

Optymalne sposoby redukcji opóźnienia jonosferycznego w rozwiązaniu nawigacyjnym GNSS

Beata Milanowska¹, Paweł Wielgosz¹, Karolina Krzykowska-Piotrowska², Ningbo Wang³,
Mainul Hoque⁴, Dariusz Tomaszewski¹, Dawid Kwaśniak¹, Anna Krypiak-Gregorczyk¹, Wojciech Jarmołowski¹

¹Katedra Geodezji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

²Zakład Telekomunikacji w Transporcie, Politechnika Warszawska

³Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

⁴Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center, Neustrelitz, Niemcy

Wprowadzenie

- Operatorzy systemów GNSS dostarczają własne modele jonosfery do poprawy rozwiązania jednoczęstotliwościowego (Klobuchar, NeQuick G, BDGIM).
- W międzyczasie pojawiło się kilka niezależnych modeli dostępnych w czasie rzeczywistym (RT GIMs, NTCM-G).
- Z uwagi na szeroką dostępność modeli opóźnienia jonosferycznego istnieje potrzeba ich ewaluacji w rozwiązaniu nawigacyjnym – jedno lub wielosystemowym.

Charakterystyka testowanych modeli

1. Model Klobuchar'a

Model transmitowany w depezy nawigacyjnej systemu GPS (8 współczynników).

3.02	N: GNSS NAV DATA				G: GPS	RINEX VERSION / TYPE	
GR50 V4.31	IGG of WUELS				20210109 235952 UTC	PGM / RUN BY / DATE	
GPSA	7.4506D-09	-1.4901D-08	-5.9605D-08	1.1921D-07		IONOSPHERIC CORR	
GPSE	9.0112D+04	-6.5536D+04	-1.3107D+05	4.5875D+05		IONOSPHERIC CORR	
GPWT	1.8626451492D-09	3.552713679D-15	233472	2140		TIME SYSTEM CORR	
18	18	1929	7			LEAP SECONDS	
						END OF HEADER	

2. Model NeQuick G

Nowa wersja NeQuick 2 opracowana dla systemu Galileo (3 parametry A_z transmitowane w depezy nawigacyjnej).

3.02	N: GNSS NAV DATA				E: GALILEO	RINEX VERSION / TYPE	
GR50 V4.31	IGG of WUELS				20210109 235952 UTC	PGM / RUN BY / DATE	
GAL	5.0500D+01	1.4453D-01	-2.8687D-03	0.0000D+00		IONOSPHERIC CORR	
GAUT	9.3132257462D-10	-8.881784197D-16	518400	2139		TIME SYSTEM CORR	
GPGA	1.1932570487D-09	-3.552713679D-15	0	2140		TIME SYSTEM CORR	
18	18	1929	7			LEAP SECONDS	
						END OF HEADER	

3. BDGIM

Model transmitowany w depezy nawigacyjnej systemu BDS (9 współczynników).

3.04	BDGIMIONO				C: BeiDou-3	VERSION / TYPE	
BDS1	8.5366E+00	-1.1166E+00	3.1736E+00		a	IONOSPHERIC CORR	
BDS2	2.0756E+00	-1.8524E+00	-3.3559E-01		a	IONOSPHERIC CORR	
BDS3	-5.9072E-01	5.8138E-01	2.3317E-01		a	IONOSPHERIC CORR	
BDS1	8.3252E+00	-1.1641E+00	2.9066E+00		c	IONOSPHERIC CORR	
BDS2	2.0834E+00	-1.8303E+00	-2.6166E-01		c	IONOSPHERIC CORR	
BDS3	-5.6527E-01	5.3072E-01	2.3253E-01		c	IONOSPHERIC CORR	

Charakterystyka testowanych modeli

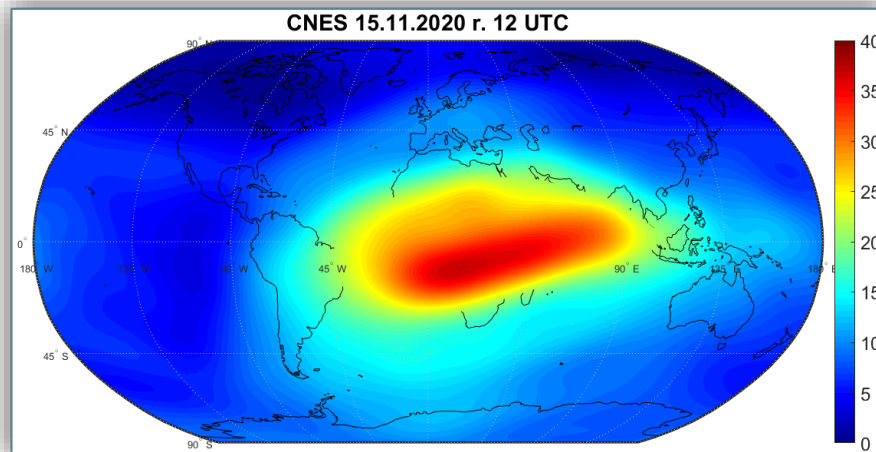
4. NTCM-G

Opracowany przez German Aerospace Center (DLR) jako alternatywa dla NeQuick G (3 parametry Az).

Hoque, M.M., Jakowski, N. & Orús-Pérez, R. *Fast ionospheric correction using Galileo Az coefficients and the NTCM model*. GPS Solut 23, 41 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s10291-019-0833-3>

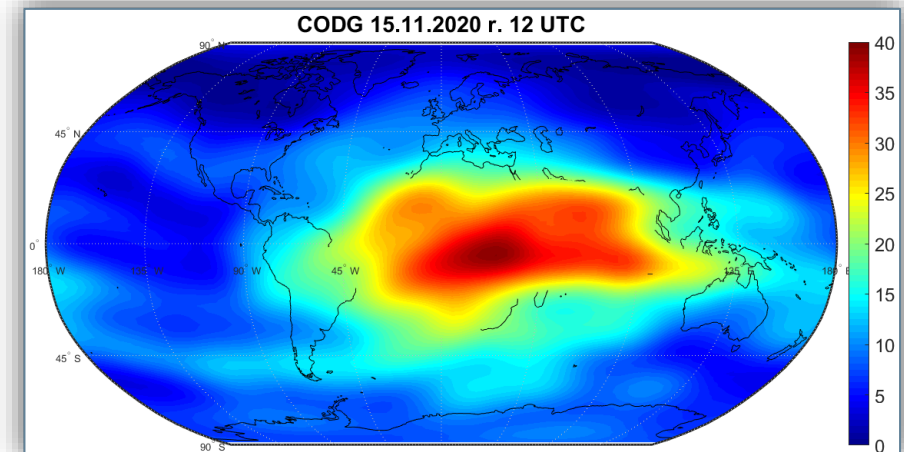
5. CNES RT GIM

Generowany w czasie rzeczywistym w oparciu o obserwacje fazowe z ~80 stacji GNSS (SHE 8x8).



