



Globala satellitnavigeringssystem: En översikt över öppna signaler och tjänster

SOFIA BERGSTRÖM, SARA NILSSON

Sofia Bergström, Sara Nilsson

Globala satellitnavigeringssystem: En översikt över öppna signaler och tjänster

Titel	Globala satellitnavigeringssystem: En översikt över öppna signaler och tjänster
Title	Global navigation satellite system: A survey of open GNSS-signals and services
Rapportnr / Report No.	FOI-R--5610--SE
Månad / Month	Oktober / October
Utgivningsår / Year	2024
Antal sidor / Pages	51
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Telekrig
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E51564
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Stora delar av vårt samhälle är beroende av noggrann och tillförlitlig tid och position från globala satellitnavigeringssystem (GNSS). Mycket har hänt inom GNSS sedan millennieskiftet, pådrivet av både militära och kommersiella aktörer. Inom GPS och GLONASS genomförs moderniseringar och både Galileo och BeiDou har tillkommit som system. Den ökande konkurrensen är till gagn för användarna i och med att det läggs stora resurser på att förbättra och framtidssäkra systemen för att de inte ska bli obsoleta. Civila och militära användare bör hålla sig uppdaterade om alternativen som finns på den civila marknaden och möjligheterna de erbjuder.

Denna rapport ger en översikt av de fyra globala satellitnavigeringssystem som finns idag: GPS, GLONASS, Galileo och BeiDou. Rapporten har ett särskilt fokus på de öppna signaler och tjänster som varje system tillhandahåller men innehåller också en introduktion till historien och arkitekturen bakom systemen.

Nyckelord: GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou

Abstract

Today's society has a vast dependence of accurate and reliable time and position from global navigation satellite systems (GNSS). A lot has happened in GNSS since the turn of the millennium, driven by both military and commercial interests. GPS and GLONASS are undergoing major modernizations and both Galileo and Beidou has emerged as new systems. The competition between systems is beneficial for the users as large amounts are invested to improve the systems and to make them relevant for the future. Both civilian and military users should stay up-to-date with the options available in the civilian market and the opportunities they offer.

This report provides a survey of the four global navigation satellite systems used today: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. The report focuses on the open signals and services but also provides an introduction to the history and architecture of each system.

Keywords: GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou

Innehållsförteckning

Förkortningar	7
1 Inledning	9
1.1 Avgränsningar	10
2 GNSS-signalers uppbyggnad	11
2.1 Bärvåg	11
2.2 Navigationsmeddelande	11
2.3 PRN-kod	12
2.4 Modulering och multiplexing	12
3 GPS	15
3.1 Historik	15
3.2 Arkitektur	16
3.3 Öppna signaler	17
3.4 Tjänster	20
4 GLONASS	21
4.1 Historik	21
4.2 Arkitektur	22
4.3 Öppna signaler	23
5 Galileo	27
5.1 Historik	27
5.2 Arkitektur	28
5.3 Öppna signaler	28
5.4 Tjänster	31
6 BeiDou	35
6.1 Historik	35
6.2 Arkitektur	35
6.3 Öppna signaler	36
6.4 Tjänster	39
7 Tilläggssystem och regionala system	41
7.1 Tilläggssystem	41
7.2 Regionala system	42
8 Avslutande reflektioner	43
Referenser	50
A Appendix	51

Förkortningar

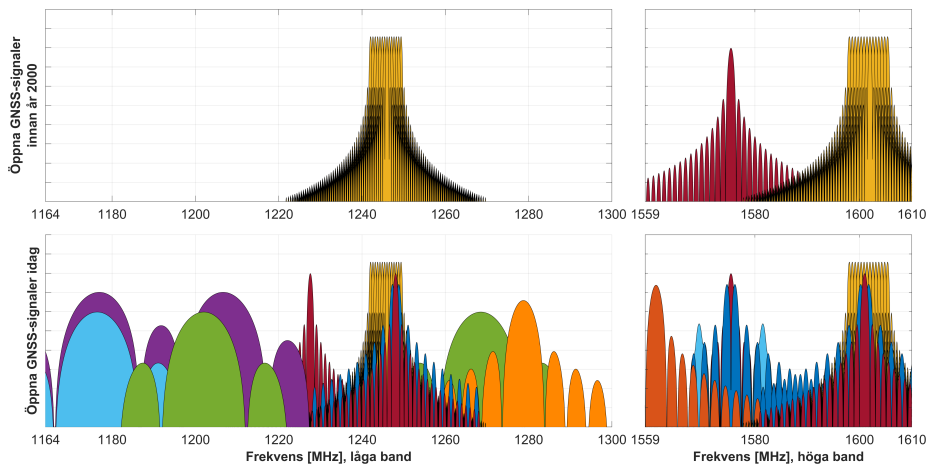
ACAS	Assisted Commercial Authentication Service
ACE-BOC	Assymetric Constant Envelope Binary Offset Carrier
Alt-BOC	Alternative Binary Offset Carrier
ANGA	Augmented Navigation for Africa
BDS	BeiDou System
BDSBAS	BeiDou Satellite Based Augmentation System
BOC	Binary Offset Carrier
BOCC	BDS Operation and Control Center
BPSK	Binary Phase Shift Keying
C/A	Course/Acquisition
CAS	Commercial Authentication Service
CDMA	Code Division Multiple Access
Chimera	Chips-Message Robust Authentication
CL	Civilian Long
CM	Civilian Moderate
CNSS	Compass Navigation Satellite System
CORS	Continuously Operating Reference Stations
CRDSS	Comprehensive Radio Determination Satellite System
DF	Dual-Frequency
DGPS	Differential Global Positioning System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	European Space Agency
EUSPA	EU Agency for the Space Programme
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFA	Federal Aviation Administration (USA)
FOC	Full Operational Capability
GAGAN	GPS-aided GEO-Augmented Navigation
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCS	Ground Control Segment
GEO	Geostationary Equatorial Orbit
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GMS	Ground Mission Segment
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSC	European GNSS Service Centre
GSMC	Global Short Message Communication
HAS	High Accuracy Service
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit
IOV	In Orbit Validation
ITU	Internationella teleunionen
KASS	Korea Augmentation Satellite System
LEO	Low Earth Orbit
LIDAR	Light detection and ranging

MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MSAS	Michibiki Satellite Augmentation System
NavIC	Navigation with Indian Constellation
NDGPS	Nationwide DGPS
OCS	Operational Control Segment
OCX	Next Generation Operational Control System
OS	Open Service
OSNMA	Open Service Navigation Message Authentication
PNT	Position, navigering och tid
PPP	Precise Point Positioning
PRN	Pseudorandom Noise
QBOC	Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RDSS	Radio Determination Satellite System
RNSS	Radio Navigation Satellite Service
RSMC	Regional Short Message Communication
SA	Selective Availability
SAR	Search and Rescue
SCA	Spreading Code Authentication
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SF	Single-Frequency
SMC	Short Message Communication
SouthPAN	Southern Positioning Augmentation Network
SPS	Standard Positioning Service
SV	Space Vehicle
TESLA	Timed-Efficient Stream Loss-Tolerant Authentication
TMBOC	Time Multiplexed Binary Offset Carrier
TT&C	Telemetry, Tracking and Command
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTC	Coordinated Universal Time
WAAS	Wide Area Augmentation System

1 Inledning

Globala satellitnavigeringssystem, eller GNSS, är ett samlingsnamn för globala navigationssystem som är baserade på satelliter. GNSS-mottagare kan beräkna sin position, hastighet och tid om den tar emot meddelanden från minst fyra satelliter. Om satellitklockan och mottagarklockan varit perfekt synkroniserade hade endast tre satellitsignaler behövts för att, genom trilateration, göra positionsbestämning. På grund av klockfel i mottagaren krävs dock en fjärde satellit för att mäta klockfelet [1].

Före år 2000 fanns endast två system med varsin signal avsedd för civil användning. GPS-signalen var avsiktligt degraderad och hade en noggrannhet på ungefär 100 meter. GPS-mottagare var dessutom både dyra och otympliga. Det finns idag fyra oberoende GNSS: GPS, GLONASS, Galileo och BeiDou. Systemen sänder flera olika frekvenser och tillhandahåller signaler med positions-, navigerings- och tidsinformation (PNT). Alla öppna signaler för civilt bruk som sänds kan ses i Figur 1.1 där utvecklingen de senaste 20 åren illustreras. En mer detaljerad översikt av alla öppna signaler kan ses i Figur A.1 i Appendix. Dagens GNSS-mottagare kan använda signaler från flera frekvenser från olika system vilket gör att robustheten ökat markant jämfört med äldre mottagare. Noggrannheten har kommit ner på meternivå, till och med bättre då tillägssystem och nya signaler för precisionsnavigering används.



Figur 1.1: Jämförelse av antal öppna GNSS-signaler före år 2000 och idag. Notera att det utöver dessa även förekommer flera krypterade signaler och signaler från regionala system och tillägssystem.

Användandet av GNSS har fortsatt att öka från år till år då det är möjligt att även med billiga och små mottagare få en hög positions- och tidsnoggrannhet [1]. Mobiltelefoner har varit drivande i denna utveckling och det är många som använder GNSS dagligen, både medvetet och omedvetet. Dagens samhälle är helt beroende av tid och position från GNSS, bland annat transportsektorn, lantbrukssektorn, elproduktion och telekom [2].

Teknikutvecklingen inom GNSS-området har gått snabbt de senaste åren. Detta drivs av både kommersiella och militära aktörer och har möjliggjorts av ny teknik. Beroendet av GNSS har ökat, och så har även möjligheten och viljan att störa ut GNSS. Alla samhällsaktörer som är beroende av position, navigering eller tid bör resonera kring sin egen användning och orientera sig inom området. Även militära användare, med tillgång till fler signaler, bör förstå att utnyttja robustheten i nya civila multikonstellationsmottagare. Denna rapport beskriver de fyra globala satellitnavigeringssystem som finns idag med ett särskilt fokus på de öppna signalerna och tjänsterna som varje system tillhandahåller.

Denna rapport inleds med kortfattad teori om GNSS-signalers uppbyggnad, kapitel 2. Därefter beskrivs GPS, GLONASS, Galileo och BeiDou i nästkommande fyra kapitel. Dessa kapitel ger en introduktion till uppbyggnaden av varje system samt

vilka signaler och tjänster som systemen tillhandahåller. Den ger också exempel på mottagare som använder de olika signalerna och tjänsterna. Rapporten avslutas med en beskrivning av tilläggsystem och regionala system i kapitel 7.

1.1 Avgränsningar

Rapporten tar endast upp civila GNSS-signaler och tjänster men lämpar sig som introduktion för användare inom både civila och militära myndigheter. Rapporten baseras på information från öppna källor, främst inhämtad via internet. Varje system är främst beskrivet utifrån material som publicerats av de som driver respektive system. För vissa system, GLONASS och BeiDou, har informationsinhämtningen varit svårare då det som publiceras är betydligt mer restriktivt.

2 GNSS-signalers uppbyggnad

GNSS-signalerna består av en bärvåg på vilken ett navigationsmeddelande och en kod, unik för både signaltypen och satelliten, moduleras. Detta kapitel går igenom dessa delar, vilka är gemensamma för flera GNSS-signaler.

2.1 Bärvåg

GNSS-signalerna sänds i det som IEEE benämner som L-band, vilket är frekvenser från 1 till 2 GHz med våglängder på mellan 30–15 centimeter. GNSS-banden delas upp i en lägre och en högre del vilka enligt Internationella teleunionen (ITU) är 1164–1300 MHz och 1559–1610 MHz. Det högre bandet kretsar kring frekvensen L1, 1575,42 MHz, även om det finns andra centerfrekvenser inom bandet. Det lägre bandet innehåller flera centerfrekvenser där L2 och L5 är de mest kända. Tabell 2.1 innehåller en översikt över samtliga civila GNSS-signaler och deras ungefärliga centerfrekvens. Noterbart är att nomenklaturen mellan olika system inte är helt konsekvent.

Tabell 2.1: Översikt över öppna GNSS-signaler uppdelat på höga och låga band.

Centerfrekvens	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
1177 MHz	L5		E5a	B2a
1192 MHz			E5	
1202 MHz		L3OC		B2b, (B2I)
1207 MHz			E5b	
1228 MHz	L2C			
1246 MHz		L2OF		
1248 MHz		L2OC		
1267 MHz				B3I
1279 MHz			E6	
1561 MHz	L1 C/A, L1C			B1I
1575 MHz			E1	B1C
1601 MHz		L1OC		
1602 MHz		L1OF		

Samtliga signaler är högercirkulärt polariserade och har en mottagen effekt på cirka –130 dBm när de når jordytan. Signalernas effekttäthet är lägre än det termiska brusgolvet. Det innebär att signalerna endast är detekterbara genom att mottagaren vet vilken kodsekvens den ska leta efter.

