

# Geoptimaliseerde surveillance van een broadcaster voor real-time distributie van GNSS data stromen

**Nele ANNAERT**

Promotor(en): Mevr. Ann Philips

Co-promotor(en): Dr. Carine Bruyninx  
(My company promotor)

Masterproef ingediend tot het behalen van  
de graad van master of Science in de  
industriële wetenschappen: Elektronica -ICT  
ICT

©Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven Technologicampus De Nayer, Jan De Nayerlaan 5, B-2860 Sint-Katelijne-Waver, +32 15 31 69 44 of via e-mail [iiw.denayer@kuleuven.be](mailto:iiw.denayer@kuleuven.be).

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

# Dankwoord

Dank aan mezelf

Dank aan een ander

# Abstract

Testabstract. Omschrijf hier je thesis.

Trefwoorden: latex, thesis, stijl

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Situering en doelstelling</b>	<b>1</b>
1.1	Situering . . . . .	1
1.2	Doel . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Literatuurstudie</b>	<b>3</b>
2.1	Satellieten . . . . .	3
2.1.1	Positie bepaling aan de hand van satellieten . . . . .	3
2.1.2	Verschillende types satellieten . . . . .	4
2.2	Global Navigation Satellite System . . . . .	5
2.2.1	Global Positioning System . . . . .	6
2.2.2	GLONASS . . . . .	9
2.2.3	Galileo . . . . .	11
2.2.4	BeiDou . . . . .	12
2.2.5	Multi-GNSS . . . . .	13
2.3	EUREF Permanent Netwerk . . . . .	14
2.3.1	Management en Coördinatie . . . . .	15
2.4	Communicatie . . . . .	15
2.4.1	RINEX dataformaat . . . . .	15
2.4.2	RTCM dataformaat . . . . .	17
2.4.3	NTRIP . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Reeds gerealiseerde elementen</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Planning</b>	<b>24</b>

# Lijst van figuren

1.1	Logo van de Koninklijke Sterrenwacht van België (1)	1
2.1	Positie bepaling aan de hand van satellieten (2)	4
2.2	GPS constellatie (3)	7
2.3	Schematische weergave van een RTK systeem (4)	9
2.4	GLONASS constellatie (5)	10
2.5	Galileo constellatie (6)	12
2.6	BeiDou constellatie (7)	13
2.7	RTCM data stroom op het internet (8)	20
2.8	Schematisch overzicht NTRIP communicatie (9)	21
2.9	NTRIP streaming systeem (10)	21
4.1	Gantt Shart	24

# Lijst van tabellen

2.1	Vereenvoudigde samenstelling van een RINEX bestand . . . . .	16
2.2	RTCM record, verdeeld in verschillende berichttypes . . . . .	17
2.3	RTCM bericht, verdeeld in hoofding en bericht . . . . .	17
2.4	RTCM-2.0 berichttypes relevant voor DGPS . . . . .	18
2.5	RTCM versie 3 frame structuur . . . . .	19

# Lijst van acroniemen

<b>BDS</b>	Beidou navigation Satellite system
<b>BEV</b>	Bundesamt fuer Eich- und Vermessungswesen (Vienna)
<b>BKG</b>	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, Federal Agency for Cartography and Geodesy (Duitsland)
<b>CP</b>	Carrier Phase
<b>DGPS</b>	Differential GPS Corrections
<b>EPN</b>	Euref Permanent GNSS Network
<b>ETRS</b>	European Terrestrial Reference System
<b>FOC</b>	Fully Operational Capacity, volledige functionele capaciteit
<b>GEO</b>	Geostationary Earth Orbit
<b>GLONASS</b>	GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, GLObal NAVigation Satellite System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HTTP</b>	HyperText Transfer Protocol
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>IGSO</b>	Inclined GeoSynchronous Orbit
<b>IOV</b>	In Orbit Validation
<b>LEO</b>	Low Earth Orbit
<b>MEO</b>	Medium Eurt Orbit
<b>MGEX</b>	Multi-GNSS EXperiment
<b>NTRIP</b>	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
<b>PNT</b>	Postioning, Navigation and Timing
<b>PPP</b>	Precise Point Postioning



**RDC** Regional Data Centers

**RINEX** Receiver INdependent EXchange

**RMS** Root Mean Square

**ROB** Royal Observatory of Belgium

**RTCM** Radio Technical Commission for Maritime services

**RTK** Real-Time Kinematic

**SC** Special Committee

**TWG** Technical Working Group

# Hoofdstuk 1

## Situering en doelstelling

Het onderwerp van deze masterproef is:

Geoptimaliseerde surveillance van een broadcaster voor real-time distributie van GNSS data stromen. Dit wordt ontwikkeld samen met de Koninklijke Sterrenwacht van België. Voor het verder verloop van de masterproef, wordt hiernaar verwezen als de Royal Observatory of Belgium (ROB). Figuur 1.1 toont het logo van het ROB. De verdere uitleg over de situering van de masterproef staat in sectie 1.1.



**Figuur 1.1:** Logo van de Koninklijke Sterrenwacht van België (1)

Het doel om het gebruik van data afkomstig van satellieten te bestuderen. Het doel wordt verder in detail besproken in sectie 1.2.

### 1.1 Situering

Er zijn verschillende constellaties die deel uitmaken van het GNSS. In sectie 2.2 worden deze verder in detail besproken. Deze constellaties zijn opgebouwd uit satellieten. De data van deze satellieten wordt verzameld door het EUREF Permanent Network (EPN), hierover is meer informatie te vinden in sectie 2.3. Het ROB doet dienst als het centrale bureau van het EPN. Hierdoor zijn zij verantwoordelijk voor het beheer van de data. In deze masterproef wordt verder ingegaan op het beheer van deze data en de logfiles. Deze worden verzameld door de broadcaster die gebruikt wordt om de data verder te verspreiden naar bevoegde instanties. Voorafgaand was er nog geen onderzoek gebeurd naar de logfiles van de broadcaster. Na de masterproef zou het voor de medewerkers van het ROB duidelijk moeten zijn wat er in de logfile staat. Dit moet grafisch weergegeven worden. Eveneens zou voor de verantwoordelijke het dagelijks beheer hierdoor eenvoudiger

moeten worden.

## 1.2 Doel

Deze masterproef heeft volgende onderzoeksvraag:

Welke gegevens worden door het logging systeem van de GNSS broadcaster verzameld?

Is het mogelijk om met deze gegevens het beheer van de GNSS broadcaster te vergemakkelijken?

Welke aanpassingen moeten in de software gebeuren zodat de doelstellingen verwezenlijkt kunnen worden? In de literatuurstudie (in hoofdstuk 2) wordt in de eerste plaats gekeken naar de nodige kennis over satellieten, GNSS en de communicatie, om het praktisch gedeelte van de masterproef te kunnen begrijpen.

Deze masterproef heeft als uiteindelijk praktisch doel een nieuw geoptimaliseerd logging systeem voor de GNSS broadcaster te ontwerpen. Deze broadcaster moet uiteindelijk in staat zijn om:

- Detecteren en reageren op potentiële beveiligings problemen. (Zoals bijvoorbeeld herhaaldelijk proberen aanmelden met een verkeerd paswoord, veel simultane verbindingen ...)
- Feedback geven aan de leveranciers van datastromen over het gebruik van hun data
- Bestuderen van de status/gezondheid van clients, software gebruikt voor het maken van de verbinding, het gebruikt protocol, verbruik van de bandbreedte ...

Het zou kunnen dat om dit te verwezelijken de software van de logger aangepast moet worden zodat er meer data bewaard wordt. De verkregen informatie moet grafisch worden voorgesteld op een web-gebaseerde interface. Deze interface moet voor de verantwoordelijke van de configuratie van de broadcaster het dagelijks beheer vergemakkelijken.

# Hoofdstuk 2

## Literatuurstudie

Dit hoofdstuk verduidelijkt de theorie en de kennis die nodig is om het onderzoek in deze masterproef te begrijpen. Als eerste bespreken we de werking van satellieten in sectie 2.1. Vervolgens wordt er een beeld van de satelliet constellaties die gebruikt worden geschetst. Deze worden besproken in sectie 2.2. Eens we de verschillende types van satellieten kennen, wordt in sectie 2.3 het Europees permanent netwerk besproken. De verschillende soorten communicate worden besproken in sectie 2.4.

### 2.1 Satellieten

Om de werking van de satelliet systemen beter te begrijpen, verklaren we in deze sectie eerst een paar basis principes. In sectie 2.1.1 verklaren we hoe aan de hand van satellieten de positie bepaald kan worden. Vervolgens bespreken we de verschillende types van satellieten besproken in sectie 2.1.2. Satellieten worden geobserveerd en gestuurd door grondstations. Die zorgen voor de ruimtelijke informatie in het signaal. Dit is de ephemeris data (de baan van een satelliet) of de almanak data (de relatie tussen alle satellieten). Bijkomend wordt informatie over de klok verzonden (11).

#### 2.1.1 Positie bepaling aan de hand van satellieten

Het algemeen principe achter een satelliet navigatie systeem is de trilateratie vanuit elk punt op het oppervlak van de aarde ten op zichte van de zichtbare satellieten. De afstand tot de satellieten wordt gemeten door de tijd die het radiosignaal nodig heeft om de ontvanger te bereiken. Omdat het radiosignaal reist aan de lichtsnelheid, worden zeer nauwkeurige klokken gebruikt. De satellieten bevatten atomaire klokken, de ontvangers geavanceerde quartz klokken. De exacte locatie van de satelliet wordt bekeken als een gekende voor de rest van de positiebepaling. Dit is mogelijk omdat de banen van de satellieten zeer stabiel en voorspelbaar zijn. In principe zijn drie satellieten voldoende om een drie dimensionale positie te bepalen. Alle punten met de zelfde afstand tot een satelliet vormen een sferisch oppervlak met de satelliet in het midden. Drie sferische oppervlakken snijden elkaar in twee punten. Eén van deze punten kan verwaarloosd worden omdat de positie te ver is van het aardoppervlak. Dit is grafisch weergegeven in figuur 2.1 Een vierde signaal is nodig om de tijdsverschillen te elimineren tussen de klokken van de satellieten en de ontvanger. Het aantal ontvangers is niet gelimiteerd omdat gebruikers zich op een passieve manier gedragen.

