

UDK 528.14

## JONOSFEROS ĮTAKOS KOVARIACIJA ATLIKUS GPS MATAVIMUS

Jonas Skeivalas

*Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva,  
el. paštas: Jonas.Skeivalas@ap.vtu.lt*

*Įteikta 2005 08 30, priimta 2005 12 14*

**Santrauka.** Straipsnyje analizuojama jonosferos įtaka atliekant pseudoatstumų ir nešlio fazių matavimus. Kadangi jonosferos būklė nėra pastovi, o kinta laike ir priklauso nuo GPS palydovų signalų sklaidimo geometrijos, tai atitinkamai nėra pastovios matavimo taško koordinatų klaidos dėl jonosferos įtakos. Nustatytos koreliacijos tarp dviejų pseudoatstumų bei tarp dviejų nešlio fazių skirtumų, gautų priimant signalus iš to paties palydovo skirtingais laiko momentais arba iš skirtingų palydovų tais pačiais laiko momentais, koeficiento teorinės reikšmės. Parodyta, kad GPS matavimo rezultatų apdorojimo procedūrose turi būti atsižvelgiama į matavimo rezultatų koreliaciją. Analizuojama jonosferos įtaka taško koordinatų, nustatytų vieno dažnio GPS imtuvais, klaidoms absoliučiojoje koordinatų sistemoje.

**Prasminiai žodžiai:** GPS, jonosfera, koreliacija, pseudoatstumai.

### 1. Įvadas

Matavimus atliekant GPS, dėl jonosferos įtakos vyksta palydovo signalų delsa, tad iškraipomi pseudoatstumų ir nešlio fazių matavimų rezultatai. Šiai įtakai eliminuoti sudaromi tiesiniai modeliai, arba jonosferos įtakos klaida nustatoma pagal transliuojamas atitinkamas jonosferos modelio parametrų reikšmes [1–10]. Tiesinius matavimo rezultatų modelius įmanoma sudaryti turint dviejų nešlio dažnių GPS imtuvus. Tačiau matavimo rezultatams, gautiems vieno dažnio GPS imtuvais apdoroti tektų sudaryti pakankamai sudėtingus jonosferos parametrų kaitos modelius. Todėl vieno dažnio imtuvai atliekant tikslius matavimus paprastai nėra naudojami. Signalo sklaidimo iš palydovo, esančio žemai virš horizonto, delsa gali būti didesnė daugiau nei tris kartus, palyginti su signalo sklaidimo iš palydovo, esančio ties zenitu, delsa [9].

Straipsnyje analizuojamas matavimo rezultatų, gautų vieno dažnio GPS imtuvais, tikslumas, įvertinant jonosferos įtakos klaidų pokyčius. Apskaičiuotos teorinės koreliacijos tarp pseudoatstumų bei tarp nešlio fazių skirtumų, nustatytų priimant signalus iš keleto palydovų tais pačiais laiko momentais arba naudojant vieno palydovo signalus skirtingais laiko momentais, koeficiento reikšmės. Siūloma GPS matavimo rezultatų apdorojimo procedūrose taikyti koreliacijos įtakos įvertinimo algoritmus.

### 2. Teorinės kovariacijos nustatymo prielaidos

Taško koordinatų (Žemės paviršiuje arba erdvėje aplink ją) nustatymo GPS imtuvais klaidos labai priklauso nuo jonosferos įtakos. Ši įtaka pasireiškia

virpesių sklaidimo grupine delsa jonosferoje  $\delta t_{gr}^{jon}$  ir išreiškiama formule [9]

$$\delta t_{gr}^{jon} = \frac{40,3}{cf^2} TEC(t), \quad (1)$$

čia  $c$  – virpesių greitis vakuume,  $f$  – L1 arba L2 kanalo nešlio dažnis,  $TEC$  (*Total Electronic Content*) – laisvųjų elektronų skaičius jonosferos sluoksnio stulpe, kurio pagrindo plotas lygus  $1 \text{ m}^2$ . Šis skaičius priklauso nuo jonosferos tam tikru metu būklės.

Apytikslę jonosferos įtakos pataisą, matuojant vieno dažnio imtuvais, galima nustatyti panaudojant iš palydovo transliuojamas jonosferos modelio parametrų reikšmes. Taikant tokius modelius jonosferos poveikį galima sumažinti apie 70 % [10].

