

1 Vēsturiska atkāpe

1.1 Kosmiskais segments

Vēsturiski satelītnavigācijas sistēmu izveide sākās 20.g.s. septiņdesmito gadu sākumā, lai nodrošinātu ASV Jūras kara spēku (JKS) navigāciju. Īpaši tas attiecās uz atomzemūdeņu floti, kurai ilgstoši bija jāatrodas zem ūdens un kuras navigācijas precizitātei bija jābūt augstai, lai nodrošinātu kodolieroču pielietošanas precizitāti. Turklāt šo navigācijas precizitāti bija jānodrošina zemūdenei neuznirstot, lai eventuālajam pretiniekam nebūtu iespējams noteikt tās atrašanās vietu. Sešdesmitajos gados jau eksistēja virkne radionavigācijas sistēmu (piemēram LORAN-C), kuru raidītāji bija izvietoti uz Zemes un, kas lietoja radiodiapazona vidējos un garos viļņus. Šīs sistēmas nebija pārāk precīzas (to precizitāti ierobežoja izmantotais viļņu garums λ) un signālu uztveršanai bija jālieto samērā lielas antenas. Aviācijas pielietojumiem situācija bija nedaudz labāka, jo gaisā signāls bija spēcīgāks un varēja iztikt ar mazākām antenām. Mikroviļņus izmantot nevarēja, jo tie izplatās taisnā virzienā un neliecas apkārt Zemei. Lielu antenu izmantošana nebija pieņemama uz zemūdenēm, turklāt esošās radionavigācijas sistēmas bija lokālas, nevis globālas. LORAN-C sistēma darbojās tikai ziemeļatlantijā, jo raidošās antenas bija izvietotas gar ASV un Kanādas piekrasti, Grenlandē, Eiropas piekrastē un vēl dažos zemeslodes reģionos.

Pirmo globālās navigācijas satelītsistēmu TRANSIT, sauktu arī par NNSS (*Navy Navigation Satellite System*) [?] sāka veidot septiņdesmito gadu sākumā un tā sastāvēja no 5-7 satelītiem 1100 km augstās riņķveida orbītās virs Zemes virsmas. Navigācijas mērījumi tika veikti izmantojot Doplera efektu nevis pseidoattālumu mērījumus, jo satelītus vēl neprata aprīkot ar pietiekami precīziem, relatīvi lētiem un ekspluatācijā drošiem atompulksteņiem. TRANSIT navigācijas sistēma jau bija uzskatāma par globālu, taču nelielā satelītu skaita dēļ tā nenošķināja nepārtrauktu pozicionēšanu. Bez tam navigācijas precizitāte bija stipri mainīga atkarībā no pozicionēšanai pieejamo satelītu konstelācijas. Analizējot orbitālo situāciju un meklējot iespēju nodrošināt nepārtrauktu pozicionēšanu tika modelēts minimālais satelītu skaits konstelācijās, kas visur uz Zemeslodes nodrošina vismaz 4 satelītus virs almukantarāta $h = 15^{\circ}$. Aprēķini rādīja, ka to iespējams realizēt ar 21 satelītu riņķveida orbītās ar inklināciju $i = 55^{\circ}$ un apriņķošanas periodu $P = 12^h$. Taču šādas konstelācijas izrādījās grūti sinhronizējamas un ar zemu t.s. “redundanci”, t.i. drošību, ja kāds no satelītiem nefunkcionē normāli. Par stabilākām un drošākām tika atzītas 24 satelītu konstelācijas ar iepriekš minētajiem orbītu parametriem.

1973.g. ASV Aizsardzības departaments (DoD - *Department of Defence*) pieņem lēmumu uz TRANSIT sistēmas pieredzes bāzes veidot jaunu globālu satelītnavigācijas sistēmu NAVSTAR (*NAVigation System with Timing And Ranging*), ko vēlāk pārdēvēja par GPS (*Global Positioning System*). Šajā sistēmā principāli jauns bija tas, ka satelītus paredzēja aprīkot ar ļoti precīziem

atompulksteņiem, kas ļauj realizēt vienvirziena attālumu (t.s. pseidoattālumu) mērīšanas principu. Tā *Block-2* satelīti (no kuriem izveidoja pirmo GPS kosmiskā segmenta satelītu pamatkonstelāciju) tika apgādāti ar diviem rubīdija (Rb) un diviem cēzija (Cs) frekvenču standartiem (atompulksteņiem), kuru frekvenču stabilitāte bija $\Delta f/f = 10^{-13}$. Nākošās paaudzes *Block-2R* satelītu ekipējumā ietilpa jau ūdeņraža (H) frekvenču standarti, kuru precizitāte bija vēl par 1-2 kārtām augstāka.

Kā jau militārā sistēmā tajā sākotnēji tika iestrādāti divi aizsardzības mehānismi, lai būtiski ierobežotu gan sistēmas slāpēšanas iespējas, gan neautorizētas lietošanas precizitāti. Šie mehānismi bija:

- SA (*Selective Availability*), kas izpaužas kā atbalsta frekvences “šūpošana” atbilstoši noteiktam algoritmam, kā rezultātā tiek degradēta signālu navigācijas informācijas precizitāte, ja uztvērējā šīs frekvences “šūpošana” netiek adekvāti kompensēta.
- AS (*Anti Spoofing*), kas izpaužas slepena un ļoti komplicēta militārā koda izmantošanā, lai, cita starpā, izslēgtu māņu signālu raidīšanas iespēju no eventuālo pretinieku satelītiem.

Pēdējo reizi šie aizsardzības mehānismi reāli tika izmantoti t.s. *Līča kara* laikā Kuveitā (1990.-91.g.), kur tie faktiski pierādīja savu neefektivitāti.

