

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII

BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂTĂȚIREA PRECIZIEI DE
DETERMINARE A POZIȚIEI UTILIZÂND SISTEME
GNSS COMPLEMENTARE

Conducător doctorat:

Prof.univ.dr.ing. CONSTANTIN MOLDOVEANU

Doctorand:

Ing. ALEXANDRU-NICOLAE VIȘAN

București

2017

Anunt sustinere publica

Cuvânt înainte

Lucrarea “*CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂȚIREA PRECIZIEI DE DETERMINARE A POZIȚIEI UTILIZÂND SISTEME GNSS COMPLEMENTARE*” reprezintă rezultatul preocupărilor autorului pentru domeniul sistemelor GNSS ca student al Școlii Doctorale a Universității Tehnice de Construcții București.

Teza a avut ca principal obiectiv continuarea cercetării autorului în domeniul sistemelor GNSS complementare demarate în cadrul lucrării de Licență și Disertație cu investigarea și testarea celor mai recente implementări din domeniu.

Munca de documentare și cercetare întreprinsă a fost realizată pe perioada anilor 2013 – 2017, timp în care am primit suport și înțelegere din partea persoanelor care au fost într-o oarecare măsură părtașe la această experiență.

Cel mai important suport, fără de care nu aş scrie acum aceste rânduri și pentru care sunt profund recunoscător a venit din partea familiei.

Îmi exprim totodată recunoștința față de toate persoanele pe care le-am întâlnit în activitatea mea profesională din acești ultimi trei ani și care m-au sprijin pentru a finaliza această lucrare.

Aduc mulțumiri în special conducătorului de doctorat, domnului Prof.univ.dr.ing. Constantin Moldoveanu și domnului Conf.univ.dr.ing. Tiberiu Rus, dar și întregii comisii de îndrumare.

Mulțumesc în egală măsură membrilor catedrei de Geodezie și Fotogrammetrie și întregului colectiv al Facultății de Geodezie din cadrul Universității Tehnice de Construcții București pentru sprijinul acordat.

CUPRINS

PREFAȚĂ	VI
1. NOȚIUNI GENERALE	8
1.1. NOȚIUNI ASUPRA SEMNALELEOR EMISE DE SATELIȚII GNSS	8
1.2. PARTICULARITĂȚI ALE SEMNALELOR GNSS	8
1.3. INTRODUCERE ÎN SISTEMELE GNSS COMPLEMENTARE	9
2. SISTEMELE COMPLEMENTARE SPAȚIALE	9
2.1. GENERALITĂȚI	9
2.2. MESAJELE DIFUZATE DE SISTEMELE SBAS	9
2.3. SISTEME SBAS REGIONALE	10
2.3.1. EGNOS - European Geostationary Navigation Service	10
2.3.2. WAAS Wide Area Augmentation System	10
2.3.3. MSAS - MTSAT Satellite Augmentation System	10
2.3.4. SDCM - System for Differential Corrections and Monitoring	10
2.3.5. GAGAN - GPS Aided Geo Augmented Navigation	10
2.3.6. Alte sisteme regionale	11
2.4. SISTEME SBAS GLOBALE	11
2.4.1. StarFire	11
2.4.2. Veripos și TerraStar	11
2.4.3. OmniSTAR și STARFIX	12
3. SISTEME COMPLEMENTARE TERESTRE	12
3.1. GENERALITĂȚI	12
3.2. MESAJE RTCM	12
3.3. SERVICII COMPLEMENTARE GLOBALE	12
3.4. SERVICII COMPLEMENTARE REGIONALE	13
3.4.1. EUREF – Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe	13
3.4.2. EUPOS – European Position Determination System	13
3.4.3. ROMPOS – Sistemul Românesc de determinare a poziției	13
3.4.4. Rețele de stații permanente	14
4. METODE DE POZIȚIONARE	14
4.1. MODELE MATEMATICE PENTRU POZIȚIONAREA RELATIVĂ	14
4.1.1. Diferențe simple de ecuații primare de observații ale fazei purtătoarei	15
4.1.2. Diferențe duble de ecuații primare de observații ale fazei purtătoarei	15
4.1.3. Diferențe triple de ecuații primare de observații ale fazei purtătoarei	16
4.1.4. Modelul liniar al ecuațiilor de corecție în cazul poziționării relative	16
4.2. MODELE MATEMATICE PENTRU POZIȚIONAREA PUNCTUALĂ	16
4.2.1. Principii generale pentru poziționarea punctuală	16
4.2.2. Metoda poziționării punctuale precise (PPP)	17
4.2.3. Corecții necesare în tehnica PPP	17

4.3.	ESTIMAREA ERORILOR UTILIZÂND TEHNICA POZIȚIONĂRII PUNCTUALE PRECISE	18
4.4.	COMBINAȚII DE FRECVENȚE	19
4.4.1	Combi nații de două frecvențe pentru observații GNSS.....	19
4.4.2	Combi nații multiple de frecvențe pentru observații GNSS	19
4.5.	METODA PPP-RTK.....	19
4.5.1	Modelul CC-1 (Common clock 1)	20
4.5.2	Modelul DC (Distinct clocks).....	21
4.5.3	Modelul CC-2 (Common clock 2)	21
4.5.4	Metoda IRC și DSC	21
4.5.5	Metoda UPB și FSC.....	22
4.6.	MODEL DE COMPESARE A OBSERVAȚIILOR GNSS	22
5.	STUDIU DE CAZ.....	23
5.1.	POSTPROCESARE ÎN MODUL PPP	23
5.1.1	Prezentarea programului GNSS-Lab Tool(gLAB)	23
5.1.2	Poziționare statică, post procesare	24
5.1.3	Analiză rezultatelor și exemplificări	24
5.2.	PROCESARE ÎN TIMP REAL ÎN MOD PPP	25
5.2.1	Aspecte asupra transmiterea fluxurilor de date în timp real	25
5.2.2	Aplicații destinate preluării, analizei și reprezentării observațiilor satelitare	26
5.2.3	Poziționare statică în timp real.....	26
5.2.4	Realizarea procesării și analiză	27
6.	CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	29
6.1.	CONCLUZII	29
6.2.	CONTRIBUȚII PERSONALE	32
6.3.	PERSPECTIVE DE CERCETARE	33
	REFERINȚE	33
	ANEXA 1	34
	ANEXA 2.....	34
	ANEXA 3.....	34
	ANEXA 4.....	34

PREFAȚĂ

Fie că se vorbește despre plasarea pe orbită a unor noi constelații de sateliți GNSS sau de crearea de receptoare moderne, dezvoltarea tehnologiei din ultimii ani și-a făcut foarte clar simțită prezența în domeniul poziționării satelitare. Constituind nucleul unui sector care a cunoscut o creștere exponențială, poziționarea GNSS rămâne cea mai răspândită și totodată cea mai eficientă sursă de informație asupra locației, din punct de vedere economic.

În același asentiment, sistemele complementare și tehnicile de poziționare care îmbunătățesc precizia standard a sistemelor GNSS au înregistrat de asemenea progrese considerabile.

Unul dintre considerentele acestei lucrări este de a investiga și de a reda într-o manieră cât mai explicită noțiunile teoretice legate de sistemele complementare dezvoltate până în prezent.

Migrarea către modelele de poziționare de tipul multi-GNSS și multi-frecvență aduce în prim-plan metode de poziționare inovative care exploatează avantajele oferite de tehnologie.

Modelele matematice abordate în lucrarea de față vizează în special metoda Poziționării Punctuale Precise, fiind o metodă care se încadrează în tendințele actuale de obținere a unei soluții de poziționare independente cu o precizie cât mai mare.

În cadrul lucrării sunt prezentate elemente de noutate cu privire la o nouă abordare în curs de implementare a tehnicii PPP-RTK menite să beneficieze de avantajele ambelor tehnici de poziționare, pe care încearcă să le îmbine.

Modelele matematice prezentate în cadrul acestui capitol reprezintă o transpunere în practica metodelor de poziționare GNSS, a teoriei Transformării S.

O atenție deosebită se acordată aplicațiilor folosite pentru manevrarea și prelucrarea datelor, analizând în același timp și capacitatea unor soluții open-source de a face față scenariilor de prelucrare ce vizează obținerea de poziții precise. În același context sunt prezentate și evidențiate avantajele unor astfel de aplicații în educarea și formarea specialiștilor în domeniu.

Partea practică a lucrării a presupus realizarea unei analize comparative a rezultatelor obținute pe baza unui eșantion de 9 ore de date preluate în timp real conform scenariilor de prelucrare propuse de autor.

Sunt evidențiate pe baza exemplificărilor făcute, avantajele implementării metodei de poziționare punctuală precisă în cazul utilizării celor mai recente semnale difuzate ale sistemelor GNSS.

Din punct de vedere al conținutului, lucrarea este structurată în șase capitole. În cadrul primului capitol “*Noțiuni generale*” sunt evocate considerentele fundamentale cu privire la semnalele satelitare, precum și particularități ale sistemelor GNSS. Tot în cadrul primului capitol se face și o primă introducere către sistemele GNSS complementare.

Capitolul doi denumit “*Sisteme complementare spațiale*” tratează pe larg sistemele complementare spațiale, cu aprofundarea noțiunilor referitoare la mesajele emise de sisteme complementare spațiale. În cadrul acestui capitol sunt catalogate și prezentate principalele sisteme GNSS complementare spațiale disponibile la momentul actual la nivel global și regional.

Capitolul trei completează documentarea sistemelor complementare GNSS prin prezentarea de “*Sisteme complementare terestre*”. Sunt prezentate implementările ale sistemelor complementare terestre la nivel național, regional, dar și global. Formatul RTCM de transmitere a mesajelor în cadrul sistemelor complementare terestre este de asemenea investigat.

“*Metodele de poziționare*” ce au ca suport informațiile provenite de la sistemele complementare sunt prezentate în cadrul capitolului cu numărul patru. Sunt reamintite în această parte a lucrării modelele matematice utilizate în cazul metodei de poziționare relativă. Capitolul se continuă cu o prezentare detaliată a metodei de poziționare punctuală precisă. Corecțiile necesare, precum și erorile cărora se datorează necesitatea acestor corecții sunt prezentate pe larg.

Metodele de eliminare a influenței erorilor prin intermediul combinațiilor de frecvențe este dezbătut în cadrul unui subcapitol independent, iar elemente de noutate în ceea ce privește tehnica PPP sunt introduse prin descrierea modelului matematic în cadrul conceptului PPP-RTK. Acesta are la bază noțiuni referitoare la eliminarea defectului de rang al unui sistem de ecuații prin utilizarea Transformării S. Capitolul se încheie prin prezentarea modelului de prelucrare al observațiilor satelitare în cazul utilizării tehnicii PPP.

Capitolul cinci, “*Studiu de caz*” cuprinde exemplificările practice realizate în cadrul acestei lucrări pentru demonstrarea conceptelor prezentate în capitolele anterioare. Studiul de caz prezintă cele două abordări de determinare a poziției, în modul postprocesare, precum și în timp real

Ultimul capitol, “*Concluzii și direcții viitoare de cercetare*” însumează concluziile ce se desprind din studiul efectuat, contribuțiile personale ale autorului, precum și perspectivele de cercetare relevante pentru viitoare studii.

