

UDK 528.73

**URBANIZUOTŲ TERITORIJŲ KARTOGRAFAVIMO YPAČ STAMBIU MASTELIU
ORTOFOTOGRAMETRINĖS TECHNOLOGIJOS YPATUMAI**

Jūratė Sužiedelytė-Visockienė, Albinas Žalnierukas
*Geodezijos mokslo institutas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva,
el. paštas: gi@takas.lt*

Iteikta 2004 01 09, priimta 2004 02 10

Santrauka. Aprašomos urbanizuotų teritorijų ypač stambaus mastelio (1:1000–1:2000) spalvotu ortofotografinių žemėlapių sukūrimo, taikant naujausias technologijas, galimybes. Pateikiami technologijos ypatumai ir tikslumo duomenys, rekomenduojami aerofotonuotraukos sudarymo parametrai. Aptariami aerofotonuotraukų skenavimo darbai, pateikiamas tinkamiausias vaizdo elemento (pikselio) dydis, skenavimo geometrinis tikslumas, nurodomi aerotrianguliacijos variantai, skaitmeninio reljefo modelio sudarymo žingsnio dydis bei tikslumas, analizuojami ortofotografinio žemėlapio generavimo ypatumai.

Raktažodžiai: ortofotogrametrisis kartografavimas, aerotrianguliacija, skaitmeninis reljefo modelis.

1. Įvadas

Urbanizuotų teritorijų stambiojo mastelio 1:1000 (arba 1:2000) tikslumo žemėlapiams sudaryti rekomenduojamas progresyvus, spartus ortofotogrametrisis kartografavimo būdas. Šis metodas miestams kartografuoti tokiais stambiais masteliais, pradėtas taikyti kai kur Europoje, Lietuvoje dar netaikomas. Iki šiol neištirti tokios technologijos ypatumai bei tikslumo parametrai, tokių žemėlapių naudojimo galimybes. Išsamių duomenų nėra ir specialioje literatūroje.

Straipsnyje, remiantis literatūros šaltiniais ir tyrimais sudarant bandomąjį projektą [1] bei konsultacijomis, apžvelgiama ortofotogrametrisių darbų eiga, analizuojami jų ypatumai ir tikslumo parametrai. Pateikiamos praktinės stambiojo mastelio ortofotografinių žemėlapių kūrimo rekomendacijos. Rekomenduojama visiškai kompiuterizuota technologija, kurios svarbiausieji etapai:

- aeronuotraukos ir atraminių taškų (kontūrženklių) projektavimas, ženklinimas vietovėje;
- aerofotografinė nuotrauka (nespalvota ar spalvota);
- aerofotonuotraukų skenavimas;
- aerotrianguliacija;
- skaitmeninio vietovės reljefo modelio sukūrimas;
- ortofotografinių žemėlapių gaminimas;
- žemėlapių radiometrinės ir geometrinės kokybės tikrinimas bei koregavimas.

Pagal aerofotogrametrisius duomenis sukuriama nespaltoti arba spalvoti skaitmeniniai rastriniai ir analoginiai stambiųjų mastelių ortofotografiniai žemėlapiai.

Ortofotografinis žemėlapis – unikalus skaitmeninis kartografijos kūrinys su spalvotu fotografiniu miesto atvaizdu, būdingomis pastatų vaizdavimo perspektyvomis [2]. Vyriausybės nutarimu numatoma 2004–2007 m. atlikti didelės apimties Lietuvos miestų kartografavimo ortofotogrametrisiu būdu stambiuoju masteliu darbus.

2. Ortofotografinių žemėlapių tikslumas

Kartografinis ortofotografinių žemėlapių tikslumas apibūdinamas vaizduojamųjų kontūrų padėties (planimetriniu) tikslumu ir turinio detalumu – vietovės detalių perteikimu. Žemės paviršiaus reljefo nuotrauka neprojektuojama. Pavieniais atvejais ji gali būti padaryta stereofotogrametrisiu metodu kartu su pastatų nuotrauka.

Planimetrinis žemėlapio tikslumas turi atitikti Lietuvos topografinių darbų reglamento reikalavimus [3]. Topografiniuose planuose vaizduojamų aiškių kontūrų ir situacijos elementų vidutinė aritmetinė paklaida nuotraukos pagrindo taškų atžvilgiu neturi viršyti 0,5 mm, o miškingų teritorijų – 0,7 mm (absoliutusias tikslumas). Koordinuotų taškų ir pastatų bei statinių kampų, nutolusių vienas nuo kito ne daugiau kaip 50 m, ribinė tarpusavio padėties paklaida plane neturi viršyti 0,4 mm (santykinis tikslumas).

Ribinis nesutapimas neturi viršyti dvigubos vidutinės paklaidos, o ribinių nuokrypių negali būti daugiau kaip 10 % kontrolinių matavimų skaičiaus.

Panašūs techniniai žemėlapių tikslumo reikalavimai, pagrįsti eksperimentinių ir gamybinių darbų išvadomis, taikomi ir kitose valstybėse, pvz., Rusijoje [4].

