



Seminarium KG PAN

Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych, a problemy definiowania krajowych układów odniesienia

Grybów, 18-19 października 2012

Problematyka dokładności i niezawodności pozycjonowania przy wykorzystaniu serwisów POZGEO i POZGEO-D w systemie ASG-EUPOS

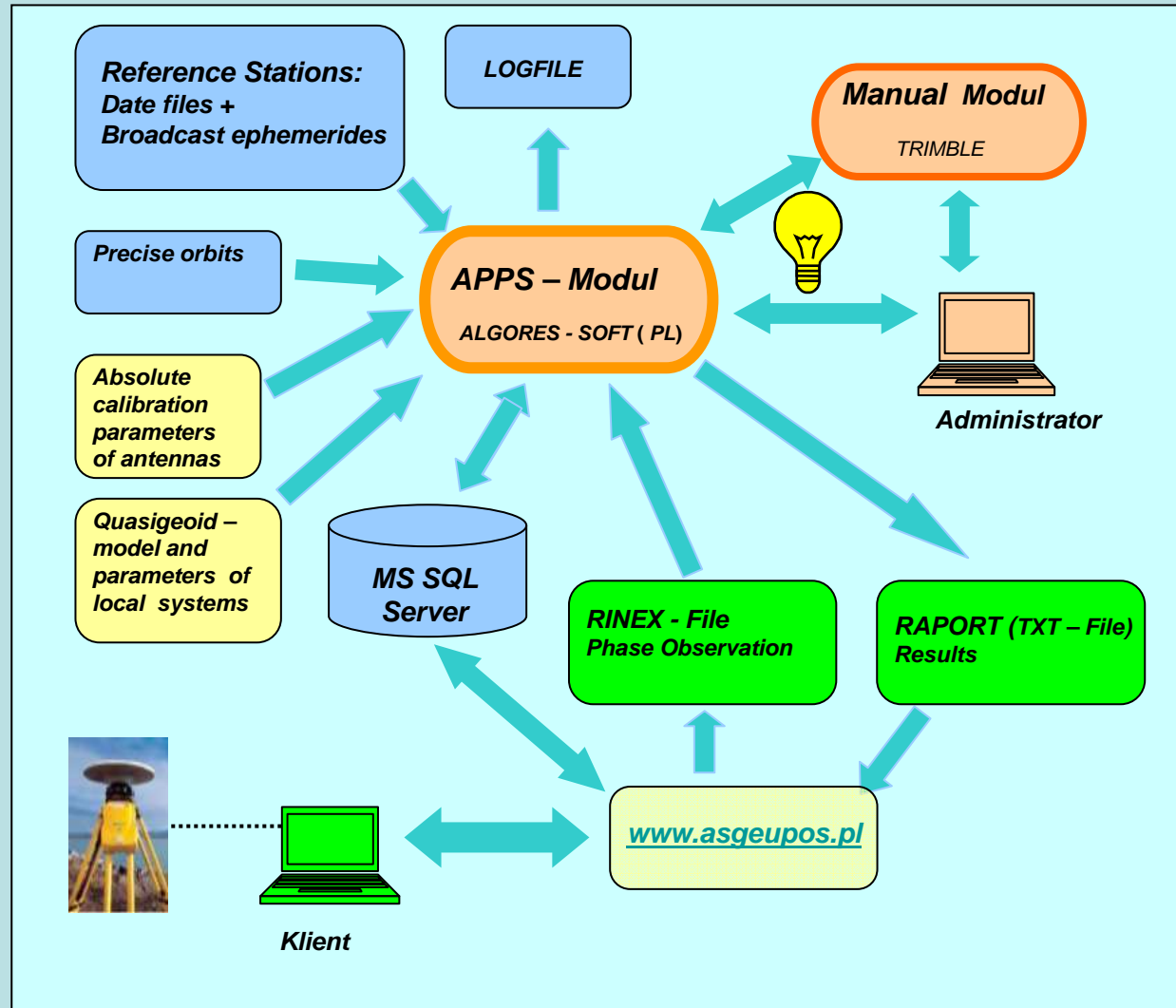
Roman Kadaj

- Algorytmy modułu APPS /POZGEO; dokładność i niezawodność pozycjonowania
- Integracja pomiarów klasycznych z obserwacjami GNSS z wykorzystaniem serwisów POZGEO-D lub POZGEO. Wybór przestrzeni wyrównania układu obserwacyjnego oraz problemy niezawodności
- Relacje między stosowanymi układami odniesienia: ETRF'89 (PL), ETRF'2000/ep.2011, ETRF'2005/ep.2008.13
- Wpasowanie quasigeoidy z globalnego modelu EGM2008 (NGA) do układu ETRF'2000/ep.2011, reprezentowanego przez stacje ASG-EUPOS i punkty EUVN, na podstawie wyników nowej kampanii pomiarowej 2010-2011 (utworzenie modelu quasigeoidy GEOIDPOL-2008C)

SERWIS POZGEO - STRUKTURA ZEWNĘTRZNA

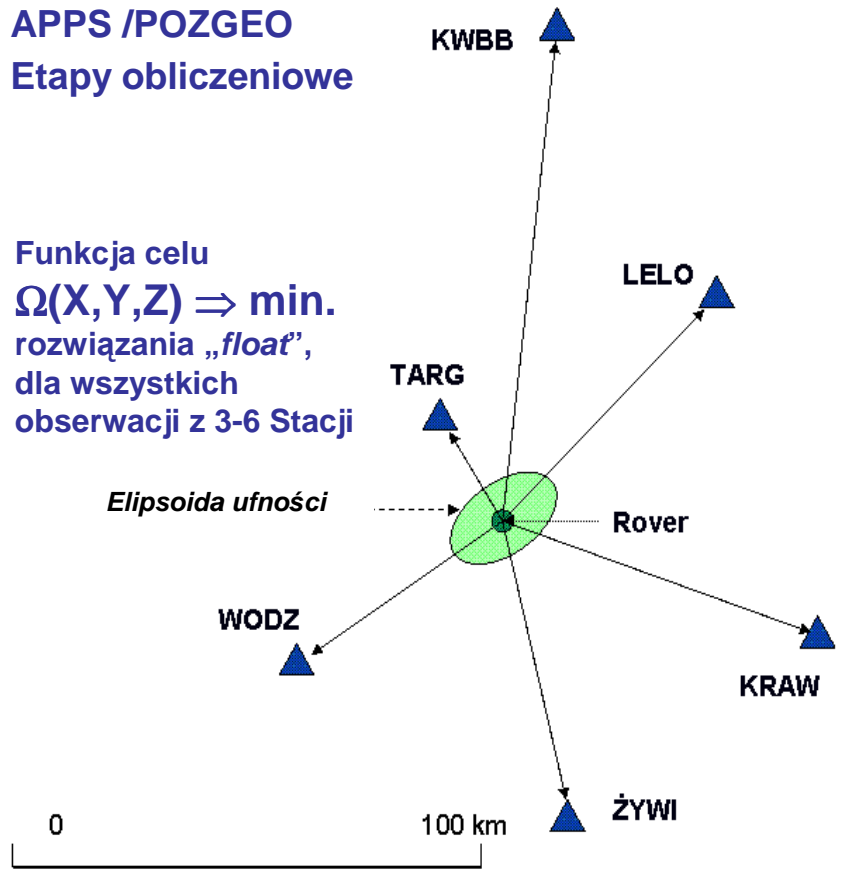
APPS – Ogólne założenia

- Czas Sesji: od 30' - 40' do 24h
- Max. Liczba epok: 3600 (jeśli więcej – nastąpi automatyczne „rozrzedzenie”)
- Interwał: 1 – 60 sek.
- Min. 5 Satelitów
- Liczba stacji: 3 – 6
- Kalibracje absolutne anten
- Sygnały fazowe L1, L2 (iono-free L3)
- Min. Elewacja 10°
- Model troposfery GMF (Niell, 2000) z Modified Hopfield refrakcją zenitalną



APPS /POZGEO Etapy obliczeniowe

Funkcja celu
 $\Omega(X,Y,Z) \Rightarrow \min.$
 rozwiązania „float”,
 dla wszystkich
 obserwacji z 3-6 Stacji



I. Przygotowanie danych

- *Broadcast* Efemerydy → Orbity
- Redukcje obs. kodowych i fazowych (parametry absolutnej kalibracji anten, wysokości anten, refrakcja troposferyczna).
- $\{X_{ik}, Y_{ik}, Z_{ik}\}$ dyskretne interpolacje orbit (*broadcast, rapid or final*)
- SPP (*Single Point Position*) (X^0, Y^0, Z^0)
- Filtracja faz L1, L2 (*cycle-slips* i inne defekty), z użyciem TD i *wide-lane* (L5) kombinacji.
- Określenie zbioru *iono-free* dyskretnych obserwacji (L3)

II. TD – typu *float* rozwiązanie (metoda BETA)

Numeryczno-analityczna (semi-analityczna) minimalizacja funkcji celu przy założeniach:

- potrójne różnice faz we wszystkich kombinacjach par epok (schemat *Schreibera*)
 - zastosowanie estymacji mocnej z kontrolnym składnikiem dla obserwacji kodowych
- $\Omega = \Sigma(v_i^2 + c^2)^{1/2} + r(\{R\}) \Rightarrow \min.$ (*Kadaj, 1988*):

III. DD – typu *fixed* rozwiązanie lub TD – *float* (BETA) ale tylko dla sesji dłuższej > 1.5h

DD – *fixed* rozwiązanie:

- Iteracje ↑
- Fiksacja nieoznaczoności, niezależnie dla każdej pary epok ($k, k+1$), według metody „60/77” (*Yang, Goad, Schaffrin, 1994*; zastosowanie np. w: *Kashani, Wielgosz, Grejner-Brzezińska, 2003*)
 - Wyrównanie pozycji ROVER z wszystkich epok z zastosowaniem estymatorów mocnych (nie szukamy optymalnych wartości całkowitych nieoznaczoności dla całych ciągów faz)

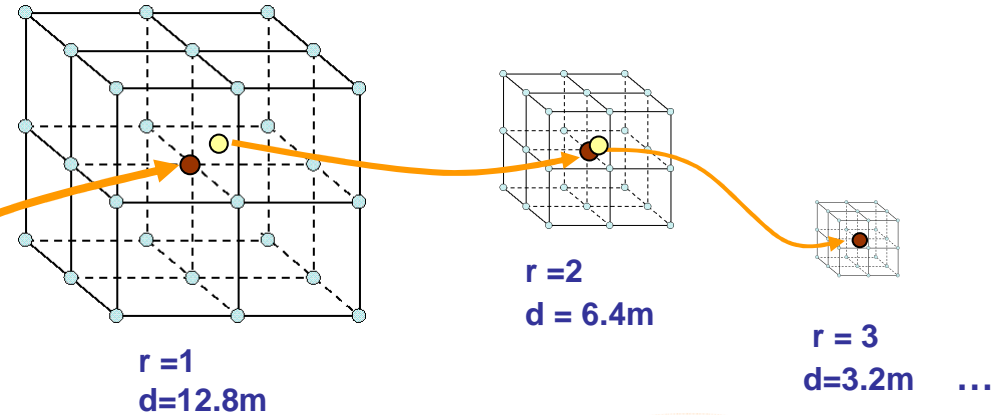
Alternatywa **nie zastosowana**: pełne wyrównanie układu z użyciem metody *LAMBDA* (*Teunissen, 1995*)

IV. Obliczenie pozycji Rover w innych układach (także w systemie wysokości normalnych).

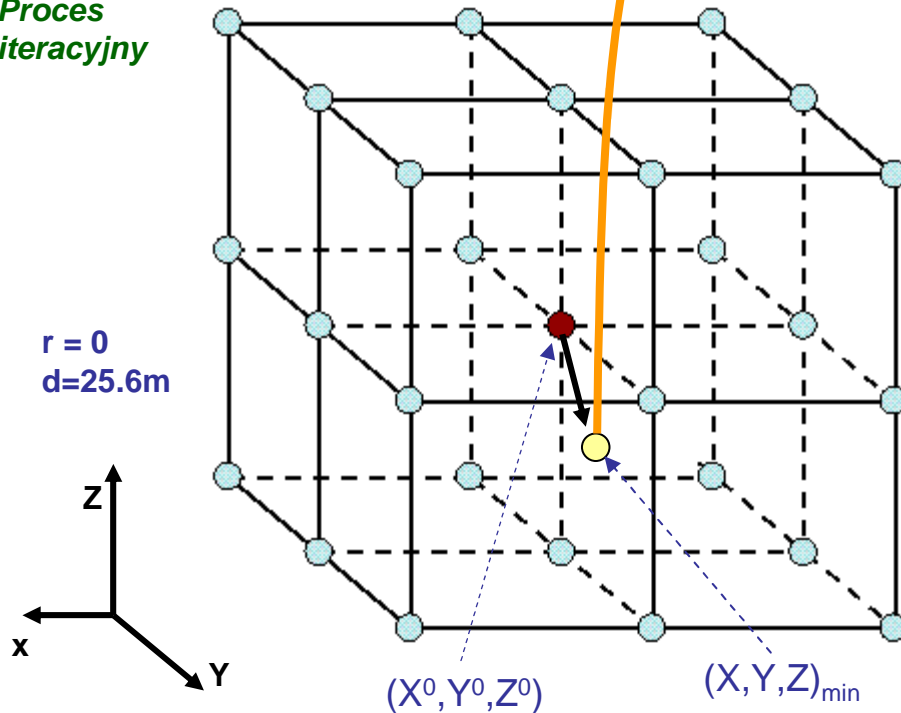
TD – float (BETA): NUMERYCZNA MINIMALIZACJA FUNKCJI ZELU $\Omega = \Omega(X, Y, Z)$ (hiperpowierzchnia)

