

LABAI TIKSLAUS LAIKO PERDAVIMO DIDELIAIS ATSTUMAIS METODŲ TYRIMAS

Romas Šimkus

VGTU AGAI Aviacijos prietaisų katedra

El. p. Romassimkus@gmail.com

Santrauka. Vystantis technologijoms yra neatsiejamas įvairiausių prietaisų ir sistemų tobulėjimas. Pasaulyje yra ne tiek jau daug sistemų, skirtų perduoti labai tikslų laiką dideliais atstumais. Labiausiai tam tinka palydovinės sistemos, tokios kaip GPS (globalinė vartotojo vietos nustatymo sistema). Todėl tyrimo metu buvo nagrinėjama ši sistema, jos pagrindiniai veikimo principai, palydovų signalai ir efemeridžių duomenys, galimi paklaidų šaltiniai bei GPS ir UTC laiko skalės ir jų susiejimas.

Reikšminiai žodžiai: GPS, radionavigacija, LORAN-C, palydovas, laikas, efemeridės, almanachas, jonosfera.

1. Įvadas

Labai tikslaus laiko perdavimą dideliais atstumais galima atlikti keliais būdais, tačiau pats tinkamiausias yra panaudojant GPS. Pastarasis metodas apima ne tik labai tikslaus laiko perdavimą, bet ir pakankamai didelį atstumą. GPS palydovai skrieja 20000 km aukštyje virš žemės. Be ilgumos, platumos ir aukščio, visuotinė padėties nustatymo sistema pateikia ir ketvirtąjį matmenį – laiką. Kiekvienas GPS palydovas turi kelis atominis laikrodžius, kurie perduoda labai tikslus laiko duomenis GPS signalams. GPS imtuvai pastaruosius signalus iššifruoja, efektyviai suderindami kiekvieną imtuvą su atominiais laikrodžiais. Tai suteikia vartotojams galimybę nustatyti laiką su ne didesne nei 100×10^{-9} sekundės paklaida (GPS ...2013).

Tikslius laikas yra be galo svarbus daugeliui ekonominių veiklų visame pasaulyje. Telekomunikacijų sistemos, elektros energijos tinklai ir finansų rinkos – visi jie priklauso nuo tikslaus laiko nustatymo duomenų suderinimui ir veiklos efektyvumui. Nemokamas GPS laiko prieinamumas leidžia sutaupyti nemažai išlaidų kompanijoms, kurių veikla priklauso nuo laiko tikslumo bei suteikia pastebimą pažangą darbo efektyvumui.

Vienas būdų, kaip tikslų laiką perduoti dideliais atstumais, yra orlaivio vietos ar bet kurio vartotojo vietos nustatymas, naudojant GPS imtuvus. Šio tyrimo tikslas yra aptarti tikslaus laiko formavimą naudojant GPS ir įsigilinti į sistemos skleidžiamus signalus bei efemeridžių parametrus. Taip pat norima parodyti, kad tikslinga naudoti GPS tarp dideliais atstumais nutolusių taškų, kai reikalingas labai tikslus laiko perdavimas.

2. GPS – globalinė vartotojo vietos nustatymo sistema

GPS iš esmės yra radionavigacinė sistema, kuri leidžia nustatyti vartotojo vietą iš radijo signalų, gautų iš orbitoje besisukančių palydovų.

Fundamentalus skirtumas tarp GPS ir ankstyvesnių radionavigacinių sistemų, tokių kaip LORAN-C (tolimojo veikimo antžeminė radionavigacinė sistema), yra skirtinga signalo sklaidimo geometrija nuo ant žemės įkurtų sių-

tuvų, palyginti su erdvėje pakeltais siųstuvais. Besisukantis palydovinis siųstuvas gali aprūpinti vizavimo linijos skleidimą per didelius pasaulio rajonus. Taip išvengiama neišvengiamo kompromiso dėl mažesnio tikslumo didesniai diapazonui, kas būdinga sistemoms, naudojančioms ant žemės įkurtus siųstuvus. Palydoviniai signalai praeina per jonosferą nuo jos neatsispindėdami, taigi sunkumų su erdvinėmis bangomis ir jų atspindžiais iš dalies išvengta.