6. CODG GIM

Globalne mapy jonosfery (generowane w postprocessing'u przez centrum analiz CODE w oparciu o obserwacje fazowe z ~300 stacji GPS+GLONASS (SHE 16x16)).



Parametry obliczeń

Model pozycjonowania

SPP (single-epoch)

Estymowane parametry

Współrzędne geocentryczne XYZ,
1 parametr poprawki zegara
odbiornika / system

Opóźnienie troposferyczne

Modified Hopfield

Obserwacje kodowe

GPS (C1C), GLONASS (C1P)
Galileo (C1C), BDS-3 (C2I)

Wagowanie obserwacji

$1/\cos Z$

Opóźnienie jonosferyczne

Klobuchar, NeQuick G, BDGIM, NTCM,
CNES RT GIM, CODE, IF.

Interwał

180 sekund

Orbity i zegary sat.

Precyzyjne produkty z centrum
analiz GFZ

Oprogramowanie

Matlab (opracowanie własne)

Minimalny kąt elewacji sat.

15 stopni

Opoźnienia sprzętowe sat.

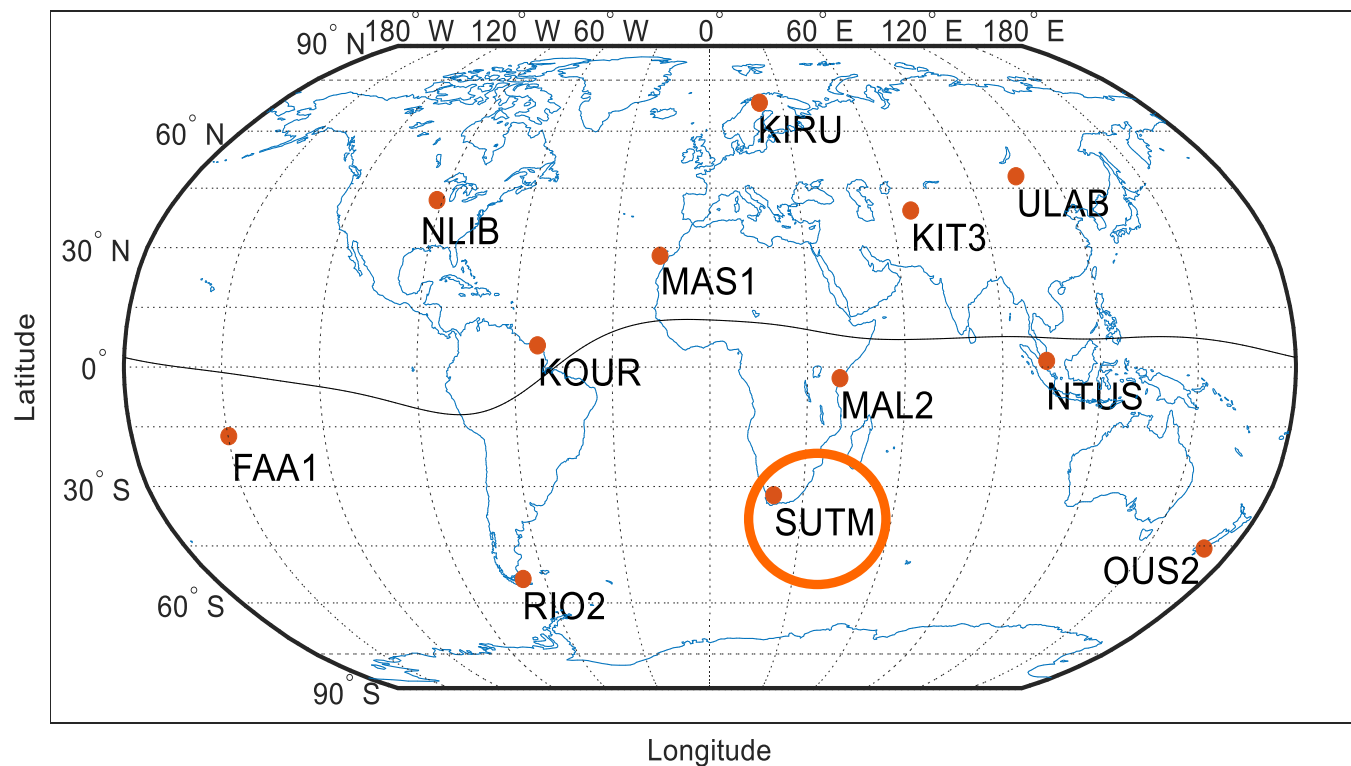
Absolutne dzienne kalibracje (OSB) z
centrum analiz CAS