De berekende positie heeft een foutenmarge in de grote orde van enkele meters. Dit is echter voor veel toepassingen, zoals de navigatie in de auto voldoende nauwkeurig). De grootste oorzaken van fouten zijn de volgende (11):

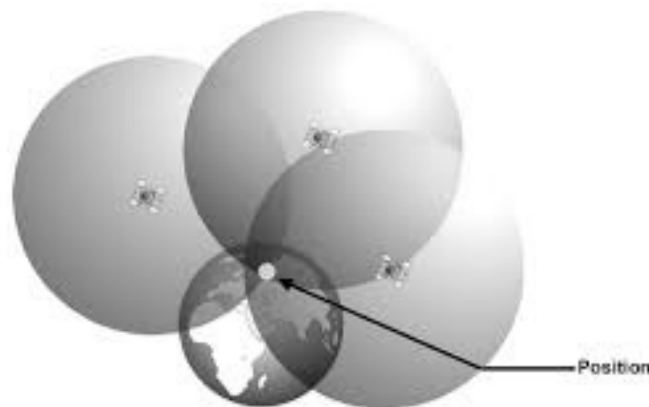
- De geometrische positie van de satellieten, bij elke satelliet kan er een kleine afwijking zijn ten op zichte van de positie die men als gekend rekent
- Klok fouten zowel bij de satelliet als de ontvanger
- Troposferische en ionosferische condities
- Multipad effecten
- Onjuistheden van de ontvanger

### 2.1.2 Verschillende types satellieten

Satellieten worden onderverdeeld in verschillende types. Dit heeft voornamelijk te maken met de baan die ze hebben rond de aarde en hun positie ten opzichte van een punt op het aardoppervlak. In deze sectie worden twee verschillende soorten van satellieten besproken.

#### Geostationary Earth Orbit Satelliet

Geostationary Orbit satelliet. Dit wordt vaak afgekort als GEO (12; 13). Het gebied waarin GEO satellieten voorkomen is net zoals Low Earth Orbit (LEO) gebied beschermd (13). De GEO satellieten hebben per definitie dezelfde omwentelingsnelheid rond de aarde als dat de aarde om haar as draait. Hierdoor lijken zij bekeken vanuit een punt op de aarde stationair (12). Vaak is de nauwkeurigheid van de satellietbaan van een GEO satelliet minder nauwkeurig dan deze van een ander satelliet type. Dit kan verklaard worden door het feit dat er geen geometrische variatie is tussen de GEO satelliet en het referentiestation. Hiermee bedoelt men dat de positie van de satelliet tegenover het referentie station op aarde gelijk blijft. Indien de satelliet afwijkt van zijn baan, wordt dit wel gemeten, maar zou dit ook door een andere fout zoals bijvoorbeeld een klok fout kunnen komen. Hierdoor wordt de afwijking in de satelliet baan pas laat gedetecteerd. Dit verzwakt de schatting van de satellietbaan (14).



**Figuur 2.1:** Positie bepaling aan de hand van satellieten (2)

### Medium Earth Orbit satelliet

Medium Earth Orbit (of afgekort MEO) satellieten bewegen als je kijkt vanop de aarde (12). MEO is geen beschermd gebied. MEO wordt gedefinieerd als een regime van satellietbanen met hoogtes tussen LEO en de geosynchrone riem. Dit betekent dat de hoogtes zich bevinden tussen 2000 km en 35586 km. GNSS (wordt verder besproken in sectie 2.2) constellaties zijn gelocaliseerd in grote MEO hoogtes tussen 18 000 km en 24 000 km. Met constellaties worden netwerken van satellieten bedoeld. Kleine MEO hoogtes tot 5000 km kunnen interessant zijn voor kleine satelliet missies. 85% Van de satellieten in het MEO gebied maken deel uit van 6 groepen (13):

1. GLONASS: Verder besproken in sectie 2.2.2.
2. NavStar: De GPS satellieten, deze worden uitgebreid besproken in sectie 2.2.1
3. Initial Defence Satellite Communications System. De voorganger van het Amerikaans Defentie Satelliet Communicatie Systeem. De satellieten werden gelanceerd in 1960 in circulaire banen in het MEO gebied
4. Oko: Dit is de Russische defentie constellatie. De satellieten zijn geplaatst in een Molniya satellietbaan. Molniya satellietbanen zijn banen met een eliptische vorm, waar de aarde niet het middelpunt is. De banen zijn geplaatst in een hoek van 63.4 graden ten op zichte van de evenaar
5. Nieuwe GNSS constellaties: Galileo, meer informatie hierover is te vinden in sectie 2.2.3 en BeiDou, besproken in sectie 2.2.4
6. West Ford needle experiment: dit is technisch gezien geen constellatie. De naalden zijn in 1960 gelanceerd om de lange afstand HF communicatie te verbeteren.

Er was veel interesse in MEO eind 1960. Maar sindsdien is er niet veel gebeurd tot 1980. De satelliet navigatie constellaties omvatten het grootste deel van MEO lanceringen in de laatste dertig jaar (13).

## 2.2 Global Navigation Satellite System

GNSS ofwel Global Navigation Satellite System, is een satelliet systeem met een wereldwijde dekking van het aardoppervlak. GNSS is een standaard term, gebruikt om systemen te beschrijven die positie en navigatie oplossingen bieden. Het werd voornamelijk ontwikkeld voor de luchtvaart en ruimtevaart industrie en voor militaire doeleinden. Tegenwoordig worden deze technologieën ook in andere toepassingen gebruikt, zoals in de wetenschap om de beweging van de continenten te bestuderen of landmeters die aan de hand van satellieten metingen doen. GNSS vraagt samenwerking tussen verschillende publieke en private organisaties (15). GNSS satellieten zenden continu radiosignalen uit naar de oppervlakte van de aarde door de atmosfeer (16). Het GNSS systeem is opgebouwd uit verschillende constellaties die verder in deze tekst besproken worden. GPS, besproken in sectie 2.2.1, is de eerste constellatie van GNSS. In sectie 2.2.2 bespreken we GLONASS, dit zijn beide militaire systemen. Toch zijn ze beschikbaar voor gebruik door internationale private en commerciële doeleinden (11). Galileo wordt besproken in sectie 2.2.3 en BeiDou komt al laatste aan bod in sectie 2.2.4. GNSS bestaat momenteel uit zes constellaties. Het Quasi-Zenith

Satellite System (Japan) en Indian Regional Navigation Satellite System worden niet besproken. Doordat BeiDou en Galileo relatief nieuwe systemen zijn, hebben zij qua modellering beperkingen tegenover de oudere systemen, zoals GPS en GLONASS. De preciese antenne fase verbeteringen zijn beschikbaar voor GPS en GLONASS. Voor Galileo en BeiDou zijn deze momenteel nog niet beschikbaar (14). De GNSS constellaties zijn opgebouwd uit drie delen, namelijk het ruimte gedeelte, het controle gedeelte en het gebruikers gedeelte (17). Het IGS, International GNSS Service staat in voor de aflevering van de hoogste kwaliteit GNSS data en producten (18). Het IGS geeft op regelmatige basis de meest accurate informatie over satellietbanen en klokken voor GPS en GLONASS vrij. Dit wordt mogelijk gemaakt door een dicht globaal netwerk en verschillende meewerkende data analyse centra. Voor de schatting van satellietbanen en klokken wordt een software pakket (NAPEOS) gebruikt. De software is uitgebreid om de vier besproken constellaties te verwerken (14). Elke satelliet is een project op zichzelf. Hierdoor is het moeilijk om een gestandaardiseerde productie ketting te creëren (15). Om de performantie van GNSS te meten zijn beschikbaarheid, betrouwbaarheid en nauwkeurigheid sleutelparameters. Met de beschikbaarheid bedoelt men het aantal satellieten dat zichtbaar is vanaf de positie van de gebruiker. De nauwkeurigheid is een maat voor hoe groot het verschil is tussen de werkelijke en de berekende positie en snelheid (19). De nodige nauwkeurigheid is afhankelijk van de toepassing waarin het gebruikt wordt (20). Gebruikers merkten al in het begin op dat de satellieten van een constellatie in het zelfde gedeelte van de hemel voorkomen met een periode die net iets kleiner is dan één dag. Dit was een belangrijke eigenschap toen het systeem nog niet volledig was en data verzameld moest worden op het moment dat de meeste satellieten zichtbaar waren (21). Dit komt doordat voor nauwkeurige metingen te hebben er vijf satellieten zichtbaar moeten zijn. In de begin jaren, waren er nog niet veel satellieten en kon men aan de hand van de periode op voorhand bepalen wanneer de meeste satellieten zichtbaar zijn op het punt waar de metingen moeten gebeuren. Zodat ze zeker voldoende zichtbare satellieten zouden hebben op het meet moment. Ondertussen is het systeem onmisbaar en komen er steeds meer extra toepassingen bij (11).

## 2.2.1 Global Positioning System

Global Positioning System, wordt vaak afgekort naar GPS. Dit is het op satellieten gebaseerde positie systeem dat bij ons het bekendste is. Het is ontwikkeld in Amerika (18; 15). Het GPS systeem heeft zijn werkende capaciteit (FOC = Fully Operational Capability) bereikt in 1993 (16). Het is één van de langst en meest gebruikte systemen binnen GNSS en draait momenteel op volledige capaciteit (22; 11). GPS wordt vaak gebruikt als algemene term voor satelliet navigatie. Het primair doel van GPS is drie dimensionale navigatie (11). Hiervoor maakt het gebruik van een netwerk van dubbele frequentie GPS ontvangers (23). Voor de gebruikers is kost van de data een hoge bezorgdheid. Daarom is het belangrijk om de kosten van de operaties te verkleinen. GPS moet toegankelijk zijn voor meerdere clients op het zelfde moment. De gebruikerstoegang gebeurt voornamelijk door mobiele toestellen die verbindig maken via het internet (24). Voor sommige toepassingen voldoet de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid van de GPS constellatie niet (19).

### Opbouw GPS constellatie

De constellatie van GPS bestaat uit 32 satellieten en heeft zijn FOC bereikt, het systeem wordt geleidelijk aan gemoderniseerd (22). De satellieten zijn geplaatst in een bijna circulaire baan met een straal van 2562.75km. De periode bedraagt 11 uur en 58 minuten (19; 11). Dit is de tijd die verstrijkt tussen dat een satelliet terug op dezelfde plaats wordt waargenomen. De satellieten

werden geplaatst in zes orbitale vlakken. De satellieten in elk vlak zijn niet op gelijke afstand geplaatst (19). Deze constellatie voorziet de gebruiker van vijf tot acht zichtbare satellieten vanop elk punt op het aardoppervlak (11). De opbouw van de constellatie wordt grafisch weergegeven in figuur 2.2.



