

Principiile sistemelor de radionavigație

prof. dr. inginer Vlad Cehan

2008

Cuprins

capitolul 1. Navigare. Generalități. Procedee și sisteme de navigație	1
1.1. Navigare. Generalități	1
1.2. Sisteme geodezice de referință	1
1.3. Sisteme de radionavigație	3
1.3.1. Sisteme de radiodirecționare	3
1.3.2. Sisteme de radionavigație hiperbolice fără sateliți	5
1.3.2.1. Principiile radionavigației hiperbolice	5
1.3.2.2. Principalele sisteme de radionavigație hiperbolică fără sateliți	6
1.3.2.3. Sisteme de radionavigație hiperbolică terestre	6
a. Sistemul Sonne/CONSOL	6
b. Sistemul GEE	7
c. Sistemul LORAN	8
capitolul 2. Principiile de funcționare ale sistemului global de poziționare (GPS)	12
2.1. Introducere	12
2.2. Structura GPS	14
2.3. Principiile de poziționare prin GPS	15
2.3.1. Principiul trilaterăției în spațiu	15
2.3.2. Poziționarea absolută prin GPS	16
2.3.3. Erori în determinarea poziției prin GPS	19
2.3.4. Poziționarea diferențială prin GPS (GPS diferențial)	21
capitolul 3. Semnalele utilizate de sateliții GPS	23
3.1. Introducere	23
3.2. Mesajul de navigație (fluxul de date cu 50 bps)	25
3.3. Codul de achiziție grosieră (C/A Code – Coarse Acquisition Code)	27
3.3.1. Principiile tehnicii spread spectrum	27
3.3.2. Funcțiile codului C/A	29
3.3. Codul de achiziție precisă (P Code – Precise Code)	30
Bibliografie	34

capitolul 1

Navigare. Generalități. Procedee și sisteme de navigație

1.1. Navigare. Generalități

Navigarea este știința conducerii unui vehicul prin determinarea poziției, traseului și distanței parcurse, astfel încât să ajungă dintr-un punct în altul în condiții de siguranță și eficiență, pe drumul prevăzut¹.

Elementul esențial al navigării este determinarea poziției vehiculului.

Navigarea prin obsevarea mediului – relief, localități, clădiri etc. (pe uscat), linia țărmului, faruri, balize, ... (pe apă), este cel mai simplu procedeu de navigare; se folosesc și hărți cu astfel de repere specificate. Evident, procedeu nu este potrivit pentru călătorii pe distanțe foarte mari, mai ales pe mări și oceane, unde reperele lipsesc.

Pentru navigarea pe mări s-au folosit – și încă se folosesc, alte procedee de navigare precum:

Navigarea celestă, în care poziția se stabilește prin observarea soarelui, lunii, anumitor stele sau planete. Practic, se măsoară înălțimea (unghiul față de orizont) a cel puțin două repere celeste și se trasează cercurile “de egală înălțime”² – la intersecția (încrucișarea) acestora se află operatorul.

Navigarea prin estimare sau poziționarea deductivă (Dead Reckoning) este un procedeu în care se stabilește direcția – cu o busolă, observând o stea, ..., se măsoară timpul și se estimează viteza deplasării din care se calculează distanța parcursă – astfel se aproximează poziția vehiculului.

De regulă se utilizează cel puțin două procedee, determinând astfel o zonă – uzual triunghiulară, în care se află, cu mare probabilitate, vehiculul.

Cele trei procedee de mai sus au fost, mii de ani, singurele folosite – până la dezvoltarea electronicii și radiocomunicațiilor, în timpul și după al doilea război mondial (după 1940).

În ultimii 60 de ani s-au dezvoltat multe procedee de navigare electronică:

- *radionavigația*, în care se folosesc unde radio; cel mai perfecționat sistem este GPS, cu sateliți;
- *sistemele de navigație inerțială* – cu giroscopae, accelerometre și vitezometre;
- *sistemele Radar* folosite în principal pentru evitarea coliziunilor dar și pentru determinarea distanțelor și a poziției.

Sistemele electronice, mai ales cele de radionavigație, au marele avantaj al independenței față de vreme, de condițiile de vizibilitate, la care se adaugă precizia net superioară față de celelalte procedee de navigare.

1.2. Sisteme geodezice de referință

Poziția unui punct în spațiu se stabilește într-un sistem de coordonate spațiale, care pot fi: carteziane (Oxyz), cilindrice, sferice, elipsoidale etc.

O primă și esențială problemă în navigare constă în adoptarea unui sistem de coordonate potrivit pentru fizarea poziției punctelor pe Pământ, având în vedere că planeta noastră este un corp neregulat, cu formă complicată și contur variabil (altitudinea suprafeței variază în

¹ Enciclopedia Britanica, 2004.

² Locul geometric al punctelor de pe Pământ din care o stea se vede sub aceeași înclinație este un cerc.

limite largi). Sistemele de referință atașate Pământului pentru poziționarea punctelor se numesc *sisteme* (de referință) *geodezice* (Geodetic System).

Până în urmă cu circa 60 de ani, se foloseau sisteme geodezice la nivel de țară sau continent; pentru mări și oceane se foloseau sisteme acceptate de mai multe țări. Odată cu “mondializarea” sistemelor de navigație electronică, a devenit imperios necesară adoptarea unui sistem unic, unanim acceptat și suficient de precis, care să permită poziționarea unui punct cu bună precizie. Astfel, au apărut sistemele geodezice mondiale (World Geodetic System – WGS) care s-au perfecționat mereu. În prezent se folosește **WGS-84** elaborat în SUA (1984), după mai multe variante militare și civile (WGS 60, 66, 72, ...).

În principiu, în WGS-84 Pământul ideal este considerat un elipsoid – fig. 1.1, iar sistemul de referință este cartezian cu:

- originea (O) în centrul de masă al Pământului;
- Planul Oxy în planul ecuatorial;
- axa Ox trece prin origine și intersecția meridianului Greenwich (zero) cu ecuatorul;
- axa Oz trece prin polul nord;
- axa Oy este perpendiculară pe planul Oxz

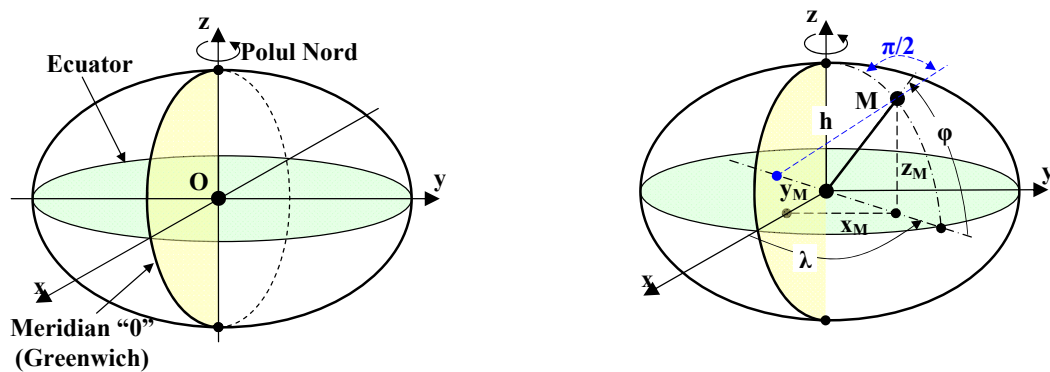


Fig. 1.1. Elipsoidul de referință în WGS-84 și fizica poziției unui punct: λ – longitudinea, φ – latitudinea, h - altitudinea

În geodezie, pentru descrierea conturului suprafeței Pământului, se folosește o suprafață ideală reprezentând nivelul mediu al suprafeței oceanelor și continuarea acesteia pe pământ. Această suprafață se numește *geoid* – fig. 1.2 și reprezintă referința pentru determinarea topografică a altitudinii punctelor suprafeței reale – este cea ce curent se numește “nivelul mării”. Geoidul nu este o suprafață descriptibilă matematic simplu – este o suprafață de egal potențial gravitațional care, în cazul mărilor și oceanelor, se suprapune cu suprafața ideală a apelor în lipsa valurilor, mareelor etc. Pe sol, suprafața de egal potențial se abate de la forma geometrică simplă datorită anomaliilor gravitaționale și ca urmare distanța de la suprafața geoidului la centrul Pământului variază.

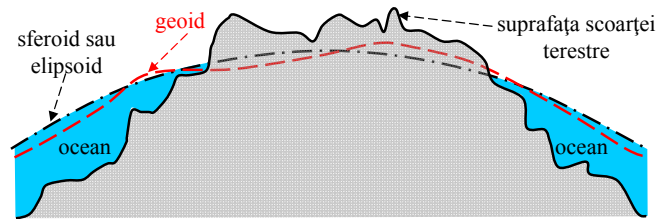


Fig. 1.2. Suprafața Pământului, geoidul și sferoidul sau elipsoidul de referință (abaterile geoid – sferoid sunt mult exagerate pentru vizibilitate)

În multe situații, forma Pământului poate fi aproximată cu o *sferă* ($R = 6378\text{km}$). Aproximații mai bune sunt *sferoidul* și *elipsoidul* – figuri geometrice folosite ca referințe pentru determinarea poziției (coordonatelor) punctelor de pe Pământ.

Un *elipsoid* este o suprafață închisă la care intersecția cu orice plan este o elipsă. Elipsoidul este simetric față de un sistem cartezian Oxyz cu O în centrul de simetrie. Intersecțiile Ox, Oy și Oz cu suprafața definesc cele trei semiaxe: a , b și c . Dacă $a = b = c$, suprafața devine *sferă*. Dacă $a = b \neq c$, suprafața se numește *elipsoid de revoluție* sau *sferoid* (se obține rotind o elipsă în jurul unei axe).

1.3. Sisteme de radionavigație

Sistemele de *radionavigație* sunt procedee de navigare în care se folosesc undele radio, adică undele electromagnetice de radiofrecvență (30kHz ... 50GHz)

În prezent se folosesc trei categorii de sisteme de radionavigație:

- *Sisteme de direcționare prin radio*, pentru determinarea unei direcții în spațiu, tehnică în care se folosesc proprietățile directive ale antenelor de recepție și de emisie, adesea și emiteria undelor radio sub formă de fascicul cu deschidere foarte îngustă.
- *Sisteme de poziționare prin radio*, pentru determinarea poziției unui radioreceptor prin recepționarea emisiilor mai multor emițătoare plasate în locuri cunoscute. Marea majoritate a sistemelor de radionavigație fac parte din această categorie (inclusiv GPS).
- *Sisteme Radar*¹, utilizate pentru determinarea poziției (direcție și distanță) la care se află diverse obiecte față de emițător.

În cele ce urmează se vor prezenta numai primele două sisteme.

1.3.1. Sisteme de radiodirecționare

Primele sisteme de radionavigație au fost cele de *radiodirecționare* - **RDF** (Radio Direction Finder) apărute încă din 1920. Acestea s-au bazat pe utilizarea *antenelor directive*², dintre care antenele cadru au fost printre primele realizate.

Folosind un radioreceptor (RR) cu antenă directivă, se poate determina destul de precis direcția în care se află radioemițătorul (RE); evident, RR și RE trebuie să lucreze pe aceeași frecvență de purtătoare. De regulă, semnalul emis este modulată; în trecut se foloseau purtătoare de JF și MF (unde lungi și medii, 100kHz ... 500kHz, cu avantajul razei mari de acțiune) modulate ASK³ (sau OOK) în sistem “puncte și linii”.

Cu ajutorul a două RR plasate pe sol (de exemplu în **A** și **B**, fig. 1.3) la distanță l , cunoscută, care recepționează directiv emisiile RE amplasat pe nava aflată în **C**, se pot determina direcțiile **AC** și **BC**, deci unghiurile α , β și γ – fig. 1.3. Prin *triangulație*⁴ se poate determina poziția navei (punctul **C**) care poate fi ușor notată pe hartă și apoi transmisă navei.

Sistemul funcționează “în plan”, dar nu e nici o problemă de a face corecțiile necesare impuse de curbura Pământului.

La fel de bine, se pot folosi două RE, unul în **A** și altul în **B** iar RR poate fi plasat pe navă, în **C**. În acest caz însă, emițătoarele trebuie să lucreze pe frecvențe diferite.

Din relații trigonometrice elementare (Anexa 1) rezultă:

$$\overline{AC} = l \frac{\tan \beta}{(\tan \alpha + \tan \beta) \cos \alpha} \quad (1.1)$$

$$\overline{BC} = l \frac{\tan \alpha}{(\tan \alpha + \tan \beta) \cos \beta}$$

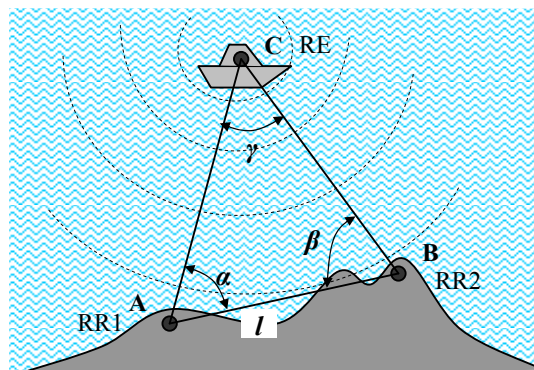


Fig. 1.3. Determinarea poziției unei nave prin triangulație, pe baza recepției radioemisiilor de pe navă

¹ Radar (Radio Detection And Ranging) – detecție și direcționare prin radio

² Proprietățile directive ale antenelor au fost descoperite practic în același timp cu realizarea radio-ului.

³ ASK – Amplitude Shift Keying. OOK – On – Off Keying

⁴ Triangulație – metodă matematică de aflare a poziției unui punct cunoscând o latură și unghiurile unui triunghi

Primele sisteme bazate pe acest principiu s-au numit **Radio Direction Finder**¹ (RDF) și au utilizat antene cadru rotite cu mici electromotoare. În prezent se folosesc antene mult mai directive iar RE sunt radiobalize cu emițătoare de mică putere, plasate în șiruri. În prezent, procedeul este tot mai puțin folosit în navigația maritimă, fiind înlocuit cu GPS.

Procedeul descris este folosit în navigația aeriană. Determinarea direcțiilor și calculele se execută automat de către un echipament plasat pe avion, numit *Automatic Direction Finder* (ADF). Undele radio sunt emise continuu sub formă de fascicule nedirective de radiobalize; de aceea, echipamentul de emisie se numește (*emițător*) *de fascicule (radio) nedirective – Non-Directional Beacon* (NDB). **NDB** emit în benzile de 190kHz și 535kHz, semnale modulate în amplitudine cu tonuri de 400Hz și 1020Hz. Sistemele descrise, prezente pe toate aeronavele, se folosesc mai mult ca “dublură” în caz de avarie a sistemelor de navigație principale, bazate pe GPS. Raza de acțiune a unui emițător NDB este – în funcție de tip, 15, 25, 50 sau 75 mile marine².

Navigarea după NDB este destul de dificilă deoarece ceea ce află pilotul aeronavei este direcția în care se află emițătorul (radiobaliza) – direcția normalei la planul antenei cadru. Mai trebuie cunoscută și poziția cadrului față de direcția de deplasare a aeronavei, ceea ce se face comparând direcția indicată de antenă cu axa Nord-Sud geografică indicată de girocompas³. Probleme apar în primul rând din cauza efectelor vântului lateral (“capul” aeronavei este în altă direcție decât aceea de deplasare, pentru compensarea forței vântului); în plus semnalul poate fi și perturbat.

