ISSN 1392−1541 print
ISSN 1648−3502 online

Geodezija ir kartografija, 2006, XXXII t., Nr. 2
Geodesy and Cartography, 2006, Vol XXXII, No 2

UDK 528.5

GPS IMTUVŲ KALIBRAVIMAS TAIKANT KALIBRAVIMO BAZES[1]

Jonas Skeivalas[2], **Raimundas Putrimas**[3]

Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva,
el. paštas: [2]Jonas.Skeivalas@ap.vtu.lt, [3]RaiPut@ap.vtu.lt

Įteikta 2006 01 27; *priimta 2006 03 20*

Santrauka. GPS imtuvų kalibravimo standartų bei normatyvinių aktų ar instrukcijų nėra sudaryta. Tam tikra prasme galima teigti, kad GPS imtuvai kalibruojasi patys. GPS imtuvų, priimančių siunčiamus GPS palydovų didelio tikslumo nešlio dažnių virpesius ($\Delta f / f \approx 10^{-14}$), generatoriai (sintezatoriai) pagal tuos virpesius sukuria tokio pat dažnio virpesius. Taip vyksta todėl, kad GPS imtuvų kvarcinių generatorių sukurtų virpesių dažnių tikslumas nėra didelis (maždaug $\Delta f / f \approx 10^{-8}$), o priimtų iš GPS palydovų virpesių dažnis yra pasikeitęs dėl Doplerio efekto. Taigi GPS imtuvuose sukuriamų virpesių dažnis yra maždaug toks pat kaip ir priimtų iš palydovo signalų. Kadangi tokia procedūra dar neužtikrina šimtaprocentinio dažnių sutapdinimo, tai signalų parametrų matavimo rezultatų apdorojimo procedūrose nustatomos GPS imtuvo generatoriaus virpesių dažnio (bei laikrodžio eigos) pataisos.
Straipsnyje nagrinėjamas GPS imtuvų kalibravimas, nustatant imtuvais išmatuotų koordinačių prieaugių pataisas, taikant didelio tikslumo kalibravimo bazių matavimo rezultatus. Kalibravimo bazių atkarpos matuojamos įvairiomis kombinacijomis. Matavimai GPS imtuvais atliekami taikant fazių dvigubųjų skirtumų modelį. Matavimų rezultatai apdorojami mažiausiųjų kvadratų metodu, taikant parametrus ir sąlygines parametrines lygtis. Apdorojimo procedūromis apskaičiuojamos taškų koordinačių prieaugių, išmatuotų GPS imtuvais, pataisos. Gautos formulės koordinačių prieaugių išlygintųjų reikšmių kovariacijų matricai įvertinti.

Prasminiai žodžiai: GPS, kalibravimo bazė, koordinačių prieaugių pataisos, kovariacija.

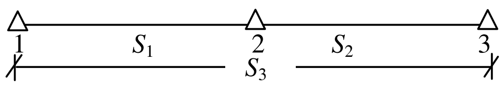
1. Įvadas

Bazės GPS imtuvams kalibruoti turi būti pakankamai didelio tikslumo. Jų ilgiams, kai standartinių nuokrypių įverčiai svyruoja 0,2–1,0 mm, išmatuoti naudojami tikslūs elektroniniai tolimačiai. Toks kalibravimo bazių tikslumas padeda patikimai įvertinti GPS imtuvais nustatytų taškų koordinačių pataisas.

Kalibravimo bazė sudaryta iš kelių atkarpų. Derinant įvairias šių atkarpų kombinacijas, sudaromos atitinkamos parametrinių ir sąlyginių lygčių sistemos. Jas sprendžiant mažiausiųjų kvadratų metodu gaunamos kalibravimo bazės atkarpų koordinačių prieaugių, išmatuotų GPS imtuvais, pataisos [1–3]. Toliau apskaičiuojamos kalibravimo bazės taškų koordinačių, nustatytų GPS imtuvais, pataisos. Nustatytų koordinačių prieaugių tikslumas įvertinamas jų kovariacijų matrica. GPS matavimų rezultatams apdoroti ir jų tikslumui įvertinti gali būti taikomi įvairūs metodai [4–7].

