4. Navigacijski sistemi 2
4.1 Od kamnov do satelitov 2
4.1.1 Kamena doba 2
4.1.2 Zvezdna doba 2
4.1.3 Radijska doba 3
4.1.4 Doba LORAN-a 5
4.1.5 Doba satelitske navigacije 6
4.2 Navigacijski sateliti 8
4.2.1 Merjenje razdalj do satelitov 8
4.3 Viri napak 11
4.3.1 Satelitska ura 11
4.3.2 Ura v sprejemniku 11
4.3.3 Napake satelitske orbite 12
4.3.4 Atmosferske napake: Ionosfera in Troposfera 12
4.3.5 Širjenje signala po več poteh 13
4.3.6 Napake v sprejemniku 13
4.3.7 GDOP (Geometrical Dilution Of Precision) 13
4.3.8 Selektivna razpoložljivost: Umetno ustvarjene napake 14
4.4 Odpravljanje virov napak 15
4.4.1 Diferencialni način 15
4.4.2 DGPS 16
4.4.3 RTK 16
4.4.4 Drugi škodljivi vplivi na signal 18

4. Navigacijski sistemi

4.1 *Od kamnov do satelitov*

4.1.1 Kamena doba

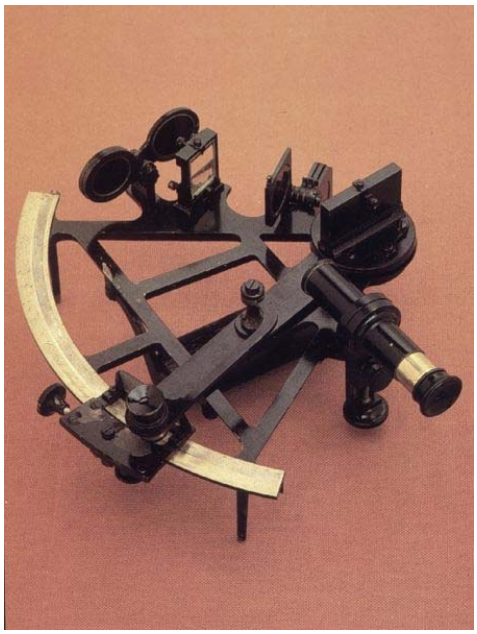
Kje sem? Kako pridem do mojega cilja? To so vprašanja, ki so stara kot je staro človeštvo.
Ljudje so že od nekdaj identificirali in si zapomnili referenčne točke na podlagi katerih so se lahko orientirali na poti skozi gozdove, puščave, gore, … Puščali so kamne, označevali so drevesa, za referenco so vzeli gore, hribe. To so bili prvotni, osnovni načini navigacije.

4.1.2 Zvezdna doba

Identificiranje referenčnih točk je bila preprosta in uporabna na kopnem. V celoti pa je odpovedala, ko so ljudje začeli raziskovati morja in oceane. Stran od kopnega so bili za navigacijo na voljo samo nebesna telesa: zvezde, sonce in luna. Postali so torej *»referenčne točke«* in doba navigacije z uporabo nebesnih teles se je pričela.
Navigacija z uporabo nebesnih teles je bila prva resna rešitev problema določanja pozicije na neznani lokaciji, kjer so bile na voljo le referenčne točke sonce, luna in zvezde. Relativna pozicija sonca, lune in zvezd ter njihova geometrijska pozicija je različna glede na različne lokacije na Zemlji.
Z opazovanjem postavitve zvezd lahko ugotovimo svojo lokacijo na Zemlji in določimo smer, v katero se moramo gibati, da bomo dosegli svoj cilj.
Veliki voz, Mali voz, Kasiopeja, to so primeri postavitve zvezd. Vidimo jih drugače iz različnih lokacij opazovalca na Zemlji.

Natančneje kot s prostim očesom lahko opazujemo konstelacijo nebesnih teles s posebnimi instrumenti. V tem času so bili razviti posebni instrumenti, ki so bili namenjeni merjenju kotov, pod katerimi opazovalec vidi zvezde s svoje pozicije. Tako izmerjeni koti so bili osnova za določanje pozicije opazovalca. V tem časovnem obdobju so bile razvite tudi karte, ki so za določeno pozicijo navajale vnaprej izračunane kote. S tem so bili opazovalcu olajšani vsakokratni zapleteni izračuni.

Proces merjenja kotov med zvezdami z optičnimi instrumenti je bil časovno potraten in nenatančen. Čez dan, ko zvezde niso bile vidne, je bil neuporaben. Če je bilo nebo oblačno, je bil sistem prav tako neuporaben. Izračunane lokacije in lokacije pridobljene na podlagi vnaprej preračunanih kart so bile natančne le na nekaj kilometrov.



Slika 1. Sekstant

Kalkulacija je bil preprost proces geometrije triangulacije, pri katerem so bile zvezde znane referenčne točke, meritev kotov med njimi in opazovalcem pa bi rešile pripadajoči sistem enačb in tako določile neznanko: pozicijo opazovalca.
Triangulacija bi bila dosti preprostejša, če bi bilo možno izmeriti tudi razdaljo do zvezd. Tako bi razdalja nadomestila kote in enačbe bi bile preprostejše. Vendar pa vemo, da to ni bilo mogoče.

Navigatorji so imeli zapleteno nalogo vsakokratnega računanja lokacije. Sanjali so o napravah, ki bi jim olajšale delo in določale pozicijo natančneje in z manj napora. Ideje so bile, da bi naredili napravo, ki bi znala na podlagi meritve kotov hitro in avtomatično izračunati lokacijo. Te sanje so postale resničnost šele takrat, ko so v sistem navigacije bili vključeni radijski signali oz. elektromagnetno valovanje.

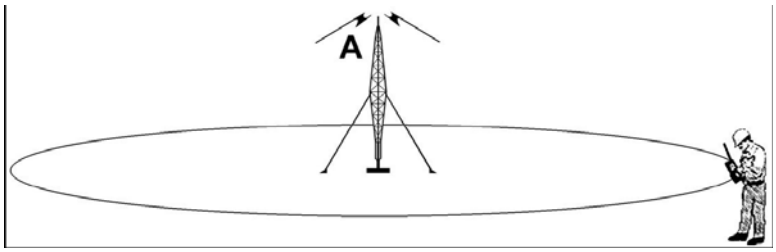
4.1.3 Radijska doba

Nekje v sredini prejšnjega stoletja so znanstveniki odkrili način merjenja razdalje z uporabo radijskih signalov. Koncept je bil takšen, da so merili čas, ki ga signal potrebuje, da prepotuje razdaljo od točke A do točke B, pri čemer so poznali hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja, t.j. približno 300.000 km/s. Ker ena mikrosekunda pomeni kar 300 metrov napake pri pozicioniranju, je natančnost meritve časa potovanja valovanja zelo pomembna. Za natančno pozicioniranje zahtevamo, da je sprejemnik sposoben meriti čas natančneje od ene milijoninke sekunde, še bolje pa od ene milijardinke sekunde (ene nanosekunde).