O variantă mai bună de navigare după principiul descris este sistemul *radio omnidirektiv* în FIF⁴ – **VOR** (*VHF Omni-directional Radio*).

În sistemul VOR, radiobalizele transmit semnal omnidirecțional care conține și informația despre azimut, adică RR recepționează o undă care include unghiul pe care îl face cu Nordul geografic (azimutul).

În sistemul VOR, RE de pe baliză emite un semnal principal (master) nemodulat, în mod continuu, cu o antenă omnidirecțională. O a doua undă, secundară, este emisă cu mare directivitate, de către o antenă directivă care se rotește. Semnalul secundar este modulat în fază în mod continuu, cu o frecvență de 30Hz. Viteza de rotație a antenei este astfel încât atunci când direcția fascicului secundar este la 90° față de Nord, semnalul este defazat cu 90° față de semnalul master. Ca urmare, defazajul dintre cele două semnale este chiar azimutul fascicului secundar. Astfel, direcția fascicului secundar, deci direcția în care se află baliza, este determinată față de axa Nord-Sud, prin măsurarea defazajului dintre cele două semnale. Operație este simplă și cu rezultate precise – eroarea de direcție este sub 1°.

Sistemul VOR este foarte utilizat pe toate aeroporturile, fiind de mare ajutor la aterizare: pilotul trebuie doar să mențină azimutul necesar, corectând direcția de zbor în funcție de rezultatele măsurărilor prin VOR.

Pe aeroporturi se folosește și un *echipament de măsurare a distanței* DME (Distance Measurement Equipment) dintre aeronavă și un RE. De la sol spre aeronavă se emite semnal iar de pe aeronavă spre sol se transmite un semnal –răspuns cu o întârziere cunoscută precis; măsurând timpul de propagare (defazajul dintre semnalul emis și cel recepționat) se calculează distanța la care se află avionul.

¹ (Sistem pentru) determinarea direcției prin radio.

² 1 milă marină (nautical mile) = 1852 m (unitate internațională, utilizată în SUA din 1959)

³ Girocompas (Gyrocompass) – busolă giroscopică – busolă constând dintr-un giroscop în rotație permanentă a cărei axă de rotație este stabilită în plan orizontal, astfel că rotația Pământului îi asigură poziționarea paralelă cu axa de rotație a planetei; astfel, girocompasul indică nordul geografic și nu este afectat de anomalii magnetice.

⁴ FIF – foarte înaltă frecvență (VHF – Very High Frequency) – banda de frecvențe radio 30 – 300MHz

Triangulație

Se cunosc: $\overline{AB} = l, \alpha, \beta$ și γ

$$\overline{CD} = \frac{\overline{AD}}{\tan \alpha} = \frac{\overline{DB}}{\tan \beta}; \quad \overline{AD} + \overline{DB} = \overline{AB} = l$$

$$\begin{cases} \overline{AD} \cdot \tan \beta - \overline{DB} \cdot \tan \alpha = 0 \\ \overline{AD} + \overline{DB} = l \end{cases}$$

$$\overline{AD} = l \frac{\tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta}; \quad \overline{DB} = l \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

$$\overline{AC} = \overline{AD} / \cos \alpha; \quad \overline{BC} = \overline{DB} / \cos \beta$$

$$\overline{AC} = l \frac{\tan \beta}{(\tan \alpha + \tan \beta) \cos \alpha}; \quad \overline{BC} = l \frac{\tan \alpha}{(\tan \alpha + \tan \beta) \cos \beta} \quad (\text{A1.1})$$

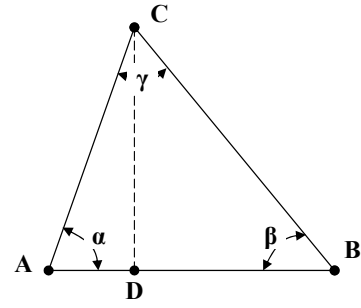


Fig. A1.1 Triangulație

1.3.2. Sisteme de radionavigație hiperbolice fără sateliți

1.3.2.1. Principiile radionavigației hiperbolice

Sistemele de radiopozitionare bazate pe măsurarea diferenței dintre timpilor de recepție a semnalelor de la două sau mai multe emițătoare ($\Delta\tau$) se numesc hiperbolice, deoarece locul geometric al punctelor în care $\Delta\tau = \text{constant}$ sunt hiperbole (în spațiu hiperboloizi).

Se consideră 2 emițătoare, plasate într-un plan, în puncte cunoscute cu coordonatele exprimate față de un sistem cartezian: $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, și un receptor plasat în $R(x, y)$. Dacă la $t = 0$, din A și B se emite câte un tren de unde, în R acestea sunt recepționate cu întâzierile:

$$\tau_A = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} \quad (1.2)$$

$$\tau_B = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2}$$

(c – viteza de propagare, $3 \cdot 10^8$ m/s) Diferența de timp dintre momentele recepției este:

$$\Delta\tau = \tau_A - \tau_B = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} - \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2} \right) \quad (1.3)$$

Locul geometric al punctelor pentru care $\Delta\tau = \text{constant}$ satisface relația:

$$\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} - \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2} = \text{constant} \quad (1.4)$$

care este ecuația unei hiperbole.

Măsurând $\Delta\tau$ se poate determina hiperbola pe care se află receptorul.

Fie acum, cazul a 3 emițătoare plasate în plan, în $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, și $C(x_C, y_C)$ și receptorul $R(x, y)$, ca în fig. 1.4. În acest caz se pot determina hiperbole de diferență de timp de recepție constantă între emisiile din A și B ($\Delta\tau_{AB} = \text{constant}$) – liniile pline și între emisiile din B și C ($\Delta\tau_{BC} = \text{constant}$) – liniile punctate.

În R se măsoară:

- diferența de timp de recepție dintre emisiile din A și B , determinând hiperbola **H1**;
- diferența de timp de recepție dintre emisiile din B și C , determinând hiperbola **H2**;

la intersecția celor două hiperbole se află punctul căutat R , unde se găsește receptorul.

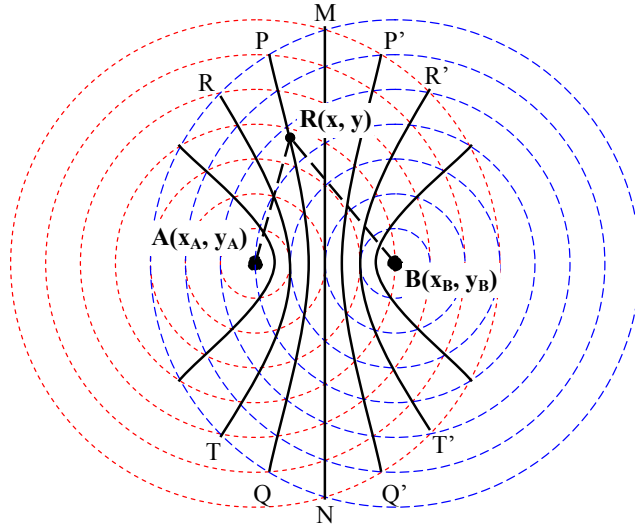


Fig. 1.3. Hiperbolele de poziționare a punctelor pentru care diferența distanțelor față de două emițătoare este constantă

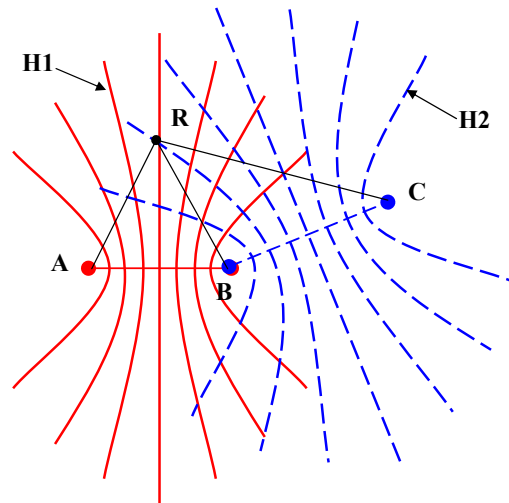


Fig. 1.4. Poziționarea hiperbolică în plan cu ajutorul a trei emițătoare

Sub această formă, principiul a fost larg utilizat încă din timpul celui de al doilea război mondial (sistemul britanic GEE) și după aceea (Sonne/Console, DECCA, LORAN, ...). Se foloseau hărți cu hiperbolele trasate; prin suprapunerea a două hărți se afla poziția căutată.

Pentru determinarea poziției unui punct în spațiu sunt necesare cel puțin 4 emițătoare. Fiecare grup de 3 surse determină câte o familie de *hiperboloizi*. Intersecția a 3 hiperboloizi este un punct – unde se află receptorul. Pe acest principiu se bazează localizarea cu ajutorul sateliților

1.3.2.2. Principalele sisteme de radionavigație hiperbolică fără sateliți

În timpul și imediat după al II-lea război mondial, s-au realizat o serie de sisteme de radionavigație hiperbolică. Acestea au fost exploatate mai mult sau mai puțin timp – fig. 1.5 dar sunt scoase din funcție pe măsură ce utilizarea sistemelor de radionavigare prin sateliți se generalizează.

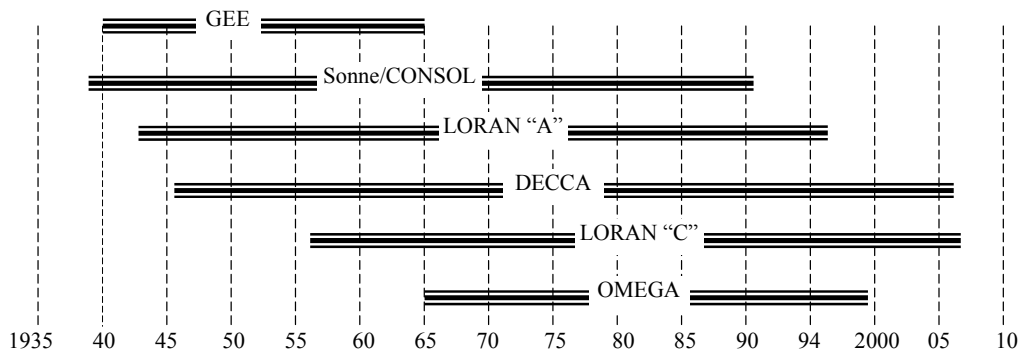


Fig. 1.5. Sisteme de navigație hiperbolice și durata de operabilitate aproximativă

Toate sistemele de radionavigație hiperbolică s-au folosit și se folosesc pentru poziționare în două coordonate (pe suprafața idealizată a Pământului), pe mare sau în aer deasupra mărilor și oceanelor; stațiile de emisie sunt amplasate pe coastele oceanelor. Cu câteva excepții, sistemele folosesc unde de medie frecvență (gama 100kHz ... 3MHz) și asigură precizii de ordinul sutelor de metri (300 ... 600m).

1.3.2.3. Sisteme de radionavigație hiperbolică terestre

a. Sistemul Sonne/CONSOL a fost realizat în Germania (firma Lorentz) prin 1938 sub numele Sonne, apoi, după război, a fost utilizat în Spania sub numele de CONSOL până prin 1991. Sistemul Sonne/CONSOL nu face parte din cele hiperbolice – poziționarea se realiza prin determinarea intersecțiilor a două diagrame de radiație.

Sistemul funcționa pe 300kHz și utiliza 3 emițătoare: unul central (**A**) și două laterale (**B, C**) distanțate la $2,8\text{km} \approx 3\lambda$ (la 300kHz, $\lambda = 1\text{km}$).

Schema bloc a sistemului apare în fig. 1.6.

Emițătoarele secundare (**B, C**) emiteau cu $\frac{1}{4}$ din puterea celui principal.

Transmisiiile se executau în cicli de 40 secunde:

1. Secvența 1 – 6 sec. Numai RE principal emite semnal omnidirecțional, incluzând codul stației în Morse (MA cu ton AF: 1/8 sec. – punct, 3/8 sec. – linie).
2. Secvența 2 – 6 sec. Pauză.

3. Secvența 3 – 30 sec., este secvența de “baleiaj”.

Toate cele 3 RE sunt active. RE principal emite semnal omnidirecțional, nemodulat.

RE secundare emit semnale în opoziție și defazate cu $+90^\circ$ respectiv -90° față de semnalul principal. Ca urmare, datorită interferențelor celor 3 radiații cu aceeași frecvență dar defazate, diagrama de radiație la un moment dat, arată ca în fig. 1.7.a, prezentând lobi înguști.

Aceste semnale sunt modulate Morse: unul dintre RE cu puncte, al doilea – cu linii.

Pe durata unui punct se păstrează defazajul – de exemplu: RE din B $\Delta\varphi_B = +90^\circ$, RE din C $\Delta\varphi_C = -90^\circ$. Apoi defazajul se inversează ($\Delta\varphi_B = -90^\circ$, $\Delta\varphi_C = +90^\circ$) și rămâne constant pe durata unei linii; ca urmare, diagrama de radiație se inversează – fig. 1.7.b.

Peste această comutare de faze, se suprapune o deplasare lentă a defazajelor care determină rotirea diagramei de radiație în jurul centrului A – se execută un “baleiaj” al spațiului de către lobi de radiație înguști (mult mai înguști de cât apar în fig. 1.7). Ca urmare, într-un punct de recepție R, după pauza de 6 sec., se vor auzi puncte (rafale de ton de AF scurte) care apoi se contopesc într-un ton continuu și continuă cu linii (sau încep cu linii și continuă cu puncte). Pentru a afla lobul în care se află R este suficient să se numere câte puncte (sau linii) se aud până la apariția tonului continuu.

4. Secvență 4 – 2 sec. Pauză.

Apoi ciclul se repetă.

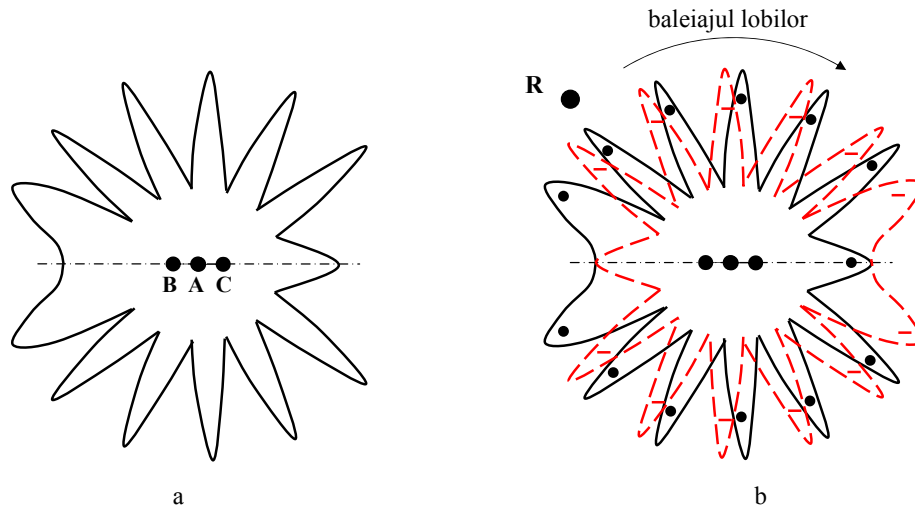


Fig. 1.7. Diagrama de radiație în sistemul Sonne/Consol: a – diagrama la un moment dat; b – diagramele la emisia unui punct (linie plină) și a unei linii (linie punctată)

Raza de acțiune a sistemului era de circa 2000km, dar oferea precizie bună în determinarea direcției (cca 1°) sub 500km.