Współrzędne referencyjne

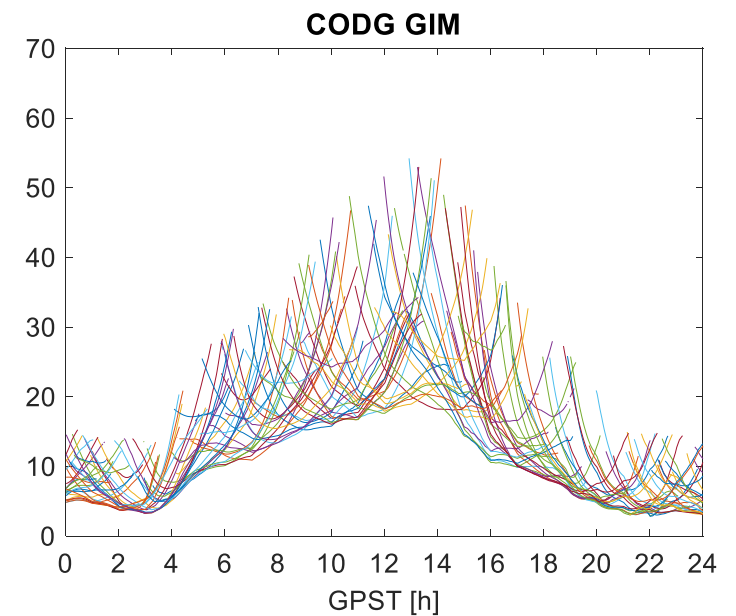
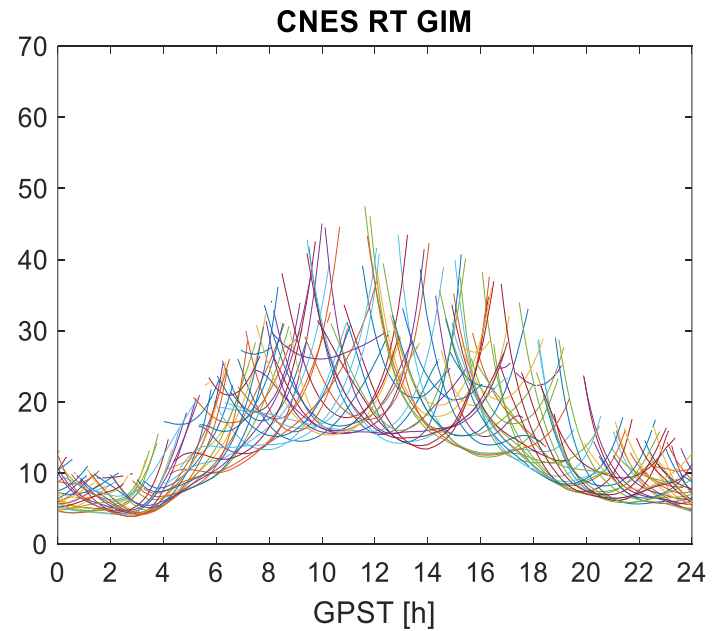
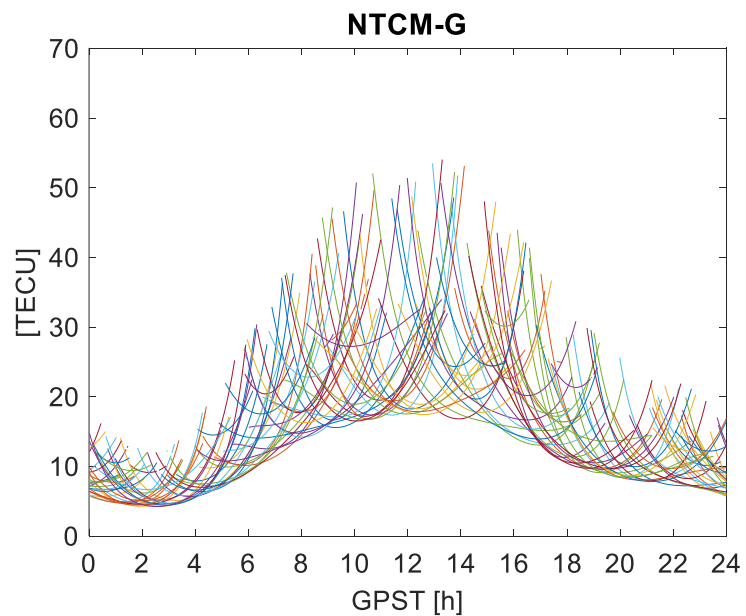
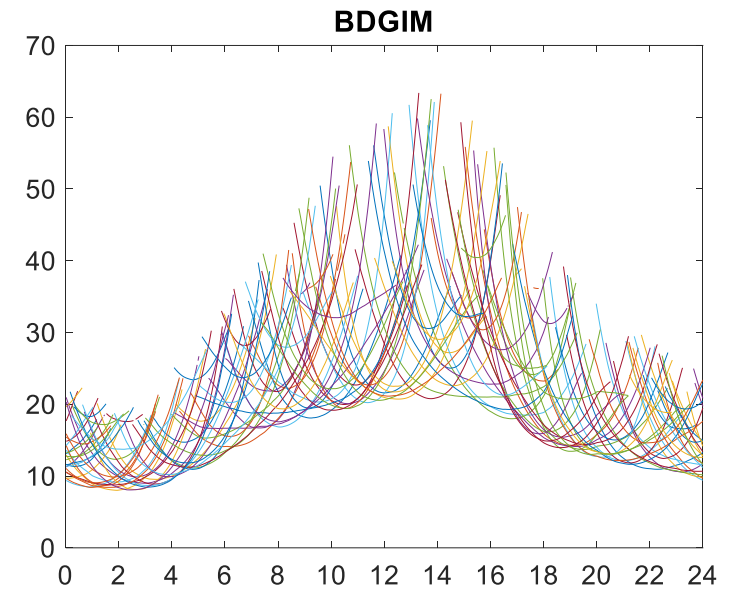
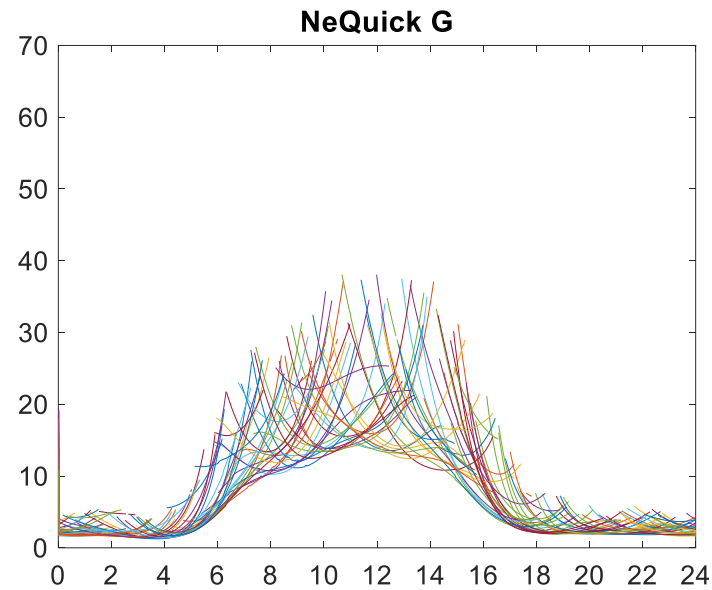
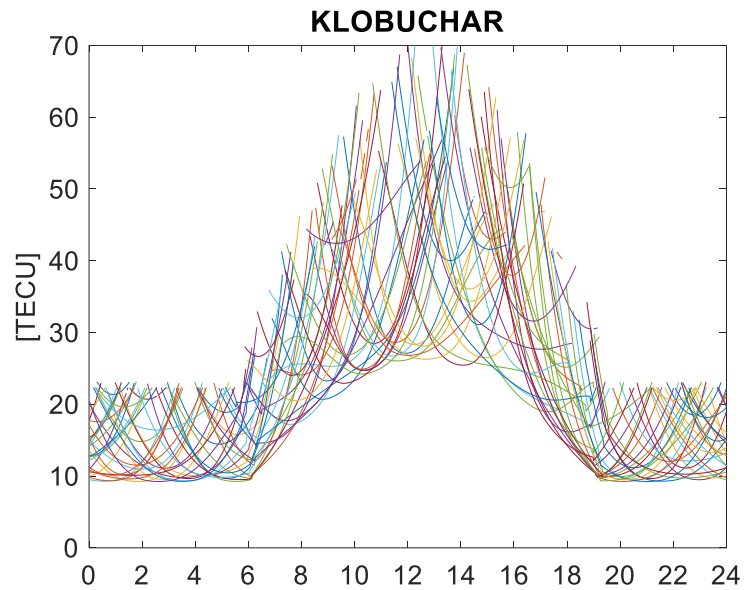
IGS14

Dane testowe

- Dane testowe obejmują 30 dni obserwacji GNSS (listopad 2020 r.).
- Do oceny modeli wykorzystano jednoczęstotliwościowe obserwacje kodowe z 12 stacji GNSS rozmieszczonych równomiernie na całym globie.

