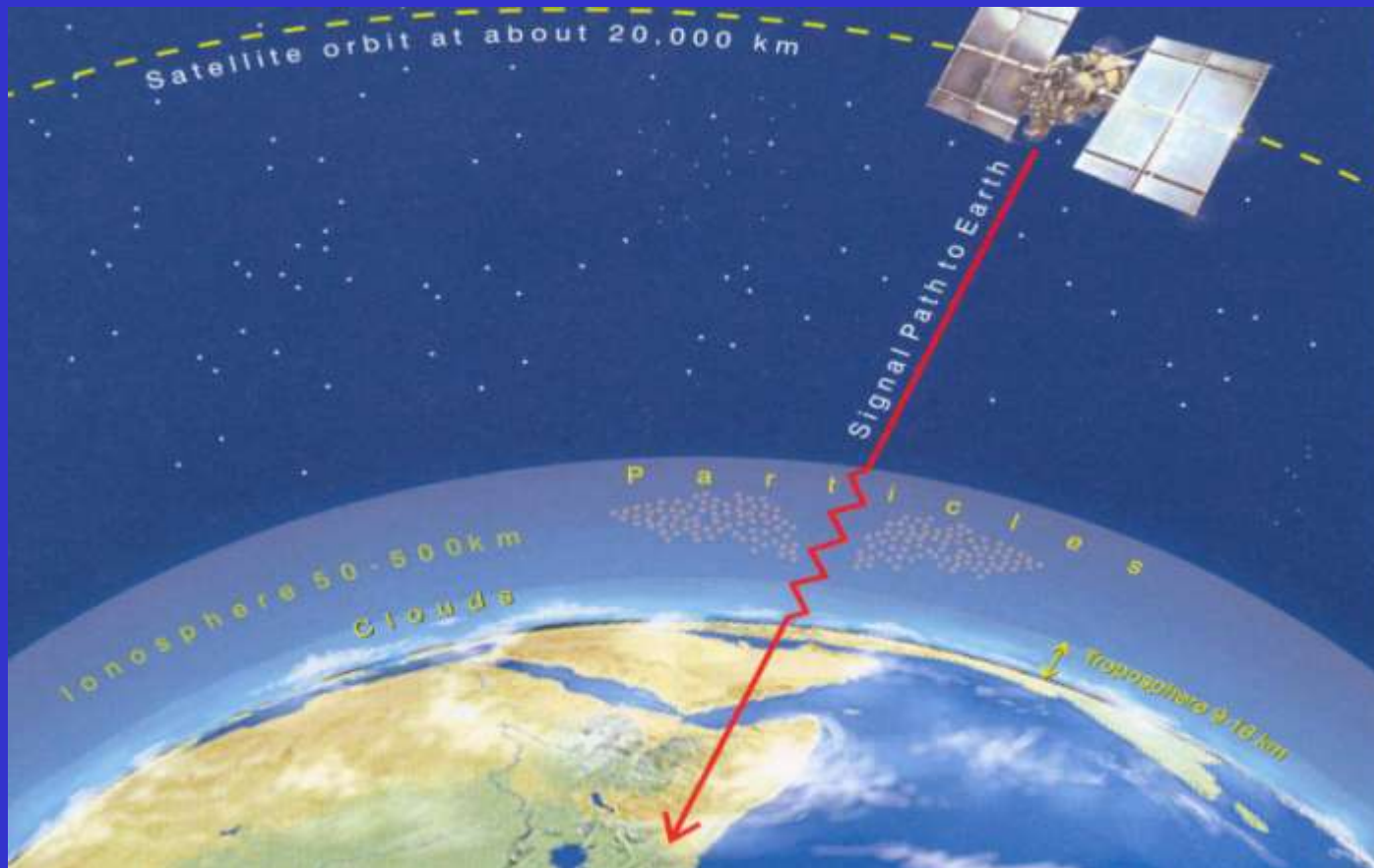


Do dalszej redukcji błędów efemeryd wykorzystać można dane precyzyjne efemeryd w formacie SP3 (dane ze stacji IGS udostępniane w Internecie).

Błędy propagacji w atmosferze:

Błędy związane z propagacją sygnału w atmosferze mają największy wpływ na wyniki opracowania obserwacji GPS. Spowodowane są:

- refrakcją jonosferyczną,
- refrakcją troposferyczną.

