



Analiza wpływu interferencji fal wtórnych na obserwacje systemu Galileo

mgr inż. Maciej Grzymała
dr inż. Dominik Próchniewicz

Zakład Geodezji i Astronomii Geodezyjnej
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

Systemy odniesień przestrzennych – podstawy geodynamiczne,
aktualne realizacje oraz kierunki rozwoju
Grybów, 10.06.2022 r.



Zgodnie z naszą najlepszą wiedzą, brakuje kompleksowego porównania wielotorowości dla systemów GPS oraz Galileo, zarówno w dziedzinie obserwacji, jak i wyników pozycjonowania, dla wszystkich dostępnych typów obserwacji obu systemów, przy jednakowych warunkach pomiarowych oraz z uwzględnieniem wpływu szumu pomiarowego na dokładność obserwacji.

Cel pracy:

Wyznaczenie wpływu wielotorowości na pomiary kodowe i fazowe systemów Galileo i GPS (z uwzględnieniem wszystkich typów sygnałów) oraz analiza wielkości tego efektu w dziedzinie obserwacji i współrzędnych.

- Obserwacje zarejestrowane przez dwie stacje: WUT1 i WUT2
- Precyzyjny sprzęt pomiarowy: odbiorniki Septentrio PolaRx5 i anteny typu *choke ring*
- Obserwacje 1-sekundowe z jednej doby: 180. dzień 2018 r.



Table 1. Type of observations used in the experiment.

System	Signal	Number of Satellites	System	Signal	Number of Satellites
Galileo	E1-C	19	GPS	L1-C/A	32
	E5a-Q	19		L2C(L)	20
	E5b-Q	19		L2W(P(Y))	32
	E5-Q	19		L5 Q	12
	E6-C	19			



Metodyka – wielotorowość dla obserwacji kodowych



Równania pseudoodległości dla obserwacji kodowych i fazowych:

$$P = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta O + \delta I + \delta T + M + E$$

$$L = \rho + \lambda N + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta O - \delta I + \delta T + m + \epsilon$$

Odjęcie stronami obu równań pozwala wyeliminować wpływ większości z błędów pomiarowych:

$$P - L = -\lambda N + 2\delta I + M + E - m - \epsilon$$

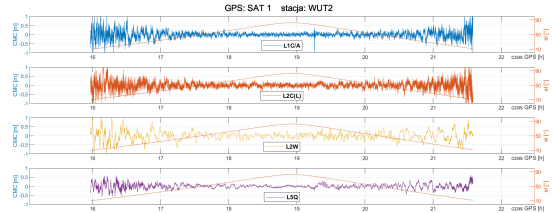
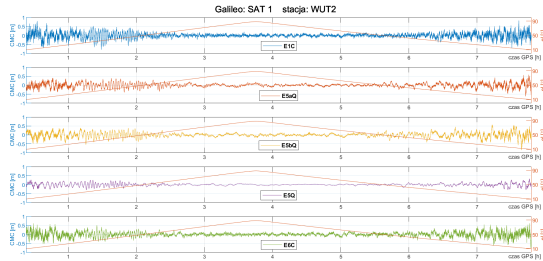
Wielkości błędu wielotorowości m i szumu pomiarowego ϵ dla obserwacji fazowych są przynajmniej 1/2 rzędu wielkości mniejsze niż dla obserwacji kodowych, zatem składniki te można pominąć:

$$CMC = P - L = -\lambda N + 2\delta I + M + E$$

Opóźnienie jonosferyczne można wyeliminować z równania wykorzystując obserwacje na dwóch częstotliwościach, a parametr nieoznaczoności wykorzystując średnią ruchomą:

$$\widetilde{CMC} = M + E$$

$$\widetilde{CMC} = M + E$$



Rysunek 1: Wartości kombinacji kod minus faza dla satelitów E01 Galileo i G01 GPS