**Figuur 2.2:** GPS constellatie (3)

### GPS Signalen

Het GPS signaal bestaat uit twee zeer stabiele, bijna monochromatische draaggolven L1 en L2, waarop drie modulaties op aanwezig zijn (25):

- C/A code
- P code
- broadcast bericht

Alle componenten van een GPS signaal zijn gebaseerd op een fundamentele kloksnelheid ( $f_0$ ) van 10,23 MHz. De GPS draaggolven hebben een frequentie van  $154 f_0$  voor L1 en een frequentie van  $120 f_0$  voor L2(26). De nauwkeurigheid van L1 code en de metingen van de fase van de draaggolf (CP) zijn nauwkeuriger dan deze bij L2 (25). GPS signalen zijn modulaties van de draaggolven L1 en L2 van alle satellieten (27). Er is ook een nieuwer signaal is L5, dit wordt uitgestraald door de nieuwste generatie van GPS satellieten. L5 wordt gebruikt voor Safety of Life toepassingen. Het wordt uitgestraald met een frequentie gelijk aan  $f_0$ . Dit signaal wordt slechts door een beperkt aantal ruimtetuigen gebruikt (28).

### Manieren om posities te bepalen

Er zijn verschillende technieken om uw positie te bepalen. Deze kunnen verschillen in het aantal stations dat nodig is. Verder wordt er voor sommige toepassingen aan post-processing gedaan,



terwijl andere toepassingen een real-time aanpak vragen. De verschillende methodes verschillen ook in de te behalen nauwkeurigheid. In deze tekst worden drie verschillende methodes besproken.

**Differential GPS Corrections** Differential GPS Corrections, ook wel DGPS genoemd, worden gebruikt om nauwkeurig posities te bepalen (29). Dezelfde techniek wordt ook gebruikt op GNSS niveau, men spreekt dan van DGNSS (11). Er worden minimaal twee GPS ontvangers gebruikt. Voor één van deze ontvangers moet de preciese positie gekend zijn, dit noemen we de basis ontvanger (30; 31). De twee stations moeten zich dicht bij elkaar bevinden (afstand kleiner dan 10 km) (4). De basis ontvanger gaat data (bv zijn positie bepaald aan de hand van satellieten) verzenden over een radio link naar het tweede station. Dit tweede station kan in beweging zijn, dit is echter geen voorwaarde. Het tweede station berekent zijn positie aan de hand van de data die hij ontvangt van de satellieten, maar ook van de data die hij krijgt via de radio link van het basis station (31). Dit is een veel gebruikte manier om satelliet- en klokfouten te elimineren. Een nadeel van deze techniek is dat de observaties van beide stations simultaan moeten gebeuren (30). Deze techniek geeft meestal een resultaat op 1m nauwkeurig (31). Deze metingen gebeuren aan de hand van de pseudo range data. Ze worden niet real-time gemaakt (20).

**Real-Time Kinematic** Real-Time Kinematic wordt afgekort als RTK. RTK is een speciale vorm van DGPS dat ongeveer centimeter nauwkeurigheid aanbiedt. Indien je, door gebruik te maken van dit algoritme, de positie wilt bepalen, moeten er minimaal vijf satellieten zichtbaar zijn. Anders werkt het niet, of even traag als DGPS in vele toepassingen (31). Bij RTK wordt de positie berekend door te werken met de CP dit is de fase van de draaggolf (32). De CP is de meer nauwkeurigere versie van de pseudo range. De draaggolf heeft normaal een constante frequentie. Maar de ontvangen draaggolf heeft een veranderende frequentie door de beweging van de satelliet en de ontvanger, er gaat een Doppler effect optreden. Voor nauwkeurige positie bepaling worden de metingen die door één ontvanger gemaakt worden gecombineerd met de metingen van een tweede ontvanger die simultaan gemaakt worden (20). Het referentie station of ook wel het basis station genoemd, gaat de CP en de pseudo range metingen van de zichtbare satellieten bepalen. Deze worden via een datalink naar de andere stations gestuurd (4). Deze werking wordt verduidelijkt in figuur 2.3.

In een RTK systeem gaan zowel het basis station en het bewegende station bestaan uit een single - of dual GPS ontvanger, de geassocieerde antenne en een data radio. Typisch gebruiken gebruikers identieke GPS ontvangers en data radios bij beide stations (20). RTCM berichten (dit wordt verder besproken in sectie 2.4.2) 18 tot 21 bevatten de meeste data die nodig zijn voor een succesvol RTK systeem (4).

**Precise Point Positioning** Precise Point Positioning of PPP is een techniek die werkt met één ontvanger en is zeer efficiënt. (22). De PPP techniek wordt steeds belangrijker in hoge precisie positie toepassingen (14). PPP is momenteel gebaseerd op enkel GPS observaties. De nauwkeurigheid, beschikbaarheid en betrouwbaarheid zijn sterk afhankelijk van het aantal zichtbare satellieten. Deze is vaak onvoldoende op bepaalde plaatsen. De nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid kan beïnvloed worden door slechte satelliet geometrie. Een mogelijke manier om de beschikbaarheid van satellieten te doen stijgen is om GPS en GLONASS resultaten te integreren. Daar wordt momenteel veel onderzoek naar gedaan (33). In post-processing kan centimeter level nauwkeurigheid bereikt worden. Voor kinematische toepassingen wordt decimeter level nauwkeurigheid bereikt (26).

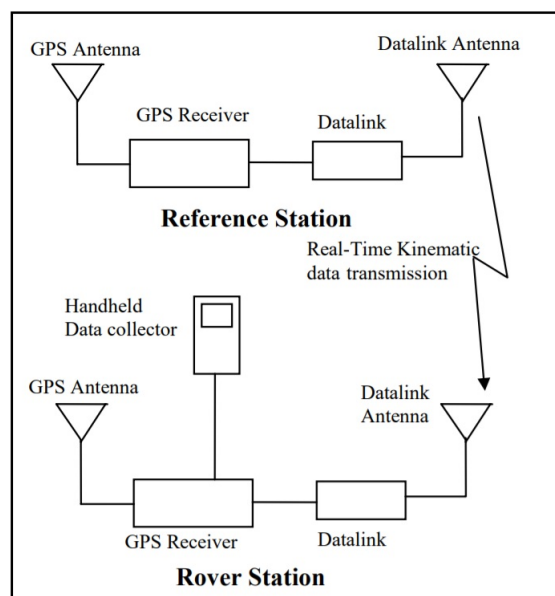
### 2.2.2 GLONASS

GLONASS is één van de langst gebruikte systemen binnen GNSS. Het is ontwikkeld door Rusland (29). GLONASS is een afkorting, het staat voor GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema of in het Engels: GLObal NAVigation Satellite System (34; 11). GLONASS heeft veel gemeenschappelijk met GPS, met name de opbouw van de constellatie, de banen van de satellieten en signaal structuur. Eén van de grootste verschillen tussen GLONASS en GPS is het referentie systeem waarin de coördinaten geleverd worden (11). Het GLONASS systeem is opgebouwd uit vier elementen (29):

- constellatie van GLONASS satellieten
- Controle segment op de grond
- Rakket/ruimte complex
- Gebruikers

Het systeem wordt continu gemoderniseerd (22). GLONASS-M satellieten vormen een tweede generatie van satellieten die gebruikt worden (18). De M staat voor Modified (aangepast). Deze satellieten werden in gebruik genomen in 2003 (33). Deze tweede generatie heeft de volgende voordelen (35; 33):

- Langere gegarandeerde levensduur (zeven jaar in plaats van drie)
- Maakt gebruik van L2 signalen
- Stabieler klok
- Extra beschikbare navigatie data (zoals betere integriteitscontrole, informatie over absolute tijd beschikbaarheid van de satelliet nummer)



**Figuur 2.3:** Schematische weergave van een RTK systeem (4)

- inter-satelliet radio link
- Betere zonnepanelen positionering
- Lager kans op onvoorspelde versnellingen

Door deze tweede generatie GLONASS satellieten zijn er nieuwe mogelijkheden voor satelliet navigatie. GLONASS is een betrouwbaar systeem, voornamelijk voor Real-Time Kinematic (RTK) toepassingen in omgevingen met slechte zichtbaarheid (35). Voor de werking van het navigatie satelliet systeem is het belangrijk dat alle processen die plaats vinden tijdens de werking gesynchroniseerd zijn. GLONASS-K satellieten vormen de derde generatie. De grootste veranderingen ten opzichte van GLONASS M zijn (29):

- Het gebruik van een derde frequentie om betrouwbaarheid en nauwkeurigheid voor gebruikersnavigatie te vergroten.
- De levensduur van de satelliet is vergroot tot 10 jaar
- Het gewicht van de satelliet is gehalveerd

Deze satellieten zijn vanaf 2008 in gebruik genomen (33).

### Opbouw GLONASS constellatie

De constellatie is opgebouwd uit 24 satellieten (22). De satellieten bevinden zich op bijna circulaire banen met een straal die net iets kleiner is dan 20 000 km. Deze satellieten bevinden zich in het MEO gebied (13). De satellieten zijn geplaatst in drie orbitale vlakken met een onderlinge afstand van 120 graden (29; 19; 11). Per vlak zijn er acht satellieten geplaatst. De periode per satelliet voor één omwenteling rond de aarde is 11 uur en 15 minuten (19). Het systeem heeft zijn FOC bereikt in januari 1996 (35). Het systeem is volledig gereviseerd en is volledig operationeel (22). Een grafische weergave van de GLONASS constellatie is te zien in figuur 2.4.



**Figuur 2.4:** GLONASS constellatie (5)

## GLONASS signalen

Terwijl bij GPS de signalen modulaties zijn van de draaggolven L1 en L2 voor alle satellieten, zijn bij GLONASS de frequenties van de draaggolf afhankelijk van het uitzendende kanaal. Er zijn 12 kanalen voor 24 satellieten (27). GLONASS maakt ook gebruik van de derde L5 frequentie. Deze wordt gebruikt door de GLONASS-K satellieten (28).