2.2 Navigationsmeddelande

Informationen i navigationsmeddelandet skickas upp från marksegmentet och innehåller data som mottagaren behöver för att beräkna position och tid:

- Efemerider (aktuell satellits bana).
- Klockdata.
- Satelliternas status.
- Jonosfärskorrekktioner.
- Almanacka (alla satelliters banor).

Navigationsmeddelandena skiljer sig mellan GNSS-konstellationer och även mellan signaler inom samma system. De har olika meddelandestruktur och kan innehålla ytterligare information. Vissa navigationsmeddelanden är kodade med felrättande kod.

I moderna GNSS-signaler är det vanligt att signalen delas upp i två fasvridna komponenter (in-phase, I, och quadrature, Q) där den ena skickas utan navigationsmeddelande för att göra det lättare för mottagaren att hitta och följa signalen. I denna uppdelning kallas signalkomponenterna för *pilot* respektive *data*.

2.3 PRN-kod

Förutom navigationsmeddelandet läggs ytterligare en kod till bärvågen. Den kallas ofta för PRN-kod (pseudo random noise) och har högre dataakt än datameddelandet. PRN-koden är inte slumpmässig utan är en förutbestämd sekvens som är unik både för satellit och signal och upprepas med ett bestämt tidsintervall. Varje bit i PRN-koden kallas för *chip* vilket inte ska blandas ihop med informationsbitarna i navigationsmeddelandet.

PRN-koden är en bandspridningssekvens vilket betyder att signalen som bildas har en större bandbredd än originalsignalen. Exempelvis har GPS L1 C/A-signalen ett navigationsmeddelande på 50 bitar per sekund och en PRN-kod med 1023 000 chip per sekund.

Det finns tre huvudanledningar bakom användandet av PRN-kod inom GNSS. För det första gör kodens höga dataakt det möjligt att få högre upplösning på den mottagna signalen. För det andra är PRN-koderna ortogonala gentemot varandra vilket gör det möjligt att sända flera signaler på samma frekvens, så kallad CDMA, (code division multiple access). Slutligen gör det bredare spektrumet signalen mer robust mot smalbandig störning [3].

2.4 Modulering och multiplexing

Modulation beskriver hur en signals information överförs till en bärvåg. Detta kan ske på en mängd olika sätt. Multiplexing beskriver hur flera olika signalkomponenter fogas samman till en signal.

2.4.1 PSK

Den vanligaste modulationstypen inom GNSS är *binary phase shift keying* (BPSK), vilket betyder att den enskilda bitens två värden endast skiljs av en fasförskjutning av signalen på 180° . I denna rapport används notationen BPSK(n) där n är det tal som, multiplicerat med 1,023 MHz, ger signalens chip-hastighet.

Spektraltätheten för en BPSK-signal antar, under ideala förhållanden, formen av en kvadrerad sinc-funktion där signalens bredd i frekvensdomänen är omvänt proportionell mot dess chiptid i tidsdomänen. Därför har BPSK(1) smalare bandbredd än BPSK(10). En lång chiptid skapar en bred autokorrelationsfunktion vilket ger lägre precision.

En liknande modulation benämns *quadrature phase shift keying* (QPSK) där signalen moduleras på både I- och Q-komponenten av bärvågen. De fyra symbolerna skiljs av en fasförskjutning på 90° .

2.4.2 BOC

Binary offset carrier (BOC) fås genom att multiplexa en BPSK-signal med en fyrkantsvåg, vilket flyttar BPSK-signalens effekt till frekvensen av fyrkantsvågen. Notationen är BOC(m,n) där m och n indikerar avstånd från centerfrekvensen (frekvensen på fyrkantvågen) respektive signalens halva bandbredd, båda i multiplar av 1,023 MHz.

För att en och samma mottagare ska kunna samtidigt nyttja signaler från olika globala satellitnavigeringssystem har en harmonisering skett av signalerna på L1-frekvensen [1, 4]. Standardsignalen är bestämd att vara en MBOC, *multiplexed BOC*, det vill säga att signalen är uppdelad i en smalbandig (BOC(n,n)) och en

bredbandig komponent (BOC(m,n)) som viktas med värdet γ , se ekvation 2.1, där G är spektraltätheten av de ingående signalerna. I MBOC(6,1) är alltså en andel av PRN-chipen multiplexade med en fyrkantsvåg med en svängning per chip och resterande med en fyrkantsvåg med sex svängningar per chip.

$$G_{MBOC(m,n,\gamma)}(f) = (1 - \gamma)G_{BOC(n,n)}(f) + \gamma G_{BOC(m,n)}(f) \quad (2.1)$$

Efter beslutet att använda MBOC-signaler har nya optimerade varianter utvecklats. GPS använder en *time multiplexed BOC* (TMBOC) i den nya L1C-signalen, som delar upp den smalbandiga och den bredbandiga komponenten av MBOC-signalen i tidluckor. BeiDou använder en *quadrature multiplexed BOC* (QMBOC) i B1C-signalen där BOC-signalerna delas upp på I- och Q-komponenterna, och Galileo en *composite BOC* (CBOC) i E1 OS.

Assymetric constant envelope BOC (ACE-BOC) används för att slå samman två smalbandiga signaler till en signal med konstant envelopp, vilket gör sändningen effektivare. BeiDous B2a/b-signal använder ACE-BOC och Galileos E5a/b använder ett specialfall av ACE-BOC som kallas *alternative BOC* (Alt-BOC) [5].

2.4.3 Bandbredd

Det finns flera sätt att definiera en signals bandbredd. I GNSS-sammanhang är så kallad noll-till-noll-bandbredd vanligt. Det som avses då är bredden på huvudloben vilken för en BPSK(n) är $2n \cdot 1.023$ MHz eller 2,046 MHz. En annan bandbreddsdefinition mäter bredden på signalen då amplituden har minskat med halva signalstyrkan, 3 dB. Ytterligare bandbreddsdefinitioner som förekommer är sändarbandbredd och mottagarbandbredd vilket definierar hur bred signal som sänds respektive hur bred signal som mottagaren tar emot. Den senare kan variera för olika typer av mottagare. Om inget annat anges är noll-till-noll-bandbredden som används i rapporten för signaler med PSK-modulering. Signaler med BOC-modulering återges med den bandbredd som finns angiven i signalbeskrivningen.