Germanii au instalat sisteme Sonne pe coasta Atlanticului, în Germania – acestea au fost dezactivate după război și în Spania – unde au funcționat până în 1991.

b. Sistemul GEE

În Marea Britanie, cercetări pentru crearea unui sistem de radionavigație au început încă din 1935, după ce Robert Alexander Watson-Watt a realizat primul RADAR britanic. Deși au fost mai multe idei, abia în 1942, când necesitățile de orientare a navelor și mai ales a

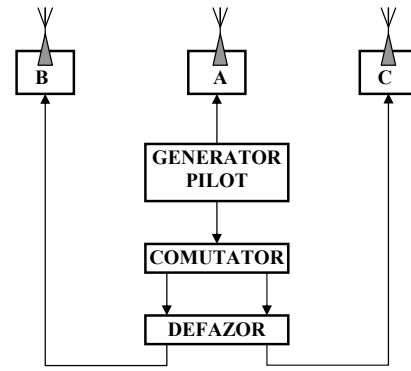


Fig. 1.6. Schema bloc a sistemului Sonne/Consol

avioanelor au devenit stringente, au început lucrările de realizare a sistemului GEE¹, după invenția lui R. G. Dippy.

Sistemul GEE este o aplicație directă a procedurii de poziționare hiperbolică descris în §1.3.2.1, care utilizează 3 stații – una principală (A) și două secundare (B și C). Fiecare pereche de emițătoare producea câte o rețea de hiperbole (fig. 1.3) cu care se realiza poziționarea.

Sistemul utilizează radioemițătoare pe circa 30MHz care generează impulsuri scurte (durata 6μs) la intervale precis fixate. Stația principală generează semnale de comandă și sincronizare către cele trei stații secundare care transmit impulsuri după o întârziere stabilită.

Stația principală (A) emite un impuls urmat de un impuls dublu după 2ms. Prima stație secundară (B) emite un singur impuls la 1ms după impulsul unic al stației A iar al doilea (C) emite un impuls la 1ms după impulsul dublu al stației A. Ciclul se repetă la fiecare 4ms.

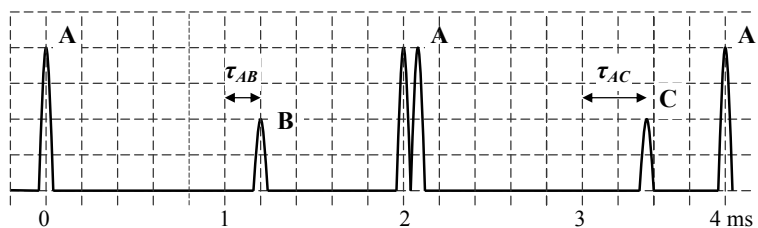


Fig. 1.8. Aspectul semnalelor GEE pe ecranul tubului catodic (τ_{AB} , τ_{AC} – întârzierile de propagare)

Receptorul era prevăzut cu un ecran catodic

iar impulsurile apăreau decalate pe axa orizontală – axa timpului, ca în fig. 1.8. Diferența de timp de propagare dintre undele din A și B (τ_{AB}) respectiv C (τ_{AC}) se citea pe ecran – fig. 1.8. Navigatorul avea la dispoziție hărți cu hiperbolele de “diferență de timp de propagare constant” gata trasate – tot ce avea de făcut era să găsească punctul de intersecție a celor două curbe corespunzătoare timpilor măsurați.

Sistemul GEE asigură o poziționare cu precizie de circa 300m la distanțe sub 100km și de circa 2000m la distanțe de peste 700km. Aceste performanțe, modeste în prezent, erau deosebit de bune la vremea introducerii în uz a sistemului.

Principalul dezavantaj al sistemului GEE era raza de acțiune redusă (circa 600km), datorată frecvenței de lucru ridicată: undele de ≈ 30 MHz nu urmează curbura Pământului dar se reflectă pe ionosferă iar undele reflectate nu pot fi folosite pentru radiolocalizare. Pe lângă aceasta, semnalele de IF erau ușor perturbabile, atât de către alte surse de unde cât și de condițiile de propagare.

Sistemul a fost folosit până prin 1965 pe teritoriul Marii Britanii, după care a fost înlocuit cu sistemul LORAN.

c. Sistemul LORAN

Prin 1940, armata Statelor Unite a recunoscut necesitatea de a dispune de un sistem de radionavigație cu rază de acțiune foarte mare (peste 1500km), pentru navele maritime și aeriene care operau în Atlantic și mai ales în Pacific.

Cu ajutorul lui R. G. Dippy, în 1942 a devenit operațional sistemul LORAN (Long Range Navigation system), numit mai târziu LORAN-A pentru a-l deosebi de versiunile ulterioare (LORAN-B, C, D și E).

LORAN-A utilizează unde de 1750kHz, 1850kHz, 1900kHz și 1950kHz care în propagare urmau curbura Pământului, asigurând sistemului o rază de acțiune de circa 1200km pe timp de zi și peste 2500km noaptea, când propagarea undelor de JF și MF este mult mai bună (Anexa 3). Frecvențele diferite asigurau identificarea stațiilor principale.

LORAN-A funcționa după exact aceleași principii ca și sistemul GEE. O stație principală (A) furniza semnale de comandă și sincronizare altor două – de regulă mai multe

¹ gee = a coti sau a continua mișcarea în direcția corectă

(până la 6) stații secundare (**B, C, ...**). Stațiile principale emiteau impulsuri de RF cu durată de $40\mu\text{s}$ la intervale de 40ms . Stațiile secundare emiteau impulsuri întârziate față de cele principale cu $29 \dots 39\text{ms}$. Astfel, intervalul dintre un impuls principal și cel secundar corespunzător era mai mare decât dintre impulsul secundar și cel principal următor – astfel se elimină confuziile privind sursăimpulsurilor, deși pe ecranul osciloscopelor acestea puteau să arate identic. Întârzierile impusurilor secundare față de cele principale difereau de la o stație secundară la alta, asigurând astfel identificarea stațiilor secundare. Aspectul imaginii pe ecran era ca în fig. 1.9. Măsurând timpul dintre un impuls secundar și unul principal și scăzând întârzierile dintre emisii, se putea afla diferența timpilor de propagare și apoi hiperbola corespunzătoare. La intersecția a două hiperbole astfel determinate se afla receptorul.

Precizia poziționării cu LORAN-A era cam de 1% din distanța față de emițătoare ($0,2 \dots 20\text{km}$), comparabilă cu aceea realizată prin navigare celestă.

Sisteme LORAN-A au fost instalate cam peste toată lumea, pe coastele Atlanticului (mai ales în SUA, Canada și Marea Britanie), ale Pacificului (China, Japonia, Australia), și ale Oceanului Indian (Indonezia, Micronezia). Prin 1970 – 1975 majoritatea instalațiilor au fost dezafectate, dar în China au mai funcționat până după 1995.

În timp, s-au introdus și alte sisteme asemănătoare cu LORAN-A, dintre care larg utilizat a fost **LORAN-C** (variantele B și F au rămas în stadiu experimental iar variantele D și E au avut aplicații limitate).

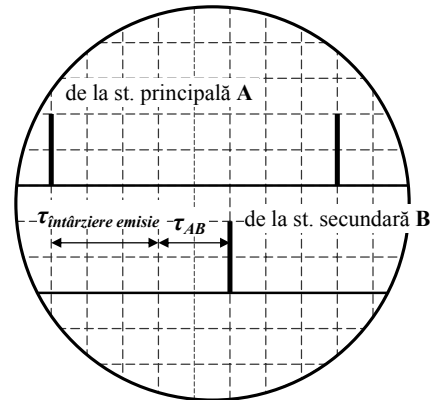


Fig. 1.9. Aspectul semnalelor pe ecranul tubului catodic la receptorul LORAN

Sistemul LORAN-C, folosit și în prezent, utilizează unde cu frecvența de 100kHz (perioada $10\mu\text{s}$) și emițători de mare putere, având astfel o rază de acțiune de peste 3000km^1 .

Sistemul folosește “lanțuri” de stații, fiecare lanț fiind format dintr-o stație principală (master – M) și 2, 3 sau 4 stații secundare (slave – W, X, Y, Z).

Fiecare stație LORAN-C transmite semnale sub forma unor impulsuri standard. Un impuls constă dintr-un tren de sinusoidă cu frecvența purtătoare (100kHz) și amplitudine crescătoare după relația (1.5), cu durată $65\mu\text{s}$. Descreșterea amplitudinii după întreruperea curentului introdus în antenă depinde de caracteristicile circuitului format de ieșire din emițător (filtrul de adaptare și antenă). Circuitul de ieșire este echivalent cu un filtru trece bandă acordat pe purtătoare și ca urmare, după întreruperea alimentării cu energie, se vor produce oscilații libere amortizate, pe frecvența de acord a acestui filtru, adică pe 100kHz . Viteza de scădere a amplitudinii depinde de amortizarea circuitului și aceasta depinde de caracteristicile fiecărui emițător; de regulă, se asigură o amortizare astfel încât conținutul în armonice al semnalului să fie cât mai mic.

$$i = 0, \quad \text{pentru } t < \tau$$

$$i(t) = A \cdot (t - \tau)^2 \cdot \exp\left(-2 \frac{t - \tau}{65}\right) \cdot \sin(0.2\pi t + PC), \quad \text{pentru } \tau \leq t < \tau + 65 \mu\text{s} \quad (1.5)$$

A este o constantă de normalizare a amplitudinii curentului maxim în antenă;

τ este diferența anvelopă – ciclu (ECD – Envelope to Cycle Difference), în μs ;

$$-5 \leq \tau \leq +5 (\mu\text{s})$$

PC este parametrul de fază pentru codare (0 – impuls pozitiv sau π – impuls negativ);

t este timpul în μs .

¹ Undele de 100kHz se propagă în principal ca “unde terestre” urmărind curbura Pământului pe distanțe mari.

Aspectul semnalelor apare în fig. 1.10: impulsurile pozitive (+) – fig. 1.10. a și b; impulsurile negative (–) – fig. 1.10.c și d. Semisinusoidele sunt numerotate (1, 2, ...) ca în fig. 1.10 iar numărarea lor la recepție se face detectând trecerile prin “0”; în funcție de sensul trecerilor prin zero de la impulsul “impar” la cel “par”, se stabilește dacă este vorba de impuls pozitiv (+) sau negativ (–).

Pentru navigare este esențial să se identifice sursele impulsurilor recepționate, adică stațiile de emisie a căror poziție este cunoscută.

Identificarea se face printr-o codare a emisiilor fiecărei stații.

Fiecare stație emite grupuri de câte 9 (SM) sau 8 (SC) impulsuri ca cele din fig. 1.10.

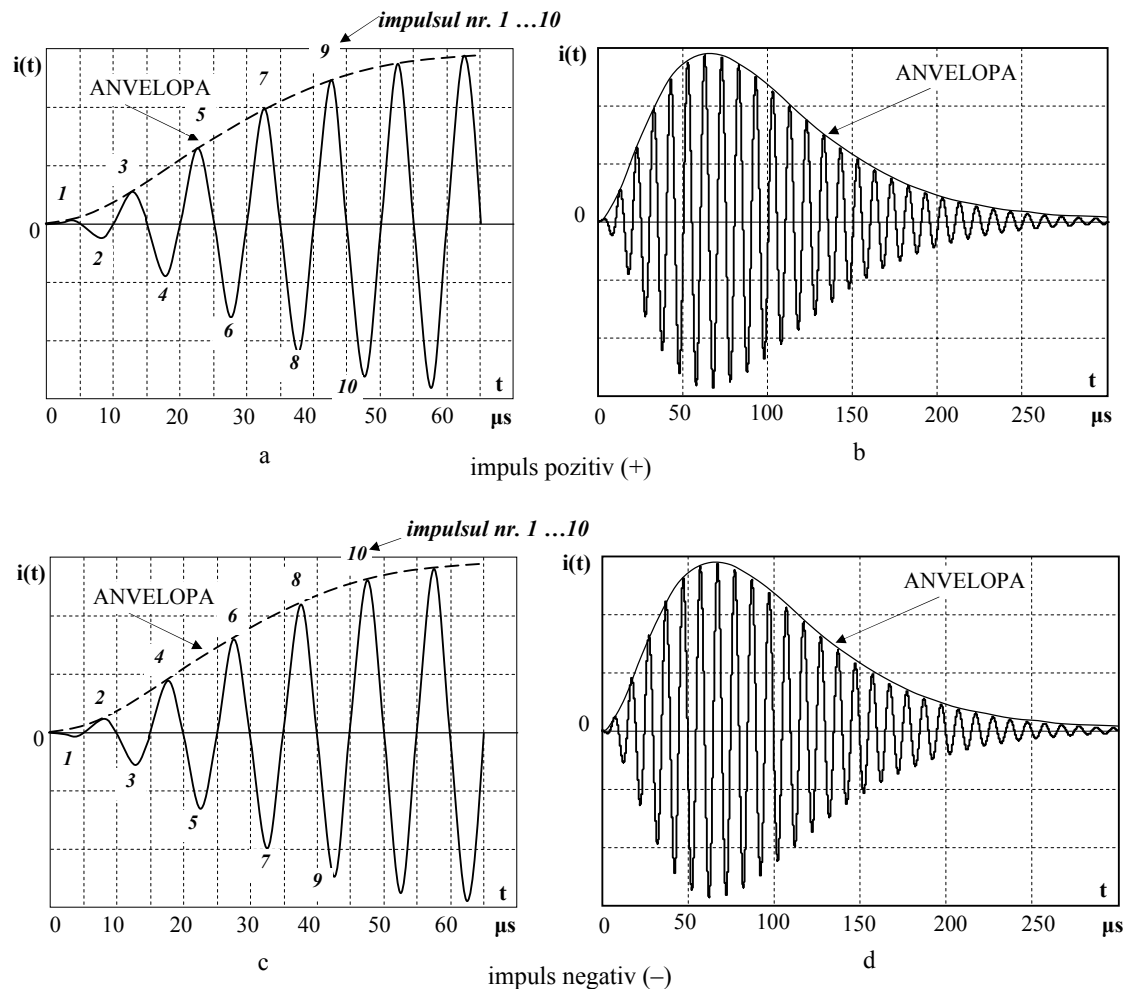


Fig. 1.10. Impulsurile de RF în sistemul LORAN-C. a, b – impulsuri pozitive (+), c, d – impulsuri negative (–); a, c – curentul injectat în antenă; b, d – forma impulsului radiat

Procedura de emisie este astfel:

Stația master (SM) emite prima, un grup de 9 impulsuri dintre care 8 sunt la intervale de $1000\mu\text{s}$ iar al 9-lea la $2000\mu\text{s}$.

Stațiile secundare (SC) emit în succesiune, de regulă alfabetică (X, Y, Z), grupuri de 8 impulsuri de RF, separate la $1000\mu\text{s}$; acest mod de emisie permite separarea SM de SC. Emisiile SC se execută după aceea a AM, după un interval de timp suficient pentru ca semnalul să se propage la cea mai mare distanță de acțiune (o undă EM parcurge 3000km în $30\mu\text{s}$).

După ce toate SC au emis, se reia emisia SM; intervalul dintre două emisii ale SM se numește **timp de repetiție de grup** (GRI – Group Repetition Interval) și se exprimă în μs .

