

UDK 528.14

KORELIACINĖ ANALIZĖ JONOSFEROS ĮTAKAI GPS MATAVIMAMS NUSTATYTI

Jonas Skeivalas

Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva
El. paštas Jonas.Skeivalas@ap.vgtu.lt

Įteikta 2007 07 27, priimta 2007 09 27

Santrauka. Remiantis erdviųjų geocentriųjų koordinacių koreliacine analize straipsnyje analizuojami jonosferos įtakos GPS matavimams pokyčiai. Jonosferos būklė nėra pastovi, ji kinta erdvėje laikui einant, ir jos įtaka GPS matavimų rezultatams priklauso nuo GPS palydovų signalų sklidimo geometrijos. Taigi atitinkamai nėra pastovios matavimo taško koordinacių klaidos dėl jonosferos įtakos. Įvertinti koordinacių kovariacijų dėl geocentriųjų stačiakampių koordinacių (X, Y, Z) kaitos skirtingose epochose per tam tikrą laiką matricių įverčiai. Tokius kovariacijų matricių įverčius galima skaičiuoti pagal koordinates, nustatytas atliekant kodinius bei nešlio fazių matavimus. Pagal koordinacių kovariacijų įverčių pokyčius įvertinami jonosferos elektronų kiekio *TEC* (*Total Electronic Content*) pokyčiai per tam tikrą laikotarpį.

Reikšminiai žodžiai: GPS, jonosfera, kovariacija, *TEC*.

1. Įvadas

Matavimus atliekant GPS, dėl jonosferos įtakos vyksta palydovo signalų delsa, tad iškraipomi pseudoatstumų ir nešlio fazių matavimų rezultatai [1–9]. Apskaičiuotos atitinkamų taškų koordinacių reikšmės nėra tikslios, klaidų intervalas kinta nuo pavienių metrų iki keleto dešimčių metrų. Signalo sklidimo iš palydovo, esančio žemai virš horizonto, delsa gali būti didesnė daugiau nei tris kartus, palyginti su signalo sklidimo iš palydovo, esančio ties zenitu, delsa [1, 5, 6, 8].

Straipsnyje nagrinėjama geocentriųjų stačiakampių koordinacių, apskaičiuotų pagal kodinius bei nešlio fazių matavimų duomenis, kovariacijų matricių įverčiai. Kovariacijų matricių įverčiai skaičiuojami pagal koordinates, nustatytas skirtingose epochose per tam tikrą laiko tarpą. Skaičiuotos koordinacių kaitos pagal epochas bei skirtingų koordinacių fiksuotą laiko tarpą kovariacijų reikšmės. Taikant atitinkamas jonosferos refrakcijos formules pagal apskaičiuotus geocentriųjų koordinacių kovariacijų įverčių pokyčius per tam tikrą laiko tarpą galima įvertinti jonosferos elektronų *TEC* (*Total Electronic Content*) skaičiaus pokyčius.

2. GPS matavimų kovariacija

GPS matavimų rezultatai (pseudoatstumai ir nešlio fazės) dėl jonosferos poveikio koreliuoja. Taško koordinacių nustatymo GPS imtuvais klaidos labai priklauso nuo jonosferos įtakos. Ši įtaka pasireiškia virpesių sklidimo 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* – laisvųjų elektronų skaičius jonosferos sluoksnio stulpelė, kurio pagrindo plotas lygus 1 m². Šis skaičius priklauso nuo jonosferos tam tikru metu būklės. *TEC* mato vienetas yra *TECU* (*Total Electronic Content Unit* = 10¹⁶ elektronų/m²).

1 *TECU* sukelia elektromagnetinių virpesių sklidimo jonosferoje delsa, lygią $\delta t = 0,351$ ns. Taigi dėl 1 *TECU* sukeltos signalo delsos atsiranda pseudoatstumo klaida, lygi

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

Išmatuoto pseudoatstumo $R_i^k(t_i)$ tarp i -ojo imtuvo ir k -ojo palydovo epochoje t_i klaida $\delta R_i^{k,jon.}(t_i)$ dėl jonosferos įtakos yra

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

Nešlio virpesių fazės $\Phi_i^k(t_i)$ klaida $\delta \Phi_i^{k,jon.}(t_i)$ dėl jonosferos poveikio, faziniais ciklais:

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

Kovariacija tarp dviejų pseudoatstumų, nustatytų skirtingose epochose – t_i ir t_s , priimant signalus iš to paties palydovo k , yra lygi:

$$K\{R_i^k(t_i), R_i^k(t_s)\} = M\{\delta R_i^k(t_i), \delta R_i^k(t_s)\} = K\{\delta R_i^k(t_i), \delta R_i^k(t_s)\}, \quad (4)$$

čia K, M – atitinkamai kovariacijos ir vidurkio simboliai; $\delta R_i^k(t_i) = R_i^k(t_i) - MR_i^k(t_i)$ – pseudoatstumo atsitiktinė klaida dėl jonosferos įtakos.