Išmatuoto pseudoatstumo  $R_i^k(t_i)$  tarp  $i$ -ojo imtuvo ir  $k$ -ojo palydovo epochoje  $t_i$  klaida dėl jonosferos įtakos yra

$$\delta R_i^{k,jon}(t_i) = c \cdot \delta t_{gr}^{jon} = \frac{40,3}{f^2} TEC(t_i). \quad (2)$$

Nešlio virpesių fazės  $\Phi_i^k(t)$  klaida dėl jonosferos poveikio faziniais ciklais:

$$\delta \Phi_i^{k,jon}(t_i) = f \cdot \delta t_{gr}^{jon} = \frac{40,3}{cf} TEC(t_i). \quad (3)$$

GPS matavimų rezultatai (pseudoatstumai ir nešlio fazės) dėl jonosferos poveikio koreliuoja. Todėl apdorojant matavimų rezultatus tenka atsižvelgti į jų koreliaciją.

Nustatysime teorines jonosferos lemiamas koreliacijos koeficiento reikšmes.

Kovariacija tarp dviejų pseudoatstumų, nustatytų skirtingose epochose  $t_i$  ir  $t_j$ , priimant signalus iš to paties palydovo  $k$  (galima skaičiuoti toje pačioje epochoje iš skirtingų palydovų), užrašoma taip:

$$\begin{aligned} K\{R_i^k(t_i), R_i^k(t_j)\} &= M\{[R_i^k(t_i) - MR_i^k(t_i)] \times \\ &[R_i^k(t_j) - MR_i^k(t_j)]\} = M\{\delta R_i^k(t_i) \cdot \delta R_i^k(t_j)\}, \end{aligned} \quad (4)$$

čia  $MR_i^k(t_i)$  – pseudoatstumo  $R_i^k(t_i)$  vidurkis (matematinė viltis),  $\delta R_i^k(t_i)$  – pseudoatstumo atsitiktinė klaida, atsirandanti dėl atsitiktinių faktorių.

Pseudoatstumo atsitiktinę klaidą  $\delta R_i^k(t_i)$  galima užrašyti dviejų komponentių suma:

$$\delta R_i^k(t_i) = \delta R_{i,m}^k(t_i) + \delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i), \quad (5)$$

čia  $\delta R_{i,m}^k(t_i)$  – pseudoatstumo atsitiktinė klaida dėl matavimo procedūrų netobulumo ir kitų atsitiktinių faktorių,  $\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i)$  – pseudoatstumo atsitiktinė klaida dėl jonosferos įtakos.

Taigi kovariaciją (4), atsižvelgiant į išraišką (5), galima įvertinti tokia formule:

$$\begin{aligned} K\{R_i^k(t_i), R_i^k(t_j)\} &= M\{\delta R_{i,m}^k(t_i) \cdot \delta R_{i,m}^k(t_j)\} + \\ &M\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i) \cdot \delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)\} = K\{\delta R_{i,m}^k(t_i), \delta R_{i,m}^k(t_j)\} + \\ &K\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i), \delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)\}, \end{aligned} \quad (6)$$

čia atsitiktinės klaidos  $\delta R_{i,m}^k(t_i)$  ir  $\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)$  nekoreliuoja.

Nagrinėsime formulės (6) antrąją komponentę, t. y. jonosferos įtakos atsitiktinių klaidų kovariaciją. Taikydami formulę (2) galime parašyti

$$\begin{aligned} K\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i), \delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)\} &= \frac{40,3^2}{f^4} \times \\ &K\{TEC(t_i), TEC(t_j)\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Kovariaciją  $K\{TEC(t_i), TEC(t_j)\}$  galima išreikšti taip:

$$\begin{aligned} K\{TEC(t_i), TEC(t_j)\} &= M\{\delta TEC(t_i) \times \\ &[\delta TEC(t_i) + \Delta \delta TEC(t_{ij})]\} = \\ &= M\{\delta TEC(t_i)\}^2 = \sigma_{TEC(t_i)}^2, \end{aligned} \quad (8)$$

čia

$$\delta TEC(t_i) = TEC(t_i) - MTEC(t_i),$$

$$\delta TEC(t_j) = \delta TEC(t_i) + \Delta \delta TEC(t_{ij}),$$

$$\Delta \delta TEC(t_{ij}) = TEC(t_i) - \text{atsitiktinių klaidų pokytis}$$

laiko intervale  $t_{ij}$ ,

$$\sigma_{TEC(t_i)} - \text{standartinis nuokrypis,}$$

$$M\{\delta TEC(t_i) \cdot \Delta \delta TEC(t_{ij})\} = 0, \text{ nes atsitiktiniai}$$

dydžiai skliaustuose yra nepriklausomi.

$$\Delta \delta TEC(t_{ij}) \text{ pokytis nepriklauso nuo } \delta TEC(t_i)$$

būsenos  $t_i$  epochoje.