Start: $r:=0$ (Iter.), (X^0, Y^0, Z^0) , $d:=25.6$ m,

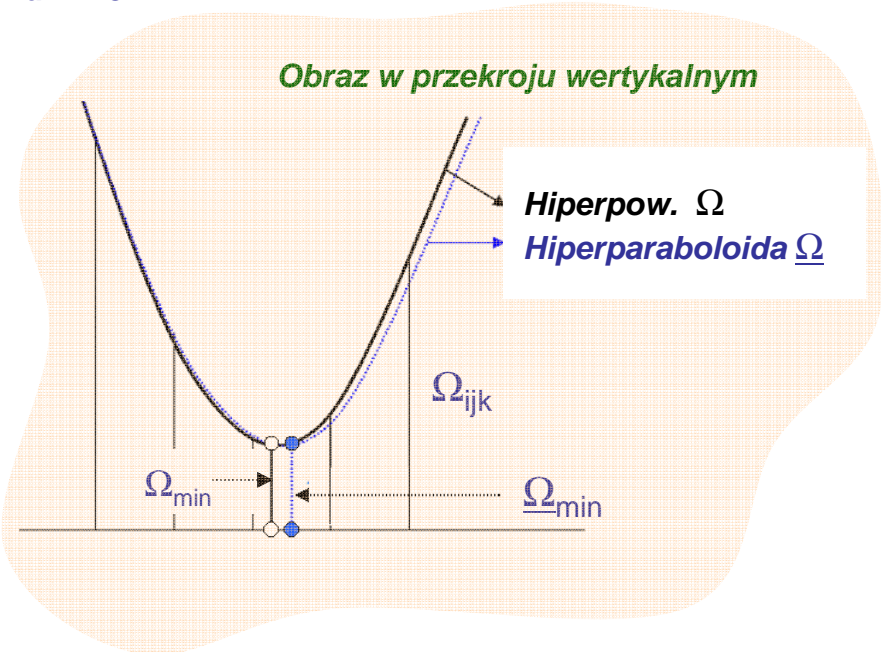
- Wartości funkcji celu w siatce regularnej:
 $\{ \Omega_{ijk} : i, j, k = -1, 0, 1 \}$, $\Omega_{ijk} = \Omega(X_i, Y_j, Z_k)$
 $X_i := X^{(r)} + i \cdot d$; $Y_j := Y^{(r)} + j \cdot d$; $Z_k := Z^{(r)} + k \cdot d$
- Aproksymacja Hyperparaboloidy drugiego stopnia $\underline{\Omega} \approx \Omega$.
- Minimalizacja (*explicit*):
 $(X, Y, Z)_{\min} \Rightarrow (X^{(r+1)}, Y^{(r+1)}, Z^{(r+1)})$
- 50% Zmniejszenie siatki:
 $d := d / 2$; $r := r + 1$



Proces iteracyjny



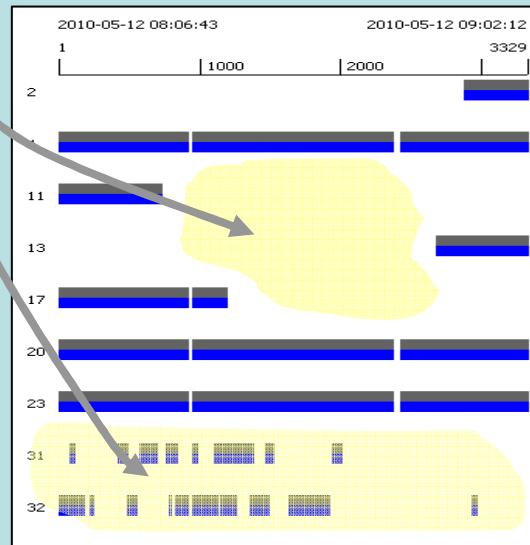
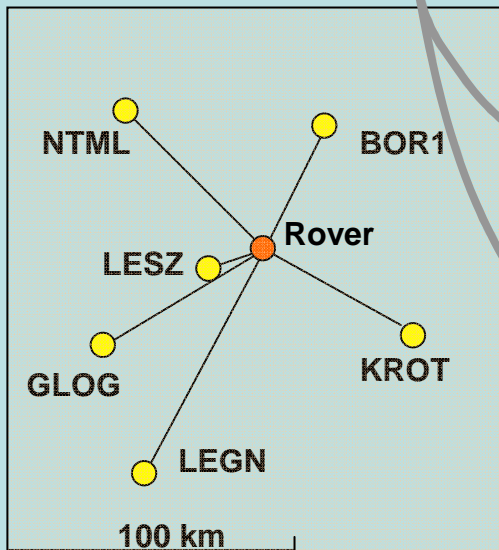
Obraz w przekroju wertykalnym





Przykład 1: obserwacje bardzo defektywne.

Długość sesji: 55 minut



T_{begin} : 1583 288403.00
 T_{end} : 1583 291731.00
interval of time: 1 sec
Number of epochs: 3328 (~ 55 min)
Number of double differences: 158836 (iono-free)
Distances: ROVER-STATION:
 BOR1 ~ 48 km
 KROT ~ 51 km
 LESZ ~ 14 km
 GLOG ~ 54 km
 NTML ~ 66 km
 LEGN ~ 87 km

Date/Time: 2012-09-09 19:43:32

FLOAT SOLUTION

ITER = 1	ROVER_COORD:	3777443.6146	1137971.4869	4995018.1103	RMS = 0.0172	d = 25.6000	n_obs = 158836	dR = 5.0021
ITER = 2	ROVER_COORD:	3777443.6147	1137971.4872	4995018.1103	RMS = 0.0173	d = 12.8000	n_obs = 158836	dR = 0.0003
ITER = 3	ROVER_COORD:	3777443.6148	1137971.4877	4995018.1105	RMS = 0.0174	d = 6.4000	n_obs = 158836	dR = 0.0006

ITER = 4	ROVER_COORD:	3777443.6148	1137971.4878	4995018.1105	RMS = 0.0174	d = 3.2000	n_obs = 158836	 dR = 0.0001
ITER = 5	ROVER_COORD:	3777443.6146	1137971.4866	4995018.1103	RMS = 0.0174	d = 1.6000	n_obs = 158836	 dR = 0.0013
ITER = 6	ROVER_COORD:	3777443.6145	1137971.4860	4995018.1102	RMS = 0.0174	d = 0.8000	n_obs = 158836	 dR = 0.0006
ITER = 7	ROVER_COORD:	3777443.6145	1137971.4859	4995018.1101	RMS = 0.0174	d = 0.4000	n_obs = 158836	 dR = 0.0002
ITER = 8	ROVER_COORD:	3777443.6145	1137971.4858	4995018.1101	RMS = 0.0174	d = 0.2000	n_obs = 158836	 dR = 0.0001

Różnice od FIX: 0.0335 -0.0284 -0.0648

Date/Time: 2012-09-09 19:43:51

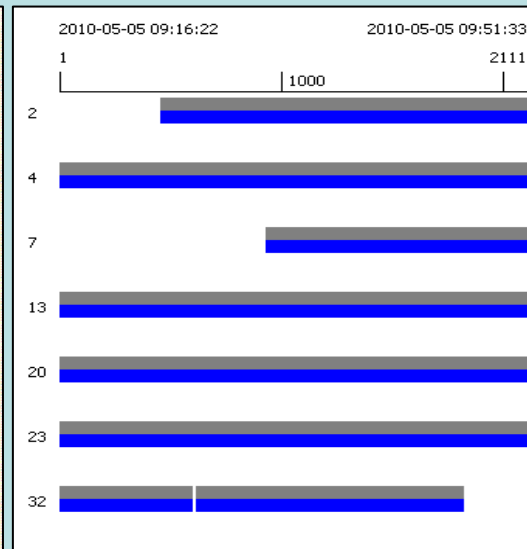
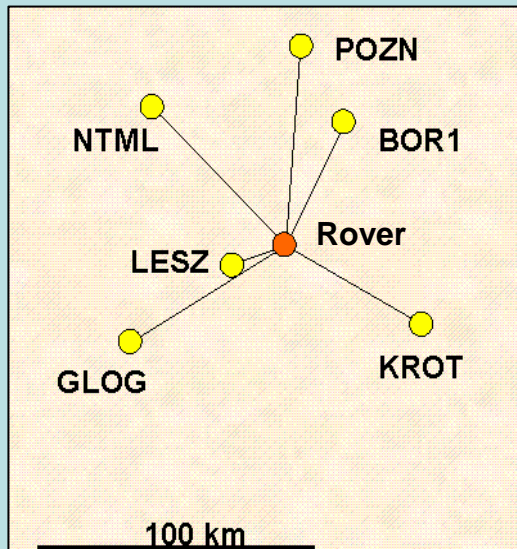
FIXED SOLUTION:

ROVER_FINAL_COORD: 3777443.5710 1137971.5142 4995018.0453 Standard Deviations: 0.0068 0.0035 0.0141



Przykład 2: względnie dobre obserwacje.

Długość sesji: 35 minut



T_{begin} : 1582 292582.00
 T_{end} : 1582 294692.00
interval of time: 1 sec
Number of epochs: 2111 (~ 35 min)
Number of double differences: 207644 (iono-free)
Distances ROVER-STATION:
 BOR1 ~ 49 km
 KROT ~ 54 km
 LESZ ~ 11 km
 GLOG ~ 51 km
 NTML ~ 63 km
 POZN ~ 62 km

Date/Time: 2012-09-20 02:03:04 (BEGIN)

FLOAT SOLUTION

ITER = 1 ROVER_COORD: 3777955.9420 1134844.2493 4995339.1358 RMS = 0.0163 d = 25.6000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.1746
 ITER = 2 ROVER_COORD: 3777955.9420 1134844.2494 4995339.1358 RMS = 0.0163 d = 12.8000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0001
 ITER = 3 ROVER_COORD: 3777955.9421 1134844.2494 4995339.1359 RMS = 0.0163 d = 6.4000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0000

~~ITER = 4 ROVER_COORD: 3777955.9421 1134844.2494 4995339.1359 RMS = 0.0163 d = 3.2000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0000~~
~~ITER = 5 ROVER_COORD: 3777955.9421 1134844.2494 4995339.1359 RMS = 0.0163 d = 1.6000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0000~~
~~ITER = 6 ROVER_COORD: 3777955.9421 1134844.2494 4995339.1359 RMS = 0.0163 d = 0.8000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0000~~
~~ITER = 7 ROVER_COORD: 3777955.9421 1134844.2494 4995339.1359 RMS = 0.0163 d = 0.4000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0000~~
 ITER = 8 ROVER_COORD: 3777955.9421 1134844.2494 4995339.1359 RMS = 0.0163 d = 0.2000 n_obs = 207644 ||dR|| = 0.0000

Date/Time: 2012-09-20 02:03:24

Różnice od FIX: - 0.0083 0.0187 - 0.0060

FIXED SOLUTION:

ROVER_FINAL_COORD: 3777955.9514 1134844.2307 4995339.1419 Standard Deviations: 0.0034 0.0014 0.0033

Date/Time 2012-09-20 02:03:32 (END)

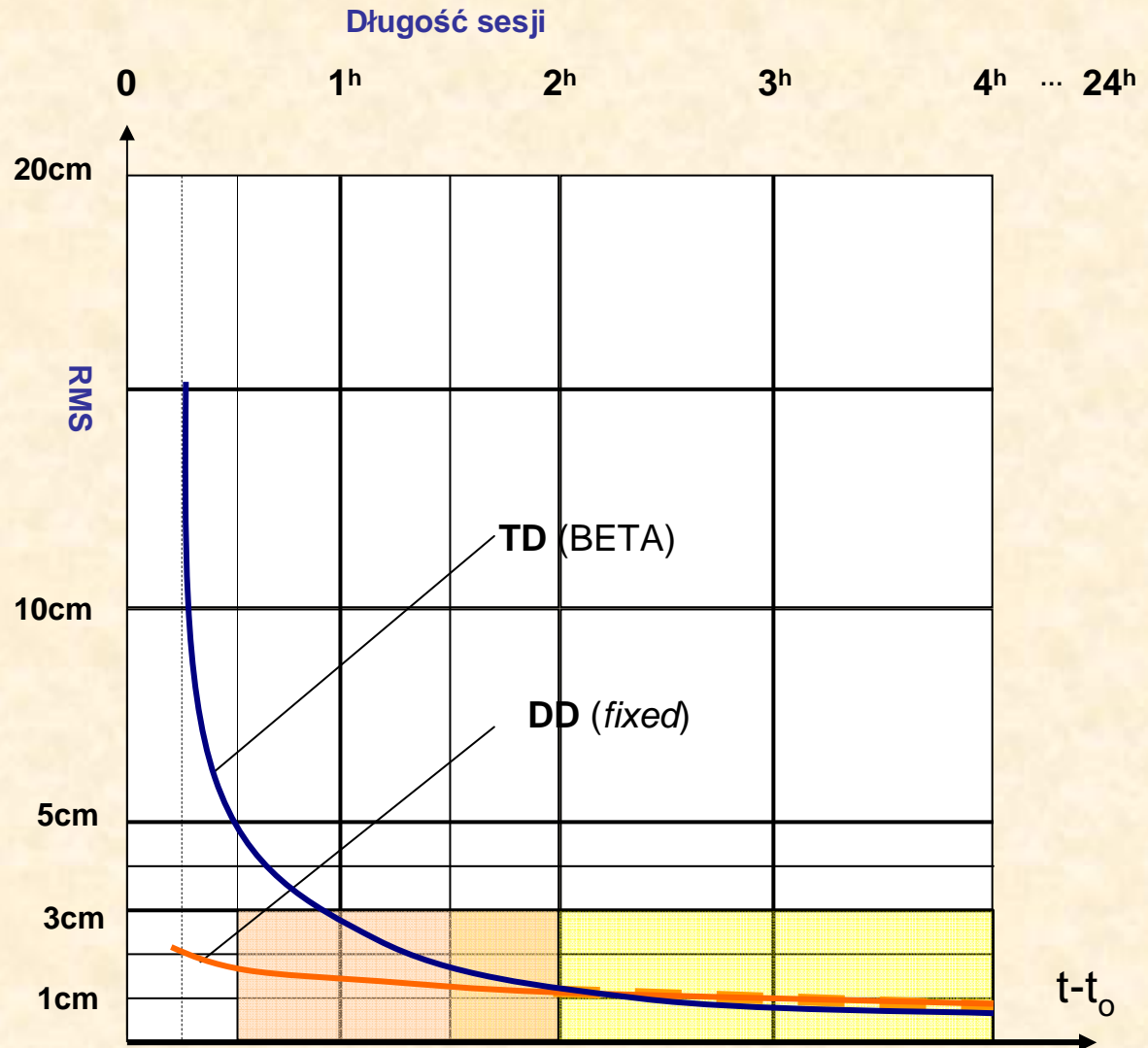
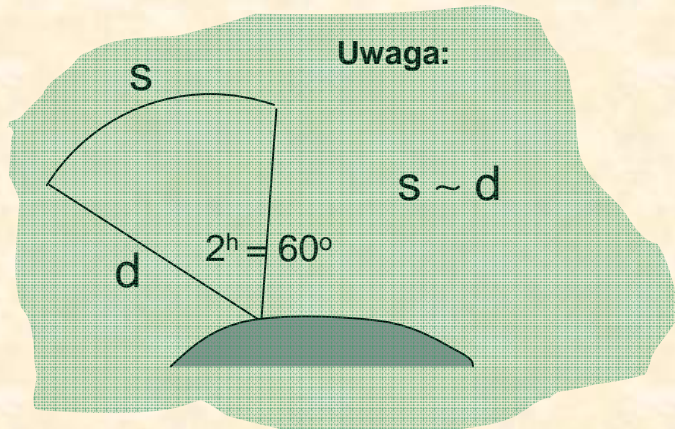


ETAP III – porównanie metod

TD (*float*) tylko dla $\Delta t_{\text{session}} > 1.5^h$
 Metoda potrójnych różnic faz dla wszystkich kombinacji par epok i par satelitów (schemat *Schreibera*); algorytm estymacji dla diagonalnej m. kowariancyjnej; automatyczna eliminacja nieoznaczoności; nie ma potrzeby definiowania satelity referencyjnego (*Kadaj, 2008*).

