



**Wydział Geodezji
i Kartografii**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Systemy Nawigacji Satelitarnej – projekt kierunek: geoinformatyka, sem 4

Systemy Nawigacji Satelitarnej – Opóźnienie jonosferyczne

mgr inż. Maciej Grzymała
maciej.grzymala@pw.edu.pl
Zakład Geodezji i Astronomii Geodezyjnej
Wydział Geodezji i Kartografii
Politechnika Warszawska

Semestr zimowy rok akad. 2023/2024

**Politechnika
Warszawska**

**Warsaw University
of Technology**

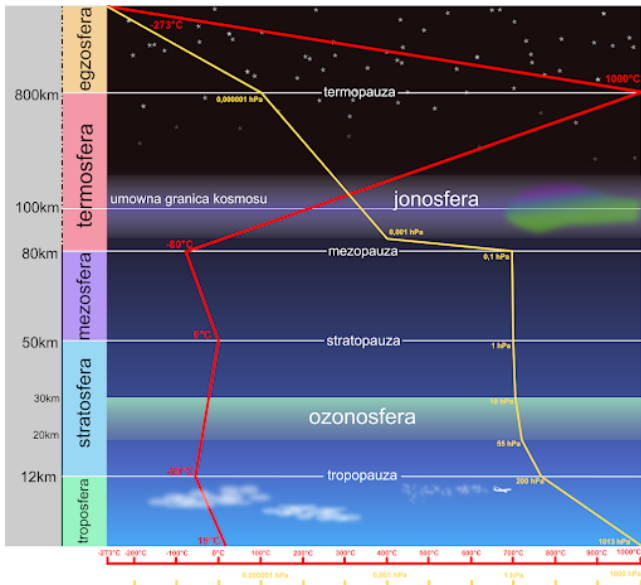


$$P_r^s = c(t_r - t^s) = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta T + \delta \mathbf{I} + E_r \quad (1)$$

gdzie::

- P_r^s : pomierzona wartość pseudoodległości między satelitą s i odbiornikiem r
- t_r : czas odbioru sygnału
- t^s : czas emisji sygnału
- ρ : odległość geometryczna między satelitą s i odbiornikiem r
- c : prędkość światła
- δt_r : błąd zegara odbiornika r
- δt^s : błąd zegara satelity s
- δT : opóźnienie jonosferyczne
- $\delta \mathbf{I}$: opóźnienie jonosferyczne
- E_r : szumy pomiarowe i inne błędy związane z odbiornikiem lub satelitą

Atmosfera ziemska



[//geografia24.pl/
budowa-atmosfery/](http://geografia24.pl/budowa-atmosfery/)

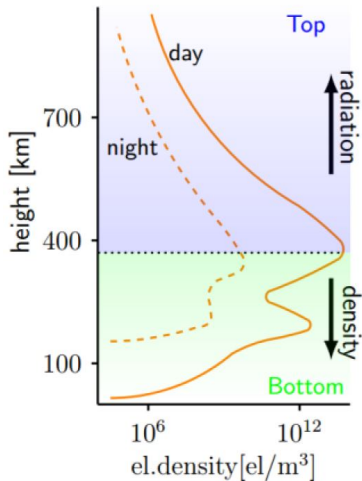


Figure: JONOSFERA

<http://spears.lancs.ac.uk/>

- Jonosfera jest górną częścią atmosfery. W tematyce pomiarów GNSS, położona od 50 km nad pow. Ziemi, do ok. 1000 km (bezpośrednio powyżej troposfery GNSS)
- Charakteryzuje się zawartością zjonizowanych cząstek: jonów dodatnich oraz wolnych elektronów
- Jonosfera ma charakter dyspersyjny, dla fal o częstotliwościach typowych dla systemów GNSS, co oznacza, że prędkość fazowa fali elektromagnetycznej w tym ośrodku zależy od jej częstotliwości: opóźnienie spowodowane tą warstwą jest inne dla fal o różnych częstotliwościach - jej wpływ można wyeliminować stosując pomiar na dwóch częstotliwościach nośnych