JAV fotogrametrisininkų draugija (*The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ASPRS*) reglamentuoja tokias ryškių kontūrų vaizdavimo

(padėties) stambiojo mastelio žemėlapiuose vidutinės kvadratinės paklaidos (ASPRS' *Tentative Map Accuracy for Large – Scale Maps*) 1988 m.:

- pirmos klasės žemėlapiuose – 0,25 mm,
- antros klasės žemėlapiuose – 0,50 mm,
- trečios klasės žemėlapiuose – 0,75 mm.

Pagal Norvegijos valstybės standartą „*Systematic Organisation of Spatial Information*“ *Version 2.1*, *Norwegian Mapping Authority*, 1995 (*SOSI*), reglamentuotos kontūrų padėties stambiųjų mastelių žemėlapiuose vidutinės paklaidos pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Norvegijos standarte *SOSI* (1995 m.) rekomenduojamas topografinis tikslumas

Table 1. Recommended topographical quality of Norway *SOSI* (1995) standard

Žemėlapijo mastelis	Reglamentuojamas kontūrų padėties tikslumas	
	vietovėje, m	žemėlapijo masteliu, mm
1:500	0,21	0,42
1:1000	0,36	0,36
1:2000	0,58	0,29
1:5000	2,00	0,40

Vokietijoje dažnai daroma ypač tiksli 1:1000 mastelio stereofotogrametrinė nuotrauka (aeronuotraukos mastelis – 1:4000) atliekant papildomus geodezinius matavimus (kontūrų padėties tikslumas – apie 10 cm).

VG TU Geodezijos institute 1995–2001 m. *stereofotogrametriiniu būdu* pagal 1:6000 ($c=153$ mm) mastelio aerofotonuotraukas sukurtos Vilniaus miesto 130 km² ploto skaitmeninio bazinio žemėlapijo duomenų bazės. Įvertinus geodeziniais kontroliniais matavimais absoliutųjį tikslumą pagal 439 kontrolinius taškus, nustatytos aiškių kontūrų padėties miesto GPS tinklo punktų atžvilgiu vidutinės kvadratinės paklaidos $m_{XY} = 0,26 - 0,34$ m. Didžiausieji nuokrypiai – iki 1 m. Vidutinis kvadratinis lauke rulete išmatuotų 59 atkarpų ilgių nuokrypis $m_S = 0,29$ m. Taškų altitudžių nustatymo tikslumas – 0,15 m (0,016 % aukščio, iš kurio fotografuota).

Tikrinant Lietuvos teritorijos 1:10 000 mastelio ortofotografinio žemėlapijo tikslumą, rastos iki 2,5 m (0,25 mm žemėlapyje) aiškių kontūrų padėties vidutinės kvadratinės paklaidos.

Skaitmeninių aerofotogrametriinių metodų tikslumą labiausiai nulemia aerofotonuotraukų mastelis bei geometrija, aerofotografinės sistemos skiriamoji geba, optinis tankis, skenavimo pikselio dydis, matavimo aerofotografijose paklaidos, geodezinių atraminių taškų ir aerofotokameros koordinavimo GPS tikslumas, reljefo modelio klaidos, kartografinės projekcijos savybės ir kt.

Remiantis turimais duomenimis, rekomenduotinas urbanizuotų teritorijų 1:1000 arba 1:2000 mastelių ortofotografinių žemėlapių vidutinis kvadratinis *planimetrinis tikslumas 0,4 mm* žemėlapių masteliu (0,4 m ir atitinkamai 0,8 m vietovėje). Ribinės paklaidos

dvigubos. Miškingųjų teritorijų paklaidos gali būti 1,5 karto didesnės.

Ortofotografinio žemėlapijo detalumą apibūdina vaizdavimo elemento – *piksely dydis (picture element)*. Jis numatomas 10 μm (0,10 m vietovėje). Atpažįstama laikoma 2–3 pikselių didžio vietovės detalė.

Aerofotonuotrauka analoginė arba skaitmeninė, 1:5000 mastelio – kartografuojant 1:1000 mastelio tikslumu ir 1:8000 – sudarant ortofotografinį 1:2000 mastelio žemėlapi. Aerofotokameros židinio nuotolis $c = 152$, arba 210 mm. Kai numatoma papildoma (dalinė) stereofotogrametrinė reljefo bei pastatų nuotrauka – $c = 152$ mm. Jei stereonuotrauka neprojektuojama, tikslingiau, kad būtų $c = 210$ mm, tada didesnis fotografavimo aukštis ir mažesnės pastatų atvaizdų perspektyvos [2]. Projekcijos centrai koordinuojami lėktuvo GPS.

Labai svarbu yra tinkami aerofotonuotraukos parametrai ir gera aparatūra bei filmo kokybė. Kai galima, reikia fotografuoti tinkamų parametrų skaitmenine aerofotokamera. Pageidautinos didesnės aerofotovaizdų sanklotos. Būtinai skersiniai aerofotonuotraukos maršrutai.

3. Kartografinė projekcija

Lietuvos miestų ortofotografiniai žemėlapiai sudaromi LKS 94 koordinacių sistemoje. Elipsoidas tarptautinis – GRS 80 (*Geodetic Reference System*).