1 pav. Bendras GPS palydovų vaizdas orbitoje (Global ...2013)
Fig. 1. The GPS system

GPS turi geresnes navigacines galimybes, palyginti su visomis ankstesnėmis radionavigacinėmis sistemomis (Collinson 2011).

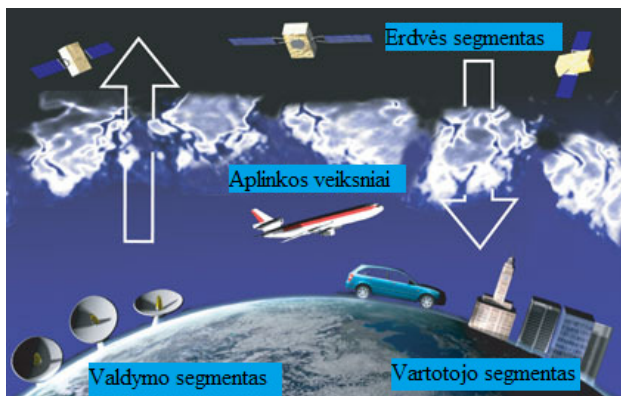
3. Pagrindiniai GPS principai

GPS sistema yra sudaryta iš trijų segmentų, t.y. erdvės, valdymo bei vartotojo segmentų (2 pav.).

Erdvės segmentas sudarytas iš 24 palydovų, esančių keturiose orbitose. 21 palydovas reikalingas globaliai darbo zonai užtikrinti, o 3 palydovai yra atsarginiai. GPS palydovai siunčia signalus dviem skirtingais nešančiais dažniais L1 ir L2.

Valdymo segmentas sudarytas iš pagrindinės stebėjimo stoties Kolorado Springse JAV (Jungtinės Amerikos

Valstijos) ir penkių stebėjimo stočių, išdėstytų visame pasaulyje.



2 pav. GPS sistemos segmentai (Galileo ...2013)
Fig. 2. Segments of GPS system

Vartotojo segmento įranga veikia pasyviuoju režimu ir susideda iš GPS imtuvo, kuriuos, naujausiais technologijų laikais, kiekvienas galime lengvai turėti tiek integruotus mobiliajame telefone, tiek kitose borto įrangose.

Vartotojo aparaturoje (GPS imtuve) priimamas signalas dekoduojamas. Gautas kodas lyginamas su analogišku kodu, kurį generuoja pats GPS imtuvas. Tai leidžia nustatyti signalo sklaidimo iš palydovo trukmę ir taip apskaičiuoti pseudoatstumą, be to, iššifruojama efemeridžių ir tarnybinė informacija.

Pagrindinis vartotojo vietos nustatymo principas yra trijų koordinatčių, bei vartotojo laiko pataisos suradimas GPS sistema. Gavęs signalus iš keturių palydovų, imtuvas ieško atitinkamų sferų susikirtimo taško. Jeigu tokio taško nėra, imtuvo procesorius pradeda nuosekliu priartėjimu koreguoti savo laikrodį iki tol, kol nepasieks visų sferų susikirtimo viename taške. Palydovų perduodami orbitinės padėties (efemeridžių ir laiko) duomenys žemės atžvigių yra labai tikslūs.

Kaip buvo minėta, kiekvienas palydovas perduoda signalus L1 ir L2, moduluojamus pseudoatsitiktiniu C/A (angl. – *Coarse Acquisition*; grubus kodas) ir P (angl. *Protected arba Precision Code*; sankcionuoto priėjimo kodas) kodais bei navigacines žinutes – bitais.

Formuojant šiuos signalus nešančiųjų dažnių virpesių fazėmis yra manipuluojama minėtų kodų psiaudoatsitiktinėmis sekomis, o navigacinės žinutės – bitų reikšmėmis. L1 dažnis moduluojamas dviem kodais: C/A kodu (dar vadinamas laisvo priėjimo kodu) ir P kodu, o dažnis L2 – tik P kodu. Navigacinėje žinutėje, kurioje yra duomenys apie palydovų orbitas, dar vadinamas almanachu, yra informacija apie atmosferos parametrus bei sisteminio laiko ir orbitų korekcijos duomenys– efemeridės. Almanachas apima visų palydovų orbitų parametrus. Jo duomenys nepasižymi dideliu tikslumu ir galioja tik kelis mėnesius. Tuo tarpu efemeridės apima labai tikslūs kiekvieno palydovo orbitų ir laiko korekcijos duomenis, nes tai reikalinga tiksliam jo koordinatčių nustatymui. Kiekvienas GPS palydovas perduoda tik savo efemeridžių duomenis. Ir šie duomenys galioja tik 30 minučių.