Standartiniam nuokrypiui  $\sigma_{TEC(t_i)}$  skaičiuoti galima taikyti formulę

$$\sigma_{TEC(t_j)}^2 = \sigma_{TEC(t_i)}^2 + \sigma_{\Delta \delta TEC(t_{ij})}^2 = 2\sigma_{TEC(t_i)}^2. \quad (9)$$

Pokyčio  $\Delta \delta TEC(t_{ij})$  standartinį nuokrypį  $\sigma_{\Delta \delta TEC(t_{ij})}$  galima laikyti lygų  $\sigma_{TEC(t_i)}$ .

Išmatuoto pseudoatstumo  $R_i^k(t_i)$  klaidos dėl jonosferos įtakos standartinis nuokrypis, taikant formulę (2) –

$$\sigma\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i)\} = \frac{40,3}{f^2} \sigma_{TEC(t_i)}. \quad (10)$$

Koreliacijos tarp  $\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i)$  ir  $\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)$  koeficientas, taikant formules (7–10), skaičiuojamas pagal formulę:

$$\begin{aligned} r\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i), \delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)\} &= \frac{K\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i), \delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)\}}{\sigma\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_i)\} \sigma\{\delta R_{i,a}^{k,jon}(t_j)\}} = \\ &= \frac{40,3^2 / f^4 \sigma_{TEC(t_i)}^2}{40,3 / f^2 \sigma_{TEC(t_i)} \cdot 40,3 / f^2 \sigma_{TEC(t_j)}} = 0,71. \end{aligned} \quad (11)$$

Analogiškai skaičiuodami nustatome koreliacijos tarp nešlio fazės atsitiktinių klaidų  $\delta \Phi_{i,a}^{k,jon}(t_i)$  ir  $\delta \Phi_{i,a}^{k,jon}(t_j)$  dėl jonosferos poveikio koeficientą:

$$r\{\delta \Phi_{i,a}^{k,jon}(t_i), \delta \Phi_{i,a}^{k,jon}(t_j)\} = 0,71. \quad (12)$$

Ši skaičiavimų eiga rodo, kad pseudoatstumų ir nešlio fazių matavimo rezultatų apdorojimo procedūrose turėtų būti atsižvelgiama į koreliaciją. Matavimo rezultatų koreliacijos tarp skirtingų epochų dėl jonosferos įtakos koeficientų matricos:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0 & 0,71 & \dots & 0,71 \\ 0,71 & 1,0 & \dots & 0,71 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,71 & 0,71 & \dots & 1,0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

čia  $r_{ij}$  –  $i$ -osios ir  $j$ -osios epochų matavimo rezultatų koreliacijos koeficientai.

### 3. Imtuvo koordinacijų pokyčiai dėl jonosferos

Pagal tyrimų rezultatus [5–7] jonosferos elektronų skaičius ties fiksuotu Žemės paviršiaus tašku pagal Saulės aktyvumą per vieną valandą gali pakisti nuo keleto dešimtųjų *TECU* dalių iki keleto dešimčių *TECU* (*Total Electronic Content Unit*). *TECU* yra *TEC* mato vienetas, lygus  $10^{16}$  elektronų/m<sup>2</sup>. 1 *TECU* sukelia elektromagnetinių virpesių sklaidimo jonosferoje delką, lygią 0,351 ns. Taigi dėl 1 *TECU* sukeltos signalo delsos atsiranda pseudoatstumo klaida, kuri lygi

$$\delta R^{jon} = c \cdot \delta t = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,351 \cdot 10^{-9} = 0,1 \text{ m.}$$

Matavimų rezultatuose per valandą išmatuoto pseudoatstumo klaida dėl jonosferos įtakos gali kisti nuo keleto centimetrų iki keleto metrų. Pseudoatstumo klaida  $\delta R^{jon}$  lemia nustatomo taško koordinacijų klaidas  $\delta X_i, \delta Y_i, \delta Z_i$ . Galima parašyti:

$$\delta R^{jon} = \sqrt{(\delta X^k + \delta X_i)^2 + (\delta Y^k + \delta Y_i)^2 + (\delta Z^k + \delta Z_i)^2} = \sqrt{\delta X_i^2 + \delta Y_i^2 + \delta Z_i^2}, \quad (14)$$

čia palydovo koordinacijų klaidos  $\delta X^k, \delta Y^k, \delta Z^k$  dėl jonosferos įtakos yra lygios nuliui.

