



ELEKTROMAGNETINIŲ VIRPESIŲ LŪŽIO RODIKLIO ĮTAKA PSEUDOATSTUMŲ TIKSLUMUI ATLIEKANT GPS MATAVIMUS

Jonas Skeivalas

*Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva
El. paštas jonas.skeivalas@vgtu.lt.*

Įteikta 2009 06 09; priimta 2009 09 23

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamas pseudoatstumų matavimo tikslumas, įvertinant virpesių lūžio rodiklio bei virpesių sklaidimo greičio vakuume įtaką. Tai pasireiškia virpesių lūžio rodiklio bei jų sklaidimo greičio klaidų įtaka matuojamų pseudoatstumų klaidoms. Pseudoatstumų tikslumui, atliekant GPS matavimus, daugiausiai įtakos turi virpesių lūžio rodiklio nustatymo tikslumas. Virpesių lūžio rodiklio nustatymo klaidas apibrėžia ribotos atmosferos parametrų reikšmių matavimo tikslumo galimybės bei žymios šių reikšmių fliuktuacijos. Virpesių greičio vakuume nustatymo klaidų įtaka pseudoatstumų klaidoms pasireiškia žymiai mažesne eile (lygiu). Darbe pateikiamos formulės virpesių lūžio rodiklio bei išmatuotų pseudoatstumų tikslumui įvertinti priklausomai nuo žinomo atmosferos parametrų reikšmių tikslumo.

Reikšminiai žodžiai: virpesių lūžio rodiklis, GPS, kovariacija, pseudoatstumai.

1. Įvadas

GPS matavimo rezultatų tikslumui įtakos turi daugelis veiksnių: GPS imtuvų ir palydovų generatorių virpesių dažnių klaidos, signalų interferencija ir atspindžiai, dirbtinių Žemės palydovų (DŽP) geometrija, DŽP eferidžių klaidos, troposfera, jonosfera bei kitų šaltinių klaidos. Didžiausios įtakos GPS matavimų tikslumui turi troposfera ir jonosfera. GPS matavimų technologijoje skirstyti atmosferą į šias dvi dalis priimta pagal jos poveikį GPS signalams. Jonosferos įtaka GPS signalams paprastai yra eliminuojama taikant du arba tris GPS nešlio virpesių dažnius, nes jonosfera radiosignalų sklaidai yra disperguojanti aplinka. Ji apatinis atmosferos sluoksnis – troposfera (maždaug 11 km storio) yra beveik neutrali atmosfera, taigi radijo signalų sklaidai ji nėra disperguojanti aplinka, todėl antrasis nešlio dažnis, atliekant GPS matavimus, netaikomas siekiant eliminuoti troposferos refrakciją. Vykstant praktiniams GPS matavimams troposferos refrakcija yra eliminuojama modeliuojant. Tam reikalui taikomi įvairūs netiesiniai modeliai: H. Hopfield, H. Berg, Saastamoinen, Essen ir Froome, Hartl-Rahne-moon, K. Chao (Leick 1995; Hofman-Wellenhof *et al.* 2001; Skeivalas 2007, 2008).

Matuojant pseudoatstumus pagrindiniu klaidų šaltiniu galima laikyti troposferos refrakciją, kuri pasireiškia elektromagnetinių virpesių greičio kaita bei virpesių trajektorijos kreiviniu. Virpesių greičio kaitą atmosferoje nusako jų lūžio rodiklio kaita.

Tai priklauso nuo troposferos turbulencijos, kai, kintant pagrindiniams troposferos būklės faktoriams – oro slėgiui, temperatūrai, drėgmei, kinta virpesių parametrų reikšmės. Troposferos pagrindinių faktorių įtaka radijo signalų sklaidai įvertinama fizikiniais metodais, atliekant modeliavimą bei taikant matematinės statistikos metodus (Bauer 1994; Skeivalas, Aksamitauskas 2001; Голубев, Дымнов 2008).

2. Teorinės prielaidos

Pseudoatstumams matuoti naudojami kodiniai C/A ir P signalai. Pagrindinė formulė pseudoatstumui $R_i^k(t_i)$ tarp GPS i -ojo imtuvo ir k -ojo palydovo laiko momentu t_i nustatyti yra:

$$R_i^k(t_i) = c\tau_i + c\delta_i(t_i), \quad (1)$$

čia c – virpesių greitis vakuume, τ_i – virpesių sklaidimo laiko intervalas, $\delta_i(t_i)$ – GPS i -ojo imtuvo laikrodžio pataisa laiko momentu t_i . Ši pataisa nustatoma pagal lygčių sistemos, sudarytos priimant signalus iš keleto palydovų keletu laiko momentų, sprendinį.

Pagal formulę (1) apskaičiuotas pseudoatstumus nesutampa su geometrinu atstumu dėl to, kad realusis virpesių greitis atmosferoje v nesutampa su greičiu vakuume c , ir dėl tam tikros imtuvo laikrodžio klaidos.