Odchylenie standardowe kombinacji *kod minus faza* zapisać można jako:

$$\sigma_{\widetilde{CMC}}^2 = \sigma_M^2 + \sigma_E^2$$

Ponieważ efekt wielotorowości cechuje się pewną okresowością, jego wpływ jest niezmienny w bardzo krótkich odstępach czasu, możemy przyjąć, że dla sąsiednich epok t_1, t_2 : $M(t_1) \simeq M(t_2)$. Wykonując różnice kombinacji *CMC* w czasie, otrzymamy zatem:

$$\Delta\widetilde{CMC}(t_{12}) = E(t_2) - E(t_1)$$

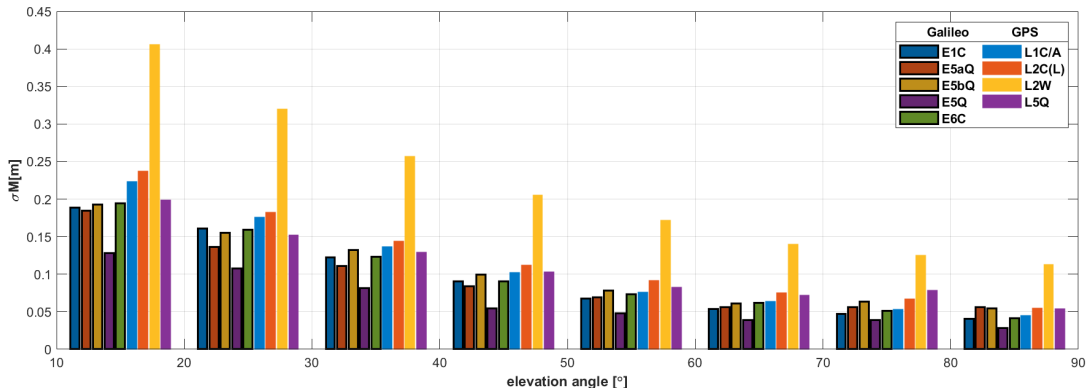
Przyjmując założenie stochastyczne, iż charakterystyka statystyczna szumu pomiarowego w bliskich epokach, jest jednakowa, to odchylenie standardowe szumu dla tych epok będzie również takie samo. Uwzględniając współczynnik czasowy korelacji szumu pomiarowego q zapisać można:

$$\sigma_{\Delta\widetilde{CMC}(t_{12})}^2 = (\sigma_{E(t_2)}^2 + \sigma_{E(t_1)}^2)(1 - q) \simeq 2\sigma_E^2(1 - q_t)$$

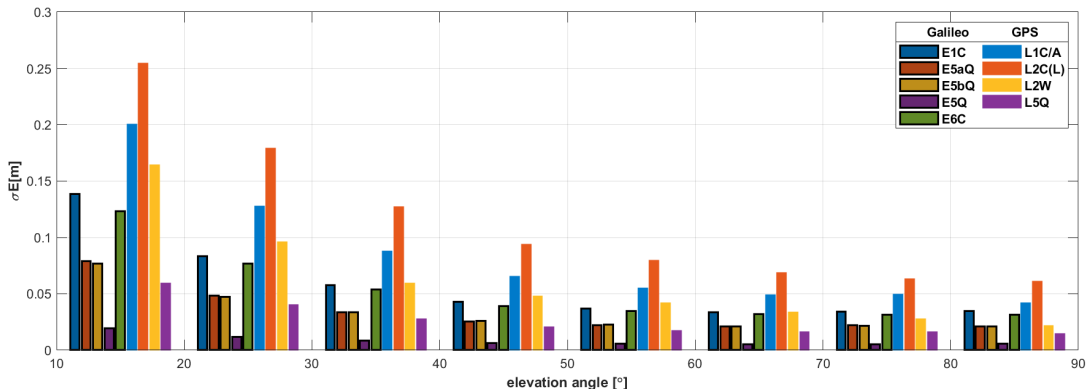
Odchylenie standardowe szumu pomiarowego i wpływu wielotorowości na obserwacje kodowe zapisać można jako:

$$\sigma_E \simeq \frac{\sigma_{\Delta\widetilde{CMC}(t_{12})}}{\sqrt{2(1 - q_t)}}$$

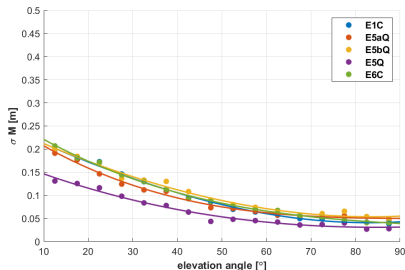
$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_{\widetilde{CMC}}^2 - \sigma_E^2}$$



Rysunek 2: Odchylenie standardowe wpływu wielotorowości na obserwacje kodowe, w zależności od elewacji satelitów, dla stacji WUT2