### 2.2.3 Galileo

Galileo is het Europees systeem (15; 22). Het doel van Galileo is het aanbieden van een flexibelere en nauwkeurige positionerings service (22). Bij de ontwikkeling van het systeem is gespecificeert dat het stand-alone bruikbaar moet zijn, maar dat het eveneens moet kunnen samen werken met andere diensten zoals GPS. Het moet goede positie- en tijds-diensten leveren (36). De kostprijs wordt geschat tussen 2,2 en 2,9 miljard euro. De financiering komt van een gedeelde publieke en private vennootschap (11). Galileo is ontworpen om Europa te voorzien van dezelfde GNSS capaciteit als dat van GPS (19). De architectuur van Galileo specificeert een globaal integriteits-concept. Dit wilt zeggen dat de nauwkeurigheid en de integriteit van de werking altijd wereldwijd bereikt moet worden en binnen de drempelwaarden moet blijven. Het Galileo systeem voorziet verschillende gebruikersdiensten. Eén van deze diensten is de Safety of Life service, dit is een groot voordeel van Galileo in vergelijking met GPS. In geval van een systeem fout moet de gebruiker binnen de zes seconden gewaarschuwd worden (37). Een uniek aspect van de satellieten die bij Galileo worden gebruikt is dat deze uitgerust zijn met een passieve waterstof maser. Dit zorgt voor een uitzonderlijke klok stabiliteit. Dit levert veel voordelen voor real-time navigatie, ppp en andere wetenschappelijke toepassingen (28).

### Opbouw Galileo constellatie

Tijdens het ontwikkelen van de opbouw van de constellatie is er geconcentreerd op twee opties. De eerste maakt gebruik van MEO satellieten. De andere maakt gebruik van een mengeling tussen MEO en GEO satellieten. De nadruk ligt op het leveren van hoge kwaliteit diensten. Dit met name in Europa en de noordelijke regio's. Omdat de constellatie gebruikt wordt voor commerciële- en veiligheidstoepassingen, is het ontwikkeld om zeer robuust te zijn en toch economisch verantwoord. De constellatie die uiteindelijk gekozen is, is deze met de MEO satellieten (36). De volledige constellatie zal bestaan uit 30 satellieten in drie orbitale vlakken. Het systeem is momenteel nog onder constructie (22). De periode van een tocht om de aarde is 14 uur en 21 minuten. Er zijn 10 satellieten per vlak (19). De straal van de baan is 23223 km. De satellieten zelf zijn van een gemiddelde grootte. Eens ze in hun baan zijn, wegen ze 650 kg en genereren een vermogen van 1500 Watt (36). In de constellatie zijn eveneens vier In Orbit Validation (IOV) satellieten geplaatst (38; 14). Deze satellieten ondersteunen testen en experimenten maar zijn nog niet goedgekeurd (28). Figuur 2.5 toont een grafische weergave van de constellatie.

### Galileo signalen

Galileo zendt open signalen uit met een CP van 1575.42 MHz (E1), 1175.45 MHz (E5a), 1207.14 MHz (E5b) en 1195.795 MHz (E5a+b). Verder wordt voor commerciële doeleinden een frequentie van 1278.75MHz (E6) gebruikt. Zoals uit de gegeven waarden afgeleid kan worden, delen Galileo



**Figuur 2.5:** Galileo constellatie (6)

en GPS de L1/e1 en L5/E5a draaggolf (14). Doordat Galileo signalen beschikbaar stelt in verschillende frequentiebanden, kunnen lineaire combinaties van verschillende signalen gebruikt worden (39). De toegang tot de E6 signalen is nog niet volledig gedefinieerd. Gebruikers kunnen vij toegang krijgen tot de signalen met geavanceerde multipad performantie in de E1 en E5a/E5b banden (28).

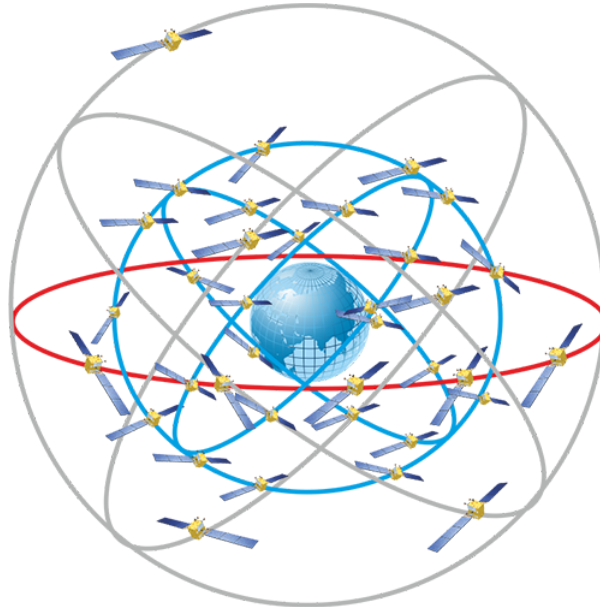
#### **2.2.4 BeiDou**

BeiDou is het satelliet systeem binnen GNSS dat ontwikkeld is in China. Het systeem wordt vaak aangeduid met de afkorting BDS (34). De ontwikkeling van dit systeem volgt een drie stappen strategie. Dit zijn: demonstratie van het systeem, het regionale systeem en als laatste het globale systeem (25). Het voorziet PNT (Positioning, Navigation and Timing) services in de Aziatisch-Pacifische regio. Momenteel is BDS beschikbaar voor regionale diensten. Hiervoor werd de werking in 2012 aangekondigd. De diensten leveren een goede nauwkeurigheid aan zijn gebruikers (34; 28). In 2020 zullen BDS signalen beschikbaar worden voor wereldwijde gebruikers. Ondertussen worden steeds meer stations uitgebreid met BDS ontvangers voor hoog-precisie GNSS toepassingen (34). De nauwkeurigheid van DGNSS met BeiDou signalen is van hetzelfde niveau als dat van DGPS. BeiDou zorgt voor een goede geometrische dekking in de Aziatisch Pacifische regio. Het aantal zichtbare satellieten is groter dan zeven (25).

#### **Opbouw constellatie**

De volledige constellatie telt 35 satellieten. Het zal volledig zijn tegen het einde van 2020 (22). De constellatie van BeiDou is interessant omdat het verschilt van de andere reeds bestaande GNSS constellaties (38). De constellatie bestaat momenteel uit 5 GEO satellieten, 5 IGSO satellieten verdeeld over 2 banen en 4 MEO satellieten in een baan met 27 878km als straal (17). De constellatie, opgebouwd uit die 14 satellieten, heeft zijn FOC bereikt in 2012 (25). De geometrie van

de satellietbanen en hun dekking is symmetrisch ten op zichte van de evenaar (40). De volgende stap in de ontwikkeling van de constellatie is het verder uitwerken van het MEO gedeelte (14). De opbouw van de constellatie wordt weergegeven in figuur 2.6.



**Figuur 2.6:** BeiDou constellatie (7)

## Signalen

BeiDou stuurt signalen uit in drie frequenties: 1561.098 MHz (B1), 1207.14 Mhz (B2) en 1268.52 MHz (B3). Zoals afgeleid kan worden uit de gegeven waarden, delen Galileo en BeiDou de B2/E5b draaggolf (14; 25). Deze drie signalen kunnen door een groot deel van multi-GNSS ontvangers ontvangen worden (28). Het BeiDou systeem maakt gebruik van twee verschillende soorten navigatie berichten. Deze worden verzonden door de MEO/IGSO en GEO satellieten. Alle berichten zijn gebaseerd op 30-bit woorden en subframes met een lengte van 10 woorden (40).

### 2.2.5 Multi-GNSS

Eens de vier systemen volledig ingezet zijn, zijn er meer dan 100 satellieten beschikbaar voor nauwkeurige PNT toepassingen. Door het opkomen van de twee nieuwere systemen (Galileo besproken in sectie 2.2.3 en BeiDou besproken in sectie 2.2.4) en het voortdurend moderniseren van GPS, besproken in sectie 2.2.1 en GLONASS, besproken in sectie 2.2.2 is de wereld van satelliet navigatie onderhevig aan veranderingen (22). Momenteel loopt er een Multi-GNSS experiment (MGEX) dat data verzamelt van GPS, GLONASS, Galileo en BeiDou. De samenvoeging van multi-GNSS vergroot het aantal satellieten en bijgevolg wordt de geometrische observatie geoptimaliseerd (41). MGEX dient als een kader voor het verhogen van het algehele bewustzijn van multi-GNSS binnen de wetenschappelijke- en ingenieursgemeenschappen. Eveneens gaan ze IGS deelnemers (centra die gebruik maken van GNSS data en lid zijn vna het IGS) vertrouwd maken met de nieuwe satelliet navigatie systemen. Als een minimum moeten alle MGEX stations GPS volgen en Galileo of BeiDou. GLONASS wordt door het grootste deel van de systemen gevolgd (28).

De multiple-GNSS observaties met meerdere frequenties voorzien de onderzoekers van meerdere kansen om de aardse ionosferische variaties en gedragingen te onderzoeken. GNSS observaties kunnen gebruikt worden om ionosferische traagheids correcties en gerelateerd wetenschappelijk onderzoek (34). Door het gemeenschappelijk gebruik van draaggolven tussen de verschillende systemen, is het gemakkelijker om de systemen samen te gebruiken (14). De aanwezigheid van multipad signalen resulteert in variaties en CP fouten (39).

