

**KODINIŲ NIVELIAVIMO MATUOKLIŲ KALIBRAVIMO TIKSLUMAS,
TAIKANT KOVARIACINĖS FUNKCIJAS****Jonas Skeivalas¹, Eimuntas Paršeliūnas², Raimundas Putrimas³, Dominykas Šlikas⁴***Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva**El. paštas: ¹Jonas.Skeivalas@ap.vgtu.lt, ²Eimuntas.Parseliunas@ap.vgtu.lt,
³raiput@ap.vgtu.lt, ⁴domasslikas@gmail.com**Įteikta 2009 01 19; priimta 2009 03 21*

Santrauka. Pristatoma kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo tikslumo, taikant kovariacinių funkcijų teoriją, analizė. Kodinių matuoklių skaitmeniniai vaizdai, gauti skaitmeniniu fotoaparatu, apdorojami pagal sudarytą kompiuterinę programą *Matlab 7* programinio paketo operatorių aplinkoje ir formuojami stacionariosios atsitiktinės funkcijos pavidalu. Šių funkcijų auto- ir tarpusavio kovariacinės funkcijos nagrinėjamos esant įvairiems vaizdo pikselių kvantavimo intervalams. Pagal tai galima įvertinti atitinkamų matuoklių kodinių brūkšnių tarpusavio nuokrypius etaloninės matuoklės kodinių brūkšnių tarpusavio nuokrypių atžvilgiu. Niveliavimo matuoklių kodinius brūkšnius įmanoma kalibruoti 1–2 pikselių tikslumu.

Reikšminiai žodžiai: kalibravimas, pikseliai, kovariacinė funkcija, kvantavimas.

1. Įvadas

Elektroniniuose nivelyruose taikoma automatizuota kodinių niveliavimo matuoklių (brūkšninių skalių) atskaitų registravimo prietaiso indikatoriuje sistema. Kodinės matuoklės skaitmeninei atskaitai gauti naudojamas tiesinis detektorius ir taikomi koreliacijos (nivelyras *Leica Wild NA 3003*), geometrinis (*Zeiss DiNi 10/20*) bei fazinis (*Topcon DL 101/102*) metodas (Menzel 1999; Skeivalas, Giniotis 2000; Grattan *et al* 2003; Giniotis, Skeivalas 2002; Lopez-Alonso, Alda 2003; Takalo, Rouhiainen 2003; NA 2002 1997). Kovariacijos nustatymo tikslumas priklauso nuo tiesinio detektoriaus fotodiodų (pikselių) matmenų, jų skaičiaus bei detektoriaus jautrio funkcijos. Tai savo ruožtu turi įtakos atskaitų, gautų nivelyro indikatoriuje, tikslumui. Atskaitų tikslumui taip pat įtakos turi kodinių brūkšnių ženklavimo matuoklėje tikslumas. Kodinių brūkšnių niveliavimo matuoklėje ženklavimo tikslumas kontroliuojamas atliekant kalibravimo procedūrą. Tai atliekama kalibravimo laboratorijose interferometriniu komparatoriumi. Šiuos komparatorius turi parengę Graco technologijos universitetas (Austrija), Helsinkio geodezijos institutas (Suomija), Miuncheno krašto apsaugos universitetas (Vokietija), Ziuricho ETH universitetas (Šveicarija).

Straipsnyje nagrinėjamas niveliavimo matuoklių kalibravimas, taikant atsitiktinių funkcijų teoriją. Matuoklės skaitmeninis vaizdas analizuojamas remiantis stacionariosios atsitiktinės funkcijos samprata, įvertinant tai, kad visų kodinių brūkšnių ženklavimo klai-

dos yra atsitiktinės ir vienodo tikslumo, t. y. klaidų vidurkis $M\Delta = \text{const} = 0$ ir dispersija $D\Delta = \text{const}$. Kodinių brūkšnių skaitmeninių vaizdų autokovariacinės ir tarpusavio kovariacinės funkcijos analizuojamos taikant skirtingus vaizdo pikselių kvantavimo intervalus. Matuoklės skalės skaitmeninė funkcija formuojama pagal kodinių brūkšnių skalės ašinę liniją. Pagal kovariacinių funkcijų atitinkamus kvantavimo intervalus galima įvertinti tikrinamų matuoklių kodinių brūkšnių tarpusavio nuokrypius etaloninės matuoklės kodinių brūkšnių tarpusavio nuokrypių atžvilgiu. Apimant visą skalės intervalą taikoma slenkamoji kovariacinė funkcija. Kodinių brūkšnių kalibravimas įmanomas 1–2 pikselių tikslumu. Dabartiniuose skaitmeniniuose fotoaparatuose fotodiodų matmuo yra apie 0,02 mm, taigi tokiu tikslumu galima atlikti kalibravimo procedūrą.