DD (*fixed*) - metoda podwójnych różnic faz z założeniami:

- Identyfikowanie nieoznaczoności i określanie pozycji ROVER (X,Y,Z) dla każdej pary epok (k, k+1).
- Wyrównanie wielokrotnie wyznac. pozycji Rover – z zastosowaniem estymacji mocnej.



Validacja:

DD - *fixed*

TD - BETA

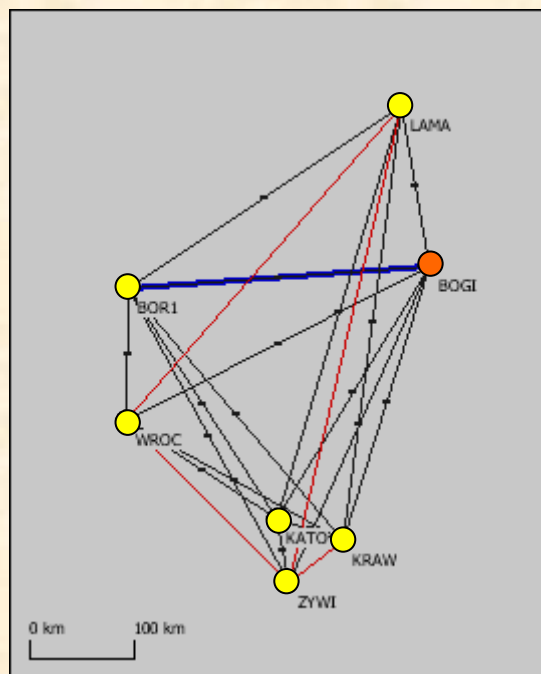
Wybór:

tylko DD - *fixed*

Użycie dwóch metod - wybór zależy od otrzymanych empirycznych param. dokładnościowych.

Test metody TD-BETA dla sesji długich (24^h)

Obserwowalność 30 satelitów w ciągu doby (A)



Pseudoobserwacje L3 (iono-free)
Orbity Final.

A:	T_begin	: 1521	0.00
	T_end	: 1521	86360.00

B:	T_begin	: 1534	86400.00
	T_end	: 1534	172760.00

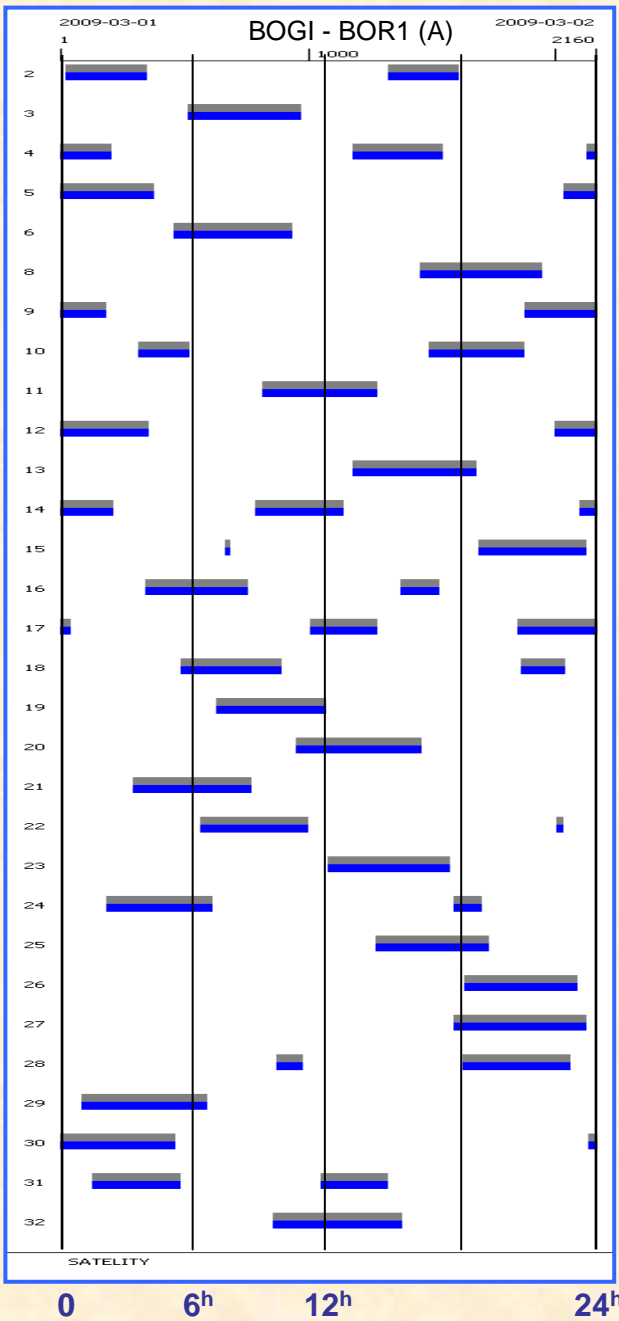
C:	T_begin	: 1542	518400.00
	T_end	: 1542	599760.00

Wyrównania swobodne sieci GPS	
Wariant	Przeciętna wypadkowa odchyłka wektora [m]
A	0.001
B	0.002
C	0.002

BOGI - XYZ katalogowe			
3633815.692 1397453.931 5035280.816			
XYZ- obliczone:			
A	.. 706	.. 937	.. 831
B	.. 687	.. 930	.. 805
C	.. 660	.. 911	.. 766
Średnie wartości współrzędnych:			
	.. 684	.. 926	.. 801

TRANS 3D(7p)	
Wariant	Błąd średni transf. [m]
A	0.004
B	0.006
C	0.004

Finalne relacje z katalogiem		
dx	dy	dz
0.008	0.005	0.015



Kwestia wykorzystania sygnałów GLONASS:

Relacja między częstotliwościami:

$$f_1/f_2 = \lambda_2/\lambda_1 = 77/60 \text{ (GPS)} \quad 9/7 \text{ (GLONASS) } ^*)$$

*) satelity $s = 1, 2, \dots$ emitują sygnały o różnej częstotliwości f_1^s, f_2^s ale o stałym stosunku 9:7

Kombinacja „iono-free” pojedynczych różnic faz:

$$\Delta r_{pq}^r(L3) = [\lambda_2^2 \cdot \Delta r_{pq}^r(L1) - \lambda_1^2 \cdot \Delta r_{pq}^r(L2)] / (\lambda_2^2 - \lambda_1^2), \quad r = \text{PRN}$$

$$\Delta r_{pq}^r(L1) = \lambda_1 \cdot \Delta \phi_{pq}^r(L1); \quad \Delta r_{pq}^r(L2) = \lambda_2 \cdot \Delta \phi_{pq}^r(L2) \quad (\text{eliminują błędy zegarów satelitów})$$

Kombinacja „iono-free” podwójnych różnic faz:

$$\Delta \Delta r_{pq}^{rs}(L3) = \Delta r_{pq}^r(L3) - \Delta r_{pq}^s(L3) \quad (\text{eliminują błędy zegarów odbiorników})$$

Dla GPS:

$$\Delta \Delta r_{pq}^{rs}(L3) = [5929 \cdot \Delta \Delta r_{pq}^{rs}(L1) - 3600 \cdot \Delta \Delta r_{pq}^{rs}(L2)] / 2329$$

(wide-lane (L5), geometry free -> int. ambiguity) oraz $\Delta \Delta r(L3) + c \cdot f(N) = \Delta \Delta \rho + e$

$$f(N) = 77 \cdot \Delta \Delta N1 - 60 \cdot \Delta \Delta N2 \quad (\text{integer}); \quad c = \lambda_2 \cdot 60 / 2329 \quad (\text{real}).$$

Dla GLONASS:

$$\Delta \Delta r_{pq}^{rs}(\text{iono-free}) = \Delta r_{pq}^r(L3^{(r)}) - \Delta r_{pq}^s(L3^{(s)})$$

$$\Delta r_{pq}^r(L3^{(r)}) = [81 \cdot \Delta r_{pq}^r(L1^{(r)}) - 49 \cdot \Delta r_{pq}^r(L2^{(r)})] / 32$$

$$\Delta r_{pq}^s(L3^{(s)}) = [81 \cdot \Delta r_{pq}^s(L1^{(s)}) - 49 \cdot \Delta r_{pq}^s(L2^{(s)})] / 32$$

Problem aplikacji *wide-lane* (L5), identyfikacji 4 nieoznaczoności dla podwójnych różnic faz (...) ale to jest inny temat.

WARIANTY ALGORYTMÓW PRZY OBLICZANIU SIECI GNSS I ZINTEGROWANYCH

Nawiązania:	Rodzaj obserwacji	
	GNSS statyczne 1	GNSS + obs. klasyczne (zintegrowane) 2
ASG-EUPOS Serwis POZGEO-D A	<ol style="list-style-type: none"> 1) Wyrównanie 3D (tylko nawiązania do stacji) 2) Transformacje do układów kartograficznych <hr/> Dla sieci precyzyjnej (2D+1D): <ol style="list-style-type: none"> 1) Rzutowanie wektorów na elipsoidę 2) Wyrównanie na elipsoidzie 3) Wyrównanie niwelacji satelitarnej 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Etap przygotowania danych <ul style="list-style-type: none"> - Wyr. GNSS 3D (stałe stacje) - Wyr. sieci klasycznej - Integracja danych w układzie BL na elipsoidzie GRS-80 lub 2000 (rzutowanie wektorów) 2) Etap finalny (2D+1D) <ul style="list-style-type: none"> - Wyr. sieci na elipsoidzie GRS-80 lub w „2000” (stałe tylko stacje) [- Transformacje BL -> xy2000] - Wyrównanie niwelacji satelit.
Inne: POLREF KLASA I + II B	<ol style="list-style-type: none"> 1) Wyr. pseudoswobodne 3D (nawiązanie do 1 punktu) 2) Przeliczenie XYZ -> xy2000e 3) Transformacja Helmerta xy2000e -> xy2000 (na osnowę) 4) Wyr. niwelacji satelitarnej 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Etap przygotowania danych <ul style="list-style-type: none"> - Wyr. pseudoswobodne 3D - Wyr. sieci klasycznej - Integracja danych w BL lub „2000” 2) Etap finalny (2D+1D) <ul style="list-style-type: none"> - Wyrównanie sieci zintegrowanej (BL lub „2000”) (naw. osnowa) - Wyr. niwelacji satelitarnej

ETAPY NUMERYCZNEGO OPRACOWANIA PRECYZYJNYCH SIECI ZINTEGROWANYCH Z WYKORZYSTANIEM STACJI ASG-EUPOS, NA PRZYKŁADACH SIECI REALIZACYJNYCH DLA TRAS KOMUNIKACYJNYCH

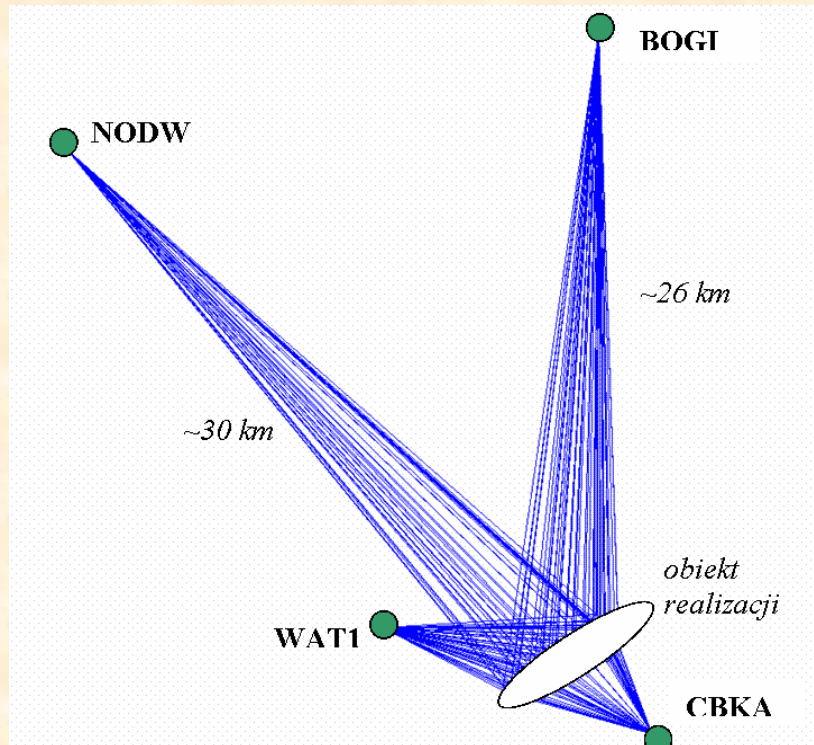
Opracowanie wstępne

- Wyrównanie pseudo-swobodne trójwymiarowej sieci wektorowej GPS w układzie kartezjańskim
- Przekształcenie wyników na elipsoidę odniesienia GRS-80 i do układu 2000 lub 1992.
 - Transformacja współrzędnych XYZ na współrzędne geodezyjne B,L,
 - Rzutowanie wektorów GPS na elipsoidę – utworzenie wektorów linii geodezyjnych
- Kontrolne wyrównanie sieci GPS na elipsoidzie oraz kontrolne wyrównanie różnic wysokości elipsoidalnych.
- Kontrolne wyrównanie sieci klasycznej w układzie „2000” lub „1992”, przy założeniu stałości punktów sieci GPS. Przeliczenie na B,L.