2. Teorinis principas

GPS imtuvams kalibruoti naudojamą kalibravimo bazę gali sudaryti keletas atkarpų, jų skaičius gali būti įvairus. Šiame straipsnyje analizuojama kalibravimo bazė, sudaryta iš trijų atkarpų (žr. pav.).



Kalibravimo bazės schema
Scheme of the calibration base

Kalibravimo bazės atkarpos S_1, S_2, S_3 išmatuotos didelio tikslumo elektroniniais tolimačiais. Šių atkarpų koordinačių prieaugiai nustatyti kalibruojamais GPS imtuvais. Linijų ilgių ir koordinačių prieaugių matavimų rezultatai apdorojami mažiausiųjų kvadratų metodu, taikant parametrus ir sąlygines lygtis.

Rašoma kiekvienos išmatuotos bazės atkarpos parametrinių pataisų lygčių sistema:

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= \frac{\Delta x_1}{S_1}\tau_{\Delta x_1} + \frac{\Delta y_1}{S_1}\tau_{\Delta y_1} + \frac{\Delta z_1}{S_1}\tau_{\Delta z_1} + l_1 \\ v_2 &= \frac{\Delta x_2}{S_2}\tau_{\Delta x_2} + \frac{\Delta y_2}{S_2}\tau_{\Delta y_2} + \frac{\Delta z_2}{S_2}\tau_{\Delta z_2} + l_2 \\ v_3 &= \frac{\Delta x_3}{S_3}\tau_{\Delta x_3} + \frac{\Delta y_3}{S_3}\tau_{\Delta y_3} + \frac{\Delta z_3}{S_3}\tau_{\Delta z_3} + l_3 \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

čia $v_i = \tilde{S}_i - S_i -$ i-osios linijos ilgio pataisa, $S_i -$ tolimačiu išmatuotas linijos ilgis, $\tilde{S}_i$ – išlygintasis linijos

[1] Straipsnis parengtas remiant Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui

ilgis; $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ – GPS imtuvais išmatuoti i-osios linijos koordinačių prieaugiai; $l_i = S_{i,0} - S_i$ – i-osios lygties laisvasis narys; $S_{i,0}$ – linijos ilgis, apskaičiuotas pagal GPS imtuvais išmatuotus koordinačių prieaugius.

Sąlyginių pataisų lygčių sistema sudaroma pagal GPS imtuvais išmatuotus bazės atkarpų koordinačių prieaugius:

$$\left.\begin{aligned} \tau_{\Delta x_1} + \tau_{\Delta x_2} - \tau_{\Delta x_3} + \omega_{\Delta x} = 0 \\ \tau_{\Delta y_1} + \tau_{\Delta y_2} - \tau_{\Delta y_3} + \omega_{\Delta y} = 0 \\ \tau_{\Delta z_1} + \tau_{\Delta z_2} - \tau_{\Delta z_3} + \omega_{\Delta z} = 0 \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

čia $\tau_{\Delta x_i}, \tau_{\Delta y_i}, \tau_{\Delta z_i}$ – išmatuoti i-osios bazės atkarpos koordinačių prieaugiai; $\omega_{\Delta x}, \omega_{\Delta y}, \omega_{\Delta z}$ – koordinačių prieaugių nesąryšiai. Nesąryšiai skaičiuojami pagal formules:

$$\left.\begin{aligned} \omega_{\Delta x} = \Delta x_1 + \Delta x_2 - \Delta x_3 \\ \omega_{\Delta y} = \Delta y_1 + \Delta y_2 - \Delta y_3 \\ \omega_{\Delta z} = \Delta z_1 + \Delta z_2 - \Delta z_3 \end{aligned}\right\}. \qquad (3)$$

Matricų pavidalu parametrinių ir sąlyginių pataisų lygčių sistemos rašomos:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{V} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\tau}_\Delta + \boldsymbol{L} \\ \boldsymbol{A}'\boldsymbol{\tau}_\Delta + \boldsymbol{\omega}' = 0 \end{aligned}\right\}, \qquad (4)$$