Elipsoidinėms koordinatėms projektuoti į plokštumą taikoma modifikuota skersinė cilindrinė Merkatoriaus (*UTM – Universal Transverse Merktor*) kartografinė projekcija. Ašiniu šios projekcijos zonos meridianu Lietuvoje laikomas $L_0 = 24^\circ$ (Kauno meridianas), ties kuriuo projekcijos mastelis $m_0 = 0,9998$. Mastelio pokytis čia neigiamas santykiu 1:5000. Visa Lietuvos teritorija telpa į vieną 6° zoną.

Ar didžiausi projekcijos kartografinio vaizdo iškreipimai Lietuvos pakraščiuose atitinka 1:1000–1:2000 žemėlapių mastelių tikslumo reikalavimus?

Modifikuotos *UTM* projekcijos mastelis kintamas ir išreiškiamas tokia formule (pirmasis narys) [5]:

$$m = m_0 \left(1 + \frac{y^2}{2m_0^2 R^2} \right) \dots, \quad (1)$$

čia y – taško ordinatė *UTM* projekcijoje, R – elipsoido kreivumo spindulys taške.

Ties optimalia zonos riba, vakariniame ir rytiniame Lietuvos teritorijos pakraščiuose, kai $y = 180$ km (Klaipėda), mastelio pokytis ($R=6370$ km) teigiamas $m = 1,0002$. Santykinė elipsoidinių atstumų deformacija čia taip pat 1:5000. Kai $y = 127,5$ km, projekcijos mastelis $m = 1$.

Pačiame vakariniame Lietuvos pakraštyje ties 21° meridianu $y = 190$ km (Nida), projekcijos mastelis $m = 1,00025$, santykinė atstumų deformacija 1:4000.

Iš modifikuotos *UTM* projekcijos mastelių analizės matyti, kad Lietuvoje pasirinktosios 6° zonos vidurio ir pakraščių 1:1000 ir 1:2000 mastelių žemėlapių lapų kraštinių ilgiai pakis nuo -0,1 iki +0,1 mm.

Modifikuota *UTM* projekcija vaizduojamąjį plotą P iškraipo (sumažina arba padidina) taip:

$$P_{pr} = m_0^2 P \left(1 + \frac{y^2}{R^2} \right). \quad (2)$$

Ties projekcijos ašiniu meridianu ir zonos pakraščiuose, kur plotas labiausiai iškraipomas, 1:1000 mastelio žemėlapių lapo 25 ha plotas pakis 1 aru, o 1:2000 mastelio lape 100 ha plotas – 4 arais (santykinis pokytis – 1:2500).

Galima teigti, kad LKS 94 koordinatų sistema su modifikuota *UTM* projekcija yra priimtina sudarant stambiojo mastelio ortofotografinius žemėlapius. Siekiant ypač didelio plotų žemėlapyje tikslumo, taškų koordinatų arba ploto projekcijos iškraipymus galima pataisyti.

4. Aerofotonuotraukų skenavimas

Nuskaitymi (skenuojami) originalūs aerofotonuotraukos negatyvai arba diapozityvai didelės skiriamosios gebos fotogrametriniais skaitymo įrenginiais – *LH DSW300*, *Zeiss SCAI*; *PS-1* ir kt. Gaunami skaitmeniniai rastriniai aerofotovaizdai. Skaitmeninės fotogrametrijos tikslumas priklauso nuo vaizdo elemento (pikslio) didumo.

Vaizdo elemento dydį galima apskaičiuoti pagal tokią formulę [6]:

$$\Delta D = 0,7 / (2 \times R), \quad (3)$$

arba [4]:

$$\Delta D = 0,4 / R, \quad (4)$$

čia R – aerofotonuotraukų vaizdo skiriamoji geba, 0,7 – planimetrinio tikslumo sumažėjimas (30 % pikslio dydžio).

Kai $R = 40$ lin/mm, tai vaizdo elemento dydis pirmuoju atveju $\Delta D = 9 \mu\text{m}$, o pagal (4) formulę – $\Delta D = 10 \mu\text{m}$.

Siekiant išvengti didelio informacijos kiekio (2 lentelė), nuskaitym spalvotas aerofotonuotraukas rekomenduojamas vaizdo elemento dydis – 15–20 μm [7, 8], o panchromatinės (n spalvotas) – 10 μm .

Leistinąjį nuskaitymo geometrinį tikslumą galima apskaičiuoti taip [9]:

$$P_{geom} = \frac{m_{orto} \times v_s}{m_{foto} \sqrt{3}}, \quad (5)$$

čia m_{foto} – aerofotonuotraukos mastelio vardiklis; m_{orto} – ortofotografinio žemėlapių mastelio vardiklis; v_s – atraminių taškų planimetrinių koordinatų (nustatytų GPS metodu) vidutinė kvadratinė paklaida; 3 – koeficientas, išreiškiantis tikslumo sumažėjimą dėl nuskaitymo ir matuojant fotogrametrinius taškus.

2 lentelė. Skaitmeninių aerofotonuotraukų laikmenos apimtys
Table 2. The size of medium digital aerophotograph

Pikslio dydis, μm	dpi, taškų/col.	Nesuglaudintos informacijos laikmena, MB	
		n spalvotoji aerofotonuotrauka	spalvotoji aerofotonuotrauka
5	5100	2018	6054
10	2540	504	1513
15	1700	235 (15 360 × 15 360 pikselių)	705
20	1270	126	378
50	510	20	61
100	250	5	15

Kai $m_{orto} = 1000$, $m_{foto} = 5000$, o $v_s = 0,05$ mm (5 cm vietovėje), tai $P_{geom} = 6 \mu\text{m}$.

