

**VENTSPILS AUGSTSKOLA  
INFORMĀCIJAS TEHNOLOĢIJU FAKULTĀTE**

**BAKALaura DARBS**

**GPS IZMANTOŠANA TRANSPORTA ORGANIZĀCIJĀ**

Autors

Ventspils Augstskolas  
Informācijas tehnoloģiju fakultātes  
bakalaura studiju programmas  
„Datorzinātnes”  
3. kursa studente  
Katrīna Zvaigzne  
Matr.nr. 2011020289

---

(paraksts)

Fakultātes dekāns

asoc.prof., Dr. math. Gaļina Hilķeviča

---

(paraksts)

Zinātniskais vadītājs

asoc.prof., Dr. hab. phys. Juris Žagars

---

(paraksts)

Recenzents

---

(paraksts)

Ventspils  
2014

## SATURS

Lpp

Saīsinājumu un nosacīto apzīmējumu saraksts.....	3
1. GPS TEHNOLOĢIJA UN GNSS.....	4
1.1. GPS rašanās un vēsture.....	4
1.1.1. Kosmiskais un tehniskais apskats.....	4
1.1.2. Lietotāju apskats.....	5
1.2. Sistēmu apskats.....	7
1.2.1. Pozicionēšanas metode.....	8
1.2.2. GPS satelītu sistēma.....	9
1.2.3. GPS satelītu signāli.....	10
1.2.4. Pseidoattālumu mērīšana.....	11
1.2.5. Pozicionēšanas matemātiskie modeļi.....	12
Izmantotās literatūras un avotu saraksts.....	15

## **Saīsinājumu un nosacīto apzīmējumu saraksts**

NNSS - Navy Navigation Satellite System

GPS - Global Positioning System

NAVSTAR - NAVigation System with Timing And Ranging

SA - Selective Availability

AS- Anti Spoofing

VLBI - Very Long Base Interferometry

GNSS – Global Navigation Satellite System

UT – Universal Time

GKS – Gaisa kara spēki

CSOC - Consolidated Space Operation Center

PRN – pseudo random noise

BPSK – bifāzu modulācija

PAL – Phase Alternating Line

# 1. GPS TEHNOLOĢIJA UN GNSS

## 1.1 GPS rašanās un vēsture.

### 1.1.1 Kosmiskais un tehniskais apskats.

Lai nodrošinātu ASV Jūras kara spēku navigāciju, 20. gadsimta septiņdesmito gadu sākumā sākās satelītnavigāciju sistēmu izveide. It īpaši tas bija nozīmīgi atomzemūdeņu flotei, kam ilgstoši nācās atrasties zem ūdens un kuras navigācijai bija jābūt īpaši precīzai, jo vajadzēja nodrošināt augstu precizitāti izmantojot kodolieročus. Šo atrašanās vietu arī nevarēja noteikt atomzemūdenei uznirstot, jo tad iespējamam tuvējam pretiniekam būtu zināma tās atrašanās vieta. Sešdesmitajos gados jau eksistēja vairākas radionavigācijas sistēmas, bet tās izmantoja raidītājus, kas atradās uz Zemes un izmantoja radiodiapozona vidējos un garos viļņus, arī to viļņa garums bija ierobežots, jo, lai uztvertu šādus radioviļņus vajadzēja izmantot samērā lielas antenas. Atrodoties gaisā, piemēram, aviācijā, situācija bija nedaudz labāka, jo gaisā radioviļņa signāls bija spēcīgāks un tā uztveršanai nebija nepieciešamas tik lielas antenas. Zemes sfēriskais izliekums ierobežoja mikroviļņu izmantošanu, jo mikroviļņu virziens ir taisns un tie neliemas. Antenu izmērs arī bija viens no noteicošajiem faktoriem, lai esošās sistēmas neizmantotu zemūdeņu atrašanās vietas noteikšanai, kā arī tās darbojās lokāli, nevis globāli. Viena no tā laika pazīstamākajām radionavigācijas sistēmām LORAN-C darbojās tikai Ziemeļatlantijas reģionā, jo raidošās antenas bija izvietotas Kanādas un ASV piekrastē, gar Grenlandi, Eiropas piekraste un vēl dažos atsevišķos reģionos.