2. Teorinis nagrinėjimas

Niveliavimo matuoklių kodinių brūkšnių nuokrypiams nuo norminės padėties fiksuoti taikysime stacionariųjų atsitiktinių funkcijų kovariacinių funkcijų teoriją. Ir kodinių brūkšnių ženklavimas, ir jų matavimai kalibravimo bei niveliavimo procese neįmanomi be atsitiktinių ir sistemingųjų klaidų. Apdorojant skaitmeniniais fotoaparatais gautus vaizdus, mato vienetais geriausiai tinka pikseliai. Taigi bet kurią linijos atkarpą vaizde galima išreikšti pikselių skaičiumi.

Nagrinėsime kovariacinių funkcijų taikymą brūkšnių skalių kalibravimo procedūrose. Dviejų skalių atkarpų – $h_1(u)$ ir $h_2(u+\tau)$, laikomų atsitiktinių funkcijų realizacijomis, kurių argumentai yra pikseliai, tolydžioji kovariacinė funkcija $K_h(\tau)$ išreiškiama (Skeivalas 1999, 2008):

$$K_h(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \bar{h}_1(u) \bar{h}_2(u+\tau) du, \quad (1)$$

čia $\bar{h}_1(u)$, $\bar{h}_2(u+\tau)$ – centruotosios atkarpos, u – skalės brūkšnio koordinatė, T – skalės atkarpos ilgis, $\tau = k \cdot \Delta$ – kintantis kvantavimo intervalas, Δ – pikselio matmuo, k – pikselių skaičius kvantavimo intervale. Skaičiavimuose panaudojama vieno pikselio pločio skalės ašinė linija.

Kovariacinės funkcijos $K_h(\tau)$ įvertis $K'_h(\tau)$ pagal turimus matavimų duomenis skaičiuojamas taip:

$$K'_h(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} \bar{h}_1(u_i) \bar{h}_2(u_{i+k}), \quad (2)$$

čia n – bendras diskrečiųjų intervalų skaičius.

Formulę (2) galima taikyti autokovariacinės arba tarpusavio kovariacinės funkcijos pavidalu. Kai funkcija autokovariacinė, skalės atkarpos $\bar{h}_1(u)$ ir $\bar{h}_2(u+\tau)$ yra tos pačios skalės atkarpos. Tarpusavio kovariacinės

funkcijos atveju skalės atkarpos $\bar{h}_1(u)$ ir $\bar{h}_2(u+\tau)$ yra dviejų skirtingų skalių atkarpos.