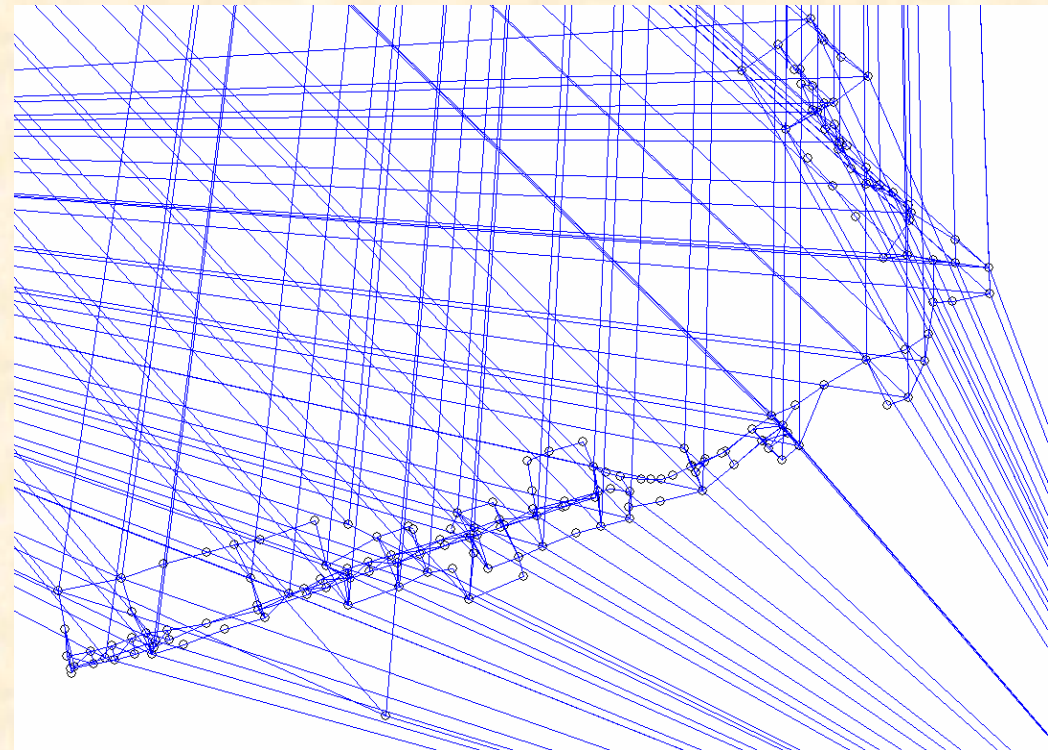
Opracowanie finalne

- Wyrównanie sieci zintegrowanej na elipsoidzie GRS-80 (nawiązanie tylko do stacji)
- Przeliczenie wyników do układu kartograficznego, np. 2000, 1992, 65 lub układ lokalny.

Przykład zintegrowanej sieci realizacyjnej dla budowy II linii metra warszawskiego



układ stacji referencyjnych, wykorzystanych do pomiaru podstawowej sieci realizacyjnej dla budowy II linii metra warszawskiego



struktura sieci zagęszczającej (klasycznej) I rzędu

Podstawowa osnowa realizacyjna II linii metra warszawskiego

Parametry wyrównania na elipsoidzie GRS-80 (ETRF'89)

Liczba wszystkich punktów sieci	$l_p =$	46
Liczba stałych punktów nawiazania	$l_s =$	4
Liczba punktów wyznaczanych	$l_r =$	42
Liczba azymutów geodezyjnych (GPS)	$l_{azg} =$	348
Liczba dlugosci GPS	$l_{dg} =$	348
Nadwymiarowosc ukkladu obserwacyjnego	$m-n =$	612
GLOBALNY WSKAZNIK NIEZAWODNOSCI:	$z = 0.8793$	$z\% = 87.9\%$

Przecietny blad polozenia (w luku) $M_p(sr) = 0.0042$ m
 Maksymalny blad polozenia (w luku) $M_p(max) = 0.0075$ m

Bład Średni jednostkowy $M_o = 0.9232$ (w. niemianowana)

Estymaty cząstkowe M_o i liczby stopni swobody:

- dla dlugosci $M_o(1) = 1.0019$ $f_1 = 306.0$
- dla azymutów $M_o(4) = 0.8370$ $f_4 = 306.0$

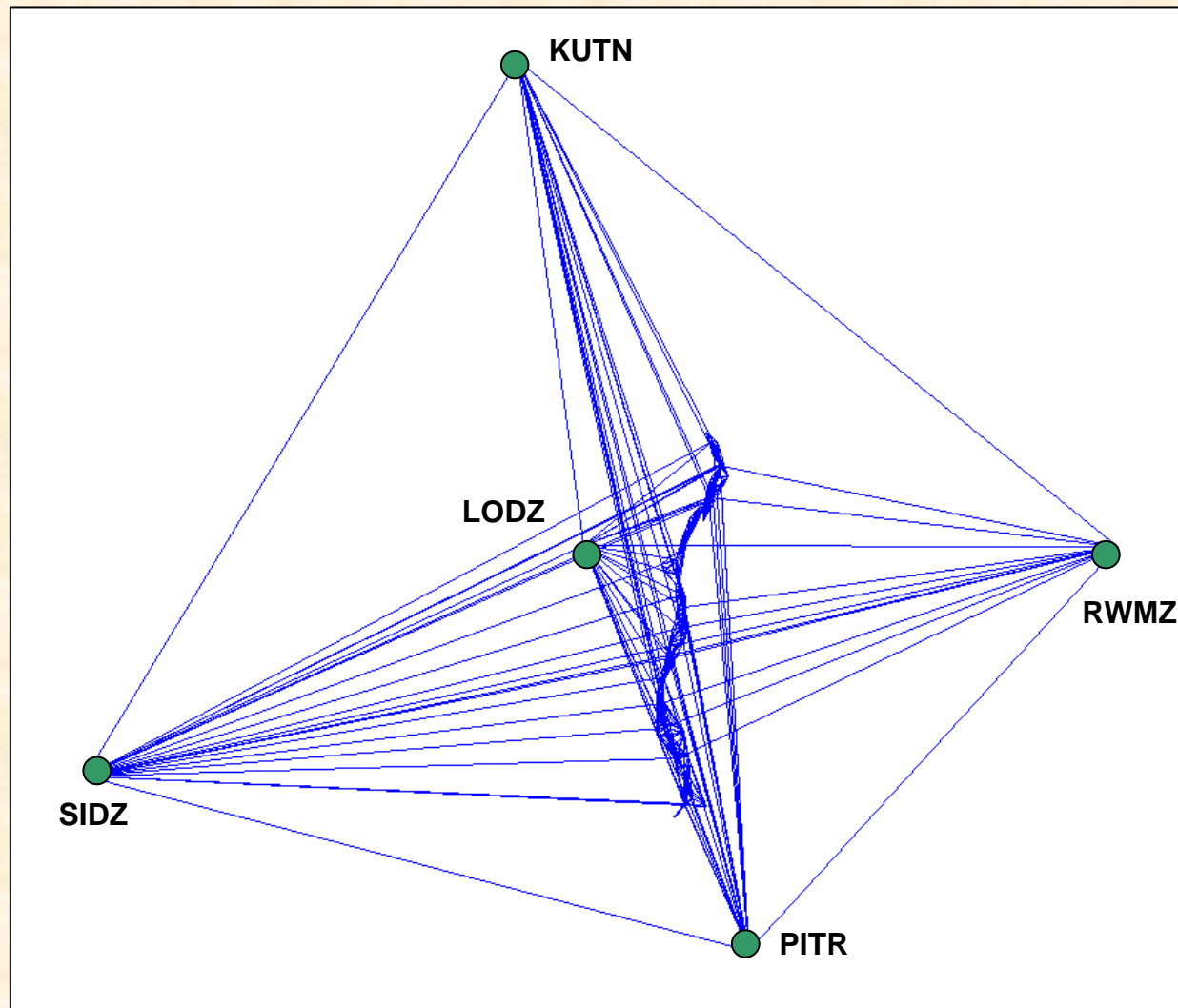
Odchyłka maksymalna dlugosci linii geodezyjnej: $vD(max.) = -0.0294$

Parametry wyrównania w układzie geocentrycznym XYZ (ETRF'89)

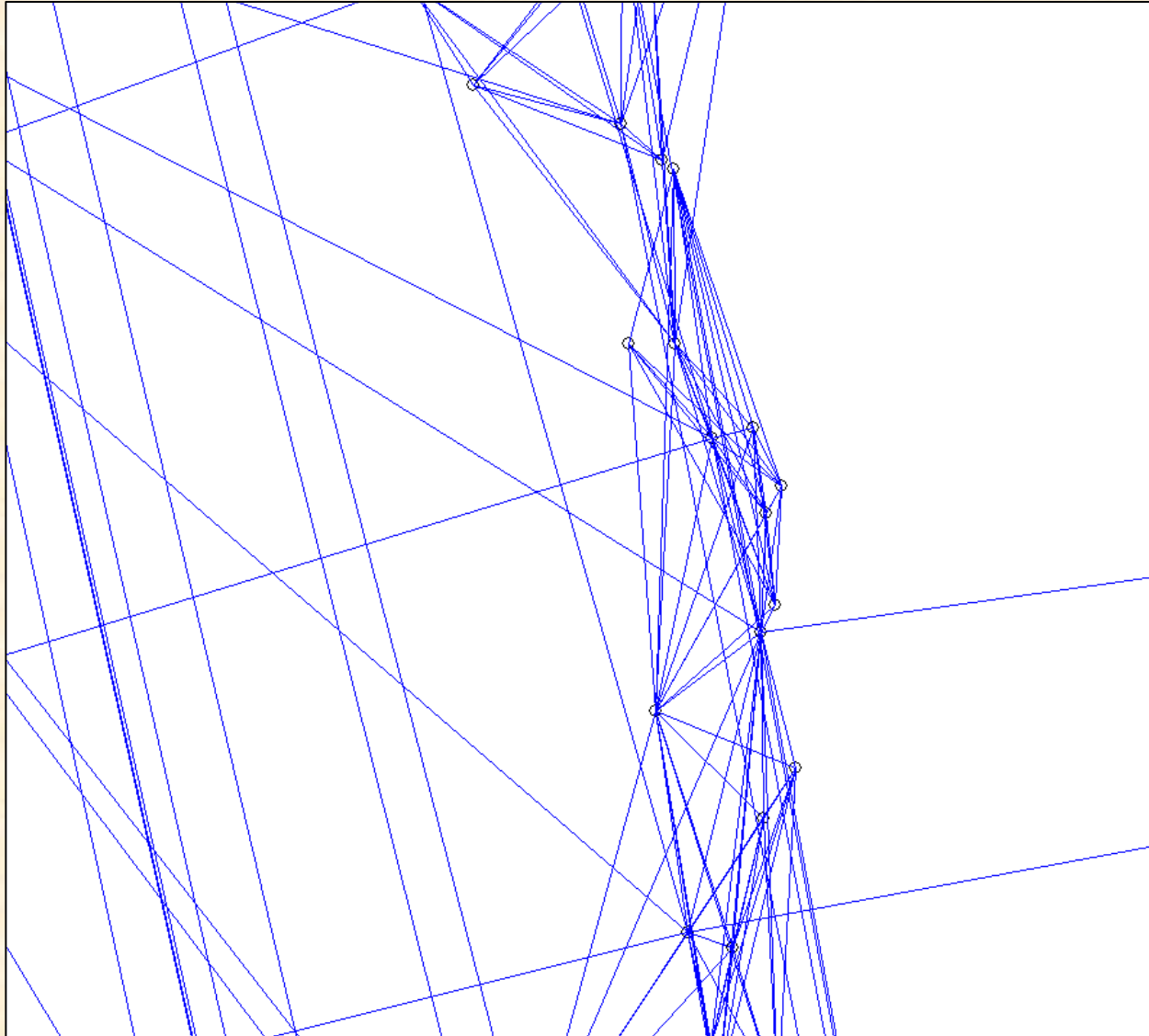
Bład sredni jednostkowy $M_o = 2.4261$

Odchyłka maksymalna dlugosci wektora: $vD(max.) = 0.1211$

**Sieć realizacyjna A1 na odcinku: STRYKÓW – TUSZYN
nawiązana do 5 stacji ASG-EUPOS**



***Sieć realizacyjna A1 na odcinku: STRYKÓW – TUSZYN
struktura geometryczna sieci***



Sieć realizacyjna A1 na odcinku: STRYKÓW – TUSZYN - parametry

PARAMETRY CAŁKOWITOLICZBOWE SIECI

Liczba wszystkich punktów sieci	lp =	88
Liczba stałych punktów nawiązania	ls =	5
Liczba punktów wyznaczanych	lr =	83
Liczba obserwacji kątowych	lka =	2
Liczba azymutów geodezyjnych (GPS)	lazg =	570
Liczba długości klasycznych	ldk =	3
Liczba długości GPS	ldg =	570
Nadwymiarowość układu obserwacyjnego	m-n =	979
GLOBALNY WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI: z = 0.8550 z% = 85.5%		

Wyrównanie na elipsoidzie GRS-80 w układzie ETRF'89

Przeciętny błąd położenia	Mp(sr) =	0.0049 m
Maksymalny błąd położenia	Mp(max)=	0.0107 m
Mo =		0.94496