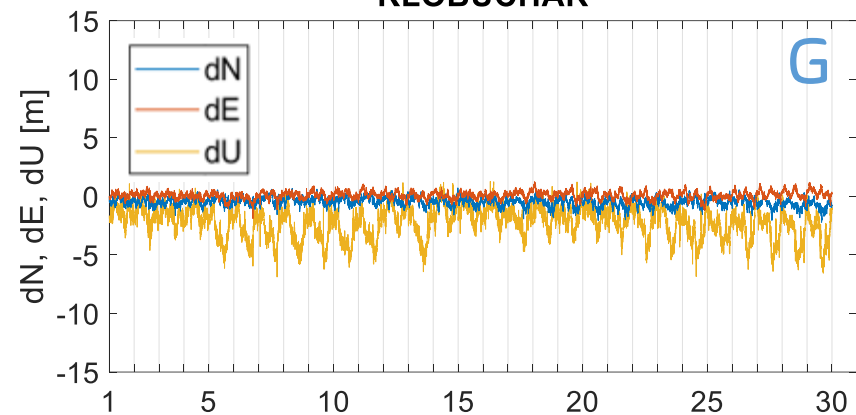


Przykład STEC, stacja SUTM (DOY 303/2020)



G+E+C – przykłady zastosowania modeli

KLOBUCHAR

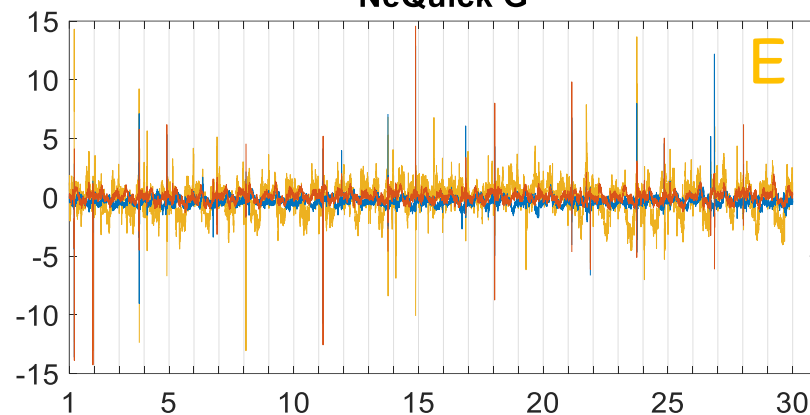


Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.17 m

VPE95% = 4.74 m

NeQuick G

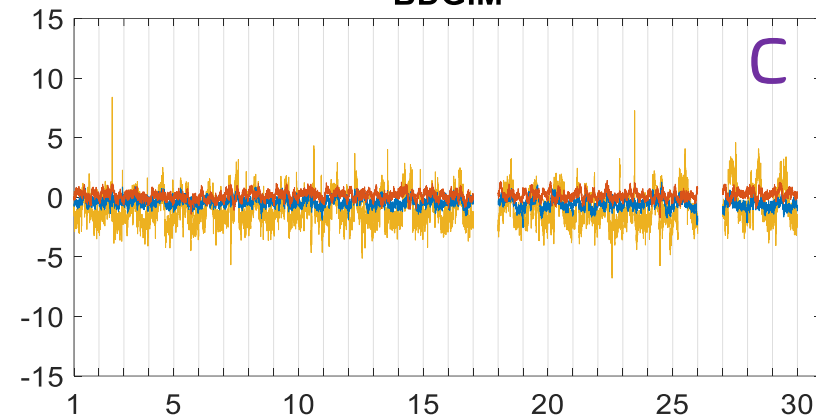


Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.07 m

VPE95% = 2.53 m

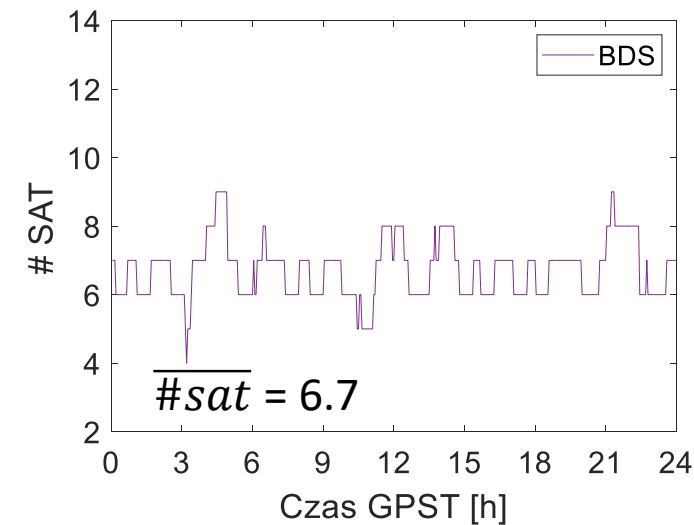
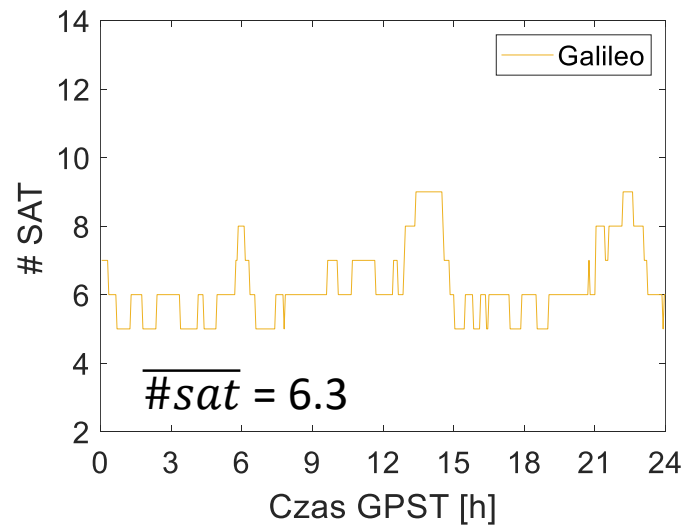
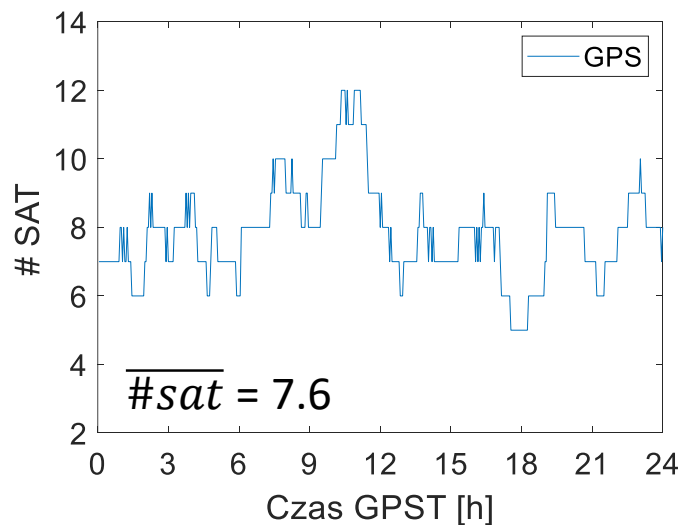
BDGIM