1. NOȚIUNI GENERALE

1.1. NOȚIUNI ASUPRA SEMNALELEOR EMISE DE SATELIȚII GNSS

Aprofundarea conceptelor și a modelelor matematice folosite în cazul poziționării cu ajutorul tehnologiei GNSS presupune mai întâi de toate, cunoașterea naturii semnalelor emise de constelațiile de sateliți artificiali.

În esență navigația prin satelit se bazează pe transmiterea și recepționarea de unde electromagnetice. Oscilațiile electrice sau magnetice generează undele electromagnetice. Dualitatea undelor electromagnetice se manifestă în propagarea simultană a celor două câmpuri, respectiv electric și magnetic care se generează reciproc pe măsură ce se propagă în spațiu.

Direcția vectorului câmpului electric E determină polarizarea undei electromagnetice, astfel că o direcție constantă definește o polarizare liniară a undei. Într-un mediu omogen care nu manifestă variații spațiale și temporale ale proprietăților sale, vectorul câmpului electric, E și vectorul câmpului magnetic, B sunt perpendiculari unul față de celălalt și față de direcția de propagare a undei.

O variație a elementelor vectorului câmpului electric indică o polarizare circulară sau eliptică a undei. Undele care străbat gaze ionizate sau trec prin câmpul magnetic al pământului întâmpină o schimbare a polarizării. Efectul este denumit polarizare rotatorie magnetică și a fost descoperit de M. Faraday, drept pentru care îi poartă numele și cauzează ca undele polarizate liniar să devină polarizate circular sau eliptic.

În cazul sistemelor satelitare de navigație acest efect este gestionat prin utilizarea prin definiție a unor unde care sunt deja polarizate circular.

Cea mai bună reprezentare a unei unde electromagnetice este dată de o funcție sinusoidală.

$$y(t) = a \sin(2\pi ft)$$

1.2. PARTICULARITĂȚI ALE SEMNALELOR GNSS

Există mai multe tipuri de sisteme de navigație prin satelit care se pot diferenția în sisteme pasive și active sau totodată în sisteme unidireționale și bidireționale.

Sistemele GNSS precum GPS, GLONASS, Galileo sau Beidou sunt sisteme pasive. Acestea nu necesită ca utilizatorul să emită vreun fel de semnal, așa cum este cazul sistemelor active. Sunt sisteme unidireționale deoarece transmit semnalele într-un singur sens, și anume din spațiu către Pământ (*space-to-earth downlink ranging system*).

Semnalele folosite de sateliții GNSS trebuie să permită atât măsurători de distanțe în timp real, cât și transmiterea de mesaje de navigație către utilizatori. Mai mult de atât, orice satelit trebuie să deservească un număr nelimitat de utilizatori fără a interfera însă cu alte sisteme.

În ceea ce privește frecvențele utilizate pentru transmiterea semnalelor GNSS, niciuna din benzi nu reprezintă o variantă optimă având în vedere criteriile necesare. Cu toate acestea banda L reprezintă cel mai bun compromis între disponibilitatea intervalului de frecvențe, efectele produse de propagarea prin atmosferă a semnalului și arhitectura sistemului de emisie necesar.

1.3.INTRODUCERE ÎN SISTEMELE GNSS COMPLEMENTARE

Geodezia este unul dintre primele domenii care a beneficiat de avantajele sistemelor de poziționare satelitară. Semnalele satelitare au fost folosite de către utilizatori civili în determinare poziției punctelor aflate pe suprafața terestră încă de la începutul constituirii constelațiilor de sateliți artificiali. Acest lucru a se datorează în mare parte dezvoltării de sisteme GNSS complementare.

Apariția sistemelor GNSS complementare este strâns legată de efectul de degradare deliberată a semnalelor emise de sistemul NAVSTAR-GPS, cunoscut sub denumire de Selective Availability sau S/A.

Primele sisteme complementare de tip DGPS au fost concepute pentru a contracara efectele produse de modificările intenționate ale corecțiilor de ceas și a efemeridelor transmise ale sateliților prin redeterminarea acestor elemente pe baza observațiilor efectuate la nivelul stațiilor de referință. Ca urmare începând cu anul 2000 efectul S/A a fost stopat, acesta devenind inefficient.

Sistemele DGPS au continuat să se dezvolte, în principal datorită faptului că sunt capabile să elimine și influența altor erori care afectează semnalele satelitare, cum ar fi întârzierile datorate ionosferei, oferind un nivel al precizie de ordinul decimetrilor, suficient pentru majoritatea aplicațiilor civile, însă insuficient pentru domeniile ce necesită precizie sporită.

2. SISTEMELE COMPLEMENTARE SPAȚIALE

2.1.GENERALITĂȚI

Cunoscute sub denumirea de SBAS, aceste sisteme se bazează pe transmiterea de corecții și mesaje de integritate pentru sateliți aflați în raza de vizibilitate a unei rețele de stații permanente distribuite la nivelul unui întreg continent sau chiar global.

Principala caracteristică a sistemelor complementare spațiale care le diferențiază de celelalte sisteme complementare este aceea că mesajele transmise de aceste sisteme sunt transmise prin intermediul sateliților geostaționari ceea ce le face capabile să asigure o acoperire sporită față de alte sisteme similare.

Pe lângă gradul de precizie ce poate fi asigurat folosind sistemele complementare spațiale o altă caracteristică importantă este dată de disponibilitatea oferită utilizatorilor. Un sistem SBAS se consideră a fi disponibil dacă întrunește și alte condiții legate în principal de integritatea mesajelor oferite înțelesă ca măsură a încrederii în corectitudinea informațiilor furnizate și de continuitate, definită ca abilitatea de a furniza un serviciu pe toată durata preconizată.

2.2.MESAJELE DIFUZATE DE SISTEMELE SBAS

Datorită lățimii de bandă reduse, datele transmise de sistemele SBAS sunt codat în mesaje care au rolul de a minimiza cantitatea de informație transmisă. Standardul care se referă specific la conținutul și structura mesajelor SBAS este standardul RTCA/DO 229-C. [9]

În prezent există un număr de 20 de mesaje standardizate ce pot fi transmise de sistemele SBAS.

Majoritatea mesajelor SBAS sunt transmise pe frecvența L1 (1575.42 MHz) la o rată de 250 biți/secundă, de 5 ori mai mare decât cea sistem GPS.

2.3.SISTEME SBAS REGIONALE

2.3.1 EGNOS - European Geostationary Navigation Service

EGNOS reprezintă un sistem complementar spațial destinat îmbunătățirii preciziei de poziționare a sistemelor de navigație GPS și GLONASS prin transmiterea de mesaje adiționale.

Obiectivul EGNOS este de a asigura performanțe îmbunătățite pentru navigație în aria definită în cadrul ECAC (*European Civil Aviation Conference*).

EGNOS este rezultatul unei colaborări lansate în 1997 între Agenția Spațială Europeană (ESA), Comisia Europeană și EUROCONTROL și reprezintă prima etapă din strategia europeană privind navigația prin satelit. Următoarea etapă care a demarat deja, este reprezentată de realizarea sistemului global de poziționare denumit Galileo [16].

2.3.2 WAAS Wide Area Augmentation System

WAAS este echivalentul american al sistemului EGNOS. WAAS este un sistem de tip SBAS dezvoltat de FAA (*Federal Aviation Administration*) care a luat ființă în 1994 pentru a îmbunătăți precizia de poziționare oferită de sistemul NAVSTAR-GPS. Sistemul este aprobat pentru aplicațiile din navigație din 2003.

2.3.3 MSAS - MTSAT Satellite Augmentation System

MSAS reprezintă un sistem complementar spațial dezvoltat de guvernul japonez care difuzează semnalele prin intermediul a doi sateliți MTSAT (Multifunctional Transport Satellites). Sateliții sunt amplasați la o longitudine de 140V, respectiv 145V și pe lângă rolul de emițători ai semnalelor MSAS, sateliții îndeplinesc și funcția de sateliți meteorologici. Sistemul a fost declarat operațional în septembrie 2007 și deserveste regiunea Fukuoka FIR (*Flight Information Region*) care delimitează spațiul aerian japonez.

2.3.4 SDCM - System for Differential Corrections and Monitoring

SDCM este un sistem de tip SBAS dezvoltat de Federația Rusă ca o componentă a sistemului GLONASS. Spre deosebire de celelalte sisteme SBAS actuale, SDMC asigură mesaje despre integritatea sistemului GLONASS, cât pentru cea a sistemului GPS. Sistemul transmite corecții diferențiale pentru GLONASS și realizează o analiză a posteriori a sistemului [8].

Segmentul spațial este alcătuit din 3 sateliți geostaționari, ultimul din ei fiind lansat în martie 2014, fiecare cu o durată de viață așteptată de 10 ani.

2.3.5 GAGAN - GPS Aided Geo Augmented Navigation

GAGAN este denumirea sistemului SBAS ce se afla în curs de implementare în India. Sistemul este compatibil cu celelalte sisteme SBAS dezvoltate până în prezent și urmează să se dezvolte în mai multe etape.

Prima dintre etape a fost denumită TDS (Technology Demonstration System) și a avut ca scop demonstrarea viabilității sistemului prin folosirea transmițătorului de la bordul satelitului INMARSAT 4F1 împreună cu 8 stații de referință ce au în dotare câte două ceasuri cu cesiu [23]. Odată cu această etapă s-a realizat și faza IEP (Initial Experimental Phase). Ultima fază denumită FOP (Final Operational phase) este în curs de desfășurare și are ca scop final autorizarea sistemului GAGAN pentru uz în aviație.

2.3.6 Alte sisteme regionale

Exceptând sistemele complementare spațiale prezentate, și-au exprimat intenția de a demara proiecte de realizare a unor astfel de sisteme SBAS și alte națiuni. Unele dintre aceste sisteme se află în faza de realizare sau sunt în curs de proiectare [8]:

- ASAS (*African Satellite Augmentation System*) – va avea o rețea formată din 55 de stații de referință și 3 centre de control, iar segmentul spațial va fi format din 3 sateliți geostaționari. Sistemul va fi o extindere a EGNOS pe teritoriul Africii;
- SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) – este dezvoltat de guvernul chinez și va deservei în special sistemul regional BeiDou;
- SACCSA (*Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica*) – reprezintă o inițiativă de a îmbunătăți siguranța traficului aerian în regiunea Caraibe și America de Sud prin intermediul unui sistem SBAS;
- Sistem SBAS în Malaezia;
- Sistem SBAS în Coreea.

2.4. SISTEME SBAS GLOBALE

2.4.1 StarFire

StarFire este un sistem SBAS cu acoperire globală dezvoltat de NavCom Technology, membră a grupului de companii John Deere. Deși conceput în special pentru aplicații din agricultură, sistemul oferă precizii centimetrice prin utilizarea unor tehnici care îmbunătățesc procesarea la nivelul receptorului. Că o particularitate a sistemului sunt folosite receptoare cu două frecvențe capabile a elimina influența ionosferei din diferențe de fază, astfel că dimensiunea mesajelor transmise către utilizatori era mai mică față de ce a sistemelor SBAS clasice.

