ISSN 1392–1541 Geodezija ir kartografija, 2005, XXXI t., Nr. 3
Geodesy and Cartography, 2005, Vol XXXI, No 3

UDK 528.14

NEŠLIO FAZIŲ DVIGUBŲJŲ SKIRTUMŲ TAIKYMAS JONOSFEROS ĮTAKAI ELIMINUOTI NUSTATANT KOORDINATES

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 03 15, priimta 2005 07 07

Santrauka. GPS matavimų rezultatų apdorojimo procedūrų tobulinimo temos aptariamos daugelyje straipsnių bei monografijų. Šiame straipsnyje analizuojamas nešlio fazių dvigubųjų skirtumų taikymas jonosferos įtakai eliminuoti, apdorojant dviejų nešlio dažnių GPS imtuvų matavimų rezultatus. Skaičiavimų procedūrose taikomos nešlio fazių dvigubųjų skirtumų išraiškos su papildomais parametrais jonosferos įtakai eliminuoti. Jonosferos įtaka eliminuojama sprendžiant mažiausiųjų kvadratų metodu redukuotas, taikant abu nešlio dažnius, kiekvienos epochos nešlio fazių dvigubųjų skirtumų parametrines lygtis. Parametrinių lygčių sistema sprendžiama sudarant papildomas kolokacines lygtis. Sprendinio rezultatų patikimumui įvertinti siūlomos kovariacijų matricų formulės.

Raktažodžiai: GPS, jonosferos įtaka, nešlio fazių dvigubieji skirtumai.

1. Įvadas

Atliekant tikslius GPS matavimus, tikslioms taškų koordinatėms bei kitiems parametrams nustatyti taikomas fazių dvigubųjų skirtumų modelis. Dviejų nešlio dažnių GPS imtuvų matavimo rezultatai padeda eliminuoti nustatomų parametrų klaidas dėl jonosferos įtakos. Jonosferos įtakai matavimo rezultatų apdorojimo procedūrose eliminuoti taikomi dviejų nešlio dažnių tiesiniai modeliai, o troposferos įtakai sumažinti – atitinkamai netiesiniai modeliai [1–10].

Straipsnyje siūlomas metodas pagrįstas papildomų parametrų nešlio fazių dvigubųjų skirtumų išraiškose taikymu jonosferos įtakai eliminuoti. Sudaromos kiekvienos epochos fazių dvigubųjų skirtumų parametrinės lygtys ir sprendžiamos mažiausiųjų kvadratų metodu. Panaudojamos papildomos kolokacinės lygtys su jonosferos klaidų eliminavimo parametrais. Skaičiavimo rezultatų tikslumui įvertinti siūlomos kovariacijų matricų formulės.

2. Teoriniai teiginiai

Pagal GPS kanalų L_1 ir L_2 matavimo rezultatus sudarytų nešlio fazių dvigubųjų skirtumų reikšmės nesutampa dėl jonosferos, troposferos lemiamų ir kitų matavimo klaidų. Kadangi dėl jonosferos ir kitų šaltinių įtakos atsirandančios matavimo klaidos turi atsitiktines ir sistemingąsias komponentes, tai matavimo rezultatams apdoroti taikysime mažiausiųjų kvadratų metodą su papildomais parametrais sistemingosioms klaidų komponentėms eliminuoti.

Nešlio fazių dvigubųjų skirtumų modelio pagrindinė lygtis užrašoma taip:

$$\Phi_{ij,cikl.}^{kl}(t) = \frac{1}{\lambda} S_{ij}^{kl}(t) - N_{ij,cikl}^{kl}, \tag{1}$$

čia $\Phi_{ij,cikl}^{kl}(t)$ – fazių dvigubasis skirtumas pagal dviejų imtuvų – i ir j matavimų rezultatus iš dviejų palydovų – k ir l laiko momentu (epocha) t, $S_{ij}^{kl}(t)$ – atitinkamų geometrinių atstumų dvigubasis skirtumas, $N_{ij,cikl}^{kl}$ – pradinių sveikųjų ciklų skaičiaus dvigubasis skirtumas, $\lambda \to \lambda_1$ arba λ_2 – nešlio kanalų – L_1 arba L_2 bangos ilgis.