- Obecność ładunków elektrycznych w jonosferze spowodowana jest przez promieniowanie ultrafioletowe Słońca. Ze względu na cykliczny charakter aktywności słonecznej, wyróżnić można trzy okresy, w których zauważalna jest zmienność liczby wolnych elektronów w jonosferze:
 - Dobowa aktywność słoneczna, decydująca o znacznie większym wpływie jonosfery w ciągu dnia (maksimum w okolicach godziny 14 czasu lokalnego) względem nocy. Różnice opóźnienia grupowego sygnału w kierunku zenitu w cyklu dobowym są znaczące, w dzień sięgające wielkości rzędu 20 – 30 metrów, natomiast w nocy są to wartości kilku metrowe (Lamparski, 2001)
 - Okres roczny związany z występowaniem pór roku
 - 11-letni okres aktywności słonecznej, wynikający ze zmian ilości plam na Słońcu
- Na stan jonosfery wpływają również inne, krótkookresowe czynniki, takie jak burze magnetyczne, czy scyntylacje jonosfery, tj. zaburzenia powodujące nagłe zmiany fazy i amplitudy sygnału, występujące przede wszystkim w rejonach okołorównikowych i okołobiegunowych.
- Liczba wolnych elektronów na przestrzeni całej warstwy nie jest jednolita. Największa ich gęstość występuje na wysokościach ok. 250 – 400 km (Teunissen and Montenbruck, 2005)

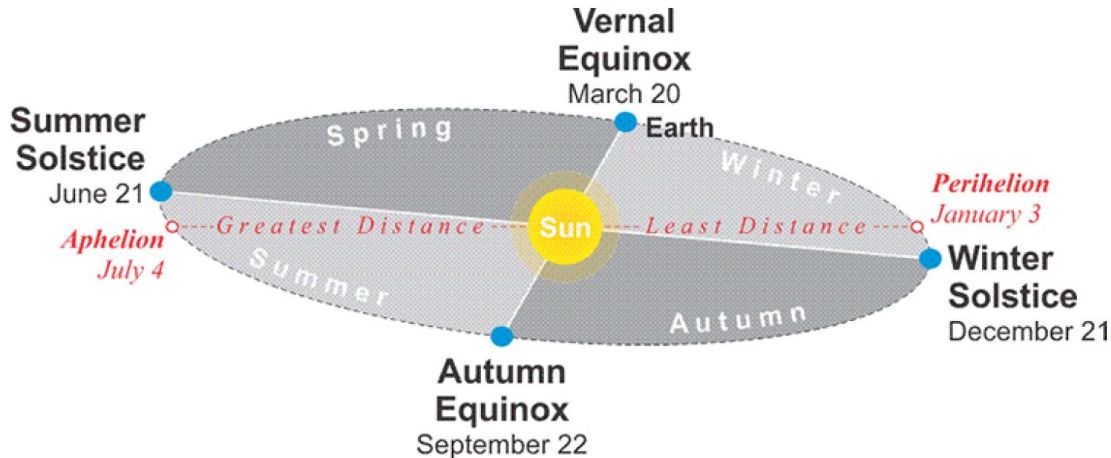


Figure: Zmienność czasowo-przestrzenna jonosfery w zależności od położenia Słońca względem Ziemi