2.4.2 Veripos și TerraStar

Compania Veripos a fost fondată în 1989 și furniza un serviciu convențional DGPS pentru utilizatori din Mare Nordului. Începând cu 2004, începe extinderea rețelei de stații de referință, iar din 2005 Veripos asigură servicii complementare GPS la nivel global.

În 2012 este creat TerraStar, un sistem SBAS global care se adresează în special zonelor de uscat și zonelor limitrofe țărmurilor. În prezent Veripos și subsidiara sa, TerraStar sunt membre ale grupului Hexagon.

Rețeaua de stații de referință numără peste 80 de stații dotate cu receptoare capabile să recepționeze semnale de la actualele sisteme GNSS, dar și de la cele aflate în curs de dezvoltare [27].

2.4.3 OmniSTAR și STARFIX

OmniSTAR reprezintă un sistem SBAS global parte a grupului TRIMBLE. Sistemul are la bază o rețea de peste 100 de stații de referință și un număr de 8 sateliți geostaționari din care fac parte sateliți din constelația Inmarsat și sateliți MSAT (Mobile Satellites).

Infrastructura sistemului Omnistar este împărțită cu sistemul STARFIX ce aparține companiei FUGRO care este dezvoltatorul ambelor sisteme. Dacă STARFIX oferă în special servicii pentru navigație în larg, OmniStar a fost realizat pentru a deservi cu precădere partea continentală. Omnistar poate asigura corecții și prin intermediul Internetului folosind protocolului NTRIP.

3. SISTEME COMPLEMENTARE TERESTRE

3.1. GENERALITĂȚI

Sistemele complementare terestre sunt alcătuite din rețele de stații de referință distribuite într-un anumit cadru geografic care efectuează măsurători continue asupra sateliților aflați în câmpul lor de vizibilitate. Prin combinarea observațiilor se pot deduce corecții pentru principalele erori care influențează poziționarea utilizatorilor.

3.2. MESAJE RTCM

Mesajele transmise de sistemele complementare sunt standardizate de un grup de lucru organizat în cadrul RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) denumit RTCM–SC 104 GNSS Service. Acesta emite periodic documente care specifică tipurile de mesaje folosite pentru transmiterea corecțiilor. Formatul de date RTCM conține un anumit număr de mesaje, iar fiecare mesaj este format din două părți principale:

- antetul, în care sunt conținut informații precum tipul mesajului, timpul la care este transmis, lungimea mesajului;
- conținutul efectiv, în care sunt conținute date aparținând tipului de mesaj respectiv.

Ultima variantă a standardului RTCM denumita RTCM 3.2 a fost publicată la 1 februarie 2013 și a fost completată prin amendamente menite să încorporează semnalele celor mai recente sisteme GNSS.

3.3. SERVICII COMPLEMENTARE GLOBALE

IGS reprezintă o federație formată din peste 200 de agenții care vine în sprijinul activităților de cercetare în domeniul GNSS prin distribuirea de date brute în format RINEX (Receiver Independent Exchange Format) și alte produse de rețea prin intermediul Internetului.

Datele oferite de IGS reprezintă un standard al calității în domeniul GNSS fiind oferite de o rețea globală de peste 350 de stații de referință reprezentate în 12 centre de analiza (Analysis Center) și peste 27 de centre de date (Data Centers).

Centrele de analiza prelucrează datele de la grupări independente de stații de referință. Produsele livrate de IGS sunt rezultatul unor combinații între soluții calculate în cadrul centrelor de analiză, în acest mod se oferă caracteristici îmbunătățite față de soluțiile calculate individual.

În prezent stațiile din rețeaua IGS oferă date brute și alte produse pe baza sistemelor GPS și GLONASS, însă proiecte de natura să includă și alte sisteme GNSS sunt în desfășurare.

Un astfel de proiect este IGS-MGEX (IGS- Multi-GNSS Experiment) care vizează realizarea unei rețele de stații de monitorizare capabile să urmărească semnalele tuturor sistemelor de navigație existente și viitoare, inclusiv semnalele provenite de la sistemele complementare spațiale.

3.4.SERVICII COMPLEMENTARE REGIONALE

3.4.1 EUREF – Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe

Pe lângă rolul său în determinare și menținerea unui sistem de coordonate în Europa, rețeaua de stații de referință a EUREF denumită EPN (EUREF Permanent Network) participă la proiecte care vizează transmiterea datelor pentru realizarea poziționării în timp real.

Odată cu creșterea capacității Internetului, aplicațiile care transmit fluxuri continue de date prin intermediul pachetelor IP, precum GNSS Internet Radio au devenit servicii bine definite. În comparație cu aceste aplicații, lățimea de bandă necesară transmiterii datelor GNSS de timp real este relativ mică. Că atare, EUREF a decis ca începând cu Iunie 2002 să pună la punct și să întrețină o structură de diseminare a datelor GNSS de timp real obținute pe baza EPN (European Permanent Network), prin intermediul Internetului. Deși principalul obiectiv al acestei inițiative a fost transmiterea corecțiilor via Internet în format RTCM pentru a permite poziționarea diferențială, au fost avute în vedere și alte aplicații precum determinarea efemeridelor precise sau determinarea parametrilor ionosferei și troposferei [35].

Efemeridele și corecțiile de ceas sunt elementele minimale necesare poziționării punctuale precise. Dezvoltarea altor produse care să susțină această tehnică se concentrează asupra modelării ionosferei și troposferei, precum și asupra determinării ambiguităților în timp real.

3.4.2 EUPOS – European Position Determination System

Proiectul EUPOS a luat ființă în 2002 la inițiativa autorităților din Germania, și anume *Berlin Senate Department for Urban Development* și a *European Academy of the Urban Development Berlin*. Modelul urmat în dezvoltarea sistemului a fost preluat de la sistemul SAPOS, care era deja operațional în Germania la acea dată. În mod practic proiectul EUPOS urmărește dezvoltarea unei rețele de stații de referință în Europa Centrală și de Est care furnizează corecții utilizatorilor aflați în raza de acoperire a rețelei pentru poziționare în timp real. Mesajele pot fi utilizate în diverse domenii, precum cel maritim, geodezic și al navigației aeriene. Rețeaua poate furniza și date brute pentru postprocesare

La ora actuală rețeaua este operațională în 18 state europene inclusiv România și cuprinde un număr de 870 de stații de referință. Rețeaua de stații de referință include stații din infrastructura EUREF sau IGS.

3.4.3 ROMPOS – Sistemul Românesc de determinare a poziției

Că membră a EUPOS, România a pus la punct un sistem complementar terestru pe baza unei rețele de stații permanente.

Sistemul este administrat de Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară și poartă denumirea de ROMPOS (*Romanian Position Determination System*).

Datele pot fi accesate de utilizatori prin intermediul *Centrului National de Servicii ROMPOS* (CNSR) care este subordonat EUPOS-ISC și se află în strânsă legătură cu centrele de monitorizare din țările vecine.

3.4.4 Rețele de stații permanente

Odată cu sporirea numărului utilizatorilor tehnologiei GNSS a crescut și numărul rețelelor de stații de referință dezvoltate în întreaga lume.

Studiile din domeniu se focusează pe rolul stațiilor permanente în asigurarea unor servicii de poziționare ce au ca suport tehnici de poziționare relativ nou apărute, cum este tehnica PPP.

Una dintre cele mai mari rețele de stații de referință este rețeaua CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) administrată de NGS (*National Geodetic Survey*). Această rețea cuprinde un număr impresionant de 1900 de stații ce oferă date pentru poziționare GNSS, precum și date meteorologice pe întreg teritoriul SUA.

Pe lângă agențiile specializate în constituirea și gestionarea unui flux de mesaje GNSS complementare la nivel regional sau global, o serie de alte companii private au realizat rețele de stații de referință care pot oferi servicii similare utilizatorilor.

4. METODE DE POZIȚIONARE

4.1. MODELE MATEMATICE PENTRU POZIȚIONAREA RELATIVĂ

Poziționarea relativă are drept scop determinarea poziției unui punct necunoscut în raport cu un punct de coordonate cunoscute. În urma efectuării unor astfel de observații se determină vectorul dintre cele două puncte denumit și vectorul bazei sau pe scurt baza (\mathbf{b})/

Ecuția de poziționare relativă a punctului B în raport cu punctul A va fi :

$$X_B = X_A + b_{AB},$$

unde

$$X_A = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}, \quad X_B = \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix}, \quad b_{AB} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}$$

Poziționarea relativă se poate efectua pe baza observațiilor cu coduri sau cu ajutorul observațiilor de fază. În geodezia cu sateliți se utilizează în general al doilea mod de poziționare relativă pe baza unor observații simultane de fază în cele două puncte A și B.

Ca metode de prelucrare a observațiilor se folosesc metode, care în general utilizează ecuații de diferențe simple, duble, triple formate pe baza ecuațiilor de observație primare . Aceste diferențe se realizează cu ajutorul observațiilor efectuate în cele două puncte (A și B) spre doi sau mai multi sateliți notați (j, k, l...) și momente de observație succesive ($t_1, t_2...$).

Formarea acestor tipuri de ecuații de observație are drept scop eliminarea sau reducerea unor erori sistematice ce apar în astfel de măsurători : eroarea de ceas a satelitelui și a receptorului, eliminarea ambiguităților și a efectelor întreruperilor recepției semnalelor satelitare (evenimentele ”cycle-slip”).

4.1.1 Diferențe simple de ecuații primare de observații ale fazei purtătoarei

Ecuațiile de diferențe simple se pot forma în cazul observării simultane de către două receptoare a aceluiași satelit.

Pe baza ecuațiilor primare de observații de fază de forma

$$\text{punctul } A: \quad \phi_A^j(t) - f^j * \Delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} * \rho_A^j(t) + N_A^j(t) - f^j * \Delta_A(t)$$

$$\text{punctul } B: \quad \phi_B^j(t) - f^j * \Delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} * \rho_B^j(t) + N_B^j(t) - f^j * \Delta_B(t)$$

se obține ecuația de diferențe simple de forma:

$$\phi_{AB}^j(t) = \phi_B^j(t) - \phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} * [\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)] + N_B^j(t) - N_A^j(t) - f^j * [\Delta_B(t) - \Delta_A(t)] ,$$

notând:

$$\phi_{AB}^j(t) = \phi_B^j(t) - \phi_A^j(t) \text{ diferența de fază măsurată în A și B;}$$

$$\rho_{AB}^j(t) = \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) \text{ pseudodistanța AB;}$$

$$N_{AB}^j = N_B^j - N_A^j \text{ diferența ambiguităților;}$$

$$\Delta_{AB}(t) = \Delta_B(t) - \Delta_A(t) \text{ diferența corecțiilor de ceas ale celor două receptoare.}$$

obținem:

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j * \Delta_{AB}(t).$$

4.1.2 Diferențe duble de ecuații primare de observații ale fazei purtătoarei

Ecuațiile de diferențe duble presupun existența observațiilor simultane a două receptoare către doi sateliți.