1.2 Lietotāju segments

Sākotnēji NAVSTAR sistēma bija paredzēta tikai militārai lietošanai (t.i. ASV armijas, jūras un gaisa kara spēku navigācijas vajadzībām). Taču paralēli militārās navigācijas idejām attīstījās interferometriskās mērīšanas tehnoloģijas, kuras arī izrādījās izmantojamas navigācijā. Turklāt to īstenošanai nav jāizmanto nekādus kodus (kā militārās navigācijas metodēs) un tās ir par 2-3 kārtām precīzākas par kodu tehnoloģijām, taču arī komplicētākas. Tā 1964.g. *I. Smith* patentē interferometriskās navigācijas ideju. 1970.g. *R. Easton* attīsta to tālāk un arī patentē. 1972.g. *C. Counselman* no Masačūsetas Tehnoloģiskā institūta (MIT) veica kosmisko kuģu “Apollo-16” un “Apollo-17” Mēness stacionāro un mobilo moduļu atsekošanu izmantojot interferometriskās navigācijas metodes, kas, cita starpā, bija aizgūtas no VLBI (*Very Long Base Interferometry*) tehnoloģijām. Taču no šodienas viedokļa skatoties tika pielietota tā pati fāzu pozicionēšanas metode, ko tagad izmanto GPS un citas GNSS. No 1978.g. līdz 1979.g. *C. Counselman u.c.* publicē praktiski visas interferometriskās jeb fāzu pozicionēšanas galvenās idejas un metodes.

Līdz ar interferometriskās fāzu pozicionēšanas ideju attīstību NAVSTAR jeb GPS sistēma kļuva slavena vēl kādā visai pārsteizošā veidā. Ļoti bieži sarežģītas un avansētas tehnoloģiskas sistēmas tiek veidotas ar vislabākajiem nodomiem un cerībām, kuras ne vienmēr piepildās, kad sistēmas realizācija ir veikta. Šādu piemēru inženierzinātņu vēsturē ir pietiekoši daudz. Daudz mazāk (vai tikpat kā nemaz!) ir gadījumu, kad sarežģītas sistēmas pēc to praktiskās realizācijas ir daudzkārt pārspējušas to sākotnēji iecerētos precizitātes vai citus veikspējas kritērijus. Fāzu pozicionēšanas ideju, metožu un algoritmu pielietošana

NAVSTAR eksperimentālās konstelācijas satelītu *Block-1* signāliem parādīja, ka sistēmas pozicionēšanas reālo precizitāti var palielināt pat par trim kārtām, t.i. tūkstoš reižu. Tas būtiski mainīja šīs militārās satelītu globālās navigācijas sistēmas tālāko likteni.

Kā pirmie iespējamo ieguvumu novērtēja ASV ģeodēzisti un pasaules ģeodēzistu sabiedrība, kuru profesionālajā darbībā jaunā satelītsistēma un tās eventuālā izmantošana solīja reālu apvērsumu, ja pozicionēšanas precizitāte spēs nodrošināt decimetru vai pat centimetru līmeni. GPS sistēmas kosmiskais segments vēl nebija pilnībā izvērstis, kad ASV ģeodēzistu organizācijas griezās pie ASV varas iestādēm ar lūgumu atļaut izmantot GPS satelītu signālus ģeodēzisku darbu veikšanai. Viņiem izdevās pārliecināt pat ASV Prezidentu, ka pielietojot precīzās interferometriskās navigācijas metodes GPS satelītu signāliem iespējams realizēt kvalitatīvu lēcienu ģeodēzisko mērījumu produktivitātes un homogenizācijas jomās. Tā izrādījās patiesība, par ko nebija iedomājušies šīs militārās sistēmas veidotāji. Šo darbību rezultātā tika pieņemts bezprecedenta lēmums: militārā un tolaik slepenā GPS sistēma tika “atvērta” civilai lietošanai visā pasaulē un turklāt bez maksas vēl pirms tika pilnībā pabeigta tās kosmiskā segmenta nokomplektēšana ¹.

Izmantojot interferometriskās navigācijas jeb t.s. fāzu pozicionēšanas idejas, ģeodēzijas, ģeofizikas un astronomijas speciālisti visā pasaulē izstrādāja daudz un dažādas GPS mērījumu apstrādes un izmantošanas metodes. To pamatideja bieži bija divu un vairāku antenu (uztvērēju) vienlaicīga izmantošana, ņemot vērā faktu, ka pseidoattālumu differences ΔR iespējams nomērīt precīzāk nekā pašus pseidoattālumus R . Tika attīstītas gan t.s. statiskās, gan kinemātiskās, gan pseidokinemātiskās u.c. metodes. Ģeodēzistiem raksturīgā tieksme nepārtraukti paaugstināt mērījumu precizitāti noveda arī pie principiāli jaunu metožu izveidošanas, kurās bez satelītu signāliem izmanto vēl citus papildsignālus.

Dažādu GPS satelītu signālu apstrādes metožu un programmatūras strauja attīstība ievērojami paplašināja GPS pozicionēšanas izmantošanas iespējas daudzās saimnieciskās dzīves jomās (ģeofizikā, aviācijā, loģistikā u.c.). Pagājušā gadsimta astoņdesmitajos gados tika uzsākta dažādu GPS uztvērēju ražošana (*Ashtech*, *Trimble*, *AOA*, *Leica*, *Magelan* un citas kompānijas), kā arī programmatūru izstrāde. Par līderi programmatūru izstrādē deviņdesmitajos gados izvirzījās Bernes astronomijas institūts (*G.Beutler* [?]), kur tika radīts ilgu gadus nepārspēts datorprogrammu komplekss GPS mērījumu precīzai apstrādei ģeodēzijas un ģeofizikas problēmu risināšanai. Šī programmu sistēma, saukta par “Bernes programmu”, bija avangardiska jau no saviem pirmssākumiem un ir saglabājusi savu augsto reputāciju līdz mūsu dienām.

¹Kā šo Prezidenta lēmumu paātrinošs faktors bieži tiek minēta Korejas avioliņģu lainera Boeing-747 (reiss KAL-007) notriekšana pie Sahalīnas salas (PSRS) krastiem un 269 cilvēku bojāeja 1983.g. itkā navigācijas kļūdu dēļ.