Nagrinėdami atsitiktines klaidų komponentes gauname šias standartinių nuokrypių išraiškas:

$$\sigma_{\delta R^{jon}}^2 = \frac{\delta X_i^2}{\delta R^2} \sigma_{\delta X}^2 + \frac{\delta Y_i^2}{\delta R^2} \sigma_{\delta Y}^2 + \frac{\delta Z_i^2}{\delta R^2} \sigma_{\delta Z}^2. \quad (15)$$

Laikydami, kad  $\sigma_{\delta X} \approx \sigma_{\delta Y} \approx \sigma_{\delta Z} = \sigma_0$ , rašome:

$$\sigma_{\delta R^{jon}}^2 = 3\sigma_0^2, \text{ arba } \sigma_0 = 0,6\sigma_{\delta R^{jon}}.$$

Todėl, esant pseudoatstumo 1 m standartiniam nuokrypiui dėl jonosferos įtakos, taško koordinatės įgauna vidutinius 0,6 m standartinius nuokrypius, t. y.  $\sigma_{\delta X} \approx \sigma_{\delta Y} \approx \sigma_{\delta Z} = 0,6 \text{ m}$ .

Taikant vieno dažnio GPS imtuvus to paties taško koordinacijų pokyčiai per valandą dėl jonosferos įtakos gali svyruoti nuo keleto centimetrų iki keleto metrų. Tai priklauso nuo jonosferos būklės, o ši – nuo Saulės aktyvumo.

### 4. Išvados

1. Pseudoatstumų ir nešlio fazių matavimų rezultatai dėl jonosferos įtakos koreliuoja, todėl apdorojant juos turi būti taikoma jų kovariacijų matrica.

2. Atliekant matavimus vieno dažnio GPS imtuvais, to paties taško koordinacijų pokyčiai per valandą gali kisti nuo keleto centimetrų iki keleto metrų.

### Literatūra

1. Baran, L. W.; Ephishov, I. I. and Shagimuratov, I. I. Ionospheric Total Electron Content Behavior During November 1997 Storm. *Phys. Chem. Earth (C)*, 26, 2001, p. 341–346.
2. Cander, L. R.; Mihajlovic, S. J. Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, Vol 103, A1, 1998, p. 391–398.
3. Hajj, G. A.; Lee, L.; C; Pi, X.; Romans, L. J.; Schreiner, W. S.; Straus, P. R. and Wang, C. COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 11, 2000, p. 235–272.
4. Ho, C. M.; Manucci, A. J.; Linqwister, U. et al. Global ionospheric TEC variations during January 10 1997 storm. *Geophys. Res. Letts*, 25, 1998, p. 2589–2592.
5. Jakowski, N.; Schluter, S.; Sardon, E. Total electron content of the ionosphere during the geomagnetic storm on 10 January 1997. *J. Atmos. Terr. Physics*, 61, 1999, p. 299–307.
6. Mannucci, A. J.; Wilson, B.; Yuan, D.; Linqwister, U. and Runge, T. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*, Vol 33, 1998, p. 565–582.
7. Pottiaux, E.; Warnant, R. Quality Assessment of GPS Integrated Precipitable Water Vapor Estimations using Water Vapor Radiometer Observations. *GPS Solutions*, Vol 6, No 1–2, 2002, p. 11–17.
8. Skeivalas, J. Construction of linear models of pseudoranges and carrier phases for eliminating the ionosphere influence. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXIX, No 3. Vilnius: Technika, 2003, p. 61–64 (in Lithuanian).
9. Būga, A. Ionospheric influence on delay of GPS satellites signals. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXV, No 4. Vilnius: Technika, 1999, p. 150–155 (in Lithuanian).
10. Skeivalas, J.; Būga, A. Ionospheric influence on GPS observations. In: The 6<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering“, Vol 2, May 26–27, 2005. Vilnius, p. 1005–1007.

**Jonas SKEIVALAS.** Prof, Doctor Habil.

Vilnius Gediminas Technical University. Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania (Ph +370 5 2744703, Fax +370 5 2744705), e-mail: [jonas.skeivalas@ap.vtu.lt](mailto:jonas.skeivalas@ap.vtu.lt).

Author of two monographs and more than 130 scientific papers. Participated in many intern conferences and research visits to the Finish Geodetic Institute.

Research interests: processing of measurements with respect to tolerances, adjustment of geodetic networks.