Radionavigācijas sistēmu daudzie trūkumi, kā piemēram, samērā lielās antenas, ierobežotie viļņu garumi un sistēmu lokālās izmantošanas iespējas bija arī galvenie iemesli, kāpēc 20. gadsimta septiņdesmito gadu sākumā radās pirmā globālās navigācijas satelītsistēma TRANSIT, saukta arī par NNSS. Tā sastāvēja no 5 līdz 7 satelītiem, kas rinvoja pa rinķveida orbītām 1100 kilometrus virs Zemes virsmas. Tā kā satelītus vēl neprata aprīkot ar atompulksteņiem, kas būtu ekspluatācijā droši, relatīvi lēti un pietiekami droši, lai veiktu navigācijas mērījumus izmantoja Doplera efektu nevis pseidoattālumu mērījumus. Lai arī TRANSIT navigācijas sistēma sastāvēja no neliela skaita satelītiem un tādēļ tā nespēja nodrošināt nepārtrauktu pozicionēšanu, sistēmu jau uzskatīja par globālu. Atkarībā no pozicionēšanai pieejamo satelītu konstelācijas navigācijas precizitāte bija ļoti mainīga. Meklējot iespēju, kā nodrošināt nepārtrauktu pozicionēšanu un analizējot orbitālo situāciju, tika modelēts minimālais satelītu skaits konstelācijās, kas visur uz zemeslodes nodrošina vismaz četrus satelītus virs almukantarata  $h = 15^\circ$ . Almukantarats ir jebkurš iedomājams

debess sfēras mazais riņķis, kas atrodas paralēli horizontam. [1] Lai arī aprēķini norādīja, ka to iespējams paveikt izmantojot 21 satelītu riņķveida orbītās ar aprināšanas periodu  $P = 12\text{ h}$  un inklināciju  $i = 55^\circ$ , tomēr, pamatojoties uz to, ka šādas konstelācijas izrādījās ar zemu drošību, ja kāds no satelītiem nefunkcionē normāli un grūti sinhronizējamas, konstelācijas ar 24 satelītiem ar iepriekšminētajiem orbītu parametriem tika atzītas par uzticamākām un stabilākām.

1973. gadā tika radīts vēlākais GPS. Tolaik ASV Aizsardzības departaments (Department of Defence) uz TRANSIT sistēmas pieredzes bāzes pieņem lēmumu veidot jaunu, globālu satelītnavigācijas sistēmu NAVSTAR. NAVSTAR ļoti būtiski atšķīrās ar to, ka šīs sistēmas satelītus paredzēja aprīkot ar ļoti precīziem atompulksteņiem, kas nodrošinātu vienvirziena attāluma (pseidoattāluma) mērīšanas principu. Uz satelītiem Block-2, kas veidoja pirmo GPS kosmiskā segmenta satelītu pamatkonstelāciju, atradās divi cēzija un divi rubīdija frekvenču standarti – atompulksteņi. Šo atompulksteņu frekvenču stabilitāte, ko aprēķina pēc formulas 1.1. bija  $10^{-13}$ . Vēlākajos satelītos Block-2R jau tika izmantoti ūdeņraža frekvenču standarti – atompulksteņi, kuru frekvenču stabilitāte bija vēl par 1-2 kārtām augstāka.

Tā kā NAVSTAR bija militāra sistēma, lai ierobežotu neautorizētas lietošanas precizitāti un mazinātu sistēmas slāpēšanas iespējas, sistēmā tika iestrādāti divi aizsardzības mehānismi – SA un AS.

SA izpaužas kā atbalsta frekvences iesvārstīšana atbilstoši izstrādātam algoritmam, kas noved pie degradētas signālu navigācijas informācijas precizitātes, ja vien šīs frekvences svārstības uztvērējā netiek kompensētas.

AS izpaužas kā slepena un ļoti sarežģīta militāra koda izmantošana kā rezultātā tiek izslēgta iespēja raidīt māņu signālus no potenciālo pretinieku satelītiem.

Izmantojot šos aizsargmehānismus Kuveitā Līča kara laikā, šie aizsargmehānismi pierādīja to neefektivitāti.

### **1.1.2 Lietotāju apskats.**

Lai arī sākumā NAVSTAR tehnoloģiju izmantoja tikai militārām vajadzībām (ASV armijas, jūras un gaisa kara spēku navigācijas vajadzībām), attīstoties interferometriskās mērīšanas tehnoloģijām, tika secināts, ka šādas tehnoloģijas arī ir izmantojamas navigācijā. Interferometriskās mērīšanas tehnoloģijas ir visas mērīšanas tehnoloģijas, kas mērīšanā izmanto iekārtas, kas mērījumus veic izmantojot interferenci. Interference ir fizikāla parādība, kas rodas divu vai vairāku koherentu viļņu (ar vienādām vai dažādām frekvencēm) savstarpējas pārklāšanās un mijiedarbības procesos.[1] Interferometrisko mērīšanas

