



Wydział Geodezji
i Kartografii

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Systemy Nawigacji Satelitarnej – projekt kierunek: geoinformatyka, sem 4

Systemy Nawigacji Satelitarnej – Opóźnienie troposferyczne

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

Warsaw University
of Technology

Politechnika
Warszawska

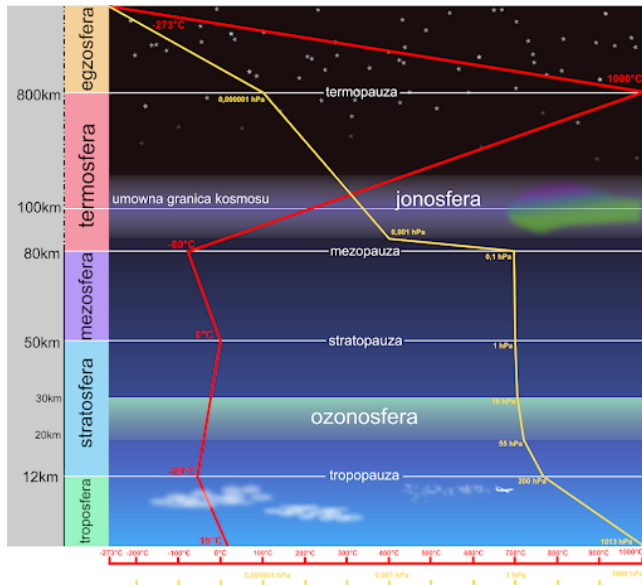


$$P_r^s = c(t_r - t^s) = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta \mathbf{T} + \delta I + E_r \quad (1)$$

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
- $\delta \mathbf{T}$: opóźnienie troposferyczne
- δI : 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/)



- Troposfera jest najniższą warstwą atmosfery. W pomiarach GNSS definiuje się ją jako neutralną część atmosfery (troposfera + stratosfera), do wysokości ok. 50 km nad pow. Ziemi.
- Troposfera jest ośrodkiem niedispersyjnym, dla fal o częstotliwościach typowych dla systemów GNSS (to znaczy, że wpływa identycznie na fale o różnych częstotliwościach - nie da się wyeliminować jej wpływu przez pomiar dwuczęstotliwościowy)
- Wpływ na propagację fali zależy od:
 - temperatury
 - ciśnienia atmosferycznego
 - wilgotności (cząstkowe ciśnienie pary wodnej)

Ze względu na różne właściwości zmian czasowych i przestrzennych, wyróżnić można dwie składowe troposfery, które w różnym stopniu wpływają na propagację sygnału GNSS.

- część sucha (δT_d) – hydrostatyczna (ang. dry/hydrostatic component): zależy głównie od ciśnienia atmosferycznego. Odpowiada za ok. 90% całego opóźnienia troposferycznego, jednak ze względu na niewielką zmienność przestrzenną i czasową, jej wpływ może być skutecznie modelowany i eliminowany (z dokładnością ok. 1 cm)
- część wilgotna (δT_w) – (ang. wet component): zależy od zawartości pary wodnej w atmosferze, której rozkład cechuje się bardzo zmiennym charakterem, zależnym od lokalnych, chwilowych warunków pogodowych. Mimo, że stanowi tylko ok. 10% całości opóźnienia troposferycznego, trudności z jej modelowaniem powodują, że to ta część odpowiada za większość błędu troposferycznego (eliminowany z dokładnością ok. 5 cm)



- Wielkość opóźnienia troposferycznego w bardzo dużym stopniu zależy od wysokości satelity nad horyzontem (e/l). Wraz ze zmianą wysokości satelity, opóźnienie troposferyczne zmienia się od ok. 2.3 m w kierunku zenitu, do ok. 20 m (dla elewacji poniżej 10°)
- Wielkość opóźnienia troposferycznego w kierunku satelity można wyrazić jako iloczyn opóźnienia w kierunku zenitu (ZTD – Zenith Tropospheric Delay) i *funkcji mapującej*
- Na wielkość opóźnienia troposferycznego ma wpływ również wysokość położenia miejsca pomiarowego nad poziomem morza, ze względu na zmiany ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza wraz ze wzrostem wysokości.



Metody eliminacji wpływu refrakcji troposferycznej

- Modele troposferyczne, np.:
 - Model Hopfield - jeden z pierwszych modeli troposfery (1969). Model empiryczny
 - Model Saastamoinen - model teoretyczny
- Dane meteorologiczne:
 - atmosfera standardowa
 - numeryczne modele prognozy pogody
- Pomiary różnicowe (względne)



Zjawisko refrakcji wynika ze zmiennej gęstości ośrodka, przez który przebiega fala elektromagnetyczna. Zmienna gęstość ośrodka powoduje zmiany prędkości fali elektromagnetycznej.