čia $\boldsymbol{V} = (v_1, v_2, v_3)^T$ – linijų ilgių pataisų vektorius, $\boldsymbol{\tau}_\Delta = (\tau_{\Delta x_1}, \tau_{\Delta y_1}, \tau_{\Delta z_1}, \tau_{\Delta x_2}, \tau_{\Delta y_2}, \tau_{\Delta z_2}, \tau_{\Delta x_3}, \tau_{\Delta y_3}, \tau_{\Delta z_3})^T$ – koordinačių prieaugių pataisų vektorius, $\boldsymbol{L} = (l_1, l_2, l_3)^T = \boldsymbol{S}_0 - \boldsymbol{S}$ – pataisų lygčių laisvųjų narių vektorius, $\boldsymbol{S}_0 = (S_{1,0}, S_{2,0}, S_{3,0})^T$, $\boldsymbol{S} = (S_1, S_2, S_3)^T$, $\boldsymbol{\omega}' = (\omega_{\Delta x}, \omega_{\Delta y}, \omega_{\Delta z})^T = \boldsymbol{A}'\boldsymbol{T}_\Delta$ – nesąryšių vektorius, $\boldsymbol{T}_\Delta = (\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2, \Delta x_3, \Delta y_3, \Delta z_3)^T$ – koordinačių prieaugių vektorius.

Atitinkamos lygčių koeficientų matricos $\boldsymbol{A}$ ir $\boldsymbol{A}'$ yra lygios:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2, \boldsymbol{A}_3)_{\boldsymbol{diag}}, \\ &\boldsymbol{A}_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}) = (\Delta x_1 / S_1, \Delta y_1 / S_1, \Delta z_1 / S_1), \\ &\boldsymbol{A}_2 = (\boldsymbol{a}_{21}, \boldsymbol{a}_{22}, \boldsymbol{a}_{23}) = (\Delta \boldsymbol{x}_2 / \boldsymbol{S}_2, \Delta \boldsymbol{y}_2 / \boldsymbol{S}_2, \Delta \boldsymbol{z}_2 / \boldsymbol{S}_2), \\ &\boldsymbol{A}_3 = (\boldsymbol{a}_{31}, \boldsymbol{a}_{32}, \boldsymbol{a}_{33}) = (\Delta \boldsymbol{x}_3 / \boldsymbol{S}_3, \Delta \boldsymbol{y}_3 / \boldsymbol{S}_3, \Delta \boldsymbol{z}_3 / \boldsymbol{S}_3), \\ &\boldsymbol{A}' = (\boldsymbol{E} \mid \boldsymbol{E} \mid -\boldsymbol{E}), \end{aligned}$$

čia $\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2, \boldsymbol{A}_3$ – matricos $\boldsymbol{A}$ blokinės dalys, sudarytos iš atitinkamų sistemos (1) lygčių koeficientų; $\boldsymbol{E}$ – vienetinė matrica, kurios matmenys (3×3).

Lygčių sistema (4) sprendžiama mažiausiųjų kvadratų metodu, taikant sąlygą:

$$\Phi = \boldsymbol{V}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{V} + 2\boldsymbol{k}^T (\boldsymbol{A}'\boldsymbol{\tau}_\Delta + \boldsymbol{\omega}') = \min, \qquad (5)$$

čia $\boldsymbol{P}$ – išmatuotų bazės atkarpų svorių matrica, $\boldsymbol{k}$ – (Lagranžo koeficientų) koreliatų vektorius.

Toliau galime parašyti:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau_\Delta} = \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{V} + \boldsymbol{A}'^T \boldsymbol{k} = 0.$$

Panaudodami vektoriaus $\boldsymbol{V}$ išraišką iš sistemos (4) gauname normalinių lygčių sistemą:

$$\boldsymbol{N}\boldsymbol{\tau}_\Delta + \boldsymbol{A}'^T \boldsymbol{k} + \boldsymbol{\omega} = 0, \qquad (6)$$

čia $\boldsymbol{N} = \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{L}$.

Matrica $\boldsymbol{N}$ yra kvazidiagonaliojo pavidalo

$$\boldsymbol{N} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{N}_1 & & 0 \\ & \boldsymbol{N}_2 & \\ 0 & & \boldsymbol{N}_3 \end{pmatrix},$$

čia $\boldsymbol{N}_1 = \boldsymbol{A}_1^T \boldsymbol{P}_1 \boldsymbol{A}_1$, $\boldsymbol{N}_2 = \boldsymbol{A}_2^T \boldsymbol{P}_2 \boldsymbol{A}_2$, $\boldsymbol{N}_3 = \boldsymbol{A}_3^T \boldsymbol{P}_3 \boldsymbol{A}_3$.