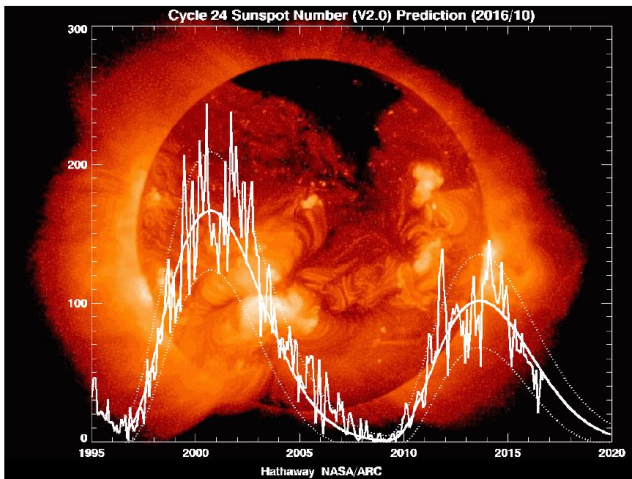
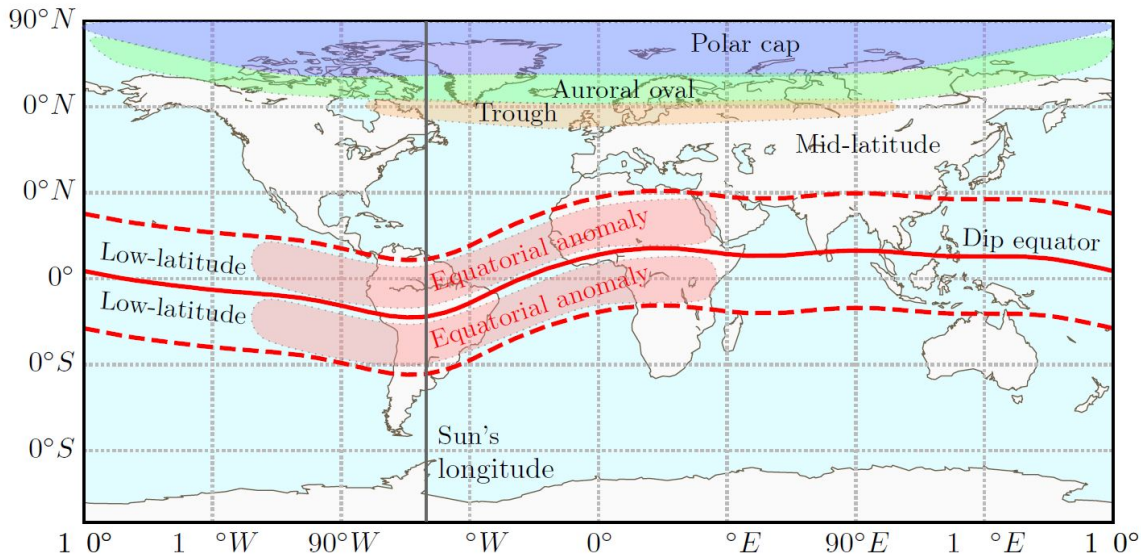


Figure: Zmienność czasowa jonosfery: cykle aktywności Słonecznej, źródło: www.nasa.com;
(Sunspot - plamy słoneczne - czarne plamy na Słońcu - niska temp., silne pole magnetyczne)

Przestrzenna zmienność jonosfery





- Złożoność jonosfery sprawia, że jej wpływ jest trudny w modelowaniu.
- W kodowych pomiarach jednoczęstotliwościowych wykorzystywane są w szczególności dwa modele jonosfery. Pierwszym z nich jest model Klobuchara, aproksymujący jonosferę jako pojedynczą warstwę, położoną na wysokości 350 km. Jej stan opisywany jest za pomocą ośmiu, aktualizowanych codziennie współczynników, przesyłanych w depeszach nawigacyjnych systemów GPS i BeiDou. Model ten pozwala wyeliminować ok. 50% wpływu jonosfery.
- System Galileo korzysta z modelu NeQuickG, jako pochodnej trójwymiarowego modelu jonosfery NeQuick. Model ten korzysta wyłącznie z trzech współczynników, również aktualizowanych przynajmniej raz dziennie, które są elementem depeszy nawigacyjnej systemu Galileo.
- Według [Teunissen and Montenbruck \(2017\)](#), model NeQuickG charakteryzuje się minimalnie lepszą skutecznością od modelu Klobuchara, przede wszystkim w obszarach międzyzwrotnikowych.



- Refrakcją jonosferyczną nazywamy wpływ jonosfery na propagację sygnału elektromagnetycznego. Opóźnienie jonosferyczne δI_r^s przedstawia wpływ refrakcji jonosferycznej na obserwacje GNSS:

$$\delta I_r^s = s - s_0 = \int_s^r n ds - \int_s^r ds_0 \quad (2)$$

gdzie: s_0 oznacza odległość mierzoną wzdłuż linii prostej w próżni ($n = 1$), s - rzeczywistą drogę propagacji sygnału w ośrodku o współczynniku załamania n