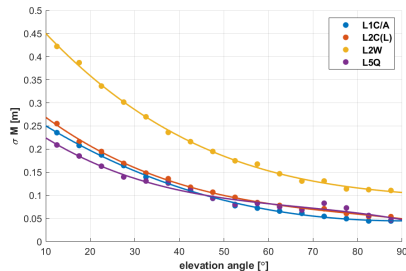
Rysunek 3: Odchylenie standardowe szumu obserwacji kodowych, w zależności od elewacji satelitów, dla stacji WUT2



Coefficient of Determination (R-Squared)

E1C	E5aQ	E5bQ	E5Q	E6C
0.995	0.992	0.986	0.977	0.996

Rysunek 4: Wielotorowość w funkcji elewacji dla Galileo



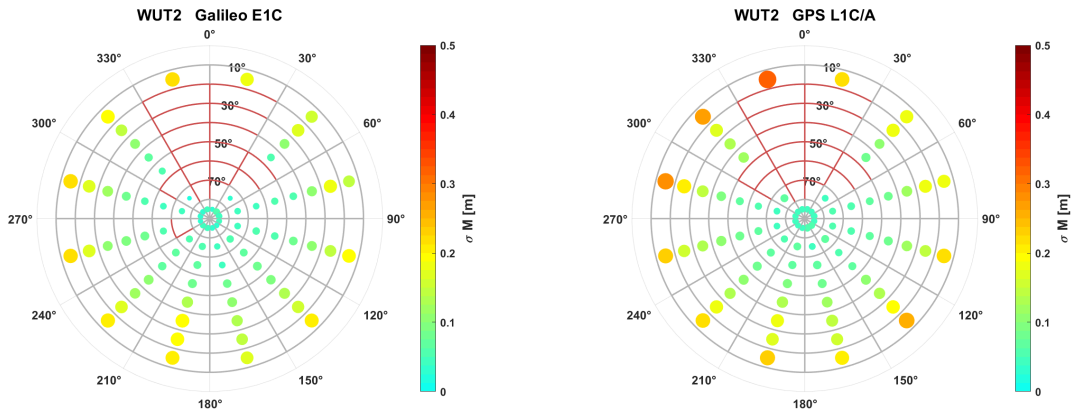
Coefficient of Determination (R-Squared)

L1C/A	L2C(L)	L2W	L5Q
0.998	0.998	0.999	0.982

Rysunek 5: Wielotorowość w funkcji elewacji dla GPS

Tabela 2: Odchylenie standardowe wpływu wielotorowości na obserwacje kodowe, dla wybranych elewacji satelitów

	Galileo					GPS			
	E1C	E5aQ	E5bQ	E5Q	E6C	L1C/A	L2C(L)	L2W	L5Q
el [°]	σM [m]								
15	0.192	0.181	0.192	0.130	0.196	0.223	0.236	0.402	0.197
30	0.137	0.122	0.140	0.090	0.136	0.153	0.160	0.285	0.137
80	0.041	0.051	0.054	0.031	0.045	0.047	0.060	0.117	0.062



Rysunek 6: Rozkład przestrzenny błędów wielotorowości obserwacji kodowych dla obserwacji E1C Galileo i L1 C/A GPS, dla pary stacji WUT2



Metodyka – wielotorowość dla obserwacji fazowych

Obserwacje różnicowe na bazie o krótkiej długości



Podwójne różnice obserwacji (DD), residua podwójnych różnic dla bazy o krótkiej długości oraz ich odchylenie standardowe, zapisać można jako:

$$\begin{aligned}\nabla\Delta L_{ab,f}^{ij} &= \nabla\Delta\rho_{ab}^{ij} + \nabla\Delta\lambda_f N_{ab,f}^{ij} + \nabla\Delta m_{ab,f}^{ij} + \nabla\Delta\epsilon_{ab,f}^{ij} \\ \widetilde{\nabla\Delta L}_{ab,f}^{ij} &= \nabla\Delta m_{ab,f}^{ij} + \nabla\Delta\epsilon_{ab,f}^{ij} \\ \sigma_{\widetilde{\nabla\Delta L}_{ab,f}^{ij}}^2 &= \sigma_{\nabla\Delta m_{ab,f}^{ij}}^2 + \sigma_{\nabla\Delta\epsilon_{ab,f}^{ij}}^2\end{aligned}$$