## 2.3 EUREF Permanent Network

Het EUREF Permanent GNSS Network wordt ook wel EPN genoemd (42; 43; 44). Het netwerk is gebaseerd op een relatie tussen site operatoren van permanente GNSS sites, die bereid zijn om hun data met het publiek te delen. Het EPN werkt nauw samen met het IGS (42). Het netwerk is ontstaan in 1995 met ongeveer 30 permanente stations en vier analyse centra (45). Het EPN is momenteel opgebouwd uit 321 permanente GPS stations waarvan er ook GLONASS satellieten volgen. Alle EPN stations moeten L1 en L2 GPS signalen volgen, maar indien het mogelijk is, moeten ze ook het nieuwe L5 signaal volgen (46). Het grootste deel van de stations die opgenomen zijn in het EPN vormen eveneens een onderdeel van het IGS. Het primaire doel van EPN is het European Terrestrial Reference Systems (ETRS89) onderhouden. Dit gebeurt door de leden op vrijwillige basis (44; 43). Door de sterke groei van het EPN zijn er opportuniteiten ontstaan om het netwerk te gebruiken buiten zijn initiële doelen (45). Een doel van het netwerk is het beschikbaar stellen van GNSS data en precise coördinaten van GNSS stations beschikbaar stellen aan het publiek. Nieuwe stations worden aan het netwerk toegevoegd zodra ze voldoen aan alle vereisten. Het EPN werkt met drie datacenters die gedefinieerd worden als regionale datacenters (RDC). Het Federal Agency for Cartography and Geodesy van Duitsland (BKG) en het Bundesamt fuer Eich- und Vermessungswesen Vienna (BEV) datacenters, zijn verantwoordelijk voor de dagelijkse zaken. Alle EPN stations gaan op vooraf gedefinieerde wegen hun data op regelmatige basis doorsturen naar het BKG en het OLG (43). Het datacenter Royal Observatory of Belgium (ROB) doet dienst als datacenter van het centrale bureau van het EPN. Dit datacenter is verantwoordelijk voor het hosten van alle historische EPN RINEX data (Dit wordt verder besproken in sectie 2.4.1) met gecorrigeerde meta-data en 1 regionale broadcaster. (43; 42). Het coördineren van tijd analyse is eveneens een doel van het EPN. Dit om het EPN te versterken als geodetisch referentie netwerk. Van de nieuwe geïnstalleerde antennes is 90 procent een multi-GNSS antenne. Hiervan is 75 procent ontworpen om GNSS en GLONASS te observeren, 25 procent van de EPN antennes is bovendien ook klaar om Galileo te ontvangen. Het netwerk is dus continu onder constructie. (42). Een station kan officieel erkend worden als een EUREF station als (11):

- Het station geïnstalleerd is volgens de IGS standaard
- De log file van het station beschikbaar is op het EPN centraal bureau
- De data van het station beschikbaar is voor de EUREF gemeenschap
- De data van het station regelmatig geanalyseerd wordt door een van de EUREF analyse centra.

Om de installatie van EPN stations in dun bezette gebieden te promoten, is er een nieuwe regel in gebruik gesteld in verband met de locatie van het nieuwe station. Er moet een minimale afstand van 300 km zijn met een reeds bestaand EPN station. Een mogelijke uitzondering op deze regel is

dat als het station in staat is om uurlijks data te leveren en bijdraagt tot het EPN Special Projects, het wel mag toetreden. Dankzij deze nieuwe regel, sturen 45 % van de stations uurlijks data (47). Binnen het EPN wordt de overschakeling naar een nieuwe set van antenne calibraties simultaan met het IGS gemaakt. Het grootste verschil met het IGS is dat binnen het EPN de individuele ontvanger antenne calibraties online beschikbaar zijn (46).

### 2.3.1 Management en Coördinatie

De activiteiten binnen het EPN worden sinds het ontstaan van het EPN in 1998 gecoördineerd en gestuurd door het EUREF Technical Working Group (EUREF TWG). Nu wordt dit gedaan door het EUREF Governing Board. Een netwerk coördinator zorgde voor het dagelijks management van het netwerk. Door de groei van het netwerk en ook het takenpakket, heeft een reorganisatie plaatsgevonden. Er zijn momenteel drie eenheden die instaan voor de coördinatie van het netwerk. Namelijk de EPN coordination groep, het EPN central bureau en de EPN special projects (47). De EPN coordination group is als volgt samen gesteld (48):

**Netwerk Coördinator** Carine Bruyninx, Royal Observatory of Belgium

**Analyse Coördinator** Tomek Liwosz, Warsaw University of Technology and Military University of Technology

**Referentierame Coördinator** Juliette Legrand, Royal Observatory of Belgium

**Troposfeer Coördinator** Rosa Pacione, Italian Space Agency

## 2.4 Communicatie

Er zijn verschillende manieren om GNSS data uit te wisselen. Hier gaat in het praktische gedeelte van de masterproef aan gewerkt wordt. Een manier om GNSS data uit te wisselen is RINEX, deze wordt besproken in sectie 2.4.1. Dit data formaat is niet beschikbaar voor real-time data transmissie. Om wel aan real-time transmissie te kunnen doen moeten er drie componenten aanwezig zijn. Het eerste is het transmissie protocol dat instaat voor de levering van de data over een netwerk en dat eveneens controle mechanismen voorziet. Het data formaat is de tweede component, dit is een overeenkomst om de uitgezonden bit sequentie te kunnen vertalen naar zinvolle informatie. De laatste component is de data communicatie link die instaat voor de manier waarop data van de ene naar de andere partij getransporteerd wordt. Er zijn twee standaard protocols om GNSS data over het internet te verdelen. Het eerste is RTCM, dit wordt verder besproken in sectie 2.4.2. De tweede mogelijkheid is Real-Time IGS (RTIGS) (49) en wordt verder niet besproken in deze literatuurstudie. Dit omdat het tijdens het verder verloop van de masterproef niet behandeld wordt. Standaardisatie van dataformaten is een belangrijk aspect voor management, analyse en uitwisseling van GNSS data (50). De modernisatie van de constellaties zorgt voor verscheidene nieuwe signalen en toepassingen. Deze nieuwe signalen vormen een uitdaging en hebben een impact op verscheidene toepassingen. Hieronder volgt de manier waarop ze doorgestuurd worden (51).

### 2.4.1 RINEX dataformaat

RINEX is een afkorting voor Receiver INdependent EXchange. Het is reeds in gebruik sinds het begin van GPS toepassingen. Het wisselt GPS data uit in een ASCII bestandsformaat voor weten-



schappelijke en geodetische toepassingen (49). Dit garandeert een gemakkelijke uitwisseling tussen verschillende computersystemen, maar het gebruik van RINEX data bestanden is niet zo eenvoudig aangezien het geavanceerde algoritmen en computercodes nodig heeft. Deze zijn meestal gepatenteerd of enkel beschikbaar voor de personen die deel uit maken van een internationaal netwerk van GPS ontvangers (23). RINEX is een internationale standaard. Typisch worden uurlijkse of dagelijkse data gearchiveerd in het RINEX bestandsformaat en wordt de data beschikbaar door een FTP server om te downloaden. Er zijn verschillende toepassingen die een post-processing methode gebruiken. RINEX is strikt bestand gebaseerd en is niet beschikbaar voor real-time data transmissie (49). Dit formaat is oorspronkelijk ontworpen voor de data van GPS. Later is dit uitgebreid naar GLONASS zonder de basis structuur van het formaat aan te passen (50). De RINEX data afkomstig van GPS ontvangers bevat hoofdzakelijk (23):

- C1: C/A code pseudo range in meters op L1 frequentie
- P2: P code pseudo range in meters op L2 frequentie
- L1: L1 CP in cycles op L1 frequentie
- L2: L2 CP in cycles op L2 frequentie

Er zijn momenteel drie verschillende RINEX versies. Namelijk versie 1, 2 en 3.00. RINEX versie 2 wordt veel gebruikt in de geodetische gemeenschap, ook door het IGS. RINEX versie 2 is niet in staat om alle huidige beschikbare datatypes afkomstig van L2 ontvangers te ondersteunen. Een grote herziening van het RINEX formaat levert versie 3.00. Men verwacht dat versie 3.00 de nieuwe standaard versie van het IGS zal worden. Een groot nadeel van het RINEX formaat is dat de bestandsgrootte van de observatie bestanden groot worden. Hierdoor zijn er compacte RINEX formaten versies gemaakt. Deze worden aangeduid met de namen 1.0 en 3.0. Compact RINEX formaat 1.0 is een compressie formaat dat compatibel is met RINEX versie 2. Het compacte RINEX 3.0 formaat is compatibel met RINEX 3.00. Naar verwachtingen is RINEX 3.00 compatibel met alle nieuwe niet gecomprimeerde versies van RINEX zolang de structuur van de RINEX bestanden ongewijzigd blijft. De compacte RINEX formaten zijn compatibel met RINEX observatie data bestanden, niet voor navigatie berichten of meteorologische data bestanden (50). De laatste versie van RINEX is 3.03. De opbouw van een RINEX bestand wordt weergegeven in tabel 2.1.

**Tabel 2.1:** Vereenvoudigde samenstelling van een RINEX bestand

RINEX hoofding
...
epoch hoofding
observaties satelliet i
observaties satelliet j
... andere satellieten ...
epoch hoofding
observaties satelliet i
observaties satelliet j
... andere satellieten ...
... andere epochs ...

## Strategiën voor kwaliteitscontrole

Er zijn verscheidene manieren om na te gaan of een RINEX bestand voldoet aan een aantal vereisten. Het eerste is een filter. Er wordt nagegaan of het bestand de nodige onderdelen bevat. Zo wordt bijvoorbeeld getest of de RINEX hoofding aanwezig is en de nodige lijnen bevat. Eveneens wordt getest of het geen corrupt bestand is. Een volgende methode is om de bestanden te gaan vergelijken met een IGS nauwkeurige bron. Het nadeel hiervan is dat er zo een bron beschikbaar moet zijn (52).

### 2.4.2 RTCM dataformaat

RTCM staat voor Radio Technical Commission for Maritime Services (35). De sterke vraag voor real-time DPGS heeft geleid tot de oprichting van het Special Comite 104 (afgekort tot SC104) (49). RTCM is het standaard formaat gebruikt voor RTK en DPGS correctie data. Het is momenteel het formaat dat het meest gebruikt wordt (20). Momenteel zijn meerdere internationale standaarden voor RTCM (49), deze worden verder besproken. RTCM data wordt verzonden als een continue binaire datastroom. Typisch wordt een volledig RTCM data record verstuurd binnen een seconde. RTCM comprimeert de verschillende onderdelen van een record in verschillende berichttypes. Een overzicht hiervan is te zien in tabel 2.2 (53).

**Tabel 2.2:** RTCM record, verdeeld in verschillende berichttypes

Bericht 1
Bericht 2
...
Bericht n

Elk bericht binnen een data record bevat een hoofding en een berichtinhoud. Dit wordt verduidelijkt in tabel 2.3 (53).