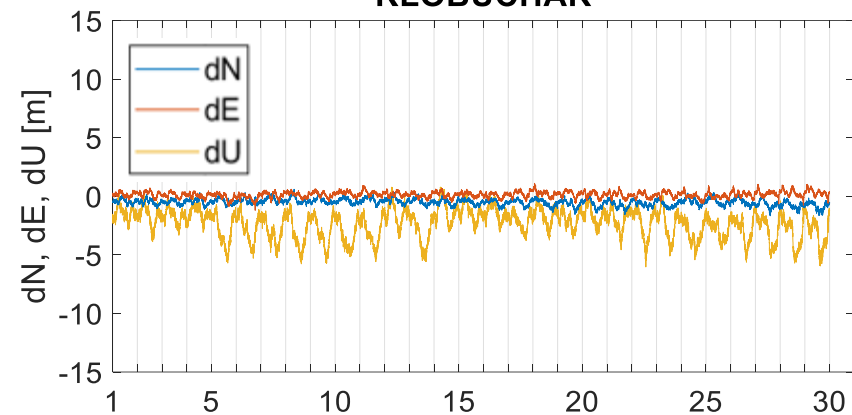
Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.19 m

VPE95% = 2.78 m



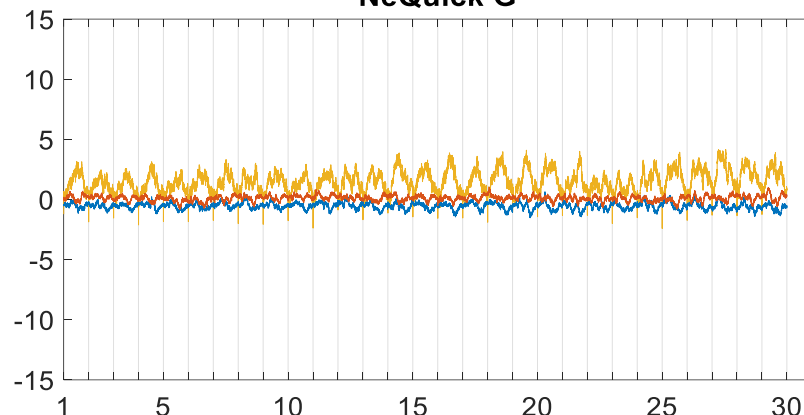
GREC- przykłady zastosowania modeli

KLOBUCHAR

Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.09 m

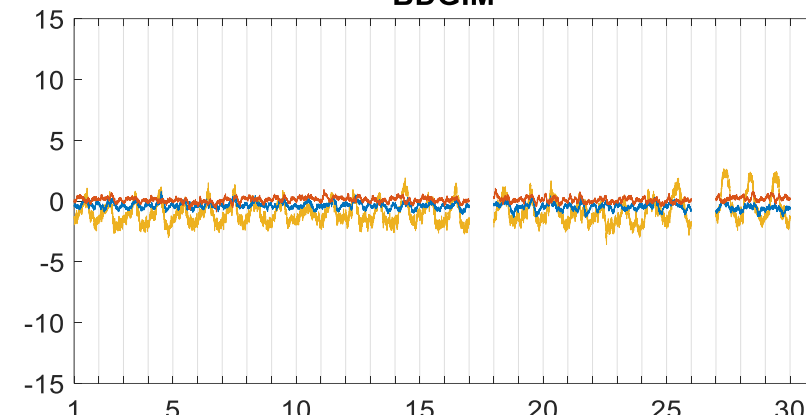
VPE95% = 4.68 m

NeQuick G

Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.08 m

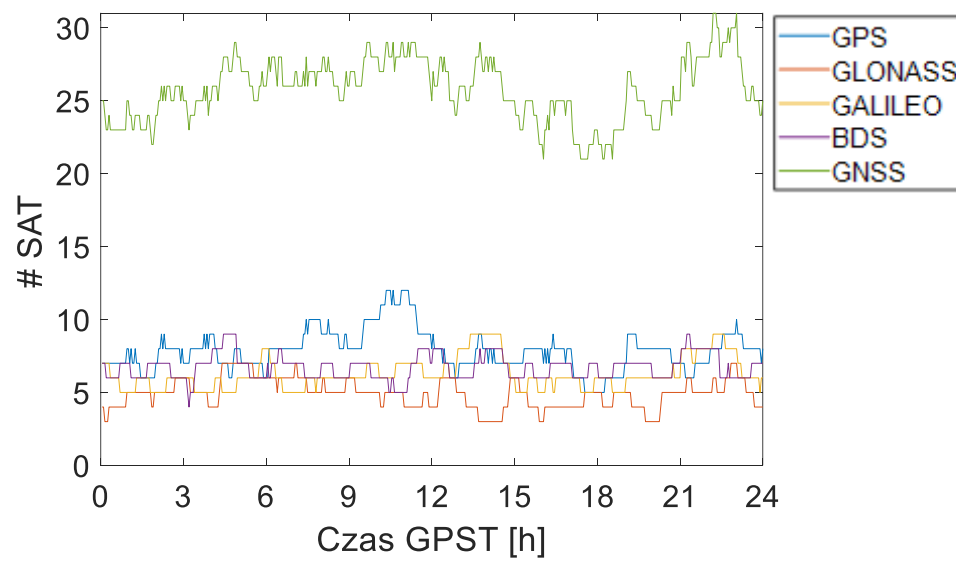
VPE95% = 3.05 m

BDGIM

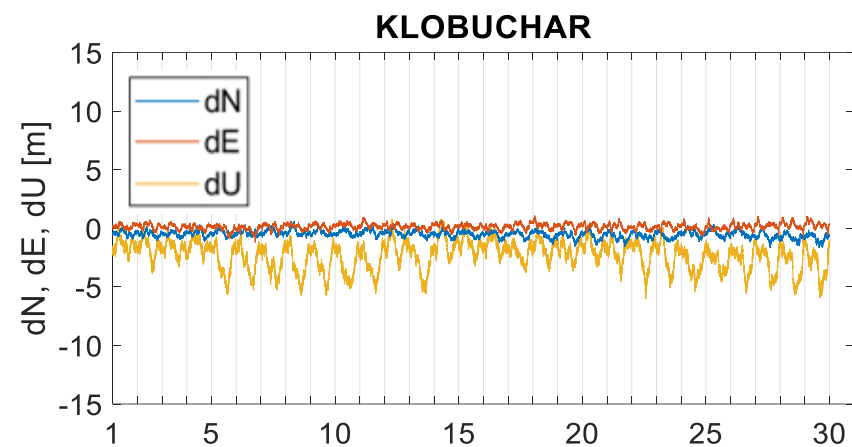
