

Issues of Time Change Forecasting of the Total Delay of GPS Signals

R.A. Eminov

Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig ave. 20, Baku, AZ1010, Azerbaijan)

For correspondence:

Eminov Ramiz / e-mail: eminovramiz@mail.ru

Abstract

A normalized mathematical model of tropospheric refractivity is proposed. An analytical expression is obtained for calculating the quantity of the partial pressure of water vapor, at which the total delay reaches a minimum value. On the basis of the available factual material, an experimental confirmation of the presence of a minimum of the total tropospheric delay predicted due to the proposed model is found.

Keywords: GPS signal, total delay, wet delay, dry delay, refractivity, forecast.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_89_94

Received 17.02.2022

Revised 17.06.2022

Accepted 21.06.2022

For citation:

Eminov R.A.

[Issues of time change forecasting of the total delay of GPS signals]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 89-94 (in Azerbaijani)

GPS-siqnalların cəm gecikməsinin zaman dəyişməsinin proqnozu məsələsi

R.Ə. Eminov

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Eminov Ramiz / e-mail: eminovramiz@mail.ru

Xülasə

Məqalədə troposfer refraktivliyinin normalaşmış riyazi modeli təklif edilmişdir. Su buxarlarının parsial təzyiqinin hesablanması üçün cəm gecikməni minimal qiymətə çatdıran analitik ifadə alınmışdır. Əldə edilmiş faktiki material və təklif olunmuş model əsasında proqnozu verilmiş cəm troposfer gecikməsinin minimuma çatdırılması mümkünlüyünün eksperimental təsdiqi aşkar olunmuşdur.

Açar sözlər: GPS-signal, cəm gecikmə, rütubət gecikməsi, quru gecikmə, refraktivlik, proqnoz.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_89_94

УДК: 528.4, 528.856

Вопросы прогноза временного изменения суммарной задержки GPS-сигналов

Р.А. Эминов

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)*

Для переписки:

Эминов Рамиз / e-mail: eminovramiz@mail.ru

Аннотация

Предложена нормированная математическая модель рефрактивности тропосферы. Получено аналитическое выражение для вычисления значения парциального давления водяных паров, при котором суммарная задержка достигает минимальной величины. На базе имеющегося фактического материала обнаружено экспериментальное подтверждение наличия минимума суммарной тропосферной задержки, предсказанной на основе предложенной модели.

Ключевые слова: GPS-сигнал, суммарная задержка, влажная задержка, сухая задержка, рефрактивность, прогноз.

Giriş

Məlumdur ki, GPS mövqəyəyinetmə sistemlərində səhvlərin yaranmasının əsas səbəblərindən biri də troposferin adekvat modelinin olmamasıdır. İş [1]-də qeyd olunduğu kimi adi halda zenit istiqamətində troposfer səhvi 2,5 m bərabərdir. Bu səhv iki tərkibdən ibarətdir: “rütubətli” və “quru”. Quru tərkib cəm gecikmənin təqribən 90%-ni təşkil edir və o, sabit olaraq, öncədən asanlıqla tapıla bilər. Ancaq rütubət tərkibi öz yüksək zaman dəyişkənliyi ilə fərqlənir. Belə ki, “rütubət” komponenti tropik zonada zenit istiqamətində 40 mm çata bilər.

[2, 3]-cü işlərdə qeyd olunduğu kimi, hətta qısa bazis məsafəli differensial GPS sistemlərdə troposferin qeyri sabitliyi mövqəyəyinetmənin gözəçarpan qədər səhvinə gətirib çıxara bilər.

İş [4]-də yağışın GPS mövqəyəyinetmə sistemlərinin keyfiyyətinə etdiyi təsirinin kompleks qiymətləndirilməsi məsələsinə baxılıb, yağışla bağlı əsas amillər təhlil olunub və nəticədə onların neqativ təsirinin öyrənilməsi üçün yanaşma yolları göstərilib.

Yuxarıda qeyd etdiklərimizi nəzərə alsaq, onda bu məsələnin aşağıdakı alternativ qoyuluşunu aktual hesab etmək olar [5]:

1. Troposferin fiziki parametrlərinin ayrı-ayrılıqda modellərinin əvəzinə, cəm zaman gecikməsinin zamanla dəyişməsinin riyazi modelini yaratmaq, yaxud da formalaşdırmaq.