Analizuosime virpesių lūžio rodiklio įtaką virpesių greičio troposferoje pokyčiui bei apskaičiuoto virpesių lūžio rodiklio tikslumo priklausomybę nuo išmatuotų troposferos parametrų tikslumo. Taigi realiojo virpesių greičio troposferoje nustatymo tikslumas priklauso nuo virpesių lūžio rodiklio nustatyto tikslumo.

Nagrinėsime pseudoatstumo, nustatomo pagal formulę (1), pirmąją dedamąją geometrinio atstumo $S_i^k(t_i)$ pavidalu

$$S_i^k(t_i) = \frac{c\tau}{n} = v\tau, \quad (2)$$

čia v – virpesių greitis troposferoje, n – virpesių lūžio atmosferoje rodiklis laiko momentu t . Teoriniuose ir praktiniuose tyrinėjimuose tikslingesnė išraiška taikant virpesių lūžio indeksą N , kuri su lūžio rodikliu n sieja lygybė

$$n = 1 + N10^{-6}. \quad (3)$$

Lūžio indekso N priklausomybė nuo troposferos parametrų išreiškiama Froome ir Essen formule (Skeivalas 2004; Дымнов 2008; Вшивкова 2005):

$$N = a\frac{P}{T} + b\frac{e}{T} + c\frac{e}{T^2}, \quad (4)$$

čia a , b , c – dispersiniai koeficientai, kurių empirinės reikšmės pateiktos lentelėje; P – atmosferos slėgis, mmHg arba mbar, T – atmosferos temperatūra, K, e – atmosferos drėgnumas, mmHg arba mbar. Atmosferos parametrų reikšmės nustatomos GPS imtuvo matavimo taške vidutiniu tikslumu: $\sigma_p \approx 0,1$ mmHg, $\sigma_T \approx 0,1$ K, $\sigma_e \approx 0,01$ mmHg.

Dispersinių koeficientų reikšmės

The values of disperse coefficients

Koeficientai	P ir e , mmHg	P ir e , mbar
a	103,49	77,64
b	-17,23	-12,92
c	$4,96 \cdot 10^5$	$3,72 \cdot 10^5$

Įvertinsime geometrinio atstumo $S_i^k(t)$, gaunamo pagal formulę (2), dispersijos išraišką priklausomai nuo atsitiktinių kintamųjų c , τ ir n dispersijų. Pagal matematinės statistikos dėsnius galime rašyti:

$$\sigma_S^2 = \left(\frac{\partial S}{\partial c}\right)_0^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \tau}\right)_0^2 \sigma_\tau^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_0^2 \sigma_n^2 + 2\left(\frac{\partial S}{\partial \tau}\right)_0 \left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_0 K(\tau, n),$$

čia σ_S , ..., σ_n – standartiniai nuokrypiai, $K(\tau, n)$ – kovariacija tarp atsitiktinių dydžių τ ir n .

Toliau gauname

$$\sigma_S^2 = \left(\frac{\tau}{n}\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{c}{n}\right)^2 \sigma_\tau^2 + \left(\frac{c\tau}{n^2}\right)^2 \sigma_n^2 + 2\left(\frac{c}{n}\right)\left(\frac{c\tau}{n^2}\right) K(\tau, n). \quad (5)$$

Panaudodami išraišką $\tau = (S/c)n$ apskaičiuojame kovariaciją $K(\tau, n)$:

$$K(\tau, n) = M(\delta\tau \cdot \delta n) = M\left(\frac{S}{c}\delta\tau \cdot \delta n\right) = \frac{S}{c}\sigma_n^2, \quad (6)$$

čia M – vidurkio simbolis, $\delta\tau = \tau - M\tau$, $\delta n = n - Mn$.

Galutiniu pavidalu lygybę (5) rašome:

$$\sigma_S^2 = \left(\frac{S}{c}\right)^2 \sigma_c^2 + 4\left(\frac{S}{n}\right)^2 \sigma_n^2. \quad (7)$$

Pagrindinę atstumo matavimo klaidos dalį sudaro virpesių lūžio rodiklio nustatymo klaida.

Santykiniu pavidalu pastaroji lygybė atrodo taip:

$$\frac{\sigma_S^2}{S^2} = \left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2. \quad (8)$$

Nustatysime virpesių lūžio indekso N ir rodiklio n dispersijų išraiškas priklausomai nuo atmosferos parametrų dispersijų. Pagal lygybę (4)

$$\sigma_N^2 = \left(\frac{\partial N}{\partial T}\right)_0^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial P}\right)_0^2 \sigma_P^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial e}\right)_0^2 \sigma_e^2.$$

Toliau gauname

$$\sigma_N^2 = \left(\frac{aP}{T^2} + \frac{be}{T^2} + \frac{2ce}{T^3}\right)^2 \sigma_T^2 + \frac{a^2}{T^2} \sigma_P^2 + \left(\frac{b}{T} + \frac{c}{T^2}\right)^2 \sigma_e^2. \quad (9)$$

Taikydami vidutines atmosferos parametrų reikšmes $P \approx 760$ mmHg, $T \approx 280$ K, $e \approx 10$ mmHg, pagal formulę (9) apskaičiuojame $\sigma_N = 0,16$.