Redukavę fazių ciklų lygybę (1) ilgio vienetais, taikydami abu nešlio bangos ilgius, gauname:

$$\left.\begin{aligned} \Phi_{1,ij}^{kl}(t) &= S_{ij}^{kl}(t) - N_{1,ij}^{kl} \\ \Phi_{2,ij}^{kl}(t) &= S_{ij}^{kl}(t) - N_{2,ij}^{kl} \end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

čia $\Phi_{1,ij}^{kl}(t) = \lambda_1 \Phi_{1,ij,cikl.}^{kl}(t)$, $\Phi_{2,ij}^{kl}(t) = \lambda_2 \Phi_{2,ij,cikl.}^{kl}(t)$, $N_{1,ij}^{kl}(t) = \lambda_1 N_{1,ij,cikl.}^{kl}$, $N_{2,ij}^{kl}(t) = \lambda_2 N_{2,ij,cikl.}^{kl}$

Pavienės sesijos n epochų GPS išmatuotieji nešlio fazių dvigubieji skirtumai apdorojami mažiausiųjų kvadratų metodu, taikant papildomus parametrus jonosferos klaidų sistemingosioms komponentėms eliminuoti. Galima parašyti šią parametrinių lygčių sistemą [10]:

$$\left.\begin{aligned}&\tilde{\Phi}^{kl}_{1,ij}(t_i)=a^{kl}_{i1}(t_i)\Delta\tilde{X}_{ij}+a^{kl}_{i2}(t_i)\Delta\tilde{Y}_{ij}+a^{kl}_{i3}(t_i)\Delta\tilde{Z}_{ij}-\\ &-N^{kl}_{1,ij}+\gamma_1\\ &\tilde{\Phi}^{kl}_{2,ij}(t_i)=a^{kl}_{i1}(t_i)\Delta\tilde{X}_{ij}+a^{kl}_{i2}(t_i)\Delta\tilde{Y}_{ij}+a^{kl}_{i3}(t_i)\Delta\tilde{Z}_{ij}-\\ &-N^{kl}_{2,ij}+\gamma_2\end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

$$t_i=t_1,t_2,\ldots,t_n,$$

čia $\tilde{\Phi}^{kl}_{1,ij}(t_i)=\Phi^{kl}_{1,ij}(t_i)+v^{kl}_{1,ij}(t_i)$, $\tilde{\Phi}^{kl}_{2,ij}(t_i)=\Phi^{kl}_{2,ij}(t_i)+v^{kl}_{2,ij}(t_i)$, $\Delta\tilde{X}_{ij},\Delta\tilde{Y}_{ij},\Delta\tilde{Z}_{ij}$ – išlyginti koordinačių prieaugiai; γ_1,γ_2 – atitinkamai L_1 ir L_2 kanalų jonosferos klaidų sistemingosios komponentės; $v^{kl}_{1,ij}(t_i)$, $v^{kl}_{2,ij}(t_i)$ – atitinkamai L_1 ir L_2 kanalų atsitiktinių jonosferos ir kitų matavimo klaidų pataisos.

Koeficientų $a^{kl}_{i1}(t_i)$, $a^{kl}_{i2}(t_i)$, $a^{kl}_{i3}(t_i)$ išraiškos:

$$\left.\begin{aligned}a^{kl}_{i1}(t_i)&=\frac{X^k(t_i)-\bar{X}_{ij}}{\bar{S}^k_{ij}(t_i)}-\frac{X^l(t_i)-\bar{X}_{ij}}{\bar{S}^l_{ij}(t_i)}\\ a^{kl}_{i2}(t_i)&=\frac{Y^k(t_i)-\bar{Y}_{ij}}{\bar{S}^k_{ij}(t_i)}-\frac{Y^l(t_i)-\bar{Y}_{ij}}{\bar{S}^l_{ij}(t_i)}\\ a^{kl}_{i3}(t_i)&=\frac{Z^k(t_i)-\bar{Z}_{ij}}{\bar{S}^k_{ij}(t_i)}-\frac{Z^l(t_i)-\bar{Z}_{ij}}{\bar{S}^l_{ij}(t_i)}\end{aligned}\right\}, \qquad (4)$$