I denna rapport visas I- och Q-komponenterna av signalen utan hänsyn till utsänd effekt eller hur energin är fördelad på signalkomponenterna. Signalerna visas över 40 MHz för att visa respektive signals minskande sidlobor.

3 GPS

Navstar Global Positioning System (GPS) är för många synonymt med den teknik som går under akronymen GNSS. GPS ägs av USA och drivs av USA:s rymdstyrka (United States Space Force). Deras öppna navigeringstjänst är fri att använda för alla med en GPS-mottagare.

Detta kapitel beskriver GPS ur ett historiskt och arkitektoniskt perspektiv i avsnitt 3.1 och 3.2. GPS består idag av fyra civila signaler uppdelade på tre frekvensband. Dessa fyra signaler presenteras i avsnitt 3.3 i den ordning de lanserades.

3.1 Historik

Idén till det som skulle bli GPS föddes år 1957 då amerikanska forskare observerade dopplerskift på ryska Sputniks radiosignal när satelliten passerade [6]. Från detta utvecklades det första globala satellitnavigeringssystemet med satelliter i låg omloppsbana, Transit, som var fullt operativt från 1968 [7]. Från Transit och flera andra parallella teknikutvecklingsspår utvecklades sedan Navstar GPS, vars tio första satelliter, tillhörande Block I, sköts upp mellan 1978 och 1985, se Tabell 3.1.

Efter att ett koreanskt passagerarflygplan blev nedskjutet över sovjetiskt luftrum år 1983 på grund av ett navigationsfel beslutade USA:s dåvarande president Ronald Reagan att göra GPS tillgängligt för civil användning. Den första versionen av GPS var redan avsedd för *både* militär och civil användning [8], men Reagans uttalande markerade detta även politiskt. Den civila signalen var dock tänkt att fungera sämre än vad den faktiskt gjorde och en alltför bra positionering kunde därför utgöra ett hot i händerna på nationens fiender. Den civila användningen degraderades därför medvetet under namnet *selective availability* (SA) fram till år 2000 [9]. Det finns många anledningar som brukar nämnas till att SA stängdes av. Bland annat konkurrens från andra GNSS, utveckling av differentiell GPS eller USA:s utveckling av effektiva störsystem mot GNSS [10]. I satelliter från och med Block III finns SA inte implementerat [11].

GPS deklarerades fullt operativt 1995 men har sedan dess fortsatt utvecklas på grund av ny teknologi och nya krav från användarna. Sedan 2000 har USA arbetat med moderniseringen av GPS vilken bland annat inkluderar ett nytt marksegment, nya satelliter, nya navigationsmeddelanden och tre nya civila signaler [11, 12].

Tabell 3.1: Översikt över de olika generationerna av GPS-satelliter där versalen i generationsnamnet står för *Advanced*, *Replenishment*, *Modernized* eller *Follow-on* [11].

Generation	Operativa	Lyckade uppskjutningar	Uppskjutningsperiod	Förväntad livslängd
Block I	0 (sista 1995)	10	1978-1985	5 år
Block II	0 (sista 2007)	9	1989-1990	7,5 år
Block IIA	0 (sista 2019)	19	1990-1997	7,5 år
Block IIR	6	12	1997-2004	7,5 år
Block IIR-M	7	8	2005-2009	7,5 år
Block IIF	12	12	2010-2016	12 år
Block III	6	6	2018-	15 år
Block IIIF	0	0	från 2026	15 år

3.2 Arkitektur

GPS består av ett rymdsegment, ett marksegment och ett användarsegment. Användarsegmentet består av alla civila och militära GPS-mottagare.

3.2.1 Rymdsegment

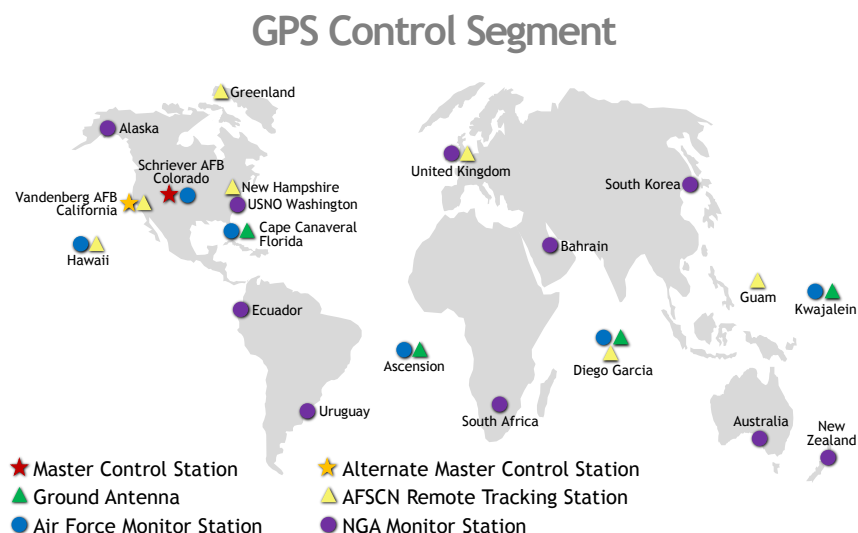
Rymdsegmentet består av minst 24 satelliter, eller *space vehicles* (SV) som skickar ut radiosignaler till användarna. Satelliterna är av olika typ och ålder, se Tabell 3.1, och väger mellan 1 till 4 ton. De kretsar i medelhög omloppsbana (MEO) på cirka 20 200 km och har en omloppstid på ungefär 11 timmar och 58 minuter. De är uppdelade på sex orbitalplan och är organiserade så att minst sex satelliter är synliga samtidigt från alla platser på jordens yta [11].

Med varje generation av satelliter adderas ytterligare funktionalitet och stöd för nya signaler. Satelliter ur Block III har förmåga att samverka med andra GNSS och har även en ökad robusthet mot störning. Nästa generations satelliter, Block IIIF, upphandlades av Lockheed Martin och väntas börja skjutas upp under 2026 [13].

3.2.2 Marksegment

Marksegmentet går även under namnet kontrollsegment (OCS) och består av en huvudkontrollstation, 16 övervakningscenter och elva markantenners utspridda över världen, se Figur 3.1. Övervakningscentren mäter på satellitsignalerna som befinner sig inom synhåll och skickar informationen vidare till huvudkontrollstationen. Där predikteras satelliternas position och klockfel som sedan sänds upp till satelliterna via markantennerna [11].