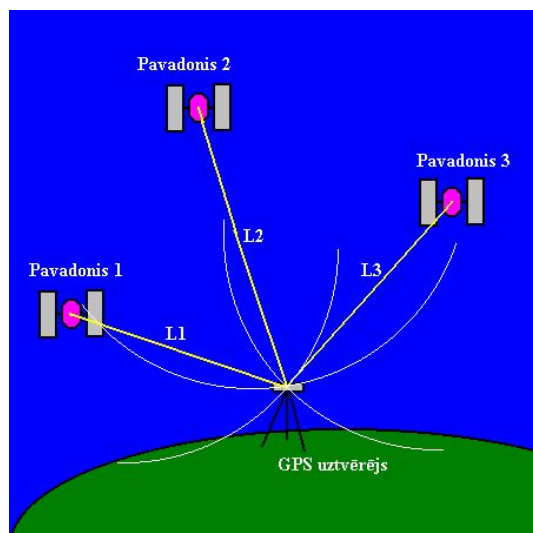
2 Sistēmu apskats

Pasaulē ir vai tiek veidotas vairākas lielas globālās navigācijas satelītu sistēmas (GNSS). Pilnībā funkcionējošas ir ASV GNSS *GPS* un Krievijas GNSS *GLONASS*. Visai drīz tām pievienosies Eiropas Savienības GNSS *GALILEO*, kurai pārskatāmā nākotnē sekos Ķīnas (*COMPASS*) un Indijas GNSS. Bez tam ir pastāvējušas un pastāv arī citas, mazāk pilnīgas satelītnavigācijas sistēmas ar ierobežotu pielietojumu apjomu (*INMARSAT* u.c.). Taču visu šo GNSS darbības principi lielos vilcienos ir identiski, atšķiras tikai otršķirīgi faktori un parametri, kā frekvenču diapazoni, modulāciju tipi, signālu skaits, to kombināciju iespējas, kodējumi u.t.l. Tādēļ, iepazīstoties ar šo sistēmu darbības principiem, galvenokārt runāsim par GPS sistēmu, jo tai vienīgajai ir uzkrāta vairāk nekā 20 gadu reālas ekspluatācijas pieredze.

2.1 Pozicionēšanas metode

GPS is an all-weather, space based navigation system under responsibility of the Departement 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 [?].

Pārfrāzējot šo oficiālo GPS sistēmas definīciju, jāatzīmē, ka GPS ir uz satelītu vienvirziena attālumu mērīšanu balstīta pozicionēšanas (navigācijas) sistēma. GPS satelīti pārraida signālus, kas ļauj ātri un precīzi aprēķināt katra satelīta atrašanās vietu telpā. Bez tam, tā kā pārraidīto signālu paketes ir rūpīgi sinhronizētas ar laika signāliem, tad izmērot signālu pakešu faktisko aizkavēšanos, ir iespējams viegli aprēķināt attālumu no GPS uztvērēja antenas līdz katram no satelītiem. Lai to izdarītu, paketes aizkavēšanās laiku vienkārši jāpareizina ar gaismas ātrumu c . Ja šādi noteikti attālumi līdz trim satelītiem, tad uztvērēja antenas atrašanās vietu telpā ģeometriski nosaka trīs sfēru ar zināmiem centriem (satelītu atrašanās vietu koordinātes) un zināmiem radiusiem (aprēķināti pēc signālu pakešu aizkavēšanās laikiem) krustpunkti (1.zīm).



1.zīm. GPS pozicionēšanas ģeometriskā shēma (I.Vilka datorgrafika)

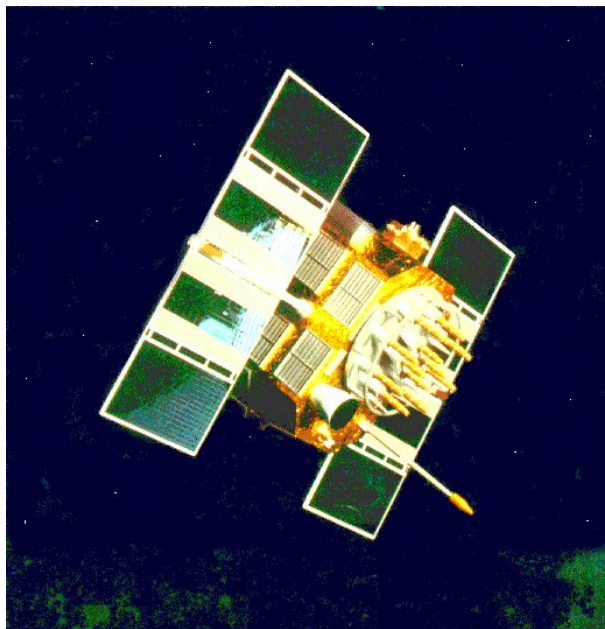
Īstenībā 1.zīm attēlotā pozicionēšanas shēma ir piemērojama tikai gadījumam, kad GPS uztvērējs ir apgādāts ar ļoti precīzu pulksteni signālu pakešu aizkavēšanās laiku noteikšanai. Taču, par cik reāli uztvērēji tiek komplektēti ar parastiem kvarca pulksteņiem, tad signālu pakešu aizkavēšanās laiku mērījumus būtiski ietekmē uztvērēja pulksteņa neprecizitāte, jeb *pulksteņa korekcija*. Šīs korekcijas noteikšanai kopā ar sfēru krustpunkta atrašanu nepieciešams vienlaikus veikt mērījumus nevis ar trim, bet vismaz četriem GPS satelītiem. Lielākā daļa GPS uztvērēju ir paredzēti vienlaicīgam darbam ar 6-12 satelītiem un reāli, tādējādi, tiek meklēts 6-12 sfēru krustpunkts, izvēloties tādu pulksteņa korekciju, kas nodrošina vismazāko izkliedi aprēķinātajām krustpunkta koordinātēm.

Tādējādi GPS pozicionēšanas rezultātu nosaka trīs būtiski faktori:

- Aplūkoto sfēru centru noteikšanas precizitāte, jeb satelītu koordinātu aprēķināšanas precizitāte;
- Sfēru radiusu noteikšanas precizitāte, jeb signālu pakešu aizkavēšanās laiku mērīšanas precizitāte;
- Satelītu sistēmas (konstelācijas) ģeometrija, kas ietekmē matemātisko algoritmu efektivitāti un precizitāti.