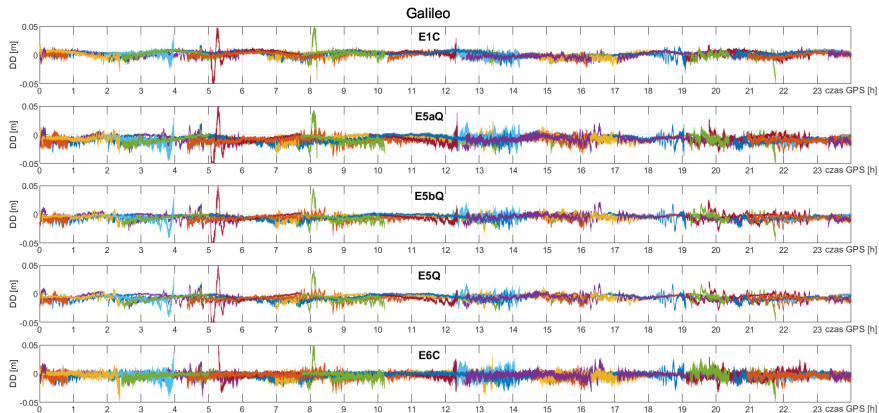
Następnie, przyjmując $\nabla\Delta m_{ab,f}^{ij}(t_1) \simeq \nabla\Delta m_{ab,f}^{ij}(t_2)$, można zapisać potrójne różnice obserwacji fazowych jako:

$$\widetilde{\nabla\Delta L}_{ab,f}^{ij}(t_{12}) = \nabla\Delta\epsilon_{ab,f}^{ij}(t_{12})$$

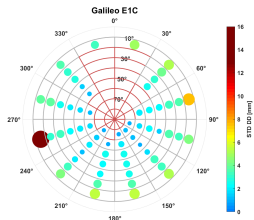
Przyjmując analogiczne założenia dotyczące szumu pomiarowego co w przypadku obserwacji *CMC*, otrzymamy wartość *STD* potrójnych różnic obserwacji fazowych, które następnie odnieść można do obserwacji nieróżnicowanych:

$$\begin{aligned}\sigma_{\widetilde{\nabla\Delta L}_{ab,f}^{ij}(t_{12})}^2 &= \sigma_{\nabla\Delta\epsilon_{ab,f}^{ij}(t_{12})}^2 (1 - q_t) \\ \sigma_{\epsilon} &= \frac{\sigma_{\widetilde{\nabla\Delta L}_{ab,f}^{ij}(t_{12})}}{\sqrt{8(1 - q_t)}} \\ \sigma_L &= \frac{\sigma_{\widetilde{\nabla\Delta L}_{ab,f}^{ij}}}{2} \\ \sigma_m &= \sqrt{\sigma_L^2 - \sigma_{\epsilon}^2} \quad (1)\end{aligned}$$

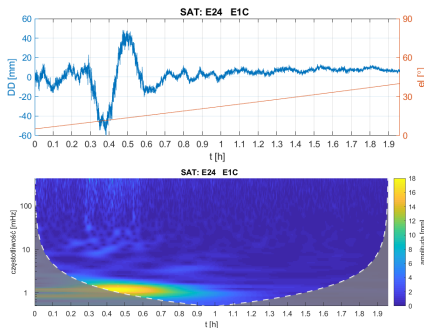
Residua podwójnych różnic obserwacji fazowych



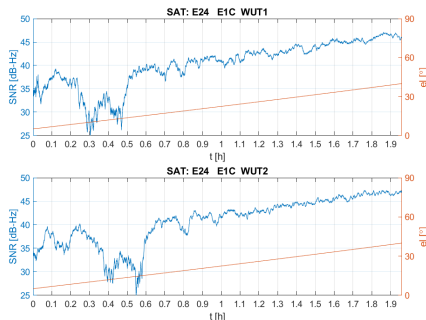
Rysunek 7: Residua podwójnych różnic obserwacji fazowych dla systemu Galileo



Rysunek 8: Rozkład przestrzenny odchylenia STD residuów podwójnych różnic obs. fazowych



Rysunek 9: Residua podwójnych różnic oraz ich widmo czasowo-częstotliwościowe dla satelity E24