Kako lahko sistema radijskega oddajnika in sprejemnika uporabimo za določanje lokacije?

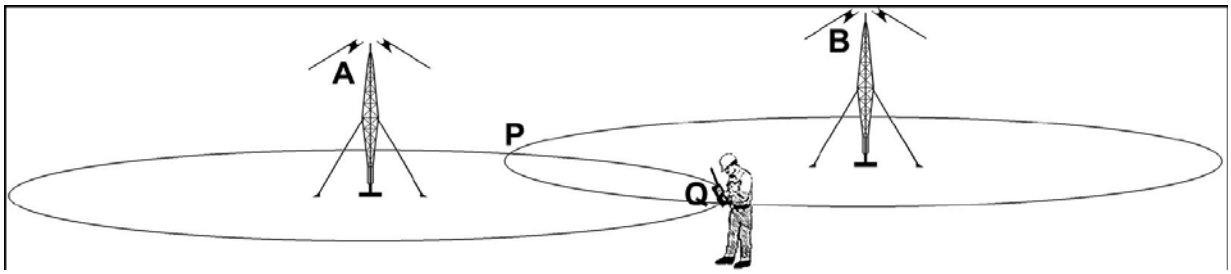
Privzemimo, da je oddajnik lociran v točki A, za katero poznamo natančno lokacijo. Prav tako imamo poseben sprejemnik, ki zna sprejemati signal, ki ga oddaja oddajnik

v točki A in meriti razdaljo do točke A, torej do oddajnika. Natančna lokacija točke A je sprogramirana v našem sprejemniku. Smo na neznani lokaciji. Vključimo sprejemnik in dobimo podatke, da smo oddaljeni od oddajnika 12.345 m. Ta podatek nam sicer ne pove kje smo, pove pa nam to, da je naša pozicija nekje na krožnici za radijem 12.345 m in središčem v točki A. Sistem prikazuje slika 2.



Slika 2: Merjenje razdalje od oddajnika

Zdaj privzemimo, da je drugi oddajnik lociran v točki B. Isti sprejemnik, kot ga uporabljamo že za merjenje razdalje do točke A nam sedaj izmeri tudi razdaljo do točke B. Ta znaša 8.293 metrov. To nam pomeni, da smo locirani nekje na krožnici s središčem v točki B in radiem 8.293 m. Zdaj že imamo dve informaciji. Oddaljenost od točke A in oddaljenost od točke B. Naša lokacije ja torej nekje na presečišču obeh krožnic. Na sliki 3 ju označimo s točkama P in Q.



Slika 3: Z merjenjem razdalje do dveh oddajnikov imamo samo dve varianti za našo pozicijo

Če bi izmerili če razdaljo do oddajnika C, bi imeli natančno informacijo o naši lokaciji. Zdaj si lahko zamislimo kako naš sistem deluje. Vključimo naš specialni sprejemnik, ki hitro izračuna razdalje do vseh treh oddajnikov, A, B in C in nam izračuna našo lokacijo.

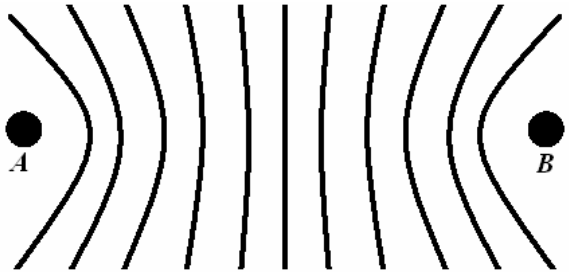
Oddajnike A, B in C skupaj imenujemo *veriga oddajnikov*. Veriga lahko ima 4 ali celo več oddajnikov, z večanjem števila oddajnikov pa dosega boljšo pokritost. Doseg tovrstnega radijskega oddajnika pa je lahko približno 500 km.

Navigacijski sistemi, ki delujejo po zgoraj opisanem principu se imenujejo radijski navigacijski sistemi.

4.1.4 Doba LORAN-a

LORAN (ang. LOng RAnge Navigation) pomeni Navigacija dolgega dosega.
LORAN je zemeljski navigacijski sistem, ki uporablja radijske oddajnike nizkih frekvenc. Pred razširitvijo GPS sistema je bil glavni tovrstni sistem za pomorstvo. Trenutna različica LORAN-a v splošni rabi je sistem LORAN-C.

Osnova sistema je zasnovana na principu časovne razlike med sprejemom signalov dveh radijskih oddajnikov. Podano konstantno časovno razliko lahko predstavimo s hiperbolo položaja (LOP). Če poznamo položaj oddajnikov, katerih signala sta sinhronizirana, lahko ugotovimo, da je položaj sprejemnika nekje na določeni hiperboli, kjer je časovna razlika med sprejetima signaloma konstantna. V idealnih pogojih je ta sorazmerna z razliko razdalj med oddajnikom in vsako od postaj.



Slika 4: Razlika med časom sprejema sinhroniziranih signalov iz radijskih postaj A in B je konstantna na vsej hiperbolični krivulji.

Dvodimenzionalni položaj s samo dvema postajama ne more biti določen, zato moramo isti postopek izvesti še enkrat, vendar z uporabo časovne razlike med drugim parom postaj.
Zemljepisni položaj je tako določen s presečiščem obeh hiperbol.

V primeru LORAN-a ostaja ena postaja v obeh postopkih konstantna - primarna (master), ki se ločeno povezuje s sekundarnima (slave) postajama. Eno krivuljo določa časovna razlika (TD - Time Difference) med primarno in prvo sekundarno postajo, drugo pa časovna razlika med primarno in drugo sekundarno postajo. Presečišče krivulj določa zemljepisno točko v odnosu do položajev treh postaj. Te krivulje pogosto označujemo kot TD-črte (TD lines)

V praksi LORAN deluje v strnjenih območnih poljih, oziroma verigah, ki jih sestavlja vsaj ena primarna in najmanj dve sekundarni postaji (pogosto več), z enotnim GRI (Group Repetition Interval) - skupinskim intervalom ponavljanja, določenim v mikrosekundah. Glavna postaja odda zaporedje signalov in se pred oddajanjem naslednjega zaporedja za določen čas ustavi.

Sekundarne postaje sprejmejo ta signal, počakajo prednastavljeno število milisekund (sekundarni zamik kodiranja) in nato oddajo signal odgovora. V dani verigi je vsak sekundarni zamik kodiranja različen, kar omogoča ločitev med signali različnih sekundarnih postaj, vendar se sodobni sprejemniki ne zanašajo na ta postopek identifikacije.

Slika 5: Oddajnik LORAN na Floridi, ZDA

Vsaka veriga LORAN v svetu uporablja drugačen GRI - skupinski interval ponavljanja, ki ga predstavlja število mikrosekund, deljeno z 10 (v praksi so zamiki večkratniki 100 mikrosekund), po katerih pogosto označujemo posamezne verige, npr. GRI 9960, oznaka za verigo na severovzhodu ZDA.