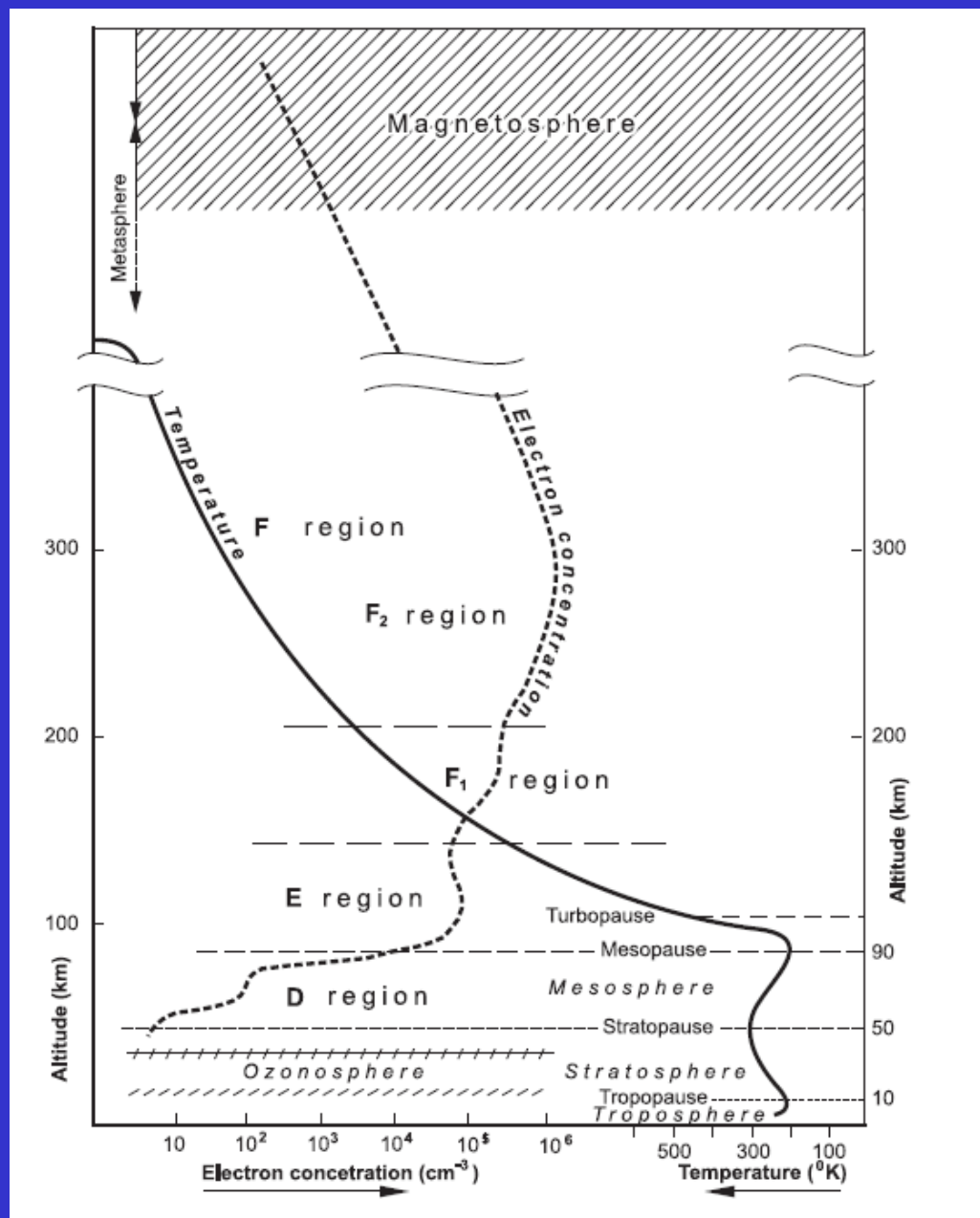


Refrakcja jonosferyczna:

Zmienność czasowo-przestrzenna gęstości elektronów powoduje zaburzenia stanu jonosfery i jest zależna głównie od następujących czynników:

- położenia geograficznego,
- pory dnia,
- pory roku,
- aktywności słonecznej.

Na rys. profil pionowy rozkładu gęstości elektronów oraz temperatury w atmosferze.



Refrakcja jonosferyczna:

Modele rozkładu gęstości elektronów w jonosferze (analityczne i empiryczne):

- **Chapmana** (SLM – *Single Layer Model*),
- **Klobuchara** transmitowany w depeszy nawigacyjnej GPS,
- model globalny **IRI** (ang. *International Reference Ionosphere*),
- model europejski **CODE** (ang. *Center of Orbit Determination of Europe*),
- model jonosfery dla Europy **WUTE**, generowany, między innymi przez lokalne centrum analiz EPN WUTE na Politechnice Warszawskiej,
- model pozwalający na korektę obserwacji fazowych GPS dla jednej częstotliwości **Georgiadou i Kleusberga**.

Modele jonosfery (rozkłady TEC) zarówno globalne, regionalne, jak i lokalne dostępne są obecnie w formacie wewnętrznym ION programu *Bernese GPS Software*, a także formacie otwartym IONEX.

Refrakcja troposferyczna:

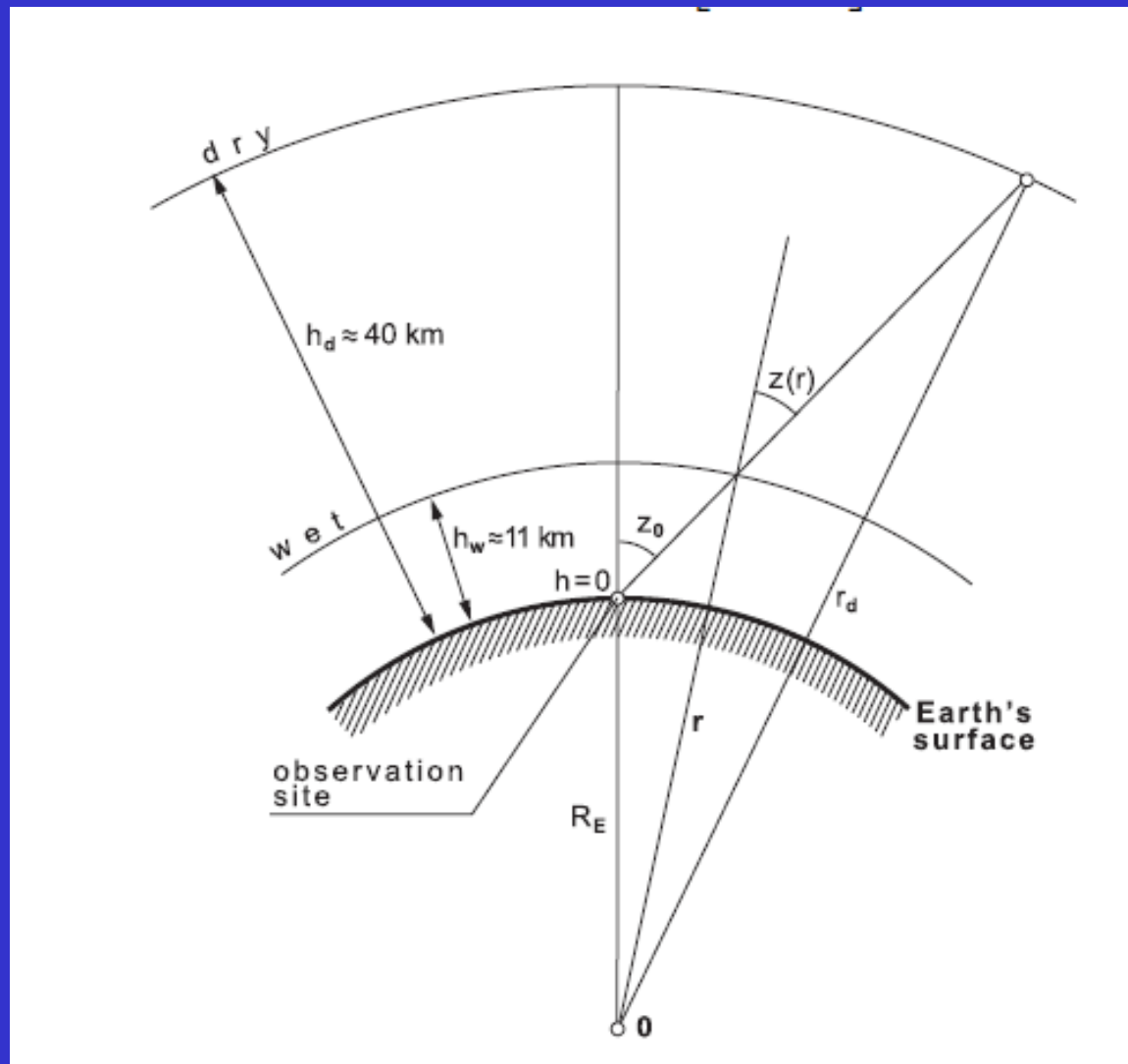
Okolo 90% opóźnienia troposferycznego spowodowanego refrakcją wywodzi się z suchej części troposfery; zależy głównie od ciśnienia atmosferycznego na powierzchni Ziemi i dlatego jest łatwe do modelowania. Pozostałe 10% całkowitego opóźnienia troposferycznego zależy od rozkładu pary wodnej w atmosferze (część mokra troposfery) i jest trudne do modelowania.