Rysunek 10: Wartości parametru SNR dla satelity E24 dla stacji WUT1 oraz WUT2

Tabela 7.3: Zestawienie czasu, elewacji oraz azymutu satelity dla charakterystycznych punktów zakłóceń parametru SNR

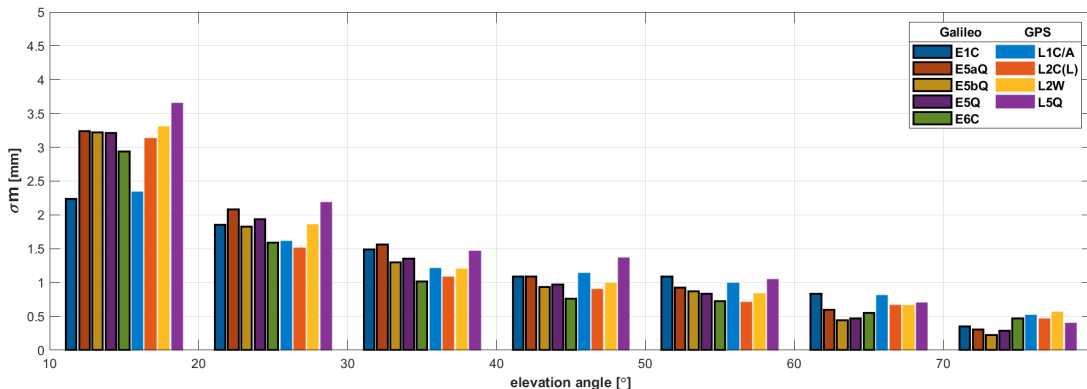
	WUT1						WUT2					
	E24			G25			E24			G25		
	t[h]	el[°]	Az[°]	t[h]	el[°]	Az[°]	t[h]	el[°]	Az[°]	t[h]	el[°]	Az[°]
1.	0,23	8,9	255,6	0,40	14,0	255,8	0,25	9,3	255,9	0,47	15,7	256,9
2.	0,39	11,7	257,8	0,54	17,2	257,7	0,46	13,0	259,0	-	-	-
3.	0,53	14,1	259,9	0,70	20,9	260,2	0,67	16,6	262,1	-	-	-

Tabela 7.4: Zestawienie odległości i kierunków od stacji do komina

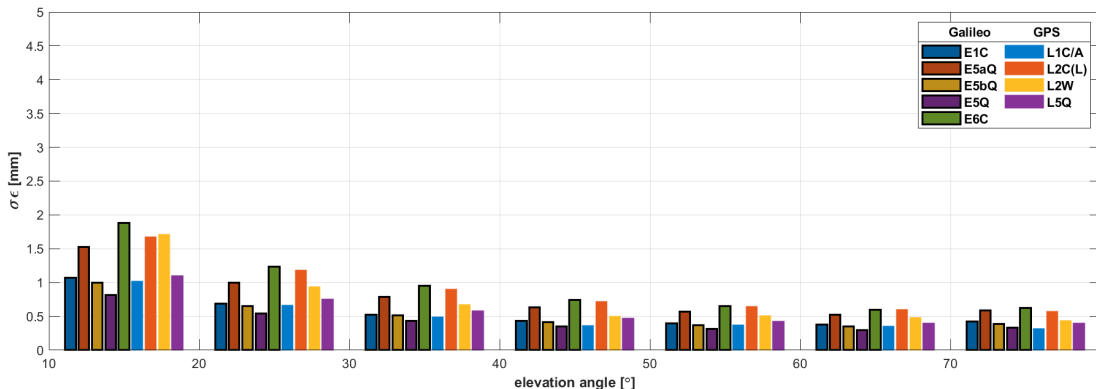
	wartości rzeczywiste		wartości wyznaczone na podstawie pomiaru	
	Az[°]	d[m]	Az[°]	d[m]
WUT1-komin	257,5	94	257,7	100
WUT2-komin	258,9	90	258,9	95



Wpływ wielotorowości na obserwacje fazowe

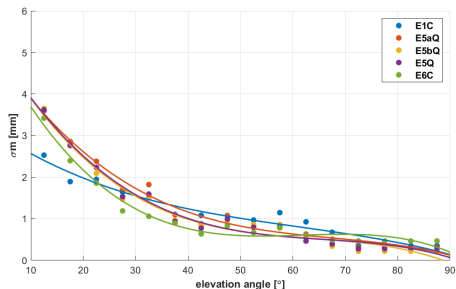


Rysunek 11: Odchylenie standardowe wpływu wielotorowości na obserwacje fazowe, w zależności od elewacji satelitów