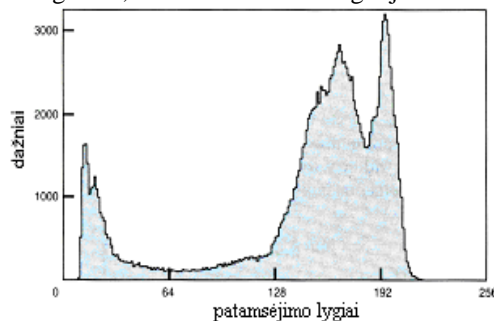
Siūlomi tokie spalvotųjų aerofotonuotraukų nuskaitymo parametrai (aerofotonuotraukos mastelis 1:5000):

- nuskaitymo vaizdo elemento dydis – 15 μm ;
- pikslio dydis žemės paviršiuje – 9 cm;
- radiometrinė skiriamoji geba – 24 bitai – gradaciniai žalios, mėlynos ir raudonos spalvų pokyčiai [10];
- geometrinis nuskaitymo tikslumas – 3–4 μm .

Prieš pradėdant nuskaitymo darbus, reikia atlikti skaitymo įrenginio kasetės, geometrinių ir radiometrinių rodiklių kalibravimą. Rezultatai turi atitikti gamintojo reikalavimus.

Siekiant geros ir vienodos fotografinės nuskaitytų aerofotovaizdų kokybės, būtini nuskaitymo (objekto, maršruto) testai. Testo duomenys saugomi fototono (sodrumo, kontrastingumo, ryškumo) reikšmių bylose (failuose), pagal šias radiometrines reikšmes nuskaitymi visi kiti objekto ar maršruto aerofotovaizdai. Testo duomenys dažniausiai pateikiami *TIFF* formatu.

Reikia daryti nuolatinę nuskaitymo kokybės kontrolę. Kiekvienam aerofotovaizdai turi būti sukuriama rastrinis, informacinis ir sodrumo (patamsėjimo) histogramos failai (1 pav.) [11]. Lyginant su pirmuoju maršruto vaizdu, sureguliuojamas sodrumas bei kontrastingumas, toninės kreivės koreguojamos.



1 pav. Pilkosios spalvos vaizdo sodrumo histograma: patamsėjimo gradacija nuo 0 iki 256

Fig 1. The histogram of grey colour intensity: dark gradation is from 0 to 256

Nuskaitymo kontrolės ataskaitoje turėtų būti:

a) nuskaitymo tikslumo geometriniai duomenys pagal kalibruotą fotogrametrinį tinklą;

b) radiometrinio tikrinimo pagal fotografinių laipsnių lentelę duomenys;

c) išsamūs kokybės duomenys: vaizdų sodrumas (0–255 reikšmių intervalo), 24 bitų radiometrinės skiriamosios gebos efektyvumas, vaizdų koordinatinių žymių ryškumas, nuskaitymo informacinė lentelė;

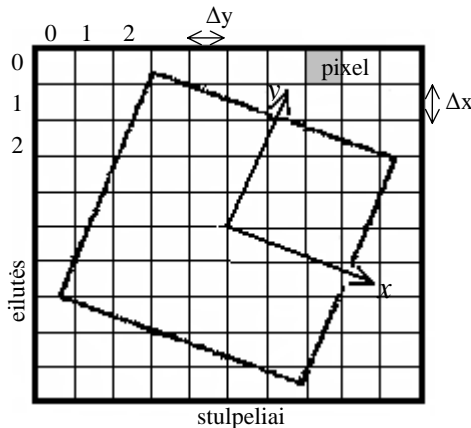
d) vaizdų geometrija, t. y. vidinis orientavimas su ne didesne kaip 20 μm vidutine kvadratine paklaida, apibendrintoji paklaida turi būti mažesnė nei 30 μm (aštuonios koordinatinių žymės);

e) vizuali nuskaitytų vaizdų kokybė – ryškumas, detalumas, pranykę detalės ir pan.

Nuskaitymo metu neturi atsirasti dulkių pėdsakų, įbrėžimų ir kitokių aerofotofilmo pažeidimų. Skaitmeniniai rastriniai vaizdai gali būti saugomi glaudintu formatu pvz., JPEG (*Joint Photographic Expert Group*) variantu arba realioju ASCII formatu.

Remiantis koordinatinių žymėmis, afiniškai randami vaizdo elementų bei aerofotovaizdo koordinatinių ryšio formulių parametrai ir nuskaitytasis rastras perskaičiuojamas į aerofotovaizdo sistemą. Vaizdo elementų koordinatinių sistemos pradžia kairiajame viršutiniame vaizdo kampe (2 pav.). Dėl aerofotokameros objektyvo distorsijos, filmo susitraukimo ir kitų veiksnių iškreiptas vaizdo turinys pataisomas pagal kalibravimo duomenis.

Aerofotografuojant skaitmenine kamera aerofotovaizdų nuskaitymo procesas atkrinta.