Presupunem în acest caz două receptoare A și B și observații către doi sateliți j și k. Vom scrie ecuația de diferențe simple de observații primare spre cei doi sateliți, conform ecuației:

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j * \Delta_{AB}(t)$$

$$\phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - f^k * \Delta_{AB}(t)$$

Forma redusă a ecuației fiind:

$$\phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} .$$

Se observă și în acest caz, că din ecuația de observații s-au eliminat erorile de ceas ale celor două receptoare (având în vedere că observațiile sunt simultane și $f^j = f^k$).

4.1.4 Diferențe triple de ecuații primare de observații ale fazei purtătoarei

Acest tip de observații se formează prin scăderea ecuațiilor de diferențe duble la momente de timp (epoci) succesive (t_1, t_2).

În acest mod sunt eliminate ambiguitățile din cadrul parametrilor de determinat și implicit schimbările de ambiguitate ce pot apărea (întrepreri "cycle-slip"). Presupunem două epoci t_1, t_2 pentru care avem diferențe duble de forma:

$$\begin{aligned}\phi_{AB}^{jk}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^{jk}(t_1) + N_{AB}^{jk} \\ \phi_{AB}^{jk}(t_2) &= \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^{jk}(t_2) + N_{AB}^{jk}\end{aligned}$$

Ecuția de diferențe triple va fi:

$$\phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} * \rho_{AB}^{jk}(t_{12})$$

4.1.5 Modelul liniar al ecuațiilor de corecție în cazul poziționării relative

Pentru alcătuirea modelului liniar vom considera ecuația de diferențe duble de observații de fază pe care o multiplicăm cu λ și obținem:

$$\lambda * \phi_{AB}^{jk}(t) = \rho_{AB}^{jk}(t) + \lambda * N_{AB}^{jk},$$

După liniarizarea termenilor se obține următoarea ecuație de corecție:

$$\begin{aligned}v_{AB}^{jk} &= a_{X_A}^{jk}(t)dX_A + a_{Y_A}^{jk}(t)dY_A + a_{Z_A}^{jk}(t)dZ_A + \\ &+ a_{X_B}^{jk}(t)dX_B + a_{Y_B}^{jk}(t)dY_B + a_{Z_B}^{jk}(t)dZ_B - l_{AB}^{jk}(t) + \lambda * N_{AB}^{jk}\end{aligned}$$

Ecuția de corecție(de diferențe duble) a poziționării relative se poate scrie și sub forma matricială:

$$V = AX - L$$

4.2.MODELE MATEMATICE PENTRU POZIȚIONAREA PUNCTUALĂ

4.2.1 Principii generale pentru poziționarea punctuală

Luând în calcul și alți termeni care definesc efectele relativiste, propagarea semnalului prin atmosferă, zgomotul semnalului, efectul de multipath și alte posibile erori, ecuația completă care definește o observație între receptorul r și satelitul s la momentul de timp t , utilizând sincronizarea codului P modulat pe frecvența f poate fi descrisă prin relația:

$$R_{P_f} = \rho_r^s(t) + c\Delta\delta_r^s(t) + Tr + \alpha_f STEC + K_{P_f,r} - K_{P_f}^s + M_{P_f} + \varepsilon_{P_f},$$

Exceptând măsurătorile derivate din corelarea codurilor transmise, unda purtătoare în sine poate fi folosită pentru a obține o măsurătoare a distanței aparente între satelit și receptor.

În general măsurătorile asupra fazei undei purtătoare sunt mai precise decât măsurătorile cu coduri (până la două ordine de mărime în ceea ce privește precizia obținută) dar prezintă un dezavantaj în determinarea numărului întreg, N de lungimi de undă, λ măsurate, necesitând redeterminarea acestuia, ori de câte ori receptorul pierde semnalul recepționat. [3]

În analogie cu ecuația pentru determinarea distanței cu ajutorul codurilor modulate pe frecvența undei purtătoare putem scrie relația:

$$\phi_{L_i} = \rho_r^s(t) + c\Delta\delta_r^s(t) + Tr - \alpha_f STEC + K_{L_f,r} - K_{L_f}^s + \lambda_{L_f} N_{L_f} + \lambda_{L_f} w + m_{L_f} + \varepsilon_{L_f}$$

Pe lângă observațiile asupra codurilor sau asupra fazei purtătoarei se pot utiliza și măsurători ale schimbărilor de frecvență în timp (*Doppler shift*).

4.2.2 Metoda poziționării punctuale precise (PPP)

Dezvoltarea metodei de poziționare punctuală precisă a pornit de la ideea formulată de Heroux and Kouba în 1995 de a utiliza observațiile GPS alături de informații precise despre orbitele și ceasurile sateliților pentru a determina în mod precis coordonatele unui singur receptor GPS. [38] Testele efectuate la acea data au reliefat posibilitatea obținerii unei precizii de aproximativ un metru.

Alături de alții autori, precum Zumberge, 1997 sau Bisnath și Langley, 2001 au investigat și diversificat prin studiile lor potențialul acestei metode, lucrările realizate de aceștia rămânând materiale de referință în literatura de specialitate. [40], [41]

Caracterul metodei PPP de a fi susceptibilă la erorile care influențează determinarea cu acuratețe a poziției (influențe atmosferice ale troposferei și ionosferei, efemeride, multipath, erori datorate receptoarelor și sateliților, ș.a) constituie unul din motivele cercetărilor asupra modalităților de contracarare a erorilor ce intervin în determinarea poziției prin observații satelitare.

4.2.3 Corecții necesare în tehnica PPP

Propagarea semnalului satelitar în atmosferă reprezintă componenta care prezintă cele mai multe probleme pentru tehnicile de determinare a poziției cu ajutorul semnalelor GNSS. Acest fapt se datorează în principal diversității atmosferei.

Una dintre proprietățile funcției de care straturile atmosferei sunt diferențiate este reprezentată de dependența de frecvență a vitezei de propagare, rezultând straturi dispersive precum ionosfera pentru care viteza de propagare variază cu frecvența undei și medii non-dispersive, cum este troposfera sau stratosfera.

Neomogenitatea straturilor atmosferei induce la rândul ei variații în parametrii modelelor de poziționare.

În cadrul acestei părți sunt prezentate următoarele erori:

- Eroarea datorată ionosferei
- Eroarea datorată troposferei
- Eroarea centrului de fază a antenei receptorului

- Eroarea centrului de fază a antenei receptorului
- Erorile datorate componentei hardware
- Erorii de cod datorată satelitului
- Eroarea de cod asociată receptorului,
- Erorile de fază ale sateliților
- Erorile de fază ale receptorului
- Eroarea datorată orientării antenei
- Eroarea datorată mării terestre
- Eroarea provocată de încărcarea oceanelor

4.3. ESTIMAREA ERORILOR UTILIZÂND TEHNICA POZIȚIONĂRII PUNCTUALE PRECISE

Elementele prezentate în capitolele precedente au vizat aspecte teoretice legate de modelul de procesare folosit în cadrul poziționării punctuale precise și s-au expus modalitățile de eliminare a erorilor sau de aplicare a corecțiilor care au fost estimate ca parametri ai unui model stohastic.

Exploatarea unele din particularitățile metodei, aceasta se poate transforma într-o unealtă utilă pentru estimarea erorilor.

Dacă practica estimării erorilor cu ajutorul unei rețele de receptoare este deja o practică comună în cadrul comunității GNSS, utilizarea unui singur receptor pentru estimarea erorilor DCB sau a celor legate de ionosferă reprezintă o alternativă de viitor, eficientizând și facilitând procesul de obținere a unor corecții pentru principalele erori care afectează determinarea poziției prin intermediul PPP.

La ora actuală o mare varietate de lucrări tratează această problemă prin dezvoltarea de algoritmi de prelucrare a observațiilor bazați pe combinații ale frecvențelor undelor recepționate de către receptoarele GNSS. Au fost investigate în studii atât receptoare capabile să recepționeze semnalele unui singur sistem satelitar, dar și receptoare de tip multi-sistem.

Fiind unul dintre mediile care influențează semnificativ poziționarea se acordă o importanță deosebită excluderea efectului acestei erori din modelul de procesare al măsurătorilor. În acest sens se folosesc combinații de frecvențe care au rolul de a elimina erorile ionosferei din rândul necunoscutelor.

Folosind același principiu se pot utiliza observațiile către un sistem GNSS pentru a determina erorile datorate ionosferei [44].

Relația de determinare a întârzierilor cauzate de trecerea semnalului prin ionosferă se poate determina cu relația:

$$\phi_{gf} = (1 - \gamma)MF(I_{v,0} + \nabla_{\theta}(\phi_P - \phi_0) + \nabla_{\lambda}(\lambda_P - \lambda_0)) + Nb'_{gf},$$

în care termenii a căror influență nu poate fi descrisă matematic au fost ignorați.

4.4.COMBINAȚII DE FRECVENȚE

4.4.1 Combinații de două frecvențe pentru observații GNSS

În general, în cadrul modelelor matematice folosite pentru poziționarea cu ajutorul unui sistem GNSS sunt folosiți algoritmi de procesare predefiniți mențiți să “îndepărteze” influența erorilor asupra coordonatelor finale determinate.

Din punct de vedere principial, făcând o analogie cu geodezia clasică, acest aspect este similar cu eliminarea erorii de colimație prin medierea citirilor efectuate în ambele poziții ale lunetei, sau dacă avem în vedere metoda relativă de determinare a coordonatelor punctelor prin metode GNSS, putem face analogie cu modelul matematic al diferențelor simple, duble sau triple ale ecuațiilor primare pentru observații ale fazei unde purtătoare. În cazul acestora se pot elimina pe rând din rândul necunoscutelor erorile de ceas ale sateliților, erorile de ceas ale receptoarelor, respectiv ambiguitățile.

Aceste modele matematice pot fi alese dintr-o serie de combinații consacrate ce pot fi utilizate atât în eliminarea cât și în estimarea diferitelor erori care influențează considerabil rezultatele observațiilor GNSS. [3]

Dintre acestea sunt amintite în cuprinsul acestui capitol următoarele:

- *Ionosphere-free combination;*
- *Geometry-free combination;*
- *Wide-laning combination;*
- *Narrow-laning combination;*
- *Melbourne-Wubben combination sau Hatch-Melbourne-Wubben combination.*

4.4.2 Combinații multiple de frecvențe pentru observații GNSS

Diminuarea perioadei de determinare a ambiguităților are repercusiuni pozitive mai ales în cazul poziționării punctuale precise în timp real, în contextul dezvoltării continue a produselor IGS precum efemeridele precise sau corecții de ceas. Un aport semnificativ în ceea ce privește rezolvarea ambiguităților a fost reprezentat de introducerea unei noi frecvențe de măsurare, fapt ce a dus la posibilitatea de a crea noi combinații asupra observațiilor asupra fazei și a celor asupra codurilor.

Procedura de determinare a ambiguităților folosind toate cele trei frecvențe nu este însă o noutate, o astfel de evoluție fiind prevăzută ca firească și fiind cunoscută sub denumirea de TCAR/CIR (*three-carrier ambiguity resolution/cascade integer resolution*).