čia $\bar{X}_{ij}=1/2(X_i+X_j)$, $\bar{Y}_{ij}=1/2(Y_i+Y_j)$, $\bar{Z}_{ij}=1/2(Z_i+Z_j)$, $\bar{S}^k_{ij}(t_i)=1/2\{S^k_i(t_i)+S^k_j(t_i)\}$, $\bar{S}^l_{ij}(t_i)=1/2\{S^l_i(t_i)+S^l_j(t_i)\}$.

Apytikrės koordinačių X_i,Y_i,Z_i,X_j,Y_j,Z_j bei atstumų $S^k_i(t_i)$, $S^k_j(t_i)$, $S^l_i(t_i)$, $S^l_j(t_i)$ reikšmės gaunamos pagal GPS kodinių matavimų rezultatus.

Parametrinės pataisų lygtys, taikant papildomas kolokacines lygtis:

$$\left.\begin{aligned}&V^{kl}_{1,ij}(t_i)=a^{kl}_{i1}(t_i)\Delta\tilde{X}_{ij}+a^{kl}_{12}(t_i)\Delta\tilde{Y}_{ij}+a^{kl}_{i3}(t_i)\Delta\tilde{Z}_{ij}-\\ &-N^{kl}_{1,ij}+\gamma_1-\Phi^{kl}_{1,ij}(t_i)\\ &V^{kl}_{2,ij}(t_i)=a^{kl}_{i1}(t_i)\Delta\tilde{X}_{ij}+a^{kl}_{12}(t_i)\Delta\tilde{Y}_{ij}+a^{kl}_{i3}(t_i)\Delta\tilde{Z}_{ij}-\\ &-N^{kl}_{2,ij}+\gamma_1-\Phi^{kl}_{2,ij}(t_i)\\ &v_{\gamma_1}=\gamma_1-\gamma_{01}\\ &v_{\gamma_2}=\gamma_2-\gamma_{02}\end{aligned}\right\}, \qquad (5)$$

$$t_i=t_1,t_2,\ldots,t_n,$$

čia v_{γ_i} – i-osios sistemingosios komponentės atsitiktinė pataisa, γ_{01},γ_{02} – apriorinės jonosferos pataisų sistemingųjų komponenčių reikšmės L_1 ir L_2 kanalų signaluose. Apriorinėmis jų reikšmėmis galima laikyti $\gamma_{01}=\gamma_{02}=0$.

Priimant signalus iš keturių palydovų (1, 2, 3 ir 4) dviem imtuvais – i ir j, tos pačios i-osios epochos pataisų lygčių sistema gaunama matricų pavidalu:

$$\boldsymbol{V_i}=\boldsymbol{A_i}\tilde{\boldsymbol{T}}+\boldsymbol{L_i}, \qquad (6)$$

čia $\boldsymbol{V_i}$ – i-osios epochos fazių dvigubųjų skirtumų pataisų vektorius, $\boldsymbol{A_i}$ – pataisų lygčių koeficientų matrica, $\tilde{\boldsymbol{T}}$ – parametrų vektorius, $\boldsymbol{L_i}$ – i-osios epochos pataisų lygčių laisvųjų narių vektorius.