tehnoloģiju pielietošanai nav jāizmanto kods, kā tas bija izmantojot militārās navigācijas metodes, un šīs tehnoloģijas salīdzinoši ar militārās navigācijas metodēm ir par 2-3 kārtām precīzākas, bet arī sarežģītākas. Pamatojoties uz to 1964. gadā I. Smith patentē interferometriskās navigācijas ideju. Pēc tam 1970. gadā to attīsta un patentē R. Easton. Būtisks pagrieziens ir 1972. gadā Chuck Counselman no Masačūsetsas Tehnoloģiskā Institūta (MIT) veiktā kosmisko kuģu “Apollo-16” un “Apollo-17” Mēness stacionāro un pārvietojamo moduļu atsekošana, izmantojot interferometriskās navigācijas metodes, kas bija aizgūtas no VLBI tehnoloģijām. Izmantojot šobrīd zināmo informāciju par GPS un GNSS, 1972. gadā Chuck Counselman veiktais darbs patiesībā ir balstīts uz fāzu pozicionēšanas metodes idejām. Vēlāk no 1978. gada līdz 1979. gadam Chuck Counselman un citi publicē aptuveni visas galvenās interferometriskās jeb fāzu pozicionēšanas idejas un metodes.

Interferometrisko jeb fāzu pozicionēšanas ideju attīstība nebija vienīgais iemesls, kādēļ GPS sistēma jeb NAVSTAR kļuva slavena. Tas saistāms arī ar to, ka šī sistēma ne tikai pilnībā attaisno uz to liktās cerības, bet krietni pārspēj cerētos precizitātes un citus veikspējas kritērijus, atšķirīgi no visbiežāk pieredzētās situācijas, kad šādas sarežģītas un rūpīgi izstrādātas sistēmas neattaisno uz tām liktās cerības, kad sistēma jau ir realizēta. Papildus NAVSTAR bija īpaša ar to, ka pozitīvus sasniegumus sasniedza jau vien tās eksperimentālās konstelācijas satelīts Block-1, bet, ka sistēmas pozicionēšanas reālo precizitāti vēl iespējams uzlabot tūkstoškārt. Fāzu pozicionēšanas ideju, algoritmu un metožu pielietošana būtiski ļāva NAVSTAR militārajai globālajai navigācijas sistēmai uzlabot tās turpmāko nākotni.

Pirmie reālu ieguvumu no globālās navigācijas sistēmas, ja tā spētu nodrošināt pozicionēšanas precizitāti līdz decimetram vai centimetram, saskatīja ASV ģeodēzisti un pasaules ģeodēzistu savienība. Viņi saskatīja lielu apvērsumu savā profesionālajā darbībā, ja būtu iespēja izmantot šo satelītsistēmu. Lai arī GPS kosmiskā daļa vēl nebija pilnībā izstrādāta, pārstāvji no ASV ģeodēzistu organizācijām vērsās ar lūgumu pie ASV varas iestādēm, un pat pie ASV prezidenta, izmantot GPS satelītu signālus ģeodēzisku darbu veikšanai, jo precīzās interferometriskās navigācijas metodes pielietotas GPS satelītu signāliem izteikti uzlabotu produktivitāti ģeodēziskajos mērījumos un homogenizācijas jomā. Homogenizācija ir visas tās metodes un procesi sistēmas viendabīguma radīšanai.[1] Vēlāk pēc šī ASV ģeodēzijas organizāciju lūguma, kad izrādījās, ka GPS sistēma būtiski uzlabo situāciju ne tikai militārajā sfērā, bet arī citās, tika pieņemts lēmums tolaik militāro un īpaši slepeno GPS sistēmu padarīt pieejamu arī civilai izmantošanai ne tikai globāli visā

pasaulē, bet arī pilnībā bezmaksas, lai arī tās kosmiskā daļa joprojām nebija līdz galam pilnībā izstrādāta.

Sakarā ar GPS sistēmas ienākšanu ikdienā, ģeodēzijas, astronomijas un ģeofizikas speciālisti visā pasaulē, izmantojot interferometriskās navigācijas jeb fāzu pozicionēšanas idejas, radīja dažādas metodes GPS mērījumu apstrādei un izmantošanai. To pamatā pārsvarā bija divu vai vairāku uztvērēju vienlaicīga izmantošana, jo bija vieglāk nomērīt pseidoattālumu differences  $\Delta R$  nekā pašus pseidoattālumus  $R$ . Lai izstrādātu šīs metodes, tika attīstītas statiskās, kinemātiskās, pseidokinemātiskās un citas metodes. Pateicoties tam, ka ģeodēzisti vēlējās padarīt savus risinājumus līdz arvien augstākai precizitātei, neskaitot jau tā ļoti precīzos satelītu signālus, izmantoja arī citus signālus un tika izveidotas principiāli jaunas metodes.