**Tabel 2.3:** RTCM bericht, verdeeld in hoofding en bericht

Bericht - Hoofding
Bericht - Inhoud

Het berichttype, de tijdsinformatie, de ID van het referentiestation, de lengte van het bericht en andere informatie zoals monitoring status zitten omvat in de hoofding. De inhoud bevat de relevante werkingsdata voor elk data type. De lengte van het bericht is afhankelijk van het data type. De hoofding en de inhoud worden beschermd door pariteitbits. Zo kunnen fouten relatief gemakkelijk gedetecteerd worden. Een RTCM data record hoeft niet alle berichttypes te bevatten. Sommige berichten moeten elke seconde verstuurd worden. Andere worden automatisch verzonden op een gewenst interval. Als een datarecord korter is dan het zendinterval, zal geen andere data verzonden worden in de reserende tijd. Omdat de data real-time verzonden wordt, moet er bij een fout in het record gewacht worden op het volgende record. Er is geen tijd om het onjuiste record nog een keer te verzenden (53).

## RTCM - 2.0

RTCM versie 2.0 is belangrijk voor DPGS toepassingen. Het wordt gebruikt sinds 1990. Het bevat alle nodige informatie om correctie data en andere informatie te sturen voor DPGS toepassingen. Er zijn nieuwe berichttypes speciaal voorzien voor DPGS toepassingen. Deze worden weergegeven in tabel 2.4 (53).

**Tabel 2.4:** RTCM-2.0 berichttypes relevant voor DGPS

Type	Inhoud	Frequentie
1	Differentiële correcties voor code observaties	In elk record, typisch elke seconde
2	Delta correcties	Automatisch bij elke verandering in satellietbaan, voor elke uursverandering
3	Coördinaten van het referentiestation	Indien nodig, typisch in intervallen van een minuut
16	Elke gewenste alfanumerische tekst (bv de naam en telefoonnummer van het referentie station)	Indien nodig
59	Gebruiker gedefinieerd berichttype	Indien nodig

De DPGS nauwkeurigheid die je kan bereiken met RTCM 2.0 bedraagt 1 meter. Er zijn ook nog andere nieuwe berichttypes in vergelijking met de eerste versie van RTCM. Deze versie bevat geen CP informatie dus geen RTK toepassingen zijn mogelijk. Een volledig RTCM 2.0 record bevat ongeveer 1200 bits (53).

## RTCM - 2.1

Deze versie is in gebruik sinds 1993. De volledige inhoud van RTCM 2.0 blijft behouden bij deze versie (53). RTCM versie 2.1 bevat vier berichttypes die specifiek voor RTK data transmissie zijn. Berichttype 18 en 19 bevatten ruwe informatie over de CP en berichttypes 20 en 21 zijn voorzien voor de transmissie van de CP en de pseudorange correcties (4). Een beperking is de nodige snelheid waarmee de data verzonden moet worden om de CP correcties van het basisstation naar het mobiele station te brengen. Bij RTCM 2.1 is een dataframe van meer dan 4800 bits nodig voor alle zichtbare satellieten. De meeste toepassingen willen elke seconde een update. Dit zorgt ervoor dat er een zeer hoge frequentie nodig is om alle informatie te verzenden (54).

## RTCM - 2.2

Versie 2.2 is de nieuwe standaard sinds 1998. In vergelijking met versie 2.1 omvat deze versie een paar uitbereidingen, zodat data afkomstig van GLONASS satellieten ook verwerkt en opgeslagen kan worden. Differentiële GLONASS correcties worden opgeslagen in berichttype 31. Dit is op dezelfde manier opgebouwd als berichttype 1 voor DGPS data. Omdat berichttypes 18 tot 21 nu ook GLONASS data moeten kunnen verwerken, zijn ze niet langer compatibel met versie 2.1.

## RTCM - 2.3

RTCM versie 2.3 is voor het eerst gepubliceerd in 2001. Voor geodetische toepassingen zijn de definities van antenntypes en antenne referentiepunten interessant. Berichttypen 18 tot en met 21 zijn compatibel met versie 2.2 (53).

### RTCM - 3.0

Er is een update gebeurd naar versie 3.0. Deze versie is ontwikkeld om RTK operaties te verbeteren en netwerk RTK te ondersteunen. Alle RTCM 3.0 berichten beginnen met een 8-bit vaste sequentie, dit is de preamble. Deze wordt gevolgd door 6 gereserveerde bits. Elke berichtlengte is variabel en is afhankelijk van het berichttype. Een overzicht van de structuur van een RTCM versie 3 bericht is terug te vinden in tabel 2.5.

**Tabel 2.5:** RTCM versie 3 frame structuur

Preamble	Gereserveerd	Bericht lengte	Variabele lengte data bericht	CRC
8 bits	6 bits	10 bits	Variabele lengte, geheel aantal bytes	24 bits

RTCM versie 3.0 is momenteel het meest populaire formaat (49). De grootte van de berichten en de verpakkingsoverhead maakt dat dit formaat voor vele commerciële toepassingen niet efficiënt genoeg is (4).

### RTCM - 3.1

De aanpassingen die gemaakt zijn ten op zichte van versie 3.0 hebben te maken met gegevens in verband met de satellietbanen. Verder beschikt 3.1 ook over een betere bericht beschrijving. Er is eveneens een mogelijkheid om PPP gegevens te verzenden via RTCM - 3.1.

### RTCM - 3.2

Met RTCM versie 3.2 is het mogelijk om gegevens in verband met satellietbanen van Galileo te versturen.

### RTCM - 3.3

Met de laatste versie van RTCM kunnen gegevens over de BeiDou constellatie verzonden worden.

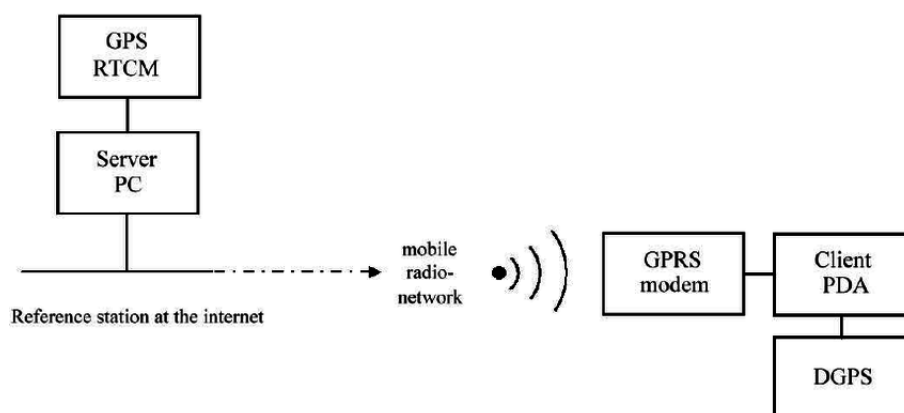
### RTCM++

Het RTCM++ formaat is ontwikkeld in 1993. Dit om de tekorten van RTCM versie 2.1 op te vangen, voornamelijk de nauwkeurigheid en het volume van de verzonden data. Aangezien de inhoud van RTCM++ data indientiek is aan RTCM 2.1 correctie data, is minimaal de zelfde nauwkeurigheid van 1 cm haalbaar (53). RTCM++ is een compact dataformaat voor de CP correcties. De complete dataset voor alle zichtbare satellieten bedraagt maximaal 2400 bits, dit in vergelijking met de 4800 bits bij RTCM 2.1 een betere optie omdat de frequentie waarmee de data moet worden verzonden niet zo hoog moet zijn (54). RTCM++ wordt niet gebruikt.

### 2.4.3 NTRIP

Networked Transport of RTCM via Internet Protocol of kortweg NTRIP (10; 55). NTRIP is een protocol ontwikkeld in 2004 (55) als een project onder EUREF (9). Men maakt gebruik van het internet om de realtime GNSS data uit te wisselen en te verzamelen. NTRIP is een HTTP(Hypertext

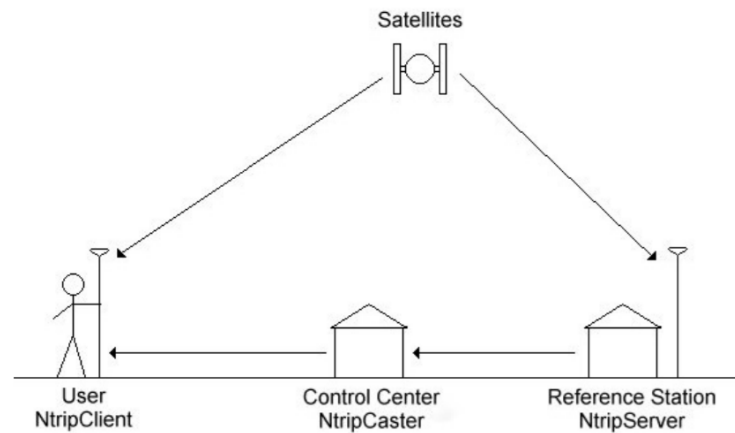
Transfer Protocol) stateless applicatie level protocol om GNSS te streamen over het internet (10). NTRIP is de interface die gebruikt wordt voor MGEX toepassingen (28). De toepassing die men in gedachte had bij het ontwerpen van het protocol is het doorsturen van RTCM data, maar het protocol kan gebruikt worden om GNSS data in eender welk formaat door te sturen. De enige beperking is een maximum snelheid van 10 kb/s en een minimum van 100b/s (55). Het doel is om real-time data uit te wisselen, maar ook om afgeleide producten te broadcasten, voornamelijk DGPS (8). De nodige breedte hiervoor is niet groot in vergelijking met bijvoorbeeld Internet Radio (10). Hierdoor wordt de NTRIP techniek een alternatief voor het verzenden van DGPS data tegenover andere wereldwijde broadcasting technieken. Het internet is uitermate goed geschikt om data door te sturen tussen verschillende providers over een grote afstand (8). Het is gebaseerd op software die oorspronkelijk bedoeld was voor MP3-formaten. Dit blijkt wel aangepast te zijn voor GNSS stromen met data snelheden tussen 0.5 en 5 kbit/s. (24). Een ander voordeel is dat tegenwoordig op veel plaatsen internet verbinding voorzien is (10). Verder is er ook geen vermindering van de positie voorstelling door gebruik te maken van NTRIP. Een ander groot voordeel is dat datastromen van referentie stations simultaan beschikbaar worden via één communicatie techniek. Men moet er wel rekening mee houden dat de nodige servers moeten verbonden worden aan het internet via intergeconnecteerde broadcasters met een voldoende grote bandbreedte. De generatie van DGPS correctie data wordt meestal direct op de GPS ontvanger gedaan, maar hij kan eveneens bepaald worden van observaties die verkregen worden door verschillende referentie stations in het netwerk. De datastroom wordt dan doorgegeven aan een server die de datastroom vervolgens beschikbaar stelt over het internet via een geschikt protocol (8). Het gevolgde pad van de data wordt weergegeven in figuur 2.7.