2.2 GPS satelītu sistēma

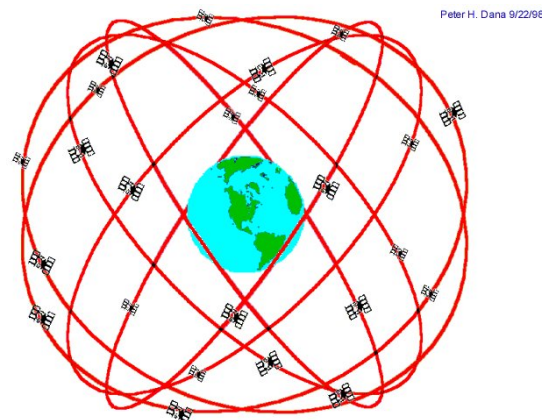
GPS satelītu sistēma sastāv no aptuveni 30-32 satelītiem (2.zīm), no kuriem 24 veido sistēmas aktīvo daļu (pa 4 satelītiem 6 dažādās orbītu plaknēs), bet pārējie satelīti atrodas rezervē (vai ir bojāti).



2.zīm. GPS satelīts (no Petera H. Dana publikācijas [?])

GPS satelīti ir ievadīti praktiski riņķveida orbītās ar apriņķošanas periodu aptuveni 12 stundas (kam atbilst orbītas lielā pusass $a=20200$ km) un inklināciju $i=55$ grādi (3.zīm). Šāda satelītu sistēma nodrošina 4-8 (reizēm 12) satelītu vienlaicīgas mērīšanas iespēju virs almukantarāta $h=15$ grādi, jebkurā vietā uz Zemes jebkurā laikā momentā.²

²Šī konstelācija nodrošina jebkurā vietā uz zemeslodes vienlaicīgi 4-8 satelītu atrašanos virs almukantarāta $h = 15^\circ$, ap 10 satelītu virs $h = 10^\circ$ un ap 12 satelītu virs $h = 5^\circ$. Satelītu konstelācijas atkārtojas ik pēc 12 stundām (attiecībā pret novērotāju uz Zemes ik pēc 24 stundām) ar 4 minūšu nobīdi laika skalu UT (pasaules laiks) un ST (zvaigžņu laiks) nobīdes dēļ.



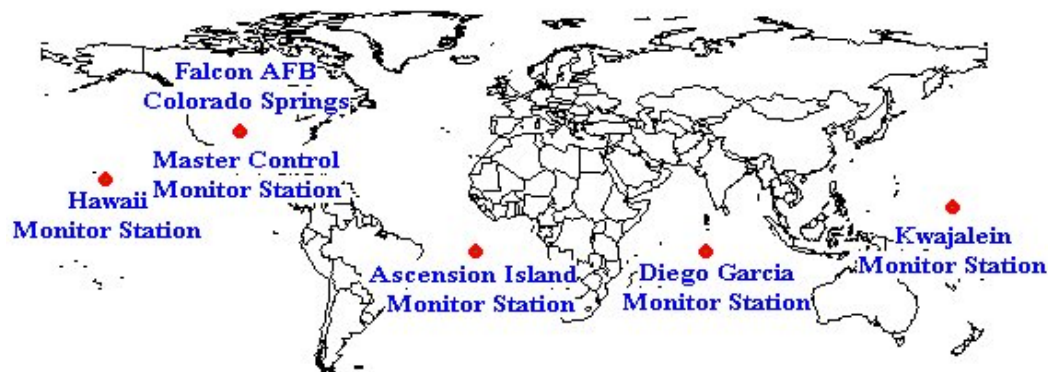
GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination

3.zīm. GPS satelītu sistēma (no Petera H. Dana publikācijas [?])

Katrs no GPS satelītiem ir aprīkots ar 4 atomlaika standartiem, datoriem un raidītāju. Viena satelīta aptuvenā masa ir ap 1500 kg, bet vērtība tuvu 50 miljoniem USD. Satelītu vidējais darbamūžs plānots ap 10 gadiem, lai gan atsevišķiem satelītiem tas reāli izrādījies ievērojami ilgāks. Laikā no 1978.-85.g. orbītās tika ievadīti 10 t.s. *Block-1* tipa satelīti, no 1989.-90.g. 9 uzlabotas konstrukcijas *Block-2* satelīti, no 1990.-97.g. 19 *Block-2A* satelīti, bet no 1997.-2004.g. 12 modernizētie *Block-2R* satelīti. Laikā no 2005.-09.g. tika sekmīgi palaisti 8 modificētie *Block-2R-M* satelīti, kurus 2010.g. nomainīja *Block-2F* satelīti, bet no 2014.g. paredzēts orbītā ievadīt jaunākās paaudzes *Block-3A* sērijas GPS satelītus.

Satelīti tiek regulāri kontrolēti no Zemes, informācija tajos tiek aktualizēta (t.i. satelīti tiek daļēji pārprogrammēti) ne retāk kā reizi 8-12 stundās, citādi to signāli degradējas un nenodrošina nepieciešamo pozicionēšanas precizitāti. Satelītu kontrole un informācijas aktualizācija tiek veikta (4.zīm) no piecām kontrolstacijām (*Hawai, Colorado Springs, Ascension island, Diego Garcia, Kwajalein*), kas nepārtraukti seko sistēmas darbam.³ Bez tam tiek izmantoti arī kontrolmērījumi no vairākiem simtiem ģeofizikālo GPS observatoriju (tostarp Rīgas un Irbenes), lai precīzi uzturētu GPS izmantoto koordinātu sistēmu.

³Galvenā kontrolstacija sākotnēji atradās Vandenbergas gaisa kara spēku (GKS) bāzē Kalifornijā, bet vēlāk tika pārcelta uz Šriveras (agrāk sauktu par Falkonas) GKS bāzi Koloradospringsā. To sauc par CSOC (*Consolidated Space Operation Center*).

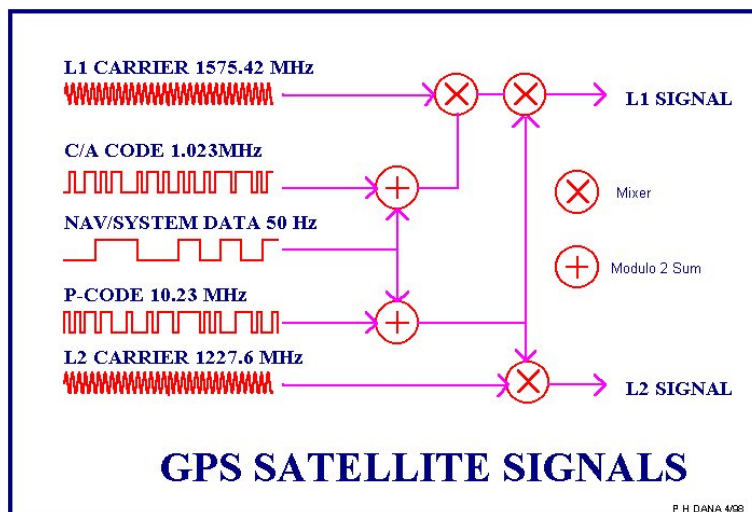


Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

4. zīm. GPS satelītu kontrolstacijas (no Petera H. Dana publikācijas [?])