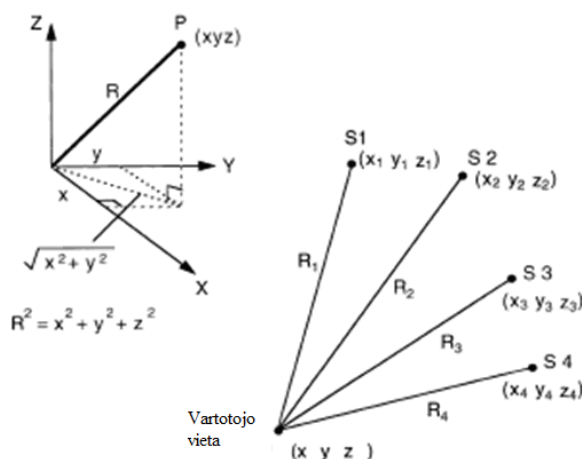
Vartotojo sferinės koordinatės pavienius signalus perduodančio palydovo atžvilgiu gali būti nustatytos

matuojant laiko intervalus, kol palydovo perduotas signalas pasiekia vartotoją. Padauginus laiko intervalus iš šviesos greičio, gauname sferinį nuotolį R .

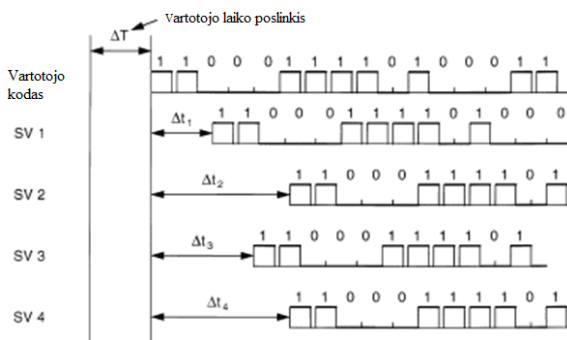
Sistema yra labai priklausoma nuo laiko tikslumo, todėl reikia atominio laikrodžio standarto. Ypatingai didelio laiko matavimo tikslumo poreikis gali būti suvokiamas remiantis faktu, kad 10 ns (10^{-8} sekundžių) laiko paklaida gali sukelti 3 metrų atstumo netikslumą, kadangi šviesos greitis yra 3×10^8 m/s.

Kiekvienas GPS palydovas turi kelis atominius laikrodžius, kurie formuoja palydovų laiko skalę. Tarkime, kad pastarasis laikas yra idealiai tikslus- reikalingi patikslinimai bus trumpai paaiškinti. Esant idealiai informacijai apie laiką vartotojo prietaisuose, trijų palydovų sferinio nuotolio matavimas būtų pakankamas vartotojo vietai nustatyti. Bet GPS imtuvų laiko skalę formuoja mažesnio tikslumo kvarciniai generatoriai, todėl gaunasi laiko poslinkis matuojant palydovo signalo perdavimo laiką.

Matuojant sferinį nuotolį nuo keturių palydovų, kaip parodyta 3 paveiksle, nustatoma vartotojo vieta ir gaunamos keturios lygtys su keturiais nežinomaisiais, trimis vartotojo vietos koordinatėmis ir laiko skalės poslinkiu vartotojo laikrodyje. Tokiu būdu vietos koordinatės, turint labai tikslią laiko informaciją, gali būti nustatytos. 4 paveiksle matyti duomenų perdavimo signalai ir vartotojo laiko poslinkis ΔT ir laiko uždelimai Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 bei Δt_4 , kol palydovo perduoti signalai pasiekia vartotoją.