Vse svetovne delujoče verige LORAN pokrivajo le majhen del zemeljske površine. Z njimi upravljajo lokalne vlade in so večinoma postavljene v bližini obalnih pasov z visokim deležem ladijskega prometa.
LORAN je bil velik napredek za radijsko navigacijo.
Kljub temu ima precej pomanjkljivosti, npr:
+ Pokritost s signalom je omejena na največ 5% zemeljske površine
+ Sistem LORAN oddaja signale samo p vzporedno s površino zemeljske oble in je tako primeren le za dvodimenzionalno navigacijo (zemljepisna širina in dolžina). Ne more pa dati informacije o višini, kar bi npr. bilo potrebno za navigacijo letal.

Natančnost sistema LORAN je omejena na približno 250 m.

4.1.5 Doba satelitske navigacije

Da lahko premagamo te omejitve, je bilo potrebno izdelati radijsko-navigacijske sistema, ki imajo oddajnike locirane na satelitih. Sateliti krožijo v orbitah na velikih višinah okrog Zemlje. S tem pridobimo veliko področje pokrivanja s signalom. Koncept je podoben kot ga poznamo v primeru prizemnih sistemov televizijske radiodifuzije in tovrstnih satelitskih sistemov. S prizemnim sistemom lahko sprejemate lokalni televizijski program le na teritoriju večjega mesta, satelitski oddajnik televizijskega programa lahko spremljate na celotnem področju npr. Evrope. Signal navigacijskega satelita lahko pokrije precej velik del zemeljske površine, signali več navigacijskih satelitov lahko pokrijejo površino celotnega planeta.

Teorija v ozadju delovanja satelitske navigacije je podobna tisti v prizemnih sistemih radijske navigacije. V prizemeljskih sistemih so oddajni stolpi naše referenčne točke. Locirani so na Zemlji in razdalja do njih nam da dvodimenzionalnoen podatek o naši lokaciji,(zemeljska širina in dolžina) tako, da izračunamo presečišča krožnic.

Pri satelitskih sistemih so sateliti naše referenčne točke. Z merjenjem razdalje do naših satelitov lahko dobimo tridimenzionalen podatek o naši lokaciji (zemljepisna širina in dolžina in pa višina - X, Y, Z). Dobimo jih tako, da poiščemo presečišča več sfer.

V prizemnih sistemih so lokacije oddajnikov fiksne in jih natančno poznamo. Pri satelitskih sistemih pa sateliti krožijo okrog Zemlje po natančno določenih orbitah. V vsakem trenutku je lokacija satelita znana in sateliti imajo mehanizme kako svojo natančno lokacijo sporočiti sprejemnikom. Natančnost pozicioniranja s pomočjo satelitov je tako tudi odvisna od natančnosti sporočene pozicije satelitov v danem trenutku.
Kroženje satelitov in njihove orbite ves čas spremlja več nadzornih centrov na Zemlji. Ti tudi skrbijo, da so sateliti v orbitah znotraj predpisanih mej odstopanja. Organizacije znajo napovedati položaj satelita v točno določenem času v prihodnosti za nekaj dni vnaprej. Te napovedi nadzorni centri sporočajo satelitom, ki jih potem naprej posredujejo sprejemnikom. Sporočanje pozicije je del protokola, ki ga sateliti uporabljajo v svojih vzorcih, ki jih oddajajo.

Ko gre za navigacijo s pomočjo satelitskih sistemov, se ponovno oziramo v nebo. Tokrat gledamo naprave, ki jih je tja poslal človek in ne več naravnih nebesnih teles. Za razliko od merjenja kotov med napravami tukaj merimo radijske signale, ki nam s pomočjo ustreznega protokola omogočajo merjenje razdalj do referenčnih točk.
Eden prvid satelitskih navigasijskih sistemov je bil Tranzit. Izkušnje, ki jih je prinesel Tranzit in ostali podobni eksperimentalni sistemi so omogočile razvoj trenutnih sistemov, GPS (Global Positioning System), GLONASS (GLObal Navigation Satellite Systems), Gallileo, …

4.2 Navigacijski sateliti

V prejšnjem podpoglavju smo ugotovili da kadar lahko izmerimo razdalje do več satelitov za katere poznamo lokacije, iz njih lahko izračunamo našo lokacijo. Za to morajo biti izpolnjeni trije predpogoji:

1. **Sateliti** – za naše referenčne točke potrebujemo satelite, do katerih lahko merimo razdalje. V vsakem trenutku moramo vedeti natančno lokacijo vsakega satelita.
2. **Koordinatni sistem** – kako bomo določili in zapisali lokacijo satelita in kako bomo določili in zapisali našo lokacijo? Kot se spomnimo iz matematike, bomo za to potrebovali ustrezen koordinatni sistem.
3. **Merjenje razdalj** – kakšen tip elektronskih signalov morajo sateliti oddajati, da bomo lahko z merjenjem teh signalov merili razdalje? Kako jih bomo merili in kako natančno jih bomo merili? Zanima nas tudi kako natančnosti pri merjenju teh signalov vpliva na natančnost izračunane lokacije.

4.2.1 Merjenje razdalj do satelitov

Čas pomeni razdaljo

Med nevihto lahko večkrat opazujemo kako zvok grmenja zaostaja za svetlobo bliska. Razlog je v dejstvu, da potuje svetloba mnogo hitreje kot zvok. Našo oddaljenost od nevihte lahko hitro izračunamo tako, da merimo čas med bliskom in grmenjem ter ga pomnožimo s hitrostjo zvoka. Hitrost zvoka v zraku je približno 344 m/s. Če je med bliskom in grmenjem minilo 3 sekunde, to pomeni, da je naša oddaljenost od nevihte 3s x 344 m/s = 1032 m ali približno 1 km. V tem primeru torej izračunamo razdaljo do objekta z meritvijo časa, ki ga signal potrebuje, da pripotuje do nas.
V tem primeru je čas bliska tudi čas nastanka zvočnih valov. Tako nam svetlobni signal pomeni tudi start, trenutek, ko moramo začeti meriti čas do trenutka ko zaslišimo zvok.
Kaj pa v primeru, da nimamo takšnega začetnega signala? Poglejmo si naslednji primer.