Koreliacijos koeficientų funkcijos įvertis yra lygus

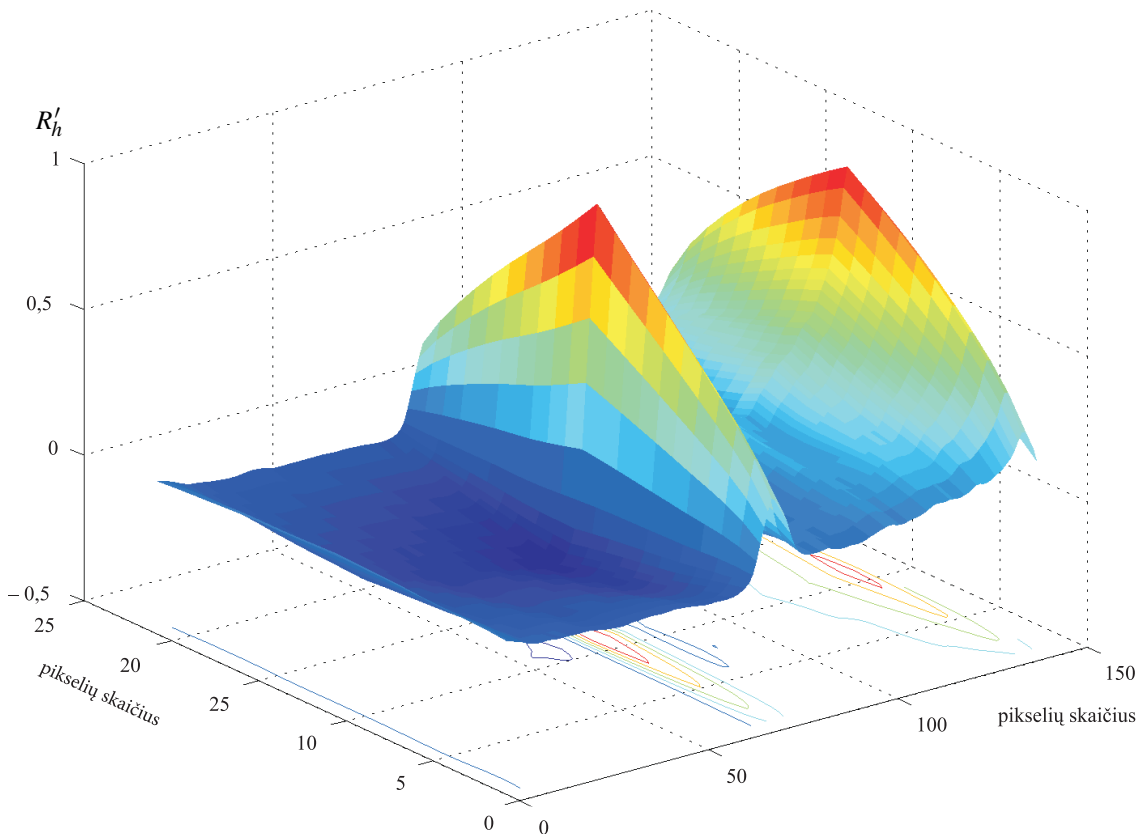
$$R'_h(k) = \frac{K'_h(k)}{K'_h(0)} = \frac{K'_h(k)}{\sigma_h'^2}, \quad (3)$$

čia σ_h' – atsitiktinės funkcijos standartinio nuokrypio įvertis.

Fotografavimo vaizduose kiekvieno taško mastelis yra šiek tiek skirtingas, todėl fotografuoti skalės ir apdoroti vaizdus tikslinga nedidelėmis atkarpomis T . Kovariacinės funkcijos reikšmių skaičiavimas atliekamas pagal skalės ašinę liniją, kurios plotis yra lygus vienam pikseliui. Atitinkamo kvantavimo intervalo τ kovariacinės funkcijos reikšmė $K_h(\tau)$ visada yra ne didesnė už atsitiktinės funkcijos dispersiją, t. y. $K_h(\tau) \leq K_h(0)$, čia $K_h(0) = D(h)$.

3. Eksperimento rezultatai

Skaičiavimams atlikti buvo sudarytos dvi kompiuterinės programos taikant *Matlab* programinio paketo operatorius. Skaičiavimų rezultatai parodyti lentelėse ir paveiksluose. Paveikslų skaitinio apdorojimo programa *Pavkor.m* yra analizuojama dviejų paveikslų tarpusavio kovariacija. Šiam skaičiavimui atlikti yra daroma stačiakampių masyvų pavidalo paveikslų atitinkamų dalių skaitinės iškarpos. Dviejų matuoklių skalių skaitinių vaizdų tarpusavio koreliacijos koeficientų matricos grafikas pavaizduotas 1 pav. Jame pateiktas