Sistemos matricos išraiškos:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{V}_i&=\big(v^{12}_{1,ij}(t_i),v^{13}_{1,ij}(t_i),v^{14}_{1,ij}(t_i),v^{12}_{2,ij}(t_i),v^{13}_{2,ij}(t_i),\\ &\quad\boldsymbol{v}^{14}_{2,ij}(t_i),(t_i),v_{\gamma_1},v^T,\\ \boldsymbol{T}&=\big(\Delta\tilde{X}_{ij},\Delta\tilde{Y}_{ij},\Delta\tilde{Z}_{ij},N^{12}_{1,ij};N^{13}_{1,ij};N^{14}_{1,ij};N^{12}_{2,ij};\\ &\quad N^{13}_{2,ij};N^{14}_{2,ij};\gamma_1,\gamma_2\big)^T,\\ \boldsymbol{L}_i&=-\big(\Phi^{12}_{1,ij}(t_i);\Phi^{13}_{1,ij}(t_i);\Phi^{14}_{1,ij}(t_i);\Phi^{12}_{2,ij}(t_i);\Phi^{13}_{2,ij}(t_i);\\ &\quad\Phi^{14}_{2,ij}(t_i);\gamma_{01},\gamma_{02}\big)^T,\end{aligned} \qquad (7)$$

$$\boldsymbol{A_i}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{A'_i} & -\boldsymbol{E} & 0 & \boldsymbol{e} & 0\\ \boldsymbol{A'_i} & 0 & -\boldsymbol{E} & 0 & \boldsymbol{e}\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}, \qquad (8)$$

$$\boldsymbol{A}'_i=\begin{pmatrix}a^{12}_{i1} & a^{12}_{i2} & a^{12}_{i3}\\ a^{13}_{i1} & a^{13}_{i2} & a^{13}_{i3}\\ a^{14}_{i1} & a^{14}_{i2} & a^{14}_{i3}\end{pmatrix}, \qquad (9)$$

$\boldsymbol{e}=(1\quad 1\quad 1)^{\boldsymbol{T}}$, $\boldsymbol{E}$ – vienetinė matrica, kurios matmenys (3×3).

Turėdami n epochų L_1 ir L_2 kanalų fazių dvigubųjų skirtumų matavimų rezultatus, jiems apdoroti rašome pataisų lygčių sistemą, sudarytą iš blokų:

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{AT}+\boldsymbol{L}, \qquad (10)$$

čia $\boldsymbol{V}=\big(\boldsymbol{V}^{\boldsymbol{T}}_1,\boldsymbol{V}^{\boldsymbol{T}}_2,\ldots,\boldsymbol{V}^{\boldsymbol{T}}_{\boldsymbol{n}}\big)^{\boldsymbol{T}}$, $\boldsymbol{V_i}$ – i-osios epochos fazių dvigubųjų skirtumų pataisų vektorius, $\boldsymbol{A}=\big(\boldsymbol{A}^{\boldsymbol{T}}_1,\boldsymbol{A}^{\boldsymbol{T}}_2,\ldots,\boldsymbol{A}^{\boldsymbol{T}}_{\boldsymbol{n}}\big)^{\boldsymbol{T}}$, $\boldsymbol{A_i}$ – i-osios epochos pataisų lygčių koeficientų matrica, $\boldsymbol{L}=\big(\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{T}}_1,\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{T}}_2,\ldots,\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{T}}_{\boldsymbol{n}}\big)^{\boldsymbol{T}}$, $\boldsymbol{L_i}$ – i-osios epochos laisvųjų narių vektorius, $i=1,2,\ldots,n$.

Parametrų vektoriaus $\boldsymbol{T}$ reikšmė nustatoma sprendžiant pataisų lygčių sistemą mažiausiųjų kvadratų metodu. Taigi gauname:

$$\tilde{T} = -N^{-1}\boldsymbol{\omega}, \tag{11}$$

čia $\boldsymbol{N} = \boldsymbol{A}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{P}_{\Phi}\boldsymbol{A}$ – normalinių lygčių koeficientų matrica, $\boldsymbol{P}_{\Phi}$ – nešlio fazių dvigubųjų skirtumų svorių matrica, $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{A}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{P}_{\Phi}\boldsymbol{L}$ – normalinių lygčių laisvųjų narių vektorius.