Kode in vzorci

Vzemimo za primer, da vaš prijatelj stoji na koncu velikega polja in neprenehoma glasno šteje od 1 do 10 s hitrostjo ene številke na sekundo. 10 sekund tako traja poln cikel štetja od 1 do 10. Privzemimo, da vi stojite na drugem koncu polja in počnete natanko isto. Štejete naglas od 1 do 10. Privzemimo tudi, da imata oba zelo natančni in med sabo usklajeni uri in da sta začela šteti ob natanko istem času. Ker zvok potuje z določeno hitrostjo, vi pa ste od prijatelja oddaljeni, boste števila, ki jih kliče prijatelj slišali z določenim zamikom. Če tako slišite prijateljevo štetje z zamikom 1 sekunde glede na vaše, to pomeni, da je vaš prijatelj od vas oddaljen 344m (1s x 344m/s = 344m).
Če se zdaj dogovorita, da bosta štela dvakrat hitreje (dve številki na sekundo), bi ista razdalja pomenila, da slišite prijatelja z zamikom dveh števil. V tem primeru pomeni

ena številka razdaljo 172m, vsaka številka pa pomeni 0,5 sekunde. Če bi lahko šteli 100 krat hitreje, bi vsaka številka pomenila 0,01 sekundo in vsaka številka bi pomenila razdaljo 3,44m. Seveda bi v realnosti potrebovali ustrezne naprave in inštrumente, da bi lahko s takšno hitrostjo sprejemali in generirali zvočne signale.
Zdaj privzemimo, da ste od prijatelja precej oddaljena in da štejeta zelo hitro, recimo 0,01 sekundo (vsak razmak med številkama pomeni 3,44m) in kot prej oba neprenehoma štejeta od 1 do 10. Recimo da slišite prijatelja, da reče 5 ravno takrat ko vi rečete 7. Slišite razliko2 števil, ampak veste, da je razdalja med vama več kot 6,88m. To je zato, ker je zamik ni samo 2 števili, ampak 2 števili plus nekaj večkratnikov števila 10 (nekaj večkratnikov *cikla vzorca*). To je enako kot na primer, če je vaš meter, s katerim merite razdaljo, prekratek, in nato izmerite razdaljo kot nekajkratnik maksimalne dolžine metra plus nek manjši del metra.
Neznani večkratnik vzorca cikla imenujemo »*neznano celo število*«.

Če bi zdaj vi in vaš prijatelj namesto od 1 do 10 štela od 1 do 1000, bi lahko slišala zamik 212 števil med številko, ki jo slišite in številko, ki jo v tistem trenutku izgovarjate. To bi pomenilo 212 števil krat 3,44 je 729,28 metrov. To bi pomenilo 21 polnih ciklov vzorca od 1 do 10 plus dve števili.
Število polnih ciklov – 21 – ki ga z našim kratkim vzorcem od 1 do 10 nismo mogli zaznavati imenujemo sedaj neznano celo število.

Kar smo želeli prikazati v prejšnjem odstavku je koncept ***resolucije vzorca*** oz. finosti označb na merilnem traku in ***dolžine vzorca*** oz. dolžine našega merilnega traku..

Vse kar smo opisovali doslej deluje po enakem principu kot merjenje razdalje do satelitov, le s to razliko, da sateliti oddajajo elektronske vzorce. Prav tako sprejemnik generira enake elektronske vzorce in jih primerja s tistimi, ki jih sprejema od satelitov. Na ta način meri razdaljo do satelitov.

Navigacijski sateliti generirajo dva tipa vzorcev. Eden ima granulacijo približno 1 mm in dolžino približno 20 cm. Drugi ima granulacijo približno 1 meter in praktično neomejeno dolžino. Prvega imenujemo **Nosilec – »Carrier**«, drugega pa imenujejo **Koda – »Code**«. Razdalja, ki jo merimo z nosilcem, se imenuje **Faza Nosilca** oz. »Carrier Phase«, razdalja izmerjena s kodo pa se imenuje **Faza Kode** »Code Phase«. Ker je vzorec kode dolg, so meritve faze kode kompletne, končne in ne vsebujejo neznanega celega števila. Tako lahko na primer izmerimo razdaljo do satelita npr. 12.345.678 metrov. Po drugi strani pa je vzorec nosilca kratek in ima veliko neznano celo število. Lahko bi rekli, da je naša razdalja do satelita 18.7 centimetrov plus neko neznano celo število ciklov nosilca. V tem primeru je neznano celo število ranga nekaj deset milijonov. Če to neznano število ostane neznano, si z meritvijo ne moremo kaj dosti pomagati pri določanju naše lokacije.

Problem neznanega začetnega celega števila (Integer Ambiguity**)**
Vrnimo se k primeru s kratkim vzorcem iz prejšnjega podpoglavja, ko sta s prijateljem stala na polju in štela od 0 do 10. Sedaj stojita drug poleg drugega in začneta šteti od nič. Razdalja med vama je 0. Nato se prijatelj začne oddaljevati. Razlika med števili se povečuje in ko doseže 9, pade nazaj na 0. Ampak to je v

resnici 10 in ne 0. Ta ničla pomeni en celoten cikel vzorca. To sedaj vemo zato, ker smo štetje in oddaljevanje spremljali od vsega začetka. Ves čas, ko se prijatelj oddaljuje dodajamo cikle in v tem primeru je naše celo število ciklov znano in problema neznanega celega števila zato nimamo.
V primeru, da začneta štetje na neznani razdalji, začneta z neznanim celom številom ciklov. Zdaj se ali približujeta drug drugemu ali pa se oddaljujeta drug od drugega, v obeh primerih število polnih ciklov odvzemamo ali pa dodajamo **neznanemu začetnemu celemu številu** ciklov. Ves čas v tem primeru je neznano začetno celo število isto. To velja dokler vaju ves čas spremljamo. Če pa sled izgubimo in začnemo štetje spremljati znova, pa dobimo seveda novo neznano začetno celo število.
Koncept kode in nosilca je zelo pomemben. Za boljše razumevanje si poglejmo še en primer analogije. Faza Kode je kot ura, ki ima samo kazalec, ki kaže ure. Kadarkoli lahko pogledate na to uro in približno veste koliko je ura.
Faza nosilca pa je kot ura, ki ima samo sekundni kazalec. Pretečeni čas lahko sledite do sekunde natančno, ampak le v primeru, da natančno spremljate koliko polnih minut je preteklo. Če lahko nekako ugotovite število polnih začetnih minut (to je neznano začetno celo število minut v trenutku, ko ste uro začeli spremljati), potem lahko sledite času zelo natančno. Če izgubite pozornost in izgubite sled o številu pretečenih minut, potem imate ponovno novo neznano začetno celo število, ki ga morate nekako ugotoviti. S fazo kode, uro samo z urnim kazalcem, lahko vedno takoj dobite čas v dnevu, vendar le približno z 10 minutno natančnostjo. Dosežete jo tako, da približno ocenite lokacijo kazalca na uri. To vam določanje neznanega začetnega celega števila zmanjša le na plus minus nekaj (celih) minut.
Opazimo, da med urnim in sekundnim kazalcem manjka minutni. Vmes je vrzel.

Pri razvoju GPS sistema je bila posebna pozornost namenjena temu, kako meritev izvesti čim hitreje in čimbolj natančno. Zato je sistem zasnovan tako, da obstaja vrzel med fazo kode in fazo nosilca, ampak sta oba izbrana tako, da se vrzel zmanjša čimbolj učinkovito.
Neznano celo število lahko hitro določimo tako, da spremljamo satelite nekaj časa. Ko je celo število določeno, je pomembno, da stalno sledimo fazi nosilca. Lahko se zgodi, da zaradi šuma, motenj ipd. za kratek čas izgubimo sled in izgubimo celo število ciklov ali pa celo več. Ta pojav v GPS terminologiji imenujemo zdrs cikla – **»Cycle Slip«.**
To nam lahko opvzroči precejšnjo napako v meritvi. Ampak večino GPS sprejemnikov ima implementirano tehniko, ki detektira tovrstne zdrse in jih popravi.