Nästa generations marksegment är under utveckling under namnet OCX. OCX har bättre cybersäkerhet och krävs för vissa nya förmågor, exempelvis bättre robusthet mot störning, samt för att kontrollera de nya satelliterna i Block III. Marksegmentet, som skulle stå klart år 2016, dras med kraftigt ökade kostnader och väntas vara operativt under 2024 [11, 14].



Updated May 2017

Figur 3.1: Översikt över GPS marksegment. (Bildkälla: United States Government [11])

3.3 Öppna signaler

GPS består idag av fyra civila signaler, se Tabell 3.2, uppdelade på tre frekvensband. På två av frekvensbanden finns även militära GPS-signaler men dessa presenteras inte i denna sammanställning. Det finns mottagare på marknaden som tar emot samtliga civila GPS-signaler.

Tabell 3.2: Översikt över de civila GPS-signalerna [15, 16, 17]. Observera att bandbredden på L1C-signalen är återgiven som den anges i [15].

Signal	Centerfrekvens	Bandbredd	Modulationstyp
L1 C/A	1575,42 MHz	2,046 MHz	BPSK(1)
L2C	1227,60 MHz	2,046 MHz	BPSK(1)
L5	1176,45 MHz	20,46 MHz	BPSK(10)
L1C	1575,42 MHz	30,69 MHz	BOC(1,1), TMBOC(6,1,4/33)

3.3.1 L1 C/A

Den första civila GPS-signalen är fortfarande den mest använda GNSS-signalen idag. C/A står för *coarse/acquisition* och namnet är ett arv från när L1 C/A användes för att snabbt hitta synliga satelliter och aktuell tid som ett försteg för den krypterade P-koden, där P står för *precision*. Det finns en moderniserad öppen signal på L1-bandet men L1 C/A är tänkt att fortsätta sändas i framtiden för bakåtkompatibilitet.

L1 C/A består av en kodsekvens där varje satellit har en unik PRN-kod som är ortogonal mot alla andra satelliters PRN-koder. Denna kod upprepar sig varje millisekund. På L1 C/A adderas navigationsmeddelandet (NAV) vilket har en sändningstid på 12,5 minuter. Navigationsmeddelandet och L1 C/A sänds BPSK-modulerat på en bärvåg med centerfrekvens på 1575,42 MHz [1], se Figur 3.2.

Mottagare

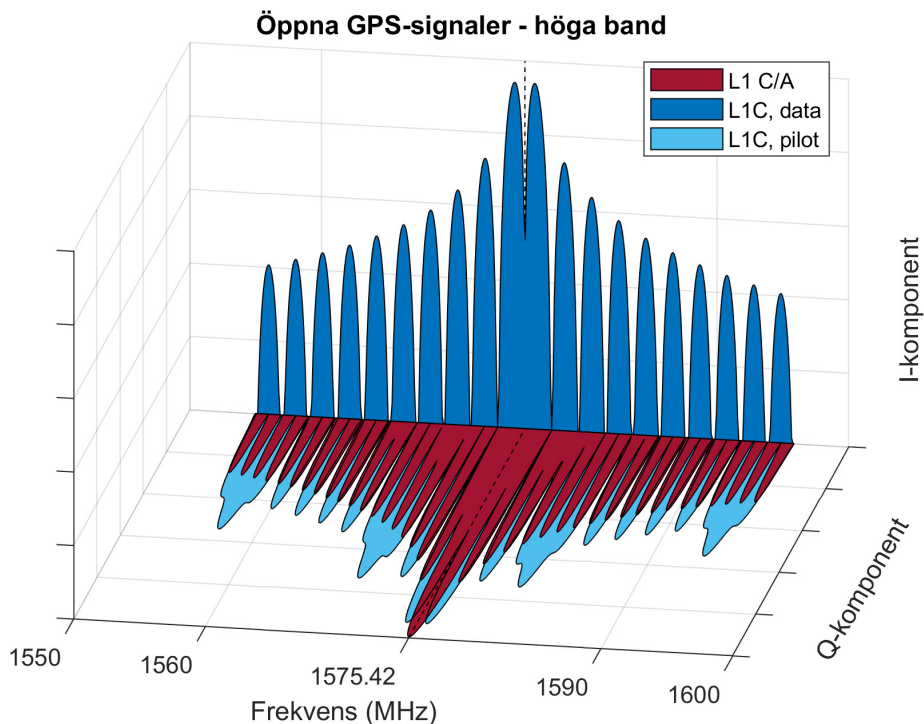
Nära samtliga GNSS-mottagare på marknaden idag tar emot GPS L1 C/A-signalen.

3.3.2 Civil L2 (L2C)

L2C är den andra civila GPS-signalen och räknas till de moderniserade signalerna. Den har fått sitt namn för att den är en civil signal som opererar på frekvensen L2, 1227,60 MHz, där det också finns två militära signaler. Signalen presenteras som ett stöd för kommersiella intressen då den möjliggör för civila mottagare att, likt militära mottagare, utnyttja två frekvenser. Mottagare som har möjlighet att använda två frekvenser från samma satellit kan beräkna fördröjningen genom jonosfären och därmed korrigera för en del fel som uppstår, med högre noggrannhet som följd.

L2C-signalen, se Figur 3.3, har samma bandbredd och modulation som L1 C/A-signalen. Denna signal är dock uppbyggd av två PRN-koder: CM (civilian moderate) med en periodtid på 20 millisekunder och CL (civilian long) med periodtid på 1500 millisekunder, som adderas samman. På CM-koden läggs sedan navigationsmeddelandet L2-CNAV. CNAV-meddelandets uppbyggnad skiljer sig från navigationsmeddelandet på L1 C/A men innehåller samma information. Dessutom innehåller CNAV bland annat felrättande kodning, tid-offset från andra GNSS-system och en flexibilitet att utökas om mer data behöver skickas. På CL-koden läggs ingen data utan det är en pilotsignal vilket ger bättre korrelationsmöjligheter än för L1 C/A. Detta tillsammans gör att mottagaren kan fungera under sämre förhållanden trots att effekten på L2C är något lägre än hos L1 C/A [1].