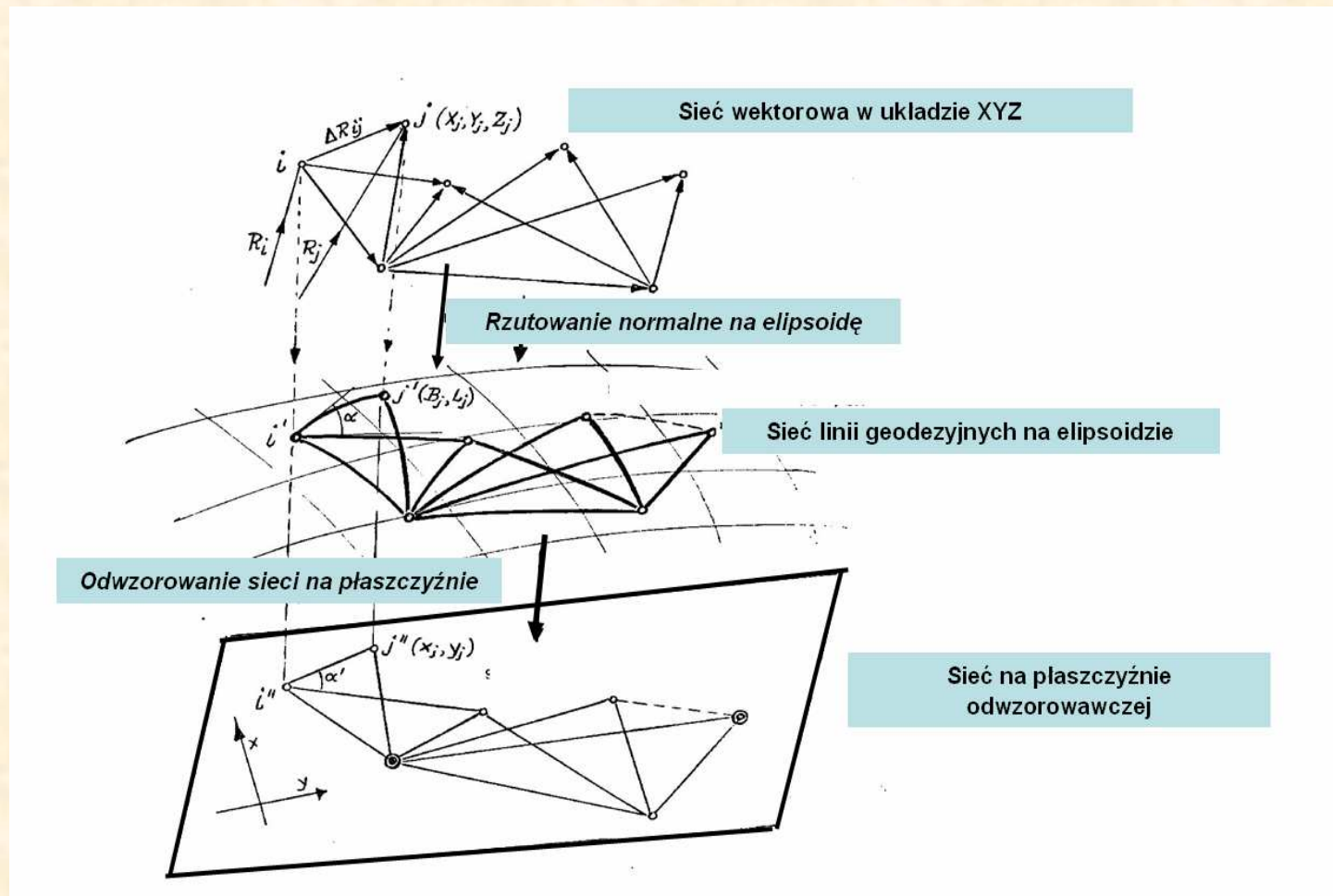
Wyrównanie w układzie „2000/18”

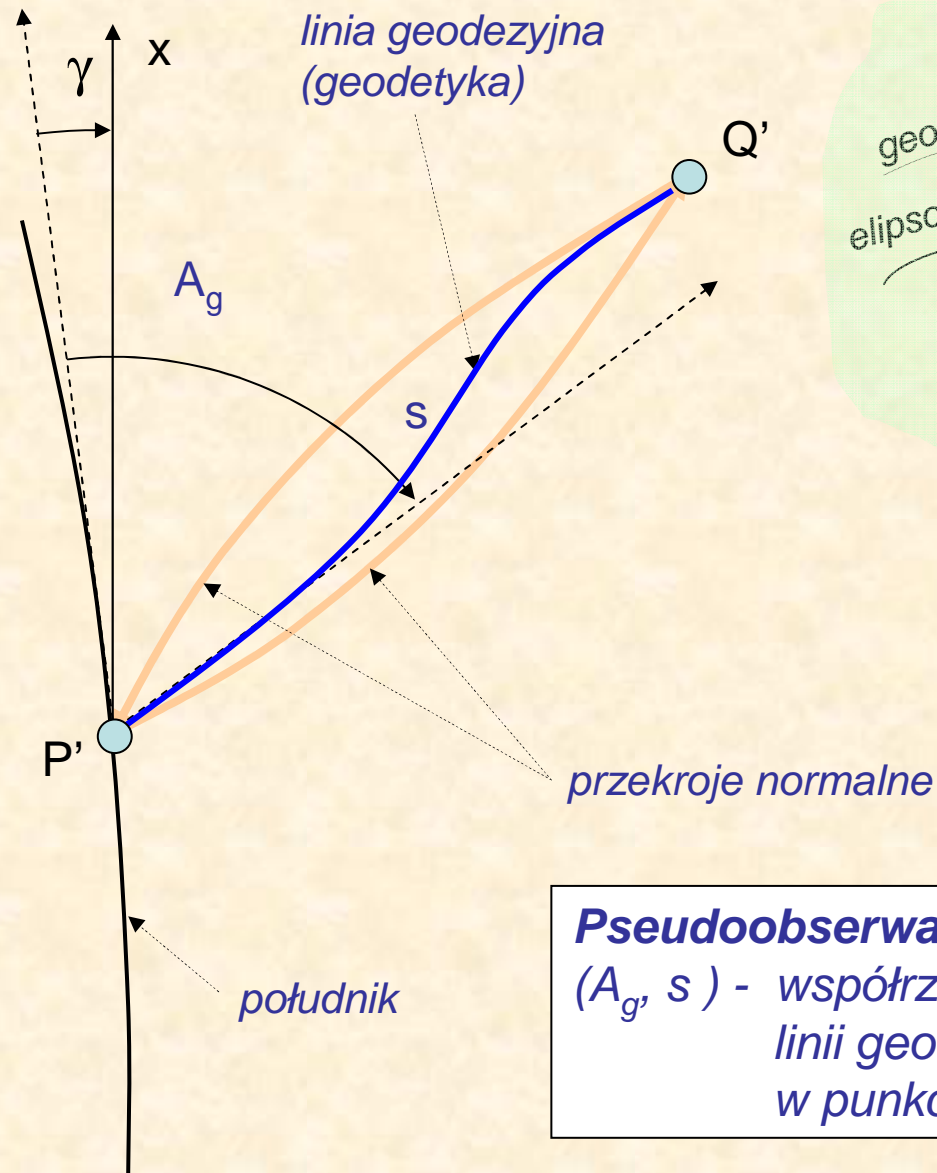
Przeciętny błąd położenia	Mp(sr) =	0.0080 m
Maksymalny błąd położenia	Mp(max)=	0.0174 m
Mo =		1.54673

Wyrównanie w układzie 1992

Przeciętny błąd położenia	Mp(sr) =	0.0097 m
Maksymalny błąd położenia	Mp(max)=	0.0211 m
Mo =		1.87394

Rzutowanie wektorów na elipsoidę – w wariantach A-2 i B-2



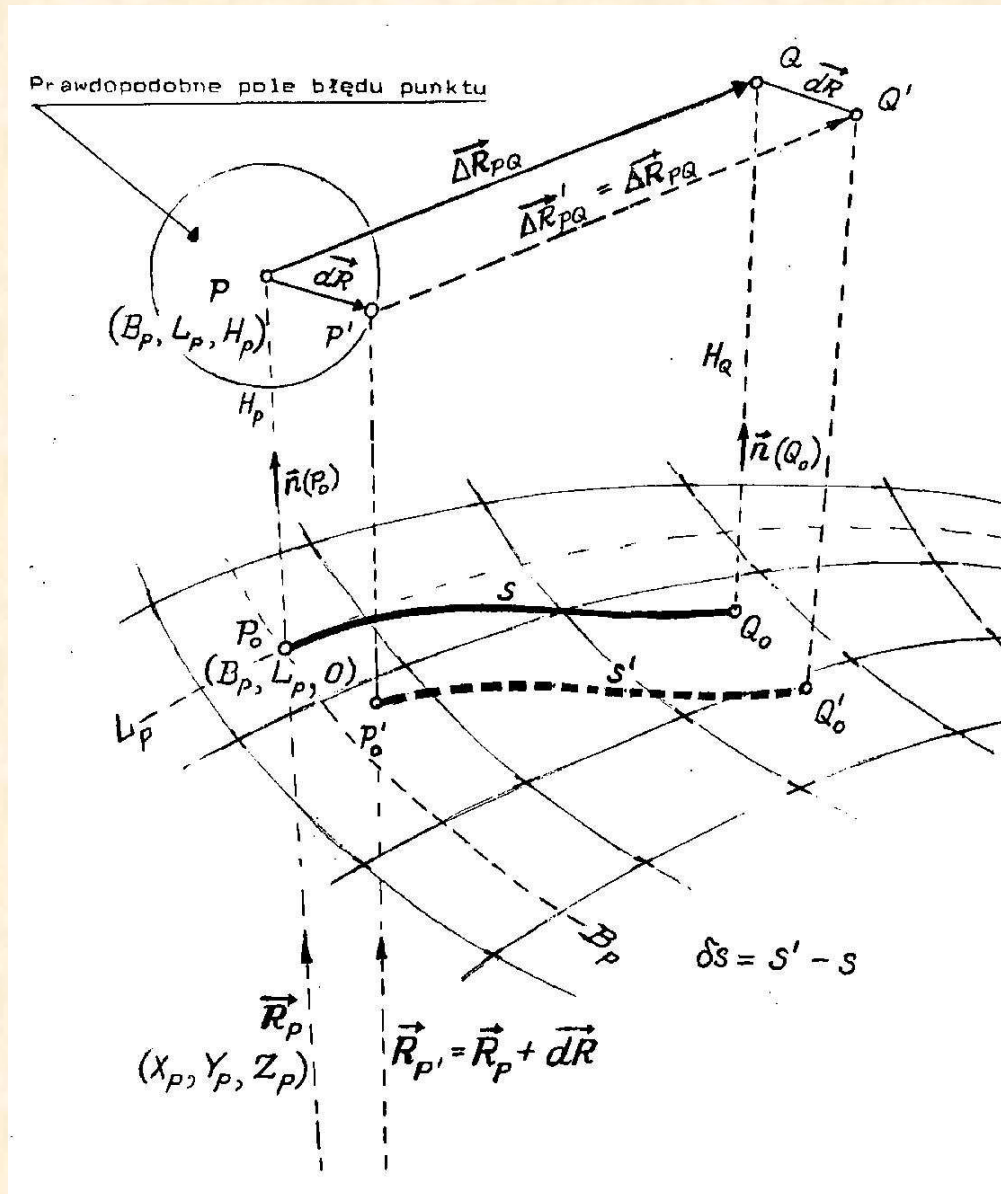


Pseudoobserwacje GNSS na elipsoidzie
 (A_g, s) - współrzędne biegunowe linii geodezyjnej o początku w punkcie P'

PSEUDO-OBSERWACJE GPS I OBSERWACJE KLASYCZNE NA ELIPSOIDZIE

OBSERWACJE PIERWOTNE	OBSERWACJE ZREDUKOWANE
<p>Wektory kartezjańskie GPS</p> <p>$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$</p>	<p>wektory linii geodezyjnych i różnic wysokości geometrycznych</p> <p>$(A_g, s), \quad dH$ (dla sieci wysok.)</p>
<p>Długości skośne i horyzontalne</p>	<p>długości linii geodezyjnych na elipsoidzie</p>
<p>Kąty (kierunki) horyzontalne</p>	<p>kąty (kierunki) między liniami geodezyjnymi na elipsoidzie</p>

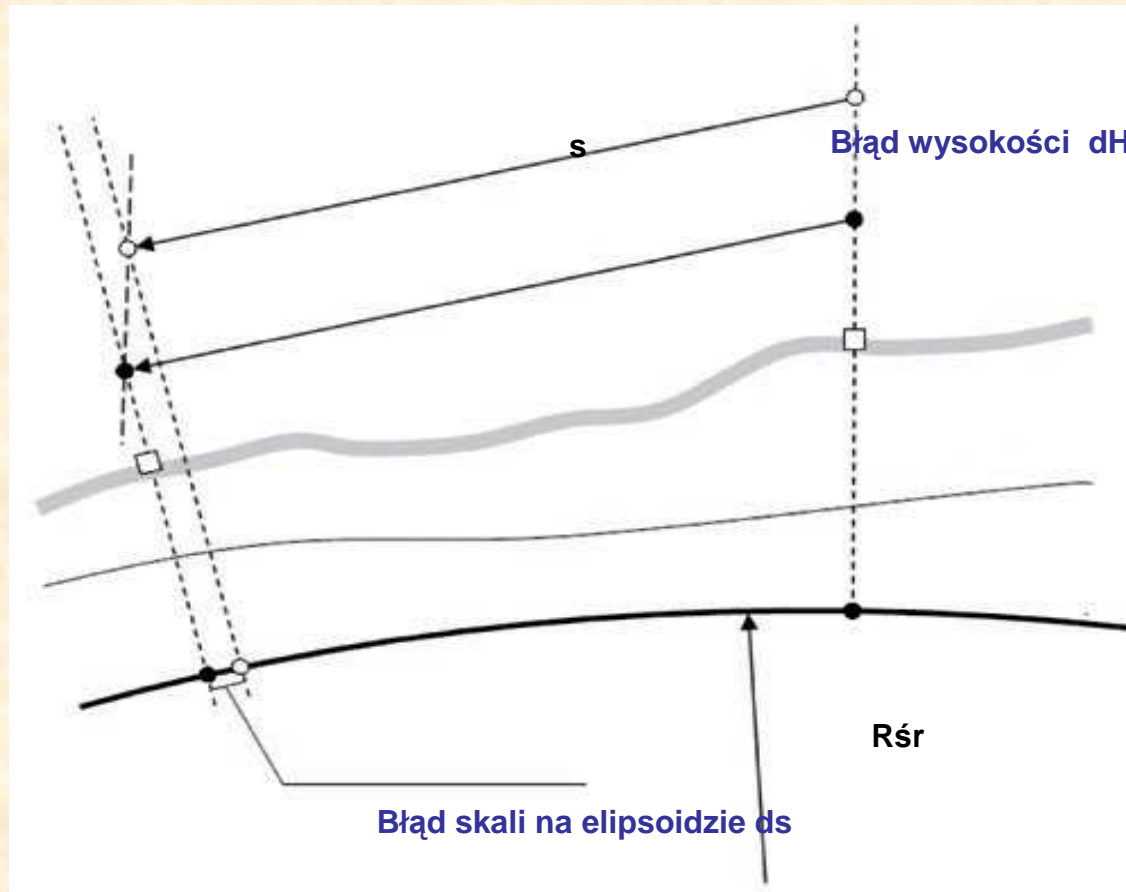
WPŁYW BŁĘDU PRZESUNIĘCIA POZIOMEGO WEKTORA GPS



$ds = 0.0000868 * dR_{max} * [s]^2$ [mm].
 dR_{max} - błąd położenia poziomego metrach
 $[s]$ - długość linii w km
 ds - zmiana długości linii geodezyjnej