2.3 GPS satelītu signāli

GPS satelīti raida šķietami dīvainu signālu, kas ļoti atgādina bināru “balto troksni”, t.i. itkā haotisku impulsu virkni, ko sauc par PRN (*pseudo random noise*) vai pseidotroksni (5. zīm.). Šis signāls ar t.s. bifāzu modulāciju (BPSK) uzmodulēts divām nesējfrekvencēm L1 ($f_{L1}=1.57542$ GHz, $\lambda_{L1} = 19$ cm) un L2 ($f_{L2}=1.22760$ GHz, $\lambda_{L2} = 24.4$ cm).



5. zīm. GPS satelītu signāli (no Petera H. Dana publikācijas [?])

Šāda signāla struktūra tika izvēlēta vairāku iemeslu dēļ: (a) tie varēja apmulsināt neautorizētus signāla struktūras pētniekus, kuriem bija neiespējami no tiem “izlobīt” jēlkādu informāciju; (b) izmantoto pseidotroksni (t.s. *Golda kodu*) ir grūti vai pat neiespējami “slāpēt” ar interferences slāpētājiem, kas var tikt pielietoti pret GPS sistēmu militāru konfliktu gadījumos; (c) PRN impulsu frontes ir tikpat piemērotas aizkavēšanās laiku mērījumiem, kā regulāras impulsu ķēdītes.

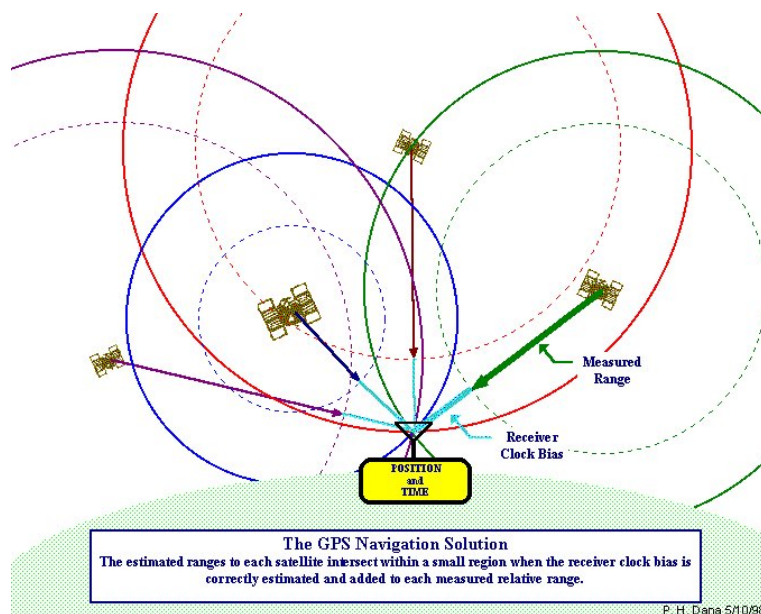
GPS signāla formēšanai sākotnēji tika izmantoti divi pseidotrokšņu kodi C/A (raupjais) kods, kas modulēts uz nesējfrekvences L1 un P(Y) (smalkais) kods, kas modulēts uz abām nesējfrekvencēm.⁴ Abu PRN kodu modulācija uz nesējfrekvences L1 tiek veikta ortogonālos fāzu ofsetos (kvadrātūrās), līdzīgi krāsu signāla modulācijai televīzijas PAL sistēmā. Taču šis šķietami haotiskais pseidotroksnis (kas pamatā domāts tikai aiztures laiku, t.i. pseidoattālumu mērījumu veikšanai), tomēr satur informāciju par satelītu atrašanās vietu (orbītas elementus), laika signālus, dažādas korekcijas (tostarp par jonosfēras stāvokli) un informāciju par satelīta sistēmu funkcionēšanas statusu. Šī informācija tiek pārraidīta ļoti lēni (ar takts frekvenci tikai 50 Hz) un uzklāta virsū PRN signālam. Lai izdalītu šo informāciju, sauktu par *navigācijas paketi*, katrā GPS uztvērējā ir iebūvētas mikroskāmas, kas ģenerē visus vai tikai C/A pseidotrokšņu kodus. Salīdzinot uztverto signālu ar PRN ģeneratora ģenerēto signālu (t.i. atskaitot vienu signālu no otra) iegūstam navigācijas paketes signālu. Navigācijas paketēm, protams, ir noteikts datu pārraides protokols. Katra pakete satur 5 t.s. kadrus, katrs no kuriem ir 300 bitu garš. Navigācijas paketes satur dažādu informāciju, kas atkārtojas ik pēc 25 paketēm. Tādēļ pilnas sistēmas informācijas uztveršana (t.s. aukstais starts), ņemot vērā lēno datu pārraides tempu, prasa 12.5 minūtes. Jāpiezīmē, ka katrs GPS satelīts (4. un 5. kadrā) pārraida kopīgu informāciju par visu GPS satelītu sistēmu.