2. GPS-siqnalların cəm troposfer gecikməsinin zamanla dəyişməsinin öncədən deməsi mümkünlüyünün tədqiqi məsələsi.

Şübhəsiz ki, cəm troposfer gecikməsinin zamanla dəyişməsinin adekvat riyazi modelini yaratmaq üçün həmin gecikmənin ayrı-ayrı tərkibləri və xüsusən də zaman dəyişmələri təhlil olunmalıdır.

Məsələnin həlli

İş [3]-də göstərilirdi ki, müəyyən t zaman anında ZHD zenit hidrostatik gecikməsi bu cür təyin olunur

$$ZHD(t) = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N_d(t) dh, \quad (1)$$

burada $N_d(t)$ - cəm refraktivliyin hidrostatik komponentinin qiymətidir; h_s - yer səthinin yüksəkliyi.

ZWD zenit rütubət gecikməsi bu cür təyin olunur

$$ZWD(t) = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N_w(t) dh. \quad (2)$$

Bu zaman cəm refraktivliyin hidrostatik və rütubət komponentləri bu cür təyin olunur

$$N_d = \frac{k_1 \rho(t) R_0}{M_d}, \quad (3)$$

$$N_w = \left[k'_2 \frac{e(t)}{T(t)} + k'_3 \frac{e(t)}{T^2(t)} \right] \cdot Z_w^{-1}, \quad (4)$$

burada $k_1 = 77,6 \pm 0,05$ (K/ГПа); $\rho(t)$ - quru və rütubətli havanın cəm sıxlığıdır ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$); R_0 - universal qaz tərkibidir, ($\text{Д} \cdot \text{мол}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); M_d - quru havanın molyar çəkisi, ($\text{кг} \cdot \text{кмол}^{-1}$).

$$k'_2 = \left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right),$$

burada $k_2 = 70,4 \pm 2,2$ (K/ГПа); $k_1 = 77,6 \pm 0,5$ (K/ГПа); M_w - rütubətli havanın molyar çəkisi, ($\text{кг} \cdot \text{кмол}^{-1}$); $e(t)$ - su buxarlarının parsial təzyiqidir; $T(t)$ - hərarətdir (K); $k_3 = (3,739 \pm 0,02) \cdot 10^5$ (K²/ГПа); Z_w^{-1} - su buxarının inversli sıxılma əmsalidir,

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \frac{e(t)}{T^3} (1 - 0,01317 T_c + 1,75 \cdot 10^{-4} T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_c^3)$$

burada T_c - hərarətdir, °C.

(1)-ci ifadəyə görə aşağıdakı bərabərliyi alırıq:

$$k_1 \left[\frac{\rho(t)R_0}{M_d} - \frac{e(t)}{T} Z_w^{-1} \cdot \frac{M_w}{M_d} \right] = \frac{k_1 P_d(t)}{T} \cdot Z_d^{-1} \quad (5)$$

burada P_d - quru havanın parsial təzyiqidir.

$$N = \frac{k_1 P_d(t)}{T} \cdot Z_d^{-1} + k_2 \frac{e(t)}{T} \cdot Z_w^{-1} + k_3 \frac{e(t)}{T^2} \cdot Z_w^{-1}, \quad (6)$$

burada Z_d^{-1} - quru havanın inversli sıxılma əmsalıdır,

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \left[57,97 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \frac{T_c}{T^2} \right].$$

Aşağıdakı ifadəni nəzərə alsaq

$$P_d(t) = P(t) - e(t), \quad (7)$$

burada $P(t)$ - cəm təzyiqidir; P_d - quru havanın parsial təzyiqidir.

(7)-ci ifadədən aşağıdakını alırıq:

$$N = \frac{k_1 [P(t) - e(t)] \cdot Z_d^{-1}}{T} + e(t) Z_w^{-1} \left(\frac{k_2}{T} + \frac{k_3}{T^2} \right) = \frac{k_1 [P(t) - e(t)] \cdot Z_d^{-1}}{T} + \quad (8)$$

$$+ \left[e(t) + \frac{e^2(t)}{T^3} \cdot 1650 \cdot (f_1(T_c)) \right] + f_2(k_2, k_3, T),$$

burada:

$$f_1(T_c) = 1 - 0,01317 T_c + 1,75 \cdot 10^{-4} T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_c^3,$$

$$f_2(k_2, k_3, T) = \frac{k_2}{T} + \frac{k_3}{T^2}.$$

Beləliklə, cəm refraktivlik aşağıdakı ikihəddli kimi təmsil oluna bilər

$$N = \alpha_1 F_1 [e(t)] + \alpha_2 F_2 [e(t)], \quad (9)$$

burada:

$$F_1 [e(t)] = P(t) - e(t);$$

$$F_2 [e(t)] = e(t) + \frac{e^2(t)}{T^3} \cdot 1650 \cdot f_1(T_c);$$

$$\alpha_1 = \frac{k_1 \cdot Z_d^{-1}}{k};$$

$$\alpha_2 = f_2(k_2, k_3, T).$$

Baxılması üçün cəm refraktivliyin aşağıdakı normalaşmış qiymətini nəzərdən keçirək:

$$N_{nor} = \frac{\alpha_1 F_1 [e(t)] + \alpha_2 F_2 [e(t)]}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (10)$$