Glede na teoretično zasnovo sistema in izbrane signalizacije lahko v sistemu GPS merimo razdalje do satelitov z natančnostjo 1 metra s fazo kode in 1 milimeter s fazo nosilca. To ne pomeni, da lahko določamo pozicijo GPS sprejemnika za natančnostjo 1 metra oz. 1 milimetra. Razlog temu je precej dejavnikov, ki v sistem vnašajo napake in nenatančnosti meritve. Natančneje jih bomo opisali v naslednjem podpoglavju.

4.3 Viri napak

V prejšnjih podpoglavjih smo predpostavljali, da sta uri oseb na nasprotnih koncih polja sinhronizirani, osebi pa sta štetje začeli hkrati. Če predpostavimo, da ena ura prehiteva ali zaostaja za drugo za eno sekundo, se bo to poznalo kot 344 m napake pri izmerjeni razdalji saj v eni sekundi zvok prepotuje 344 metrov. Če merimo razdaljo s pomočjo satelitov, prepotuje elektronski signal v eni sekundi 300.000.000 metrov (hitrost svetlobe). Napake v satelitski uri in uri sprejemnika torej znatno prispevajo k napaki izmerjene razdalje.

4.3.1 Satelitska ura

Ena miljardinka sekunde (ena nanosekunda) nenatančnosti satelitske ure prispeva 30 cm napake v merjenju razdalje do tega satelita, zato so sateliti opremljeni z izredno natančnimi cezijevimi atomskimi urami. Tudi te, sicer izredno natančne ure pridelajo približno eno milijardinko sekunde vsake tri ure. Za kompenzacijo teh napak so sateliti nenehno nadzorovani iz zemeljskih postaj, satelitske ure pa so primerjane z glavnim časovnim nadzornim sistemom, ki ga sestavlja deset izredno natančnih atomskih ur. Napake satelitskih ur se nenehno izračunavajo, poročilo o njih pa je del sporočil, ki jih oddajajo sateliti. GPS sprejemniki odštevajo napake satelitske ure od posredovanih oddajnih časov, da dobijo pravilen čas potovanja signala.

Kljub velikemu trudu kontrolnih centrov, da opazujejo obnašanje vsake satelitske ure, je nemogoče povsem natančno ugotoviti napake ur v satelitih. V praksi je vsota vseh napak ure nekaj nanosekund, kar se pri merjenju razdalje odraža kot napaka približno en meter.

4.3.2 Ura v sprejemniku

Enako kot pri satelitskih urah, se tudi napaka v uri GPS sprejemnika odraža v merjenju razdalje. Problem pa je, ker v GPS sprejemnike ne moremo vgraditi zelo natančnih atomskih ur, saj vsaka atomska ura tehta več kot 20 kilogramov, stane več kot 50.000,00 USD in zahteva pazljivo rokovanje ter temperaturno kontrolo.
Predpostavimo, da ima ura v sprejemniku napako eno milisekundo, kar povzroči napako v izmerjeni razdalji približni 300.000 metrov. Če merimo razdaljo do satelitov ob natančno istem času, potem je sprejemnik izmeril enako napako v razdalji (300.000 metrov) do vseh satelitov. Napako v uri sprejemnika lahko torej obravnavamo kot neznanko, ki jo moramo ugotoviti. V prejšnjih podpoglavjih smo ugotovili, da nam lokacijo določajo tri neznanke (X, Y in Z). Če dodamo tem trem neznankam še novo neznanko, imamo namesto treh štiri neznanke, torej poleg treh, ki nam povedo lokacijo še četrto, ki je napaka sprejemnikove ure. Za določitev štirih neznank, potrebujemo torej štiri enačbe. Meritev razdalje do štirih satelitov, nam da vse štiri potrebne enačbe. Namesto treh satelitov potrebujemo sedaj štiri, vendar pa zato ne potrebujemo drage in nepraktične atomske ure v našem GPS sprejemniku.
Vedeti pa moramo, da je koncept napake ure kot ene neznanke veljaven le, kadar merimo razdaljo do satelitov ob natančno istem času. Če temu ni tako, potem imamo za vsako meritev različno uro.

S hkratnimi meritvami razdalje do štirih satelitov ne izračunamo le treh kordinat naše pozicije, pač pa tudi ugotovimo napako ure v sprejemniku z zelo dobro natančnostjo. Tipična ura ima vsako sekundo približno 1000 ns pogreška, toda uro sprejemnik lahko sedaj prilagajamo natančni GPS uri, kar nam naredi iz navadne ure natančno atomsko uro. Sprejemniki popravljajo uro vsako sekundo in zagotavljajo natančno uro tudi za zunanje uporabnike. Če postavimo sprejemnik v natančno poznano lokacijo, potrebujemo samo en satelit, da sproti korigiramo uro.
Štiri je torej minimalno število satelitov za izračun pozicije in časa. Več kot imamo satelitov, bolj natančne rezultate lahko dobimo. To bo kasneje opisano še bolj natančno v podpoglavju o GDOP.

4.3.3 Napake satelitske orbite

Kot smo ugotovili že prej, je izračunana razdalja tudi odvisna od tega, kako natančno poznamo lokacijo satelitov (referenčne točke). Več opazovalnih postaj po vsej Zemlji opazuje satelitske orbite GPS satelitov. Predvideno orbitalno informacijo postaje pošiljajo satelitom, ti pa jo naprej pošiljajo GPS sprejemnikom. Zgodovina sistema GPS je pokazala, da je natančnost predvidevanja orbite reda nekaj metrov, kar povzroči nekaj metrov napake pri računanju naše pozicije. V nadaljevanju bomo tudi opisali, kako to napako odpraviti.

4.3.4 Atmosferske napake: Ionosfera in Troposfera

Ionosfera

Pri računanju razdalje do satelita najprej izmerimo čas, ki je potreben, da signal prepotuje od satelita do GPS sprejemnika in ga pomnožimo s svetlobno hitrostjo. Problem pa nastopi, ker je hitrost potovanja svetlobe odvisna od razmer v atmosferi. Zgornji del atmosfere, ki se imenuje Ionosfera, vsebuje nabite delce, ki upočasnjujejo kodo in pospešujejo nosilec.
Ionosferski vpliv je bistveno večji čez dan kot pa ponoči. Velikost vpliva ima tudi ciklično periodo, ki traja 11 let. V zadnjem obdobju je ionosferski vpliv dosegel maksimum leta 1998 in svoj minimum leta 2004. Cikel se nato ponovi. Če ne blažimo posledic ionosferskih napak, lahko to doprinese k več kot 10 m napake pri merjenju razdalje do satelitov.
Nekateri sprejemniki uporabljajo matematični model ionosferskih efektov. Če predpostavimo, da poznamo približno vrednost naboja ionosferskih delcev (informacija od satelitov), lahko ionosferski efekt zmanjšamo za približno 50 %, vendar je preostala napaka še vedno nezanemarljiva.
Vpliv ionosfere na elektronske signale je odvisen od frekvence signala. Višja kot je frekvenca, manjši je vpliv. Če torej vzorce oddajamo simultano na dveh frekvencah, bo ionosfera zakasnila signal na eni frekvenci npr za 5 metrov in na drugi npr za 6 metrov. Sicer ne moremo izmeriti velikosti teh zakasnitev, lahko pa izmerimo razliko v zakasnitvi. V našem primeru je zakasnitev 1 meter. Iz znanih formul s spremenljivko frekvence lahko izračunamo ionosfersko zakasnitev in tako eliminiramo ionosferski efekt.
Prav iz tega razloga oddajajo vsi sateliti informacijo na dveh frekvencah, ki ju imenujemo *L1* in *L2*. Natančni GPS sprejemniki sprejemajo obe frekvenci, da