Przykład:
 $dR_{max} = 10m, s = 10$ km
 $ds = 0.000868 * 100 = 0.09$ mm

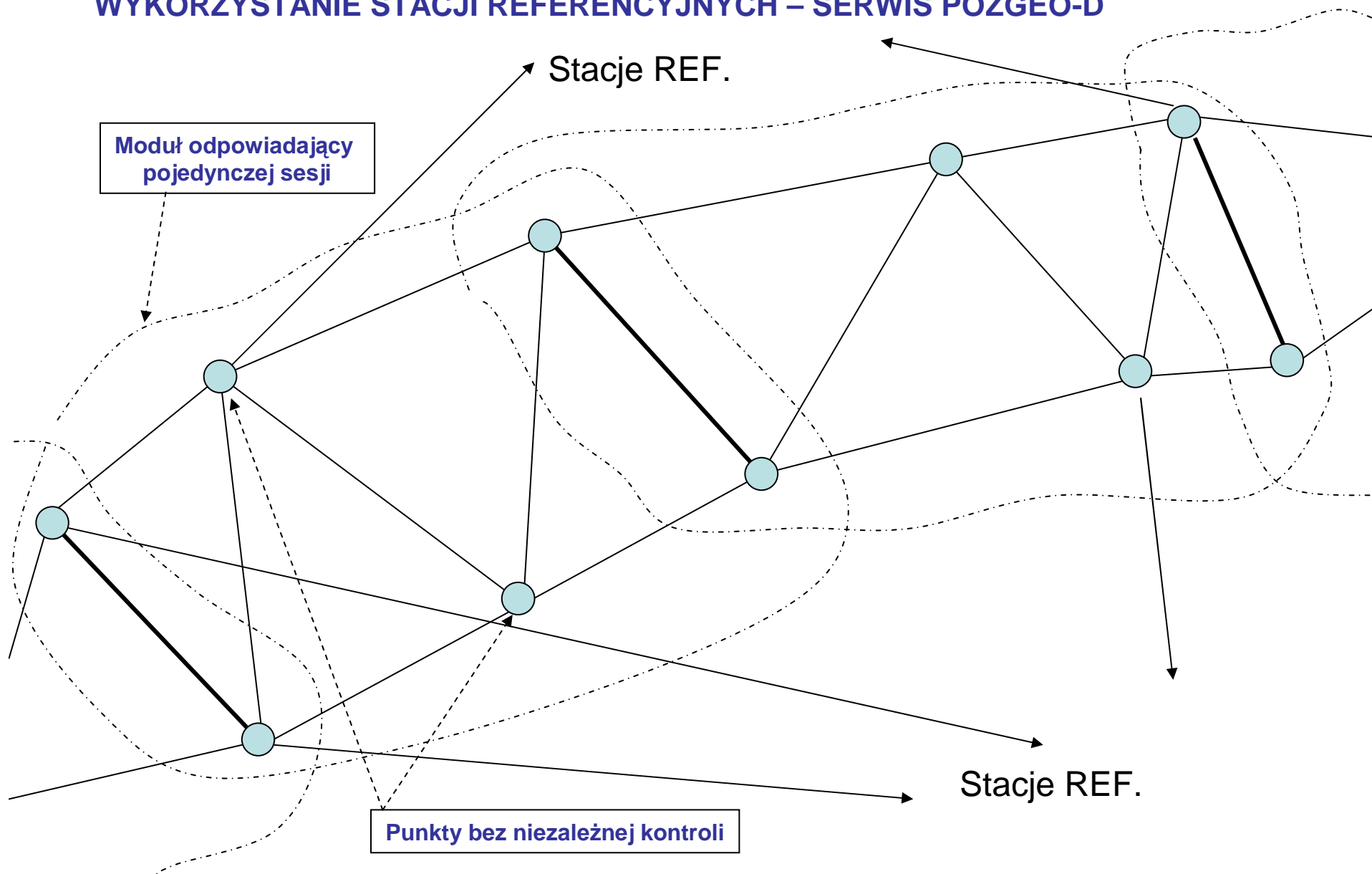
WPŁYW BŁĘDU WYSOKOŚCI WEKTORA GPS NA SKALĘ SIECI



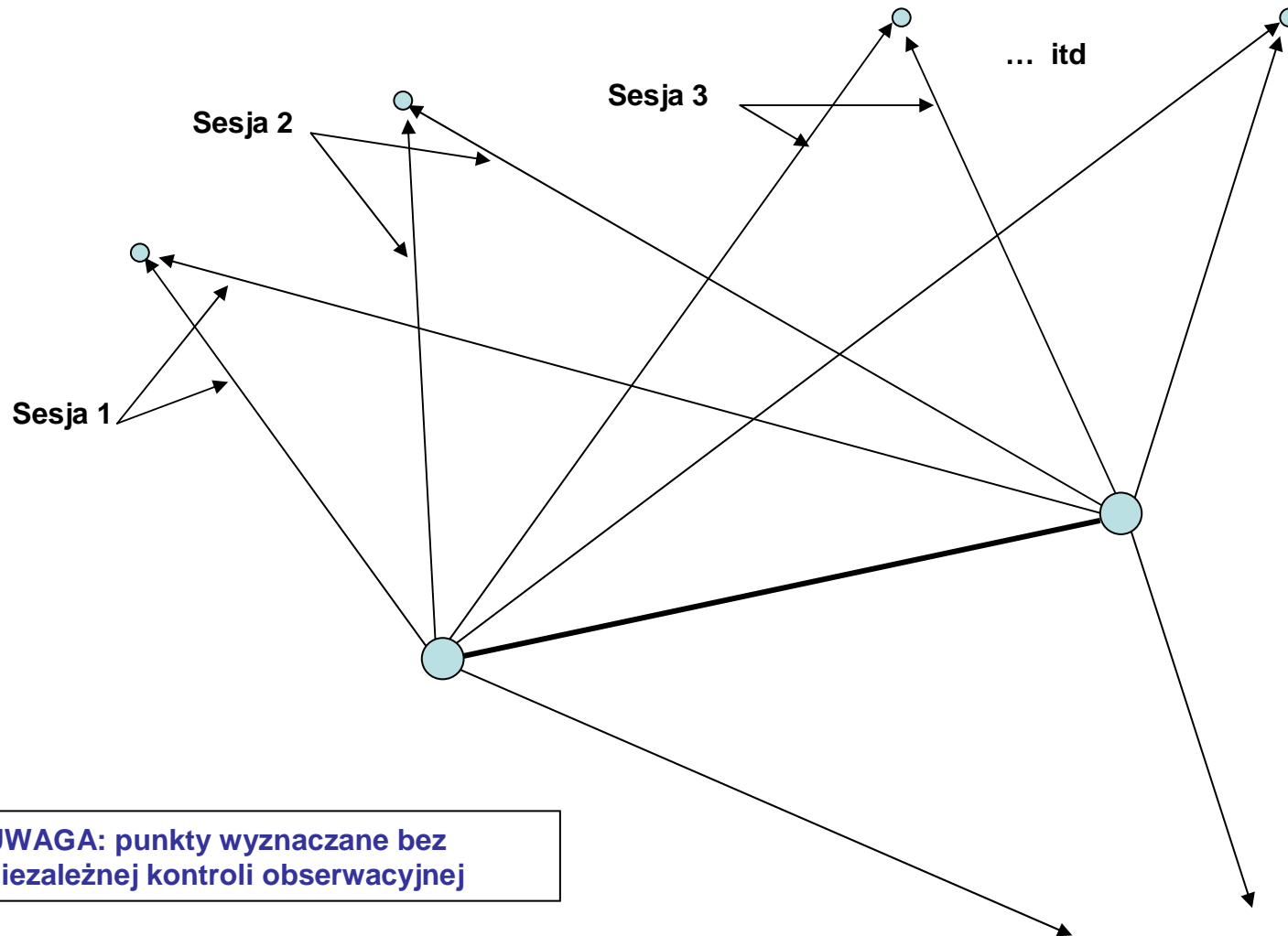
$$ds = dH \cdot s / R_{śr}$$

Przykład: $s=10\text{km}$, $dH=100\text{m}$
 $ds \approx 16\text{ cm}$

SIEĆ MODULARNA GPS (dla tras komunikacyjnych) WYKORZYSTANIE STACJI REFERENCYJNYCH – SERWIS POZGEO-D

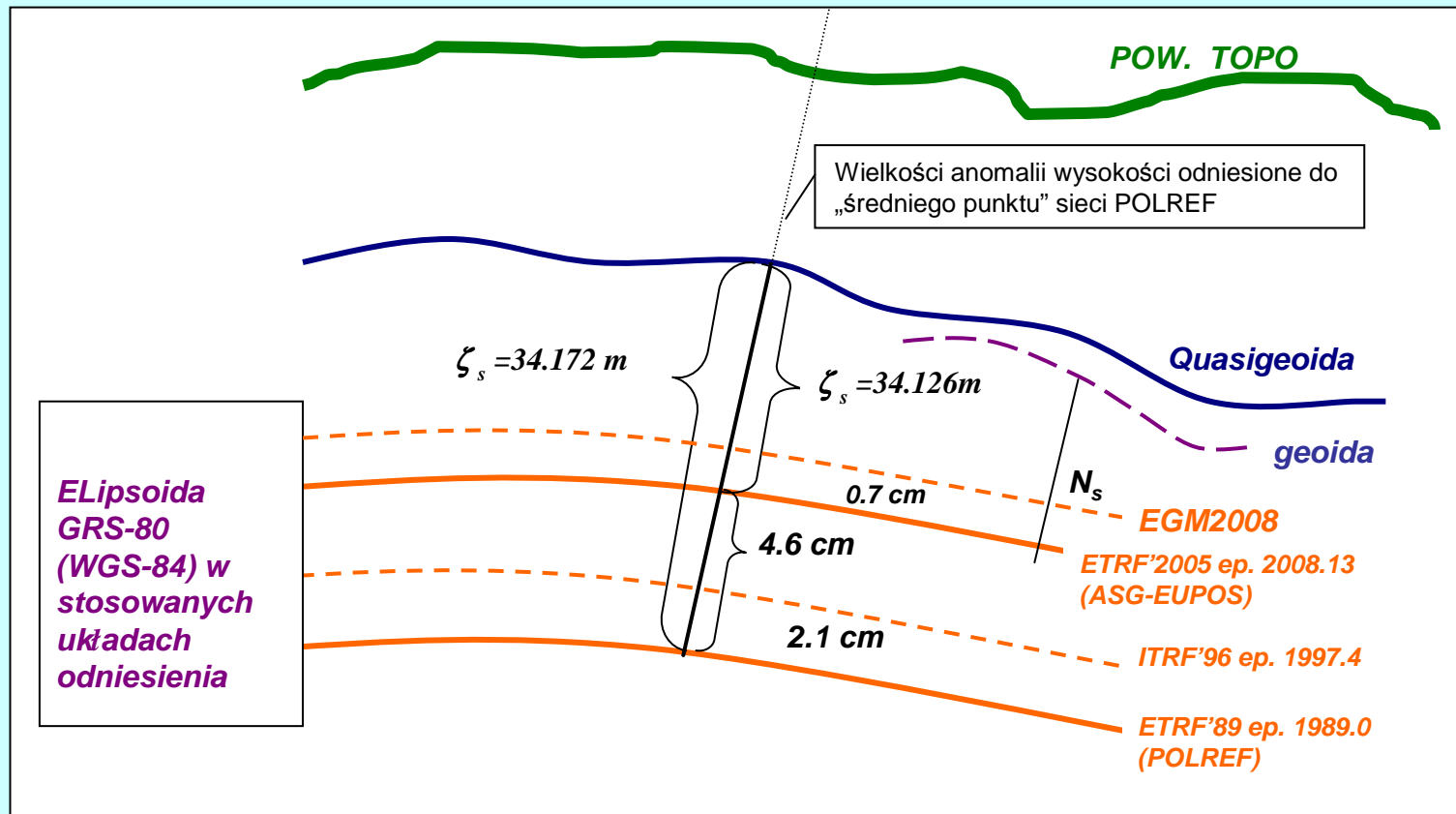


PROBLEM NIEZAWODNOŚCI W POMIARACH STATYCZNYCH GPS (przykład negatywny: wyznaczenie punktu tylko z wektorów jednej sesji obserwacyjnej)



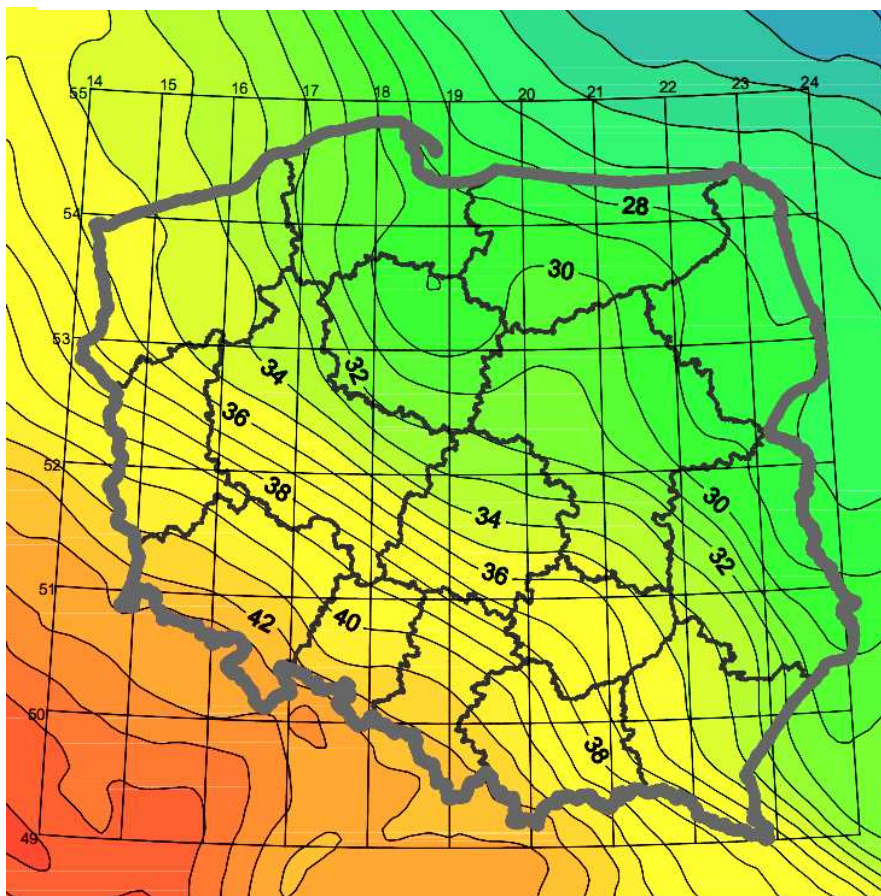
UWAGA: punkty wyznaczone bez niezależnej kontroli obserwacyjnej

Niwelacja satelitarna, w szczególności przy korzystaniu z serwisów POZGEO, POZGEO-D. Kalibracje i transformacje modeli quasigeoidy.