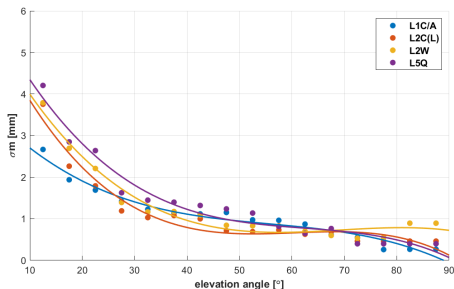
Rysunek 12: Odchylenie standardowe szumu obserwacji fazowych, w zależności od elewacji satelitów

Model empiryczny błędu wielotorowości w funkcji wysokości satelity nad horyzontem



Coefficient of Determination (R-Squared)				
E1C	E5aQ	E5bQ	E5Q	E6C
0.948	0.979	0.971	0.976	0.974

Rysunek 13: Wielotorowość w funkcji elewacji dla Galileo



Coefficient of Determination (R-Squared)			
L1C/A	L2C(L)	L2W	L5Q
0.963	0.949	0.962	0.960

Rysunek 14: Wielotorowość w funkcji elewacji dla GPS

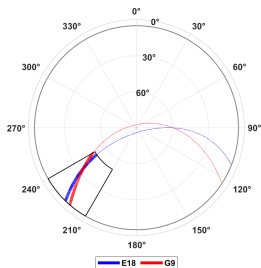
Tabela 3: Odchylenie standardowe wpływu wielotorowości na obserwacje fazowe, dla wybranych elewacji satelitów niereferencyjnych

	Galileo					GPS			
	E1C	E5aQ	E5bQ	E5Q	E6C	L1C/A	L2C(L)	L2W	L5Q
el [°]	σm [mm]								
15	2.3	3.2	3.2	3.2	2.9	2.3	3.0	3.2	3.6
30	1.5	1.7	1.4	1.5	1.1	1.3	1.1	1.4	1.6
50	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	1.1	0.9	0.9	1.2



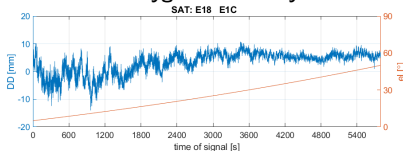
Analiza falkowa

Wpływ wielotorowości z wykorzystaniem transformacji falkowej

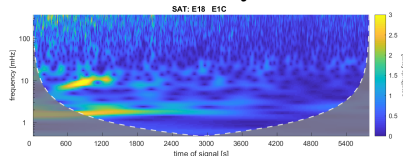


Rysunek 15: Łuki obserwacyjne dla analizowanej pary satelitów Galileo E18 i GPS G9

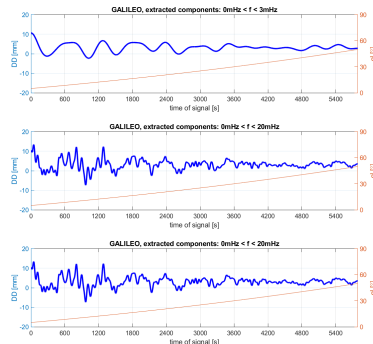
1. Sygnał źródłowy



2. Widmo czasowo-częstotliwościowe



3. Dekompozycja sygnału



4. Maksymalne błędy obserwacji, dla zakłóceń o charakterystycznych dla zjawiska wielotorowości częstotliwościach, wyznaczone na podstawie dekompozycji sygnału

Tabela 4: Obserwacje kodowe

	0–3 mHz		3–20 mHz		0–20 mHz	
	E18	G9	E18	G9	E18	G9
max [m]	0.197	0.320	0.426	0.633	0.462	0.621
min [m]	–0.202	–0.352	–0.586	–0.574	–0.632	–0.813
range [m]	0.399	0.672	1.012	1.207	1.094	1.434

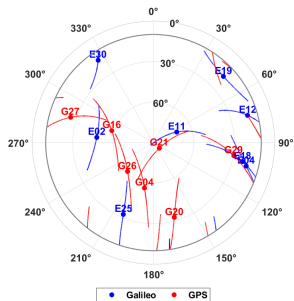
Tabela 5: Podwójne różnice obserwacji fazowych