Taikydami formulę (2) galime parašyti:

$$K\{\delta R_i^{k, jon.}(t_i), \delta R_i^{k, jon.}(t_s)\} = \frac{40,3^2}{f^4} K\{TEC(t_i), TEC(t_s)\}, \quad (5)$$

Toliau rašome:

$$K\{TEC(t_i), TEC(t_s)\} = M\{\delta TEC(t_i) \cdot \delta TEC(t_s)\} = M\{\delta TEC(t_i) \cdot h \cdot \delta TEC(t_i)\} = h \sigma_{TEC(t_i)}^2, \quad (6)$$

čia $\delta TEC(t_s) = h \cdot \delta TEC(t_i)$, h – koeficientas, rodantis TEC pokytį, pereinant iš t_i epochos į t_s epochą; $\sigma_{TEC(t_i)}$ – standartinis nuokrypis.

Taško koordinatinių standartinius nuokrypius $\sigma_{\delta X}, \sigma_{\delta Y}, \sigma_{\delta Z}$ dėl jonosferos įtakos galima išreikšti pseudoatstumo standartiniu nuokrypiu $\sigma_{\delta R^{jon.}}$ pagal formulę [9]:

$$\sigma_{\delta R^{jon.}}^2 = \frac{\delta X^2}{\delta R^2} \sigma_{\delta X}^2 + \frac{\delta Y^2}{\delta R^2} \sigma_{\delta Y}^2 + \frac{\delta Z^2}{\delta R^2} \sigma_{\delta Z}^2. \quad (7)$$

Laikydami, kad $\sigma_{\delta X} \approx \sigma_{\delta Y} \approx \sigma_{\delta Z} = \sigma_{\delta \bar{T}}$, gauname:

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

Pagal formules (1) ir (2) galime rašyti:

$$\sigma_{\delta R^{jon.}}^2 = \frac{40,3^2}{f^4} \sigma_{TEC}^2, \quad (8)$$

arba

$$\sigma_{TEC}^2 \approx \frac{3\sigma_{\delta \bar{T}}^2 \cdot f^4}{40,3^2}. \quad (9)$$

3. Kovariacijų koordinatinės išraiškos

Parašysime pseudoatstumų kovariacijos formulę, taikydami koordinatinę išraišką:

$$K\{\delta R_i^{k, jon.}(t_i), \delta R_i^{k, jon.}(t_s)\} = M\{[a_{x_i} \delta X_i(t_i) + a_{y_i} \delta Y_i(t_i) + a_{z_i} \delta Z_i(t_i)] \times [a_{x_i} \delta X_i(t_s) + a_{y_i} \delta Y_i(t_s) + a_{z_i} \delta Z_i(t_s)]\} \leq M\{[\delta X_i(t_i) + \delta Y_i(t_i) + \delta Z_i(t_i)] \times [\delta X_i(t_s) + \delta Y_i(t_s) + \delta Z_i(t_s)]\}, \quad (10)$$

čia $a_{x_i}, a_{y_i}, a_{z_i}$ – pseudoatstumų dalinių išvestinių pagal atitinkamas koordinatas reikšmės, apskaičiuotos taikant išmatavus gautas koordinačių reikšmes. Koeficientų $a_{x_i}, a_{y_i}, a_{z_i}$ reikšmės yra mažesnės už vienetą, t. y. $a_{x_i} < 1, a_{y_i} < 1, a_{z_i} < 1$.

Toliau formulę (10) įgauna tokį pavidalą:

$$K\{\delta R_i^{k, jon.}(t_i), \delta R_i^{k, jon.}(t_s)\} \leq K\{\delta X_i(t_i), \delta X_i(t_s)\} + K\{\delta Y_i(t_i), \delta Y_i(t_s)\} + K\{\delta Z_i(t_i), \delta Z_i(t_s)\} + 2K\{\delta X_i(t_i), \delta Y_i(t_s)\} + 2K\{\delta X_i(t_i), \delta Z_i(t_s)\} + 2K\{\delta Y_i(t_i), \delta Z_i(t_s)\}. \quad (11)$$

Laikydami, kad kovariacija tarp koordinačių maždaug vienoda, rašome:

$$K\{\delta R_i^{k, jon.}(t_i), \delta R_i^{k, jon.}(t_s)\} \leq 9K\{\delta T_i(t_i), \delta T_i(t_s)\}, \quad (12)$$

čia $K\{\delta X_i(t_i), \delta X_i(t_s)\} \approx K\{\delta X_i(t_i), \delta Y_i(t_s)\} \approx \dots \approx K\{\delta Y_i(t_i), \delta Z_i(t_s)\} = K\{\delta T_i(t_i), \delta T_i(t_s)\}$.