- w ośrodku dyspersyjnym, jakim jest jonosfera, prędkość propagacji jest różna dla fal sinusoidalnych (*prędkość fazowa* v_φ) oraz dla grupy fal, powstałej jako złożenie fal o różnych częstotliwościach (*prędkość grupowa* v_g)
 - refrakcja: opóźnienie grupowe modulowanego sygnału
 - refrakcja: przyspieszenie fazy fali nośnej
- Prędkość fazowa charakteryzuje fale nośne, a więc odnosi się do pomiarów fazowych, natomiast prędkość grupowa odnosi się do pomiarów kodowych



- Współczynniki refrakcji dla prędkości fazowej i grupowej przedstawiają wzory:

$$n_{\varphi} = 1 - \frac{40.3N_e}{f^2}$$

$$n_g = 1 + \frac{40.3N_e}{f^2}$$

- Wprowadzając wielkość całkowitej zawartości elektronów Total Electron Content (TEC):

$$TEC = \int_s^r N_e ds \quad (3)$$

która opisuje liczbę wolnych elektronów wzdłuż drogi propagacji sygnału pomiędzy satelitą s i odbiornikiem r (jako liczbę elektronów zawartych w kolumnie o przekroju 1 m^2 liczoną wzdłuż drogi propagacji sygnału, jako jednostkę TEC przyjmuje się wielkość TECU (ang. Total Electron Content Unit) wynoszącą 10^{16} elektronów/ m^2 ; 1 TECU - 0,16 m dla L1)



- Wielkość opóźnienia jonosferycznego δI zależna jest od częstotliwości fali nośnej f i całkowitej liczby wolnych elektronów wzdłuż drogi propagacji sygnału TEC (ang. Total Electron Content). Refrakcję jonosferyczną definiuje wzór:

$$\delta I = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (4)$$

- **Zasada, że im większa częstotliwość fali nośnej, tym wpływ jonosfery mniejszy**



$$P_r^s = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta T + \delta \mathbf{I} + E_r \quad (5)$$

$$L_r^s = \rho + \lambda N + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta T - \delta \mathbf{I} + \epsilon_r \quad (6)$$

gdzie:

- L_r^s : pomierzona wartość pseudoodległości fazowej między satelitą s i odbiornikiem r , w metrach
- δI : opóźnienie jonosferyczne
- N : nieoznaczoność fali nośnej (pełna liczba odłożeń fali)
- λ : długość fali nośnej

Wpływ jonosfery na obserwacje kodowe i fazowe jest jednakowy, ale z różnym znakiem



Odbiorniki jednoczęstotliwościowe

- modele jonosfery (Klobuchar, NeQuick)
- globalne mapy jonosfery (format IONEX)
- pomiary różnicowe (pomiary kodowe DGNSS)

Odbiorniki dwuczęstotliwościowe

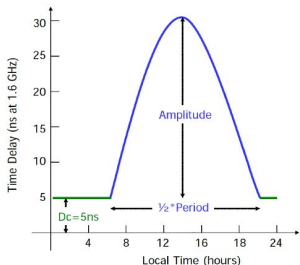
- kombinacje obserwacji dwuczęstotliwościowych (tzw. kombinacja IONO FREE)
- pomiary względne - różnicowanie obserwacji



- Model Klobuchara (często nazywany jest modelem GPS) opracowany, aby zapewnić oszacowanie opóźnienia jonosferycznego dla użytkowników jednoczesnościowych odbiorników systemu GPS – **stosowany w kodowych pomiarach absolutnych**
- Globalny, empiryczny model wykorzystywany w celu modelowania opóźnienia jonosferycznego spowodowanego refrakcją jonosferyczną (pierwszy wyraz opóźnienia)
- Globalny stan jonosfery przedstawiany jest za pomocą 8 współczynników, transmitowanych w depeszy nawigacyjnej systemów GPS i BeiDou, aktualizowanych raz dziennie (GPS)
- **Model pojedynczej warstwy**, zakłada, że opóźnienie jonosferyczne występuje w cienkiej warstwie na wysokości 350 km (dla GPS) lub 375 km (dla BeiDou)
- Pozwala na eliminację **ok. 50% wpływu refrakcji jonosferycznej** wyrazu 1-szego rzędu