4.5.METODA PPP-RTK

Metoda PPP-RTK reprezintă o alternativă la conceptul clasic de poziționare precisă punctuală. Deosebirea majoră și totodată baza metodei, este constituită de implementarea conceptului de IAR (*integer ambiguity resolution*). Determinarea ambiguităților ca numere întregi reduce timpul de convergență și mai mult de atât este demonstrat faptul că îmbunătățește acuratețea soluției în special în direcția longitudinii [55].

Așa cum a fost precizat anterior, caracterul de numere întregi al ambiguităților se pierde în cazul metodei clasice PPP datorită asimilării în cadrul acestui parametri a influenței altor erori care nu se pot elimina, așa cum se întâmplă în poziționarea relativă.

Ignorarea anumitor influențe în cadrul modelului matematic folosit ar duce la deteriorarea calității poziției obținute. Pe de altă parte creșterea numărului de parametri necunoscuți în cadrul modelului matematic ar duce eventual la apariția unui defect de rang.

Strategiile de îndepărtare a defectului de rang pentru sistemul ecuațiilor de observații vizează în principal două abordări: folosirea unor valori estimate pentru anumiți termeni necunoscuți sau gruparea termenilor între care există anumite corelații.

Așadar PPP-RTK reprezintă o dezvoltare firească a metodei de poziționare punctuală precisă în care sunt furnizate utilizatorului corecțiile pentru orbitele sateliților, corecțiile de ceas și corecții ale erorilor satelitului. Metoda este intens dezbătută în literatura de specialitate, Teunissen și Khodabandeh fiind doar doi proeminenți cercetători, dintre mulți alții care au investigat potențialul acestei metode.

Conceptul PPP-RTK, precum și cele 3 componente: componenta rețea, componenta corecție și componenta utilizator, care vor fi explicate din punct de vedere matematic [57].

Pentru fiecare metodă prezentată în cele ce urmează va fi dezbătut atât cazul unei rețele de receptoare, cât și cazul unui singur receptor.

4.5.1 Modelul CC-1 (Common clock 1)

În cazul unei rețele vom folosi ecuațiile exprimate vectorial, în care se folosește indicele $r = 1 \dots n$ pentru a desemna stațiile rețelei.

$$\Delta\Phi_r^{ps} = e\Delta\rho_r^{ps} - edt^{ps} - \mu l_r^{ps} + \Lambda(z_r^{ps} - \delta^{ps})$$

$$\Delta p_r^{ps} = e\Delta\rho_r^{ps} - edt^{ps} + \mu l_r^{ps} - d^{ps}$$

Având un număr de m sateliți recepționați și v parametri de poziție, defectul de rang al sistemului este în număr de $v + 4(m-1)$. Din acest număr, v provine din dependența liniară a coeficienților Δx_r cu erorile de cod ale sateliților (în forma diferențiată $s - p$) dt^{ps} .

Acest efect poate fi eliminat prin eliminarea din rândul necunoscutelor a parametrilor unei stații de referință $r = 1$ spre exemplu, Δx_1 fiind astfel considerat cunoscut.

Restul de $4(m-1)$ este rezultatul corelației între eroarea datorată ionosferei, erori ale sateliților și receptoarelor, erori ale ceasurilor și ambiguități.

Pentru detalierea acestei corelații se folosește descompunerea parametrilor funcție de componentele lor absolute din combinații IF (*ionosphere-free*) și GF (*geometry-free*) scrisă de data aceasta în formă vectorială.

În urma rezolvării sistemului de ecuații va rezulta vectorul parametrilor necunoscuți estimați

$$x_{CC-1} = [\Delta\tilde{x}_r^T \quad \tilde{l}_r^{psT} \quad d\tilde{t}^{ps} \quad \tilde{\delta}^{psT} \quad \tilde{z}_r^{psT}]^T$$

Structura sistemului de ecuații rezultat este similară cu structura exemplificată pentru cazul general, în care semnificațiile parametrilor sunt de această dată cei prezentați în cadrul metodei.

4.5.2 Modelul DC (Distinct clocks)

Reprezintă o altă metodă de rezolvare a sistemelor de ecuații bazată pe metoda transformării S ce a fost introdusă P.J. de Jonge în 1998 în studiile sale. Vom observa în continuare asemănarea cu modelul CC-1 în ceea ce privește alegerea bazei pentru transformarea S.

$$x_{DC}^S = [\Delta x_1^T \quad d^{psT} \quad z_1^{psT}]^T$$

O parametrizare diferită pentru termenii estimați este realizată și implică exprimarea noilor estimări ale erori fazei funcție de erorile fazei estimate pentru modelul CC-1 și erori ale ceasurilor.

$$\begin{bmatrix} d\tilde{t}^{ps} \\ \tilde{\delta t}^{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ e & \Lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\tilde{t}^{ps} \\ \tilde{\delta}^{ps} \end{bmatrix}$$

Metoda utilizează un singur termen comun pentru observațiile asupra codurilor pentru a descrie ceasurile sateliților dar utilizează doi termeni distincți pentru cele două observații asupra frecvențelor.

4.5.3 Modelul CC-2 (Common clock 2)

În cadrul acestei metode baza transformării S este configurată astfel încât să includă în locul ambiguităților aferente unei stații de referință, termenii ce definesc erorile de fază.

$$x_{CC-2}^S = [\Delta x_1^T \quad d^{psT} \quad \delta^{psT}]^T$$

În această formă, ambiguitățile, împreună cu ceilalți parametri necunoscuți vor forma vectorul parametrilor estimați astfel:

$$x_{CC-2} = [\Delta \tilde{x}_r^T \quad \tilde{l}_r^{psT} \quad d\tilde{t}^{ps} \quad \tilde{\alpha}_r^{psT}]^T$$

Pe lângă metodele prezentate mai sus, au fost introduse în literatura de specialitate (Laurichesse, Collins) metode care au la baza același principiu al determinării ambiguităților ca numere întregi, dar care folosesc combinații de ecuații care elimină efectul ionosferei.

În cadrul primei metode prezentate sunt detaliate modelele de prelucrare pentru IRC (*Integere Recovery Clock*), dar și pentru metoda DSC (*Decoupled Satellite Clock*), acestea fiind similare.

4.5.4 Metoda IRC și DSC

Introduse de Laurichesse și Mercier, respectiv de Collins aceste metode folosesc combinații de observații pentru a simplifica sistemul de ecuații format la nivelul rețelei care este de forma:

$$\Delta \Phi_r^{ps} = e\Delta \rho_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} - \mu \tilde{l}_r^{ps} + \Lambda (z_r^{ps} - \delta^{ps} - Md^{ps})$$

$$\Delta p_r^{ps} = e\Delta \rho_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} + \mu \tilde{l}_r^{ps}$$

În cadrul acestor metode modul de alegere a bazei transformării S este la fel ca în cazul metodei CC.

Vectorul parametrilor estimați este de forma următoare:

$$x_{IRC/DSC} = [\Delta\tilde{x}_r^T, d\tilde{t}^{ps}, [\delta\tilde{t}_{IF}^{ps}, \delta\tilde{t}_{WL}^{ps}], [\tilde{z}_{r,1}^{ps}, \tilde{z}_{r,WL}^{ps}]]^T,$$

iar vectorul corecțiilor este formulat astfel:

$$x_{IRC/DSC}^{cor} = [d\tilde{t}^{ps}, [\delta\tilde{t}_{IF}^{ps}, \delta\tilde{t}_{WL}^{ps}]]^T$$

La nivelul utilizatorului observațiile corectate au următoarea formă:

$$\Delta\tilde{\Phi}_{u,IF}^{ps} = \Delta\Phi_{u,IF}^{ps} + \delta\tilde{t}_{IF}^{ps}$$

$$\Delta\tilde{p}_{u,IF}^{ps} = \Delta p_{u,IF}^{ps} + d\tilde{t}^{ps}$$

$$\Delta\tilde{\Phi}_{u,WL,NL}^{ps} = \Delta\Phi_{u,WL,NL}^{ps} + \lambda_{WL} \delta\tilde{t}_{WL}^{ps}$$

4.5.5 Metoda UPB și FSC

Această metodă are la bază parametrizarea aleasă pentru metoda CC-2, prezentată mai sus sub forma:

$$\Delta\Phi_r^{ps} = e\Delta\tilde{\rho}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} - \mu\tilde{l}_r^{ps} + \Lambda(\tilde{a}_r^{ps})$$

$$\Delta p_r^{ps} = e\Delta\tilde{\rho}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} + \mu\tilde{l}_r^{ps}$$

Vectorul corecțiilor va avea următoarea formă, pentru oricare $q \in \{1 \dots n\}$:

$$x_{UPD/FCB}^{cor} = [d\tilde{t}^{ps}, [\tilde{a}_{q,1}^{ps}, \tilde{a}_{q,WL}^{ps}]]^T$$

În urma analizei metodelor prezentate se deduce [57] faptul că aceste metode sunt derivații ale aceluiași model matematic, diferențele între ele fiind reprezentate de alegerea bazei transformării S, care influențează la rândul ei modul de parametrizare. O altă diferențiere poate fi regăsită în utilizarea în cadrul unor metode, a combinațiilor între observații care elimină efectul ionosferei.

4.6. MODEL DE COMPESARE A OBSERVAȚIILOR GNSS

Modelul de prelucrare a observațiilor folosit în majoritatea softurilor destinate prelucrării măsurătorilor prin metoda PPP, urmează tiparul clasic al compensării măsurătorilor prin metoda celor mai mici pătrate.

Parametri folosiți în cadrul modelului sunt coordonatele receptorului, erori de ceas ale receptorului, eroarea datorată troposferei și ambiguitățile aferente undei purtătoare. Celelalte erori, precum eroarea indusă de ionosferă, eroarea de ceas a sateliților, multipath sau zgomotul măsurătorilor sunt fie eliminate, fie asimilate de termeni cu o pondere mai semnificativă în cadrul modelului, cum este cazul erorii indusă de receptor asupra codului, care este asimilată de eroarea de ceas a receptorului, sau erorile datorate satelitului și erorile fazei purtătoarei care sunt asimilate termenului care desemnează ambiguitățile.

Având în vedere cele de mai sus, precum și faptul că în cadrul primei iterații a modelului sunt folosite valori aproximative ale parametrilor modelului, ecuația pentru o observație după aplicarea combinației de eliminarea a efectului ionosferei poate fi rescrisă sub forma:

$$\phi_c = (\rho_r^s(t)_0 + \delta \rho_r^s(t)) + c(\Delta\delta_r^s(t)_0 + \delta \Delta\delta_r^s(t)) + (Tr_0 + \delta Tr) + \lambda_{L_f}(N_{L_f_0} + \delta N_{L_f})$$

, unde fiecare termen este prezentat ca valoare aproximativă alături de eroare asociată ca diferență dintre valoarea reală și valoarea aproximativă.

Pentru parametri aproximativi se folosesc în cazul fiecărei epoci de observație, exceptând primul moment de timp, parametri determinați anterior conform modelului matricial:

$$X = (A^t P A + C_x)^{-1} A^t P l,$$

Sistemul are ca rezultat determinarea vectorului erorilor care conține un număr de $5 + n$ necunoscute, unde n reprezintă numărul de măsurători asupra fazei unde purtătoare (pentru un receptor cu două frecvențe n reprezintă dublul numărului de sateliți observați la momentul de timp t).