Aby nie posługiwać się współczynnikiem załamania troposfery n , którego wartość jest niewiele większa od jedności, wprowadzono pojęcie wskaźnika refrakcji N_{trop} , który wyraża się jako:

$$N_{trop} = 10^6 (n - 1)$$

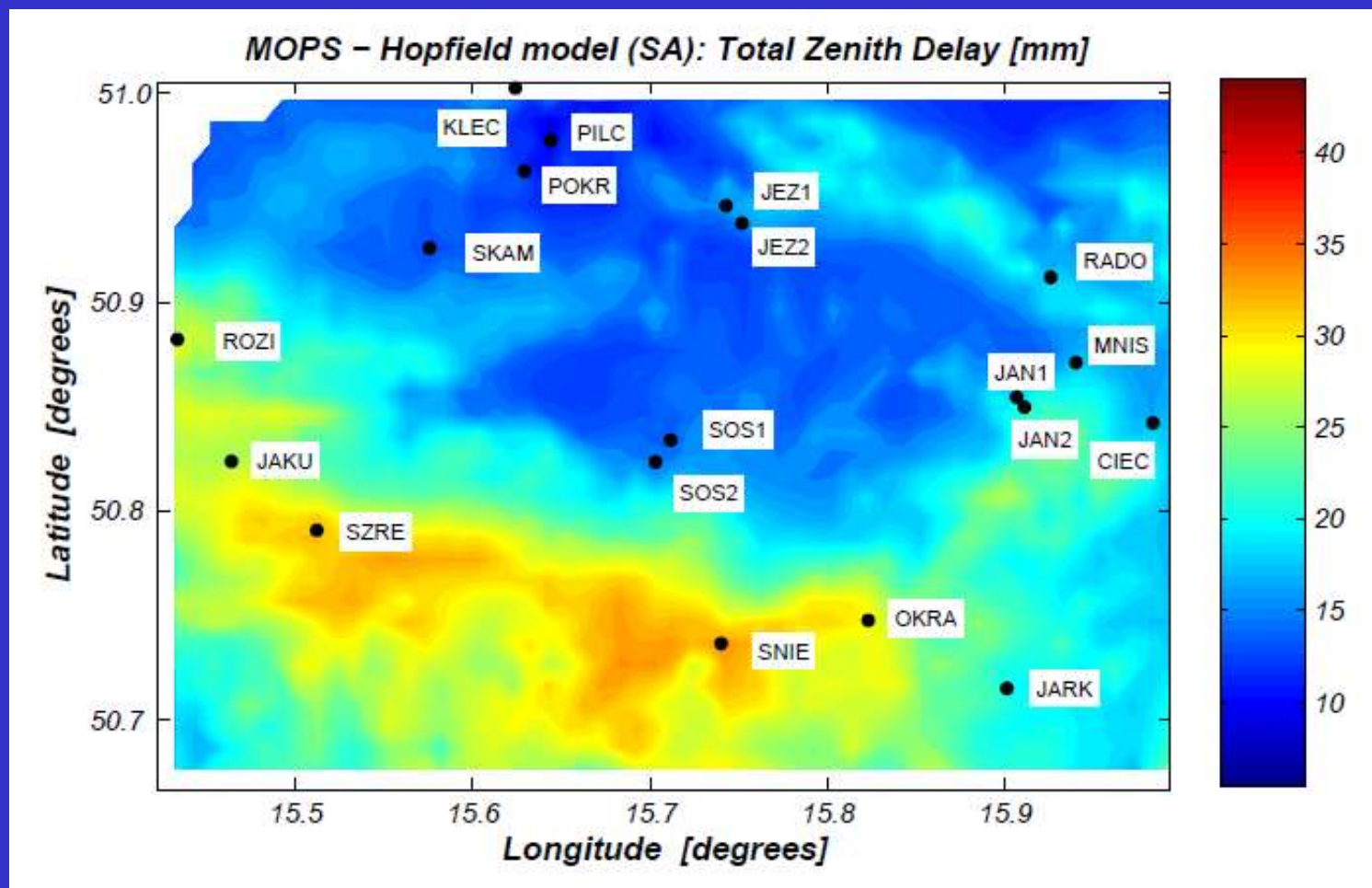
Refrakcja troposferyczna:

Geometria opóźnienia troposferycznego:



Refrakcja troposferyczna:

Przykład opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu w Karkonoszach na podstawie modelu Hopfielda:



Błędy urządzeń nadawczych i odbiorczych:

Błędy urządzeń nadawczych i odbiorczych są spowodowane głównie:

- niestabilnością wzorców częstotliwości satelity i odbiornika,
- szumami własnymi odbiornika,
- zmiennością centrum fazowego anten GPS (*Phase Center Variations: PCV*) zarówno nadawczej, jak i odbiorczej,
- interferencją fal wtórnych (wielotorowość lub wielodrożność sygnału).