Pārsteidzošais uzplaukums GPS satelītu signālu apstrādes metožu izstrādē un tām pastiprināti pievērstā uzmanība rezultējās GPS pozicionēšanās izmantošanas iespēju paplašināšanos ārpus militārās jomas, piemēram tādās saimnieciskās dzīves sfērās, kā ģeodēzija, aviācija, loģistika un citās. 20. gadsimta astoņdesmitajos gados tika uzsākta arī vairāku GPS uztvērēju ražošana. Ar to nodarbojās tādas kompānijas, kā Ashtech, Trimble, AOA, Leica, Magelan un citas. Papildus GPS uztvērējiem attīstījās arī programmatūras izstrāde. 20. gadsimta deviņdesmitajos gados par līderi izvirzījās Bernes Astronomijas Institūts ar programmu kompleksu “Bernes programma”. Jau sākotnēji “Bernes programma” bija nepārspēts līderis ģeodēzijas un ģeofizikas problēmu risināšanā izmantojot GPS mērījumu precīzo apstrādi. Pārsteidzoši ir tas, ka tā joprojām arī mūsdienās nav zaudējusi savu augsto reputāciju.

## 1.2 Sistēmu apskats

Pasaulē šobrīd ir vai atrodas izveides stadijā vairākas lielas globālās navigācijas satelītu sistēmas. Šobrīd izveidotas ir ASV GNSS GPS un Krievijas GNSS GLONASS. Drīz vien šīm GNSS pievienosies Eiropas Savienības GNSS GALILEO, kurai tuvākajā nākotnē sekos arī Ķīnas COMPASS un Indijas GNSS. Bez šīm lielajām GNSS ir eksistējušas un joprojām eksistē arī vairākas mazākas pilnībā izstrādātas satelītnavigācijas sistēmas, kā piemēram, INMARSAT un citas. Šo mazo satelītnavigācijas sistēmu pielietošanas iespējas lai gan ir ierobežotas. Tomēr apskatot visas GNSS nākas secināt, ka to darbības principi ir faktiski vienādi. Katrai GNSS atšķiras tikai neprimāri parametri, kā piemēram, frekvenču diapozoni, modulācijas tipi, signālu skaits un to kombināciju variantu iespējas, kodējumi un citi. Tāpēc, lai nebūtu jāapskata katras GNSS minimālās atšķirības, tālāk apskatīsim GPS

sistēmu, jo šī ir vienīgā pozicionēšanas sistēma, kuras darbības un izmantošanas pieredze ir uzkrāta 20 gadu garumā.

### 1.2.1 Pozicionēšanas metode

Pārfrāzējot oficiālo GPS sistēmas definīciju, kas ir šāda, “GPS is an all-weather, space based navigation system under responsibility of the Department of Defence to satisfy the requirements for the military forces to accurately determine their position, velocity and time in a common reference system, anywhere on or near the Earth on a continuous basis”, jāpiebilst, ka GPS ir pozicionēšanas sistēma, kas balstīta uz satelītu vienvirziena attālumu mērīšanu. Katra satelīta atrašanās telpā ir viegli aprēķināt, jo GPS satelīti pārraida signālus, kurus izmantojot tas izdodas ātri un precīzi. Lai aprēķinātu attālumu no katra no satelītiem līdz GPS uztvērēja antenai, pamatojoties uz to, ka pārraidīto signālu paketes tiek uzmanīgi sinhronizētas ar laiku, un izmērot aizkavēšanās periodu signālu paketēm, šo aizkavēšanās laiku reizina ar gaismas ātrumu  $c$ . GPS uztvērēja antenas atrašanās vietu iespējams noteikt, ģeometriski apskatot trīs sfēru, kuru centri atrodas satelītu atrašanās vietu koordinātēs, bet rādiusi jau iepriekš aprēķināti kā attālumi no katra no satelītiem līdz GPS uztvērēja antenai, krustpunktā.

Šāda ideāla situācija, kad tik viegli iespējams noteikt GPS uztvērēja antenas atrašanās vietu, iespējama tikai tādā gadījumā, ja GPS uztvērējs arī tiek apgādāts ar pulksteni ar ļoti augstu precizitāti, lai būtu pilnvērtīgi iespējams noteikt signālu pakešu aizkavēšanās perioda garumu. Bet tā kā šāda situācija reālajā dzīvē ne vienmēr ir iespējama un GPS uztvērēji tiek nodrošināti ar vienkāršiem kvarca pulksteņiem, tad, lai līdzsvarotu šo neprecizitāti jeb pulksteņa korekciju, lai noteiktu šo korekciju, krustpunkta noteikšanai izmanto nevis vien trīs, bet vismaz četras sfēras, ko iegūst no GPS satelītiem un ar kuriem vienlaicīgi veic mērījumus. Lielākā daļa GPS uztvērēja darbojas izmantojot informāciju no 6-12 GPS satelītiem. Tādējādi, lai iegūtu vismazāko izkliedi ar uztvērēja atrašanās vietas koordinātām, izvēlas tādu pulksteņu korekciju, kas iegūta izmantojot 6-12 sfēru krustpunktu.