Listopad 2020 r.

HPE95% = 0.89 m

VPE95% = 2.19 m



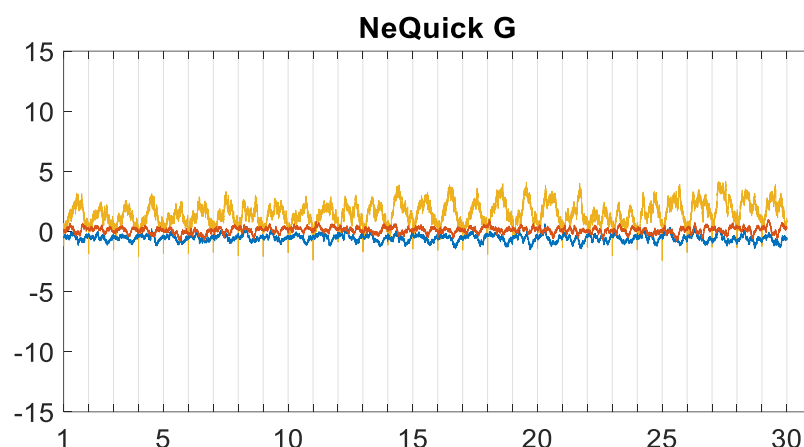
GREC- przykłady zastosowania modeli



Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.09 m

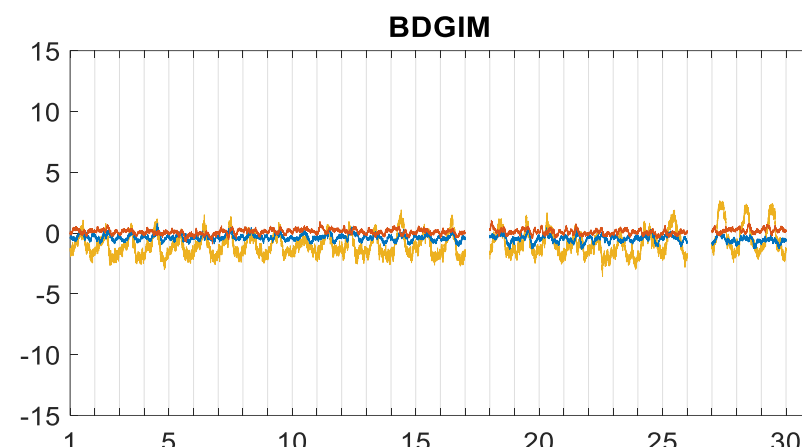
VPE95% = 4.68 m



Listopad 2020 r.

HPE95% = 1.08 m

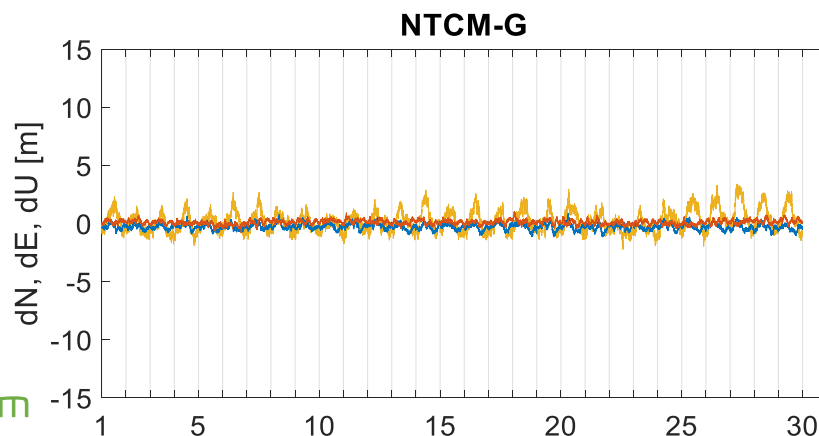
VPE95% = 3.05 m



Listopad 2020 r.

HPE95% = 0.89 m

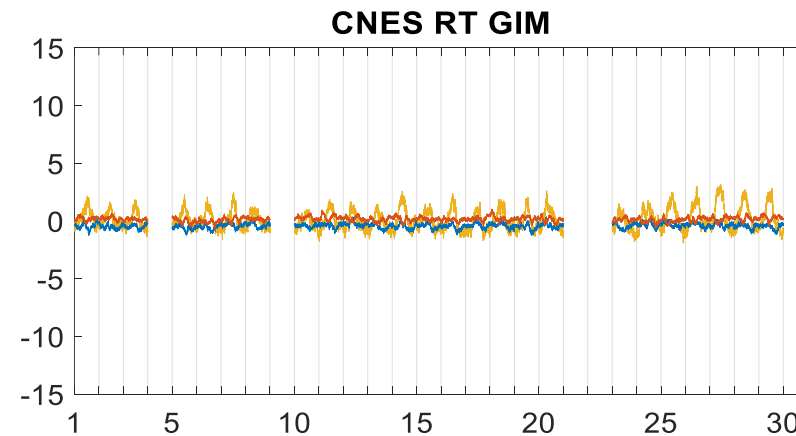
VPE95% = 2.19 m



HPE95% = 0.75 m

VPE95% = 1.93 m

Listopad 2020 r.