Svorių matrica $\boldsymbol{P}_{\Phi}$ yra blokinio pavidalo:

$$\boldsymbol{P}_{\Phi} = \left(\boldsymbol{P}_{\Phi_1}, \boldsymbol{P}_{\Phi_2}, ..., \boldsymbol{P}_{\Phi_n}\right)_{diag},$$

čia $P_{\Phi_i} = \left\{P\left(\Phi_1^{12}\right), P\left(\Phi_1^{13}\right), P\left(\Phi_1^{14}\right), P\left(\Phi_2^{12}\right), P\left(\Phi_2^{13}\right), P\left(\Phi_2^{14}\right), P_{\gamma_1}, P_{\gamma_2}\right\}_{diag}$ – i-osios epochos fazių dvigubųjų skirtumų pagal L_1 ir L_2 kanalus bei jonosferos klaidų sistemingųjų komponenčių pataisų svorių matrica.

Nustatysime nešlio fazių dvigubųjų skirtumų svorių matricos $\boldsymbol{P}_{\Phi}$ išraišką, kai $\boldsymbol{P}_{\Phi} = \boldsymbol{Q}_{\Phi}^{-1}$, čia $\boldsymbol{Q}_{\Phi}$ – fazių dvigubųjų skirtumų svorinių koeficientų matrica. Panaudodami paprastuosius fazių skirtumus fazių dvigubųjų skirtumų išraišką galime parašyti:

$$\Phi_{ij}^{kl} = \boldsymbol{C}\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{kl}, \tag{12}$$

čia $\boldsymbol{C} = (1 -1)$ – transformavimo matrica, $\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{kl} = \left(\Phi_{ij}^{k}, \Phi_{ij}^{l}\right)^T$ – fazių paprastųjų skirtumų vektorius.

Paprastieji fazių skirtumai Φ_{ij}^{k} išreiškiami išmatuotais fazių skirtumais Φ_i^k, Φ_j^k tarp atitinkamų imtuvų ir palydovų nešlio signalų:

$$\Phi_{ij}^{k} = \boldsymbol{C}\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{k}, \tag{13}$$

čia $\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{k} = \left(\Phi_i^k, \Phi_j^k\right)^T$ – išmatuotų fazių skirtumų vektorius.

Panaudodami išraišką (12) gauname fazių dvigubųjų skirtumų Φ_{ij}^{kl} svorinio koeficiento $Q\left(\Phi_{ij}^{kl}\right)$ formulę funkcionalo pavidalu:

$$Q\left(\Phi_{ij}^{kl}\right) = \boldsymbol{C}\cdot Q\left(\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{kl}\right)\boldsymbol{C}^T, \tag{14}$$

$$\text{čia } \boldsymbol{Q}\left(\overline{\Phi}_{ij}^{kl}\right) = \begin{pmatrix} Q\left(\Phi_{ij}^{k}\right) & 0 \\ 0 & Q\left(\Phi_{ij}^{l}\right) \end{pmatrix}. \tag{15}$$

Vektoriaus $\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{kl}$ svorinių koeficientų matrica yra diagonalioji, nes kiekvieno palydovo signalų fazės matuojamos nepriklausomai ir vienodu tikslumu, todėl $\boldsymbol{Q}\left(\Phi_{ij}^{k}\right) = \boldsymbol{Q}\left(\Phi_{ij}^{l}\right)$. Toliau pagal formules (14) ir (15) rašome

$$Q\left(\Phi_{ij}^{kl}\right) = Q\left(\Phi_{ij}^{k}\right) + Q\left(\Phi_{ij}^{l}\right). \tag{16}$$

Pagal formulę (13) galime parašyti:

$$Q\left(\Phi_{ij}^{k}\right) = \boldsymbol{CQ}\left(\overline{\boldsymbol{\Phi}}_i^k\right)\boldsymbol{C}^T = Q\left(\Phi_i^k\right) + Q\left(\Phi_j^k\right) = 2q_{\varphi}, \tag{17}$$