Timpul dintre emisia primului impuls al unui grup și momentul emisie primului impuls al unui grup secundar, se numește **întârziere de emisie** (Emission Delay – ED) – fig. 1.11. Întârzierea de emisie (ED) este suma dintre “durata grupului de impulsuri ($8\mu\text{s}$)”, “întârzierea codată dintre două emisii secundare (SCD – Secondary Coding Delay sau CD – Coding Delay)” și “durata propagării semnalului de RF”.

După ce emite și ultima SC din lanț, procesul se reia; timpul dintre două emisii ale SM este timpul de repetiție de grup – GRI care se exprimă în μs . GRI divizat pri 10 reprezintă numărul (codul) lanțului LORAN-C recepționat.

Astfel, prin măsurarea GRI, care se face cu bună precizie, se identifică lanțul LORAN-C și se știe compunerea și succesiunea în emisie a stațiilor secundare din lanț. Ca urmare, se pot trasa hiperbolele de poziționare și se poate determina poziția receptorului.

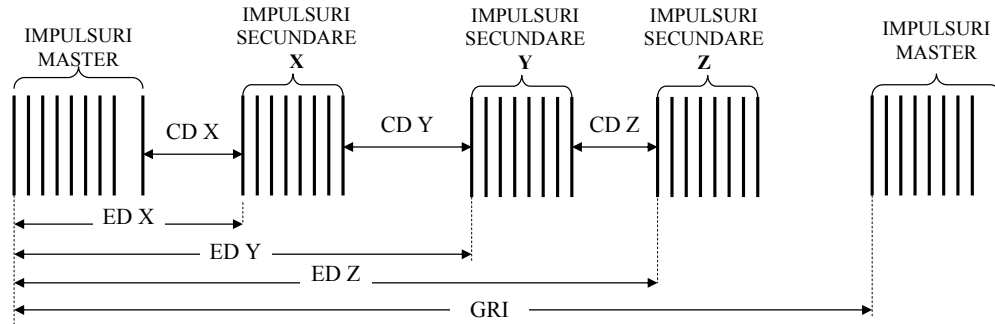


Fig. 1.11. Succesiunea grupurilor de impulsuri de RF în sistemul LORAN-C.

De prin anul 2003, s-a emis ideea dezafectării și a ultimului sistem de radionavigație hiperbolică – LORAN-C, având în vedere disponibilitățile GPS. Suporterii LORAN subliniază însă câteva avantaje ale acestuia față de sistemele prin sateliți, printre care:

- LORAN folosește emițătoare de mare putere, greu de perturbat (oricum, mult mai greu decât GPS);
- stațiile LORAN sunt exploatate de firme independente de stat – GPS este controlat complet de guvernul SUA¹ (prin U.S. D.O.D);
- LORAN poate fi folosit în combinație cu GPS pentru o mai bună estimare a poziției sau/și ca sistem de rezervă.

Având în vedere toate acestea, deocamdată LORAN-C rămâne în funcție.

¹ U. S. Department of Defense (DOD) prin United States Air Force 50th Space Wing.

capitolul 2

Principiile de funcționare ale sistemului global de poziționare (GPS)

2.1. Introducere

Problema esențială în navigație (§1.1) este determinarea poziției vehicolului, operație realizabilă prin multe procedee: (1) prin observarea mediului, (2) cu ajutorul astrilor (navigație celestă), (3) prin estimare (aprecierea/măsurarea vitezei și a direcției de deplasare) și (4) cu mijloace electronice.

Procedeele electronice de poziționare/navigare sunt: (a) cu ajutorul undelor radio (radionavigarea, radiopозиționarea), (b) cu sisteme RADAR și (c) cu sisteme de navigare inerțială (se utilizează giroscopae, accelerometre, vitezometre).

În prezent, toate sistemele sunt utilizate, deoarece sunt complementare, nu concurente. De exemplu, navigarea/позиționarea prin observarea mediului nu necesită nici un fel de echipamente – doar simțul văzului și, eventual, un binoclu; sistemele celeste nu au nevoie de echipamente electrice/electronice deci de surse de energie; sistemele electronice, în schimb, sunt precise și pot fi folosite pe orice vreme, ziua ca și noaptea.

Sistemele de radionavigație s-au dezvoltat în timpul celui de al doilea război mondial¹, din necesitatea determinării în orice condiții de vreme, ziua ca și noaptea, a poziției obiectelor pe Pământ, pe distanțe și suprafețe de ordinul de mărime al continentelor și oceanelor, cu precizie satisfăcătoare pentru flotele de luptă maritime și aeriene.

Dintre diversele sisteme utilizate (§1.3), s-au dovedit mai bune cele care au utilizat radionavigația hiperbolică - §1.3.2. Dintre acestea, încă se folosesc sistemele LORAN-C și DECCA (§1.3.2.3). Aceste sisteme utilizează cel puțin 3 stații de radioemisie pe unde lungi (80 – 100kHz) – una principală (master) și 2 sau mai multe secundare (slave), cu poziții cunoscute. Stațiile emit rafale de impulsuri sinusoidale la intervale de timp fixate. Radioreceptoarele asigură determinarea diferențelor dintre timpii de propagare a impulsurilor de la stațiile secundare față de cele de la stația principală. Cu acești timpii, pe baza principiilor radionavigației hiperbolice (§1.3.2), se poate determina poziția vehicolului.

Marea problemă a sistemelor cu emițătoare terestre este necesitatea realizării unui alegeri între:

- (a) folosirea undelor RF de joasă frecvență (unde lungi, gama 30 ... 300kHz) care se propagă pe distanțe mari (peste 2000km) dar asigură poziționare cu precizie redusă (uzual sute ... mii metri) și
- (b) folosirea undelor RF cu frecvență mare (UIF, EIF, 300MHz ... 30GHz), care asigură poziționare cu precizie mare (câțiva metri) dar se pot folosi pe distanțe mici (x10km).

De remarcat că undele de MF și IF (300kHz ... 30-60MHz) nu se folosesc deoarece sunt ușor perturbabile mai ales datorită reflexiilor multiple (ionosferă, sol, apa mărilor, ...)

După ce primul satelit artificial al Pământului, Sputnik 1, a fost lansat pe 4 oct. 1957 de către dispăruta URSS, a devenit clar că acești sateliți pot fi utilizați pentru radionavigație, îmbinând precizia (prin folosirea undelor în UIF și EIF) cu raza de acțiune practic nelimitată (datorată altitudinii la care sunt plasate emițătoarele).

¹ De fapt, principiile unor sisteme de radionavigație datează de prin 1930, dar aplicarea pe scară largă, perfecționarea, apariția unor noi sisteme, au fost puternic impulsionate de necesitățile militare.

Primele experimente cu sateliți de navigare¹ au fost efectuate în SUA cu sistemul de sateliți **TRANSIT**, cunoscut și sub numele de **NAVSAT** (Navy Navigation Satellite System), folosit inițial de către submarinele purtătoare de rachete nucleare Polaris și apoi de toată flota de luptă a SUA. Primele lansări s-au făcut în 1960; sistemul a fost complet operațional prin 1965 și a funcționat până în 1996 când a fost complet înlocuit cu sistemul GPS. **TRANSIT** utiliza 5 – 6 sateliți pe orbite circulare polare pentru a se acoperi tot globul pământesc (spre final erau operaționali 10 sateliți); altitudinea orbitei era de circa 1100km. Poziționarea se realiza prin măsurarea efectului Doppler². Emițătoarele de pe sateliți emiteau continuu unde de RF cu frecvență foarte stabilă și cunoscută. La radioreceptorii de pe nave se monitoriza, la intervale scurte de timp, deplasarea de frecvență Doppler, la apropierea și la depărtarea sateliților. Cunoscând precis pozițiile mai multor sateliți și deviațiile Doppler, se putea calcula poziția receptorilor.

După ce sistemul GPS a devenit complet operațional în 1996, sateliții TRANSIT nu au mai fost folosiți pentru radionavigație fiind complet depășiți moral, dar au rămas pe orbite și sunt utilizați pentru studierea ionosferei.

Sistemul Global de Poziționare (GPS – Global Positioning System) este în prezent, singurul sistem de radionavigație prin sateliți complet funcțional și poartă numele oficial **NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System)**. Sistemul a fost dezvoltat de Ministerului Apărării al SUA (United States Department of Defense - DoD). Deși costurile de funcționare și pentru înlocuirea sateliților (cam 400 milioane de dolari pe an), sunt în întregime acoperite de SUA, sistemul este bun public – poate fi utilizat gratuit de oricine.

Apariția ideii, studiile teoretice și apoi experimentele cu sateliți, s-au realizat de prin 1973 până în 1978 – 1979; din 1978 sistemul a devenit utilizabil pentru armata SUA inițial cu 18 sateliți. Constelația de 24 de sateliți a fost definitivată în 1993.

Sistemul GPS a fost conceput și realizat în scopuri militare și până prin 1983³ a fost accesibil numai pentru armata SUA⁴. A urmat o perioadă în care, sub licență, sistemul a putut fi folosit și în aplicații civile, mai ales în transportul aviativ. Din 1993 și mai ales după 1995, sistemul a fost deschis și utilizării civile, fără restricții, dar cu performanțe mai reduse decât cele militare, rezervate în continuare armatei SUA. După anul 2000, toate restricțiile au fost eliminate. Astfel, înainte de 2000, erorile în poziționare pentru civili erau circa 100m în plan orizontal și circa 156m în altitudine; după 2000, erorile sunt de cel mult 20m, dar pot fi și sub 1 – 3mm! Adicional, sistemul GPS furnizează și ora exactă cu o eroare de 60 ... 5ns. Operatorul GPS garantează, în condiții de exploatare optime, următoarele performanțe:

- eroarea de poziționare în plan orizontal: $\leq 13\text{m}$;
- eroarea de poziționare în plan vertical: $\leq 22\text{m}$;
- eroarea în determinarea timpului: aproximativ 40ns.

Alte sisteme de radionavigație prin sateliți sunt:

- **GLONASS**, un sistem inițiat de URSS în 1983 și continuat de Rusia, incomplet (operează cu vreo 8 sateliți) și cu șanse reduse de dezvoltare din cauza costurilor mari;

¹ În mai puțin de 24 de ore de la lansarea Sputnik-ului, specialiștii de la Massachusetts Institute of Technology i-au determinat orbita pur și simplu măsurând modul în care se modifica nivelul semnalului recepționat la apropierea și îndepărtarea de radioreceptorii. A apărut logic că, dacă se poate determina poziția satelitului față de Pământ, atunci și poziția punctelor de pe sol poate fi determinată folosind radioemițători plasați pe sateliți.

² **Efectul Doppler** constă în apariția unei diferențe între frecvența unei unde măsurată la sursă (f_S) și aceea măsurată la un receptor (f_R) aflat în mișcare relativă față de sursă. Dacă S se apropie de R : $f_R > f_S$; dacă S se îndepărtează de R : $f_R < f_S$.

³ După doborârea unui avion sud-coreean cu peste 350 de pasageri rătăcit deasupra teritoriului URSS în sept. 1983, președintele SUA Ronald Reagan a autorizat utilizarea GPS în scopuri civile.

⁴ Marea utilitate militară a sistemului GPS a fost dovedită în războiul din Golful Persic (1990 – 1991).

- **Beidou** – un sistem inițiat de China în 2000, cu sateliți 2 geostaționare care asigură navigația pe tot teritoriul țării;
- **GNSS** – cunoscut sub denumirea de **Galileo**, un sistem propus de Uniunea Europeană pentru a fi operațional în 2011, cu primele lansări în 2005, dar nefinalizat lipsă de fonduri.

2.2. Structura GPS

NAVSTAR GPS este compus din 3 segmente (părți) distincte: segmentul spațial, segmentul de control și segmentul utilizatorului – fig. 2.1.

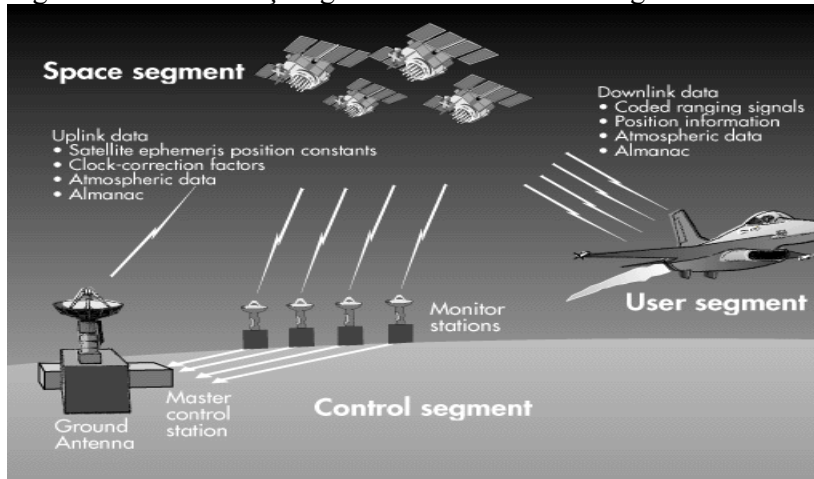


Fig. 2.1. Structura GPS

1. **Segmentul spațial**, este format (din 2001) din minimum 24¹ de sateliți pe 6 orbite (4 – 5 sateliți pe orbită) înclinate la 55° față de planul ecuatorial la 20.183km altitudine, cu o perioadă de revoluție de 11ore și 56minute (fig. 2.2). Structura constelației asigură, practic în orice punct de pe pământ, vizibilitatea simultană a 5 ... 8 sateliți 24 de ore din 24. Fiecare satelit este echipat cu ceasuri atomice care realizează măsurarea timpului cu precizie de câteva zeci de nanosecunde.
2. **Segmentul de control**, este format din 5 stațiile terestre de urmărire și control. Stația principală este în Colorado Springs la o bază a forțelor aeriene ale SUA. Alte stații sunt plasate în Hawaii, pe atolul Kwajalien, pe insula Ascencion, și pe insula Diego Garcia. Acestea recepționează semnale de la sateliți, le

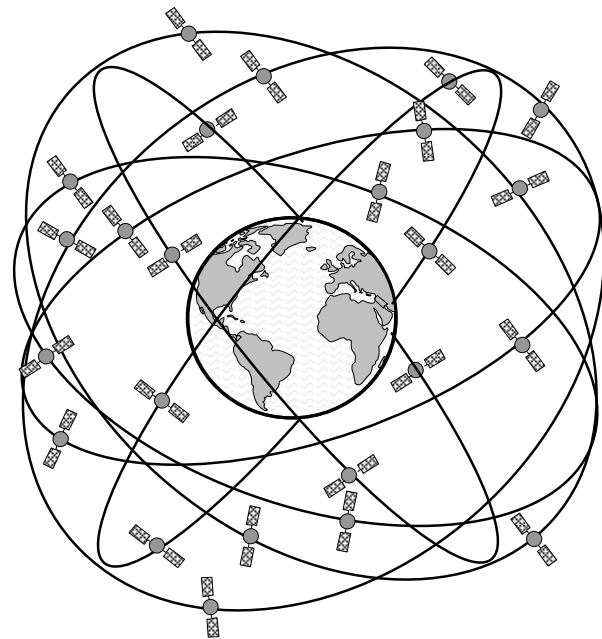


Fig. 2.2. Constelația celor 24 de sateliți GPS pe 6 orbite

¹ Numărul sateliților activi variază - unii sunt rezerve (pentru cazuri de avarie), alții vor înlocui sateliții cu durata de viață epuizată. În 2005 erau activi 30 de sateliți; în 2007 sunt activi 29 de sateliți.

măsoară caracteristicile și le trimite la stația principală, care trimite spre fiecare satelit semnale de corecție.