Prie lygčių sistemos (6) prijungiame sąlyginių pataisų lygčių sistemą (sistemos (4) antroji lygtis) ir sudarome jungtinę lygčių sistemą:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{N}\boldsymbol{\tau}_\Delta + \boldsymbol{A}'^T \boldsymbol{k} + \boldsymbol{\omega} = 0 \\ \boldsymbol{A}'\boldsymbol{\tau}_\Delta + \boldsymbol{\omega}' = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (7)$$

Šios sistemos pseudosprendinys dėl išsigimusiosios matricos $\boldsymbol{N}_0$ yra lygus

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau}_\Delta \\ \boldsymbol{k} \end{pmatrix} = -\boldsymbol{N}_0^+ \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}' \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \boldsymbol{N} & \boldsymbol{A}'^T \\ \boldsymbol{A}' & 0 \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}' \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \boldsymbol{Q}_{11} & \boldsymbol{Q}_{12} \\ \boldsymbol{Q}_{21} & \boldsymbol{Q}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}' \end{pmatrix}. \qquad (8)$$

čia $\boldsymbol{N}^+$ – pseudoatvirkštinė matrica, nes $\boldsymbol{N}_0$ yra išsigimusioji.

Apskaičiuota koordinačių prieaugių pataisų vektoriaus $\boldsymbol{\tau}_\Delta$ reikšmė panaudojama koordinačių pataisų vektoriaus $\boldsymbol{\tau}$ reikšmei skaičiuoti.

Pateiksime pavyzdį, kai dvi kalibravimo bazės sudarytos iš trijų dalių.

Pirmosios bazės dalys išdėstytos tiesėje, o antrosios – nėra tiesėje. Abiejų bazių dalys išmatuotos elektroniniu tolimačiu *Mekometer ME 3000*, kurio tikslumas apibrėžiamas standartinio nuokrypio įverčiu $m_{01} = m_{km} = 0{,}4$ mm. Bazių dalių koordinačių prieaugiai ΔX, ΔY, ΔZ išmatuoti GPS imtuvais *Ashtech Z12*, vidutiniu standartinio nuokrypio įverčiu laikant $m_{02} \approx 5$ mm. Koordinačių pataisos τ_Δ skaičiuotos pagal formulę (8), taikant pseudosprendinį. Skaičiavimų rezultatai pateikti 1 lentelėje. Rezultatų tikslumas įvertintas, nustačius pataisų vektoriaus τ_Δ kovariacijų matricos įvertį K'_{τ_Δ} pagal formulę (14), kai $\sigma_{01} \approx m_{01}$, $\sigma_{02} \approx m_{02}$. Skaičiavimų rezultatai pateikti 2 lentelėje.

1 lentelė. Koordinačių prieaugių pataisų reikšmės
Table 1. Values of the coordinates discrepances corrections

Bazių dalys	Bazių dalių ilgiai, m	Parametrinių pataisų lygčių laisvieji nariai, mm	Sąlyginių pataisų lygčių nesąryšiai, $(\omega_X, \omega_Y, \omega_Z)$ mm	Koordinačių prieaugių pataisos, mm		
				τ_{Δ_X}	τ_{Δ_Y}	τ_{Δ_Z}
1–2	360,177	11,6	–9,0	–4,3	–3,7	12,6
2–3	960,317	–9,7	–5,0	9,8	6,7	0,5
1–3	1320,495	0,1	–19,0	–3,5	–2,0	–5,9
10–20	841,814	3,9	2,0	–4,6	–1,6	6,2
20–30	949,189	–6,5	1,0	6,7	–0,8	–1,2
10–30	1320,495	–4,9	–10,0	4,1	–1,4	–5,0