Nisbi əmsalları daxil edək:

$$\beta_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad \beta_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Çox güman ki, $\beta_1 + \beta_2 = 1$.

Beləliklə, cəm refraktivliyin normalaşmış qiyməti bu cür təyin oluna bilər:

$$N_{nor} = \beta_1 F_1 [e(t)] + \beta_2 F_2 [e(t)] \quad (11)$$

$P(t) = const$ şərti altında su buxarlarının parsial təzyiqinin azalması (11)-ci modeldə aşağıdakı dəyişikliklərə gətirəcək:

1. $F_2 [e(t)]$ qiymətinin azalmasına;
2. $F_1 [e(t)]$ qiymətinin artmasına.

$e(t)$ qiyməti artsa, onda əks prosesin baş verməsini gözləmək olar.

Yuxarıda qeyd etdiklərimizi nəzərə alsaq, onda demək olar ki, N_{nor} cəm refraktivliyin normalaşmış qiymətinin dəyişməsi xarakterinin proqnozunun mümkünlüyü xüsusi maraq doğurur.

Bu suala cavab vermək üçün iş [2]-də göstərilmiş çoxmeyarlı optimizasiyaya dair tədqiqat nəticələrindən istifadə etmək məqsədə uyğun olardı.

Bu işdə göstərilir ki, əgər sistem müəyyən $\varphi(t)$ funksiyasından qarşılıqlı inversiv formada asılılıqda olan iki F_1 və F_2 keyfiyyət funksionallarla xarakterizə olunarsa, yəni F_1 $\varphi(t)$ -nin artan, F_2 isə azalan funksiyası olarsa, onda xətti kombinə edilmiş funksional bu cür olacaq:

$$L = \gamma_1 \cdot F_1[\varphi(t)] + \gamma_2 \cdot F_2[\varphi(t)]$$

və $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ olduqda, müəyyən $\varphi_0(t)$ nöqtəsində öz minimumuna çatacaq.

N_{nor} qiymətini minimuma endirən $e(t)$ qiymətini tapmaq üçün (10)-cu ifadənin surətini ekstremuma tədqiq etmək kifayətdir.

(10)-cu ifadə surətinin birinci törəməsini alıb, onu sıfıra bərabər etsək:

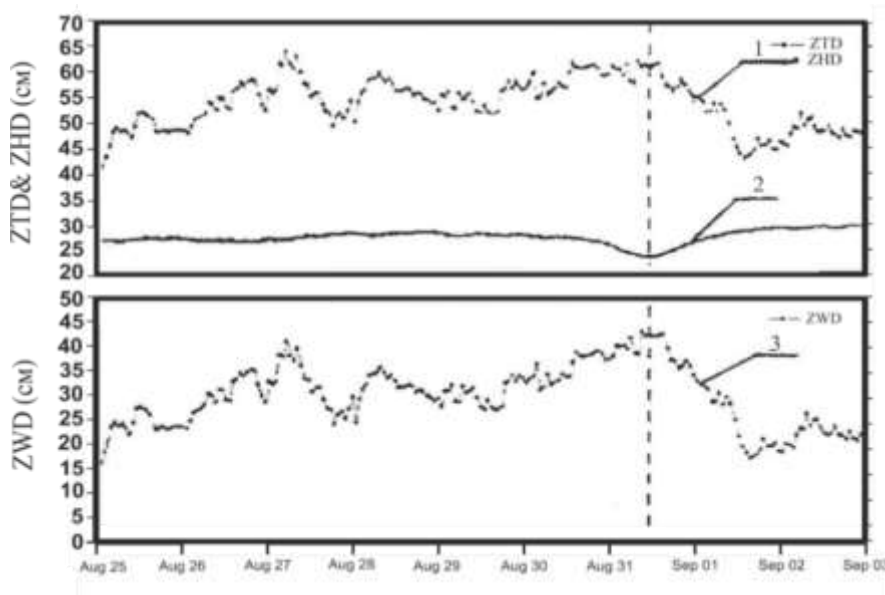
$$-\alpha_1 + \alpha_2 \left[1 + \frac{2e(t)}{T_3} \cdot 1650 \cdot f_1(T_2) \right] = 0, \quad (12)$$