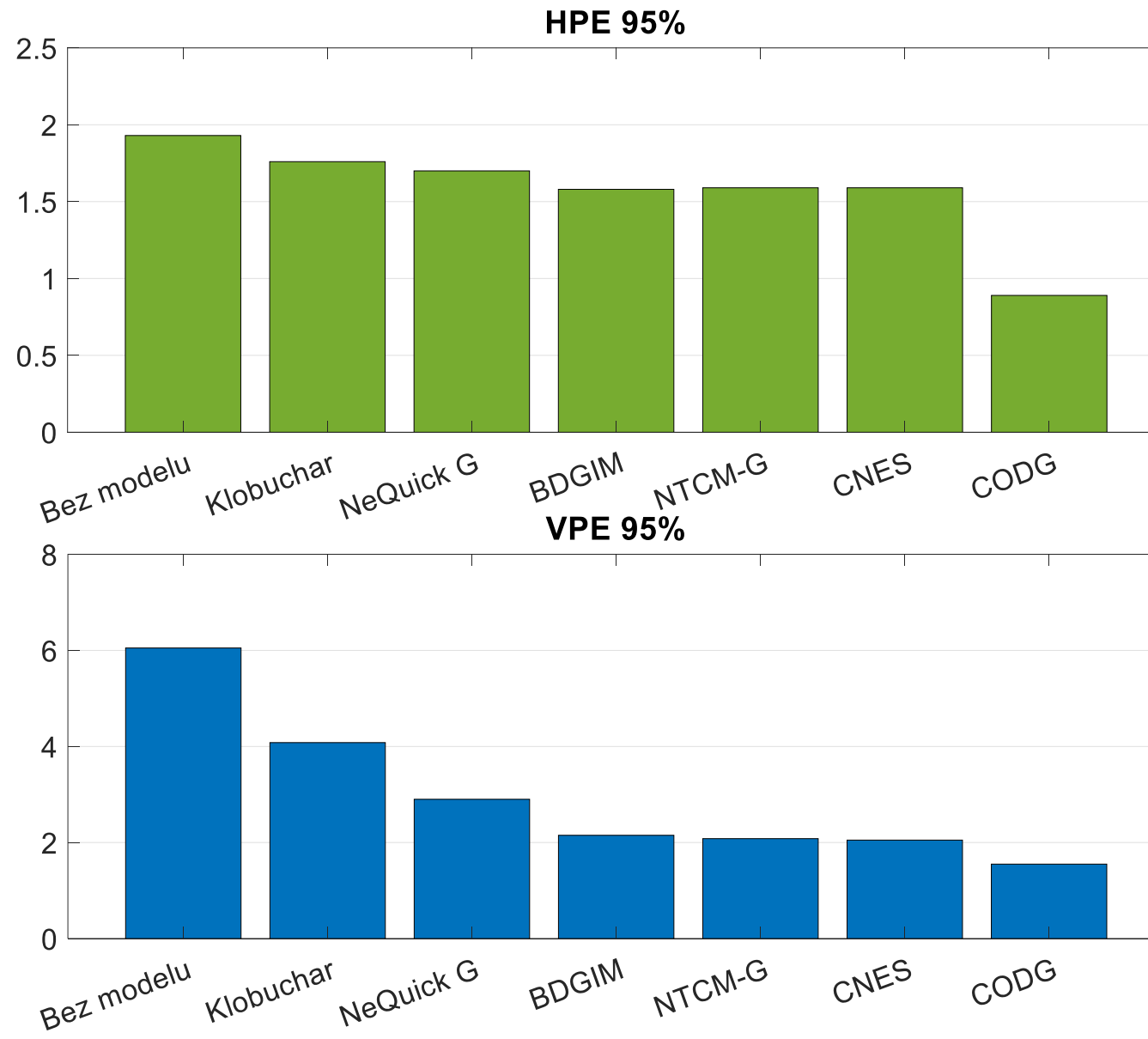


Listopad 2020 r.