2 lentelė. Kovariacijų matricos įverčio $K'\tau_\Delta$ diagonalieji nariai

Table 2. Diagonal members of covariance matrix estimator $K'\tau_\Delta$

Bazių dalys	$m_{01}\left(\sqrt{Q_{11}NQ_{11}}\right)_{ii}$, mm			$m_{02}\left(\sqrt{Q_{12}N_{\omega'}Q_{21}}\right)_{ii}$, mm		
	$m'_{\Delta X}$	$m'_{\Delta Y}$	$m'_{\Delta Z}$	$m''_{\Delta X}$	$m''_{\Delta Y}$	$m''_{\Delta Z}$
1–2	0,22	0,16	0,19	2,8	2,8	2,8
2–3	0,22	0,16	0,19	2,8	2,8	2,8
1–3	0,22	0,16	0,19	2,8	2,8	2,8
10–20	0,40	0,42	0,22	4,8	3,4	2,1
20–30	0,34	0,43	0,20	1,2	5,2	3,1
10–30	0,28	0,25	0,23	4,0	2,8	3,3

3. Nustatytų parametrų tikslumo įvertinimas

Įvertinsime apskaičiuoto vektoriaus $(\boldsymbol{\tau}_\Delta, \boldsymbol{k})^T$ tikslumą, nustatydami jo kovariacijų matricos $\boldsymbol{K}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\tau}_\Delta \\ \boldsymbol{k}\end{pmatrix}$ išraišką. Taikydami formulę (8), koordinačių prieaugių pataisų ir koreliatų vektoriaus kovariacijų matricą rašome:

$$\boldsymbol{K}\begin{pmatrix}\tau_\Delta \\ \boldsymbol{k}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\boldsymbol{K}_{\tau_\Delta} & \boldsymbol{K}_{\tau_\Delta,\boldsymbol{k}} \\ \boldsymbol{K}^T_{\tau_\Delta,\boldsymbol{k}} & \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{k}}\end{pmatrix} = \boldsymbol{N}_0^+ \boldsymbol{K}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}'\end{pmatrix}\boldsymbol{N}_0^+ =$$
$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{Q}_{11} & \boldsymbol{Q}_{12} \\ \boldsymbol{Q}_{21} & \boldsymbol{Q}_{22}\end{pmatrix}\boldsymbol{K}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}'\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{Q}_{11} & \boldsymbol{Q}_{12} \\ \boldsymbol{Q}_{21} & \boldsymbol{Q}_{22}\end{pmatrix}. \quad (9)$$

Nesąryšių vektoriaus $(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}')^T$ kovariacijų matrica yra lygi

$$\boldsymbol{K}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}'\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\boldsymbol{K}_\omega & \boldsymbol{K}_{\omega,\omega'} \\ \boldsymbol{K}^T_{\omega,\omega'} & \boldsymbol{K}_{\omega'}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\boldsymbol{K}_\omega & 0 \\ 0 & \boldsymbol{K}_{\omega'}\end{pmatrix}, \quad (10)$$

čia $\boldsymbol{K}_{\omega,\omega'} = 0$, nes vektoriai $\boldsymbol{\omega}$ ir $\boldsymbol{\omega}'$ yra nepriklausomi. Panaudodami vektorių $\boldsymbol{\omega}$ ir $\boldsymbol{\omega}'$ ankstesnes išraiškas, gauname

$$\boldsymbol{K}_\omega = \boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{K}_L\left(\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}\right)^T = \sigma_0^2\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} = \sigma_{01}^2\boldsymbol{N}, \quad (11)$$

ir

$$\boldsymbol{K}_{\omega'} = \boldsymbol{A}'\boldsymbol{K}_{T_\Delta}\boldsymbol{A}'^T = \sigma_0^2\boldsymbol{A}'\boldsymbol{Q}_{T_\Delta}\boldsymbol{A}'^T = \sigma_{02}^2\boldsymbol{Q}_{\omega'}, \quad (12)$$

čia $\boldsymbol{K}_L = \boldsymbol{K}_S = \sigma_{01}^2\boldsymbol{P}^{-1}$ – elektroniniu tolimačiu išmatuotų bazės atkarpų kovariacijų matrica, σ_{01} – rezultato, kurio svoris lygus vienetui, standartinis nuokrypis, matuojant elektroniniu tolimačiu; σ_{02} – rezultato, kurio svoris lygus vienetui, standartinis nuokrypis, matuojant GPS imtuvais. $\boldsymbol{K}_{T_\Delta} = \sigma_{02}^2\boldsymbol{Q}_{T_\Delta}$ – GPS imtuvais išmatuotų bazės atkarpų koordinačių prieaugių vektoriaus $\boldsymbol{T}_\Delta$ kovariacijų matrica, gaunama apdorojant *GPPS* programa matavimų rezultatus (pvz., išmatuotus imtuvais *Ashtech Z12*).