Apskatot visu šos faktorus iespējams secināt, ka, lai noteiktu precīzu GPS uztvērēja atrašanās vietu, nepieciešams ņemt vērā trīs ietekmējošus faktoru.

- Izmantoto sfēru centru precizitāte, ko nosaka satelītu koordināšu aprēķinu precizitāte.
- Izmantoto sfēru rādiusu garumu precizitāte, ko, galvenokārt nosaka mērīšanas precizitāte, ko izmanto, lai izmērītu signālu pakešu aizkavēšanās laiku.
- Pašu satelītu sistēmas izkārtojums – konstelācijas ģeometrija, kas ietekmē matemātisko algoritmu precizitāti.



## 1.2.2 GPS satelītu sistēma

Pati GPS satelītu sistēma satur 30-32 satelītus. No šiem satelītiem 24 veido sistēmas funkcionējošo daļu (6 dažādās orbītu plaknēs pa 4 satelītiem), bet atlikušie vai nu ir bojāti, vai atrodas rezervē, gadījumā, ja tiek bojāts kāds no funkcionējošās daļas satelītiem.

GPS satelīti tiek ievadīti riņķveida orbītās ar apriņķošanas periodu  $P \approx 12h$ , kam atbilst GPS satelīta riņķveida orbītas lielā pusass  $a = 20200 \text{ km}$ , un inklināciju  $i = 55^\circ$ . Šāda satelītu sistēma ar šādiem parametriem nodrošina 4-8 vienlaicīgu satelītu, reizēm 12, mērīšanas iespēju virs almukantarata  $h = 15^\circ$  jebkurā brīdī jebkurā vietā uz Zemes. Attiecīgi virs almukantarata  $h = 10^\circ$  nodrošina vienlaicīgi ap 10 satelītu, bet virs  $h = 5^\circ$  ap 12 satelītu. Šāda konstelācija atkārtojas ik pa 12 stundām, kas attiecīgi pret novērotāju no Zemes ir ik pēc 24 stundām ar 4 minūšu laika nobīdi atšķirīgo laika skalu UT (pasaules laiks) un ST(zvaigžņu laiks) dēļ.

Uz katra no GPS satelītiem atrodas 4 atompulksteņi – frekvenču standarti, datori un raidītājs. Katrs satelīts aptuveni sver 1500 kilogramu, bet tā finansiālā vērtība ir gandrīz 50 miljoni ASV dolāru. Katra satelīta plānotais funkcionēšanas laiks ir 10 gadu, bet viena daļa satelītu šo laiku ievērojami pārsniedz. Tabulā 1.1. redzams cik un kādi satelīti kādos laika periodos orbītās tikuši ievadīti.

1.1. tabula

### Orbītā palaistie un plānotie satelīti

Laika periods	Satelītu sērijas nosaukums	Skaits
1978-1985	Block-1	10
1989-1990	Block-2	9
1990-1997	Block-2A	19
1997-2004	Block-2R	12
2005-2009	Block-2R-M	8
2010	Block-2F	(nomaina Block-2R-M satelītus)
2014	Block-3A	plānots

Lai satelīti nedegradētos un ar tiem tiktu nodrošināta visaugstākā pozicionēšanas precizitāte, satelīti no Zemes tiek regulāri kontrolēti un ne retāk kā reizi 8-12 stundās tajos tiek uzlabota informācija, tādējādi tie var teikt, ka tiek daļēji pārprogrammēti ikdienā. Kontrole un informācijas atjaunināšana notiek izmantojot piecas kontrolstacijas uz Zemes – Hawai, Colorado Springs, Ascension Island, Diego Garcia un Kwajailen, kas nepārtraukti uzrauga satelītus. Galvenā kontrolstacija, kas agrāk atradās Vandenbergas gaisa kara spēku

bāzē Kalifornijā, tagad ir pārcelta uz Šriveras, agrākās Falkonas, GKS bāzi Koloradospringsā. Šo kontrolstaciju sauc par CSOC.