Zapisać można:

$$\delta T = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N ds \quad (2)$$

gdzie:

- δT – opóźnienie troposferyczne
- n – współczynnik refrakcji
- ds – droga propagacji sygnału w troposferze
- $N = (n - 1)10^6$ – wskaźnik refrakcji (refrakcyjność)



Refrakcyjność części suchej i wilgotnej

Refrakcyjność na powierzchni Ziemi, w kierunku zenitu (N_0) można przedstawić jako sumę dwóch komponentów, zgodnie ze wzorami Essena-Frooma:

$$N_0 = N_{d,0} + N_{w,0} \quad (3)$$

$$N_{d,0} = c_1 \frac{p}{t} \qquad N_{w,0} = c_2 \frac{e}{t} + c_3 \frac{e}{t^2} \quad (4)$$

gdzie:

- $N_{w,0}$ – refrakcyjność dla części suchej w kierunku zenitu
- $N_{d,0}$ – refrakcyjność dla części wilgotnej w kierunku zenitu
- parametry atmosfery standardowej (dla danej wysokości terenu): $p[\text{hPa}]$, $t[\text{K}]$, $e[\text{hPa}]$
- c_1 , c_2 , c_3 – współczynniki modelu Hopfield

$$c_1 = 77.64[K/hPa] \qquad c_2 = -12.96[K/hPa] \qquad c_3 = 3.718 \cdot 10^5[K^2/hPa] \quad (5)$$



Wyznaczenie parametrów atmosfery (temperatury, ciśnienia, wilgotności) dla danej wysokości nad poziomem morza, na podstawie parametrów dla atmosfery standardowej:

$$p = p_0(1 - 0.0000226h)^{5.225},$$

$$p_0 = 1013.25hPa$$

$$t = t_0 - 0.0065h,$$

$$t_0 = 291.15K$$

$$Rh = Rh_0 \exp(-0.0006396h),$$

$$Rh_0 = 50\% = 0.5$$

$$e = 6.11Rh \cdot 10^{\frac{7.5(t-273.15)}{t-35.85}}$$

gdzie:

h - wysokość ortometryczna: $h_{ort} = h_{el} - N$ (N -odstęp geoidy od elipsoidy)

t - temperatura

p - ciśnienie atmosferyczne

Rh - wilgotność względna

e - ciśnienie pary wodnej

Model Hopfield

- Opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu, dla części suchej $\delta T_{d,0}$

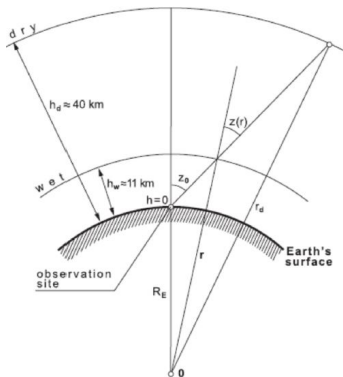
$$\delta T_{d,0} = \frac{10^{-6}}{5} N_{d,0} h_d \quad (6)$$

- Opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu, dla części wilgotnej $\delta T_{w,0}$

$$\delta T_{w,0} = \frac{10^{-6}}{5} N_{w,0} h_w \quad (7)$$

gdzie h_d i h_w to górna granica części suchej i wilgotnej troposfery, równe ok. 42 km oraz 11 km:

$$h_d = 40136 + 148.72(t - 273.15)[m] \quad h_w = 11000[m] \quad (8)$$



Grubość warstw troposfery
(Seeber, 2003)

Model Hopfield

- Wyznaczenie opóźnienia troposferycznego dla części suchej i wilgotnej, w kierunku satelity, korzystając z osobnych funkcji mapujących $m(el)$, gdzie el to elewacja satelity [w stopniach!!!]:

- dla części suchej:

$$\delta T_d = m_d(el) \cdot \delta T_{d,0}$$

$$m_d(el) = \frac{1}{\sin \sqrt{el^2 + 6.25^{\circ\circ}}}$$

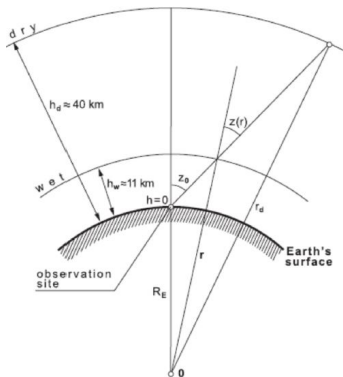
- dla części wilgotnej

$$\delta T_w = m_w(el) \cdot \delta T_{w,0} \quad (9)$$

$$m_w(el) = \frac{1}{\sin \sqrt{el^2 + 2.25^{\circ\circ}}}$$

- Wyznaczenie łącznej wartości opóźnienia troposferycznego w kierunku satelity

$$\delta T = \delta T_d + \delta T_w \quad (10)$$



Grubość warstw troposfery
(Seeber, 2003)