**Figuur 2.7:** RTCM data stroom op het internet (8)

## Communicatie

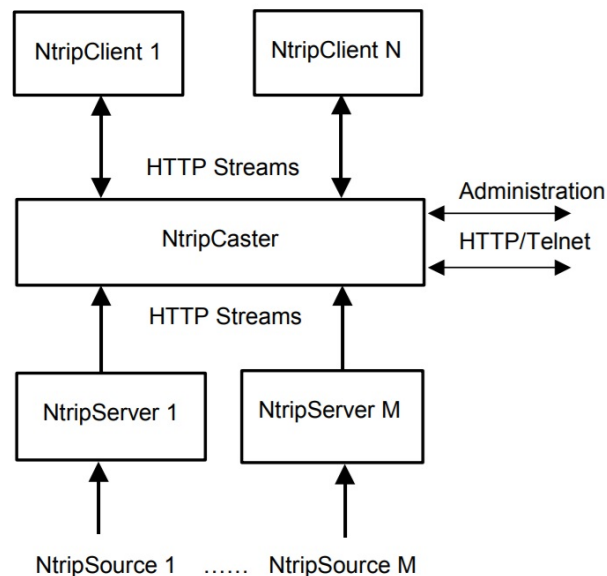
Figuur 2.8 toont hoe NTRIP communicatie werkt. De gebruiker, dit is de NTRIPClient ontvangt de correctie data van het controle centrum via het internet. De data wordt in NTRIP formaat over het internet verzonden. De communicatie tussen het controle center (NTRIPCaster) en het referentiestation (NTRIPServer) gebeuren via NTRIP. Zowel gebruikers als referentiestationen ontvangen satelliet data. De correctievoorziening is verantwoordelijk voor de NTRIPCaster in het controle centrum (9). De afstand tussen het referentie station en de client met het verbonden station is opgedeeld in twee delen. Het grootste deel van de afstand bestaat uit een bedrade internet verbinding. Het overige deel wordt overbrugd door mobiele telefonie technologie (8).



**Figuur 2.8:** Schematisch overzicht NTRIP communicatie (9)

### Opbouw van NTRIP software

NTRIP wordt geïmplementeerd in vier grote componenten. Namelijk NTRIPSources, NTRIP-Clients, NTRIPServers en NTRIPCasters. De NTRIPCaster is het HTTP server programma terwijl NTRIPClients en NTRIPServers reageren zoals HTTP clients(10). In figuur 2.9 staat een overzicht van de opbouw van het NTRIP streaming systeem.



**Figuur 2.9:** NTRIP streaming systeem (10)

NTRIP is gebaseerd op een subset van het vaak gebruikte HTTP en is bijgevolg gebaseerd op TCP. Daaruit volgt dat het streamen gebeurt vanuit een enkele IP Poort. Meestal is dit poort 80 of 2101 (55).

**NTRIPCaster** NTRIPCasters gaan de administratie tussen clients en servers afhandelen (24). NTRIPCaster is een stream-splitser- en broadcaster- component. Momenteel zijn er acht NTRIPCasters in Europa (10). De NTRIPCasters gaan, zoals vaak gebeurt bij internet radio implementaties de binnenkomende datastromen dupliceren, zodat hij door meerdere gebruikers simultaan ontvangen kan worden (8). NTRIP omvat de voorziening van metadata door een Source Table die onderhouden wordt door de NTRIPCaster (55). Deze tabel bevat informatie over de NTRIPSources maar ook over de netwerken van sources en andere broadcasters. Elke NTRIPSource wordt geïdentificeerd door een uniek aanhechtingspunt. Alle verzonden berichten met NTRIP worden ofwel ontvangen door de NTRIPCaster of verzonden door de NTRIPCaster (9). EUREF bevat 3 NTRIPCasters. Hiervan staat er één in ROB.

**NTRIPSource** De NTRIPSources stellen de bronnen van de GNSS data voor. Deze worden gevoed aan het systeem. Een NTRIPSource kan een GNSS ontvanger zijn die observaties verstuurd. Een andere mogelijkheid is dat het een GNSS ontvanger is die DGPS correctie data gaat verzenden (55). NTRIPSource is een geografisch stationair punt dat een continue RTCM datastroom levert. De data wordt dan verzonden naar de NTRIPServer die de verdere transfer naar de NTRIPClient zal regelen (9).

**NTRIPServer** NTRIPServers gaan datastromen vervoeren (24). NTRIPServers ontvangt RTCM data van een NTRIPSource en gaat dit doorsturen naar een NTRIPCaster in NTRIP formaat. Om een NTRIPServer te installeren moet je het mountpunt en het wachtwoord kennen (9).

**NTRIPClient** NTRIPClients gaan data ontvangen van de gewenste bronnen via de NTRIPCaster (10). De NTRIPClient is de component die geïnstalleerd is in het toestel van de gebruiker dat GPS gaat ontvangen. Voor sommige technieken, zoals bij Virtueel Reference Station, moet de NTRIPClient in staat zijn om zijn positie door te sturen naar de NTRIPCaster. Deze mogelijkheid wordt bij NTRIP ondersteunt (9).

## **Hoofdstuk 3**

# **Reeds gerealiseerde elementen**

Dit hoofdstuk handelt de reeds gerealiseerde elementen.

Als eerste zijn de doelstelling en het situering uitgeschreven en besproken in hoofdstuk 1.

Als tweede is er theoretisch onderzoek gedaan naar satellieten, GNSS, EPN, RINEX, RTCM en NTRIP. Dit onderzoek is verwerkt en is terug te vinden in hoofdstuk 2.

Voor de rest is er momenteel nog niet veel gebeurd. Dit doordat er pas laat met het onderwerp begonnen is en momenteel de contracten met de Koninklijke Sterrenwacht nog niet op punt staan. Hierdoor kan de student daar nog niet praktisch aan de slag. Er wordt gepland dat dit tegen begin januari in orde is en de student dan kan beginnen. Hoofdstuk 4 beschrijft de verdere planning voor deze masterproef.

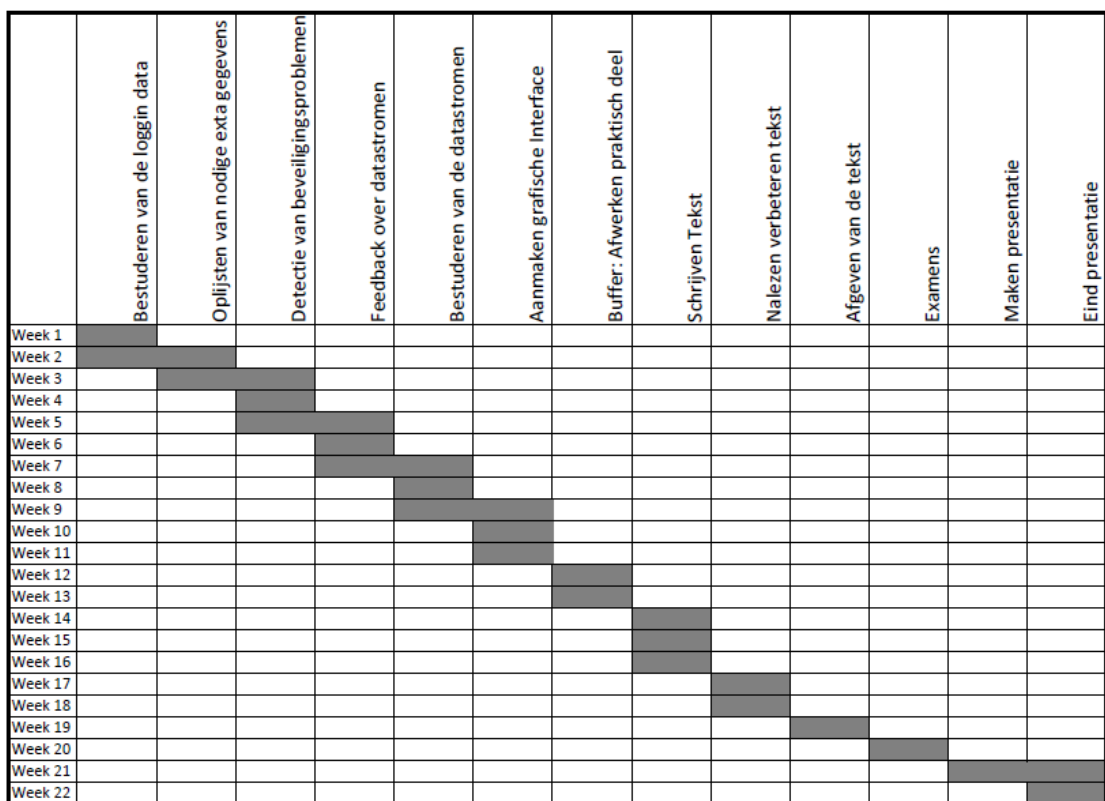


## Hoofdstuk 4

# Planning

Dit hoofdstuk is het laatste hoofdstuk van het tussentijds verslag. Het omschrijft de planning voor de komende maanden.

Figuur 4.1 toont een grafische weergave van de planning in de vorm van een Gantt kaart.



**Figuur 4.1:** Gantt Shart

Hierbij is week 1 de week van 15 tot en met 21 januari. Week 22 is de week van 24 juni. Naar schatting vallen daar ongeveer de masterproef verdedigingen. Er is een periode van drie weken voorzien om de tekst te schrijven. Natuurlijk is dit niet voldoende. De tekst wordt tussendoor ook geschreven. Deze drie weken is voor het afronden van de tekst.