čia $Q\left(\Phi_i^k\right) = Q\left(\Phi_j^k\right) = q_{\varphi}$ – išmatuotų nešlio fazių skirtumų svoriniai koeficientai,
ir

$$Q\left(\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}^{k}\right) = \begin{pmatrix} Q\left(\Phi_i^k\right) & 0 \\ 0 & Q\left(\Phi_j^k\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{\varphi} & 0 \\ 0 & q_{\varphi} \end{pmatrix}.$$

Taigi taikant išraišką (17), lygybė (16) įgauna tokį pavidalą:

$$Q\left(\Phi_{ij}^{kl}\right) = Q_{\Phi} = 4q_{\varphi},$$

ir toliau

$$p_{\Phi} = Q_{\Phi}^{-1} = \frac{1}{4}p_{\varphi}, \tag{18}$$

čia p_{φ} – nešlio fazių dvigubojo skirtumo svoris, Q_{Φ} – svorinis koeficientas.

Išmatuotų nešlio fazių skirtumų svoriams skaičiuoti taikome fazių skirtumų klaidų dėl jonosferos įtakos pagal L_1 ir L_2 kanalus santykį [11]:

$$\frac{\delta\Phi_1^{jon}}{\delta\Phi_2^{jon}} = \frac{f_2}{f_1},$$

toliau gauname

$$p_{\varphi_1}^{-1} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 p_{\varphi_2}^{-1} = 0{,}606\,p_{\varphi_2}^{-1}, \tag{19}$$

čia f_1, f_2 – nešlio virpesių dažniai.

Laikydami $p_{\varphi_1} = 1{,}00$ nustatome $p_{\varphi_2} = 0{,}606$.

Ištyrus [7–9] jonosferos įtaką GPS matavimų rezultatams, jonosferos $TEC(t)$ parametro reikšmių svyravimai per valandą ar netgi keletą minučių yra apie 20–30 %, t. y. $TEC_{ats}/TEC_{sist} = 0{,}20 - 0{,}30$. Taigi galima parašyti:

$$\frac{\delta\Phi_{1,ats}^{jon}}{\delta\Phi_{1,sist}^{jon}} = \frac{TEC_{ats}(t)}{TEC_{sist}} = 0{,}30,$$

ir toliau

$$p_{\varphi_{1,ats}}^{-1} = 0{,}30^2\, p_{\varphi_{1,sist}}^{-1} = 0{,}09\, p_{\gamma_1}^{-1}, \tag{20}$$

arba $p_{\gamma_1} = 0{,}09,$ kai $p_{\varphi_{1,ats}} = 1{,}00.$

Atitinkamai galima parašyti

$$p_{\varphi_{2,ats}}^{-1} = 0{,}09\, p_{\gamma_2}^{-1}, \tag{21}$$

ir kai $p_{\varphi_2} = 0{,}606,$ gauname $p_{\gamma_2} = 0{,}054.$

Kiekvienos epochos L_1 ir L_2 kanalų nešlio fazių dvigubųjų skirtumų bei jonosferos sistemingųjų komponenčių pataisų svorių matricos yra:

$$P_{\Phi_i} = \left(0{,}25;0{,}25;0{,}25;0{,}151;0{,}151;0{,}151;0{,}025;0{,}013\right)_{diag}.$$

3. Išlygintųjų parametrų tikslumo įvertinimas

Mažiausiųjų kvadratų metodu apskaičiuotos, taikant formulę (11), parametrų vektoriaus $\tilde{\boldsymbol{T}}$ reikšmės tikslumas įvertinamas kovariacijų matrica $\boldsymbol{K}_{\tilde{T}}$:

$$\boldsymbol{K}_{\tilde{T}} = \boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{K}_{\omega}\boldsymbol{N}^{-1}, \tag{22}$$

čia $\boldsymbol{K}_{\omega}$ – normalinių lygčių laisvųjų narių vektoriaus kovariacijų matrica.