### 1.2.3 GPS satelītu signāli

GPS satelītu signāls ir dīvains signāls, kas ir līdzīgs binārajam “baltajam troksnim”, tas ir līdzīgs haotiskai impulsu virknei, ko sauc par PRN vai pseidotroksni. Šis GPS satelītu raidītais signāls ar tā saucamo bifāzu modulācijas (BPSK) palīdzību uzmodulēts divām nesējfrekvencēm L1 un L2 ar šādiem parametriem kā frekvences lielums  $f_{L1} = 1575,42 \text{ MHz}$ , viļņa garumu  $\lambda_{L1} = 0,19 \text{ m}$ ,  $f_{L2} = 1227,6 \text{ MHz}$  un  $\lambda_{L2} = 0,244 \text{ m}$ .

Šādu neparastu un sarežģītu signāla uzbūvi izvēlējas vairākās vairāku praktisku apsvērumu dēļ, kā piemēram:

- izmantojot tik neparastu struktūru, jebkādas nesankcionētas pieejas gadījumā šāds signāls apmulsinātu pētniekus un tie no šiem signāliem nespētu izgūt nekādu informāciju;
- pateicoties pseidotrokšņa jeb Golda koda savdabībai to ir neiespējami apstrādāt ar interferences slāpētājiem, ko iespējams varētu mēģināt pielietot pret GPS sistēmu gadījumā, ja rastos militārs konflikts;
- tikpat piemērotas, cik ir regulāras impulsu ķēdītes aizkavēšanās laiku mērījumiem ir arī PRN impulsu frontes.

Lai izveidotu GPS signāla kodu sākumā izmantoja divus pseidotrokšņu kodus. “Raupjais” kods C/A tika modulēts uz nesējfrekvences L1, bet “smalkais” kods P(Y) tika modulēts gan uz L1, gan uz L2 nesējfrekvencēm. Vēlāko paaudžu GPS satelīti sākot no 2010. gada izmanto trīs nesējfrekvences L1, L2 un L5. Abu pseidotrokšņu kodu modulācija izmantojot nesējfrekvenci L1 notiek ortogonālos fāzu ofsetos – kvadrātūrās. Līdzīgi norisinās krāsu signāla modulācija televīzijas PAL sistēmā. Par spīti tam, ka šis pseidotrokšnis šķiet haotisks un pamatā paredzēts tikai aiztures laika noteikšanai, no kura iespējams izmērīt pseidoattālumus, tas tomēr satur arī informāciju par satelīta atrašanās vietas koordinātām, laika signālus un pat dažādas korekcijas, kā piemēram, par jonosfēras stāvokli, un informāciju, kas satur statusu par satelīta sistēmu funkcionēšanu. Šo informāciju uzklāj virs pseidotrokšņa signāla un tā tiek pārraidīta ļoti lēni – ar takts frekvenci  $50 \text{ Hz}$ . Šo informāciju sauc par navigācijas paketi. Lai šo informāciju izdalītu, katrs GPS uztvērējs satur mikroshēmu, kas attiecīgi ģenerē vai nu visus vai tikai “raupjos” C/A pseidotrokšņu kodus. Lai iegūtu navigācijas paketes signālu, tiek salīdzināts GPS uztvērēja uztvertais signāls ar pseidotrokšņa generatora ģenerēto signālu. Attiecīgi no pirmā signāla tiek atņemts otrais. Navigācijas paketēm arī ir noteikts datu pārraides protokols, kas nosaka, ka katra

pakete satur 5 kadrus, kur katrs no tiem ir 300 bitu garš. Informācija, ko satur navigācijas paketes atkārtojas ik pēc 25 paketēm. Tādēļ nepieciešamas 12,5 minūtes, lai uztvertu pilnu sistēmas informāciju. Lai gan papildus katrs GPS satelīts 4. un 5. kadrā pārraida informāciju par visu GPS sistēmu kopumā.

#### 1.2.4 Pseidoattālumu mērīšana

Kā jau iepriekš uzzinājām katrs GPS uztvērējs spēj atdalīt pseidotrokšņa signālu no navigācijas paketes un attiecīgi no tā iegūt informāciju, lai aprēķinātu satelīta tekošās koordinātes, kas apzīmē sfēru centrus līdz 1 metra precizitātei. Procedūru, kad tiek salīdzināts GPS uztvērēja uztvertais un no navigācijas paketes atdalītais pseidotrokšņa signāls ar uztvērējā iebūvētā PRN ģeneratora signālu, izmantojot kodu korelatoru un tam tiek noteikta nobīde laikā attiecīgi pret otru signālu, sauc par pseidoattāluma mērīšanu. Tā kā abu PRN signālu frontes tiek uzmanīgi sinhronizētas ar laiku, bet ar atšķirīgiem frekvenču standartiem – pārraidītajam pseidotrokšņu signālam izmantojot satelītā atrodošos 4 atompulksteņu frekvenču standartus un GPS uztvērējā ģenerētajam PRN signālam izmantojot kvarca pulksteņus, tad arī nomērītā pseidotrokšņu signālu nobīde tiek veikta izmantojot atšķirīgus standartus un ar atšķirīgu precizitāti. Šādus mērījumus sauc par pseidoattālumiem, jo, kamēr nav noteikta uztvērēja pulksteņa korekcija, tie nav pietiekami precīzi un tos nevar saukt par attālumiem.