2 pav. Nuskaitymo vaizdo elementų ir aerofotovaizdo koordinatinių sistemos

Fig 2. Scanning pixels and aerophoto coordinates systems

5. Aerotrianguliacija

Aerotrianguliacija yra svarbus fotogrametrinio pagrindo sutankinimo procesas. Aerotrianguliacijos metodu nustatytų taškų koordinatinių tikslumas priklauso nuo aerofotonuotraukos kokybės, fotogrametrinių matavimų tikslumo, pradinių geodezinių duomenų paklaidų, tinklo sudarymo bei išlyginimo metodikos.

Urbanizuotų teritorijų fotogrametriniam pagrindui sudaryti rekomenduojami blokiniai aerotrianguliacijos tinklai, išlyginami projekcinių spindulių pluoštų metodu

(*bundle block adjustment*). Visai miesto teritorijos aeronuotaukai, išskyrus didžiuosius miestus, sudaromas vienas fotogrametrinis blokas. Didelių miestų aeronuotauka suskaidoma į 2–4 blokus, tai numatoma projektuojant skersinius maršrutus ir kontūrženklis. Į aerotrianguliacijos tinklus reikia įtraukti skersinius aerofotografavimo maršrutus, atraminius kontūrženklis ir kinematinį GPS metodu nustatytas aerofotonuotaukų projekcinių centrų koordinatas. Taip pat turi būti ne mažiau kaip 10 (iki 20) kiekvieno modelio ryšio bei kontrolinių taškų. Miškingoje teritorijoje reikia įtraukti daugumą galimų ryšio taškų. Skaitmeninėje aerotrianguliacijoje ryšio taškų renkama daugiau – iki 200.

Duomenys, apibūdinantys aerotrianguliacijos tinklo tikslumą:

- svorio vieneto (taško matavimo) vidutinis kvadratinis standartas;

- empiriniai fotogrametrinių taškų koordinatinių standartai atlikus išlyginimą (*root-mean-square error – RMSE*);

- geodezinių taškų (kontūrženklių) koordinatinių nuokrypiai nuo GPS metodu nustatytų dydžių;

- projekcinių centrų koordinatinių standartiniai nuokrypiai, nustatyti iš lėktuvo GPS reikšmių.

Remiantis literatūros šaltiniais ir Vilniaus miesto blokinių aerotrianguliacijos (aerofotonuotraukos mastelis 1:6000) tinklų išlyginimo rezultatais, svorio vieneto vidutinis kvadratinis standartas rekomenduojamas 5–6 μm .

Visų matuotų taškų empiriniai taškų koordinatinių standartai S_x, S_y, S_z (*RMSE* – liekamosios kolinearumo paklaidos) apskaičiuojami tinklo išlyginimo metu. Jei reikia, taškai, kurių paklaidos didelės, permatuojami. Kai sąlygos palankios, tikėtini empiriniai taškų koordinatinių standartai S_x, S_y – 0,15 m, o S_z – iki 0,20 m. Jei aerotrianguliacijos blokinių tinklo teritorija miškinga – tikslumas mažesnis.

Atraminių taškų (geodezinių punktų bei kontūrženklių) fotogrametrinių X, Y, Z koordinatinių nuokrypiai nuo GPS metodu nustatytų geodezinių reikšmių, išlyginus tinklą, turi būti ne didesni kaip 15 cm. Tuomet galima teigti, kad blokinių aerotrianguliacijos tinklas yra gerai suderintas su geodezine atrama. Išlyginant aerotrianguliacijos bloką apskaičiuotųjų aerokameros projekcinių centrų (PC) koordinatinių standartai tikėtini iki 0,10–0,15 m. Lėktuve įrengto GPS imtuvo antenos centras geometriškai nesutampa su vaizdo projekcijos centru, todėl išlyginant fotogrametrinį tinklą šis GPS antenos centro nuokrypis nuo projekcijos centro patikslinamas.

Galimi du aerotrianguliacijos sudarymo variantai: analitinis ir skaitmeninis (automatinis). Kartais šie abu metodai derinami tarpusavyje į fotogrametrinio sutankinimo sistemą. Tuomet pagal analitinį variantą sudarytas fotogrametrinis atraminis tinklas atliekant automatinę aerotrianguliaciją papildomai sutankinamas iki skaitmeniniam reljefo modeliui suformuoti reikiamo tankumo. Analitinė aerotrianguliacija dažnai taikoma, kai

numatoma dalinė (pastatų arba reljefo) stereofotogrametrinė nuotrauka analitiniu prietaisu.

Analitinė aerotrianguliacija – tikslus ir patikimas fotogrametrinių tinklų sudarymo metodas *off-line* režimu. Matuojama stereofotogrametriniu analitiniu arba analoginiu-analitiniu prietaisu aerofotonegatyvų originaluose arba diapozityvuose. Ryšio taškai projektuojami lygioje vietovėje stereoskopiškai aerofotovaizdų atspauduose (fotokopijose) arba fiksuojami aerofotonegatyvuose (diapozityvuose) specialiu stereomarkiravimo prietaisu (pvz., *PUG-4*). Fotogrametriniai taškai taip pat gali būti parenkami ir matuojant. Matavimo procese reikia tikrinti kokybę – apskaičiuojant fotogrametrinį modelį ir pan.

Blokiniis aerotrianguliacijos tinklas išlyginamas ir jo kokybę įvertinama tiksliai projektavimo spindulių pluoštų metodu, remiantis kolinearumo lygtimis (programos *PAT-B*, *NLHBUNT* ir kt.).