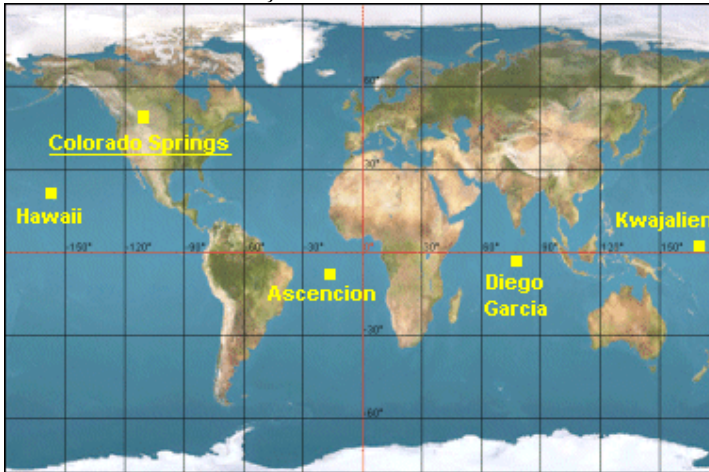


Fig. 2.3. Stațiile de urmărire și control a sateliților GPS

3. **Segmentul utilizator**, este format din receptorii de semnal GPS, plasați pe sol pe nave aeriene și maritime etc. Receptorii GPS asigură detecția semnalelor radio, decodarea informațiilor și furnizarea de date privind: poziția (latitudine, longitudine și altitudine în sistemul WG85), viteza de deplasare și timpul (ora exactă).

Sateliții GPS au fost proiectați și lansați în “grupuri”, din ce în ce mai perfecționați. Primii au fost lansați sateliții din “BLOCK II”, între 1989 și 1990; aceștia nu mai sunt funcționali. Apoi, au fost lansați sateliții din “BLOCK IIA”, între 1990 și 1997; majoritatea acestora sunt încă activi. A treia serie a fost “BLOCK IIR”, între 1997 și 2004. Din 2005 au început lansările sateliților din “BLOCK IIM”.

2.3. Principiile de poziționare prin GPS

2.3.1. Principiul trilaterăției în spațiu

Sateliții GPS transmit informații de timp foarte precise, astfel încât un receptor își poate sincroniza ceasul intern cu cel de pe satelit cu o eroare foarte mică. Semnalul recepționat la un moment dat conține și momentul emisie (T_e), iar receptorul, folosind ceasul propriu determină momentul recepției (T_r). Cunoscând viteza de propagare a semnalului (unda EM de RF) c^1 se poate calcula distanța de la satelitul $S1$, cu coordonate² cunoscute (x_{s1} , y_{s1} , z_{s1}) la receptor: $R_{rs1} = (T_r - T_e)c = \Delta T_1 c$, deci receptorul se află pe o sferă cu centrul în $S1(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$ și raza R_{rs1} . În același mod se pot determina sferile pe care se află receptorul și față de alți 2 sateliți $S2(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$ și $S3(x_{s3}, y_{s3}, z_{s3})$: $R_{rs2} = \Delta T_2 c$, $R_{rs3} = \Delta T_3 c$. Evident, receptorul se află la intersecția celor 3 sfere – fig. 2.4, iar determinarea coordonatelor sale $R(x_r, y_r, z_r)$ este o simplă problemă de trilaterăție³.

¹ Viteza luminii în vid: $c = 299.792,458 \text{ km/s}$

² Intr-un sistem de coordonate acceptat, de exemplu WG 84.

³ *Trilaterație*: metodă de poziționare în care se măsoară cele 3 laturi ale unui triunghi și apoi se calculează unghiurile; cunoscând pozițiile a 2 vârfuri și lungimile laturilor se calculează coordonatele celui de al 3-lea vârf. Până la apariția GPS, trilaterăția era puțin folosită – foarte populară (în topografie, geodezie) era *triangulația* – procedeu de calcul a elementelor unui triunghi pe baza măsurării a 2 unghiuri.

Din păcate, procedura nu se poate aplica decât ca principiu, din cauza erorilor – razele calculate nu sunt cele “adevărate”.

În prezent, se utilizează 2 metode de poziționare prin GPS: poziționarea absolută și poziționarea diferențială.

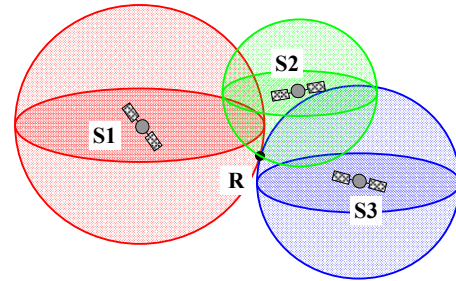


Fig. 2.4. Poziționarea prin trilateratie

2.3.2. Poziționarea absolută prin GPS

Poziționarea absolută presupune utilizarea unui singur receptor pasiv (nu emite nimic) și colectarea datelor de la mai mulți sateliți – cel puțin 4, pentru determinarea a 3 mărimi: latitudinea, longitudinea și altitudinea – poziționare în 3D (3 dimensiuni)

Ideal, pentru poziționare în 3D sunt suficienți 3 sateliți, dacă măsurătorile de timp de propagare și de poziție a sateliților nu ar include erori.

Ca la orice măsurătoare experimentală, prin GPS se face o *estimare* a poziției, mai mult sau mai puțin precisă. Pentru reducerea erorilor de poziționare determinate de erorile în măsurarea timpului, în aprecierea vitezei de propagare și a poziției sateliților, sunt necesari minimum 4 emițători; cu cât sunt accesibili mai mulți sateliți, precizia este mai bună.

Datorită diverselor erori, la receptor se poate calcula numai distanța aproximativă până la satelitul recepționat, numită *pseudodistanță* sau *pseudorază* (pseudorange) PsR :

$$PsR = (T_{em} - T_{rm})c \quad (2.1)$$

$PsR = (T_{em} - T_{rm})c = (T_{e\text{ adevărat}} - T_{r\text{ adevărat}})c + \Delta T_e c = R_a + \Delta T_e c$, din care se obține distanța “adevărată” R_a :

$$R_a = PsR - \Delta T_e c \quad (2.2)$$

T_{em} , T_{rm} – momentele (timpii) de emisie respectiv de recepție a semnalului, măsurate; ($\Delta T_m = T_{em} - T_{rm}$ – durata propagării, măsurată); R_a – distanța “adevărată” (și necunoscută) receptor – satelit; ΔT_e – eroarea în măsurarea timpului de propagare; c – viteza luminii.

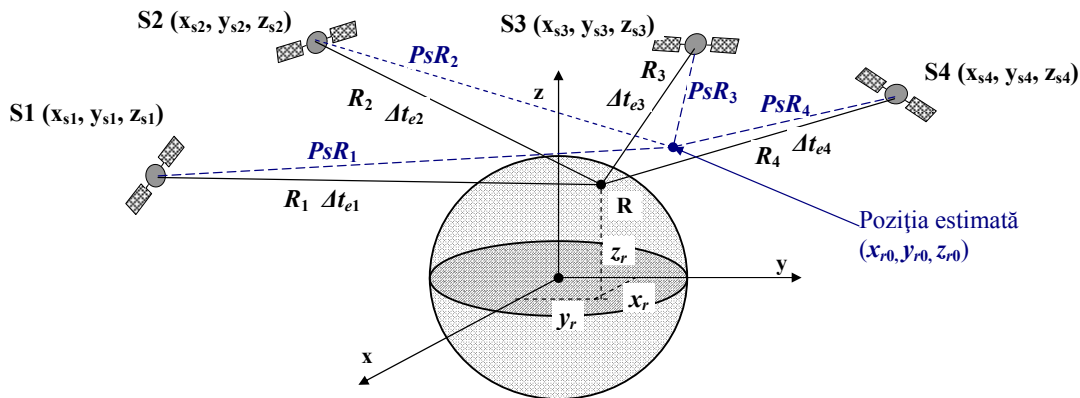


Fig. 2.5. Pozițiile sateliților și receptorul într-un sistem de 3 axe de coordonate

Într-un sistem $Oxyz$, pozițiile celor 4 sateliți $S_k(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk})$ sunt cunoscute cu eroare mică; poziția receptorului $R(x_r, y_r, z_r)$ este necunoscută – fig. 2.5. Distanțele adevărate sunt:

$$\begin{aligned}
R_{a1} &= \sqrt{(x_{s1} - x_r)^2 + (y_{s1} - y_r)^2 + (z_{s1} - z_r)^2} \\
R_{a2} &= \sqrt{(x_{s2} - x_r)^2 + (y_{s2} - y_r)^2 + (z_{s2} - z_r)^2} \\
R_{a3} &= \sqrt{(x_{s3} - x_r)^2 + (y_{s3} - y_r)^2 + (z_{s3} - z_r)^2} \\
R_{a4} &= \sqrt{(x_{s4} - x_r)^2 + (y_{s4} - y_r)^2 + (z_{s4} - z_r)^2}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Din relații de tipul (2.1) scrise pentru fiecare satelit rezultă:

$$\begin{cases}
PsR_1 = \sqrt{(x_{s1} - x_r)^2 + (y_{s1} - y_r)^2 + (z_{s1} - z_r)^2} + c\Delta t_e \\
PsR_2 = \sqrt{(x_{s2} - x_r)^2 + (y_{s2} - y_r)^2 + (z_{s2} - z_r)^2} + c\Delta t_e \\
PsR_3 = \sqrt{(x_{s3} - x_r)^2 + (y_{s3} - y_r)^2 + (z_{s3} - z_r)^2} + c\Delta t_e \\
PsR_4 = \sqrt{(x_{s4} - x_r)^2 + (y_{s4} - y_r)^2 + (z_{s4} - z_r)^2} + c\Delta t_e
\end{cases} \tag{2.4}$$

cu PsR_k – cunoscute pe baza relațiilor (2.1) aplicate pentru semnalele recepționate de la fiecare satelit.

(2.4) este un sistem de 4 ecuații cu 4 necunoscute: x_r , y_r , z_r și Δt_e .

Eroarea în măsurarea timpului de propagare (Δt_e), este diferența dintre timpul satelitelui și timpul receptorului. Timpul pe toți sateliții este același cu o eroare foarte mică, datorită celor 4 ceasuri atomice (două cu Cesium și două cu Rubidiu) amplasate pe fiecare satelit și a sincronizărilor periodice cu ceasul atomic din stația de control principală. În schimb, ceasurile receptorilor sunt de obicei cu cuarț, mult mai puțin stabile. Ca urmare, între timpul satelitelui și al receptorului există o diferență – aceasta este ΔT_e (aceeași pentru toți sateliții, deoarece este determinată, în principal, de ceasul receptorului)

Sistemul (2.4) este neliniar și deci greu de rezolvat. Se procedează la o liniarizare prin dezvoltare în serie Taylor.

[O funcție $f(x)$ se poate dezvolta în jurul unei valori x_0 în serie Taylor:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} \cdot \Delta x + \frac{f''(x_0)}{2!} \cdot \Delta x^2 + \dots + \frac{f^n(x_0)}{n!} \cdot \Delta x^n, \quad \text{cu } \Delta x = x - x_0$$

Reținând primii doi termeni: $f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \cdot \Delta x$ se realizează liniarizarea. Pentru aceasta trebuie să se adopte o valoare x_0 în apropierea soluției x , astfel ca Δx să fie mic.

Dacă seria folosește derivatele în zero ($x_0 = 0$), se obține seria Maclaurin.]

Pentru liniarizarea sistemului din (2.4), în fiecare ecuație k se introduce o poziție estimată $PsR_{k0}(x_{r0}, y_{r0}, z_{r0})$ în jurul căreia se dezvoltă funcțiile; se rețin numai primii 2 termeni. Pentru ecuația k :

$$\begin{aligned}
PsR_k(x_r, y_r, z_r) &= PsR_{k0} + \left. \frac{\partial(PsR_k)}{\partial x_r} \right|_{x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}} \cdot \Delta x_r + \left. \frac{\partial(PsR_k)}{\partial y_r} \right|_{x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}} \cdot \Delta y_r + \\
&\quad + \left. \frac{\partial(PsR_k)}{\partial z_r} \right|_{x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}} \cdot \Delta z_r + c\Delta t_e
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Dar, cu PsR_k din (2.3), derivând, rezultă:

$$\left. \frac{\partial \left[\sqrt{(x_{sk} - x_r)^2 + (y_{sk} - y_r)^2 + (z_{sk} - z_r)^2} + c\Delta t_e \right]}{\partial x_r} \right|_{x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}} = \frac{x_{r0} - x_{sk}}{PsR_{k0}} \text{ și analog pentru } y \text{ și } z.$$

cu $\Delta x_r = x_r - x_{r0}$, $\Delta y_r = y_r - y_{r0}$, $\Delta z_r = z_r - z_{r0}$ - distanțele dintre coordonatele reale și cele estimate, necunoscute.

Astfel, (2.3) devine:

$$\begin{cases} PsR_1 = PsR_{10} + \frac{x_{r0} - x_{s1}}{PsR_{10}} \cdot \Delta x_r + \frac{y_{r0} - y_{s1}}{PsR_{10}} \cdot \Delta y_r + \frac{z_{r0} - z_{s1}}{PsR_{10}} \cdot \Delta z_r + c \Delta t_e \\ PsR_2 = PsR_{20} + \frac{x_{r0} - x_{s2}}{PsR_{20}} \cdot \Delta x_r + \frac{y_{r0} - y_{s2}}{PsR_{20}} \cdot \Delta y_r + \frac{z_{r0} - z_{s2}}{PsR_{20}} \cdot \Delta z_r + c \Delta t_e \\ PsR_3 = PsR_{30} + \frac{x_{r0} - x_{s3}}{PsR_{30}} \cdot \Delta x_r + \frac{y_{r0} - y_{s3}}{PsR_{30}} \cdot \Delta y_r + \frac{z_{r0} - z_{s3}}{PsR_{30}} \cdot \Delta z_r + c \Delta t_e \\ PsR_4 = PsR_{40} + \frac{x_{r0} - x_{s4}}{PsR_{40}} \cdot \Delta x_r + \frac{y_{r0} - y_{s4}}{PsR_{40}} \cdot \Delta y_r + \frac{z_{r0} - z_{s4}}{PsR_{40}} \cdot \Delta z_r + c \Delta t_e \end{cases} \quad (2.6)$$

Pseudorazele măsurate PsR_k și cele estimate PsR_{k0} ($k = 1, 2, 3, 4$) sunt cunoscute, deci sunt cunoscute și diferențele $x_{r0} - x_{sk}$, $y_{r0} - y_{sk}$, $z_{r0} - z_{sk}$. Necunoscute sunt: diferențele dintre coordonatele poziției reale și a celei estimate (Δx_r , Δy_r , Δz_r) și eroarea de timp Δt_e care se obțin rezolvând sistemul (2.6). Se poate scrie:

$$\begin{pmatrix} PsR_1 - PsR_{10} \\ PsR_2 - PsR_{20} \\ PsR_3 - PsR_{30} \\ PsR_4 - PsR_{40} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{r0} - x_{s1}}{PsR_{10}} & \frac{y_{r0} - y_{s1}}{PsR_{10}} & \frac{z_{r0} - z_{s1}}{PsR_{10}} & c \\ \frac{x_{r0} - x_{s2}}{PsR_{20}} & \frac{y_{r0} - y_{s2}}{PsR_{20}} & \frac{z_{r0} - z_{s2}}{PsR_{20}} & c \\ \frac{x_{r0} - x_{s3}}{PsR_{30}} & \frac{y_{r0} - y_{s3}}{PsR_{30}} & \frac{z_{r0} - z_{s3}}{PsR_{30}} & c \\ \frac{x_{r0} - x_{s4}}{PsR_{40}} & \frac{y_{r0} - y_{s4}}{PsR_{40}} & \frac{z_{r0} - z_{s4}}{PsR_{40}} & c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta t_e \end{pmatrix},$$

din care, folosind inversa matricei coeficienților se obține:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta t_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{r0} - x_{s1}}{PsR_{10}} & \frac{y_{r0} - y_{s1}}{PsR_{10}} & \frac{z_{r0} - z_{s1}}{PsR_{10}} & c \\ \frac{x_{r0} - x_{s2}}{PsR_{20}} & \frac{y_{r0} - y_{s2}}{PsR_{20}} & \frac{z_{r0} - z_{s2}}{PsR_{20}} & c \\ \frac{x_{r0} - x_{s3}}{PsR_{30}} & \frac{y_{r0} - y_{s3}}{PsR_{30}} & \frac{z_{r0} - z_{s3}}{PsR_{30}} & c \\ \frac{x_{r0} - x_{s4}}{PsR_{40}} & \frac{y_{r0} - y_{s4}}{PsR_{40}} & \frac{z_{r0} - z_{s4}}{PsR_{40}} & c \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} PsR_1 - PsR_{10} \\ PsR_2 - PsR_{20} \\ PsR_3 - PsR_{30} \\ PsR_4 - PsR_{40} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

(Matricea necunoscutelor (erorile) este produsul dintre matricea inversă a coeficienților și matricea termenilor liberi.)