Komentarz: teoretycznie powinna zachodzić równość potencjałów normalnego na elipsoidzie (ekwipotencjalnej) i rzeczywistego na geoidzie ($U_0 = W_0$). W praktyce, system wysokościowy z geoidą lub quasigeoidą (Łyszkowicz A., 1993; Łyszkowicz i Forsberg 1995) nie ma związku z przyjmowanymi (w latach późniejszych) układami odniesienia 3D (ETRF), definiującymi równocześnie elipsoidę odniesienia. Modele geoidy odniesione do innej elipsoidy (np. w ETRF'89) należy zawsze skalibrować na aktualny system wysokości elipsoidalnych. W przeciwnym razie zadania niwelacji satelitarnej będą obarczone błędem systematycznym.

Quasigeoida GEOIDPOL-2008C utworzona na bazie modelu EGM2008 (*Pavlis i in.* NGA [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html]) poprzez jego kalibrację na zbiorze empirycznych anomalii wysokości punktów geodezyjnych: ASG-EUPOS i sieci EUVN.



Izolinie anomalii wysokości [m]

Sieć odniesienia (satelitarno-niwelacyjna) do kalibracji quasigeoidy: 141 punktów w tym:
 101 stacji **ASG_EUPOS**
 40 punktów sieci **EUVN** (z kampanii 2010/11)

Etapy tworzenia GEOIDPOL-2008 A (C)

I. Wygenerowanie z modelu EGM2008

anomalii wysokości ζ dla

- siatki geograficznej o „oczku” 0.01° w zakresie: B: 48° - 56° , L: 13° – 25° (962001pkt)
- punktów **ASG-EUPOS** i **EUVN** i przeliczenie:

$$(BL \zeta)_{EGM08} \Rightarrow (XYZ)_{EGM08} \text{ (grid + osnowa)}$$

II. Utworzenie zbioru empirycznych (pomiarowych) anomalii wysokości dla punktów ASG-EUPOS i sieci EUVN oraz przeliczenie:

$$\zeta = H(\text{ETRF}'2000 \text{ ep.2011}) - H_n(\text{Kronstadt '86})$$

$$(BL \zeta)_{\text{ETRF}'00} \Rightarrow (XYZ)_{\text{ETRF}'00} \text{ (osnowa)}$$

III. 3D – TRANS z korektami Hausbrandta:

$$(XYZ)_{EGM08} \text{ (grid+osnowa)}$$

$$(XYZ)_{\text{ETRF}'00} \text{ (osnowa)}$$



$$(XYZ)_{\text{ETRF}'00} \text{ (grid)}$$



IV. Przekształcenie finalne:

Model GEOIDPOL_2008A(C):

$$(BL \zeta)_{\text{ETRF}'00} \text{ (grid)}$$

Niektóre własności modeli GEOIDPOL_2008, 2008A, 2008C

Wszystkie modele mają: rozdzielczość $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ i zakres B: $48^\circ - 56^\circ$ L: $14^\circ - 25^\circ$

GEOIDPOL_2008

- bazowy układ odniesienia siatki modelu: ETRF'89 (PL)
(przejdzie do układu ETRF'2005 ep.2008.13 przez transformację anomalii wysokości)
- kalibracyjne punkty osnowy: POLREF+EUREF-POL+EUVN (400pkt) – empiryczne (pomiarowe) anomalie wysokości wyrażone w układzie ETRF'89 (PL)
- źródłowa dane EGM2008: undulacje geoidy w siatce 1' (z dyskretnego modelu NGA)
- podstawowy test kontrolny: stacje ASG-EUPOS (101pkt):
 $d = \zeta [\text{prognoza_geoidpol2008}] - \zeta [\text{empiryczne (pomiarowe)}]$
 odchyłki: $d_{sr} = -0.007$, RMS = 0.017 zakres: $\langle -0.051, 0.050 \rangle$

GEOIDPOL_2008A

- bazowy układ odniesienia siatki modelu: ETRF'2000 ep. 2011.0
- kalibracyjne punkty osnowy: stacje ASG-EUPOS + EUVN (101+40 = 141 pkt)
- źródłowe dane EGM2008 jak w modelu GEOIDPOL_2008
- podstawowy test kontrolny: EUREF-POL+POLREF+EUVN (393 pkt 400 - 7***)
 odchyłki: $d_s = 0.005$ RMS = 0.022 zakres: $\langle -0.056, 0.105 \rangle$

GEOIDPOL_2008C

- bazowy układ odniesienia siatki modelu: ETRF'2000 ep. 2011.0
- kalibracyjne punkty osnowy: stacje ASG-EUPOS + EUVN (101+40 = 141 pkt)
- źródłowe dane EGM2008: wygenerowane na podstawie opublikowanych współczynników harmonicznym sferycznym anomalie wysokości dla punktów siatki 0.01° i osnowy.
- podstawowy test kontrolny: EUREF-POL+POLREF+EUVN (393 pkt 400 - 7***)
 odchyłki: $d_s = -0.004$ RMS = 0.021 zakres: $\langle -0.056, 0.073 \rangle$

FORMUŁA RÓŻNICOWA TRANSFORMACJI ANOMALII WYSOKOŚCI:

$$\begin{aligned} [X1, Y1, Z1] &\Rightarrow [X2, Y2, Z2] \\ [B1, L1, \zeta1_{EGM08}] & [B2, L2, \zeta2_{GEOIDPOL-2008C}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X2 &= X1 + (-0.0097) + (-0.00000000233) * DX + (0.00000003335) * DY + (-0.00000005214) * DZ; \\ Y2 &= Y1 + (-0.0031) + (-0.00000003335) * DX + (-0.0000000233) * DY + (-0.00000006386) * DZ; \\ Z2 &= Z1 + (-0.0135) + (0.00000005214) * DX + (0.00000006386) * DY + (-0.0000000233) * DZ; \\ DX &= X1 - XS1; \quad DY = Y1 - YS1; \quad DZ = Z1 - ZS1; \\ XS1 &:= 3702867.3121 \quad YS1 := 1315710.5245 \quad ZS1 := 5001712.2324 \end{aligned}$$

Średniokwadratowe odchyłki współrzędnych:

$$S_x = 0.0130 \quad S_y = 0.0046 \quad S_z = 0.0172$$

Ochyłki bezwzględnie maksymalne

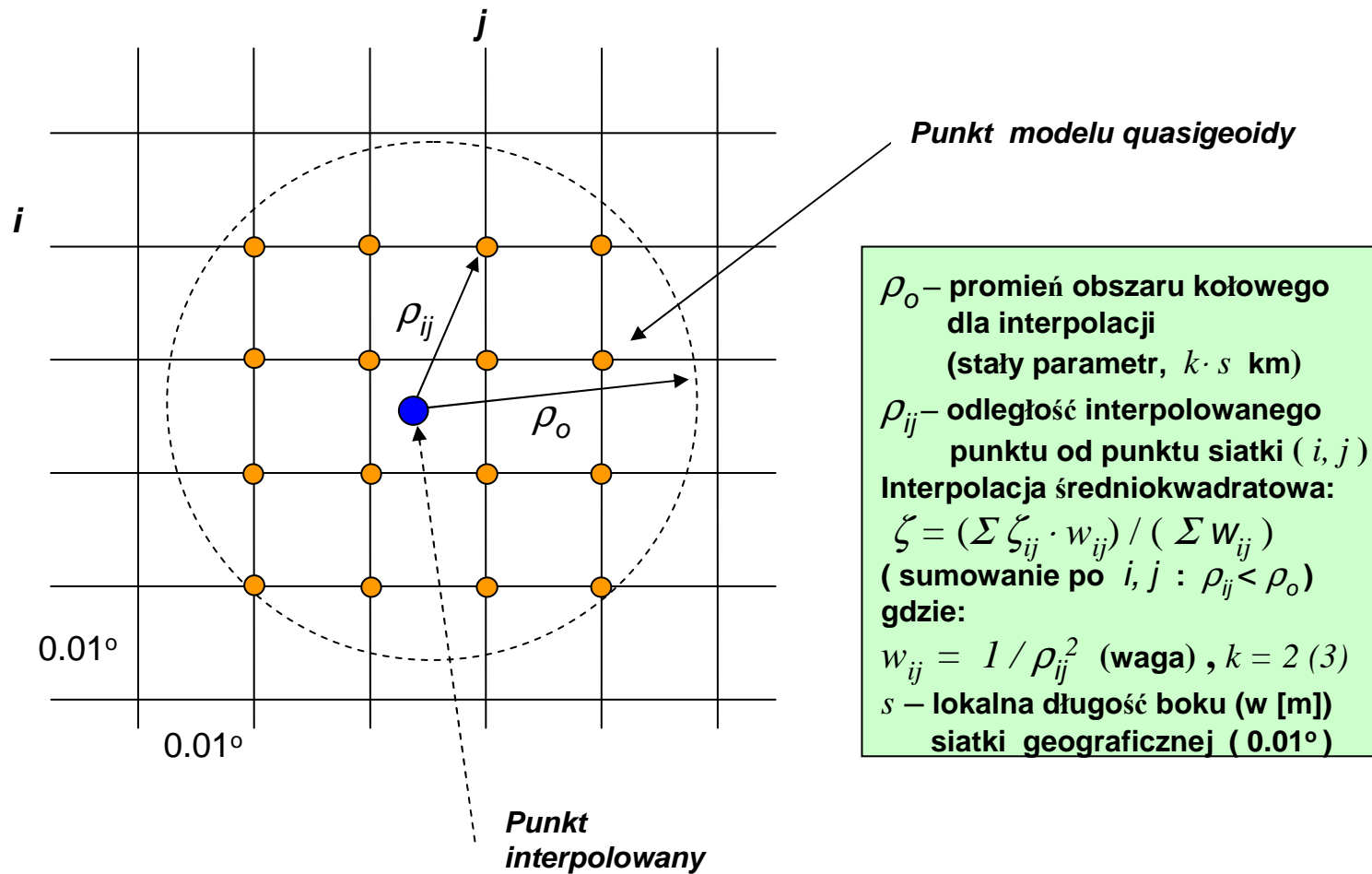
NWSC	0.0331	0.0124	0.0408	***	
PRZM	-0.0360	-0.0147	-0.0467	***	*) (niwelacja, czy model ?)
ZYWI	0.0428	0.0144	0.0528	***	
003	0.0418	0.0158	0.0519	***	EUVN GRYBÓW

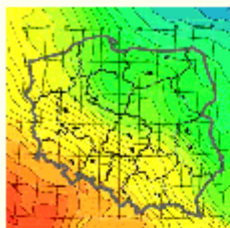
Inne oceny porównawcze EGM2008 z modelami lokalnych quasigeoid:
Hirt C., 2011 (na obszarze Niemiec)
Trojanowicz M. 2009 (na obszarze Dolnego Śląska) oraz
Kryński J., Kloch-Główka G., (2009)

*) Wyciąg z operatu wyrównania sieci wysokościowej III klasy dla miasta Przemyśla – analiza stałości reperów II klasy, świadcząca o problemach z samą osnową wysokościową II klasy, do której stacje ASG-EUPOS były nawiązywane:

W wyrównywanej sieci występowało ogółem 38 reperów II klasy. Na podstawie przeprowadzonej analizy (wyrównania swobodne) stwierdzono, że tylko 22 repery zachowuje stałość - przyjęto je jako repery nawiązania. W tych warunkach wyrównana sieć spełnia kryteria jakościowe osnowy wysokościowej III klasy. Pozostałe 16 reperów II klasy wykazuje przemieszczenie pionowe rzędu 0.02 - 0.03 m, wykraczające istotnie poza szacowaną dokładność wyznaczenia wysokości (por. błędy średnie wysokości wyrównanych w protokole wyrównania max.MH = 0.004m). [Kwestia może dotyczyć np. położenia reperów w pobliżu szlaków komunikacyjnych dla ciężkiego taboru, powodujące drgania i osiadania gruntu]. W wyrównaniu uwzględniono podwójne różnice wysokości, ponieważ były one wyznaczane niezależnie, mając istotne znaczenie dla wiarygodnej oceny błędu średniego jednostkowego (Mo).