2.4 Pseidoattālumu mērīšana

Tātad katrs GPS uztvērējs atdala PRN signālu no navigācijas paketēm un pēc tajās esošās orbitālās informācijas, aprēķina satelītu tekošās koordinātes (t.i. iepriekš apskatīto sfēru centrus) ar aptuveni 1 metra precizitāti. (Par to, kā tiek iegūta augstāka precizitāte, skt. [?, ?, ?]). Uztvertais un no navigācijas paketes atdalītais PRN signāls, izmantojot t.s. *kodu korelatoru*, tiek salīdzināts ar uztvērējā iebūvētā PRN ģeneratora signālu un noteikta viena signāla nobīde laikā attiecībā pret otru signālu. Šo procedūru sauc par pseidoattālumu mērīšanu. Jāpiezīmē, ka PRN signālu frontes ir rūpīgi sinhronizētas ar laika signāliem – pārraidītajam PRN signālam ar satelīta 4 atomstandartu signāliem, bet uztvērējā ģenerētajam PRN signālam, ar uztvērēja kvarca pulksteņa laika signāliem. Tādejādi nomērītā PRN signālu nobīde tiek veikta izmantojot atšķirīgus pulksteņus, turklāt ar visai atšķirīgu precizitāti. Šādi mērījumi, pirms ir noteikta uztvērēja pulksteņa korekcija, nav īpaši precīzi un tādēļ tos sauc par *pseidoattālumiem* nevis

⁴ *Block-2F* un vēlāku paaudžu GPS satelīti no 2010.g. strādā jau ar trim nesējfrekvencēm L1, L2 un L5.

attālumiem. 6.zīm. attēloti pseidoattālumi (pārtrauktās līnijas) un patiesie attālumi (nepārtrauktās līnijas), kurus pēc satelītu signāliem mēģina noteikt GPS uztvērējs.



6.zīm. Pseidoattālumi un patiesie attālumi (no Petera H. Dana publikācijas [?])

Bez tam jāņem vērā, ka attālumu (arī pseidoattālumu) mērījumus ietekmē dažādi nepatīkami un traucējoši faktori, to starpā:

- *jonosfēras refrakcija* (rada attālumu mērījumu kļūdas kas var saniegt 40-50 metrus),
- *troposfēras refrakcija* (rada attālumu mērījumu kļūdas ar kārtu 1-3 metri),
- *relatīvistiskie efekti* (rada attālumu mērījumu kļūdas ar kārtu 20 cm),
- *multirefleksija* (rada attālumu mērījumu kļūdas lielākas par 10-20 m) – un var vispār nojaukt mērīšanas procesu(!) u.c.

Visievērojamākais no mērījumus traucējošiem faktoriem – jonosfēras refrakcija ir atkarīga no elektronu vertikālās koncentrācijas jonosfērā. Šo efektu “apkaro” ar dažādām metodēm, no kurām ievērtības vērtas ir sekojošas. (1) elektronu vertikālo koncentrāciju jonosfērā mēra speciālas jonosfēras observatorijas un dati par atsevišķiem Zemes reģioniem (piemēram Japānu) ir pieejami internetā; (2) jonosfēras refrakciju modelē un modeļa parametrus nosaka pēc tiem pašiem GPS mērījumiem, papildzinot mērīšanas procesu, lai iegūtu papildus informāciju par procesiem jonosfērā; (3) jonosfēras refrakciju tuvināti aprēķina izmantojot

navigācijas paketē iekļauto informāciju; (4) jonosfēras refrakciju izslēdz izmantojot mērījumus, kas veikti ar divām nesējfrekvencēm L1 un L2 (realizējot t.s. “matemātisko heterodinu”, t.i. mērījumus pārrēķinot uz starpfrekvenci, kurai ir nulles jonosfēras refrakcija [?, ?]) Pēdējā ir visprecīzākā no visām jonosfēras refrakcijas nevēlamā iespaids novēršanas metodēm un faktiski izskaidro, kāpēc GPS signāli tiek pārraidīti ar divām (šobrīd jau trim) nesējfrekvencēm.

Otrs traucējošais faktors *multirefleksija* (angliski *multipath*), kuru izsauc GPS signālu atstarošanās no dažādām virsmām uztvērēja tiešā tuvumā un vairākkārtēja nonākšana uztvērēja antenā, ir vēl nepatīkamāks (tas spēj pat pilnībā nojaukt GPS uztvērēja darbu!), tādēļ no tā vislabāk izvairīties, uzstādot antenu tālu no atstarojošām virsmām. Labus rezultātus dod antenas ekranēšana no apakšas un daļēji arī no sāniem. Pēdējā laikā lieto arī polarizācijas filtrus, jo tiešais un atstarotais signāli ir cirkulāri pretēji polarizēti. Bez tam ir izstrādātas arī smalkas un komplicētas modelēšanas metodes, izmantojot faktu, ka efekts ir atšķirīgs signāliem ar atšķirīgām nesējfrekvencēm L1 un L2.

2.5 Pozicionēšanas matemātiskie modeļi

Lai saprastu, kā GPS uztvērēja procesors nosaka antenas koordinātes (t.i. aprēķina iepriekš apskatīto sfēru krustpunktus) apzīmējam ar $\overline{\Delta t}$ nomērīto PRN signālu nobīdi vienam pret otru. Tad

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

kur

$$\Delta t = t_r - t_s$$

$$\Delta \delta = \delta_s - \delta_r \approx -\delta_r$$

bet $\overline{t_r}$ - uztvērējā registrētais PRN signāla frontes uztveršanas moments (pēc uztvērēja pulksteņa),

$\overline{t_s}$ - tās pašas PRN signāla frontes emisijas moments no satelīta antenas (pēc satelīta pulksteņa),

t_r un t_s - atbilstoši patiesā (absolūtā) laika momenti,

δ_r - uztvērēja pulksteņa korekcija (nezināma),

δ_s - satelīta pulksteņa korekcija (zināma no informācijas navigācijas paketē).

Pareizinošais pirmais sakarību ar gaismas (mikroviļņu) izplatīšanās ātrumu c iegūstam

$$R = \rho + c\Delta \delta \quad (1)$$

kur $R = c\overline{\Delta t}$ - satelīta pseidoattālums, bet $\rho = c\Delta t$ - satelīta patiesais attālums no uztvērēja antenas. Turklāt uzskatām, ka visi nepieciešamie traucējošie faktori (t.i. mērījumu sistematiskās kļūdas) ir ņemti vērā un iekļauti pseidoattālos. Vienādojumus (1) mēs varam uzrakstīt katram satelītam, ar kuru tiek veikti mērījumi, tādēļ pievienosim indeksu j tiem vienādojuma parametriem, kuri ir

atkarīgi no konkrētā satelīta, kā arī ņemsim vērā, ka patiesais satelīta attālums no uztvērēja antenas ir uzrakstāms formā