Model Klobuchara – założenia

opóźnienie sygnału (w kierunku zenitu jest definiowane jako stała wartość w godzinach nocnych (5 ns) oraz funkcji połowy cosinusa w ciągu dnia, której amplituda i okres są podane jako funkcja ośmiu parametrów, gdzie maksimum opóźnienia przypada na godzinę 14:00 (50400 s) czasu lokalnego



$$\delta I_{vertical} = \begin{cases} DC + A \cos \left[\frac{2\pi(t - \Phi)}{P} \right], & \text{dzień} \\ DC; & \text{jeśli } \left[\frac{2\pi(t - \Phi)}{P} \right] \geq \frac{\pi}{2}, \text{ noc} \end{cases}$$

$$A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_m^n \quad P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n$$

α_n, β_n : współczynniki modelu;

φ : szerokość geomagnetyczna;

DC : nocna wartość $TEC = 5 \cdot 10^{-9} s = 5 ns$;

A : amplituda funkcji cosinus dla wartości w ciągu dnia;

P : okres funkcji cosinus (7200s);

$\Phi = 14 h$: faza odpowiadająca max. wartości funkcji cos (stały offset fazy);

t : czas lokalny;

Model Klobuchara – założenia

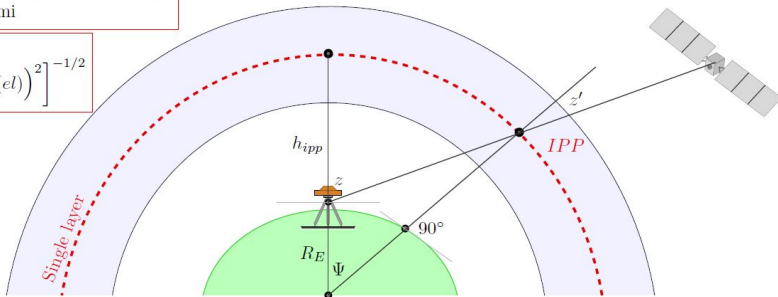
Model zakłada, że opóźnienie jonosferyczne występuje w cienkiej warstwie na wysokości 350 km (dla GPS) lub 375 km (dla BeiDou)

IPP : IPP: Punkt przebiecia jonosfery
 R_E : promień Ziemi
 h_{ipp} : wysoko warstwy jonosfery
 z : kat zenitalny satelity ($el = 90^\circ - z$)
 Ψ : kat centrum Ziemi

Funkcja mapująca:

$$m(el) = \left[1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h_{ipp}} \cos(el) \right)^2 \right]^{-1/2}$$

Opóźnienie w kierunku do satelity:
 $\delta I_{slant} = \delta I_{vertical} \cdot m(el)$



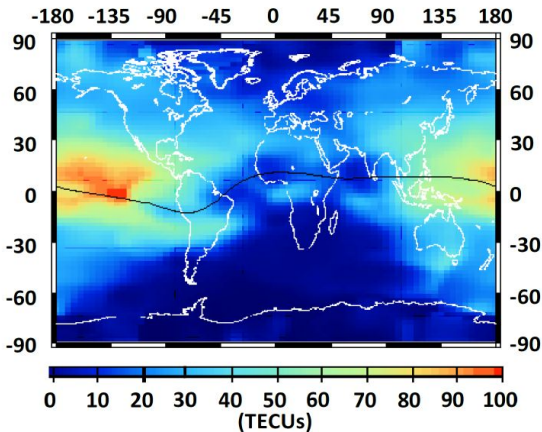


Figure: Globalny rozkład zawartości elektronów na podstawie modelu Klobuchara



co jest potrzebne:

- współrzędne geodezyjne odbiornika (φ_r, λ_r)
- elewacja el i azymut Az obserwowanego satelity
- współczynniki α i β modelu Klobuchara, z depeszy nawigacyjnej (zapisane w nagłówku pliku nawigacyjnego RINEX)
- lokalny czas obserwacji (t) podany w sekundach tygodnia GPS

UWAGA!!!