Pseudoatstumų kovariacijų įverčius skaičiuojame taikydami taško koordinatinių, išmatuotų s epochose, nuokrypių matricinę išraišką:

$$\delta T_i = \begin{pmatrix} \delta X_i(t_1) & \delta X_i(t_2) & \dots & \delta X_i(t_s) \\ \delta Y_i(t_1) & \delta Y_i(t_2) & \dots & \delta Y_i(t_s) \\ \delta Z_i(t_1) & \delta Z_i(t_2) & \dots & \delta Z_i(t_s) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

čia

$$\delta X_i(t_j) = X_i(t_j) - \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s X_i(t_j),$$

$$\delta Y_i(t_j) = Y_i(t_j) - \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s Y_i(t_j),$$

$$\delta Z_i(t_j) = Z_i(t_j) - \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s Z_i(t_j), \quad j = 1, 2, \dots, s.$$

Taško erdvinių koordinatinių vektorių X_i, Y_i, Z_i tarpusavio kovariacijų matricos įvertis $K'_{\delta \bar{T}_i}$ yra lygus

$$K'_{\delta \bar{T}_i} = \frac{1}{s} \delta T_i \cdot \delta T_i^T, \quad (14)$$

skleistiniu pavidalu –

$$K'_{\delta\tilde{T}_i} = \begin{pmatrix} K'_{X_i X_i} & K'_{X_i Y_i} & K'_{X_i Z_i} \\ K'_{Y_i X_i} & K'_{Y_i Y_i} & K'_{Y_i Z_i} \\ K'_{Z_i X_i} & K'_{Z_i Y_i} & K'_{Z_i Z_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K'_{11} & K'_{12} & K'_{13} \\ K'_{21} & K'_{22} & K'_{23} \\ K'_{31} & K'_{32} & K'_{33} \end{pmatrix},$$

čia $K'_{X_i X_i} = \sigma_{X_i}^2$, $K'_{Y_i Y_i} = \sigma_{Y_i}^2$, $K'_{Z_i Z_i} = \sigma_{Z_i}^2$.

Taško koordinatų nuokrypių vektorius pagal epochas $\delta T_i(t_i) \rightarrow (\delta X_i(t_i), \delta Y_i(t_i), \delta Z_i(t_i))^T$ kovariacijų matricos įvertį $K'_{\delta T_i}$ gauname

$$K'_{\delta T_i} = \frac{1}{3} \delta T_i^T \cdot \delta T_i, \quad (15)$$

skleistiniu pavidalu –

$$K'_{\delta T_i} = \begin{pmatrix} K'_{t_1 t_1} & K'_{t_1 t_2} & \dots & K'_{t_1 t_s} \\ K'_{t_2 t_1} & K'_{t_2 t_2} & \dots & K'_{t_2 t_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K'_{t_s t_1} & K'_{t_s t_2} & \dots & K'_{t_s t_s} \end{pmatrix},$$

čia $K'_{t_i t_j} = K \{ \delta T_i(t_i), \delta T_j(t_j) \}$; $t_i = t_1, t_j \rightarrow t_2, \dots, t_s$.

Pseudoatstumų kovariacijos įvertis, įvertinant išraiškas (12) ir (14), yra ne didesnis už kovariacijų matricos $K'_{\delta\tilde{T}_i}$ narių sumą:

$$K' \{ \delta R_i^{k, jon.}(t_i), \delta R_i^{k, jon.}(t_s) \} \leq \sum_{i,j=1}^3 K'_{ij}(\delta\tilde{T}_i). \quad (16)$$

Taikydami formules (5), (6), (9), (16), galime parašyti

$$\sum_{i,j=1}^3 K'_{ij}(\delta\tilde{T}_i) \geq h \cdot 3\sigma_{\delta\tilde{T}}^2,$$

čia $\sigma_{\delta\tilde{T}}$ – standartinio nuokrypio įvertis.

Toliau koeficiento h reikšmė skaičiuojama pagal formulę

$$h \leq \frac{1}{3\sigma_{\delta\tilde{T}}^2} \sum_{i,j=1}^3 K'_{ij}(\delta\tilde{T}_i). \quad (17)$$

Taigi koeficientas h rodo jonosferos elektronų kiekio TEC santykinį pokytį GPS matavimų metu pereinant iš t_i epochos į t_s epochą.