$$\rho_j(t) = \sqrt{[x_j(t) - X]^2 + [y_j(t) - Y]^2 + [z(t) - Z]^2} = \rho_j(X, Y, Z)$$

kur $x_j(t)$, $y_j(t)$, $z_j(t)$ – laikā mainīgās, bet pēc navigācijas paketē iekļautās informācijas aprēķināmās satelīta koordinātes, bet X , Y , Z – konstantās, bet nezināmās GPS uztvērēja antenas koordinātes. Tādējādi attālums ρ_j ir gan laika t , gan nosakāmo GPS uztvērēja antenas koordinātu X, Y, Z funkcija. Uzrakstot (1) veida vienādojumu sistēmu n_j satelītiem, attiecībā pret kuriem tiek veikti mērījumi, iegūstam

$$\rho_j(X, Y, Z) + c\Delta\delta = R_j \left. \vphantom{\rho_j(X, Y, Z)} \right\}_{j=1}^{n_j} \quad (2)$$

n_j vienādojumus, kas satur 4 nezināmos: trīs GPS uztvērēja antenas koordinātes X, Y, Z un laika korekciju $\Delta\delta$. Tādējādi nepieciešami vienlaicīgi vismaz $n_j = 4$ satelītu novērojumi, kas ļauj aprēķināt 4 nezināmos vienādojumu sistēmā (2). Par cik šī vienādojumu sistēma attiecībā pret nezināmajām koordinātēm X, Y, Z ir nelineāra, tad bieži tiek veikta vienādojumu linearizācija un meklētas korekcijas ΔX , ΔY , un ΔZ attiecībā pret parasti zināmām tuvinātām antenas koordinātēm X_0, Y_0, Z_0 . Šo matemātisko modeli sauc par absolūto kodu pozicionēšanas modeli. Par relatīvo pozicionēšanu, kā arī t.s. diferenciālo pozicionēšanu DGPS skt. šī darba 7. nodaļu vai literatūras avotus [?, ?].

2.6 Fāzu pozicionēšana

Bifāzu modulācijai, kuru pielieto GPS signālu formēšanā, piemīt īpašība, ka paceļot signālu kvadrātā, t.i. pareizinot to pašu ar sevi, modulācija pazūd (!) un tiek iegūts gandrīz sinusoidāls signāls ar dubultotu nesējfrekvenci. Tas ļauj izmantot pseidoattālumu noteikšanai fāzu differences uztvertā demodulētā signāla un uztvērējā ģenerētā atbalsta signāla starpā. Citiem vārdiem, ir iespējams pielietot signālu interferometriskās apstrādes metodes, kuras izceļas ar ļoti augstu precizitāti. Tieši šīs metodes ir pamatā precīzajiem ģeofizikālajiem un ģeodēziskajiem mērījumiem, tostarp populārajai RTK (*Real Time Kinematic*) metodei [?]. Tādējādi fāzu pozicionēšanas lielākā priekšrocība ir augstā precizitāte, bet lielākais trūkums – cikliskās nenoteiktības (*integer ambiguity*) parādīšanās. Cikliskā nenoteiktība ir fenomens, ka izmainoties attālumam starp GPS antenu un satelītu par nesējfrekvences λ (t.i. 19.0 līdz 24.4 cm) interferometriskā aina identiski atkārtojas un ir grūti noteikt cik pilna viļņu garuma intervālu aizpilda attālumu no antenas līdz satelītam. Fāzu pozicionēšanas gadījumā satelīta pseidoattālumu nosaka formula

$$R = N\lambda + \Phi\lambda \quad (3)$$

kur N – cikliskā nenoteiktība (vesels skaitlis), Bet $\Phi\lambda$ – pēc fāzu nobīdes Φ (interferometriski) precīzi nomērītā pseidoattāluma korekcija. Šeit λ - demodulētā

signāla viļņa garums, bet $0 \leq \Phi < 1$. Ievietojot (3) vienādojumu sistēmā (2) iegūstam fāzu pozicionēšanas vienādojumu sistēmu

$$\rho_j(X, Y, Z) + c\Delta\delta - N_j\lambda = \Phi_j\lambda \Bigg\}_{j=1}^{n_j} \quad (4)$$

kas satur n_j vienādojumus, bet $n_j + 4$ nezināmos $X, Y, Z, \Delta\delta, N_1, N_2, \dots, N_{n_j}$. Šādai sistēmai, diemžēl, nav viennozīmīga atrisinājuma, ja veikts tikai viens fāzu nobīdes Φ_j mērījums līdz katram no satelītiem. Tas saistīts ar to, ka cikliskās nenoteiktības vērtība N_j ir atšķirīga katram satelītam, tādēļ jaunu satelītu pieslēgšana mērīšanas procesam situāciju neuzlabo, jo katrs jauns satelīts, pievienojot jaunu vienādojumu sistēmai (4), pievieno arī vienu jaunu nezināmo – savu ciklisko nenoteiktību N_j . Lai atrisinātu sistēmu (4), t.i. noteiktu nezināmos $X, Y, Z, \Delta\delta$, kā arī visas cikliskās nenoteiktības N_1, N_2, \dots, N_{n_j} ir izstrādāts liels daudzums dažādu metožu, turklāt nav zināms, kura no tām ir labākā, jo katrai piemīt ne tikai priekšrocības, bet arī trūkumi. Šo metožu izstrāde nav uzskatāma par nobeigtu, jo dažādu konkrētu navigācijas vai pozicionēšanas uzdevumu risināšanai literatūrā tiek piedāvātas arvien jaunas metodes [?, ?, ?]. Pakavesimies tikai pie vienas no tām, kuras pamatideja ir pseidoattālumus līdz katram satelītam mērīt vairākas reizes. Šo procesu apzīmēsim ar indeksu t , ņemot vērā faktu, ka satelīti atrodas kustībā attiecībā pret izmantoto koordinātu sistēmu (parasti WGS-84), t.i. dažādos laika momentos t izmērītie viena un tā paša satelīta pseidoattālumi R_j (vai to korekcijas $\Phi_j\lambda$) būs savstarpēji atšķirīgi. Tātad veicam n_t pseidoattālumu korekciju mērījumus n_j satelītiem ar nekustīgu (tas ir būtiski!) GPS uztvērēja antenu. Vienādojumu sistēma (4) tādā gadījumā saturēs $n_t n_j$ vienādojumus, bet nezināmo skaits būs n_j cikliskās nenoteiktības N_j plus n_t pulksteņa korekcijas $\Delta\delta_t$, plus trīs antenas koordinātes X, Y, Z . Tādejādi vienādojumu sistēma (4) būs atrisināma, ja vienādojumu skaits būs lielāks par nezināmo skaitu, t.i.