Uwaga na jednostki. W modelu Klobuchara stosowana jest jednostka kątowa: **półtук**, ang. **semicircle [sem]**, jako część kąta półpełnego, w zakresie $<0,1>$.

$$\alpha[sem] = \alpha[^{\circ}] \cdot 1/180$$

$$\alpha[sem] = \alpha[rad]/\pi$$

Natomiast trzeba pamiętać, że funkcje trygonometryczne przyjmują jako argumenty wartości w radianach!!!

- 1 Kąt geocentryczny (kąt o wierzchołku w środku Ziemi pomiędzy wektorem położenia użytkownika i rzutem punktu IPP - punkt przebicia jonosfery, (ang. Ionospheric Pierce Point), na powierzchnię Ziemi)

$$\psi[sem] = \frac{0.0137}{el[sem] + 0.11} - 0.022 \quad (7)$$

- 2 Wyznaczenie szerokości geograficznej dla punktu IPP [półłuk]:

$$\varphi_{IPP}[sem] = \varphi_r[sem] + \psi[sem] \cos Az \quad (8)$$

Sprawdzenie warunku dla 75° ($75^\circ = 0.416666$ [sem] szerokości geograficznej

$$\text{dla } \varphi_{IPP} > 0.416 \quad \varphi_{IPP} = 0.416$$

$$\text{dla } \varphi_{IPP} < -0.416 \quad \varphi_{IPP} = -0.416$$

- 3 Wyznaczenie długości geograficznej dla punktu przebicia jonosfery IPP

$$\lambda_{IPP}[sem] = \lambda_r[sem] + \frac{\psi[sem] \sin Az}{\cos \varphi_{IPP}} \quad (9)$$

- 4 Szerokość geomagnetyczna punktu IPP (przeliczenie szerokości geograficznej do geomagnetycznej wykonujemy, ponieważ zmienność jonosfery jest bardziej skorelowana z układem współrzędnych geomagnetycznych aniżeli geograficznych):

$$\varphi_m[sem] = \varphi_{IPP}[sem] + 0.064 \cos(\lambda_{IPP}[sem] - 1.617) \quad (10)$$

- 5 Wyznaczenie czasu lokalnego [sekunda dnia]:

$$t = 43200\lambda_{IPP}[sem] + t_{GPS} \quad (11)$$

Przeliczenie czasu tygodnia do sekundy dnia (reszta z dzielenia przez liczbę sekund w ciągu dnia – 86400), w python:

$$t = t \% 86400 \quad (12)$$

6 Wyznaczenie amplitudy opóźnienia jonosferycznego:

$$A_{ION} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_m[sem] + \alpha_2 \varphi_m^2[sem] + \alpha_3 \varphi_m^3[sem] \quad (13)$$

sprawdzenie warunku: dla $A_{ION} < 0$ $A_{ION} = 0$

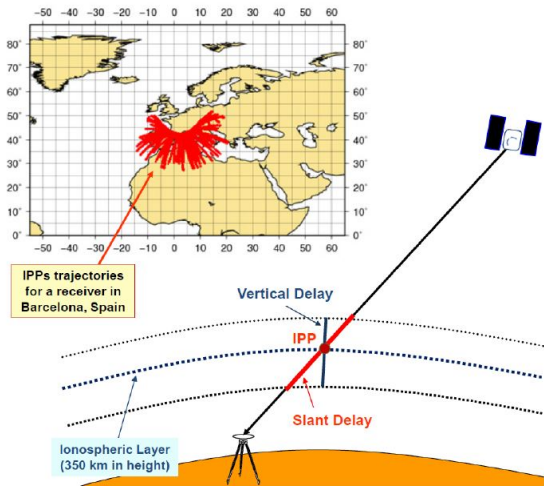
7 Wyznaczenie okresu opóźnienia jonosferycznego [sekundy]:

$$P_{ION} = \beta_0 + \beta_1 \varphi_m[sem] + \beta_2 \varphi_m^2[sem] + \beta_3 \varphi_m^3[sem] \quad (14)$$

sprawdzenie warunku: dla $P_{ION} < 72000$ $P_{ION} = 72000$

8 Wyznaczenie fazy opóźnienia jonosferycznego:

$$\phi_{ION}[rad] = \frac{2\pi(t - 50400)}{P_{ION}} \quad (15)$$



9 Funkcja mapująca:

$$mf = 1 + 16(0.53 - el[sem])^3 \quad (16)$$

Funkcja mapująca

Stosunek opóźnienia w kierunku do satelity (*slant*) do opóźnienia pionowego (*vertical*):