Cunoscând erorile, se calculează coordonatele receptorului:

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{x}_{r0} + \Delta \mathbf{x}_r; \quad \mathbf{y}_r = \mathbf{y}_{r0} + \Delta \mathbf{y}_r; \quad \mathbf{z}_r = \mathbf{z}_{r0} + \Delta \mathbf{z}_r \quad (2.8)$$

De obicei se fac mai multe iterații, cu poziții estimate corectate, până ce diferența rezultatelor a două iterații succesive este destul de mică. Eroarea de timp calculată ca mai sus, se utilizează pentru ajustarea timpului la receptor.

2.3.3. Erori în determinarea poziției prin GPS

La determinarea poziției prin GPS se introduc numeroase erori; se produce așa numita “diluție a preciziei”. Printre cele mai importante erori și cauze, sunt:

- Timpul sateliților – deși sateliții dispun de ceasuri atomice, cu stabilitate foarte bună (eroarea este de cca 1-2 părți la 10^{13} pe zi) și se fac sincronizări periodice, tot există erori de timp de circa 10ns/zi, care introduc erori de poziționare de ordinul a 3m.
- Poziția sateliților (efemeridele) – deși este mereu determinată de către stațiile de control, poziția sateliților este cunoscută cu erori de ordinul 1 ... 5m din cauza imposibilității determinării tuturor efectelor care influențează mișcarea sateliților.

- Viteza luminii – se modifică în atmosferă și ionosferă și nu poate fi considerată ca o constantă.

Viteza luminii diferă în funcție de densitatea atmosferei și a conținutului în particule cu sarcină electrică. Mai mult, dacă unghiul de intrare în atmosferă diferă de 90° , se produc refracții deoarece indicele de refracție variază cu densitatea atmosferei, deci cu altitudinea. Ca urmare, distanța parcursă efectiv de undă diferă de cea reală (fig. 2.6). În prezent, mesajul de la sateliți include și un model al refracției pe baza căruia se pot face corecții care reduc eroarea cu peste 66%. Receptoarele sofisticate – și scumpe, realizează recepția simultană a celor 2 unde cu frecvențe diferite (L1 în banda 1602 – 1615MHz cu și L2 în banda 1246 – 1256MHz). Deoarece unghiurile de refracție variază cu frecvența în mod diferit, prin compararea rezultatelor măsurării timpilor pe cele 2 frecvențe se pot determina erorile și efectua corecții).

- Propagarea că căi multiple (multi-path propagation), datorate reflexiilor (fig. 2.7), introduce erori substanțiale. În prezent, aceste erori sunt practic eliminate. De exemplu, unda reflectată ajunge cu nivel ceva mai mic și puțin mai târziu decât unda directă – pe baza măsurării celor 2 decalaje, semnalul parazit (reflectat) poate fi eliminat.

- Măsurarea timpului de propagare – se face pe baza momentelor în care semnalul recepționat execută o tranziție de nivel – aceasta introduce o eroare de ordinul a 10 – 20ns (ordinul de mărime al perioadei semnalului) și în consecință o eroare de poziție de 3 – 6m. Eroarea în determinarea tranziției de nivel este mult esențial de zgomote, reflexii și refracții ale semnalelor.

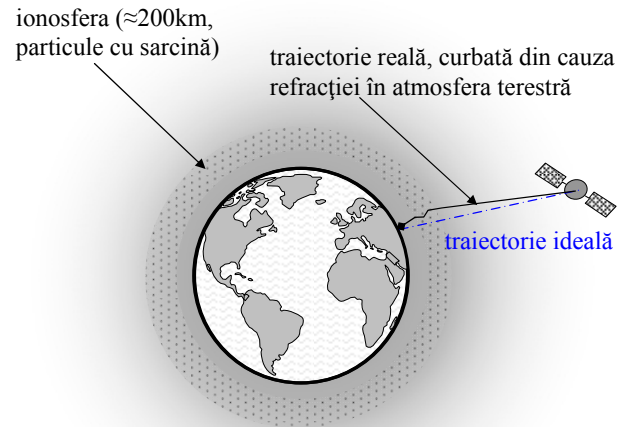


Fig. 2.6. Eroare de distanță determinată de refracția undelor EM în atmosfera terestră

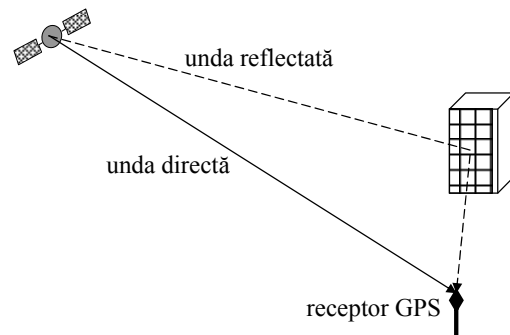


Fig. 2.7. Undă directă și reflectată la recepția semnalului de pe satelit GPS

- Geometria orbitelor sateliților, mai bine spus, geometria pozițiilor reciproce ale sateliților recepționați – dacă cei 4 sateliți sunt apropiați, eroarea de poziționare este mare; se spune că apare o “diluție geometrică a preciziei” (GDoP – Geometric Dilution of Precision).

Poziția receptorului se determină pe baza determinării distanțelor până la sateliți. Aceste distanțe (raze) se determină cu erori, deci între o valoare minimă și una maximă. Ca urmare, poziția receptorului se va afla într-un volum determinat de valorile minime și maxime ale celor 3 raze determinate. Problema poate fi ușor înțeleasă considerând o situație în plan – fig. 2.8. Din figură se observă cu ușurință efectul poziției reciproce a sateliților asupra incertitudinii poziției receptorului: când sateliții sunt depărtați, aria (volumul) în care se află probabil receptorul este mai mic.

Multe receptoare GSM indică pozițiile sateliților vizibili, ceea ce permite o apreciere calitativă a “cât de mare poate fi eroarea datorată pozițiilor sateliților”.

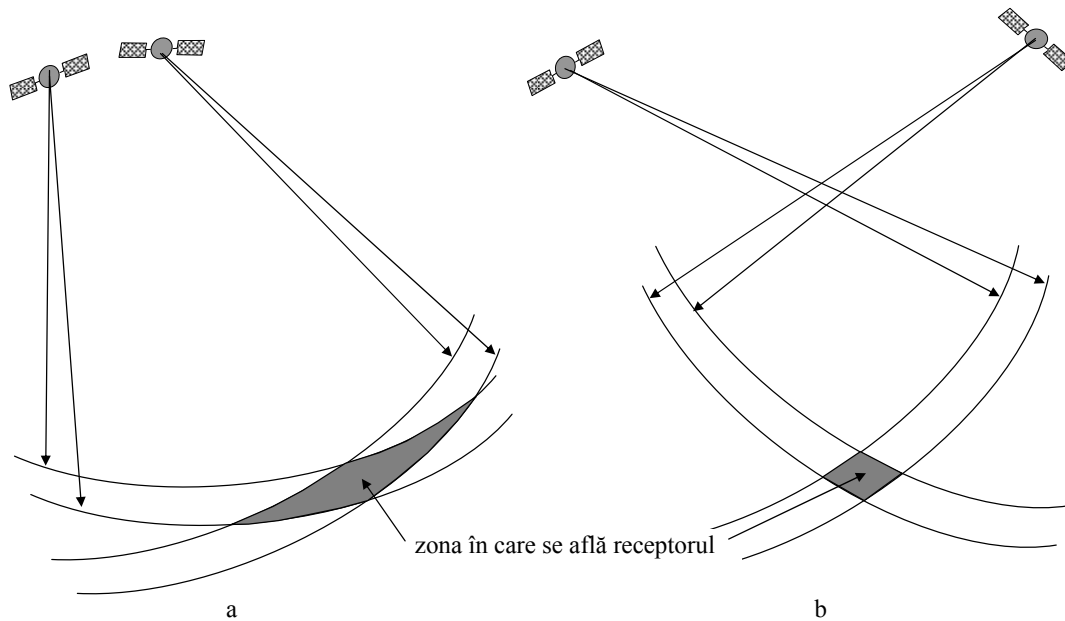


Fig. 2.7. Eroari datorate poziției reciproce a sateliților: a – erori mari, poziție proastă; b – erori mici, poziție bună

- Eroarea datorată ambiguității determinării fazei apare datorită modului în care se realizează determinarea timpului la receptor: prin sesizarea unui salt de fază în semnalul de purtătoare (se va detalia mai jos). Datorită periodicității purtătoarei (un semnal sinusoidal), saltul de fază poate fi localizat la momente diferite, ceea ce înseamnă localizarea satelitului la distanțe care pot să difere cu 1 ... 4 lungimi de undă (20 ... 100cm). Eliminarea ambiguității se face în diverse moduri: folosind informații suplimentare (trimise codat), determinând schimbările în poziția satelitului sau folosind mai mulți sateliți decât este strict necesar.

Măsurătorile efectuate de către US Federal Aviation Administration pe durate mari de timp, pe întreaga constelație, pe variate distribuții ale sateliților vizibili de către receptori (în 2004) au indicat următoarele valori medii ale erorilor:

- Eroarea în poziționare pe verticală (68,3% din rezultate): 12,8m
- Eroarea în poziționare pe verticală (95,5% din rezultate): 25,6m
- Eroarea în poziționare pe orizontală (68,3% din rezultate): 10,2m
- Eroarea în poziționare pe orizontală (95,5% din rezultate): 20,4m

În multe cazuri, erorile au fost sensibil mai mici – de ordinul 1 ... 2m.

Erorile pot fi reduse semnificativ prin diverse procedee, de exemplu prin măsurători diferențiale.

GPS a fost primul sistem cu elemente “macroscopice” în care, prin 1997 – 98, s-au putut evidenția caracteristicile relativiste ale spațiului și timpului; până atunci, aceste efecte au putut fi puse în evidență numai la nivel microscopic, în acceleratoarele de particule (electroni, protoni, ...). Până atunci încă mai existau îndoiele privind valabilitatea teoriilor relativității ale lui Einstein. Verificarea efectelor relativiste în GPS este posibilă deoarece: sateliții se deplasează cu viteze foarte mari (cca 14.000km/ora = 3,89km/sec.). Deoarece un observator de pe Pământ vede sateliții în mișcare relativă, conform teoriei relativității restrânse, e sateliții timpul este “dilatat” față de Pământ – ceasurile de pe sateliți rămân în urma celor de pe sol cu circa 7μsec/zi.

Pe de altă parte, conform teoriei relativității generalizate, continuumul spațiu-timp este deformat în prezența maselor mari, mai mult pe sol (aproape de centrul Pământului) și mai puțin pe sateliți (la 20.000km distanță de sol). Din cauza acestui efect, ceasurile de pe sateliți o iau înaintea celor de pe sol cu circa 45μsec/zi.

Efectul cumulativ este că ceasurile de pe sateliți merg “înainte” față de cele de pe sol cu circa 38μsec./zi.

Diferența pare mică – și chiar este, pentru măsurătorile obișnuite, dar în cazul GPS diferențele admise sunt de ordinul 20 – 30nsec/zi – cu 3 ordine de mărime mai mici decât cele relativiste!

La reglarea ceasurilor de pe sateliți s-au luat măsuri pentru compensarea efectelor relativiste – înainte de lansarea sateliților, frecvența ceasurilor s-a reglat ceva mai mică decât a ceasurilor care rămân pe sol, astfel ca, ceasurile de pe orbită să “indice” la fel cu cele de pe sol.

2.3.4. Poziționarea diferențială prin GPS (GPS diferențial)

Există destule aplicații în care erorile de câțiva metri, inevitabile la poziționarea absolută prin GPS sunt inacceptabile (de exemplu, la măsurarea deplasării coronamentului unui baraj, eroarea acceptabilă este de câțiva milimetri!).

Pentru reducerea drastică a erorilor, până la sub 1cm, se poate folosi **poziționarea diferențială prin GPS** (Differential GPS – DGPS). Ideea este de a corecta erorile la localizarea unui receptor dintr-o locație necunoscută prin măsurarea erorilor apărute la localizarea unui receptor de referință dintr-o locație cunoscută, pe baza observației că, dacă cele două locații nu sunt prea îndepărtate (sub circa 200km), erorile sunt foarte apropiate.

Principiul GPS diferențial presupune existența unei **stații GPS de referință** ($SRef$) – fig. 2.8, plasată într-un punct cu poziție foarte precisă stabilită și cunoscută. $SRef$ își determină poziția folosind 4 sateliți, cu o eroare cunoscută; de fapt, se determină eroarea în pseudoraza calculată pentru fiecare satelit ($\Delta x_{sref\ k}$, $\Delta y_{sref\ k}$, $\Delta z_{sref\ k}$, – diferențele dintre PsR_k și valoarea adevărată, cunoscută). **Receptorul utilizatorului** (RU), își determină poziția folosind aceiași 4 sateliți ca și $SRef$, dar cu eroare necunoscută. Comparând în mai multe secvențe rezultatele măsurătorilor la RU și $SRef$ se pot corecta valorile obținute, pe baza observației că erorile în determinarea PsR_k ale RU sunt foarte apropiate cu cele ale $SRef$ și se pot folosi pentru corecția rezultatelor la RU . Evident, $SRef$ și RU nu pot fi prea îndepărtate (cam la 200km maximum) și trebuie să comunice una cu alta.

GPS diferențial se poate realiza după două tehnici:

- DGPS bazat pe măsurarea duratei propagării (eroarea scade la sub 1m);
- DGPS bazat pe măsurarea fazei semnalului de purtătoare (eroarea scade sub 1cm).