3 pav. Vartotojo- palydovo geometrija (Collinson 2011)
Fig. 3. User-satellite geometry



4 pav. GPS palydovų signalai su idealiais palydovų laikrodžiais (Collinson 2011)
Fig. 4. GPS satellite waveforms with perfect satellite clocks

Keturi pseudo nuotoliai R_{1p} , R_{2p} , R_{3p} , R_{4p} iki keturių palydovų S1, S2, S3, S4 gali būti nustatyti.

$$\begin{aligned} R_{1p} &= c\Delta t_1; \\ R_{2p} &= c\Delta t_2; \\ R_{3p} &= c\Delta t_3; \\ R_{4p} &= c\Delta t_4. \end{aligned} \quad (1)$$

Tarkime, vartotojo laiko skalės poslinkiai yra lygūs ΔT . Tada šio poslinkio duodama atstumo paklaida bus:

$$T = c\Delta T; \quad (2)$$

Iš bendrų 3D koordinačių geometrijos:

$$\begin{aligned} R_1 &= [(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2]^{1/2} = R_{1p} - T; \quad (3) \\ R_2 &= [(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2]^{1/2} = R_{2p} - T; \quad (4) \\ R_3 &= [(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2]^{1/2} = R_{3p} - T; \quad (5) \\ R_4 &= [(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2]^{1/2} = R_{4p} - T. \quad (6) \end{aligned}$$

čia R_1, R_2, R_3, R_4 yra tikrieji nuotoliai nuo vartotojo vietos iki keturių palydovų S1, S2, S3, S4 ir palydovų koordinatės – atitinkamai $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3), (X_4, Y_4, Z_4)$.

Šios keturios lygtys su keturiais nežinomaisiais yra išsprendžiamos ir duoda vartotojo vietos koordinates (X, Y, Z) bei vartotojo laiko skalės poslinkį ΔT .

Vis dėlto pirminė prielaida dėl tobulų palydovų laikrodžių nėra pagrįsta ir, iš tikrųjų, laikrodžiai lėtai bei stabiliai išsiderina vienas nuo kito, turint galvoje tikslumą. Dėl to palydovai yra matematiškai sinchronizuojami pagrindinėje stebėjimo stotyje. Šis GPS pagrindinis laikas yra kontroliuojamas ir susietas su UTC (koordinuoti pasaulinio laiko skalė), prižiūrima JAV jūrų observatorijos.

Kiekvieno palydovo laikas yra susietas su GPS laiku matematine išraiška ir vartotojas koreguoja palydovo laiką iki GPS laiko naudodamasis lygtimi

$$t = t_{s/c} - \Delta t_{s/c}; \quad (7)$$

čia t yra GPS laikas sekundėmis, $t_{s/c}$ – efektyvus palydovo laikas signalo perdavimo metu sekundėmis ir $\Delta t_{s/c}$ yra laiko skirtumas tarp pagrindinių palydovo ir GPS laikų.

Laiko skirtumas $\Delta t_{s/c}$ gaunamas iš sekančios lygties

$$\Delta t_{s/c} = a_0 + a_1(t - t_{o/c}) + a_2(t - t_{o/c})^2 + \Delta t_r; \quad (8)$$

kur a_0, a_1 , ir a_2 yra daugianario koeficientai rodantys palydovų laiko skalės poslinki GPS laiko skalės atžvilgiu ir jo kitimą laike, Δt_r yra reliatyvistinis narys, s. Parametras t yra GPS laikas, o $t_{o/c}$ yra epocha, kuriai daugianario koeficientai yra įvertinami. Daugianario koeficientai a_0, a_1, a_2 yra įvertinami valdymo segmente kiekvieno palydovo laikrodžiui ir periodiškai jam perduodami.

Šie koeficientai yra perduodami su palydovų signalais priimamais vartotojų. Laikrodžio patikslinimus keturiems palydovams pažymėkime τ_1, τ_2, τ_3 , ir τ_4 .

Sferiniai nuotoliai R_1, R_2, R_3 ir R_4 yra:

$$R_i = c(\Delta t_i + \Delta T - \tau_i);$$

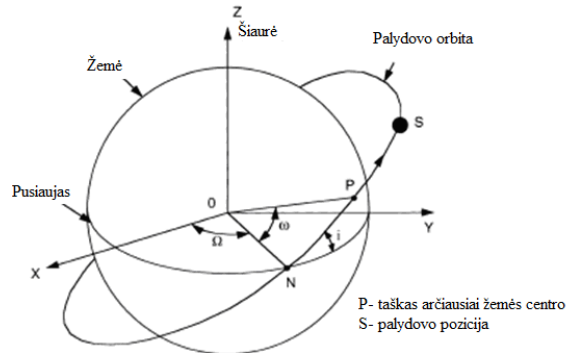
$$\begin{aligned} R_2 &= c(\Delta t_2 + \Delta T - \tau_2); \\ R_3 &= c(\Delta t_3 + \Delta T - \tau_3); \\ R_4 &= c(\Delta t_4 + \Delta T - \tau_4). \end{aligned} \quad (9)$$