Tāpat jāņem vērā vairāki traucējoši faktori, kas var traucēt noteikt ne tikai pareizos attālumus, bet arī pseidoattālumus. Kā piemēram:

- jonosfēras refrakcija, kas rada kļūdas attālumu mērījumos, kas var sasniegt 40-50 metrus;
- troposfēras refrakcija, kas rada kļūdas mērījumos ar kārtu 1-3 metri;
- relatīvistiskie efekti, kas rada kļūdas mērījumos ar kārtu 0,2 metri;
- multirefleksija, kas rada ne vien kļūdas mērījumos lielākas par 10-20 metriem, bet arī var pilnībā šo procesu sabojāt.

Refrakcija ir gaismas stara noliekšanās, tam ejot cauri Zemes atmosfērai, kā cēlonis ir Zemes atmosfēras nehomogenitāte [1]. Lai apkarotu visievērojamāko no mērījumus apgrūtinājošajiem faktoriem – jonosfēras refrakciju, kas ir atkarīga no elektronu vertikālās koncentrācijas jonosfērā, izmanto dažādas metodes, kā piemēram:

- speciālās jonosfēras observatorijās mēra šo elektronu vertikālo koncentrāciju jonosfērā, un pieejamie dati par atsevišķiem reģioniem ir pieejami internetā, piemēram, par Japānu;

- paildzinot mērīšanas procesu, lai iegūtu papildus informāciju par procesiem jonosfēra, mērot GPS mērījumus, iegūst modeļa parametrus, ko izmanto, lai modelētu jonosfēras refrakciju;
- izmantojot navigācijas paketē iekļauto informāciju, jonosfēras refrakciju tuvināti aprēķina;
- izmantojot nesējfrekvences L1 un L2, tas ir realizējot “matemātisko heterodinu” jeb no mērījumiem izrēķinot starpfrekvenci, jonosfēras refrakciju izslēdz, jo starpfrekvencei ir nulles jonosfēras refrakcija.

Pēdējā metode arī vislabākā no visām metodēm, ar kurām cenšas novērst jonosfēras refrakcijas nelabvēlīgo iespaidu, un arī pierāda kādēļ jau sākumā GPS signāls tika pārraidīts pa divām nesējfrekvencēm.

Otrs apgrūtinotais faktors ir multirefleksija, kura ir atkarīga no uztvērējam tuvumā esošām atstarojošām virsmām pret ko atstarojas GPS signāli, un, kas nodrošina signāla vairākkārtēju nonākšanu uztvērējā. Šāda situācija ir vēl bīstamāka un sarežģītāka, jo var pilnībā sabojāt GPS uztvērēja darbību. Lai no šādas situācijas būtu iespējams izvairīties, nepieciešams uztvērēju uzstādīt tālu no atstarojošām virsmām. Vēl viens variants ir antenu ekranēt no apakšas un nedaudz no sāniem. Vēl pēdējā laikā aktuāla kļuvusi polarizācijas filtru lietošana, jo tiešais un atstarotais signāls ir cirkulāri pretēji polarizēti. Tāpat, protams, ir izstrādātas vairākas sarežģītas metodes, kas balstās uz to, ka efekts signāliem ar atšķirīgām nesējfrekvencēm L1 un L2 ir atšķirīgs.

### 1.2.5 Pozicionēšanas matemātiskie modeļi

Lai aprēķinātu sfēru krustpunktus, pēc kuriem GPS uztvērēja procesors noteiktu antenas koordinātes, vispirms no nomērītā pseidotrokšņa signāla nobīdes vienam pret otru izved formulu

$$\overline{\Delta t} = \overline{t_r} - \overline{t_s} = (t_r - \delta_r) - (t_s - \delta_s) = \Delta t + \Delta \delta \quad (1.1.)$$

kur

$$\Delta t = t_r - t_s, \quad (1.2.)$$

$$\Delta \delta = \delta_s - \delta_r \approx -\delta_r, \quad (1.3.)$$

$\overline{\Delta t}$  – nomērītā PRN signāla nobīde vienam pret otru,

$\overline{t_r}$  – uztvērējā reģistrētais PRN signāla uztveršanas moments pēc uztvērēja pulksteņa,

$\overline{t_s}$  – PRN signāla emisijas moments no satelīta antenas pēc satelīta pulksteņa,

$t_r$  – uztvērējā reģistrētais PRN signāla uztveršanas moments pēc absolūtā laika,

$\delta_r$  – uztvērēja pulksteņa korekcija,

$t_s$  - PRN signāla emisijas moments no satelīta antenas pēc absolūtā laika,

$\delta_s$  – satelīta pulksteņa korekcija, ko iespējams uzzināt no informācijas navigācijas paketē.