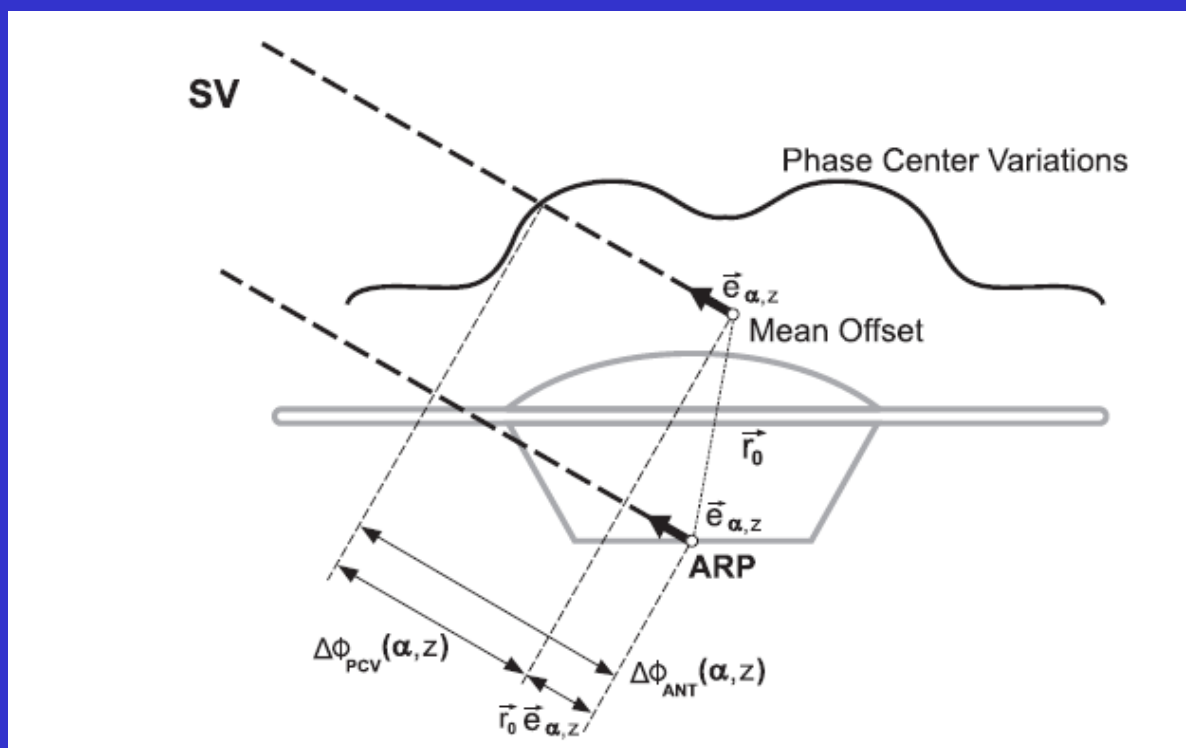
Niestabilność wzorców częstotliwości satelity i odbiornika jest eliminowana w procesie opracowania obserwacji GPS.

Szumy własne odbiornika spowodowane są działaniem urządzeń elektronicznych w nim zastosowanych i nie są możliwe do wyeliminowania.

Przesunięcia centrów fazowych anten nadawczych względem fizycznego punktu anteny tzw. punktu referencyjnego (*Antenna Reference Point: ARP*) dla poszczególnych satelitów GPS są udostępniane przez administratora systemu.

Zmienność centrum fazowego anteny GPS:

Wyznaczanie pozycji GNSS odnosi się do **elektrycznego centrum fazowego anteny odbiorczej**. W precyzyjnym pozycjonowaniu jest zatem niezwykle ważne dokładne określenie położenia centrum fazowego. Szczególnie ma to znaczenie dla składowej wysokościowej i ma ścisły związek z troposferą oraz wysokością topocentryczną satelity.



Położenie centrum fazowego określa się względem fizycznego punktu anteny, tzw. punktu referencyjnego (*Antenna Reference Point: ARP*).

Zmienność centrum fazowego anteny GPS:

Równanie położenia centrum fazowego anteny względem punktu ARP:

$$\Delta\Phi_{ANT}(\alpha, z) = \vec{r}_0 \cdot \vec{e}_{\alpha, z} + \Delta\Phi_{PCV}(\alpha, z)$$

gdzie:

$\vec{r}_0$ — offset główny względem punktu referencyjnego ARP [m],

$\vec{e}_{\alpha, z}$ — wektor jednostkowy kierunku do satelity SV,

$\Delta\Phi_{PCV}(\alpha, z)$ — zmiana położenia centrum fazowego zależna od azymutu α i odległości zenitalnej z (lub wysokości topocentrycznej $\varepsilon = 90 - z$) satelity [m].

Offset główny $\vec{r}_0$ wyznacza się przez podanie trzech składowych (północnej — N , wschodniej — E oraz pionowej — U); określa on położenie centrum fazowego anteny względem ARP jako stałe. Taka charakterystyka, wykorzystywana w programach komercyjnych, jest niewystarczająca w przypadku opracowań precyzyjnych. Dla takich opracowań konieczne jest wyznaczenie drugiego członu równania, czyli zmian położenia centrum fazowego anteny jako funkcji azymutu i odległości zenitalnej $\Delta\Phi_{PCV}(\alpha, z)$ satelity.

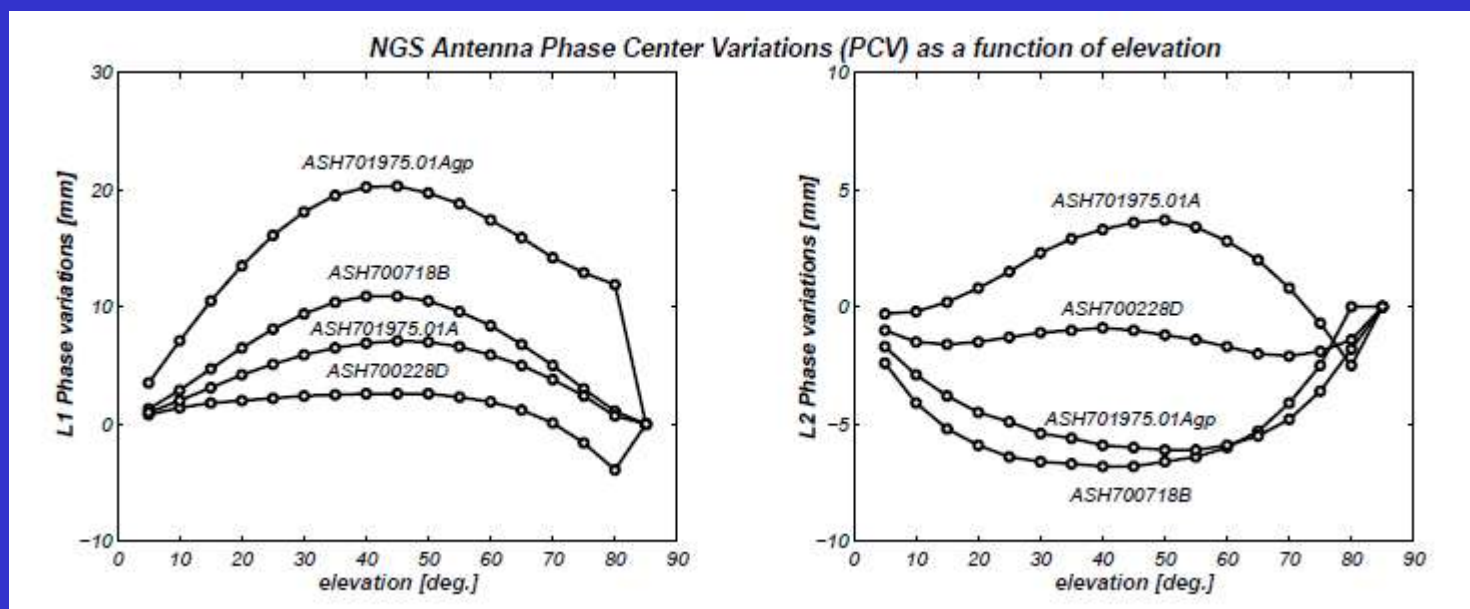
Zmienność centrum fazowego anteny GPS:

Stosowane są obecnie trzy sposoby wyznaczania zmian położenia centrum fazowego anteny odbiorczej jako funkcji azymutu i wysokości satelity nad horyzontem (wysokości topocentrycznej).