# Bibliografie

- [1] K. S. van Belgie, "Koninklijke sterrenwacht - wetenschappelijke inlichtingen." online, April 2013.
- [2] A. Bogovic and d. D. Veberic, "Use if global postioning system as time reference in astrophysics experiments and its accuracy," diploma thesis, University of Nova Gorica, School of Applied Sciences, 2013.
- [3] J. Van Sickle, "The space segment." online, 2017.
- [4] D. N. C. Talbot, "Compact data transmission standard for high precision gps," *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, pp. 861 – 871, September 1996.
- [5] J. Moran, "Glonass constellation." online, June 2011.
- [6] ESA-P.Carril, "Galileo constellation." online, July 2004.
- [7] Information, N. Analysis Center for Positioning, and Timing, "Beidou orbital constellation." online, 2017.
- [8] G. Weber, D. Dettmering, and H. Gebhard, *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)*, pp. 60–64. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [9] M. Peterzon, "Distribution of gps-data via internet," diploma thesis, Lantmateriet, Gavle, 2004.
- [10] D. Dettmering and G. Weber, "The euref-ip ntrip broadcaster: Real-time gnss data for europe," tech. rep., Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), FRANKFURT Germany, 11 2017.
- [11] W. Lechner and S. Baumann, "Global navigation satellite systems," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 25, no. 1, pp. 67 – 85, 2000.
- [12] I. F. Akyildiz, E. Ekici, and M. D. Bender, "Mlsr: A novel routing algorithm for multilayered satellite ip networks," *IEEE/ACM Transactions of Networking*, vol. 10, pp. 411–424, June 2002.
- [13] C. Lucking, C. Colombo, and C. McInnes, "A passive satellite deorbiting strategy for medium earth orbit using solar radiation pressure and the j(2) effect," *Acta Astronautica*, vol. 77, pp. 197–206, 8 2012.
- [14] J. Tegedor, O. Ovstedal, and E. Vigen, "Precise orbit determination and point positioning using gps, glonass, galileo and beidou," *Journal of Geodetic Science*, vol. 4, pp. 65 – 73, 01 2014.
- [15] P.-A. Balland, "Proximity and the evolution of collaboration networks: Evidence from r&d projects within the gnss industry," *Regional Studies*, Jan 2011.

- [16] S. Jin, G. Feng, and S. Gleason, "Remote sensing using gnss signals: Current status and future directions," *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 10, pp. 1645 – 1653, 2011. GNSS Remote Sensing-2.
- [17] C. Han, Y. Yang, and Z. Cai, "Beidou navigation satellite system and its time scales," *Metrologia*, vol. 48, no. 4, pp. S213 – S218, 2011.
- [18] D. John M., N. R.E., and R. C., "The international gnss service in a changing landscape of global navigations satellite systems," *Springer - Verlag*, vol. 83, pp. 191 – 198, 2009.
- [19] A. Constantinescu and R. Landr, "Gps/galileo/glonass hybrid satellite constellation simulator - gps constellation validation and analysis," in *Proceedings of the 61st Annual Meeting of The Institute of Navigation*, (Royal Sonesta Hotel Cambridge, MA), pp. 733 – 744, June 2005.
- [20] R. B. Langley, "Rtk gps," *GPS World*, pp. 70 – 76, September 1998.
- [21] D. C. Agnew and K. M. Larson, "Finding the repeat times of the gps constellation," *GPS Solutions*, vol. 11, pp. 71–76, Jan 2007.
- [22] X. Li, M. Ge, X. Dai, X. Ren, M. Fritsche, J. Wickert, and H. Schuh, "Accuracy and reliability of multi-gnss real-time precise positioning: Gps, glonass, beidou, and galileo," *Journal of Geodesy*, vol. 89, pp. 607–635, June 2015.
- [23] S. Sharma, N. Dashora, P. Galav, and R. Pandey, "Cycle slip detection, correction and phase leveling of rinex formatted gps observables," *Current Science*, vol. 100, pp. 205–212, January 2011.
- [24] J. Millner, M. Hale, P. Standen, N. Talbot, J. Presenter, and Millner, "The development and enhancement of gnss/gps infrastructure to support location based service positioning systems in victoria," *The 2004 International Symposium on GNSS/GPS*, 11 2017.
- [25] Y. Yang, J. Li, A. Wang, J. Xu, H. He, H. Guo, J. Shen, and X. Dai, "Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of beidou regional navigation satellite system," *Science China Earth Sciences*, vol. 57, pp. 144–152, Jan 2014.
- [26] V. U. Zavorotny and A. G. Voronovich, "Scattering of gps signals from the ocean with wind remote sensing application," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, pp. 951–964, March 2000.
- [27] P. Defraigne, Q. Baire, and N. Guyennon, "Glonass and gps ppp for time and frequency transfer," *Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International*, pp. 909 –913, 07 2007.
- [28] O. Montenbruck, P. Steigenberger, R. Khachikyan, G. Weber, R. Langley, L. Mervart, and U. Hugentobler, "Igs-mgex: preparing the ground for multi-constellation gnss science," *Inside GNSS*, vol. 9, pp. 42–49, January/February 2014.
- [29] G. M. Polischuk, V. I. Kozlov, V. V. Ilitchov, A. G. Kozlov, V. A. Bartenev, V. E. Kossenko, N. A. Anphimov, S. G. Revniviykh, S. B. Pisarev, and A. E. Tyulyakov, "The global navigation satellite system glonass: Development and usage in the 21st century," *Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, vol. 34, pp. 151 – 160, December 2002.

- [30] J. Kouba, "A guide to using international gnss service (igs) products," tech. rep., Geodetic Survey Division Natural Resources Canada, 615 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0E9, May 2009.
- [31] F. van Diggelen, "Gps and gps+glonass rtk," in *New Product Descriptions*, (Ashtech Inc. Sunnyvale, California USA), ION-GPS, 1997.
- [32] Y. Takasu and A. Yasuda, "Development of the low-cost rtk-gps receiver with an open source program package rtklib," *International Symposium on GPS/GNSS*, pp. 4–6, November 2009.
- [33] C. Cai and Y. Gao, "Precise point positioning using combined gps and glonass observations," *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 6, pp. 13–22, 06 2007.
- [34] S. G. Jin, R. Jin, and D. Li, "Assessment of beidou differential code bias variations from multi-gnss network observations," *Annales Geophysicae*, vol. 34, no. 2, pp. 259–269, 2016.
- [35] Z. Alexei E, "Using glonass in combined gnss receivers: Current status," *ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division*, pp. 1046 – 1057, September 2005.
- [36] J. Benedicto, S. E. Dinwiddie, G. Gatti, R. Lucas, and M. Lugert, "Galileo: Satellite system design and technology developments," tech. rep., European Space Agency, November 2000.
- [37] B. Helmut, E. Walter, L. Arian, and B. Eduarda, "Gnss/galileo global and regional integrity performance analysis," tech. rep., Thales ATM GmbH and NavPos Systems, September 2004.
- [38] M. Uhlemann, G. Gendt, M. Ramatschi, and Z. Deng, *GFZ Global Multi-GNSS Network and Data Processing Results*, pp. 673–679. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [39] M. Irisgler, G. W. Hein, and B. Eissfeller, "Multipath performance analysis for future gnss signals," *Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, pp. 225 – 238, January 2004.
- [40] O. Montenbruck and P. Steigenberger, "The beidou navigation message," in *International Global Navigation System Society Symposium*, (Outrigger Gold Coast, Australia), July 2013.
- [41] X. Li, G. Dick, C. Lu, M. Ge, T. Nilsson, T. Ning, J. Wickert, and H. Schuh, "Multi-gnss meteorology: Real-time retrieving of atmospheric water vapor from beidou, galileo, glonass and gps observations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 6385 – 6393, June 2015.
- [42] C. Bruyninx, H. Habrich, W. Söhne, A. Kenyeres, G. Stangl, and C. Völksen, *Enhancement of the EUREF Permanent Network Services and Products*, pp. 27–34. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [43] C. Bruyninx, E. Brockmann, A. Kenyeres, W. Sohne, G. Stangl, K. Szafranck, and C. Völksen, "Euref permanent network," 2014.
- [44] C. Bruyninx, "Comparing gps-only with gps + glonass positioning in a regional permanent gnss network," *GPS Solutions*, vol. 11, pp. 97–106, March 2007.
- [45] C. Bruyninx, "Status and prospects of the permanent euref network," in *EUREF Symposium*, (Prague, Czech Republic), June 1999.

- [46] C. Bruyninx, J. Baire, Q en Legrand, and F. Roosbeek, "The euref permanent entwork: Recent developments and key issues," in *EUREF 2011 Symposium*, (Chisinau, Republic of Moldova), May 2011.
- [47] C. Bruyninx, H. Habrich, A. Kenyeres, and G. Stangl, "The euref permanent network report 2000," tech. rep., Royal Obersvatory of Belgium, Faderam Agency of Cartography, FOMI satellite Geodetic Obersvatory and Institute of Space Research, Brussels, Frankfurt am Main, Budapest and Graz, 2000.
- [48] R. O. of Belgium, "Euref permanent gnss network." online, 2017.
- [49] Y. Heo, T. Yan, S. Lim, and C. Rizos, "International standard gnss real-time data formats and protocols," in *International GLobal Nvaigation Satellite Systems Society, IGNSS Symposium*, (Holiday Inn Surfers Paradicse, Qld Australia), December 2009.
- [50] Y. Hatanaka, "A compression format and tools for gnss obersvation data," *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, vol. 55, pp. 21 – 30, March 2008.
- [51] G. Wubben, M. Schmitz, and A. Bagge, "Some thoughts on satellite induced phase shifts (aka l2c quarter cycle problem) and the impact on rinex and rtcm," *Geo ++*, January 2009.
- [52] M. Schenewerk, S. Hilla, G. Sella, and K. Chai, "Quality controlling rinex navigation message files," tech. rep., National Geodetic Survey (NGS), 2016.
- [53] A. Bagge, "Dpgs data formats 2.0," Tech. Rep. 2.01, GEO++, Gesellschaft fur satellitenge-stutzte geodatische und navigatorische technologien mbH, Steinriede 8, D -30827 Garbsen, Germany, November 2001.
- [54] D. G. Wubben and P. G. Seeber, "Developments in real-time precise dpgs applications concepts and status," in *IAG Symposium*, July 1995.
- [55] G. Weber, "Streaming real-time igs data and products using ntrip," tech. rep., Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), FRANKFURT Germany, 12 2006.

FACULTEIT INDUSTRIELE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
TECHNOLOGIECAMPUS DE NAYER  
Jan De Nayerlaan 5  
2860 SINT-KATELIJNE-WAVER, België  
tel. + 32 15 31 69 44  
iiw.denayer@kuleuven.be  
www.iw.kuleuven.be



LID VAN **ASSOCIATIE  
KU LEUVEN**