Iš formulės (3) $\sigma_n = 10^{-6} \sigma_N = 10^{-6} \cdot 0,16$. Atmosferos temperatūrą matuodami $\sigma_T \approx 0,01$ K tikslumu, gauname $\sigma_n = 10^{-6} \cdot 0,016$.

Taikydami formulę (7), esant vidutinėms atmosferos parametrų reikšmėms gauname:

$$\sigma_S = 6,5 \text{ m (kai } \sigma_T = 0,1 \text{ K ir } \sigma_N = 0,16),$$

$$\sigma_S = 0,6 \text{ m (kai } \sigma_T = 0,01 \text{ K ir } \sigma_N = 0,016).$$

Virpesių greitis vakuume žinomas su standartiniu nuokrypiu $\sigma_c \approx 0,3$ m/s, ir jo įtaka pagal formulės (7) pirmąją dedamąją yra nedidelė – lygi $\sigma'_S = 0,007$ m (dėl greičio vakuume c klaidos įtakos).

Taigi pagrindinė klaidos dalis redukuojant pseudoatstumų matavimų rezultatus į geometrinį atstumą atsiranda dėl virpesių lūžio rodiklio troposferoje nustatymo klaidų.

3. Išvados

1. Atliekant GPS matavimus pagrindinis klaidų šaltinis yra Žemės atmosfera, jos dedamosios dalys – troposfera ir jonosfera. Jonosferos įtakai eliminuoti taikomi keletas nešlio dažnių, o troposferos – naudojami atitinkami jos modeliai,

- tačiau visai panaikinti atmosferos įtakos klaidų turimais metodais ir modeliais neįmanoma. Išlieka aktuali tema – atmosferos įtakos, atliekant GPS matavimus, įvertinimas.
2. Ištyrus paaiškėjo, kad radijo virpesių lūžio rodiklio santykinės klaidos įtaka pagal išmatuotus pseudoatstumus apskaičiuotai geometrinio atstumo santykinė klaidai yra du kartus didesnė nei virpesių sklaidimo vakuume santykinės klaidos įtaka.
 3. Didžiausią įtaką radijo virpesių lūžio rodiklio nustatymo klaidai turi troposferos temperatūros nustatymo klaida. Kai temperatūra matuojama standartiniu nuokrypiu $\sigma_T = 0,1\text{K}$, tai apskaičiuoto geometrinio atstumo standartinis nuokrypis $\sigma_S = 6,5\text{ m}$, o esant $\sigma_T = 0,01\text{ K}$, gauname $\sigma_S = 0,6\text{ m}$. Temperatūrą nustatyti $\sigma_T = 0,01\text{ K}$ tikslumu yra nerealu dėl troposferos turbulencijos.

Literatūra

- Bauer, M. 1994. *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. Heidelberg: Wichmann. 274 S.
- Hofmann-Wellenhopf, B.; Lichtenegger, H. and Collins, J. 2001. *Global Positioning System*. Theory and Practice. Wien, New York: Springer-Verlag. 326 p.
- Leick, A. 1995. *GPS Satellite Surveying*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons. 352 p.
- Skeivalas, J. 2004. *Elektroniniai geodeziniai prietaisai*. Vilnius: Technika. 193 p.
- Skeivalas, J. 2007. Koreliacinė analizė jonosferos įtakai GPS matavimams nustatyti [Practice of correlation analysis for determination of ionospheric influence on GPS measurements], *Geodezija ir kartografija* [Geodesy and Cartography] 33(4): 98–101.
- Skeivalas, J. 2008. *GPS tinklų teorija ir praktika* [Theory and practice of GPS networks]. Vilnius: Technika. 288 p.
- Skeivalas, J.; Aksamitauskas, Č. 2001. Matavimo elektroniniais tolimačiais rezultatų koreliacijos analizė [Correlation analysis of measurement results obtained by Electronics range finders], *Geodezija ir kartografija* [Geodesy and Cartography] 27(1): 9–12.
- Вшивкова, О. В. 2005. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы, *Геодезия и аэрофотосъемка* 4: 41–46.
- Голубев, А. Н.; Дымнов, Д. Г. 2008. О возможности аппаратного определения тропосферной поправки без привлечения моделей при спутниковых измерениях, *Геодезия и аэрофотосъемка* 1: 3–7.
- Дымнов, Д. Г. 2008. О высотном разnose приемников при дифференциальном режиме работы глобальных спутниковых систем, *Геодезия и аэрофотосъемка* 3: 63–68.

Jonas SKEIVALAS. Prof., Dr. Habil. at the Department 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 jonas.skeivalas@vgtu.lt.

The author of 3 monographs and more than 150 scientific papers. Participated in a number of international 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).