Visi palydovų laikrodžiai yra matematiškai sinchronizuojami iki pagrindinio GPS laiko pagal aptartuosius palydovų laikrodžių patikslinimo parametrus. Sinchronizuojant, vis dėlto, paklaidos augs, jei daugianariai koeficientai a_0, a_1 ir a_2 nebus periodiškai atnaujinami.

Vartotojo navigacijai reikia efemeridžių parametrų, t.y., momentinių GPS palydovų vietos duomenų, kurie naudojami nuotolio nustatymui. Taip pat reikalingi laikrodžio parametrai tam, kad būtų galima apskaičiuoti vartotojo vietą. Efemeridžių parametrus apibrėžiantys palydovo orbitinės vietos duomenis sudaro 16 parametrų. Pav. 5 vaizduoja palydovo-žemės geometriją ir orbitos parametrų apibrėžimą. Kontrolės segmentas apdoroja sekimo duomenis, gautus iš pagrindinių stočių, sugeneruotus orbitinius įverčius GPS palydovams. Numatomi palydovo pozicijos koordinačių įverčiai gaunami integruojant GPS palydovų judėjimo lygtis.

Abeji laikrodžio bei efemeridžių parametrai yra perduodami vartotojui 50 bitų per sekundę tempu, moduliuojant tiek C/A, tiek P kodu navigacinius signalus.

Be palydovo bei laikrodžio parametrų, kiekvienas palydovas perduoda visų palydovų almanacho duomenis vartotojui. Taip siekiama palengvinti keturių palydovų parinkimą mažiausiai vadinamojo geometrinio faktoriaus (GDOP) reikšmei gauti.



5 pav. Palydovo-Žemės geometrija. Efemeridžių parametrų apibrėžimas (Collinson 2011)

Fig. 5. Satellite-Earth geometry. Ephemeris parameter definition

Optimali geometrija gaunama, kai vienas palydovas yra vartotojui virš galvos (vartotojo zenite) ir mažiausiai kiti trys palydovai yra tolygiai išsidėstę ties vartotojo horizontu. Geometrinio faktoriaus reikšmė būtų didelė, jei palydovai atsidurtų greta taip, kad jų matomumo laukai būtų lygiagretūs. Taip pat yra perduodami jonosferos duomenys vartotojui, naudojančiam vieno dažnio imtuvą ir konvertavimo parametrus iš GPS laiko į UTC laiko skalę (Collinson 2011).

4. GPS laiko skalės susiejimas su UTC laiko skale

JAV jūrų observatorija (USNO) kontroliuoja ir seka laiko skalę, taip pat užtikrina stabilią koordinuoto laiko skalę GPS sistemai. Šias funkcijas USNO vykdo preciziniu ir

standartiniu režimais. GPS laiko skalė yra atominio laiko skalė. Kompozicinį laikrodį sudaro visi atominiai laikrodžiai, esantys palydovuose ir kontrolės segmente. Iki 1990 metų birželio mėnesio GPS laiko skalė buvo formuojama vienu iš etalonų, esančių kurioje nors kontrolės stotyje. GPS laiko skalė prasidėjo 1980 m. sausio 6 d. vidurnaktį UT1 laiku. GPS laiko skalės vienetas yra atominė sekundė. Papildomosios sekundės, kurios įvedamos atominei UTC laiko skalei, GPS laiko skalei nėra įvedamos. Todėl:

$$T_{GPS} = T_{UTC} + n, s, \quad (10)$$

čia n yra UTC ir GPS laiko skalių skirtumas sekundėmis.

Savo ruožtu GPS sisteminis laikas yra susietas su UTC laiku. Pagal GPS sistemos precizinio režimo užtikrinimo reikalavimus, GPS laiko skalės susiejimo su UTC laiko skale paklaida negali būti didesnė kaip $1 \mu s$.