Panaudodami Lietuvos GPS 2-osios klasės tinklo pavieniam taške C/A kodinių matavimų (GPS diena

139) vienos valandos laikotarpio duomenis, kai epochos fiksuojamos kas 15 s, apskaičiuojame koeficiento h reikšmę. Ji lygi $h \leq 1,36$. Tai rodo, kad vienos valandos laikotarpiu jonosferos elektronų TEC santykinis pokytis padidėjo 36 %, pereinant iš pradinės t_1 epochos į paskutinę – t_{250} epochą. Skaičiavimai atlikti pagal sudarytą kompiuterinę programą *KorTEC.m*, naudojant *Matlab* programinio paketo standartinius operatorius. Erdvinių koordinatų X, Y, Z vektorių tarpusavio koreliacijos koeficientų matricos įvertis $R'_{\delta\tilde{T}}$ yra lygus

$$R'_{\delta\tilde{T}} = \begin{pmatrix} 1 & 0,60 & -0,05 \\ 0,60 & 1 & 0,58 \\ -0,05 & 0,58 & 1 \end{pmatrix}.$$

Koordinatų vektorius (X, Y, Z) pagal epochas koreliacijos koeficientų matricos įverčio $R'_{\delta\tilde{T}}$ nariai kinta $R'_{\delta\tilde{T}} \rightarrow (\pm 0,02; 0,99)$.

Kompiuterinės programos *KorTEC.m* tekstas:

```
% Koreliacinė analizė jonosferos įtakai GPS matavimuose nustatyti
% (KorTEC.m), GPS2k–geocentrinių stačiakampių koordinatų
% masyvas,
% išmatuotas epochose kas 15s 1 val. laikotarpiu (GPS diena 139);
load C:\matlab\geok\GPS2k1.txt;
n=size(GPS2k1,1);
nr=GPS2k1(1:n,1);
X=GPS2k1(1:n,3);
Y=GPS2k1(1:n,4);
Z=GPS2k1(1:n,5);
XYZ=[X,Y,Z];
dX=X-mean(X);
dY=Y-mean(Y);
dZ=Z-mean(Z);
dXYZ=[dX,dY,dZ];
Kx=cov(dXYZ); %koordinatų vektorius kovariacijų matricos įvertis;
sx=sqrt(diag(Kx));%koordinatų standartinių nuokrypių įverčių vekt.;
Dx=mean(diag(Kx));
sKx=sum(sum(Kx));
h=1/(3*Dx)*sKx; %TEC pokyčio koeficientas tarp epochų t1 ir ts;
Rx=corrcoef(dXYZ); %koordinatų kor. coef.matricos įvertis;
Kt=cov(dXYZ); %koordinatų vektorių pagal epochas kovariacijų
%matricos įvertis
Rt=corrcoef(dXYZ);
st=sqrt(diag(Kt)); %koordinatų standartinių nuokrypių įverčių
% pagal epochas vektorius;
%surf(Kt)
%surf(Kx)
dlmwrite('C:\matlab\geok\h.rez',h,' ');
dlmwrite('C:\matlab\geok\sx.rez',sx,' ');
dlmwrite('C:\matlab\geok\st.rez',st,' ');
dlmwrite('C:\matlab\geok\Rx.rez',Rx,' ');
dlmwrite('C:\matlab\geok\Rt.rez',Rt,' ');
```

4. Išvados

1. Geocentrinių stačiakampių koordinatų matavimo pavienėse epochose rezultatai dėl jonosferos įtakos koreliuoja, todėl apdorojant juos turi būti taikoma jų kovariacijų matrica.

2. Išvesta formulė jonosferos elektronų TEC santykiniam pokyčiui nustatyti, pereinant GPS matavimų metu iš vienos epochos į kitą, taikant pagal pavienės epochas nustatytų geocentrinių stačiakampių koordinatų vektorių X, Y, Z kovariacijų matricos įvertį.

3. Pagal 1 val. C/A kodinių matavimų duomenis, kai epochos fiksuojamos kas 15 s, gauta koeficiento h reikšmė $h \leq 1,36$.

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)*, 2001, No 26, p. 341–346.
2. CANDER, L. R.; MIHAJLOVIC, S. J. Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol 103, A1, 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.*, 2000, No 11, 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*, 1998, No 25, 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*, 1999, No 61, 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*, 1998, Vol 33, p. 565–582.
7. POTTIAUX, E.; WARNANT, R. Quality Assessment of GPS Integrated Precipitable Water Vapor Estimations using Water Vapor Radiometer Observations. *GPS Solutions*, 2002, Vol 6, No 1–2, 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)*, 2003, Vol XXIX, No 3, p. 61–64 (in Lithuanian).
9. SKEIVALAS, J. Covariation of ionospheric influence in the GPS observations. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, 2006, Vol XXXII, No 1, p. 3–5 (in Lithuanian).

Jonas SKEIVALAS. Prof, Doctor Habil. Vilnius Gediminas Technical University. Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Ph +370 5 2744 703, Fax +370 5 2744 705, e-mail: jonas.skeivalas@ap.vgtu.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.