eliminirajo ionosferski efekt. Vsi običajno GPS sprejemniki sprejemajo le signal *L1.* To je tudi ena glavnih razlik med različnimi tipi GPS sprejemnikov.
V angleščini se je za sprejemnike, ki sprejemajo signal le na eni frekvenci, uveljavil izraz »single frequency receiver«, med tem ko se je za sprejemnike, ki sprejemajo signal na dveh frekvencah uveljavili izraz »dual frequency receiver«. Sprejemniki tipa »dual frequency receivers praktično eliminirajo celoten ionosferski efekt.
Ker signal *L2* ni v celoti na voljo širši javnosti, so bile v GPS sprejemnike implementirane sofisticirane metode, ki so sposobne iz signala *L2* izluščiti kodno in nosilno razdaljo tudi samo z delno prisotnostjo signala *L2*. Izkazalo je, da je takšna rešitev povsem sprejemljiva za civilne uporabnike, hkrati pa ne ogroža varnostnih pravil ameriškega ministrstva za obrambo, ki preprečujejo zlorabe sistema.
Obstajale so razprave o ločitvi frekvenc za civilne in vojaške namene, ki pa so se izkazale za nerelevantne, saj obstoječi sistem povsem zadosti potrebam civilnega uporabnika.

Troposfera
Nižji sloj atmosfere, ki vsebuje vodne hlape, se imenuje troposfera. Troposfera upočasnjuje tako kodo, kot tudi nosilec. Troposferskega efekta se ne da odstraniti z uporabo dveh frekvenc. Edini način, kako lahko odstranimo troposferski efekt je z merjenjem njegove vsebnosti vodnih hlapov, temperature in pritiska in na osnovi matematičnih modelov izračunati zakasnitev zaradi troposfere.

4.3.5 Širjenje signala po več poteh

Pri merjenju razdalje do vsakega satelita predpostavljamo, da potuje signal direktno od satelita do sprejemne antene. Zavedati pa se moramo, da sprejemnik poleg direktnega signala sprejema tudi odboje od tal in objektov blizu antene, ki dosežejo anteno preko indirektnih poti in interferirajo z direktnim signalom. Tako združen signal povzroči negotovost o prihodu pravilnega signala, enako kot lahko negotovost povzroči odboj od bližnjih gora v našem ilustrativnem primeru. Če je indirektna pot bistveno daljša od direktne, takšna da se dva vzorca signala lahko ločita, potem je mogoče problem širjenja signala po več poteh uspešno eliminirati s pomočjo signalnega procesiranja.

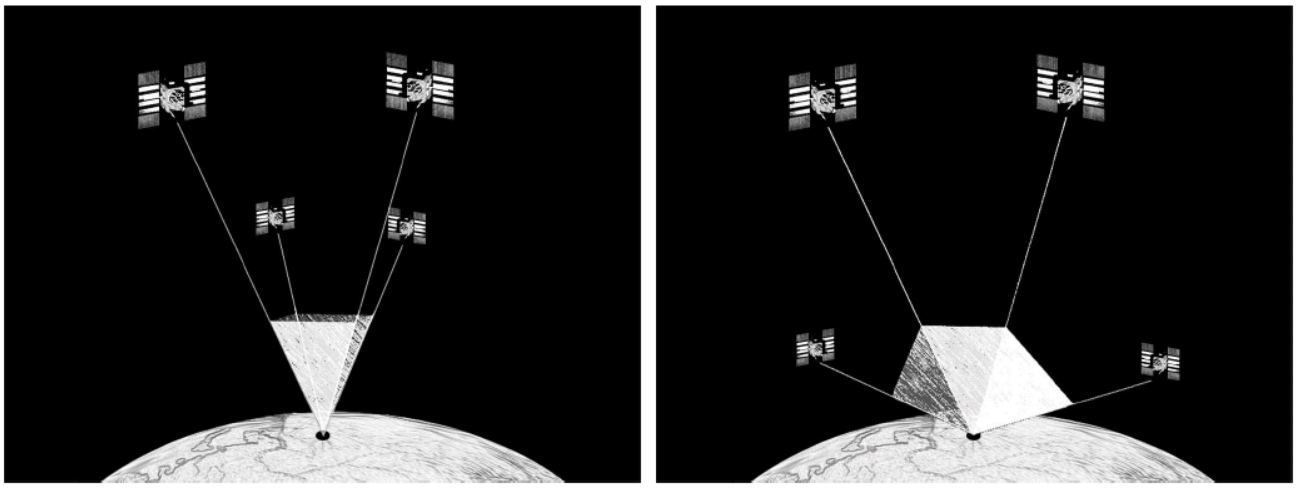
4.3.6 Napake v sprejemniku

Sprejemniki lahko prispevajo k napaki pri merjenju kode ali nosilca predvsem zaradi toplotnega šuma. Pri visoko kvalitetnih sprejemnikih je ta napaka zanemarljiva in znaša pri merjenju nosilca manj kot en milimeter in pri merjenju kode manj kot en centimeter.

4.3.7 GDOP (Geometrical Dilution Of Precision)

Do sedaj smo se pogovarjali o napakah pri merjenju razdalje do satelitov. Vprašanje pa je, kako tovrstne napake vplivajo na napake v izračunani poziciji, oziroma z drugimi besedami koliko metrov napake v izračunani poziciji, nam povzroči en meter napake pri meritvi razdalje do satelitov.
Odgovor na to vprašanje je, da je napaka odvisna od števila satelitov in od geometrijskega položaja satelitov, ki jih uporabimo. Če so štirje sateliti, ki jih

uporabimo zelo blizu skupaj, potem lahko en meter napake pri izračunu razdalje do satelita povzroči deset ali celo več sto metrov napake v izračunu pozicije. Če pa so sateliti bolj enakomerno razporejeni po nebu, potem je lahko napaka v poziciji manj kot 1.5 m za vsak meter napake v izmerjeni razdalji. Efekt vpliva geometrije na natančnost določitve pozicije se imenuje GDOP (Geometric Dilution Of Precision), ki ga lahko v grobem interpretiramo kot razmerje med napako v poziciji in napako v izmerjeni razdalji do satelitov.
Predstavljajmo si tetraeder, ki ga formirajo črte, ki povezujejo sprejemnik do vsakega izmed štirih satelitov. Večji kot je volumen tetraedra, manjši (boljši) je GDOP. V večini primerov pomeni tudi večje število satelitov manjši GDOP.