$$mf = \frac{\text{slant} IONO}{\text{vertical} IONO}$$

- 10 Opóźnienie jonosferyczne w kierunku satelity dla częstotliwości L1 GPS, w metrach, obliczane jest jako:

$$\delta I_{L1} = \begin{cases} c \cdot mf \cdot [5 \cdot 10^{-9} + A_{ION} \cdot (1 - \frac{\phi_{ION}^2}{2} + \frac{\phi_{ION}^4}{24})] & \text{dla } |\phi_{ION}| \leq \pi/2 \text{ dzień} \\ c \cdot mf \cdot [5 \cdot 10^{-9}] & \text{dla } |\phi_{ION}| > \pi/2 \text{ noc} \end{cases} \quad (17)$$

gdzie: $C = 299792458.0$ [m/s] - prędkość światła

- 12 Przeliczenie opóźnienia jonosferycznego dla innych częstotliwości:

$$\delta I_{Ln} = \frac{f_{L1}^2}{f_n^2} \cdot \delta I_{L1} \quad (18)$$

gdzie: f_n to częstotliwość danego sygnału



Do zrobienia funkcja wykorzystująca algorytm Klobuchara do wyznaczenia opóźnienia jonosferycznego, przyjmująca jako argumenty: czas tygodnia GPS, współrzędne φ i λ odbiornika, elewację i azymut do satelity oraz współczynniki ALFA i BETA modelu Klobuchara z depechy nawigacyjnej. Funkcja zwracać ma pojedynczą wartość opóźnienia jonosferycznego w kierunku danego satelity.

W przypadku, gdyby ktoś chciał wyznaczać pozycję na podstawie obserwacji na innych częstotliwościach, należy wyznaczyć δI_{Ln} gdzie n jest oznaczeniem danej częstotliwości.



Wpływ jonosfery wyeliminować można stosując tzw. kombinację liniową obserwacji *IONO Free*. Zapisać ją można wychodząc z równania 20, zapisując je dla dwóch częstotliwości:

$$\delta I_1 = \frac{40.3}{f_1^2} TEC \quad (19)$$

$$\delta I_2 = \frac{40.3}{f_2^2} TEC \quad (20)$$

Ponieważ 40.3 TEC jest wartością w obu równaniach stałą, możemy otrzymać:

$$\delta I_1 \cdot f_1^2 = \delta I_2 \cdot f_2^2 \quad (21)$$

$$\delta I_2 = \frac{\delta I_1 \cdot f_1^2}{f_2^2} \quad (22)$$

Zapisując równania pseudoodległości kodowej dla obserwacji na dwóch częstotliwości, podstawiając pod δI_2 (23) i odejmując je stronami, otrzymamy:

$$P_1 = c(t_r - t^s) = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta T + \delta I_1 \quad (23)$$

$$P_2 = c(t_r - t^s) = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta T + \delta I_2 \quad (24)$$

$$P_1 - P_2 = \delta I_1 - \delta I_1 \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2} \quad (25)$$



Wykonując kolejne przekształcenia otrzymamy wartość δI_1 :

$$\delta I_1 = \frac{P_2 - P_1}{f_1^2 - f_2^2} \cdot f_2^2 \quad (26)$$

Podstawiając wyznaczone δI_1 do równania pseudoodległości kodowej (24), otrzymamy pseudoodległość pozbawioną wpływu jonosfery *IONO Free*:

$$P_{IF} = \frac{P_1 f_1^2 - P_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (27)$$

$$P_{IF} = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) \quad (28)$$

W tym przypadku, poprawkę troposferyczną należy uwzględnić przed zastosowaniem kombinacji, w sposób:

- $P_1 = P_1 - \delta T$
- $P_2 = P_2 - \delta T$



Lamparski, J. (2001), *NAVSTAR GPS od teorii do praktyki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn.

Teunissen, P. and Montenbruck, O., eds (2017), *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer.



Dziękuję za uwagę

Maciej Grzymała