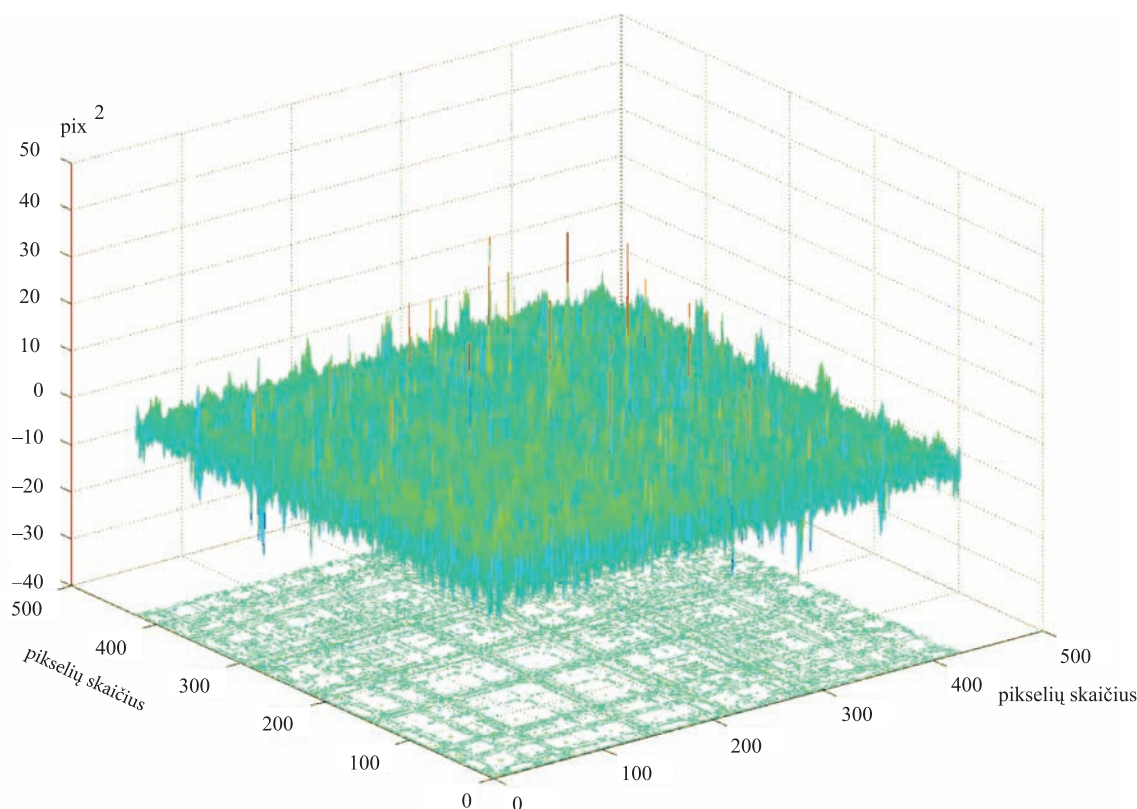


1 pav. Dviejų dalių tarpusavio koreliacijos koeficientų matricos grafinis vaizdas
Fig. 1. Graphical view of the correlation coefficient matrix of the two digital fragments

1 lentelė. Skalių padalų standartinių nuokrypių įverčių vektoriaus fragmentas, pikseliai

Table 1. Part of a vector of the standard deviations of the scale sections, pixels

1,94	2,3856	2,3394	3,4772	2,9419	2,9665	3,2193	3,4165	4,1779	2,5726
1,7321	1,9212	1,4397	1,4013	1,7373	2,9695	2,5082	1,4206	1,3685	1,5725
1,9022	2,6181	2,6112	2,6112	2,0671	2,9818	3,9312	3,4588	3,239	2,8058
1,6733	1,7477	2,737	2,4827	1,9679	1,5374	1,8635	2,5442	2,1106	1,5551
2,1448	1,5783	1,4397	1,7373	1,8488	2,5298	2,6007	1,8586	1,5667	2,6492