Automatinė skaitmeninė aerotrianguliacija – modernus visiškai arba pusiau automatizuotų operacijų aerotrianguliacijos *on-line* režimu metodas, įtraukiamas į ortofotografinių žemėlapių kūrimo technologiją [12–14]. Automatinės aerotrianguliacijos tinklus sudaro skaitmeninė fotogrametrinė stotis, naudojami skaitmeniniai arba nuskaitytieji rastriniai aerofotovaizdai. Yra *Zeiss Intergraph* stotis su gera automatinės aerotrianguliacijos programa *MATCH-AT Inpho* ir kai kurios kitos *AT* programos.

Technologinis procesas trijų pagrindinių etapų:

- parengiamieji darbai ir projekto sukūrimas;
- skaitmeninių vaizdų orientavimas ir taškų koordinacių matavimas bei automatinis klaidų atpažinimas;
- blokinių tinklo išlyginimas projekcinių pluoštų metodu bei kontrolė.

Rastrinių skaitmeninių vaizdų taškų koordinatės galima matuoti automatiškai arba pusiau automatiškai įsijungiant operatoriui. Fotogrametrinius (rišamuosius) taškus parenka pati sistema standartinėse zonose ir juos skaitmeniniu būdu identifikuoja (koreliuoja) gretimuose su aktyviuoju aerofotovaizduose (*matshing*). Į aerotrianguliacijos tinklą rekomenduojama įtraukti daug fotogrametrinių ryšio taškų (iki 200 modelyje). Taip sudaromos geresnės sąlygos skaitmeniniam reljefo modeliui sukurti. Ten, kur sistema automatiškai nesuranda matuojamųjų taškų, juos reikia papildomai – rankiniu būdu parinkti taip, kad taškai per visą stereomodelį būtų išsidėstę tolygiai.

Aerotrianguliacinio išlyginimo rezultatai dažnai pateikiami *ASCII* formatu. Sudaromi aerofotonuotraukų parametrų bei orientavimo elementų visų fotogrametrinių ir kontrolinių taškų koordinacių katalogai su aerotrianguliacijos tikslumo parametrais.

6. Skaitmeninis reljefo modelis

Ortofotografinių žemėlapių gamybai reikia suformuoti skaitmeninį žemės paviršiaus reljefo modelį (SRM). Reljefo modelis turi būti sukurtas tokiu tikslumu bei tokio taškų tankumo, kad būtų užtikrinta gera

geometrinė skaitmeninių rastrinių vaizdų transformavimo kokybė. SRM tikslumas gali būti apskaičiuotas pagal formules [13]

$$m_h \cong H \left[\frac{d_x}{x} \right] \left[1 : m_{foto} / 1 : m_{orto} \right] \quad (6)$$

ir [4] –

$$\Delta h = d_x \cdot c \cdot m_{orto} / x, \quad (7)$$

čia d_x – leistinas liekamasis taškų poslinkis ortofotografiniame žemėlapyje dėl reljefo įtakos; x – fotogrametrinių taškų atstumas nuo aerofotonuotraukos nadyro taško; H – lėktuvo skrydžio aukštis; $1 : m_{foto}$ – aerofotonuotraukos ir $1 : m_{orto}$ – ortofotografinio žemėlapio masteliai.

Kai $d_x = 0,15$ mm (reikšmė diskutuotina), $x = 100$ mm, $1 : 1000$ mastelio ortofotografinio žemėlapio gamybai iš $1 : 5000$ mastelio aerofotovaizdų ($c = 210$ mm) SRM sudarymo tikslumas:

$$m_h = 1050 \left[\frac{0,15}{100} \right] \left[1 : 5000 / 1 : 1000 \right] = \pm 0,3 \text{ m},$$

o ribinis žingsnis dvigubas – $0,6$ m [4]. Tai $0,03$ % fotografavimo aukščio H – realiai pasiekiamas tikslumas.

Sudarant $1 : 2000$ mastelio žemėlapi

$$1 : m_{foto} = 1 : 8000, H = 1680 \text{ m}, \text{ tai } m_h \pm 0,6 \text{ m}.$$

SRM sukuriama fotogrametrine stotimi automatinio režimu pagal aerotrianguliacijos duomenis. Modelis kuriamas pagal vieną arba du stereomodelius koreliuojant vaizdus teoriniu apie $0,3$ vaizdo elemento planimetriniu ir $0,01$ – $0,02$ % H aukščių tikslumu [13, 15]. SRM vizualizuojamas horizontalėmis. Miškų teritorijose SRM formuojamas medžių viršūnėmis, paskui daroma korekcija nuleidžiant horizontales arba taisant tinklelio viršūnių altitudes. Čia tikslumas mažas.

SRM tinklelis parenkamas pagal vietovės reljefą. Jei vietovė lygi, užtenka išmatuoti taškų aukščius kas 5 – 10 m. Esant sudėtingam reljefui – tankiau. Taškų matavimas atliekamas automatinio metodu. SRM reikia filtruoti ir rūpestingai redaguoti (koreguoti), jei reikia, matuojant rankiniu būdu. Tai labai atsakinga procedūra, lemianti žemėlapio tikslumą.