Aplicațiile DGPS diferă, în funcție de mărimea ariei de acțiune a stației de referință; există:

- DGPS local;
- DGPS regional;
- DGPS pe arie largă (wide area DGPS).

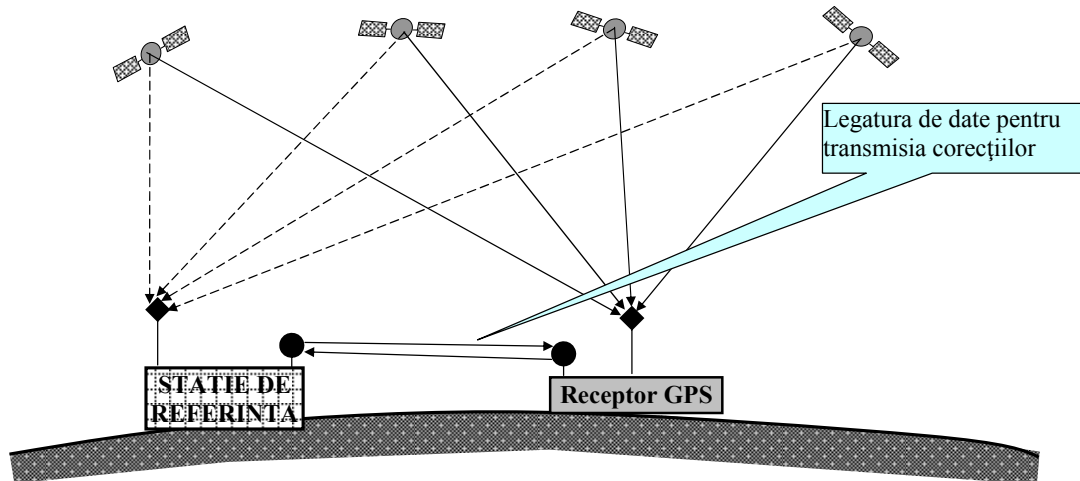


Fig. 2.8. Principiul poziționării diferențiale prin GPS

De fapt, calculatorul stației de referință:

- determină *timpii de deplasare ai undei* pornind de la poziția cunoscută a receptorului și pozițiile sateliților primite de la aceștia (în cadrul mesajelor);
- măsoară *timpii de deplasare*, ca la orice receptor GPS;
- calculează erorile de timp de propagare pentru fiecare satelit din aria de vizibilitate;
- comunică erorile receptorilor GPS care solicită aceasta

În orice variantă, este esențial ca: (1) *SRef* și *RU* să utilizeze aceiași sateliți și (2) recepția semnalelor să se realizeze în același timp. Deoarece o stație de referință nu are cum să știe ce sateliți sunt utilizați de un receptor GPS oarecare, la cerere, transmite erorile calculate pentru toți sateliții vizibili – este sarcina calculatorului de la utilizator să determine (pe baza unor coduri) care erori corespund sateliților folosiți.

De regulă, sistemele lucrează în regim de *postprocesare*, adică: datele de la sateliți sunt culese și procesate în stații, după care se realizează legătura între *SRef* și *RU* prin care se transmit datele necesare corecțiilor la un calculator amplasat la utilizator (*RU*). Pentru corecții calculatorul folosește de regulă programul (programe) de firmă (de la producătorul receptoarelor GPS).

În general, utilizarea sistemelor DGPS este scumpă (soft-ul și accesul la stațiile de referință costă mult) și nu se justifică oricând.

capitolul 3

Semnalele utilizate de sateliții GPS

3.1. Introducere

Sateliții din GPS comunică cu stațiile de control și cu utilizatorii.

Comunicațiile între sateliți și stațiile de control sunt bilaterale; există:

- legătură satelit → stație de sol (legătura descendentă – downlink) și
- legătură stație de sol → satelit (legătura ascendentă – uplink).

Procedurile și semnalele utilizate pentru comunicațiile dintre sateliți și stațiile de control nu sunt disponibile în literatura accesibilă (citată în bibliografie) și de fapt nu prezintă interes pentru utilizatorii sistemului.

Între sateliți și utilizatori conexiunea este unilaterală: satelit → utilizator (downlink).

Toți sateliții din blocurile II ... IIR emit simultan pe două purtătoare de canal de RF din gama UIF¹, în banda L²: **L1** pe **1575.42MHz** ($\lambda \approx 19\text{cm}$) și **L2** pe **1227.60MHz** ($\lambda \approx 24\text{cm}$). Cele două purtătoare sunt modulate în fază digital (modulație tip PSK – Phase Shift Keying) și vehiculează informații diferite.

Pe **purtătoarea L1** se transmite mesajul de navigație, adică datele privind poziția satelitului, orbita, corecțiile de tact și multe altele. Pentru aceasta este necesar soft-ul pentru decriptarea codului grosier (codul C/A). Această operație reprezintă serviciul de poziționare standard (Standard Positioning Service – SPS).

Purtătoarea L2 servește numai pentru măsurarea întârzierii undei în ionosferă. Aceasta se face cu receptoare GPS echipate cu soft-ul necesar pentru decriptarea codului pseudo-aleator precis (codul P). Această operație reprezintă serviciul de poziționare precisă (Precise Positioning Service – PPS) care asigură erori mult mai mici decât SPS.

Purtătoarea L1 este modulată digital în fază, cu două semnale în cuadratură (QPSK - Quadrature PSK). Pentru ambele semnale – “în fază” și “în cuadratură” (defazat cu $\pi/2$), se folosește tehnica de împrăștiere a spectrului “cu secvență de cod de zgomot pseudo-aleator (pseudo-random noise – PRN).

Semnalul “în fază” este modulat binar (în fază) cu un șir de date cu **50bps** (bps = biți/secundă). Spectrul acestui șir de date este “împrăștiat” cu o secvență de cod de zgomot pseudo-aleator (PSN) de **1023** biți – ceea ce corespunde unei frecvențe de bit de cod de 1,023MHz (perioada 0,9775171 μs); secvența are o perioadă de repetiție de 1ms. Codul pseudoaleator folosit aici se numește “**C/A Code – Coarse Acquisition, cod de achiziție grosieră**).

Semnalul “în cuadratură” este de asemenea modulat binar în fază cu aceleași date, cu 50 biți/sec., dar secvența PSN folosită pentru împrăștiere este de **1023** biți – ceea ce corespunde unei frecvențe de bit de cod de 10,23MHz (0,0977... μs); secvența aceasta are o perioadă de repetiție de o săptămână. Codul folosit aici se numește cod P (**P Code – Precise Code, codul /de achiziție/ precisă**).

Expresia matematică a semnalului din banda L1 este:

¹ Banda UIF (Ultraînaltă frecvență – Ultra High Frequency UHF): 300 – 3000 MHz

² După IEEE și Radio Society of Great Britain, frecvențele din banda L sunt 1000 – 2000MHz. În această bandă sunt canalele rezervate pentru GPS (L1=1575,42MHz; L2=1227,60MHz; L3=1381,05MHz; L5=1176,45MHz) și pentru alte aplicații (radiodifuziune digitală, RADAR, ...). După alte surse, banda L este 390 – 1550MHz.

$$s(t) = \sqrt{2P_I} d(t)c(t)\cos(\omega t + \theta) + \sqrt{2P_Q} d(t)p(t)\sin(\omega t + \theta) \quad (3.1)$$

P_I și P_Q sunt puterile componentelor purtătoarei în fază și respectiv în cuadratură (P_Q este cu circa 3dB mai mică decât P_I);

$d(t)$ este șirul de date (transmis cu 50 bps.);

$c(t)$ și $p(t)$ sunt secvențele pseudo-aleatoare de zgomot (PRN) ale codului de achiziție grosieră (C/A) respectiv ale codului de achiziție precisă (P).

$\omega = 2\pi f$ este frecvența unghiulară a purtătoarei L1; θ este faza inițială (în radiani).

Purtătoarea L2 este modulată în fază numai de către șirul de date de 50 bps., cu spectrul împrăștiat cu secvența PRC de cod P (precis); astfel, semnalul emis este de forma:

$$s(t) = \sqrt{2P_Q} d(t)p(t)\sin(\omega t + \theta) \quad (3.2)$$

Datele pentru navigație (“mesajul de navigație”) sunt transmise prin șirul de biți cu viteză de 50 bps.. Mesajul de navigație conține efemeridele (poziția) satelitelui, orbita, corecții de tact, și mulți alți parametri.

Structura componentelor în fază și în cuadratură ale semnalului L1 apar în fig. 3.1. Un bit de date durează 20ms (viteza este de 50 bps). Într-o perioadă de bit de date încap exact 20 perioade de cod C/A (o perioadă de cod C/A durează 1ms) respectiv 20460 biți de cod C/A; începutul și sfârșitul unui bit de date sunt marcate de începutul unei perioade de repetiție a codului C/A. Într-o perioadă de bit a codului C/A intră exact 1540 perioade de purtătoare L1 ($1575,42 \cdot 10^6 / 1,023 \cdot 10^6 = 1540$). În cazul semnalului în cuadratură: pe durata unui bit de date (20ms) intră exact 204600 biți de cod P (de 10 ori mai mulți biți ca în cazul codului C/A) iar începutul și sfârșitul unui bit de date coincid cu începutul unei perioade de repetiție de cod P.

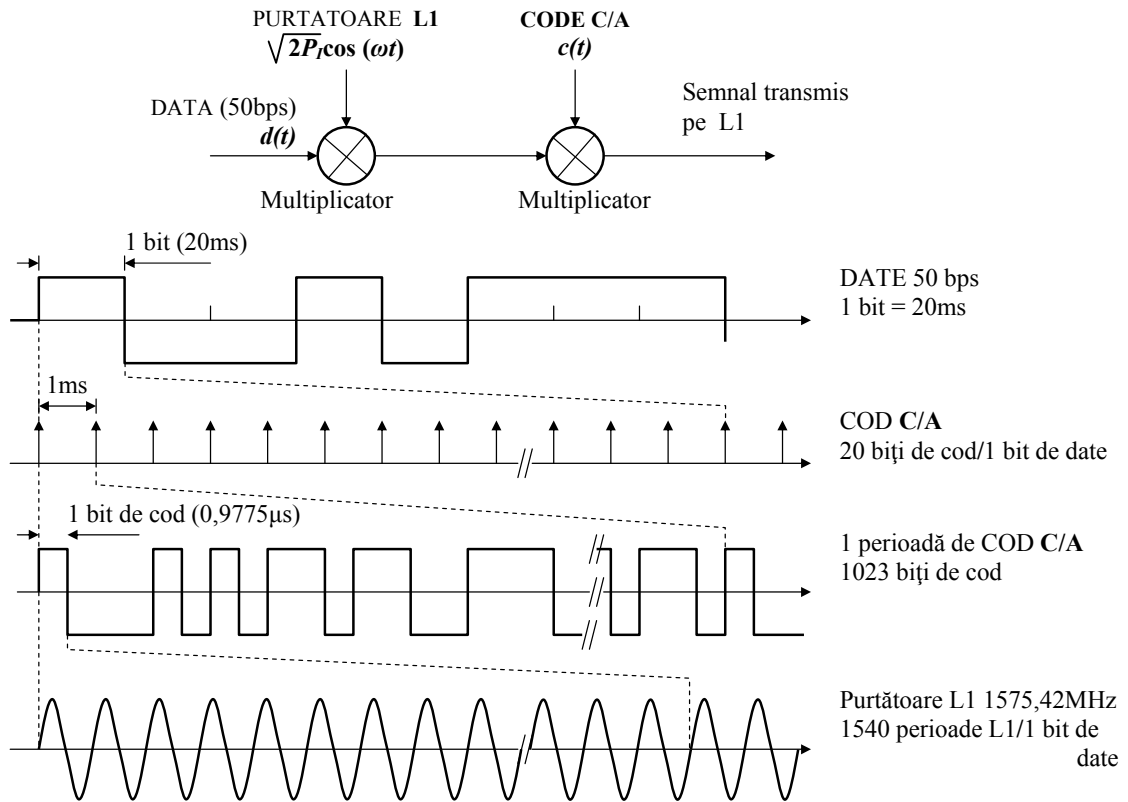


Fig. 3.1. Structura componentelor în fază și în cuadratură ale semnalelor pe purtătoarea L1

3.2. Mesajul de navigație (fluxul de date cu 50 bps)

Sirul (fluxul) de date (Data stream) transmis cu 50 bps constituie “mesajul de navigație” care include mai multe componente, dintre care cele mai importante sunt:

1. *Datele de referință ale satelitului* (Satellite Almanac¹ Data), adică un ansamblu de informații privind orbita satelitului și poziția sa pe orbită, în cadrul constelației. Aceste date sunt orientative, nu permit poziționarea precisă a satelitului, dar sunt valide mult timp (luni) și asigură recunoașterea acestuia de către receptor când este pus în funcție pentru prima dată. Aceste date se pot folosi și pentru aproximarea efectului Doppler.

2. *Efemeridele satelitului*, sunt datele care permit poziționarea precisă a stelitului (seaman cu datele de *almanac* dar sunt mult mai precise). Aceste date sunt actualizate frecvente, la câteva ore.

3. *Semnallee de timp*, sunt date care conțin “momentul” (timpul) transmisiei unui anumit semnal (dată, front), din semnalul emis de satelit. Timpul este măsurat în raport cu o origine stabilită pentru toată constelația GPS.

4. *Intârzierea ionosferică*, reprezintă o estimare a întârzierii realizate la trecerea undei prin ionosferă.

5. *Mesajul de stare a satelitului* (|Satellite Health Message) este un sir de date cu informații asupra stării de funcționabilitate a sistemelor de pe satelit. Dacă sunt anomalii în funcționare, pe baza acestui mesaj, receptorul va ignora datele primite.

Datele de la satelit sunt structurate în *cadre* (frame) – fig. 3.2.

Un mesaj complet este format din 25 de cadre, fiecare cu 1500 biți.

Fiecare cadru este divizat în 5 *subcadre* (subframe) cu 300 biți; fiecare subcadru include câte 10 cuvinte a câte 30 biți/cuvânt; bitul cel mai semnificativ (MSB – Most Significant Bit) este transmis primul.

La o viteză de 50 bps, sunt necesare 6 secunde pentru transmisia celor 300 biți dintr-un subcadru și 30 secunde pentru transmisia întregului cadru. Întregul mesaj de navigație (25 cadre) se transmite în 750 secunde (12,5 minute).

Descrierea detaliată a conținutului mesajului de navigație depășește cadrul acestei lucrări. În continuare se face numai o prezentare sumară a principalelor componente ale mesajului – fig. 3.2.

Fiecare subcadru începe cu un *cuvânt de telemetrie* (TLM – Telemetry Word). Primii 8 biți din TLM sunt un preambul necesar receptorului să stabilească începutul subcadrului; următorii biți conțin un mesaj de telemetrie destinat utilizatorilor autorizați, fără interes pentru utilizatorii civili.

Al doilea cuvânt din subcadru este *cuvântul de transfer [al controlului]* (HOW – Hand-over Word) și conține în principal informații necesare determinării timpului (la receptor).

Informația din HOW permite receptorului să determine precis momentul emisiei: anul, luna, ziua, ora, minutul, secunda, ..., fracțiuni de secundă. Pe de altă parte, TLM în combinație cu o parte din HOW permite determinarea cu precizie a momentului de start a fiecărui subcadru. Urmarea este ca receptorul poate calcula durata necesară undei pentru a parcurge distanța satelit – receptor (cu erorile indicat anterior).