5. STUDIU DE CAZ

5.1. POSTPROCESARE ÎN MODUL PPP

5.1.1 Prezentarea programului GNSS-Lab Tool(gLAB)

Programul GNSS-Lab Tool este un soft educațional interactiv destinat procesării și analizei datelor GNSS [59]. Programul a fost dezvoltat de un grup de lucru: Research Group of Astronomy and Geomatics alcătuit din specialiști din mai multe departamente ale Universității Tehnice din Catalonia, Spania. Reunind specialiști din domeniul matematicii și fizicii aplicate, acest grup de cercetare este unul din cele mai apreciate la nivel european, deținător a mai multor patente și partener activ în proiecte de cercetare precum EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) sau alte proiecte inițiate de ESA (European Space Agency).

Programul se adresează mai multor categorii de utilizatori, printre care:

- Profesioniști din sistemul educațional care doresc să ofere cunoștințe și exemple practice despre domeniul GNSS;
- Studenților sau persoanelor care posedă cunoștințe de bază despre sistemele satelitare și doresc o unealtă în cadrul procesului de auto-învățare;
- Profesioniștilor din domeniul GNSS cu cunoștințe ample care doresc o unealtă ușor de utilizat pentru aplicații precise.

În varianta actuală programul *gLAB* permite procesarea datelor provenite de la un receptor static sau cinematic în modul post procesare.

5.1.3 Poziționare statică, post procesare

Având în vedere capacitățile programului *gLAB* în ceea ce privește modulul de poziționare punctuală precisă, se prezintă în cuprinsul acestui subcapitol o exemplificare a utilizării softului în determinarea poziției pentru stația permanentă BUCU prin prelucrarea măsurătorilor din ziua de 25 august 2016 și reprezentarea și interpretarea rezultatelor obținute.

Pentru realizarea acestui studiu s-au folosit date din următoarele surse:

- Observații în format RINEX versiunea 2.11 la o rată de înregistrare de 30s. Acestea au fost accesate și descărcate prin intermediul GNSS DATA CENTER la adresa <https://igs.bkg.bund.de/file/rinexsearch>;
- Fișier în format ANTEX cu informații despre antenele sateliților și ale receptoarelor procurat de la adresa <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/>;
- Efemeridele precise ale sateliților și corecțiile de ceas în format .SP3 pentru săptămâna 1911 provenite de la IGS accesate la adresa <ftp://ftp.igs.org/pub/product/1911/>;
- Fișiere precise în format IONEX cu date despre VTEC pentru ziua GPS 238 <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/ionex/2016/238/>;
- Fișiere auxiliare cu corecțiile DCB pentru P1-C1 valabile pentru o perioadă de 30 de zile accesate la adresa <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2016/>;
- Fișiere auxiliare cu corecțiile DCB pentru P1-P2 valabile pentru o perioadă de 30 de zile accesate la adresa <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2016/>;
- Fișier cu tipurile de receptor necesare identificării corecțiilor DCB poate fi accesat la adresa ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/gipsy_products/gipsy_params/;
- Fișierul SINEX cu soluțiile zilnice pentru coordonatele stațiilor de referință și vitezele de deplasare. Începând cu august 2012 produsele IGS sunt bazate pe astfel de soluții zilnice, făcându-se trecerea de la cele săptămânale. Fișierele de tip SINEX pot fi găsite la IGS accesând adresa <ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/products/orbits/1911/>, sau o altă posibilitate este de a fi descărcate de pe serverul CRUSTAL DINAMICS DATA INFORMATION CENTER (CDDIS) menținut de NASA la adresa <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/1911/>.

5.1.4 Analiză rezultatelor și exemplificări

Datele mai sus menționate au fost folosite în configurația prestabilită a modului PPP. Pentru exemplificarea rezultatelor se vor prezenta în această secțiune grafice realizate pe baza valorilor extrase din fișierul de ieșire rezultat.

Valorile pentru coordonatele calculate sunt exprimate în sistem de coordonate convențional terestru geocentric (ECEF) și într-un sistem local de tip *North, East, Up* (N,E,U) care este un sistem asociat unui plan tangent cu normala la plan orientată după direcția dată de vectorul asociat punctului determinat.

Prin analiza rezultatelor obținute se pot calcula valorile pentru eroarea de poziționare la anumite momente de tip, conform Tabelul 1.

Tabelul 1 Eroarea de poziționare 3D

Durată	Epoci de observație	Eroare de poziționare 3D
40 min	80	10 cm
1 ora 15 min	150	5 cm
2 ore 30 min	300	2 cm
5 ore 30 min	660	1 cm
14 ore	1680	0.5 cm
24 ore	2880	0.4 cm

Se remarcă diferența între observațiile realizate pe baza codurilor și observațiile realizate pe baza fazei undeii purtătoare care au o eroare mai redusă după aplicarea parametrilor rezultați în modelul de compensare.

Pe lângă reprezentări grafice ale coordonatelor obținute, respectiv ale erorilor de determinare ale acestora se prezintă valorile influențelor principalelor corecții care au fost aplicate în cadrul modelului de prelucrare. Valorile pentru erori sunt prezentate ca sub forma influenței pe care o au acestea asupra observațiilor (distanțe).

5.2.PROCESARE ÎN TIMP REAL ÎN MOD PPP

5.2.1 Aspecte asupra transmiterea fluxurilor de date în timp real

O componentă importantă în realizarea unei estimări a preciziei ce poate fi obținută în urma prelucrării observațiilor satelitare este reprezentată de soluțiile software folosite pentru manevrarea datelor.

În cazul transmiterii sau recepționării datelor în timp real sunt utilizate aplicații capabile să respecte cerințele legate de integritatea datelor, sau transmiterea cu o latență cât mai scăzută a acestora.

Alte particularități ce diferențiază aceste aplicații sunt constituite de:

- Tipul și formatul datelor de intrare și ieșire;
- Diversitatea modalităților de acces a datelor de intrare(Caster, TCP/IP, UDP, Serial);
- Numărul conexiunilor simultane suportate;
- Posibilitatea de automatizare a preluării și diseminării corecțiilor;
- Înglobarea unor module de decodare sau prelucrare a datelor recepționate.

O astfel de aplicație, utilizată în elaborarea studiului de caz este reprezentată de softul SNIP (Simple NTRIP Caster). Dezvoltat ca alternativă la soluțiile comerciale de transmitere a corecțiilor, în special pentru metoda RTK, dar nu numai, această aplicație oferă posibilitatea setării unui punct local de transmitere a corecțiilor necesare metodelor de poziționare moderne.

Softul SNIP permite conectarea directă la stațiile de referință eliminând nevoie unei aplicații de tipul NTRIP Server care acționa în variantă clasică ca o aplicație intermediară ce livra datele furnizate de un receptor către o aplicație de tip Caster.

SNIP permite preluarea și transmiterea fluxurilor de date către utilizatori atât prin intermediul protocolului TCP/IP, cât și prin intermediul standardului NTRIP în format RTCM versiunea 3.

Aplicația SNIP permite monitorizarea în timp real a soluțiilor obținute pentru observațiile aferente unei stații de referință oferind o soluție în modul PPP dar care folosește o singură frecvență.

Modulul de monitorizare în timp real oferă numeroase posibilități de vizualizare a informațiilor procesate, precum poziția, abaterea standard a pozițiilor în timp real sau numărul de sateliți recepționați în timp real.

5.2.2 Aplicații destinate preluării, analizei și reprezentării observațiilor satelitare

În cadru studiului practic asupra metodei de poziționare punctuală precisă aplicația software SNIP a fost utilizată pentru retransmitere fluxurilor de date către o aplicație de tip NTRIP Client, acționând ca un „*splitter*” pentru fluxul de date.

Pentru determinarea poziției, dar și pentru analiza datelor a fost utilizată aplicația software open source BNC – BKG NTRIP Client, alături de RTKPlot folosită pentru afișarea pozițiilor determinate și pentru întocmirea graficelor.

Softul BNC este dezvoltat de BKG (*Federal Agency for Cartography and Geodesy*) și permite pe lângă preluarea fluxurilor de date în timp real, procesarea și transmiterea de corecții, precum și analiza datelor în modul PPP sau în modul SPP.

Fișierele în format RTCM sau RINEX ce pot conține observații către sistemele GNSS disponibile în prezent pot fi interpretate, alături de corecții sau de efemeride finale înregistrate în fișiere de format .SP3 pentru obținerea unei soluții. O listă a mesajelor RTCM implementate suportate în versiunea 12 a softului BNC este disponibilă în ANEXA 2 la prezenta lucrare.

Rezultatele constau în fișiere NMEA sau rapoarte cu pozițiile determinate. Aplicația permite înregistrarea datelor brute preluate în timp real pentru prelucrările efectuate “*near real-time*”, sau post procesare.

Cea de-a doua aplicație utilizată face parte din gama de module a softului open source RTKLIB care este alcătuit dintr-o bibliotecă portabilă, alături de o suită de aplicații concepute pentru poziționare GNSS în modul standard și precis de poziționare.

5.2.3 Poziționare statică în timp real

Unul dintre punctele menite a fi atinse prin realizarea studiului de caz este reprezentat de exemplificarea conceptelor expuse în capitolele anterioare, dar în egală măsură se urmărește estimarea aportului adus de cele mai recente constelații de sateliți GNSS în privința îmbunătățirii preciziei de poziționare.

Pentru realizarea efectivă a testărilor s-a impus alegerea unei locații care să îndeplinească următorul set de condiții:

- Locație stabilă cu coordonate determinate în cadrul unei rețele de stații permanente integrată în EPN sau IGS;
- Antenă calibrată individual (cel puțin pentru sistemele GPS și GLONASS);
- Dotată cu un receptor capabil să recepționeze observațiile de la sistemele GNSS existente, inclusiv cele mai recent apărute (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou);

- Să nu aparțină rețelei IGS-multi GNSS(eliminarea corelațiilor prin alegerea unei stații care nu participă la calculul efemeridelor pentru sistemele multi-GNSS) ;
- Furnizează observațiile recepționate în timp real cu o întârziere cât mai mică și cu o disponibilitate cât mai ridicată.

Având în vedere criteriile enumerate, în urma analizei efectuate asupra rețelei de stații permanente EPN , cât și asupra stațiilor incluse în proiectul IGS s-a ales stația PASA00ESP amplasată în nordul Spaniei.

Aplicația folosită pentru prelucrare, de tip NTRIP Client are rolul de a prelua observațiile furnizate în timp real alături de corecțiile furnizate și a le procesa concomitent în două scenarii diferite, funcție de sistemele GNSS recepționate.

O primă variantă este reprezentată de recepționarea sateliților din constelațiile GPS și GLONASS, iar cea de-a doua include adițional sateliții disponibili din constelația Galileo și BeiDou. Parametrii utilizați pentru configurarea celor două variante de prelucrări au fost identici, singura diferență fiind constituită de constelațiile de sateliți recepționați.

Realizarea acestei configurații a permis realizarea unei comparații valide a rezultatelor în exact aceleași condiții.

În ceea ce privește efemeridele sateliților pentru a se asigura disponibilitatea acestora s-a folosit un flux de date suplimentar la o rată de transmisie de 1 secundă.