Nauja GPS savaitė prasideda pasauliniu laiku vidurnaktį iš šeštadienio į sekmadienį. GPS savaitės laikas nuo savaitės pradžios išreiškiamas sekundėmis, todėl jis gali keistis nuo 0 iki 604 800 s:

$$t_{UTC} = t_{GPS} + A_0 + A_1(t_e - t_p), \quad (11)$$

čia t_e yra efemeridžių laikas, t_p – palydovo laikas. Efemeridės yra apskaičiuojamos ir perduodamos prieš kelias valandas, kad palydovas pasiektų tą tašką, kuriame jos pradeda galioti. A_0 – GPS sisteminės laiko skalės postūmis UTC laiko skalės atžvilgiu, o A_1 – A_0 išvestinė pagal laiką. UTC(USNO) su pasauline koordinuotojo laiko skale yra susieta ~10 ns tikslumu.

$$A_1 = \frac{dA_0}{dt} \quad (12)$$

Palydovo laiko skalės pataisa apskaičiuojama tokiu būdu:

$$\delta_{tp} = a_0 + a_1(t_p - t_e) + a_2(t_p - t_e)^2 \quad (13)$$

čia a_0 yra palydovo laiko skalės postūmis GPS laiko skalės atžvilgiu t_e epochai:

$$a_1 - \text{postūmio } a_0 \text{ kitimo tempas: } a_1 = \frac{da_0}{dt};$$

$$a_2 - \text{postūmio } a_0 \text{ kitimo pagreitis. } a_2 = \frac{d^2a_0}{dt^2}.$$

Parametrai A_0 , A_1 , a_0 , a_1 , a_2 perduodami navigaciniame pranešime.

Tuo būdu GPS sistema sudaro sąlygas labai tiksliai išmatuoti laiką ir susieti jį su UTC (Klepczynski 1983).

5. Išvados

GPS yra radionavigacinė sistema, kurią naudodamas vartotojas gauna vietą iš radijo signalų, gautų iš orbitoje besisukančių palydovų.

Pagrindinis padėties nustatymo principas naudojant GPS sistemą, yra išmatuoti vartotojo sferinį nuotolį nuo bent keturių geometriškai geriausiai tinkamų palydovų.

Kiekvienas palydovas perduoda signalus L1 ir L2, moduluojamus pseudoatsitiktiniais C/A ir P kodais bei navigacines žinutes – bitais.

Visi palydovų laikrodžiai yra matematiškai sinchronizuojami iki pagrindinio GPS laiko pagal pastarųjų laikrodžių patikslinimo parametrus. Sinchronizuojant vis dėlto, paklaidos augs, jei daugianario koeficientai a_0 , a_1 ir a_2 nebus periodiškai atnaujinami.

Jonosferos duomenys vieno dažnio imtuvą naudojančiam vartotojui ir konvertavimo parametrai iš GPS laiko į UTC taip pat siunčiami ir saugomi GPS nešančiuosiuose dažniuose.

Kadangi GPS darbo zona yra globali, tai gaunamą labai tikslų laiką galima naudoti tarp pakankamai nutolusių žemės taškų ir dideliu tikslumu jį susieti su UTC laiku.

Literatūra

- GPS Timing [interaktyvus] [žiūrėta 2013 m. balandžio 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gps.gov/applications/timing/>
- Global Positioning System Satellites [interaktyvus] [žiūrėta 2013 m. balandžio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://technicalhut.blogspot.com/2011/09/global-positioning-system-satellites.html>
- Galileo System Simulation Facility [interaktyvus] [žiūrėta 2013 m. balandžio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gsssf.info/GSSF%20subpage%20GSSF%20models.htm>
- Collinson, R. P. G. 2011. *Introduction to Avionics Systems*. 3rd ed.
- Klepczynski, W. J. 1983. *Modern Navigation and their Relation to Timekeeping*.

ANALYSIS OF METHODS FOR TRANSMISSION OF PRECISE TIME ACROSS LONG DISTANCES

R. Šimkus

Summary

With the development of technology is an integral variety of devices and systems development. The world is not to supply for many systems for the transmission of the precise time across long distances. The main way in which this can be done is to use satellite systems such as GPS (Global Positioning System). We will have to look into this system basic principles, operation of satellite signals and ephemerides data, possible sources of errors and the GPS and UTC time scales. All this aspects will be dealt in this article.

Keywords: GPS, radionavigation, LORAN-C, satellite, timing, ephemeris, almanac, ionosphere.