(12)-ci ifadədən bunu alırıq

$$e(t) = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1 \right) \frac{T_3}{2 \cdot 1650 \cdot f_1(T_c)}. \quad (13)$$

Beləliklə, atmosferin cəm normalaşmış refraktivliyinin yuxarıdakı modelinə əsasən, (13)-cü ifadə ilə təyin olunan $e(t)$ qiymətində, ZWD azalan, quru gecikmə isə artan zaman intervalında cəm gecikmənin minimumu müşahidə olunmalıdır.

Misal kimi, DAEJ stansiyasında müşahidə olunmuş eksperimental gecikmə nəticələrini nəzərə çatdırırıq (şəkil). Göstərilmiş qrafiklərdən görünür ki, 01.09 - 02.09 zaman intervalında ZWD , ZHD -nin əksfazlı dəyişmələri müşahidə olunur və nəticədə cəm gecikmə minimal qiymətdən keçir [6].



Şəkil – Kanadanın DAEJ stansiyasında 25.08.2002-03.09.2002 tarixində cəm gecikmənin (əyri 1), hidrostatik gecikmənin (2) və rütubət gecikməsinin (3) zamanla dəyişməsinin qrafikləri [6]

Figure – Graphs of change of total delay (curve 1), hydrostatic delay (2) and humidity delay (3) on time in Canadian DAEJ station on 25.08.2002 – 03.09.20002 [6]

Beləliklə, cəm refraktivliyin təklif etdiyimiz modeli, onun ayrı-ayrı tərkiblərinin zaman dəyişmələrinin öyrənilməsi əsasında, cəm refraktivliyin zaman dəyişməsinin proqnozunu deməyə imkan verir. Aydındır ki, zaman məsələsinin əks qoyuluşu da müm-

kündür, yəni cəm troposfer refraktivliyinin və su buxarları refraktivliyinin öyrənilməsi əsasında hidrostatik troposfer refraktivliyinin zamanla dəyişməsinin xarakterini də öncədən demək olar.

Nəticə

Aparılmış tədqiqatların yekununda aşağıdakı əsas nəticələr alınmışdır:

- Troposfer refraktivliyinin normalaşmış riyazi modeli təklif edilmişdir.

- Su buxarlarının parsial təzyiqinin hesablanması üçün cəm gecikməni minimal qiymətə çatdıran analitik ifadə alınmışdır.

- Əldə edilmiş faktiki material və təklif olunmuş model əsasında proqnozu verilmiş cəm troposfer gecikməsinin minimuma çatdırılması mümkünlüyünün eksperimental təsdiqi aşkar olunmuşdur.

REFERENCES

1. **Ahn Y.W., Kim D., Dare P.** Positioning impact from imbalanced atmospheric GPS network errors. ION GNSS 20th International Meeting of the Satellite division, 25-28 September 2007, *Fort Worth, TX*, pp. 2302-2312 (*in English*)
2. Oblaka. Aviatsiya specialnogo naznacheniya. 2012. Available at: <http://aviaspec.com/aviatsionnaya-meteorologiya/oblaka.html>. (*in Russian*)
3. Training manual for GPS operations, Nd dept of transportation surveys & photogrammetry, 2007, January, pp. 1-54. Available at: www.dot.nd.gov/manuals/design/surveymanual (*in English*)
4. **Eminov R.Ə., İbrahimova S.İ.** Yağışın GPS mövqetəyinetmə sistemlərinin keyfiyyətinə etdiyi təsirin kompleks qiymətləndirilməsi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, Bakı, 2020, cild 12, №1, s. 92-96. (*in Azerbaijani*)
5. **Eminov R.A., Ismailov K.H., Javadov N.G., Gafarov N.G.** Voprosy ocenki vliyaniya dozhdy na troposfernyuyu zaderzhku signalov GPS navigacionnyh sistem. X Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Agrarnaya Nauka – selskomu hozyajstvu", sbornik statej, kniga 2. Barnaul, 2015, s. 381-382 (*in Russian*)
6. **Asadov H.G., Suleymanov Sh.T.** Sintez trekhvolnovykh skorrektirovannykh izmeritelej malykh komponent atmosfery v ultrafioletovom diapazone. Moskva: *Metrologiya*, 2007. № 9, s. 3-7 (*in Russian*)