Pentru implementarea unui algoritm PPP sunt necesare corecții asupra efemeridelor și ceasurilor sateliților furnizate de asemenea în timp real.

Astfel de corecții sunt furnizate de CNES (*Centre National d'etudes spatiales*), în cadrul proiectului *PPP-Wizard* pe baza unui număr de 70 de stații ale IGS, distribuite global.

Denumit *CLK 93*, acest produs de timp real este rezultatul procesării prin intermediul unui filtru Kalman care prelucrează observațiile într-un mod mixt (având ambiguitățile fixate atât ca numere întregi dar și ca numere reale).

5.2.4 Realizarea procesării și analiză

Exemplificarea făcută a vizat reproducerea unui scenariu de monitorizare continuă a stației permanente, cu investigarea perioadelor de convergență a soluției, precum și posibilitatea de comparare a rezultatelor pentru cele două configurații de sisteme satelitare testate.

Având în vedere detaliile expuse asupra aplicațiilor, precum și prezentarea fluxurilor de date folosite, a fost concepută și implementată o schemă de testare care poată fi aplicată atât în cazul de față, dar și pe caz general pentru realizarea unor testări similare.

Fluxurile de date au fost preluate în decursul a două zile, respectiv 19 și 20 martie 2017, săptămâna GPS 1241, DOY 78 și 79. Iar în cadrul analizei efectuate au fost prelucrate 9 ore de observații satelitare, însumând un număr de 32.400 de epoci de observație la intervale de înregistrare de 1 secundă corespunzător unui flux în timp real.

Observațiile au cuprins înregistrări pe trei frecvențe , respectiv L1(C/A), L2(L2C), L2(Z-traking) și L5(Q) pentru GPS, G1(C/A), G2(C/A) pentru GLONASS, E1(C), E5(Q) pentru Galileo

și B1(I), B2(I) pentru BeiDou. O detaliere a întregului spectru de semnale emis de sateliții constelațiilor GNSS utilizate în cadrul prezentei lucrări este prezentată în ANEXA 3.

Un unghi minim de 10° a fost setat ca mască pentru prelucrarea observațiilor. De asemenea o valoare pentru sigma apriori de 0.01 este pretabilă pentru măsurători de fază în cazul în care în cadrul prelucrării se combină măsurători de cod cu măsurători de fază (P3&L3). O valoare mică exprimă o contribuție semnificativă a unei observații de fază în combinația de observații cod și fază. În scenariul creat pentru testare algoritmul de prelucrare utilizează combinații de măsurători de cod și fază într-o combinație care elimină efectul ionosferei.

De amintit este faptul că, în general, de modul de setare a parametrilor depinde caracterul soluției PPP obținute și în special de raportul dintre ponderile măsurătorile de cod și de fază.

Pentru confirmarea recepționării semnalelor declarate în specificațiile aferente fluxurilor de date recepționate, pe perioada înregistrărilor au fost stocate atât datele brute în format RINEX (observații și efemeride), cât și corecțiile recepționate. Corecțiile sunt înregistrate în format propriu BNC și includ corecții ale orbitelor, corecții ale ceasurilor, erori de fază, respectiv de cod.

Prin analizarea comparativă, expusă grafic și în ANEXA 4, în graficul aferent poziției înregistrate după 15 min se poate observa de asemenea o convergență mai rapidă a soluțiilor pentru coordonatele N și E față de componenta U în cazul utilizării setului complet de constelații satelitare GPS, GLONASS, Galileo și BeiDou.

Pentru exprimarea coordonatelor se folosește un sistem de coordonate convențional terestru geocentric (ECEF) și un sistem local de tip North, East, Up (N,E,U) care este un sistem asociat unui plan tangent cu normala la plan orientată după direcția dată de vectorul asociat punctului determinat.

Pe parcursul întregului studiu s-a încercat pe cât posibil corelarea celor două scenarii pentru o analiză cât mai sugestivă și concludentă a rezultatelor obținute.

Pentru exemplificarea matematică a gradului de împrăștiere a soluțiilor în Tabelul 2, respectiv Tabelul 3 s-a calculat abaterea standard pentru pozițiile determinate aferente fiecărei perioade considerate pentru cele două scenarii.

Tabelul 2 Media și abaterea medie pătratică a pozițiilor determinate în configurația GPS, GLONASS

Perioada	Media			Abatere medie pătratică		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ_X (m)	σ_Y (m)	σ_Z (m)
15 min	4644909.062	-156644.973	4353623.066	0.254	0.083	0.112
30 min	4644909.065	-156645.003	4353623.063	0.183	0.068	0.083
1 h	4644909.077	-156645.007	4353623.055	0.131	0.053	0.062
2 h	4644909.098	-156645.064	4353623.075	0.096	0.076	0.052
3 h	4644909.110	-156645.093	4353623.089	0.081	0.075	0.048
4h	4644909.121	-156645.106	4353623.099	0.073	0.068	0.046
6h	4644909.123	-156645.113	4353623.101	0.061	0.057	0.039
9h	4644909.125	-156645.112	4353623.101	0.051	0.047	0.033

Tabelul 3 Media și abaterea medie pătratică a pozițiilor determinate în configurația completă a constelațiilor

Perioada	Media			Abaterea medie pătratică		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σX (m)	σY (m)	σZ (m)
15 min	4644909.075	-156645.069	4353623.051	0.222	0.074	0.121
30 min	4644909.073	-156645.104	4353623.066	0.161	0.064	0.091
1 h	4644909.080	-156645.097	4353623.067	0.115	0.047	0.066
2 h	4644909.102	-156645.096	4353623.073	0.085	0.039	0.048
3 h	4644909.112	-156645.113	4353623.082	0.071	0.040	0.042
4h	4644909.122	-156645.120	4353623.091	0.065	0.037	0.041
6h	4644909.129	-156645.124	4353623.102	0.054	0.031	0.037
9h	4644909.128	-156645.119	4353623.102	0.045	0.027	0.031

6. CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1. CONCLUZII

Necesitatea sistemelor complementare a apărut odată cu creșterea cerințelor privind nivelul de acuratețe, precum și cu nevoia utilizatorilor de a obține informația privind pozițiile observate în timp real.

În prezent, aceste necesități sunt asigurate la nivel mondial de instituții acreditate precum IGS, sau EUREF, care sunt capabile de a respecta aceste cerințe prin configurarea unor servicii de poziționare precise chiar și în timp real care pun la dispoziția utilizatorilor informații suplimentare necesare poziționării.

Având acest lucru în vedere, se poate contura o primă concluzie și anume: numai prin intermediul unei infrastructuri adecvate se poate face posibil accesul utilizatorilor la tehnici de poziționare moderne.

La momentul actual sunt disponibile servicii oferite de sisteme SBAS cu acoperire la nivel continental sau chiar globală. Sistemele SBAS prezintă un avantaj față de sistemele complementare terestre în domeniul ariei de acoperire pe care o oferă.

Aria de acoperire pentru care un sistem SBAS poate garanta calitatea datelor oferite este limitată doar de întinderea rețelei de stații de la sol pe baza cărora sunt calculate mesajele transmise.

Având în vedere posibilitatea de interconectare a sistemelor SBAS regionale pentru realizarea unui sistem cu acoperire cvasi-globală, țara noastră prezintă un avantaj din punct de vedere al poziției geografice. Amplasarea geografică favorizând recepționarea semnalelor sistemelor complementare spațiale.

În ceea ce privește segmentul sistemelor complementare terestre, în România acesta este reprezentat prin intermediul infrastructurii sistemului ROMPOS.

Datorită dezvoltării sistemului ROMPOS procentul utilizatorilor care adoptă metodele de poziționare în timp real de tip RTK sau DGNS este în continuă creștere.

Un rol esențial și de importanță vitală în viitor este dezvoltarea mijloacelor de comunicație care fac posibil accesul utilizatorilor la datele oferite de sistemele complementare.

Tot mai multe agenții pun la dispoziție prin intermediul Internetului date brute și produse de rețea necesare tehnicilor de poziționare moderne: DGNS, RTK, PPP.

Dezvoltarea unei infrastructuri care să permită utilizarea tehnicii de poziționare punctuală precisă oferă utilizatorilor posibilitatea de a realiza o poziționare în mod independent față de stațiile de referință actuale, eliminând astfel considerentele legate de densitatea rețelei și de distanța utilizatorului față de stațiile permanente.

Mai mult de atât, dezvoltarea sistemelor complementare oferă avantaje în toate domeniile care întrebunțează conceptul de localizare având repercusiuni imediate asupra laturii economice.

Din acesta cauza numeroase societăți private prezintă interes în a furniza servicii complementare pentru poziționare pe baza unor abonamente.

Avantajele oferite de sistemele complementare utilizatorilor în materie de timp pentru realizarea măsurătorilor și de nivel al preciziei, justifică nevoia și preocupările din domeniu de a îmbunătăți tehnicile de măsurare ce au ca suport astfel de sisteme. De aici se deduce și necesitatea prezentei teze, ce are ca obiectiv investigării posibilităților de utilizare a sistemelor complementare disponibile și viitoare în scopul îmbunătățirii preciziei de poziționare obținută de utilizatori.

Potrivit definiției sale, poziționarea punctuală precisă (*Precise Point Positioning*) utilizează orbite precise și date precise despre ceasurile sateliților, precum și observații ale fazei și măsurători de coduri pe dublă frecvență, înglobate în funcții matematice care elimină efectul ionosferei asupra observațiilor.

Din perspectiva utilizatorului tehnica PPP implică folosirea unui singur receptor. Prin analogie cu poziționarea relativă, rolul celui de-al doilea receptor în cazul diferențelor duble (între receptoare și sateliți) este îndeplinit de rețeaua de stații permanente distribuite global.

Spre deosebire de poziționarea relativă în care erorile comune se anulează reciproc, în cazul poziționării punctuale precise aceste erori nu pot fi înlăturate prin această tehnică. Mișcările receptorului rezultate din fenomenele geodinamice precum mișcările tectonice, mările terestre, sau încărcarea oceanelor contribuie din plin la soluția oferită prin PPP, ca și erorile cauzate de troposferă și ionosferă.

Așadar în cadrul acestei metode sunt utilizate modele individuale pentru eliminarea influenței erorilor.

O preocupare de actualitate în ceea ce privește metoda de poziționare punctuală precisă este reprezentată de diminuarea timpului de convergență a soluției.

Disponând de posibilitatea de a combina, folosind algoritmi deja testați, noi frecvențe puse la dispoziție de sistemele satelitare, printre care și noile frecvențe comerciale ale sistemului Galileo, se pot obține măsurători din care sunt eliminate sau atenuate influențele erorilor ce pot surveni în măsurătorile clasice GNSS.

Datorită faptului că în cazul abordării clasice a acestei metode caracterul de numere întregi al ambiguităților este pierdut, dezavantajul major este reprezentat de dependența de o sursă exterioară pentru estimarea părților fracționare asociate cu aceste erori.

În cazul metodei de poziționare punctuală precisă rezolvarea sistemului de ecuații ale observațiilor duce la un caz de nedeterminare, fiecare observație efectuată aducând noi parametri necunoscuți în cadrul modelului matematic.