2 pav. Dviejų skalių tarpusavio kovariacijos vaizdas trijų spalvų spektre

Fig. 2. The view of the two scales intercorrelation in the three colors spectrum

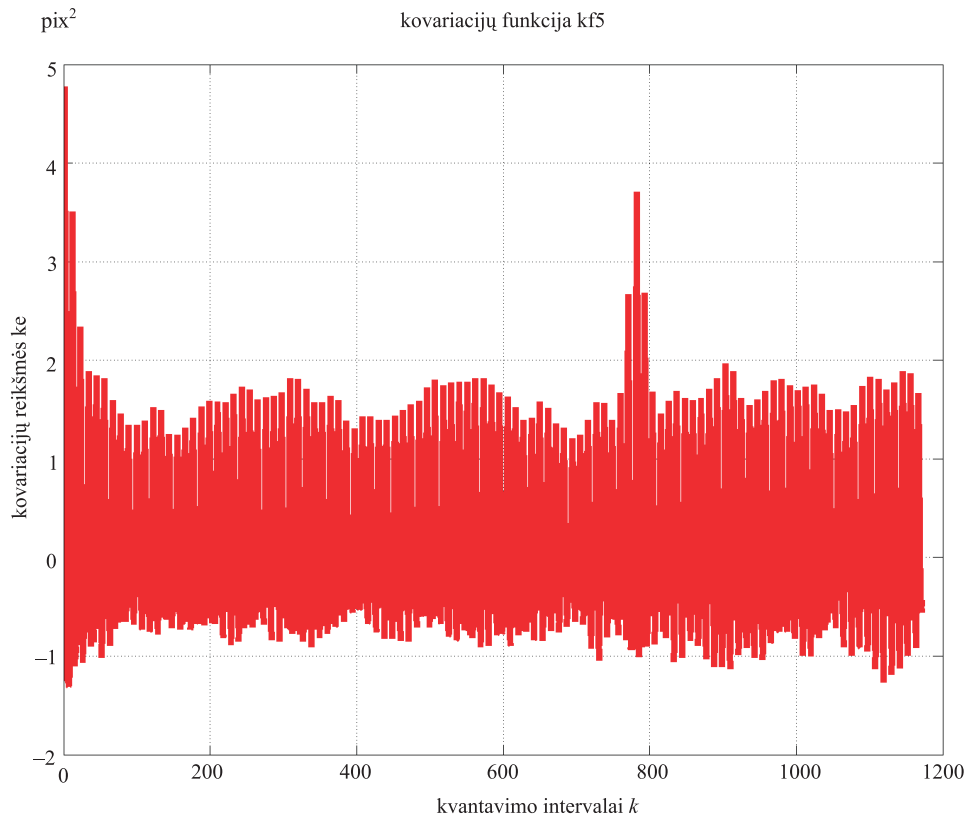
vaizdas pagal vienos spalvos spektrą. 1 lentelėje parodyta nedidelė skalių padalų standartinių nuokrypių įverčių vektoriaus dalis. Tuo atveju, kai skalių nulines atskaitos sutapdintos maždaug su 1 pikselio klaida, didžiausia koreliacijos koeficiento reikšmė $r_{12,max} = 0,996$; o $r_{12,min} = 2,9 \cdot e - 04$. Paslinkus abiejų skalių nulines atskaitas 8 pikselių atstumu, gaunama $r_{12,max} = 0,941$; o $r_{12,min} = 2,9 \cdot e - 05$. Vieno pikselio vertė ilgio vienetais pagal naudotą skaitmeninį fotoaparata yra lygi apie 0,02 mm.

Kita kompiuterine programa *Pkor.m* yra atliekama detali paveikslų skaitinės koreliacijos analizė, taikant kovariacinių funkcijų teoriją. Skaičiavimuose naudojamas kintamas kvantavimo intervalas k , kai jo reikšmė kinta nuo 1 pikselio iki $n/2$ pikselių, čia n – bendras stačiakampio masyvo pikselių skaičius. Skaičiavimų grafiniai vaizdai parodyti 2–4 pav. 2 pav. vaizduoja dviejų skalių tarpusavio kovariaciją trijų spalvų spektre. 3 pav. pateiktas vienos skalės kovariacinės funkcijos vaizdas, o 4 pav. – dviejų skalių tarpusavio kovariacinė funkcija kintamais kvantavimo intervalais.

Kai pradinis kvantavimo intervalas lygus 1 pikseliui, kovariacinės funkcijos $kf_{12}(1)$ reikšmė rodo dviejų skalių nulinių arba kitų pradinių atskaitų tarpusavio kovariaciją. Tai apibrėžia dviejų atskaitų tarpusavio poslinkį, kai mato vienetas pix^2 . Kai abiejų skalių pradinės atskaitos sutampa maždaug su 1 pikselio klaida, ir kvantavimo intervalas $k = 1$, gauname kovariacinės funkcijos reikšmę $kf_{12}(1) = 0,65 \text{ pix}^2$. Pavienių skalių padalų kovariacinės matricos dalis parodyta 2 lentelėje. Vidutinis skalės padalos standartinio nuokrypio įvertis pagal 1 ir 2 lenteles yra lygus $\sigma'_{12} \approx 2 \text{ pix} = 0,04 \text{ mm}$.