Kovariacijų matricą $\boldsymbol{K}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\tau}_\Delta \\ \boldsymbol{k}\end{pmatrix}$ (9), taikydami išraišką (10), rašome taip:

$$K\begin{pmatrix}\boldsymbol{\tau}_\Delta \\ k\end{pmatrix} =$$
$$\left(\begin{array}{c|c}Q_{11}K_\omega Q_{11} + Q_{12}K_{\omega'}Q_{21} & Q_{11}K_\omega Q_{12} + Q_{12}K_{\omega'}Q_{22} \\ \hline Q_{21}K_\omega Q_{11} + Q_{22}K_{\omega'}Q_{21} & Q_{21}K_\omega Q_{12} + Q_{22}K_{\omega'}Q_{22}\end{array}\right). \quad (13)$$

Pagal šią išraišką bei formules (11), (12) gauname vektoriaus $\boldsymbol{\tau}_\Delta$ kovariacijų matricos $\boldsymbol{K}_{\tau_\Delta}$ formulę:

$$\boldsymbol{K}_{\tau_\Delta} = \sigma_0^2\boldsymbol{Q}_{\tau_\Delta} = \boldsymbol{Q}_{11}\boldsymbol{K}_\omega\boldsymbol{Q}_{11} + \boldsymbol{Q}_{12}\boldsymbol{K}_{\omega'}\boldsymbol{Q}_{21} =$$
$$\sigma_{01}^2\left(\boldsymbol{Q}_{11}\boldsymbol{N}\boldsymbol{Q}_{11}\right) + \sigma_{02}^2\left(\boldsymbol{Q}_{12}\boldsymbol{Q}_{\omega'}\boldsymbol{Q}_{21}\right). \quad (14)$$

4. Išvados

1. Pasiūlytas GPS imtuvų kalibravimo metodas, naudojant elektroniniais tolimačiais išmatuotas kalibravimo bazes. Šiuo metodu taikant dvigubųjų fazių skirtumų modelį, gaunamos GPS imtuvais nustatytų koordinačių prieaugių pataisos.

2. Dviejų nešlio dažnių GPS imtuvais išmatuotų ir mažiausiųjų kvadratų metodu išlygintų koordinačių prieaugių tikslumas yra mažesnis nei išlygintų koordinačių prieaugių, nustatytų, taikant vien aukšto tikslumo elektroninius tacheometrus. Tai rodo formulė (14). Šios formulės pirmoji komponentė apibrėžia elektroniniu tolimačiu nustatytų koordinačių prieaugių tikslumą. Antroji komponentė rodo GPS imtuvais nustatytų koordinačių prieaugių tikslumą.

Literatūra

1. Leick, A. GPS Satellite Surveying. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, 1995. 352 p.
2. Koch, K. R. Einführung in die Bayes-Statistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 225 S.
3. Skeivalas, J. Accuracy of GPS observations linear models. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XVIII, No 2. Vilnius: Technika, 2002, p. 35–38 (in Lithuanian).
4. Bauer, M. Vermessung und Ortung mit Satelliten. Heidelberg: Wichmann, 1994. 274 S.
5. Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H. and Collins, J. Global Positioning System. In: Theory and Practice. Wien, New York: Springer-Verlag, 1992. 326 p.
6. Teunissen, P. J. G. An optimality property of the integer least-squares estimator. *Journal of Geodesy,* No 73. Berlin: Springer-Verlag, 1999, p. 275–284.
7. 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.

Jonas SKEIVALAS. Prof, Doctor Habil. Vilnius Gediminas Technical University. Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania
(Ph +370 5 274 4703, Fax +370 5 274 4705),
e-mail: 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.

Raimundas PUTRIMAS. Associate Professor, Doctor. Vilnius Gediminas Technical University. Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania
(Ph +370 5 274 4703, Fax +370 5 274 4705),
e-mail: RaiPut@ap.vtu.lt.

Author of more than 30 scientific papers. Participated in many intern conferences.

Research interests: calibration of geodetic instruments, adjustment of geodetic networks.