Średniokwadratowa interpolacja quasigeoidy





QUASI - GEOIDA GEOIDPOL 2008C

oparta na modelu globalnym EGM-2008

http://earth-info.nga.mil/GandG/wsg84/gravitymod/egm2008/egm08_wsg84.html

i polskich osnowach satelitarno - niwelacyjnych EUVN + stacje ASG-EUPOS

INFO

UKŁAD ODNIESIENIA WYSOKOŚCI NORMALNYCH: Kronstadt '86

OKREŚL UKŁAD ODNIESIENIA DLA WYSOKOŚCI ELIPSOIDALNYCH:

- ETRF'1989 (PL) [EUVN + EUREF-POL + POLREF]
- ETRF'2005 epoka 2008.13 [ASG-EUPOS - obecny]
- ETRF'2000 epoka 2011.00 [ASG-EUPOS - proponowany]

DANE:

BL

=> Obliczenie odstępów N =>

BLH_e

H elipsoidalne => H normalne [Kronstadt '86]

BLH_n

H normalne [Kronstadt '86] => H elipsoidalne

WYNIKI:

BLN

BLH_n.1

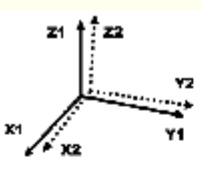
BLH_e.1

OBLICZAJ

Wyjście =>

Folder roboczy = E:\

TRANS_ETRS_PL v. 1.0 (11. Czerwiec 2012)
(c) ALGORES-SOFT www.geonet.net.pl



TRANS_ETRS_PL

PROGRAM TRANSFORMACJI WSPÓŁRZĘDNYCH GEOCENTRYCZNYCH XYZ
 POMIĘDZY RÓŻNYMI UKŁADAMI ETRF [...] SYSTEMU ETRS89
 ZREALIZOWANYMI W POLSCE PRZEZ OSNOWY PODSTAWOWE I STACJE ASG-EUPOS

precyzja zapisu wyników

dotatkowe wykazy wynikowe

ZBIÓR WEJŚCIOWY

- XYZ_1989
[ETRF89 / ep. 1989.0 (POLREF, EUVN)]
- XYZ_2005
[ETRF2005 / ep. 2008.13 ASG-EUPOS]
- XYZ_2000
[ETRF2000 / ep. 2011.0 (rekomendowany)]

ZBIÓR WYNIKOWY

- XYZ_1989.1
[ETRF89 / ep. 1989.0 (POLREF, EUVN)]
- XYZ_2005.1
[ETRF2005 / ep. 2008.13 ASG-EUPOS]
- XYZ_2000.1
[ETRF2000 / ep. 2011.0 (rekomendowany)]

OBLICZAJ

Wyjście =>

Folder roboczy = c:\0_0_0_PORZADEK\GEO-UKLADY\TRANS_ETRF_1

Kody procedur transformacji (w j. DELPHI) pomiędzy układami: ETRF'89 (PL - POLREF), ETRF'2005 ep. 2008.13 (obecny ASG-EUPOS), ETRF'2000 ep. 2011.0 (proponowany dla ASG-EUPOS)
Dane źródłowe: *Liwosz T., Rogowski J., Kruczyk M., Rajner M., Kurka W. (2012); Jaworski L. (CBK), 2012, Bosy J. (2011); Dane z CODGK: Sieci POLREF i EUVN oraz raporty szczegółowe Kampanii 2010-2011*

// TRANS ETRF'2005/ep2008.13 ⇒ ETRF'2000/ep2011.0
// (obecny ASG-EUPOS) (nowy – proponowany)

```
procedure XYZ2008_XYZ2011(var x1,y1,z1,x2,y2,z2:extended);
var xs1,ys1,zs1,dx,dy,dz: extended;
begin
  XS1:= 3704191.47035; YS1:= 1319675.19105; ZS1:= 5000172.34553;
  dx := (X1-XS1)*0.00001;
  dy := (Y1-YS1)*0.00001;
  dz := (Z1-ZS1)*0.00001;
  X2 := X1 + (-0.0139)+(-0.000000)*dx+( 0.000273)*dy+(-0.000882)*dz;
  Y2 := Y1 + (-0.0152)+(-0.000273)*dx+(-0.000000)*dy+(-0.000523)*dz;
  Z2 := Z1 + (-0.0147)+( 0.000882)*dx+( 0.000523)*dy+(-0.000000)*dz;
end;
```

// TRANS ETRF'2000/ep2011 ⇒ ETRF'2005/ep2008.13
// (nowy proponowany) (obecny ASG-EUPOS)

```
procedure XYZ2011_XYZ2008(var x1,y1,z1,x2,y2,z2:extended);
var xs1,ys1,zs1,dx,dy,dz: extended;
begin
  XS1:= 3704191.45640; YS1:= 1319675.17588; ZS1:=5000172.33085;
  dx := (X1-XS1)*0.00001;
  dy := (Y1-YS1)*0.00001;
  dz := (Z1-ZS1)*0.00001;
  X2 := X1 + ( 0.0139)+(-0.000000)*dx+(-0.000273)*dy+( 0.000882)*dz;
  Y2 := Y1 + ( 0.0152)+( 0.000273)*dx+(-0.000000)*dy+( 0.000523)*dz;
  Z2 := Z1 + ( 0.0147)+(-0.000882)*dx+(-0.000523)*dy+(-0.000000)*dz;
end;
```

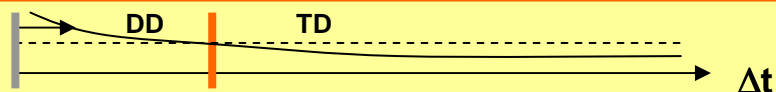
// TRANS ETRF'89 (PL) ⇒ ETRF'2000/ep2011.0
// (POLREF) (nowy – proponowany)

```
procedure XYZ1989_XYZ2011(var X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2:extended);
var xs1,ys1,zs1,dx,dy,dz: extended;
begin
  XS1:= 3696865.55949; YS1:= 1301613.58847; ZS1:= 5009805.50249;
  dx := (X1-XS1)*0.00001;
  dy := (Y1-YS1)*0.00001;
  dz := (Z1-ZS1)*0.00001;

  X2 := X1 + (-0.0345)+(-0.005948)*dx+(-0.001921)*dy+( 0.004966)*dz;
  Y2 := Y1 + (-0.0374)+( 0.001921)*dx+(-0.005948)*dy+( 0.008406)*dz;
  Z2 := Z1 + (-0.0555)+(-0.004966)*dx+(-0.008406)*dy+(-0.005948)*dz;
end;
```

// TRANS ETRF'2000/ep2011 ⇒ ETRF'89(PL)
// (nowy proponowany) (POLREF)

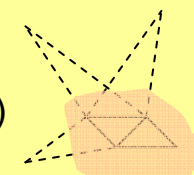
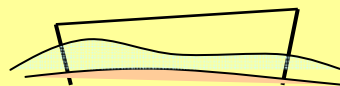
```
procedure XYZ2011_XYZ1989(var x1,y1,z1,x2,y2,z2:extended);
var xs1,ys1,zs1,dx,dy,dz: extended;
begin
  XS1:= 3696865.52504; YS1:= 1301613.55103; ZS1:= 5009805.44696;
  dx := (X1-XS1)*0.00001;
  dy := (Y1-YS1)*0.00001;
  dz := (Z1-ZS1)*0.00001;
  X2 := X1 + ( 0.0345)+( 0.005948)*dx+( 0.001921)*dy+(-0.004966)*dz;
  Y2 := Y1 + ( 0.0374)+(-0.001921)*dx+( 0.005948)*dy+(-0.008406)*dz;
  Z2 := Z1 + ( 0.0555)+( 0.004966)*dx+( 0.008406)*dy+( 0.005948)*dz;
end;
```

SYNTEZA:

Dokładność i niezawodność pozycjonowania z użyciem serwisów POZGEO lub POZGEO-D

- Krótkie (< 30') sesje w **POZGEO** lub **POZGEO-D** nie wykluczają wprowadzie wysokiej precyzji ale są ryzykowne ze względu na **niską niezawodność wewnętrzną** pozycjonowania.
- Najwyższe (milimetrowe) precyzje i dobre niezawodności wewnętrzne pozycjonowania dla wektorów o długościach (50 – 500 km) uzyskuje się metodą **TD – BETA** w sesjach dłuższych niż 2^h.
- Poprawna **niezawodność zewnętrzną** wymaga aby obserwacje na każdym punkcie sieci były wykonane przynajmniej w dwóch sesjach obserwacyjnych, w różnych warunkach zewnętrznych, ale alternatywnym (najlepszym) sposobem na uzyskanie poprawnej niezawodności zewnętrznej jest integracja pomiarów GNSS z pomiarami klasycznymi.

Wyrównanie sieci hybrydowych (zintegrowanych) z użyciem serwisów POZGEO lub POZGEO-D

- Ze względu na znaczne odległości punktów od stacji referencyjnych wyrównanie sieci zintegrowanej powinno być zawsze realizowane na elipsoidzie (we współrzędnych B, L) po przekształceniu wektorów kartezjańskich ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) w wektory linii geodezyjnych ($A^g, s, \Delta H^e$). Ten sposób powoduje również eliminację ewentualnych błędów o kierunku wertykalnym). Wyrównanie sieci w układzie „2000” lub „1992” może być obarczone istotnym błędem numerycznym.
- Dla sieci precyzyjnych punktami nawiązania powinny być wyłącznie stacje referencyjne. Alternatywą może być przekształcenie innych osnów (POLREF, I+II klasa do układu stacji)


Niwelacja satelitarna


- Model globalny **EGM2008** w zakresie anomalii wysokości skalibrowany na 141 punktów o największej wiarygodności w zakresie wyznaczeń wysokości normalnych (101 stacji **ASG-EUPOS** + 40 punktów sieci **EUVN** z najnowszych kampanii pomiarowych) wykazuje błąd przeciętny **< 2 cm** (dane z 393 punktów kontrolnych). Model skalibrowany: **GEOIDPOL_2008C** w formie gotowego programu, do skopiowania wraz z referatem.

LITERATURA

- Bosy J.:** Wyniki weryfikacji wyników integracji podstawowej osnowy geodezyjnej na obszarze kraju ze stacjami referencyjnymi systemu ASG-EUPOS. Wrocław, 30 listopada 2011r. Raport dla GUGiK – Warszawa
- Hirt C., (2011):** Assessment of EGM2008 over Germany using accurate quasigeoid heights from vertical deflections, *GCG05 and GPS/levelling*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 136(3): pp. 138-149.
- Jaworski L. i in.** (2012): Zintegrowanie podstawowej osnowy geodezyjnej ze stacjami referencyjnymi systemu ASG-EUPOS ETAP IV. Opracowanie i wyrównanie obserwacji GNSS. Raport CBK dla GUGiK, Warszawa, lipiec – 2012.
- Kadaj R. (1988):** Eine Klasse von Schätzverfahren mit praktischen Anwendungen. *ZfV* (8)1988, 157-166.
- Kadaj R. (1992):** An Alternative to a discrete Kalman Filter. In K.Linkwitz/U.Hangleiter (Eds): High Precision Navigation 91, Dümmler Verlag 1992, pp 379-386.
- Kadaj R. (2008):** New algorithms of GPS post-processing for multiple baseline models and analogies to classical geodetic network. *Geodesy and Cartography (PL)*, Vol. 57, No 2, 2008, pp. 61-79
- Kadaj R., Świętoń T. (2008):** Automatic Postprocessing Software (APPS) for TRIMBLE Application in ASG-EUPOS – System. Version 2.** (2008 - 2011). GEOTRONICS – Poland sp. z o.o. Katowice
- Kadaj R.** (2012): GEOIDPOL-2008: a new centimetre accuracy quasigeoid model for the area of Poland based on global geopotential EGM-2008 model and EUVN, EUREF-POL and POLREF geodetic networks. [internet –publ. in PL], © ALGORES-SOFT - Rzeszów, www.geonet.net.pl, 1/2012, 7.05.2012.
- Kashani I., Wielgosz P., Greiner-Brzezińska D. (2003):** Datum Definition in the Long Range Instantaneous RTK GPS Network Solution. *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 2, No.2, pp. 100-1008
- Kryński J. (2007):** Precise Quasigeoid Modelling in Poland – Results and Accuracy Estimation. Warszawa, IGiK, 2007, ISBN: 978-83-60024-11-9
- Kryński J., Kloch-Główka G. (2009):** Evaluation of the Performance of the New EGM2008 Global Geopotential Model over Poland. *Geoinformation Issues*, Vol. 1, No 1, 7-17/2009.
- Liwoś T., Rogowski J., Kruczyk M., Rajner M., Kurka W.** (2012): Wyrównanie kontrolne obserwacji satelitarnych GNSS wykonanych na punktach ASG-EUPOS, EUREF-POL, EUVN, POLREF i osnowy I klasy wraz z oceną wyników. Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej Wydział Geodezji i Kartografii Politechnika Warszawska, Warszawa, 15 grudnia 2011. Raport dla GUGiK
- Łyszkowicz A., (1993):** The Geoid for the Area of Poland. *Artificial Satellites*, Vol. 28, No 2, Planetary Geodesy, No 19, 1993, pp. 75-150
- Łyszkowicz A., Forsberg R., (1995):** Gravimetric Geoid for Poland Area Using Spherical FFT, *Artificial Satellites*, Vol. 29, No 1, Planetary Geodesy No 21, pp. 1-11
- Niell A. E. (2000):** Improved atmospheric mapping functions vor VLBI and GPS. *Earth Planets Space* 52(10), pp. 703-708
- Pavlis N.K.; Holmes S.A. Kenyon S.C., Factor J.K., (2008a):** The EGM2008 Global Gravitational Model. American Geophysical Union, Fall Meeting 2008
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K., (2008b):** An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, EGU General Assembly 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-01891
- Pażus R., Osada E., Olejnik S., (2002):** Levelling Geoid 2001 (in PL), *GEODETA*, No 5(84), 2002
- Teunissen P.J.G. (1995):** The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A Method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of Geodesy* 70 (1-2), pp. 65-82
- Trojanowicz M.** Estimation of an accuracy of global geopotential models EGM96 and EGM08 at lower Silesia area. *Acta Scientiarum Polonorum, Geodesia et Descriptio Terrarum* 8(1) 2009, pp. 19-30.
- Yang M., Goad C., Schaffrin B. (1994):** Real-time on-the-fly ambiguity resolution over short baseline in the presence of anti-spoofing. *Proceedings of ION GPS-94*, Salt Lake City, p. 519

Dziękuję za uwagę

Roman J. Kadaj
geonet@geonet.net.pl
Politechnika Rzeszowska
Katedra Geodezji *im. K. Weigla*