Teknologin bakom signalen lanserades år 2005 tillsammans med den nya generationens satelliter i Block IIR-M. Tanken var först att börja sända L2C med



Figur 3.2: De civila GPS-signalerna i de höga GNSS-bandet.

nästa generations marksegment, OCX, men på grund av förseningar i marksegment började CNAV-meddelandet på L2C-signalen ändå sändas år 2014 [18]. Trots att fler än 24 satelliter i nuläget sänder signalen och att meddelandet är *healthy*, har den status som *pre-operational* och ska användas på egen risk [11].

Mottagare

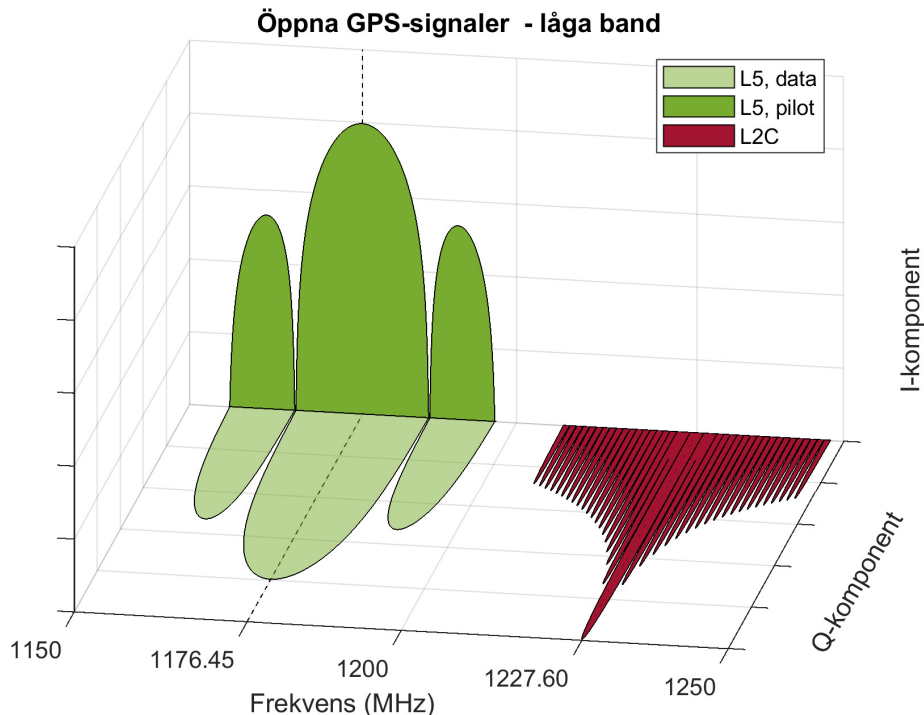
Mottagare för L2C-signalen förekommer på marknaden, till exempel Novatels OEM7-serie [19] eller u-blox F9P [20].

3.3.3 L5

L5 är den tredje civila GPS-signalen och räknas även den till de moderniserade signalerna. Signalen sänds på bärfrekvensen 1176,45 MHz i L5-bandet, som är reserverat för flygsäkerhetstjänster, och är tänkt att användas i kritisk infrastruktur och i applikationer där hög prestanda är ett krav. Används L5-signalen tillsammans med L1 C/A erhålls högre noggrannhet, på grund av korrigeringen av jonosfärsfördröjningen, och högre robusthet, på grund av att flera signaler används. L5-signalen sänds med högre effekt än L1 C/A och L2C [11].

L5-signalen består till skillnad från L1 C/A och L2C av två identiska PRN-koder som är fasvridna 90 grader, se Figur 3.3, som multiplexas samman. Den ena komponenten, kallad *data*, innehåller navigationsmeddelandet L5-CNAV och en synksekvens, och den andra, kallad *pilot*, innehåller endast en annan synksekvens. Att piloten är datalös underlättar för GPS-mottagaren i sök-fasen (aquisition). Även L5-signalen är BPSK-modulerad, men med en tio gånger så bred bandbredd som L1 C/A och L2C [1].

Det finns stöd för L5 på satelliter från Block IIF eller senare, vilka började skjutas upp år 2010. L5-signalen var tänkt att börja användas tillsammans med marksegmentet OCX, men på grund av förseningar i marksegmentet började L5-signalen, likt L2C, att sändas 2014. I nuläget sänds signalen från 18 satelliter. Den har status *pre-operational*



Figur 3.3: De civila GPS-signalerna på de låga GNSS-banden där signalernas centerfrekvens är utmarkerad.

och *unhealthy* och ska användas på egen risk. Prognosen är att signalen ska vara tillgänglig från 24 satelliter år 2027 [11].

Mottagare

Antalet mottagare på marknaden väntas öka när signalen driftsätts. Vissa multifrekvensmottagare tar emot L5-signalen, däribland u-blox F10-serien [21] och vissa avancerade träningsklockor från till exempel Garmin [22].

3.3.4 L1C

Den fjärde civila GPS-signalen kallas L1C och ska inte förväxlas med L1 C/A eller de två militära signalerna som också finns på frekvensen L1, 1575,42 MHz. Då L1 C/A är en utbredd men något föråldrad signal skapades en ny öppen signal på L1-frekvensen som är tänkt att både introducera bättre signalegenskaper samt kunna användas tillsammans med signaler från andra GNSS. För bakåtkompatibilitet med tidigare mottagare kommer L1 C/A-signalen att fortsätta sändas.

L1C-signalen är den mest utvecklade av alla de nya civila GPS-signalerna då den utnyttjar funktionerna från de tidigare beskrivna signalerna inklusive från WAAS, se avsnitt 7.1.1. L1C-signalen består, likt L5-signalen, av en data- och en pilotkomponent, se Figur 3.2. Huvudloben i L1C-signalen sammanfaller inte med L1 C/A-signalen trots att signalerna har samma centerfrekvens. I L1C är energin istället uppdelad i två sidlobar kring centerfrekvensen. Datakomponenten består av en ren BOC(1,1)-signal och pilotkomponenten består av en BOC(1,1) och BOC(6,1) som sammanfogas med TMBOC(6,1,4/33)-modulation till en signal som liknar BeiDous B1C och Galileos E1 OS [1].

Unikt för L1C-signalen, bland övriga GPS-signaler, är att effekten inte delas lika mellan pilot- och datasignalen utan 75 % av den totala effekten läggs på pilot-signalen. L1C använder ett nytt navigationsmeddelande, CNAV-2, som bland annat har felrättande kod [23]. En ytterligare nyhet med L1C är autentiseringsprotokollet

Chimera (chips-message robust authentication), vilket ska göra signalen svårare att vilseleda med falska GNSS-signaler, så kallad spoofing [24].