Kiekviename stereomodelyje reikia patikrinti ir pataisyti horizontales, nubrėžtas ant kelių, tiltų, miškų, namų bei kitų aukštų kontūrų. Horizontalės, nubrėžtos ant vandens (ežerų, upių) paviršiaus redaguojamos pagal kranto liniją. Visų stereomodelių skaitmeniniai žemės paviršiaus modeliai sujungiami į bendrą reljefo ansamblį. Galutinis SRM kokybės įvertinimas atliekamas lyginant duomenis su kontūrženkliais ir kontroliniais taškais bei palyginant dviejų gretimų SRM rezultatus. Rezultatai turi atitikti būtiną tikslumą.

7. Ortofotografinio žemėlapio gaminimas

Skaitmeniniam ortofotografiniam žemėlapiui gaminti reikalingi SRM duomenys bei aerofotovaizdų išorinio orientavimo parametrai apskaičiuoti atliekant aerotrianguliaciją. Vaizdo elemento dydį P vietovėje

ortofotografiniam žemėlapiui gaminti galima nustatyti pagal formulę [13]:

$$P = \left[8,5 \times 10^{-5} \right] \times m_{orto}. \quad (8)$$

Gaminant 1:1000 mastelio ortofotografinį žemėlapi apskaičiuotas $P = 0,085$ m, tai būtų $0,10 \times 0,10$ m vietovėje, o 1:2000 mastelio – $P = 0,2$ m (0,1 mm ortofotografinių žemėlapių masteliais).

Sudaryto ortofotografinio žemėlapio teorinis tikslumas gali būti apibūdintas dviem vaizdo elemento dydžiais [13], todėl 1:1000 mastelio žemėlapio tikėtinas santykinis tikslumas – apie 0,2 m, o 1:2000 mastelio žemėlapio – 0,4 m vietovėje.

Vaizdai transformuojami ir jų centrinės dalys (fragmentai) sujungiamos į mozaiką. Formuojant fragmentus siekiama, kad jų ribos eitų vaizdų sanklotų viduriu. Jungiant fragmentus rastriniai vaizdai pagal sandūras suderinami 10–50 vaizdo elementų ruože, priklausomai nuo spalvų skirtingumo. Atliekamas radiometrinis fotovaizdų išlyginimas (spalvų suderinimas viename vaizde ir tarp gretimų vaizdų). Tikrinamas kontūrų sutapimas.

Pagal 1:1000 arba 1:2000 mastelio žemėlapių kampų koordinatas formuojami atitinkamo mastelio ortofotografinių žemėlapių lapai.

Stambiųjų mastelių ortofotografiniams žemėlapiams kurti gali būti naudojamos *DPW-770 Leica-Helava*, *Image Station Z Intergraph* su *MATCH-AT Inpho* ir kai kurios kitos fotogrametrinės stotys su stereoskopine ir monoskopine įranga [8, 15, 16]. Kuriami *Classical* tipo (išilginė aerofotovaizdų sanklota $p=60$ %) arba *True Orthophoto* ($p=80$ %) ortofotožemėlapiai. Antruoju atveju mažesnės statinių perspektyvos, bet apie 50 % padidėja operatoriaus darbo apimtis.

Tikrinama visų sukurtų ortofotografinių žemėlapių *radiometrinė ir geometrinė kokybė*. Klaidos ir kiti trūkumai turi būti ištaisomi. Pataisomos vaizdų sandūros, patikrinami keliai, geležinkeliai, pastatai, tiltai. Ten, kur yra klaidų, dar kartą pataisomas reljefo modelis. Rastrinis vaizdas turi būti kokybiškas, švarus – be dulkių, įbrėžimų ir pan. Geometrinis tikslumas turi būti toks, kad aiškių kontūrinių taškų vidutinės absoliutinės padėties paklaidos 1:1000 bei 1:2000 mastelių ortofotografiniuose žemėlapuose būtų atitinkamai ne didesnės kaip 0,4 m ir 0,8 m.

Būtina lauko geodeziniais matavimais tikrinti žemėlapio tikslumą ir įvertinti jo kokybę. Kokybės kontrolė turi būti vykdoma periodiškai.

Ortofotogrametrinė nuotrauka dar gali būti papildoma pastatų stereonuotrauka analitiniu prietaisu.

Galutinė *ortofotografinių žemėlapių gamybos produkcija*:

- nuskaityti aerofotovaizdai;
- aerotrianguliacijos duomenys;
- skaitmeninis reljefo modelis;
- skaitmeniniai nespaltvieji arba spaltvieji ortofotografiniai žemėlapiai;
- rastriniai ortofotografiniai žemėlapiai.

Ortofotografiniai žemėlapiai sukuriama 1:1000 arba 1:2000 (mažieji miestai) mastelių nuotraukų tikslumu fotovaizdo skaitmeninio rastro neglaudintu *TIFF* formatu arba glaudintu *MrSID (of Lizardtech Inc.)* formatu (glaudinimo faktorius $Q = 20$). Taip pat pateikiami fotobraižytuvu (*filmwriter*) analogine forma plėvelėje daryto ortofotografinio žemėlapio negatyvinio vaizdo lapai ir nustatytas skaičius fotokopijų.