Model Hopfield

- Wyznaczenie opóźnienia troposferycznego z wykorzystaniem modelu Hopfield sprowadza się zatem do zastosowania następujących obliczeń:

$$\delta T_d = \frac{10^{-6}}{5} \frac{77.64 \frac{p}{t}}{\sin \sqrt{e} l^2 + 6.25} [40136 + 148.72(t - 273.15)] \quad (11)$$

$$\delta T_w = \frac{10^{-6}}{5} \frac{-12.96t + 3.718 \cdot 10^5}{\sin \sqrt{e} l^2 + 2.25} \frac{e}{t^2} 11000 \quad (12)$$

Model Saastamoinen

Drugim modelem pozwalającym na eliminację wpływu opóźnienia troposferycznego jest zastosowanie modelu Saastamoinen:

$$\delta T_{d,0} = 0.002277p \quad (13)$$

$$\delta T_{w,0} = 0.002277 \cdot \left(\frac{1255}{t} + 0.05 \right) e \quad (14)$$

gdzie: p , t i e to parametry atmosfery dla atmosfery standardowej.

$$\delta T = \delta T_d + \delta T_w = m_d(el) \cdot \delta T_{d,0} + m_w(el) \cdot \delta T_{w,0} \quad (15)$$

gdzie: m_d i m_w to funkcje mapujące, te same co dla modelu Hopfield

Model Hopfield i Saastamoinen

Dla uproszczenia, można zastosować tę samą funkcję mapującą dla części suchej i wilgotnej:

$$m(el) = \frac{1}{\sin(el)} \quad (16)$$

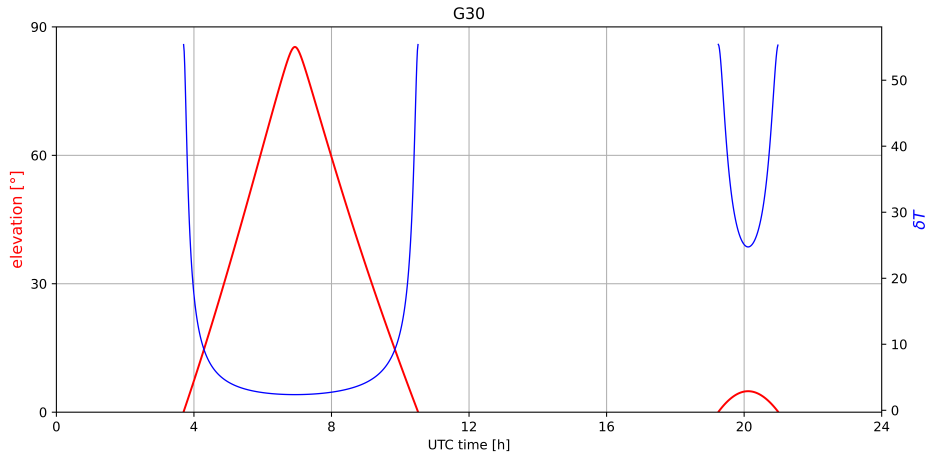
$$\delta T = \frac{1}{\sin(el)} \cdot (\delta T_{d,0} + \delta T_{w,0}) \quad (17)$$



Do zrobienia: wyznaczenie opóźnienia troposferycznego z wykorzystaniem modelu Hopfield i/lub Saastamoinen: funkcja przyjmująca jako argumenty wysokość odbiornika (ortometryczną, do wyznaczenia parametrów atmosfery dla danej wysokości odbiornika dla atmosfery standardowej) i elewację satelity, zwracająca jako wynik pojedynczą wartość opóźnienia troposferycznego w kierunku danego satelity.

Wyniki należy sprawdzić dla przykładowych elewacji wybranego satelity dla stacji JOZ2 (wykres dla modelu Hopfield). Zależność między elewacją satelity a wartością poprawki troposferycznej przedstawiono na wykresie na następnym slajdzie. Wykres ma charakter poglądowy: czyli dla elewacji np. 30° poprawka troposferyczna powinna mieć wartość ok. 4 m

- $h_{el} = 152.520m$
- $N = 31.359m (\zeta)$
- $H_{ort} = h_{el} - N = 121.161m$







Dziękuję za uwagę

Maciej Grzymała