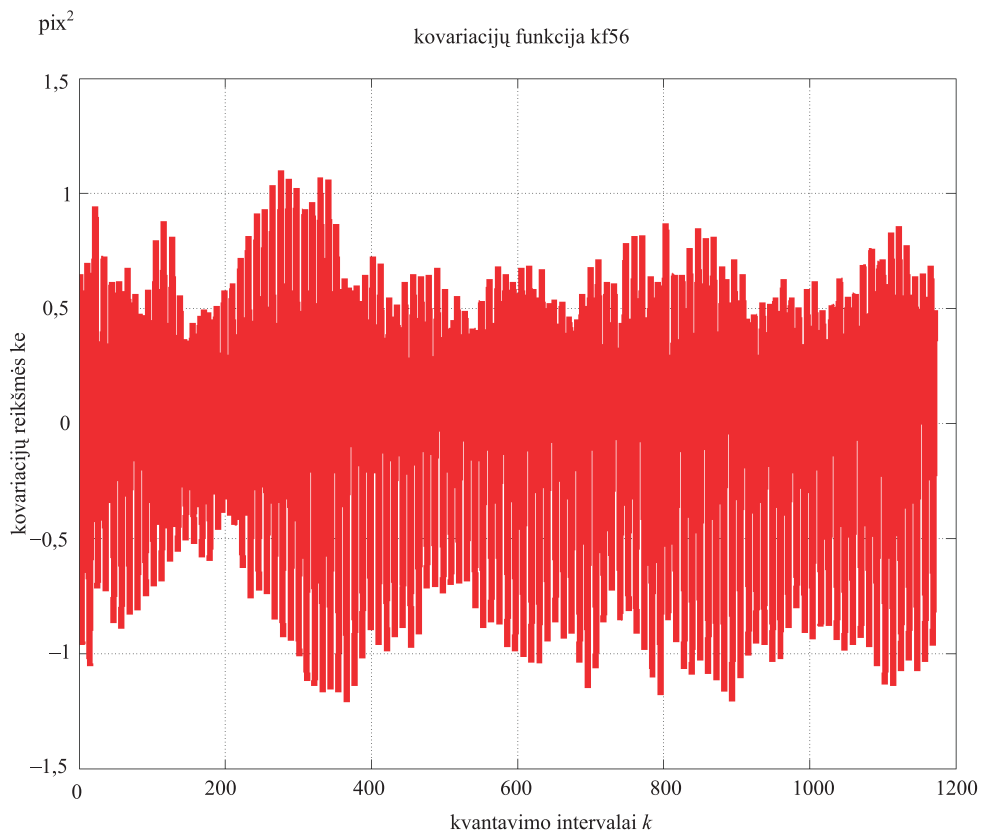
4. Išvados

1. Sukurtos dvi kompiuterinės programos – *Pavkor.m* ir *Pkor.m Matlab 7* aplinkoje paveikslams identifikuoti ir jiems analizuoti, taikant kovariacinių funkcijų teoriją.
2. Panaudojus sudarytas kompiuterines programas buvo atlikti tyrimai modeliuojant matuoklių skalių tam tikro intervalo klaidas.



3 pav. Vienos skalės kovariacinės funkcijos grafikas kintamu kvantavimo intervalu

Fig. 3. Graphic of the covariance function of a single scale by the moving quantation interval



4 pav. Dviejų skalių tarpusavio kovariacinės funkcijos grafinis vaizdas kintamu kvantavimo intervalu

Fig. 4. Graphic view of the covariance function of the two scales by the moving quantation interval

2 lentelė. Dviejų skalių padalų kovariacinės funkcijos reikšmių, pix^2 matu, matricos dalis kintamu kvantavimo intervalu

Table 2. Part of a matrix of the covariance function values of the two scales sections by the moving quantation interval, pix^2 measure