Pierwszy z nich to kalibracja w specjalnych komorach pochłaniających fale elektromagnetyczne. Ze względu na małą liczbę komór kalibracje anten tą metodą nie są powszechnie stosowane. W Europie komora pochłaniająca fale elektromagnetyczne o częstotliwości > 0.5 MHz o wymiarach 41 x 16 x 14 m znajduje się w *EMV-Testzentrum der Bundeswehr in Greding* w Niemczech.

Zmienność centrum fazowego anteny GPS:

Drugim sposobem wyznaczania zmian położenia centrum fazowego anten odbiorników satelitarnych GPS/GLONASS są względne kalibracje polowe prowadzone przez IGS oraz amerykański NGS (*National Geodetic Survey*).



Dane NGS są akceptowane przez większość programów wykorzystywanych w obliczeniach precyzyjnych, jak np. Bernese GPS Software (AIUB), GAMIT/GLOBK (MIT), GIPSY-OASIS II (JPL).

Zmienność centrum fazowego anteny GPS:

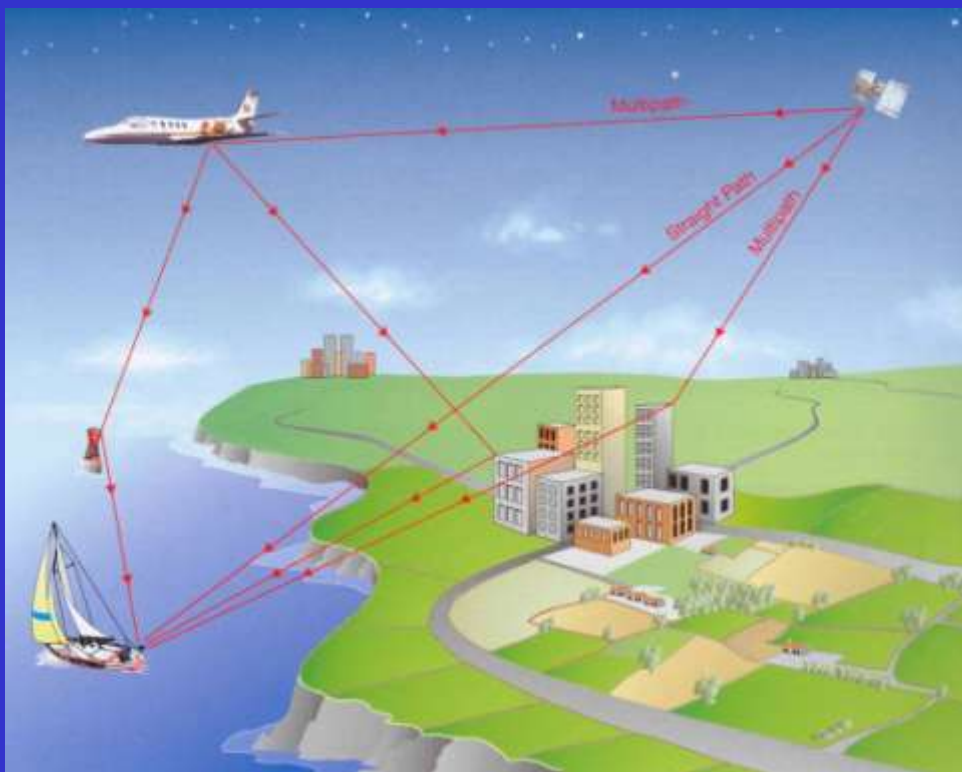
Trzecim sposobem jest metoda polowej kalibracji bezwzględnej anten. Sposób ten został opracowany na Uniwersytecie w Hanowerze przy współpracy z firmą Geo++[®] GmbH. Polega on na kalibracji bezpośrednio w terenie z użyciem precyzyjnego robota.

Pomiary kalibracyjne wykonywane są przy kilku tysiącach różnych położań anteny (obroty i pochylenia) oraz minimum przez dwie doby celem eliminacji wpływu błędu wielotorowości. Autorzy tej metody kalibracji podkreślają, że jest to metoda wyznaczania zmian bezwzględnych centrum fazowego i nie wymaga anteny referencyjnej. Daje ona wyniki w czasie rzeczywistym i jest wolna od wpływu błędów wielotorowości. Można nią wykonywać kalibrację bezpośrednio na punktach sieci, dlatego zalecana jest jako metoda kalibracji anten na stacjach permanentnych sieci GNSS (GPS/Glonass).



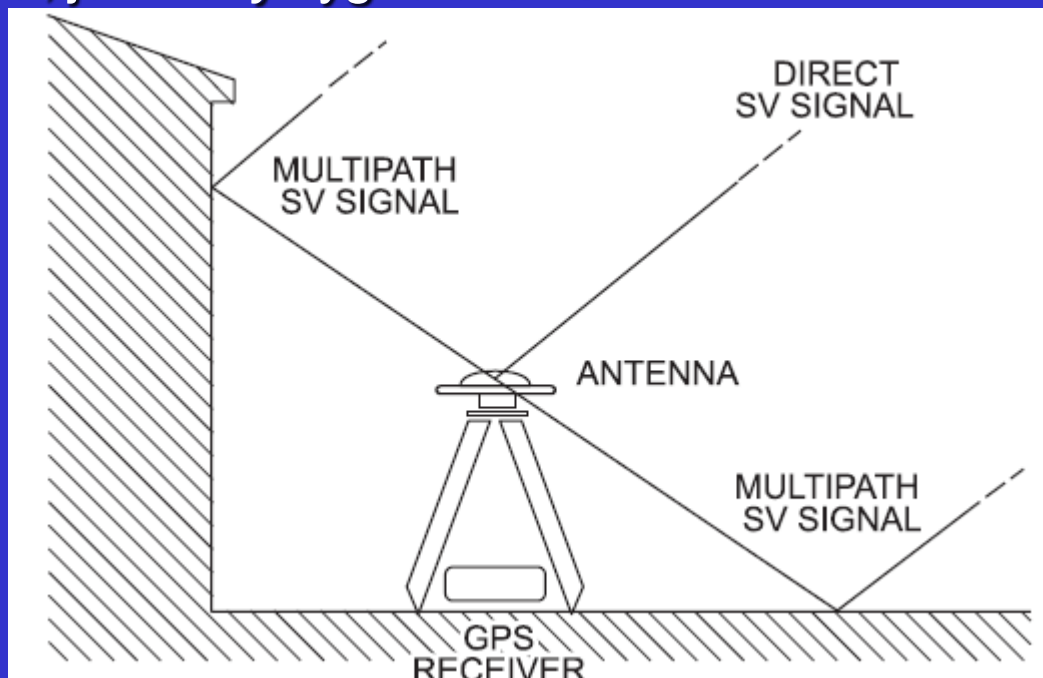
Błędy wielotorowości:

Błąd związany z interferencją fal wtórnych, tzw. wielotorowości (ang. *multipath*) spowodowany jest tym, że sygnał GPS emitowany przez satelitę dociera do odbiornika nie tylko bezpośrednio, najkrótszą drogą, lecz także wieloma pośrednimi drogami wskutek odbić od różnych obiektów otaczających antenę (np. budowle, powierzchnia ziemi, wody). Ma on znaczny wpływ na wyznaczenie współrzędnych punktu, zwłaszcza gdy obserwowane są satelity znajdujące się nisko nad horyzontem.



Błędy wielotorowości:

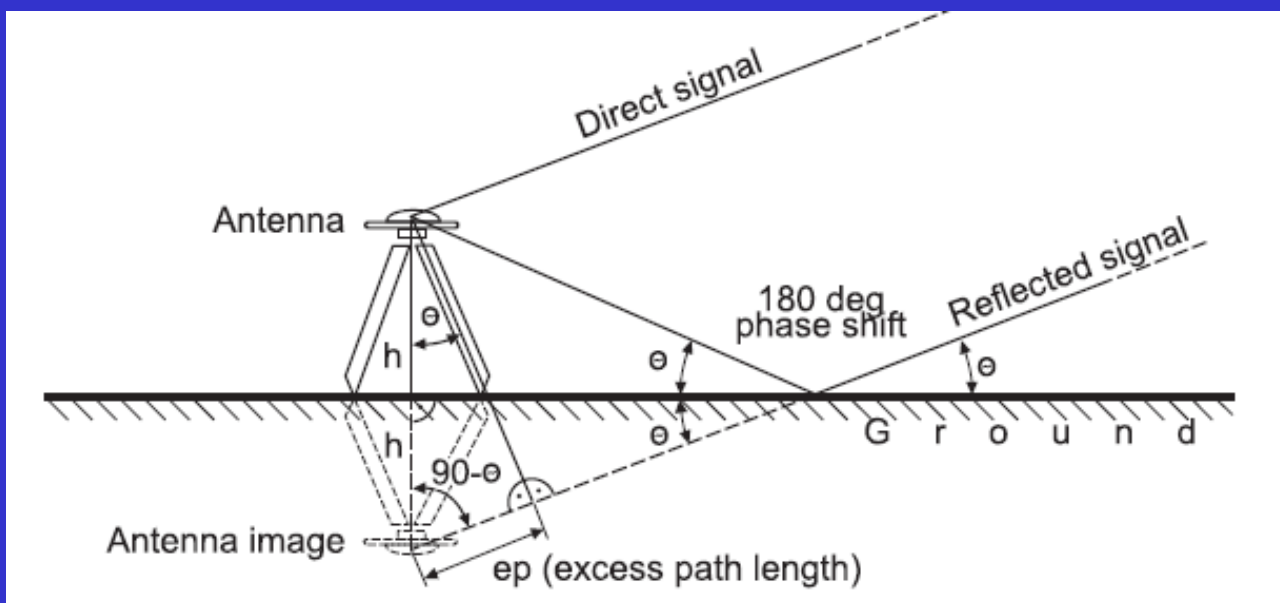
Punkt odbicia sygnału może być położony poniżej i powyżej centrum fazowego anteny odbiorczej i takie dwa przypadki są rozpatrywane w analizach związanych z wpływem błędu wielotorowości. W przypadku wyznaczania wysokości punktu wielotorowość jest jednym, obok refrakcji troposferycznej, z dominujących źródeł błędów. W zależności od różnicy długości dróg jakie muszą pokonać sygnały odbite, a tym samym od różnicy ich faz, amplituda sygnału wypadkowego może ulec wzmocnieniu lub osłabieniu, a efektem tym obciążone będą zarówno obserwacje pseudoodległości, jak i fazy sygnału GPS.



Błędy wielotorowości:

Na podstawie znanej geometrii satelita – odbiornik – reflektor można stwierdzić, że sygnał odbity będzie przesunięty w fazie o wielkość:

$$\Delta\Phi = 2\pi \frac{e_p}{\lambda}$$



Błąd pomiarów fazowych spowodowany wielotorowością:

$$\psi_M = \arctg\left(\frac{\eta \sin(\Delta\Phi)}{1 + \eta \cos(\Delta\Phi)}\right)$$

Błędy wielotorowości:

Metody wykrywania i eliminowania błędu wielotorowości są oparte o analizę SNR, na podstawie której wyznaczana jest wartość przesunięcia fazy między sygnałem bezpośrednim i odbitym w fazowych obserwacjach GPS.

Do wykrywania błędu pseudoodległości spowodowanego wielotorowością w pomiarach kodowych wykorzystuje się kombinację liniową obserwacji fazowych oraz pseudoodległości na wybranej do wyznaczenia błędu częstotliwości.

Błędy pozycji stacji obserwacyjnej i stacji nawiązania:

Błędy pozycji stacji obserwacyjnej i stacji nawiązania są wywołane takimi czynnikami, jak:

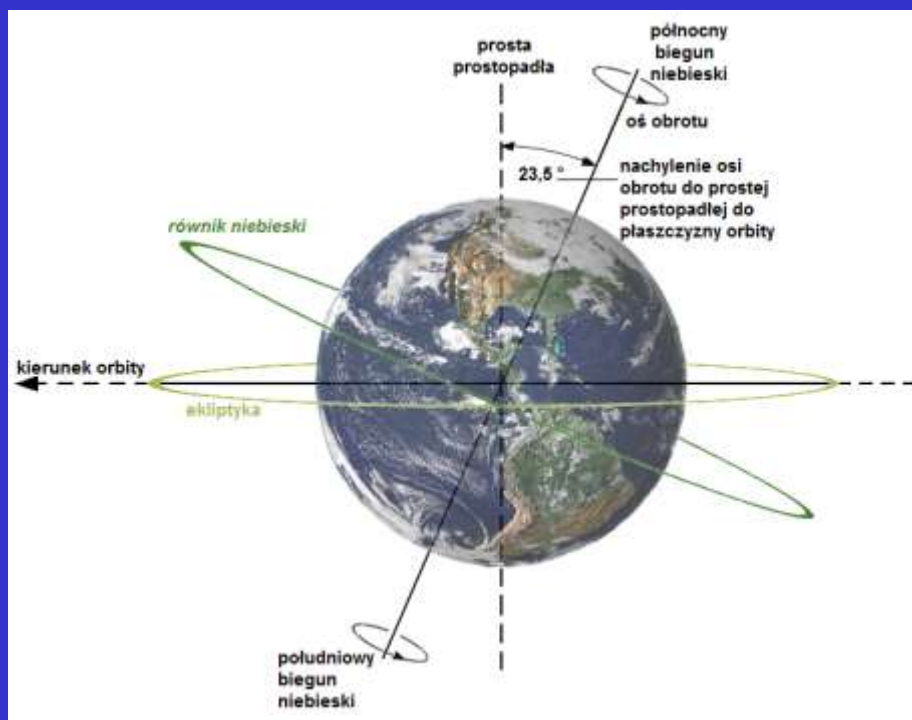
- pływy skorupy ziemskiej,
- pływy oceaniczne,
- pływy atmosferyczne,
- ruch płyt kontynentalnych,
- przyjęta realizacja ziemskiego układu odniesienia.

W opracowaniach precyzyjnych wpływ tych zjawisk jest redukowany poprzez użycie ich modeli, które udostępniane są przez IERS (modele pływowe). W przypadku ruchu płyt kontynentalnych w opracowaniach obserwacji GPS wykorzystywane są dwa modele: NNR-NUVEL-1A (*No-net-rotation Geophysical Plate Kinematic Model*) i APKIM2000.0 (*Actual Plate Kinematic Model*). Przyjęcie konkretnej realizacji układu odniesienia w procesie opracowania obserwacji satelitarnych GPS w sieciach lokalnych nawiązanych do stacji permanentnych pozwala na wyznaczanie współrzędnych punktów sieci oraz parametrów kinematyki w tym układzie (np. ziemski układ odniesienia ITRF2000).

Błędy parametrów ruchu obrotowego Ziemi:

Błędy parametrów ruchu obrotowego Ziemi są redukowane w procesie opracowania obserwacji GPS poprzez zastosowanie modeli udostępnianych przez Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi (*International Earth Rotation and Reference Systems Service: IERS*).

Parametry ruchu obrotowego Ziemi stanowią dane wejściowe do systemu opracowania obserwacji GPS - *IERS Bulletin B: Monthly Earth Orientation Data*.



Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Błędy opracowania obserwacji GPS wynikają z przyjętej metodyki opracowania.

Zazwyczaj pliki obserwacyjne z formatu binarnego odbiorników GPS są konwertowane do formatu tekstowego ASCII, niezależnego od sprzętu pomiarowego – RINEX (ang. *Receiver Independent Exchange*), a następnie poddane obróbce w oprogramowaniu komercyjnym lub dostępnym np. na serwerze ASG EUPOS.

Na każdym etapie przeliczeń występują np. błędy numeryczne zaokrągleń. W przypadku statycznych pomiarów fazowych istotny wpływ na dokładność ma ilość linii bazowych (wektorów pomiędzy nieruchomymi odbiornikami GPS), spośród których wyselekcjonowane zostaną wektory niezależne (o błędach pomiarowych z najniższą korelacją).

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Przykładowe etapy opracowania obserwacji korzystając z **Bernese GPS Software**:

1. Konwersja plików IERS/IGS do formatu Bernese EOP (ERP).
2. Wstępne opracowanie obserwacji kodowych z wykorzystaniem modułów CODCHK i CODSPP. Pierwszy z nich ma na celu znalezienie obserwacji odstających, na bazie równań pojedynczych różnic. Moduł CODSPP ma na celu synchronizację zegarów odbiorników z czasem GPS.
3. Zdefiniowanie układu wektorów niezależnych: moduł SNGDIF. W przypadku sieci lokalnych, w których obserwacje były prowadzone jednorodnym sprzętem pomiarowym, jako metodę wyboru niezależnych linii bazowych stosuje się metodę najkrótszych połączeń – SHORTEST.

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Bernese GNSS Software Version 5.2

Configure Campaign RINEX Orbits/EOP Processing Service Conversion BPE User Help

CODE-BASED CLOCK SYNCHRONIZATION - CODSPP 1: Filenames

GENERAL FILES

Show all general files ☒

INPUT ORBITS

☐ Broadcast orbits BRD

☒ Standard orbits STD

Satellite clocks CLK

INPUT FILES

Code observation files	????\$S+0 CZH	A priori coordinates	APR\$YD+0 CRD
Estimated tropo.values	TRP	Site eccentricities	ECC
Maps of VMF1 coeff.	GRD	Kin. input coordinates	KIN
Pole file	COD\$YD+0 ERP	Code bias input files	P1C1\$M+0 DCB
		Station sigma factors	SOS

LEO files ☐

^Top | ^Prev | ^Next | Cancel | Save^As | ^Save | ^Run | ^Output | Rer^un | ^+Day | ^-Day

> User: bern52 Campaign: \${P}/INTRO \$Y+0=2010 \$S+0=2070 File: /home/bern52/GPSUSER52/PAN/CODSPP.INP

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Bernese GNSS Software Version 5.2

Configure Campaign RINEX Orbits/EOP Processing Service Conversion BPE User Help

CREATE SINGLE-DIFFERENCE/BASELINE FILES - SNGDIF 1: Input File Selection

GENERAL FILES

Show all general files ☒

GENERAL OPTIONS

Measurement type PHASE

Processing strategy OBS-MAX

Stations must contain observ. from GPS

AUTOMATED BASELINE CREATION

Zero-difference observation files ????\$S+0 PZH ????\$S+0 CZH

Reference station for STAR strategy PZH CZH

MANUAL BASELINE CREATION

First zero-difference input file PZH CZH

Second zero-difference input file PZH CZH

Single-difference output file PSH CSH

|| ^Top | ^Prev | ^Next | Cance^l | Save^As | ^Save | ^Run | ^Output | Rer^un | ^+Day ^-Day

> User: bern52 Campaign: \${P}/INTRO \$Y+0=2010 \$S+0=2070 File: /home/bern52/GPSUSER52/PAN/SNGDIF.INP

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Przykładowe etapy opracowania obserwacji korzystając z **Bernese GPS Software**:

3. Niezależne wektory są podstawą do tworzenia równań potrójnych różnic obserwacji fazowych oraz testowania kombinacji liniowych obserwacji fazowych L_1 i L_2 . Na tym etapie opracowania wychwytywane i naprawiane są przeskoki fazy „cycle slips” oraz następuje zmiana wag obserwacji błędnych, np. ze względu na błąd spowodowany wielotorowością. W przypadku braku możliwości naprawienia tych fragmentów obserwacji, w których nastąpiły przeskoki fazy – są one usuwane. Ten etap opracowania realizowany jest w ramach modułu MAUPRP.
4. W module GPSEST wyznaczane są współrzędne przybliżone punktów z dokładnością centymetrową z wykorzystaniem kombinacji liniowej „*Ionosphere-free*” fazy L_3 równań podwójnych różnic. W ramach tego samego modułu opracowywany zostaje lokalny model jonosfery WUTE-L, który jest wykorzystywany do rozwiązania nieoznaczoności oraz lokalny model troposfery.

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Bernese GNSS Software Version 5.2

Configure Campaign RINEX Orbits/EOP Processing Service Conversion BPE User Help

PHASE PREPROCESSING - MAUPRP 1: Input Files

GENERAL FILES

Show all general files ☒

INPUT FILES

☐ Zero-difference observation files	????\$S+0	PZH
☒ Single-difference observation files	????\$S+0	PSH
A priori coordinates	APR\$YD+0	CRD
Site eccentricities		ECC
Kinematic input coordinates		KIN
GNSS standard orbits	COD\$YD+0	STD
Pole file	COD\$YD+0	ERP
Satellite clocks		CLK
Estimated troposphere values		TRP
Meteo data files		MET
Maps of VMF1 coefficients		GRD
Ionosphere models		ION
Process LE0s		

|| ^Top | ^Prev | ^Next | Cance^l | Save^As | ^Save | ^Run | ^Output | Rer^un | ^+Day ^-Day

> User: bern52 Campaign: \${P}/INTRO \$Y+0=2010 \$S+0=2070 File: /home/bern52/GPSUSER52/PAN/MAUPRP.INP

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Bernese GNSS Software Version 5.2

Configure Campaign RINEX Orbits/EOP Processing Service Conversion BPE User Help

GPSEST 3.1: General Options 1

TITLE

OBSERVATION SELECTION

Satellite system	GPS/GLO
Frequency/linear combination	L3
Elevation cutoff angle	5 degrees
Sampling interval	180 seconds
Tolerance for simultaneity	100 milliseconds
Special data selection	NO
Observation window	

OBSERVATION MODELING AND PARAMETER ESTIMATION

A priori sigma of unit weight	0.001 meters
Elevation-dependent weighting	COSZ
Type of computed residuals	NORMALIZED
Correlation strategy	BASELINE

LEO-SPECIFIC SELECTION AND MODELING OPTIONS

Elevation cutoff angle	0 degrees
Elevation-dependent weighting	NONE

|| ^Top | ^Prev | ^Next | Cancel | Save^As | ^Save | ^Run | ^Output | Rer^un | ^+Day ^-Day

> User: bern52 Campaign: \${P}/INTRO \$Y+0=2010 \$S+0=2070 File: /home/bern52/GPSUSER52/PAN/GPSEST.INP

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Przykładowe etapy opracowania obserwacji korzystając z **Bernese GPS Software**:

5. Końcowy etap opracowania stanowi wyznaczenie współrzędnych punktów sieci wraz z charakterystyką dokładnościową w układzie współrzędnych ITRF2000 dla każdego dnia obserwacyjnego (epoki) kampanii pomiarowej (również w module GPSEST).
6. Rozwiązania z poszczególnych dni pomiarowych w ramach jednej kampanii są następnie łączone modułem ADDNEQ, a wyniki stanowią średnie współrzędne punktów dla okresu kampanii pomiarowej wraz z charakterystyką dokładnościową.
7. Transformacja uzyskanych współrzędnych do innych układów np. ETRF89 z epoką 1989.0.

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Bernese GNSS Software Version 5.2

Configure Campaign RINEX Orbits/EOP Processing Service Conversion BPE User Help

RESRMS 3: Residual Statistics and Sigma Factors

OPTIONS FOR RESIDUAL HISTOGRAM

Size of histogram

Bin width for histogram millimeters

STATION OBSERVATION SIGMA FACTORS

Compute measurement noise from of residuals

Default sigma factor

New sigma factor	Noise larger than (m)		
1.41	0.005	+	-
1.73	0.010	+	-
2.00	0.015	+	-

^Top | ^Prev | ^Next | Cancel | Save^As | ^Save | ^Run | ^Output | Rer^un | ^+Day | ^-Day

> User: bern52 Campaign: \${P}/INTRO \$Y+0=2010 \$S+0=2070 File: /home/bern52/GPSUSER52/PAN/RESRMS.INP

Błędy opracowania obserwacji GNSS:

Bernese GNSS Software Version 5.2

Configure Campaign RINEX Orbits/EOP Processing Service Conversion BPE User Help

ADDNEQ2 3.1: Options 1

TITLE

GENERAL OPTIONS

Maximum number of parameters in combined NEQ

A priori sigma of unit weight meters

Compute and compare individual solutions

Reference epoch for station coordinates (yyyy mm dd)

Stop program after NEQ saving ☐

ADD PARAMETERS TO THE SYSTEM

Set up station velocities ☐

Set up Geocenter coordinates ☐

> User: bern52 Campaign: \${P}/INTRO \$Y+0=2010 \$S+0=2070 File: /home/bern52/GPSUSER52/PAN/ADDNEQ2.INP

Błędy wynikające z celowego ograniczenia precyzji:

Błędy wynikające z celowego ograniczenia precyzji nakładane przez zarządców (właścicieli) systemów satelitarnych to na przykładzie GPS:

- (SA – *Selective Availability*) degradacja zegara satelity lub efemeryd satelitów w depeszy satelitarnej,
- błędy wynikające z celowego wyłączenia niektórych sygnałów np. włączenie systemu zapobiegającego próbom zakłócenia pracy GPS (AS – *Anti-spoofing*), polegający na zastąpieniu kodu P zaszyfrowanym kodem Y, który jest dostępny tylko dla autoryzowanych użytkowników systemu.

Algorytm rozwiązania układu równań pozycyjnych:

Schemat ogólny rozwiązania układu równań pozycyjnych GNSS, mający na celu wyznaczenie nieoznaczoności oraz pozostałych parametrów wektora niewiadomych (Joosten and Tiberius : **LAMBDA**).