¹ Termenul englez *Almanac* – în lb. română almanah, semnifică “calendar” (cu informații suplimentare legate de astronomie, evenimente, ...) dar și “carte cu informații pe o temă dată, publicată anual”. În cazul unui satelit, *almanac* înseamnă totalitatea datelor privind datele orbitale ale acestuia. În continuare se va utiliza cuvântul englezesc (*almanac*) deoarece cuvântul românesc *almanah* are cu alt înțeles, care nu se referă la poziția astrilor.

După cuvintele TLM și HOW, subcadrele conțin alte informații: efemeridele, starea ionosferei, almanac-ul, starea stelitelui și altele (fig. 3.2)

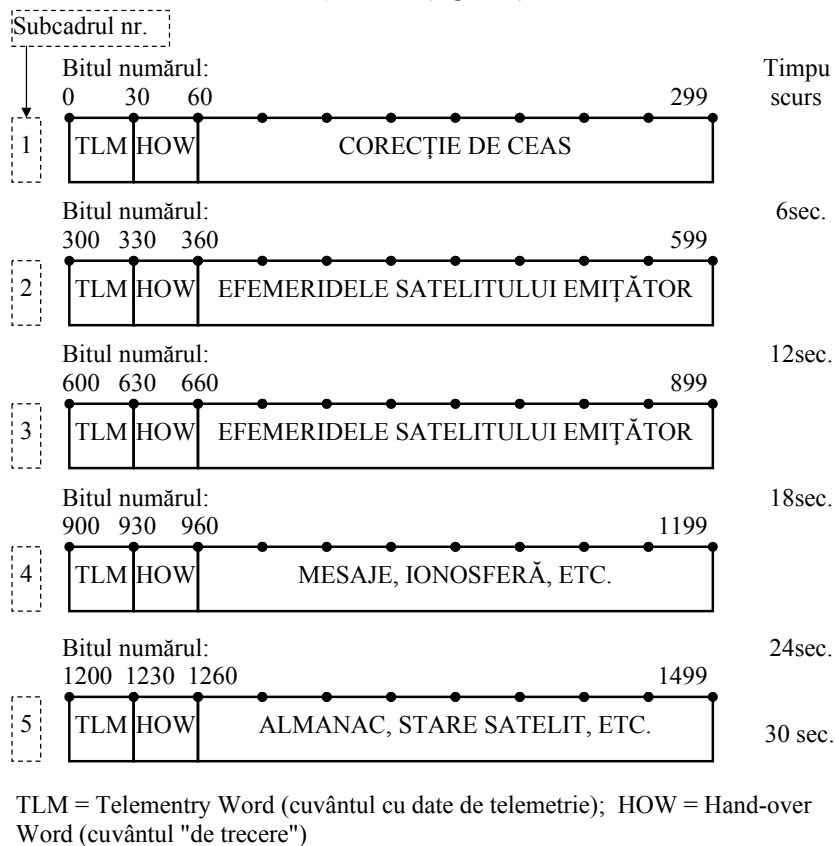


Fig. 3.2. Structura cadrului mesajului de navigație

3 biți din HOW sunt utilizați ca identificatori de subcadru.

Subcadrul 1 conține corecția ceasului sistemului GPS. Timpul măsurat de ceasul de pe satelit se numește "Timpul vehicolului spațial" – **SV Time** (Space Vehicle Time); timpul obținut după aplicarea corecției este "Timpul sistemului" – **GPS Time**. Astfel, chiar dacă diferiți sateliți au măsuri diferite ale timpului – SV Time diferiți, (erori produse de variate fenomene), toți sateliții dispun de o aceeași măsură a timpului – GPS Time.

Subcadrele 2 și 3 conțin efemeridele satelitelui, de fapt datele necesare pentru determinarea cu precizie a poziției satelitelui la un moment dat (într-un sistem de referință adoptat – WG 84, §1.2, pentru GPS).

Subcadrul 4 conține unele date de almanac dar mai ales informații privind ionosfera (pentru calculul corecțiilor asupra vitezei undelor), date pentru conversia timpului GPS în timp universal (UTC - Temps Universel Coordonné – timp universal coordonat¹) precum și mesaje speciale.

Subcadrul 5 conține datele de *almanac* ale tuturor sateliților. Pe baza acestora se stabilește poziția satelitelui, cu destulă de mare aproximație. Aceste date sunt valabile o perioadă de timp mai îndelungată. Tot aici sunt introduse și informațiile privind funcționarea echipamentelor de pe satelit.

¹ UTC (Temps Universel Coordonné) este Timpul Internațional Atomic la care se adaugă câte 1 secundă, la intervale neregulate, pentru compensarea încetinirii rotației Pământului; practic UTC este același cu GMT – Greenwich Mean Time – referința standard pentru măsurarea timpului pe Pământ; deosebirea între UTC și GMT este că pentru UTC se folosește o scară de timp atomică iar pentru GMT – scara de timp uzuală (ore, minute, ...).

3.3. Codul de achiziție grosieră (C/A Code – Coarse Acquisition Code)

3.3.1. Principile tehnicii spread spectrum

Data fiind distanța mare de la satelit la receptor (circa 20.000km) și puterea limitată a emițătorului de pe satelit, semnalul recepționat este foarte slab (uzual nW). Pe de altă parte, receptorul este adesea plasat în zone puternic poluate electromagnetic, în care nivelul de zgomot este mult mai mare decât nivelul semnalului util. În plus, efectele reflexiilor – propagarea pe căi multiple (multipath propagation) sunt importante.

Se știe că spectrul de putere¹ al unui semnal modulat digital în fază cu 2 nivele (BPSK – Binary PSK) de către un șir de biți de cu viteza R_b , este practic localizat într-o bandă cu lărgimea dublul vitezei ($B = 2R_b$) din jurul purtătoarei. În cazul GPS, datele sunt transmise cu viteza $R_D = 50 \text{ bps}$, deci banda ocupată în jurul purtătoarei L1 (1575.42MHz) este de 100Hz – fig. 3.3. Dacă transmisiile s-ar realiza prin modularea directă a purtătoarei cu biții de date de 50bps, ar apărea mari dificultăți la recuperarea semnalului util din zgomot, la eliminarea semnalelor [provenite din reflexii și la identificarea transmițătorului..

S-a pus problema găsirii unei tehnici de radiocomunicație care să asigure recepție corectă în condițiile foarte nefavorabile indicate mai sus. Una dintre tehnicile cele mai eficiente care asigură recuperarea semnalului în condiții de transmisie foarte nefavorabile este aceea cunoscută sub numele de "spread spectrum" – *spectru împrăștiat*, aplicabilă numai în transmisiile de date.

Tehnica *spread spectrum* este un procedeu de transmisie (prin radio) prin care semnalul în banda de bază este codat într-un semnal modulat, a cărui bandă este "împrăștiată", acoperind o bandă cu cel puțin un ordin de mărime mai mare decât aceea normal necesară transmisiei semnalului din banda de bază. Împrăștierea se face multiplicând semnalul din banda de bază (cu biți având o perioadă T_D) cu o secvență formată din biți cu perioada T_b mult mai mică ($T_b \ll T_D$). Pentru detecția semnalului dorit în prezența tuturor interferențelor, semnalul recepționat este corelat cu secvența utilizată la împrăștiere, cunoscută. Rezultatul net este o îmbunătățire a performanțelor cu raportul benzilor ocupată de semnalul împrăștiat și al semnalului transmis normal (fără împrăștiere).

În cazul GSM, împrăștierea spectrului se realizează:

- o folosind codul C/A pentru purtătoarea L1 pentru achiziție "grosieră" și
- o codul P pentru achiziție precisă, pe L1 și L2.

Codul C/A folosește o secvență pseudoaleatoare în care biții de împrăștiere – numiți și "chips" (*feliuțe*) se succed cu viteza de 1023Mbps (frecvența tactului este de 1023MHz). În acest caz, spectrul semnalului de date este "împrăștiat" într-o bandă de $2 \times 1023 = 2046 \text{ MHz}$ (de 20460 ori mai mare decât banda semnalului dedate), cum se vede în fig. 3.3.

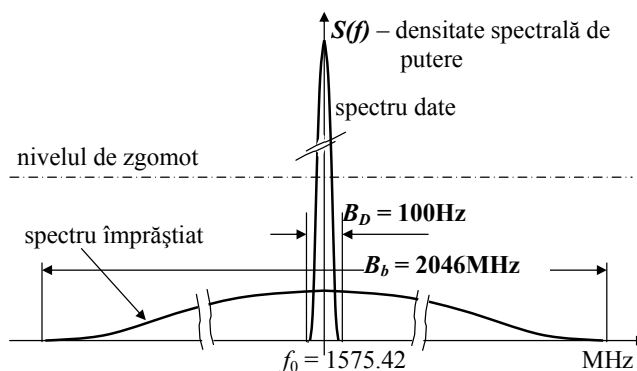


Fig. 3.3 Spectrele de putere ale semnalului L1 modulat BPSK cu date (50bps) și biți ai codului C/A (1023 Mbps)

¹ Funcția densitate spectrală de putere

defazare prin sumare modulo-2 cu secvența pseudo-aleatoare utilizată la emisie; impulsurile astfel obținute sunt apoi sumate rezultând biții de date. Toate aceste operații pot fi realizate

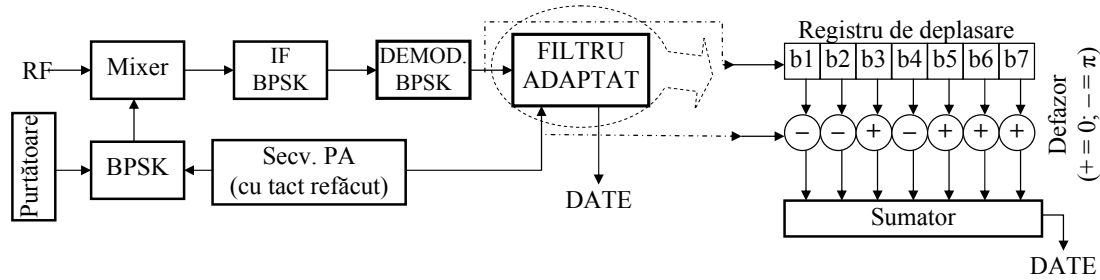


Fig. 3.5. Schema bloc simplificată a unui receptor pentru Spread spectrum cu secvență de pseudo zgomot (aceeași ca în fig. 3.4)

chiar dacă în RF raportul semnal-zgomot este considerabil mai mic decât 1.

La receptor, nivelul densității spectrale de putere al semnalului (cu spectru împrăștiat) poate fi mai mic decât nivelul de zgomot ambiant – fig. 3.3. Prin detecție (corelație), puterea semnalului este concentrată într-o bandă mult mai mică – astfel, densitatea spectrală de putere a semnalului de date obținut prin demodulare devine mult mai mare decât densitatea spectrală de putere a zgomotului – datele pot fi interpretate corect.

Dacă biții de date sunt furnizați cu viteza R_D și semnalul ocupă în RF o bandă B_b , se definește câștigul de procesare sau factorul de împrăștiere:

$$G_p = B_b / R_D \quad (3.1)$$

În cazul GPS câștigul de procesare este foarte mare: 20460 pentru codul C/A și 204600 pentru codul P.

3.3.2. Funcțiile codului C/A

Codul C/A de achiziție grosieră are mai multe funcții, printre care:

1. *Asigurarea măsurării corecte a distanței satelit-receptor.* Pentru măsurarea timpului de propagare este necesar ca purtătoarea de RF să fie modulată cu un semnal de frecvență mare – cu cât această frecvență este mai mare, precizia măsurătorii este mai bună. Acest lucru se întâmplă deoarece momentele la care se fac măsurătorile sunt stabilite pe fronturile impulsurilor semnalului modulator – prima eroare este practic 1/2 din distanța dintre 2 fronturi, deci $T_b/2$ (T_b – perioada impulsurilor).
2. *Asigurarea imunității la propagarea pe căi multiple,* datorate reflexiilor. Unul dintre marile avantaje ale transmisiilor cu *spread spectrum* este tocmai creșterea imunității interferențele semnalului cu cele reflectate: semnalele reflectate sunt defazate față de cel real, util, și ca urmare, la ieșirea din corelator (filtrul adaptat) numai acesta din urmă determină răspuns semnificativ.
3. *Asigurarea măsurării simultane a distanței la mai mulți sateliți.* Deoarece fiecare satelit dispune de propria secvență pseudo-aleatoare, identificarea emițătorului se poate face ușor: (1) semnalul provenit de la mai mulți sateliți este trecut prin-un banc de filtre adaptate, ca cel din fig. 3.5; (2) fiecare filtru este configurat pentru câte una dintre secvențele pseudo-aleatoare; (3) fiecare semnal va determina răspuns numai la filtrul adaptat propriei secvențe – celelalte semnale, codate cu secvențe diferite sunt "zgomote" și nu determină răspuns semnificativ. jamming
4. *Asigurarea imunității la bruiaj,* adică la semnale perturbatoare cu spectrul îngust în banda semnalului util. Aceasta este o proprietate inerentă tehnicii *spread spectrum*, determinată

de faptul că numai semnalul util produce răspuns la ieșirea filtrului adaptat. În general tehnica *spread spectrum* asigură o mare imunitate la interferențe.

3.3. Codul de achiziție precisă (P Code – Precise Code)

Codul P funcționează după exact aceleași principii ca și codul C/A (*spread spectrum*) doar că viteza chips-urilor este de 10 ori mai mare (10230Mbps). Ca urmare, spectrul este lărgit și mai mult – semnalul ocupă o bandă de 20460MHz. Ca urmare, codul P asigură toate funcțiile descrise în §3.2.1 dar cu o precizie (inclusiv a poziționării) aceste motive, codul P a fost inițial accesibil numai miitarilor SUA. În prezent este accesibil și pentru aplicații civile.

Structura codului P este publică – oricine poate realiza receptorul pentru cod P și realiza localizarea precisă. Totuși, informațiile codate P sunt criptate – numai cine deține cheia de decriptare, adică militarii SUA, poate înțelege datele transmise.

Codul P se transmite pe ambele purtătoare (L1 și L2) – aceasta permite compararea timpilor de propagare a celor două unde cu frecvențe diferite și introducerea unor corecții.

Bibliografie

1. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews "Global Position Systems, Inertial Navigation and Integration", J. Wiley, 2007, ISBN 13 978-0-470-04190-1
2. Ahmed El-Rabbany "Introduction to GPS The Global Positioning System", Artech House, 2002, ISBN 1-58053-183-0
3. Gregory T. Frenh "An Introduction to the Global Positioning System. What It Is and How It Work", GeoReserch Tnc, Bethesda, USA, 1996, ISBN 0-9655723-0-7
4. Laurie Tetley, David Calcutt "Electronic Navigation Systems", Butterwoth & Heinemann, Oxford, 1988, ISBN 0 7506 51385
5. Peter H. Dana, "Global Positioning System Overview", k.foote@colorado.edu.
6. Jean-Marie Zogg "GPS Basics", 2002, www.u-blox.com
7. Kathie Kingsley-Hughes "Hacking GPS", Wiley Publishing Inc., 2005, USA, ISBN 0-7645-8424-3
8. Vlad Cehan "Radiorelee și comunicații prin sateliți", curs RRCS, <http://telecom.etc.tuiasi.ro/telecom/staff/vlcehan/index.htm>