L1C-signalen kan sändas från satelliter från och med Block III, vilka började skjutas upp 2018. Det finns i nuläget bara sex satelliter tillgängliga och dessa sänder ingen navigationsdata. Signalen väntas vara tillgänglig från 24 satelliter i slutet av 2020-talet [11].

Mottagare

Mottagare för L1C-signalen förekommer på marknaden, till exempel Novatels multifrekvenskort OEM7500 [19].

3.4 Tjänster

Det finns flera tjänster knutna till GPS, där *Standard positioning service*, SPS, är den mest använda. De finns även flera system som förbättrar noggrannheten lokalt däribland WAAS, NDGPS, CORS och GBAS samt globala tjänster som Search and Rescue och DGPS [11].

3.4.1 Standard positioning service

Den öppna tjänsten SPS är en kostnadsfri tjänst för position, navigering och tid som nästan alla GNSS-mottagare använder sig av. Kraven på tjänstens prestanda presenterades år 1993 men användaren kan förvänta sig bättre prestanda idag. Prestandan gäller endast för L1 C/A-signalen då L5, L2C och L1C fortfarande räknas som *pre-operational*. Enligt [25] ska SPS bland annat uppfylla följande krav:

- Det globala positionsfelet (i medeltal) ska vara under 8 meter i horisontalled och under 13 meter i vertikalled 95 % av tiden.
- Klockfelet på satelliterna ska vara mindre än 30 nanosekunder 95 % av tiden.

3.4.2 Search and Rescue

Search and Rescue är en del i ett större system under namnet Cospas-Sarsat, som lyssnar efter transpondrar (406 MHz) på jordytan för att snabbt kunna lokalisera platsen för en olycka. Detta har tidigare skett från geostationära satelliter (GEO) eller från satelliter i låg omloppsbana (LEO) men är nu på väg att kompletteras med MEO-satelliter, vilket ger en rad fördelar [26]. Denna funktionalitet kommer finnas på GPS-satelliter från och med Block IIIF [11].

4 GLONASS

GLONASS är det satellitnavigeringssystem som drivs av Ryssland. GLONASS är en förkortning för *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* vilket är ryska för globala satellitnavigeringssystem. GLONASS utvecklades av forna Sovjetunionen och var det andra operativa GNSS efter det amerikanska GPS. Idag drivs och utvecklas GLONASS av Roscosmos som är den ryska federala rymdbyrån. GLONASS kan delas upp i två tjänster, den första är *Open Service*, en gratis civil tjänst, och den andra är *Secure Service* som används av den ryska militären. De militära signalerna som finns i *Secure Service* sänds på två av GLONASS frekvensband.

Detta kapitel presenterar GLONASS ur ett historiskt och arkitektoniskt perspektiv i avsnitt 4.1 och avsnitt 4.2. De signaler som ingår och i framtiden ska ingå i *Open Service* presenteras i avsnitt 4.3.

4.1 Historik

Idén till GLONASS föddes ur ett tidigare Sovjetiskt radionavigeringssystem vid namn Cicada. Cicada bestod av fyra satelliter i låg omloppsbanan. Systemet gav användare på jorden möjligheten att fastställa sin position mot en satellit genom räckviddsmätningar på fem till sex minuter. Cicada-systemet skulle så småningom också utmynnas i ett system för Search and Rescue kallat Cospas-Sarsat tillsammans med ett liknande fransk-amerikanskt system. Cicada visade nyttan med satellitbaserad radionavigering för styret i Sovjetunionen som då beställde GLONASS [27].

Den första operativa satelliten, kallad Uragan, sköts upp år 1983 och redan 1988 öppnade Sovjetunionen för gratis användning av den civila signalen trots att det bara fanns ett fåtal operativa satelliter. Formellt ansågs systemet vara fullt operativt år 1993 men en full konstellation på 24 satelliter uppnåddes inte förrän 1995. Med en full konstellation ökade den civila användningen av GLONASS, speciellt då det var möjligt att få en högre positionsnoggrannhet än med GPS som fortfarande avsiktligt degraderade sin C/A-signal [1].

I början av 90-talet minskade finansieringen till rymdsektorn och i kombination med Uragan-satelliternas korta livstid resulterade det i att antalet operativa satelliter snabbt minskade. År 2002 fanns endast sju satelliter kvar i konstellationen. Samma år sjösattes ett nytt 10-års direktiv med mål att återuppbygga och modernisera både rymd- och marksegmentet av GLONASS. Den första satelliten av det nya blocket Glonass-M sköts upp 2005, se Tabell 4.1. Det nya blocket hade bättre klockor som ger en längre satellitlivslängd och adderade ytterligare en civil signal. 2011 blev GLONASS fullt operativt igen med 24 satelliter och sedan dess har systemet haft cirka 24 operativa satelliter hela tiden. Ett nytt 10-årigt moderniseringsdirektiv lanserades 2012 [27].

Tabell 4.1: Översikt över de olika generationerna av GLONASS-satelliter [27, 28, 29].

Block	Operativa	Lyckade uppskjutningar	Uppskjutningsperiod	Förväntad livslängd
Uragan	0 (sista 2009)	81	1982-2005	3,5 år
Glonass-M	21	45	2003-2022	7 år
Glonass-K	3	4	2011-	10 år
Glonass-K2	0	1	2023-	10 år

En bidragande orsak till den korta livslängden på GLONASS-satelliterna jämfört med till exempel GPS är att en del av satelliten är trycksatt vilket har lett till ett flertal satellithaverier. Från och med block Glonass-K är satelliterna inte trycksatta vilket förväntas leda till längre livslängd. Glonass-K-satelliter är också de första GLONASS-satelliterna som sänder CDMA-signaler och markerar starten för satellituppskjutningar från Plesetsk Cosmodrome norr om Moskva. Tidigare sköts alla satelliter upp från Baikonur Cosmodrome nära Leninsk i Kazakstan. För att skynda på moderniseringen

har även Glonass-M sändt L3OC, den första CDMA-signalen, sedan 2014 [1]. Ytterligare två CDMA-signaler ska adderas med Glonass-K2. Den första satelliten i block Glonass-K2 sköts upp 2023 efter år av förseningar [30].

4.2 Arkitektur

GLONASS består av ett rymdsegment, marksegment och användarsegment. Användarsegmentet är alla mottagare som finns på jorden som kan ta emot GLONASS-signaler.