	0–3 mHz		3–20 mHz		0–20 mHz	
	E18	G9	E18	G9	E18	G9
max [mm]	6.7	7.7	9.1	9.3	12.3	10.1
min [mm]	–2.3	–1.4	–3.0	–3.8	–7.3	–3.5
range [mm]	9.0	9.1	12.1	13.1	19.6	13.6



Wyniki pozycjonowania

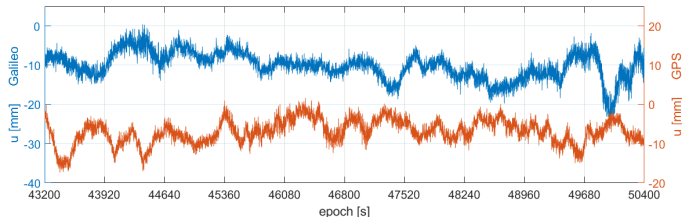
Wpływ wielotorowości z wykorzystaniem transformacji falkowej



Rysunek 16: Wykres Skyplot satelitów Galileo i GPS

Tabela 6: RMS dla współrzędnych horyzontalnych

	δn [mm]	δe [mm]	δu [mm]
Galileo	2.1	1.9	10.7
GPS	2.4	1.8	7.6



Rysunek 17: Błąd pozycji dla współrzędnej wysokościowej

Tabela 7: Maksymalne błędy współrzędnej wysokościowej spowodowane wpływem wielotorowości sygnału

	0–3 mHz		3–20 mHz		0–20 mHz	
	Galileo	GPS	Galileo	GPS	Galileo	GPS
max [mm]	−2.7	−0.2	−5.1	−3.1	−2.4	1.8
min [mm]	−20.4	−14.9	−14.9	−10.9	−23.7	−14.7
range [mm]	17.7	14.7	9.9	7.8	21.3	16.5



Podsumowanie

Obserwacje kodowe

- średni wpływ wielotorowości na poziomie 20–25 cm dla niskich elewacji satelitów
- najmniejsze błędy wielotorowości otrzymano dla obserwacji E5 AltBOC (STD=13 cm, wyniki lepsze o ok. 30% względem pozostałych obserwacji Galileo)
- największe błędy wielotorowości otrzymano dla obserwacji L2W GPS (STD=40 cm)
- obserwacje Galileo zapewniają wzrost odporności na zjawisko wielotorowości o ok. 13% względem GPS (bez uwzględnienia obserwacji „odstających” E5 AltBOC i L2W)
- spośród podstawowych obserwacji obu systemów, lepsze wyniki uzyskano dla sygnału E1 Galileo (maksymalne wartości błędów wielotorowości uzyskane na podstawie transformacji falkowej okazują się nawet o ok. 40% mniejsze niż dla kodu C/A GPS)
- system Galileo charakteryzuje się znacznie mniejszym szumem pomiarowym w porównaniu do GPS (różnica o ok. 40% nawet bez uwzględniania obserwacji E5 AltBOC)



Obserwacje fazowe

- średni wpływ wielotorowości na nieróżnicowane obserwacje fazowe dla niskich elewacji satelitów otrzymano na poziomie 2–3,5 mm
- wpływ wielotorowości na obserwacje fazowe zależy wyłącznie od długości fali nośnej – nie zauważono różnic pomiędzy obserwacjami systemu Galileo i GPS
- maksymalny wpływ wielotorowości na podwójne różnice obserwacji otrzymano na poziomie 20 mm
- wpływ szumu pomiarowego na poziomie 1–2 mm (dla satelitów wysokich $\sim 0,5$ mm)

Wyniki pozycjonowania

- różnica pomiędzy wynikami dla Galileo i GPS widoczna wyłącznie dla współrzędnej wysokościowej (wielotorowość powoduje powstawanie zaburzeń o amplitudzie do 21 mm dla Galileo i 17 mm dla GPS)



Dziękuję za uwagę

Maciej Grzymała

maciej.grzymala@pw.edu.pl

Praca została zrealizowana w ramach pracy magisterskiej realizowanej na Wydziale GiK PW oraz w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki pt. „Modelowanie stochastyczne obserwacji GNSS na potrzeby precyzyjnego pozycjonowania kinematycznego” (2016/23/D/ST10/00498)