Kovariacijų matrica $\boldsymbol{K}_{\omega}$ yra lygi

$$\boldsymbol{K}_{\omega} = \boldsymbol{A}^{T}\boldsymbol{P}_{\Phi}\boldsymbol{K}_{L}\left(\boldsymbol{A}^{T}\boldsymbol{P}_{\Phi}\right)^{T} = \sigma_0^2\boldsymbol{A}^{T}\boldsymbol{P}_{\Phi}\boldsymbol{A} = \sigma_0^2\boldsymbol{N}, \tag{23}$$

čia $\boldsymbol{K}_{L} = \sigma_0^2\boldsymbol{P}_{\Phi}^{-1},$ σ_0 – matavimo rezultato, kurio svoris lygus vienetui, standartinis nuokrypis.

Galutinė parametrų vektoriaus $\tilde{\boldsymbol{T}}$ kovariacijų matricos išraiška, įvertinus (23):

$$\boldsymbol{K}_{\tilde{T}} = \sigma_0^2\boldsymbol{N}^{-1}. \tag{24}$$

Standartinio nuokrypio σ_0 įvertis skaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma_0^2 \approx m_0^2 = \frac{1}{n-k}\boldsymbol{V}^{T}\boldsymbol{P}_{\Phi}\boldsymbol{V}, \tag{25}$$

čia $n = 2n_e + 2$ – pataisų lygčių skaičius, n_e – epochų skaičius, k = 11 – parametrų skaičius.

4. Išvados

1. Pasiūlyta nešlio fazių dvigubųjų skirtumų parametrinių lygčių kartu su kolokacinėmis lygtimis variantas su papildomais parametrais jonosferos klaidų sistemingosioms ir atsitiktinėms komponentėms eliminuoti. Pataisų lygčių sistemai spręsti taikomas mažiausiųjų kvadratų metodas. Nešlio fazių dvigubųjų skirtumų bei jonosferos klaidų sistemingųjų komponenčių pataisų svoriams skaičiuoti pasiūlytos formulės (12–21).

2. Apskaičiuotų parametrų tikslumas įvertinamas kovariacijų matrica (24).

Literatūra

1. Bauer, M. Vermessung und Ortung mit Satelliten. Heidelberg: Wichmann, 1994. 274 S.
2. Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H. and Collins, J. Global Positioning System. In: Theory and Practice. Wien, New York: Springer-Verlag, 1992. 326 p.
3. Leick, A. GPS Satellite Surveying. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, 1995. 352 p.
4. Koch, K. R. Einführung in die Bayes-Statistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 225 S.
5. Teunissen, P. J. G. An optimality property of the integer least-squares estimator. *Journal of Geodesy*, No 73. Berlin: Springer-Verlag, 1999 b, p. 275–284.
6. Hankemeier, P. Der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS in Deutschland. Multifunktionale GNSS-Referenzstationsysteme für Europa. Workshop von 4. 5. März 2002 in der Europäischen Akademie für städtische Umwelt. Berlin, S. 16–23.
7. Yih Hwa Ho; Ahmad Faizal Mohd; Zain Mardina Abdullah; Abdul Ghaffar Ramli; Wan Salwa Wan Hassan. Equatorial TEC Variations During the Geomagnetic Storm of July 15–17, 2000. In: 2002 – the 27th triennial General Assembly of the International Union of Radio Science. Maastricht, 2002.
8. Gao, Y.; and Liu, Z. Z. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. *Journal of Global Positioning Systems,* Vol 1, No 1, 2002, p. 18–24.
9. Pulinets, S. A. and Liu, J. Y. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity. *Adv. Space Rec*., 34, 2004, p. 1926–1933.
10. Skeivalas, J. Accuracy determination of the coordinates augmentations of GPS vectors by measuring double phase shifts of the carrier. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXIX, No 4, Vilnius: Technika, 2003, p. 115–118 (in Lithuanian).
11. 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).

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.

Author of two monographs and more than 100 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.