8. Išvados

1. Miestų stambiojo mastelio bazinę topografinę nuotrauką galima gauti progresyviu skaitmeniniu aerofotogrametrijos būdu, sudarant 1:1000 mastelio spalvotus ortofotografinius žemėlapius. Racionalus aerofotonuotraukos mastelis 1:5000 ($c=210$ mm). Mažų miestų ortofotografiniai žemėlapiai gali būti gaminami 1:2000 masteliu. Aerofotografavimo mastelis – 1:8000.

2. Ortofotografinio metodo taikymas inžinerinėms 1:1000 mastelio nuotraukoms dėl didelių pastatų atvaizdų perspektyvų gana ribotas. Šiuo atveju geriau tinka stereofotogrametrinė nuotrauka.

3. Rekomenduojamas spalvotųjų aerofotonegatyvų (diapozityvų) nuskaitymo mažiausiojo vaizdo elemento dydis – 15 μ m, nespaltvųjų – 10 μ m. Aerotrianguliacijos tinklus galima sudaryti skaitmeniniu automatinio būdu. Jungiant rastrinius aerofotovaizdus į mozaiką, reikia paisyti didelių pastatų perspektyvų ir fragmentus atriboti vidurine sanklotų linija.

4. Mažiausias ortofotografinio žemėlapio vaizdo elementas – 10 μ m. Aiškių žemėlapio kontūrų padėties vidutinė paklaida geodezinio pagrindo punktų atžvilgiu gali būti iki 0,40 mm (ribinė paklaida – dviguba).

5. Pagaminus pirmuosius Lietuvoje stambiojo mastelio ortofotografinius žemėlapius, gamybos procese būtina periodiškai tikrinti jų kokybę bei tikslumą atliekant geodezinius matavimus (GPS, elektroniniu tacheometru).

Literatūra

- Pilot project of the urban areas mapping (Urbanizuotų teritorijų kartografavimo pilotinis projektas). Scientific report. Geodetic Institute of VGTU. Vilnius, 2003. 69 p. (in Lithuanian).
- Žalnierukas, A.; Sužiedelytė-Visockienė, J. Aerial photograph geometry of building using photogrammetric mapping (Aerofotonuotraukų geometrija fotogrametriškai kartografuojant pastatus). *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXVIII, No 1. Vilnius: Technika, 2002, p. 15–18 (in Lithuanian).
- Regulation of geodetic engineering investigations for constructions (Statybiniai inžineriniai geodeziniai tyrinėjimai). GKTR 2.08.01.: 2000. National Land Service under the Ministry of Agriculture: Vilnius, 2000. 24 p. (in Lithuanian).
- Instruction for photogrammetry works used for creation of digital maps and plans. (Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов). ГКИНП-02–036–02, ЦНИИГ АнК. Moscow, 2002. 99 p. (in Russian).
- Zakarevičius, A. Coordinate systems of Lithuanian geodetic networks and their relations. (Lietuvos geodezinių

- tinklų koordinacių sistemos ir jų ryšiai). Vilnius: Technika, 1996. 200 p. (in Lithuanian).
6. Kraus, Karl. Photogrammetry. Vol 1. Fundamentals and standard processes. Köln: Dümmler, 2000. 396 p.
 7. Kraus, Karl. Photogrammetry. Vol 2. Advanced methods and applications. Bonn: Dümmler, 1997. 466 p.
 8. Colomina, Ismael; Colomer, Josep Lluís. Digitale photogrammetrische Systeme im Einsatz: Erfahrungen an Institut Cartografic de Catalunya. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 1995 /1, S. 30–41.
 9. Khlebnikova, T. A.; Yurchenko, V. I. On digital photoplans compilation using air imagery for territorial cadastre. *Geodesy and Cartography (Геодезия и картография)*, 2001, No 5, Moscow, p. 23–26 (in Russian).
 10. Ivonin, I. L.; Chuprina, E. P. Use of photogrammetric scanners in map production. *Geodesy and Cartography (Геодезия и картография)*, 2002, No 1, Moscow, p. 19–20 (in Russian).
 11. Schenk, Toni. Digital photogrammetry. Vol 1. USA, Laurelville, OH: Terra science, 1999, 428 p.
 12. Kersten, Thomas; Häring, Silvio. Effiziente automatische digitale Aerotriangulation in der Praxis. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 1997/4, S. 118–28.
 13. Kaczynski, R. Digital aerial triangulation, DEM and orthophoto generation in IGIK. *Geodesy and Cartography (Геодезия и картография)*. Vol XXVI, No 3. Vilnius: Technika, 2000, p. 105–110.
 14. Khlebnikova, T. A.; Luzhbina, E. Y.; Svetlakova, L. M. Digital on–line photo triangulation for creation of digital plans and orthophotoplans using domestic digital photogrammetric stations. *Geodesy and Cartography (Геодезия и картография)*, 2003, No 8, Moscow, p. 19–24 (in Russian).
 15. Myshlyayev, V. A.; Kudinova, N. M. Study of automatic digital terrain model compilation. *Geodesy and Cartography (Геодезия и картография)*, 2001, No 5, Moscow, p. 26–29 (in Russian).
 16. Falkner, Edgar; Morgan, Dennis. Aerial mapping. Methods and application. London, New York, Washington: Levis Publishers, 2002. 190 p.