Acest fapt a condus la dezvoltarea conceptului de PPP-RTK, aflat în fază de implementare, concept bazat pe infrastructura principală a unui sistem RTK, dar care folosește algoritmi avansați specifici Transformării S, de înlăturare a defectului de rang generat de introducerea în modelului de procesare a unui număr suplimentare de parametri.

Având în vedere dependența metodei PPP de soluția oferită de rețeaua de stații permanente se poate evidenția caracterul relativ al metodei, însă avantajele majore aduse de această metodă constau în:

- în reducerea considerabilă a densității stațiilor permanente necesare calculul corecțiilor necesare;
- diminuarea implicită a costurilor destinate întreținerii unei rețele de stații permanente dense;
- eliminarea dependenței de distanța față de stațiile de referință;
- obținerea unei soluții cu caracter global prin folosirea unei rețele distribuite global;
- reducerea costurilor utilizatorului pentru implementarea metodei prin folosirea unui singur receptor GNSS.
- beneficiază din plin de caracterul și specificațiile noilor frecvențe transmise de cele mai recente sisteme de poziționare prin satelit de tip GNSS.

Cunoașterea elementelor care influențează acuratețea de determinare a poziției reprezintă o condiție esențială pentru utilizarea adecvată a metodei de poziționare punctuală precisă, ca atare în cadrul acestei lucrări este oferită o prezentare detaliată a erorilor ce condiționează această metodă.

Mai mult de atât, acest fapt permite alcătuirea unui model al observațiilor cât mai fidel ce are ca modalitatea de estimare a parametrilor, metoda celor mai mici pătrate.

Pentru exemplificarea metodei PPP în modul post-procesare și analiza rezultatelor s-a folosit un program dezvoltat de Agenția Spațială Europeană denumit *gLAB*. Menit să vină în sprijinul doctoranzilor, dar și tuturor celor interesați de domeniul GNSS acest soft oferă posibilități de analiză și reprezentare grafică a rezultatelor obținute.

În cadrul capitolului dedicat studiului de caz s-a exemplificat modul de determinare a poziției unui receptor static obținându-se precizii sub-centimetrice. În cadrul aceleiași demonstrații au fost realizate grafice pentru reliefa influenței erorilor asupra soluției obținute.

Pentru realizarea unei procesării în timp real au fost utilizate soluțiilor open source în cadrul celei de-a doua părți a studiului de caz, analizând în același timp și deschiderea domeniului poziționării GNSS către acest tip de soluții.

Au fost elaborate criteriile de selecție a unei stații candidat, precum și scenariile de poziționare funcție de configurațiile de sateliți recepționați și implementate în cadrul unei scheme de testare elaborate de autor.

Rezultatele au validat tendința de îmbunătățire a preciziei pentru metoda de poziționare punctuală precisă în cazul noilor constelații de sateliți. Coordonatele sub formă de serii de timp și graficele prezentate în cadrul expunerii studiului de caz confirmă totodată acest fapt. Cu toate acestea, posibilitatea de utilizare a metodei PPP în aplicațiile în care conceptul RTK tinde să devină un standard este încă îngrădită de timpul de convergența a soluțiilor care este în continuare considerabil mai mare decât în cazul RTK. Această problemă găsindu-și rezolvarea în studiile din domeniu efectuate asupra utilizării și combinării noilor frecvențe disponibile în acest scop.

Scenariul de procesare dezvoltat de autor poate constitui baza unui serviciu permanent de monitorizare a soluțiilor obținute prin intermediul tehnicii PPP, aducând ca factor de noutate introducerea celor mai recente constelații lansate în orbită. Un astfel de serviciu ar putea permite monitorizarea și evaluarea permanentă a rezultatelor ce se pot obține prin utilizarea metodei de poziționare punctuală precisă.

Aportul sateliților noi apăruiți, dar și al frecvențelor și în special al frecvențelor comerciale E5a/E5b Galileo concepute pentru transmiterea mesajelor care îmbunătățesc metoda PPP constituie un factor hotărâtor pentru dezvoltarea conceptului PPP.

6.2.CONTRIBUȚII PERSONALE

În cadrul acestei lucrări, cu titlul *"CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂȚIREA PRECIZIEI DE DETERMINARE A POZIȚIEI UTILIZÂND SISTEME GNSS COMPLEMENTARE* ,, autorul și-a arătat preocuparea legată de domeniul GNSS și în special de sistemele complementare de poziționare, cu aplicațiile acestora, aducând în prim plan elementele de noutate legate de acest domeniu.

În ceea ce privește contribuțiilor personale ale autorului aduse prin intermediul acestei lucrări sunt de menționat :

- Investigarea și alcătuirea unei baze teoretice ample referitoare la situația sistemelor complementare spațiale și terestre;
- Expunerea considerentelor de natură teoretică referitoare la tehnica poziționării punctuale precise;
- Documentarea combinațiilor de frecvențe utilizate pentru reducerea influenței erorilor
- Prezentarea metodei de poziționare punctuală precisă ca mijloc de estimare a erorilor ce intervin în cadrul poziționării GNSS;
- Cercetarea asupra conceptelor emergente referitoare la tehnica *PPP-RTK* aflată în curs de dezvoltare și implementare;
- Prezentarea modelelor matematice folosite în cadrul metodei *PPP-RTK*;
- Prezentarea unor aplicații cu potențial de implementare în cadrul curricular universitar ca mijloc educațional sau în cadru profesional ca mijloc de formare și perfecționare a specialiștilor;
- Configurarea unui sistem de preluare a fluxurilor de date și calcul a soluțiilor folosind în totalitate aplicații open source.

6.4. PERSPECTIVE DE CERCETARE

Totodată, în urma cercetării întreprinse de autor cu privire la dezvoltarea și utilizarea sistemelor complementare în scopul îmbunătățirii preciziei se pot deprinde următoarele perspective de cercetare:

- Investigarea capabilităților noilor frecvențe comerciale operaționale sau viitoare puse la dispoziție de sistemul GNSS European Galileo în virtutea îmbunătățirii preciziei de poziționare;
- Perspective de implementare a conceptului PPP-RTK pe baza unui sub-set din stațiile permanente aparținând rețelei naționale de stații GNSS permanente;
- Studiarea posibilităților de realizare a unor modele matematice precise pentru modelarea principalele surse de erori care afectează determinarea poziției utilizând sisteme GNSS;
- Tratarea pe larg a domeniului estimării erorilor ce intervin în cadrul poziționării GNSS, cu investigarea algoritmilor utilizați în cadrul procesului de estimare a erorilor;
- Posibilitatea de participare cu o stație permanentă de clasă superioară în cadrul IGS-multi GNSS.

REFERINȚE SELECTIVE

- [1] E. Wasle, . H. Lichtenegger and B. Hofmann-Wellenhoh, GNSS - Global Navigation Satellite System GPS, GLONASS, Galileo and more, New York: SpringerWien, 2008.
- [2] The Ohio State University, „Department of Astronomy,” The Ohio State University, 2016. [Interactiv]. Available: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit5/gps.html>. [Accesat martie 2017].
- [3] SanzSubirana, J; Zornoza, J.M.; Hernandez-Pajares, M.; GNSS DATA PROCESSING, Volume I: Fundamentals and Algorithms, Noordwijk: ESA Communications, Mai 2013.
- [4] Antenna-Theory.com, „Antenna-Theory.com,” [Interactiv]. Available: <http://www.antenna-theory.com/basics/gain.php>. [Accesat Martie 2017].
- [5] N. Marchal, S. Mahooti-Larger, F. Brunel, G. Huggins, J. Cosmen și J. Martin, „GNSS1-GNSS2 Transition Analysis (WP5),” THOMSON-CSF, Matra Marconi Space, GMV, Iunie 1997.
- [6] N. Marchal, J. Cosmen, G. Huggins, T. Haddrell și R. Cardarelli, „Candidate GNSS2 - WP4.1,” Thomson-CSF, Matra Marconi Space, GMV, Navstar, Nuova Telespazio, Iulie 1996.
- [7] Satel Conseil, „Multimodal Safety Sattelite System for Transport Final Raport, Synthesis, Guidelines and Recomandations,” Satel Conseil, Septembrie 2000.
- [8] European Space Agency, „Navipedia,” [Interactiv]. Available: <http://www.navipedia.net>. [Accesat Martie 2017].
- [9] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, „International Standards and recommended practices for AERONAUTICAL TELECOMMUNICATIONS Annex 10, Volume 1,” Iulie 1996.
- [10] C. Rizos, „Multi-Constellation GNSS/RNSS From the Perspective of High Accuracy Users in Australia,” School of Surveying & Spatial Information Systems, University of New South Wales, Sydney, Australia.

- [11] CNES, ESA, COMISA EUROPEANĂ, User guide for EGNOS application developers, CNES, ESA, COMISA EUROPEANĂ, Iulie 2007.
- [12] Science Applications International Corporation, GPSW SE&I, „INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200, Revision E,” GLOBAL POSITIONING SYSTEM WING (GPSW) SYSTEMS ENGINEERING & INTEGRATION, Iunie 2010.
- [13] J. Nikula, „EGNOS AUGMENTED SATELLITE POSITIONING, Master's Thesis,” University of Jyväskylä, Department of Mathematical Information Technology, Jyväskylä, 2007.
- [14] Y.-J. Tsai, „WIDE AREA DIFFERENTIAL OPERATION OF THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM : EPHEMERIS AND CLOCK ALGORITHMS,” Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering and the committee on graduate studies, Standford University, California, USA, 1999.
- [15] Mathur, Ankit Raj;, „SISNeT User Application Software User Manual,” ESA, GNSS-1 Project Office, Martie 2010.
- [16] J. Ventura-Traveset, L. Gauthier, F. Toran, P. Michel, G. Solari, F. Salabert, D. Flament, J. Auroy și D. Beugnon, „EGNOS, The European Geostationary Navigation Overlay System - A cornerstone of Galileo,” ESA, 2006.
- [17] ESSP, „EGNOS service notes,” ESSP, Mai 2014.
- [18] GPS WORLD staff, „Update on EGNOS and GAGAN SBAS Satellites,” *GPS WORLD*, 2 August 2012.
- [19] European Commision , „EGNOS Safety of Life Service Definition Document,” European Commision, Directorate-General for Enterprise and Industry, Martie 2011.
- [20] European Commision, „EGNOS SOpen Service Definition Document,” European Commision, Directorate-General for Enterprise and Industry, Octombrie 2009.
- [21] European GNSS Agency, „EGNOS,” European GNSS Agency, [Interactiv]. Available: <https://www.egnos-portal.eu/>. [Accesat Martie 2017].
- [22] F. A. A. Department of Transportation, „GPS WASS PERFORMANCE STANDARD,” Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Octombrie 2008.
- [23] United Nation Office for Outer Space Affair, „United Nation Office for Outer Space Affair,” [Interactiv]. Available: <http://www.unoosa.org/>. [Accesat Martie 2017].
- [24] Sharpe, T; Hatch, R; Galyean, P, „StarFire: A Global High Accuracy Differential GPS System,” *NavCom Technology Inc.*

ANEXA 1

ANEXA 2

ANEXA 3

ANEXA 4