Slika 6: GDOP

4.3.8 Selektivna razpoložljivost: Umetno ustvarjene napake

Napake zaradi satelitske ure, satelitske orbite, ionosfere, troposfere, širjenja signala po večih poteh ter napake sprejemnika tipično prispevajo k manj kot 10 m napake pri merjenju razdalje do satelitov, kar se pri tipičnih vrednostih GDOP (okoli 2) odraža na napaki lokacije približno 20 m.
Ameriško ministrstvo za obrambo je ocenilo, da je takšna natančnost za širšo javnost proti ameriškim narodnim interesom. Zato je ameriško ministrstvo uvedlo namerne napake, da zmanjša natančnost sistema GPS na okrog 100 m. To se imenuje selektivna razpoložljivost (Selective Availability - SA) in je implementirana z omejevanjem natančnosti satelitskih ur in napačnimi podatki o orbiti satelitov. Vojaški sprejemniki so opremljeni s posebno strojno opremo in kodami, ki odstranijo efekt SA. GPS administratorji na zemlji lahko SA vključijo ali izključijo.

4.4 Odpravljanje virov napak

Niti natančnost na 100 metrov (SA vključen) niti natančnost na 20 metrov (SA izključen) včasih nista dovolj za mnogo aplikacij, ki se uporabljajo v civilne namene. Od začetka delovanja sistema GPS se razvijajo metode, ki zmanjšujejo napake in izboljšujejo natančnost, tudi s prisotnostjo SA in uporabo ene same frekvence.

4.4.1 Diferencialni način

Predpostavimo, da imamo dva sprejemnika, ki med sabo nista preveč oddaljena. Napake zaradi satelitske ure, satelitske orbite, ionosfere, troposfere in SA se enako, z enako jakostjo odražajo v obeh sprejemnikih. Če bi poznali natančno lokacijo enega sprejemnika, bi lahko ta podatek uporabili za izračun napake v meritvi in napako posredovali drugemu sprejemniku. Drugi sprejemnik bi lahko ta podatek uporabil za kompenzacijo napake. Princip imenujemo Diferencialni način (Differential mode).

Sprejemnik na znani lokaciji se imenuje referenčni sprejemnik (base receiver), tisti z neznano lokacijo pa se imenuje uporabniški sprejemnik (rover receiver). Referenčni sprejemnik računa svojo trenutno razdaljo do satelitov, ki temelji na znani poziciji in trenutni lokaciji satelitov. Sprejemnik nato primerja izračunano razdaljo in izmerjeno razdaljo za vsakega izmed satelitov. Razlika med njima je napaka v meritvi razdalje do satelita, oz. korekcijska vrednost za vsak posamezni satelit. To vrednost posreduje uporabniškemu sprejemniku, ki za vsak satelit od svojih izmerjenih rezultatov odšteje korekcijsko vrednost in na ta način natančneje določi svojo pozicijo.

Zaradi gibanja satelitov in sprememb v njihovih urah se korekcijske vrednosti spreminjajo zelo hitro, zato jih mora referenčni sprejemnik ažurno računati in sporočati uporabniškemu sprejemniku.

Zavedati se moramo, da natančno poznavanje pozicije referenčnega sprejemnika direktno vpliva na natančnost pozicije, ki jo izračuna uporabniški sprejemnik. Če v referenčni sprejemnik vnesemo napako, ki je napačna v eni določeni smeri, se bo ta napaka odražala na lokaciji uporabniškega sprejemnika v enaki smeri in z enako velikostjo.

Razdalja med referenčnim in uporabniškim sprejemnikom se imenuje »baseline«. Če je ta razdalja majhna, kar pomeni če sta sprejemnika zelo blizu, so napake v izmerjenih razdaljah skoraj enake. V tem primeru lahko napake, ki jih izračuna referenčni sprejemnik za svoj izračun pozicije uporabi uporabniški sprejemnik. Če se ta razdalja veča, se slabša korelacija med napakami v razdalji do satelitov. Z drugimi besedami pomeni to, da bodo v izračunani poziciji ostale neke napake ki so odvisne od bližine referenčnega sprejemnika. Če to napako ocenimo čez palec, pomeni to milimeter napake za vsak kilometer razdalje med sprejemnikoma, če predpostavimo uporabo dveh frekvenc. To lahko okrajšano zapišemo tudi kot 1 ppm (part per million, oz. en delec na milijon). Napaka se poveča na 2 ppm pri uporabi ene same frekvence.

Diferencialni način odstrani vse napake, razen napake, ki je posledica širjenja signala po več poteh in napake v sprejemniku. Te napake so odvisne od vsakega posameznega sprejemnika, zato jih diferencialni način ne odpravi.

Napaka sprejemnika (oz. toplotni šum) je tipično okrog 10 cm za pri merjenju kodne razdalje in 1 mm pri merjenju nosilne razdalje. Pri visokokvalitetnih sprejemnikih so te vrednosti še bistveno manjše. Napaka zaradi širjenja valov po večih poteh pa je

lahko več metrov za kodni signal in več centimetrov za nosilni signal. Če nekako poskušamo odpraviti napake zaradi širjenja signala po večih poteh, lahko dosežemo milimetrsko natančnost nosilnega signala in decimetrsko natančnost kodnega signala. Odpravljanje tovrstnih napak ni predmet tega poglavja, zato le predpostavimo, da se tudi te napake da ublažiti.
Zgodovinsko gledano se je diferencialni način z uporabo merjenja kodne razdalje imenoval DGPS, z uporabo merjenja nosilne razdalje pa CPD (Carrier Phase Differential). Merjenje nosilne razdalje v diferencialnem načinu v realnem času se je imenovalo RTK (Real time Kinematic). V aplikacijah, ki niso tekle v realnem času, so se uporabljali termini »static«, oz. »kinematic«. V nadaljevanju bomo opisovali DGPS in RTK. Opisi veljajo enako za sisteme, ki niso v realnem času.
Pri diferencialnem načinu merjenja z nosilcem so izračuni bistveno kompleksnejši, saj se moramo soočiti z dodatnimi neznankami začetnih polnih ciklov. Za odpravo dvoumnosti je potrebno več minut. Ko enkrat to ugotovimo, je vsak naslednji izračun pozicije takojšen. Kakor hitro pa izgubimo povezavo s štirimi sateliti, je potrebno te dvoumnosti ponovno razrešiti, kar zopet traja več minut. Nasprotno pa nam diferencialni način za kodno razdaljo da takojšnje podatke, vendar je rezultat manj natančen.