$$n_j n_t \geq n_j + n_t + 3 \quad (5)$$

Ja, līdzīgi kā agrāk, $n_j = 4$, tad no nosacījuma (5) izriet, ka $n_t \geq 3$. Šie mērījumi obligāti jāveic ar nekustīgu antenu, lai nepalielinātu nezināmo skaitu (t.i. nebūtu atšķirīgas antenas koordinātes X, Y, Z katram pseidoattālumu mērījumu komplektam) vienādojumu sistēmā (4). Tikai pēc tam, kad uztvērējs ir noteicis visas cikliskās nenoteiktības N_j , var uzsākt antenas kustību, nenojaucot pozicionēšanas procesu. Šis algoritms, saprotamu iemeslu dēļ, nav pielietojams aviācijā un rada problēmas arī saistībā ar citiem kustīgiem objektiem. Jo pietiek satelītu uz brīdi pazaudēt (negaisa, satelītu konstelācijas izmaiņu vai citu iemeslu dēļ), lai matemātiskais process nojuktu un tā atjaunošanai bez GPS antenas (un kustīgā objekta uz kura tā uzstādīta) apstādināšanas jālieto komplicēti un visai rafinēti algoritmi.

2.7 Precizitātes “šķīšana” jeb DOP faktori

Kā jau tas tika pieminēts, vienādojumu sistēmas (3) un (4) pirms to risināšanas bieži tiek linearizētas un, tādejādi, reducētas matricu formā

$$\underline{A}\underline{x} = \underline{l} \quad (6)$$

kur \underline{A} – koeficientu matrica, \underline{x} – parametru vektors (T -transponēšanas operācija), \underline{l} – mērījumu vektors, t.i.

$$\underline{x}^T = \{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, c\Delta t\}$$

bet GPS antenas koordinātes aprēķināmas pēc formulām $X = X_0 + \Delta X$, $Y = Y_0 + \Delta Y$, $Z = Z_0 + \Delta Z$, kur X_0 , Y_0 , Z_0 – antenas tuvinātās (zināmās) koordinātes. Lai sistēmu (6) varētu atrisināt, jāizpildās nosacījumam $\det(\underline{A}) > \varepsilon > 0$. Ja šis nosacījums neizpildās, aprēķinātais parametru vektors \underline{x} ir neprecīzs. Lineārā tuvinājumā korelāciju teorija ļauj vektora \underline{x} precizitāti raksturot ar korelāciju matricu, kas pa diagonāli satur aprēķināto parametru dispersijas (standartnoviržu kvadrātus) $\sigma_{\Delta X}^2$, $\sigma_{\Delta Y}^2$, $\sigma_{\Delta Z}^2$, $\sigma_{c\Delta t}^2$.

GPS sistēmā pozicionēšanas precizitāti pieņemts raksturot ar normalizētu standartnoviržu funkcijām, kuras sauc par DOP (*Dilution of Precision* – precizitātes “šķīšanas”) faktoriem. Izšķir sekojošus DOP faktorus (*GDOP* – *Global DOP*, *PDOP* – *Positional DOP*, *TDOP* – *Time DOP*, *HDOP* – *Horizontal DOP*, *VDOP* – *Vertical DOP*):

$$GDOP = \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta X}^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma_{\Delta Y}^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma_{\Delta Z}^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma_{c\Delta t}^2}{\sigma^2}}$$

$$PDOP = \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta X}^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma_{\Delta Y}^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma_{\Delta Z}^2}{\sigma^2}}$$

$$TDOP = \sqrt{\frac{\sigma_{c\Delta t}^2}{\sigma^2}}$$

kā arī $HDOP = \dots$ un $VDOP = \dots$, kurus iegūst transformējot atbilstošās standartnovirzes no WGS-84 koordinātu sistēmas uz horizontālo koordinātu sistēmu. Šeit ar σ apzīmēta pseidoattālumu mērījumu standartnovirze jeb vidējā kvadrātiskā kļūda. Nobeidzot DOP faktoru apskatu, jāpiezīmē, ka no korelāciju teorijas izriet, ka tie ir atkarīgi tikai no satelītu sistēmas (konstelācijas) ģeometrijas, nevis no paša mērīšanas procesa. Tādejādi DOP faktorus ir iespējams aprēķināt iepriekš un plānot GPS novērojumu seansus tādos laika periodos, kad DOP faktori ir apmierinoši nelieli. Vairumā gadījumu ir pieņemts uzskatīt, ka GPS mērījumi ir apmierinoši, ja atbilstošie DOP faktori nav lielāki par 6, taču nereti tiek piemērotas arī mazākas DOP faktoru vērtības. Faktoram *PDOP* ir vienkārša ģeometriskā interpretācija – tas ir apgriezti proporcionāls prizmas tilpumam, kuru veido GPS uztvērēja antena ar visiem vienlaikus mērāmajiem satelītiem.

2.8 Noslēguma piezīmes

Šajā nelielajā ievadā, mēs iepazīnāties ar pašiem būtiskākajiem GPS sistēmas pamatprincipiem, kuru izpratne ir svarīga ne tikai profesionāliem sistēmas lietotājiem, bet arī visiem, kas tā vai citādi izmanto šīs pozicionēšanas sistēmas ārkārtīgi plašās iespējas. Sarežģītu inženiertehnisku sistēmu, kāda nenoliedzami ir GPS, lietošana bez izpratnes par sistēmas darbības pamatprincipiem, nereti noved pie neadekvātas to ekspluatācijas un kļūdainu rezultātu iegūšanas. Ja uz tiem balstās atbildīgu lēmumu pieņemšana, tad sekas nereti ir traģiskas. Par to uzskatāmi liecina arī GPS sistēmas neadekvātas lietošanas piemēri gan aviācijā, gan jūras transportā, gan citās nozarēs [?].