3,763 6	3,118 2	-1,790 9	0,681 82	3,072 7	1,1	-2,663 6	-2,109 1	-0,427 27	0,745 45
-0,3	2,018 2	0,809 09	0,436 36	1,054 5	1,754 5	2,181 8	1,754 5	1,890 9	-0,409 09
-0,545 45	1,127 3	2,545 5	1,654 5	-0,309 09	0,318 18	1,972 7	2,163 6	1,418 2	0,690 91
0,7	0,172 73	0,281 82	-0,236 36	0,290 91	-0,163 64	-0,490 91	-0,290 91	-0,972 73	-1,754 5
-2,2	-1,118 2	-0,309 09	1,645 5	1,245 5	1,7	1,363 6	1,527 3	1,727 3	1,854 5
2,2	0,572 73	-0,745 45	-0,890 91	0,218 18	0,718 18	0,254 55	-0,409 09	-0,709 09	-0,609 09
0,672 73	0,963 64	-0,027 273	-0,754 55	-2,027 3	-2,081 8	-1,672 7	-1,054 5	-1,109 1	-0,318 18
1,945 5	4,227 3	3,036 4	-0,536 36	0,427 27	2,7	1,418 2	-1,772 7	-1,081 8	0,1
1,018 2	-0,363 64	1,181 8	0,536 36	0,181 82	0,818 18	1,018 2	1,445 5	1,018 2	1,154 5
-0,345 45	-0,481 82	0,845 45	2,263 6	1,036 4	-0,927 27	-0,581 82	1,727 3	1,872 7	1,127 3
0,4	0,372 73	-0,290 91	-0,181 82	0,263 64	0,790 91	0,472 73	0,127 27	-0,490 91	-1,172 7
-1,272 7	-1,909 1	-0,9	0,236 36	1,309 1	1,345 5	1,3	1,018 2	1,654 5	1,854 5
2,027 3	2,372 7	1,509 1	0,190 91	-0,118 18	1,363 6	1,681 8	1,536 4	1,645 5	0,781 82
-0,918 18	0,363 64	1,672 7	0,681 82	-0,045 455	-1,445 5	-1,054 5	-0,218 18	0,781 82	0,518 18
1,154 5	3,790 9	2,590 9	2,509 1	-2,48 18	-0,927 27	2,290 9	0,236 36	-0,318 18	-1,181 8
-0,045 455	1	-0,645 45	1,090 9	0,236 36	-0,3	0,290 91	1,336 4	1,054 5	1,154 5
1,290 9	-1,081 8	-1,218 2	0,227 27	1,645 5	1,490 9	-0,472 73	-0,836 36	1,154 5	1,681 8
0,936 36	0,209 09	0,227 27	0,1	0,209 09	-0,918 18	-0,390 91	-0,527 27	-0,8	0,345 45
-0,336 36	-0,727 27	-1,327 3	0,254 55	1,109 1	1,763 6	1,9	1,981 8	1,681 8	2,027 3

3. Gautieji tyrimų rezultatai patvirtino galimybę kalibruoti niveliavimo matuoklių skales 1–2 pikselių tikslumu.

Literatūra

- Giniotis, V.; Skeivalas, J. 2002. *The level*. Lithuanian Patent LT 4966 B, Int. Cl. G01C 5/02 / Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius: State Patent Office. 10 p.
- Grattan, K. T. V.; Skeivalas, J. and Giniotis, V. 2003. Development of 2D optical measurements, in *Proceedings of XVII IMEKO World Congress, IMEKO and HMD, 1831–1833*.
- Lopez-Alonso, M.; Alda, J. 2003. Operational parametrization of the $1/f$ noise of a sequence of frames by means of the principal component analysis in focal plane arrays, *Opt. Eng.* 42(7): 1915–1922.
- Menzel, M. 1999. The development of levels during the past 25 years, with special emphasis on the NI002 optical geodetic level and the DiNi[®] 11 digital level, in *Geodesy and Surveying in the Future. The Importance of Heights. Proceedings*, 85–93.
- NA 2002. NA 3003. Technical report, digital levels. *Leica Geosystems AG, Geodesy*, CH–9435 Heerbrugg (Switzerland), 1997.
- Skeivalas, J. 1999. An accuracy of determination of the covariation of random values, *Geodezija ir kartografija* [Geodesy and Cartography] 25(4): 156–158 (in Lithuanian).
- Skeivalas, J. 2008. *GPS tinklų teorija ir praktika* [Theory and practice of GPS networks]. Vilnius: Technika. 288 p.
- Skeivalas, J.; Giniotis, V. 2000. Elektroninių nivelių atskaitymo sistemos tikslumo analizė [Analysis of reading accuracy system in electronics levels], *Matavimai* [Measurements] 1(13): 30–32.
- Takalo, M. and Rouhiainen. 2003. *On use of FGI system calibration comparator*. Finnish Geodetic Institute, Paris, France.

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 three monographs and more than 150 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, global positioning system (GPS).

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

Doctor (1992). Author of two teaching books and more than 40 scientific papers. Participated in many intern conferences.

Research interests: graphs theory in geodesy, adjustment of geodetic networks, geoinformation systems.

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.vgtu.lt.

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

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

Dominykas ŠLIKAS. MSc., Dept of Geodesy and Cadastre. Vilnius Gediminas Technical University. Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Ph +370 5 2744 703, Fax +370 5 2744 705, e-mail: domasslikas@gmail.com

MSc at VGTU (2007).

Research interests: calibration of geodetic instruments, engineering geodesy.