HPE95% = 0.88 m

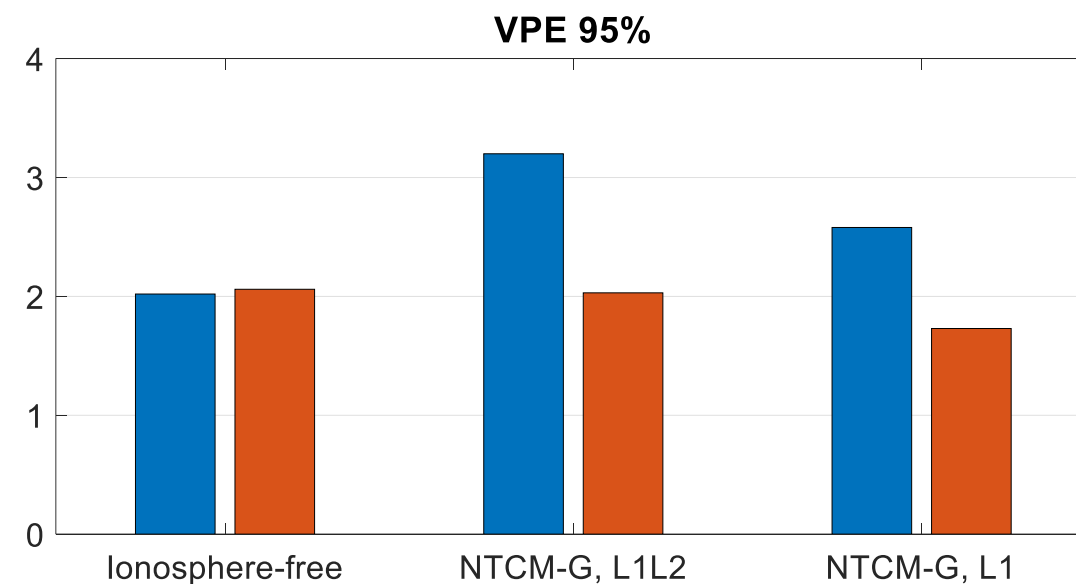
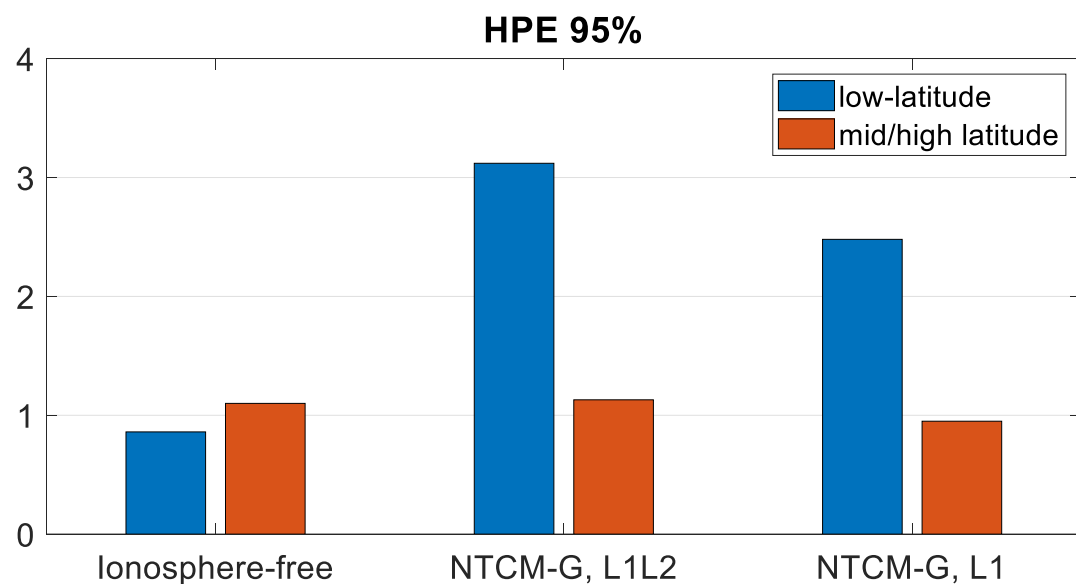
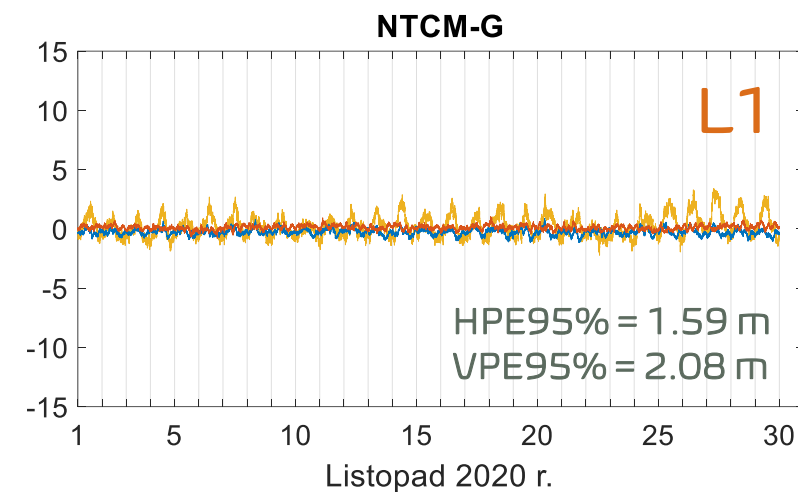
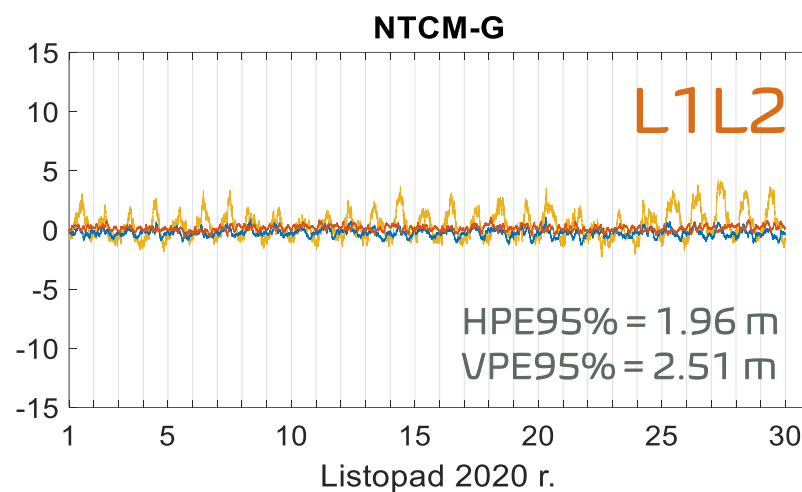
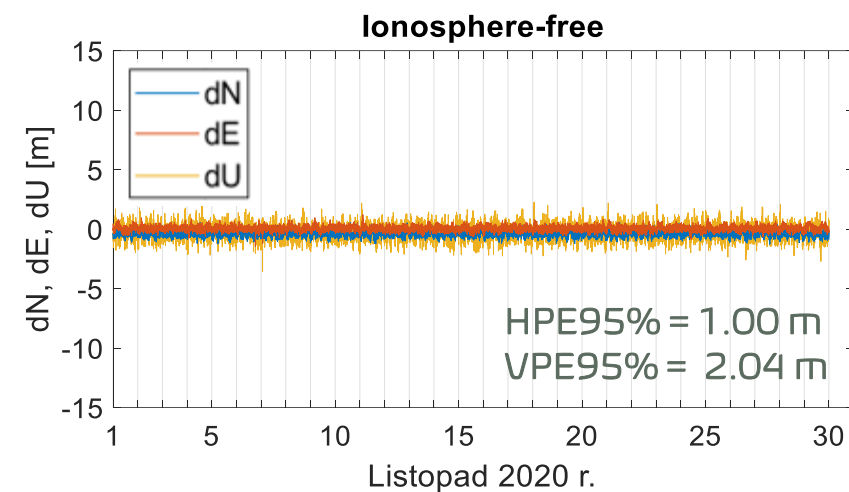
VPE95% = 1.79 m

GREC - statystyki pozycji (średnia ze wszystkich stacji)



GREC - 2 częstotliwości

STACJA SUTM



Wnioski

- Model Klobuchar'a najmniej dokładnie odzwierciedla stan jonosfery.
- Spośród modeli dedykowanych do systemów satelitarnych najlepiej sprawdził się model BDGIM (BDS), również model NTCM-G i CNES osiągnęły zbliżone wyniki.
- Model NTCM jest bardzo dobrą alternatywą dla modelu NeQuick G ze względu na swoją skuteczność jak i łatwość implementacji.
- Pozycjonowanie z wykorzystaniem obserwacji jednoczęstotliwościowych skorygowanych dobrym modelem jonosfery często pozwala na osiągnięcie lepszych wyników niż pozycjonowanie z obserwacji dwuczęstotliwościowych.