4.4.2 DGPS

Če v sistemu DGPS referenčni sprejemnik pošilja uporabniškemu sprejemniku podatke v realnem času, potem se sistem imenuje »real-time DGPS«, oz. DGPS v realnem času. Takšen sistem nam daje natančne rezultate v realnem času. To je uporabno, kadar npr. določamo točke na terenu, ali pa postavljamo objekte na točno določene položaje. Če ne potrebujemo sistema v realnem času (npr. pri izdelavi zemljevidov), lahko oba sprejemnika enostavno zapisujeta izmerjene podatke v svoj računalniški pomnilnik, diferencialne popravke pa opravi uporabnik takrat, ko prinese svoj GPS sprejemnik k referenčnemu.
DGPS temelji na merjenju kodnih razdalj do satelitov. Kot smo opisali že v prejšnjih podpoglavjih je kodno merjenje kot merilni trak, ki ima oznake le na vsak meter. Razdalje lahko zato merimo v vsakem trenutku, vendar z manjšo natančnostjo.

4.4.3 RTK

RTK temelji na merjenju razdalj do satelitov s pomočjo nosilca. Tudi tukaj lahko potegnemo analogijo z merilnim trakom, ki ima metrske in milimetrske označbe, le da se tukaj metrska označba ne pojavi takoj, ko se povežemo na satelit. Počakati moramo, da se metrska označba pojavi in da postane jasna, da lahko potem pravilno izmerimo razdaljo. To je čas, ki ga moramo počakati, da določimo začetne neznanke. Dlje kot čakamo, bolj natančne postajajo te označbe. Ko enkrat ta podatek imamo, lahko razdalje merimo hipno, saj ni potrebno ponovno določati neznank. Če pa povezavo s satelitom vmes izgubimo, se izgubi tudi ta podatek, kar pa pomeni ponovno čakanje.
Če so prekinitve satelitskega signala zelo kratke, lahko sprejemnik nadaljuje z isto oceno celega števila, kot ga je ugotovil predhodno.
Če sprejemnik ugotovi napačno vrednost, pomeni to enako kot da bi prebral napačno vrednost na metrski označbi na merilnem traku. Če to ponazorimo s primerom, je to

tako kot da bi razdaljo 3874 m izmerili kot 4874 m. Milimetrsko razdaljo preberemo natančno, zgrešimo pa pri metrski označbi, kar pa seveda pomeni precejšnjo napako.
Ko sprejemnik pravilno razreši dvoumnosti, je natančnost izračunane razdalje med 0.5 cm horizontalno in med 1 in 3 cm vertikalno (odvisno od zmožnosti antene koliko odbitih signalov lahko izloči) plus 1 ppm za dvofrekvenčne sprejemnike in 2 ppm za enofrekvenčne sprejemnike. Vsi proizvajalci GPS sprejemnikov navajajo te točnostne razrede, vendar veljajo samo pod predpostavko, da pravilno določimo celo število.
Ugotovitev pravilnega celega števila je torej bistvenega pomena pri RTK. Vprašanje je le, kako dolgo bo sprejemnik potreboval, da zanesljivo ugotovi celo število, za tem, ko je ujel satelitski signal. Še enkrat poudarimo, da pomeni napačna določitev celega števila enake posledice, kot da bi na metru napačno odčitali metrsko označbo, še naprej pa bi se trudili z milimetrskim odčitavanjem razdalje.
Za kratke razdalje med referenčnim in uporabniškim sprejemnikom (manj kot 10 km), je čas v katerem uspemo določiti število odvisen od:

- S kakšno verjetnostjo želimo določiti pravilno celo število
- Števila satelitov
- Ali uporabljamo dve ali eno frekvenco
- Jakosti odbitih signalov
- Sposobnosti antene ublažitve odbitih signalov

Da bi lažje razumeli odvisnost določitve pravilne vrednosti od zgoraj navedenih faktorjev, so ti faktorji spodaj razloženi kvantitativno:

- Ob enakih ostalih razmerah lahko pravilno določimo celo število z 99% verjetnostjo v 10 s, z 99.9% verjetnostjo pa v 100s.
- Ob enakih ostalih razmerah lahko število s 15 sateliti določimo v 1 sekundi in v 100 sekundah z 8 sateliti.
- Ob enakih ostalih razmerah lahko z dvema frekvencama celo število določimo v 10 sekundah, z eno samo frekvenco pa v 2 minutah. Pri kratkih razdaljah med referenčnim in uporabniškim sprejemnikom pomeni uporaba dveh frekvenc enako kot bi imeli 50% več satelitov.
- Ob enakih ostalih razmerah lahko ugotovimo celo število v 10 sekundah, če se signal odbije od suhih tal in v 20 sekundah, če se signal odbije od mokrih tal. Odbiti signal od mokrih tal je skoraj tako močan kot direktni signal.
- Ob enakih ostalih razmerah, lahko ugotovimo celo število v 10 sekundah z anteno, ki ima dobro odstranitev odbitih signalov in 200 sekund z navadno anteno. Odbiti valovi so tudi glavni vir napak pri oceni števila.

Število satelitov je najpomembnejši faktor za odpravljanje dvoumnosti hitro in zanesljivo. Čez palec lahko ocenimo, da je potrebnih vsaj osem satelitov pri kratkih razdaljah med referenčnim in uporabniškim sprejemnikom. Pri dolgih razdaljah pa je potrebnih vsaj osem satelitov in uporaba obeh frekvenc.
S samim sistemom GPS imamo na voljo 8 satelitov samo 32% časa, 9 satelitov pa le 5% časa. Več kot 9 satelitov je vidnih zelo redko. Sistem GPS ima 6 satelitov na voljo 96% časa, kar pomeni, da je uporaba dveh frekvenc komaj dovolj za RTK pri kratkih razdaljah med referenčnim in uporabniškim sprejemnikom.
Sistema GPS in GLONASS imata vedno na voljo vsaj 9 satelitov, 99% časa več kot 10 in 96% časa več kot 11.

GPS sprejemniki, ki uporabljajo eno samo frekvenco redko delujejo pri majhnih razdaljah med referenčnim in uporabniškim vmesnikom in nikoli pri dolgih razdaljah.
GPS+GLONASS sprejemniki, ki uporabljajo eno samo frekvenco vedno delujejo pri majhnih razdaljah med referenčnim in uporabniškim vmesnikom in nikoli pri dolgih razdaljah.
GPS sprejemniki, ki uporabljajo dve frekvenci vedno delujejo pri majhnih razdaljah med referenčnim in uporabniškim vmesnikom in redko pri dolgih razdaljah.
GPS+GLONASS sprejemniki, ki uporabljajo dve frekvenci so edini sprejemniki, ki vedno delujejo za dolge in kratke razdalje med referenčnim in uporabniškim vmesnikom.

4.4.4 Drugi škodljivi vplivi na signal

Poleg težav, ki smo jih omenjali do sedaj, se pojavljajo še drugi škodljivi vplivi, kot npr. izginjanje signala, interferenca (lastna in interferenca s tujimi signali) in senčenje, s katerimi se prav tako moramo spopasti. Sprejemniki, ki jih uporabljamo v RTK aplikacijah morajo imeti še posebno dobre lastnosti sledenja satelitom, hkrati pa morajo biti sposobni v čim večji meri zaobiti te pomanjkljivosti, saj moramo ob vsaki izgubi kontakta s satelitom ponovno čakati na določitev celih števil.