Pēc tam, izmantojot izvesto formulu (1.1), un pareizinot to ar gaismas izplatīšanās ātrumu iegūstam formulu, kas aprēķina satelīta pseidoattālumu.

$$R = c\overline{\Delta t} = c(\Delta t + \Delta\delta) = c\Delta t + c\Delta\delta = \rho + c\Delta\delta, \quad (1.4.)$$

kur

$\rho = c\Delta t$  – satelīta patiesais attālums no GPS uztvērēja antenas,

$R$  – satelīta pseidoattālums,

$\Delta\delta$  – starpība starp satelīta un uztvērēja pulksteņa korekciju,

$c$  – gaismas (mikroviļņu) izplatīšanās ātrums.

Vienkāršības labad pieņemam, ka mērījumu sistemātiskās kļūdas un citi traucējošie faktori tiek ņemti vērā un ir iekļauti pseidoattālumu aprēķinos. Tā kā formula (1.4) tiek izmantota katram satelītam, tiek pievienots indekss  $j$  tiem parametriem, kas ir atkarīgi no katra konkrētā satelīta, bet patiesais attālums satelītam no GPS uztvērēja antenas atkarībā no laika rakstāms formā

$$\rho_j(t) = \sqrt{(x_j(t) - X)^2 + (y_j(t) - Y)^2 + (z_j(t) - Z)^2} = \rho_j(X, Y, Z), \quad (1.5.)$$

kur

$x_j(t), y_j(t), z_j(t)$  – no laika atkarīgas satelīta koordinātes, kuras iespējams aprēķināt pēc informācijas, kas atrodama navigācijas paketē,

$X, Y, Z$  – nezināmas, konstantas GPS uztvērēja antenas koordinātes.

Pēc formulas (1.5) redzams, ka patiesais attālums no kāda satelīta līdz GPS uztvērēja antenai  $\rho_j$  ir gan no laika, gan no GPS uztvērēja antenas koordinātēm atkarīga funkcija. Ja katram no  $j$  satelītiem atbilstošajā formulā (1.4) ievietojam tam atbilstošo vienādojumu, kas apzīmē patieso attālumu no uztvērēja antenas līdz satelītam, iegūstam šādu vienādojumu sistēmu

$$\begin{cases} \rho_1(X, Y, Z) + c\Delta\delta = R_1 \\ \rho_2(X, Y, Z) + c\Delta\delta = R_2 \\ \vdots \\ \rho_j(X, Y, Z) + c\Delta\delta = R_j \end{cases}, \quad (1.6.)$$

kas satur  $j$  vienādojumus, kur katrs no tiem satur 4 nezināmos – GPS uztvērēja antenas koordinātes  $X, Y, Z$  un laika korekciju  $\Delta\delta$ . Lai aprēķinātu šos četrus nezināmos, nepieciešama vienādojumu sistēma ar vismaz  $j = 4$ , kas nozīmē, ka nepieciešami vismaz 4 satelīti, lai noteiktu uztvērēja antenas atrašanās vietu un laika korekciju. Šādiem vienādojumiem bieži tiek veikta vienādojumu linearizācija, jo vienādojumu sistēma (1.6.) atkarībā pret nezināmajām uztvērēja antenas koordinātēm ir nelineāra. Lai veiktu linearizāciju tiek meklētas korekcijas  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  attiecībā pret tuvinātajām antenas

koordinātēm  $X_0, Y_0, Z_0$ . Šādu pielietoto matemātisko modeli sauc par absolūto kodu pozicionēšanas modeli.[2]

## IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN AVOTU SARAKSTS

1. *Zinātnes un tehnoloģijas vārdnīca*. Proj. vad. Ilze Kačevska, galv. red. Dainuvīte Guļevska, Rīga, Apgāds "Norden AB", 2001. 36., 269., 287., 558.lpp. ISBN 9984-9383-5-2
2. J.Žagars, J.Zvirgzds, J.Kaminskis "Globālās navigācijas satelītu sistēmas (GNSS)", 2014 (izdošanas procesā)