Den ursprungliga designen av GLONASS skiljer sig på flera sätt från dess amerikanska motsvarighet men har under den pågående moderniseringen av systemet allt mer börjat likna de andra GNSS som är operativa idag.

4.2.1 Rymdsegment

GLONASS rymdsegment består idag av 26 satelliter, varav 24 som aktivt sänder till användarsegmentet och två som är i testfas [31]. Satelliterna är fördelade på tre orbitalplan med åtta i varje plan och har en omloppstid på 11 timmar och 15 minuter. Konstellationen innehåller endast satelliter i medelhög omloppsbana på 19 100 kilometers höjd. De satelliter utöver de 24 som aktivt sänder är i reserv tills någon aktiv satellit tas ur drift [32].

Till skillnad från andra GNSS designades GLONASS första signaler och satelliter med FDMA-teknik. FDMA står för *frequency-division multiple access* och innebär att alla GLONASS-satelliter sänder samma signalkod men på olika frekvenser. Från början sände satelliterna på två band, L1-bandet 1602,0–1615,5 MHz och L2-bandet 1246,0–1256,5 MHz med frekvenser separerade med 0,5625 MHz respektive 0,4375 MHz. Totalt blev det 25 kanaler för 24 satelliter att sända på. Sedan 1993 använder satelliterna endast 14 av dessa kanaler då radioastronomer behöver de högre frekvenserna i L1-bandet för att studera den interstellära rymden och de har förtur till frekvenserna enligt ITU. Till exempel är Glonass-M satelliter utrustade med filter som förhindrar sändning på oönskade frekvenser i L1-bandet [33].

GLONASS fungerar med 14 kanaler för att rakt motsatta satelliter, det vill säga satelliter i samma orbitalplan som ligger mitt emot varandra på olika sidor om jorden, kan sända på samma kanal. En användare på jorden kan aldrig ta emot båda signalerna samtidigt utan endast en av satelliterna i samma par kommer vara synlig vid en tidpunkt.

Precis som för GPS genomgår GLONASS en modernisering där varje nytt satellitblock adderar nya funktioner som längre livslängd på satelliter och nya signaler. På sikt ska GLONASS gå till att främst sända CDMA-signaler som alla andra GNSS [34, 35].

4.2.2 Marksegment

Marksegmentet kontrollerar GLONASS och bevakar till exempel satellitbanor och tids- och frekvensparametrar. Marksegmentet övervakar även hälsostatus på alla satelliter och skickar upp korrektionsdata för både satelliterna och navigationsmeddelandet. Centren för systemkontroll, central synkronisering och faskontroll ligger i Moskva. Det finns även så kallade TT&C-stationer (telemetry, tracking and command), monitoreringsstationer och avståndsmätare med laser [33].

Fram tills för ett par år sedan fanns hela GLONASS marksegment i Ryssland eller i länder som tillhörde forna Sovjetunionen. Det har varit ett stort problem för GLONASS då problem med satelliterna endast kunde upptäckas när de var synliga från Ryssland [33]. Sedan ett par år tillbaka har Ryssland slutit avtal med länder som Brasilien, Kina, Venezuela och Indien för att sätta upp mätstationer på deras territorium [36, 37, 38, 39].

4.3 Öppna signaler

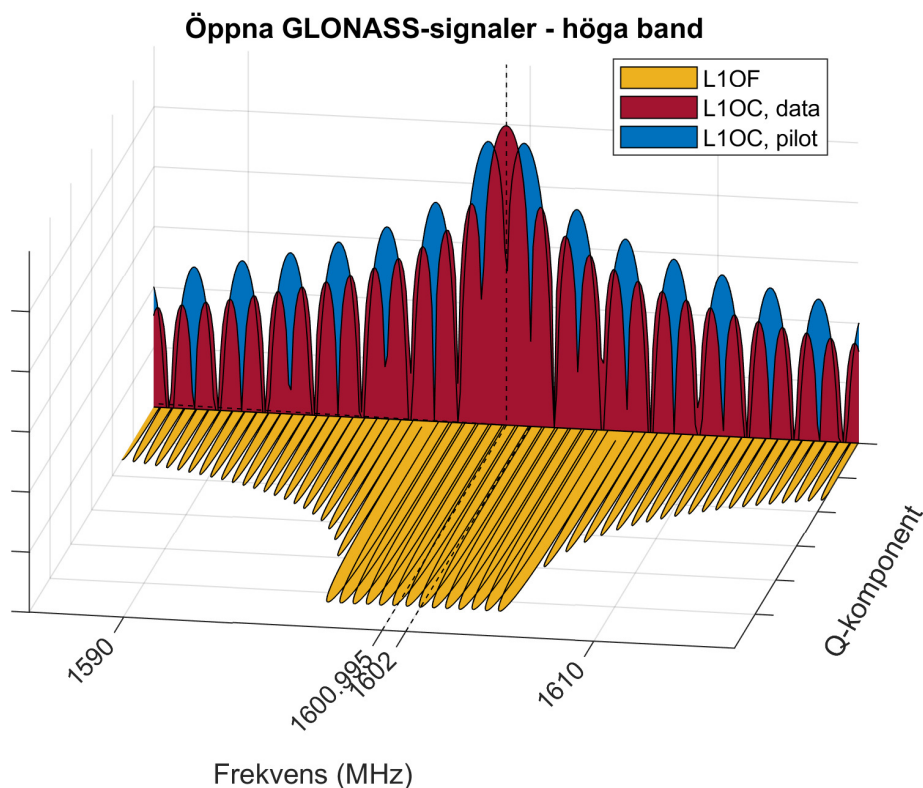
GLONASS består idag av två öppna signaler, L1OF och L2OF. En tredje signal L3OC sänds på ett flertal satelliter i konstellationen men är ännu inte för publik användning. Två till signaler, L1OC och L2OC, är planerade och sänds idag av en satellit [27]. Dessa signaler sammanfattas i Tabell 4.2.

För ett par år sedan ändrades namnkonventionen av GLONASS öppna signaler. De två första tecknen beskriver vilket frekvensband signalen sänds på. O och S står för *Open*, öppen signal, respektive *Secure*, säker och krypterad signal. F anger signaler som använder FDMA-teknik och C är för signaler som använder CDMA-teknik [1]. Tidigare användes namnen C/A och P för öppna respektive krypterade signaler.

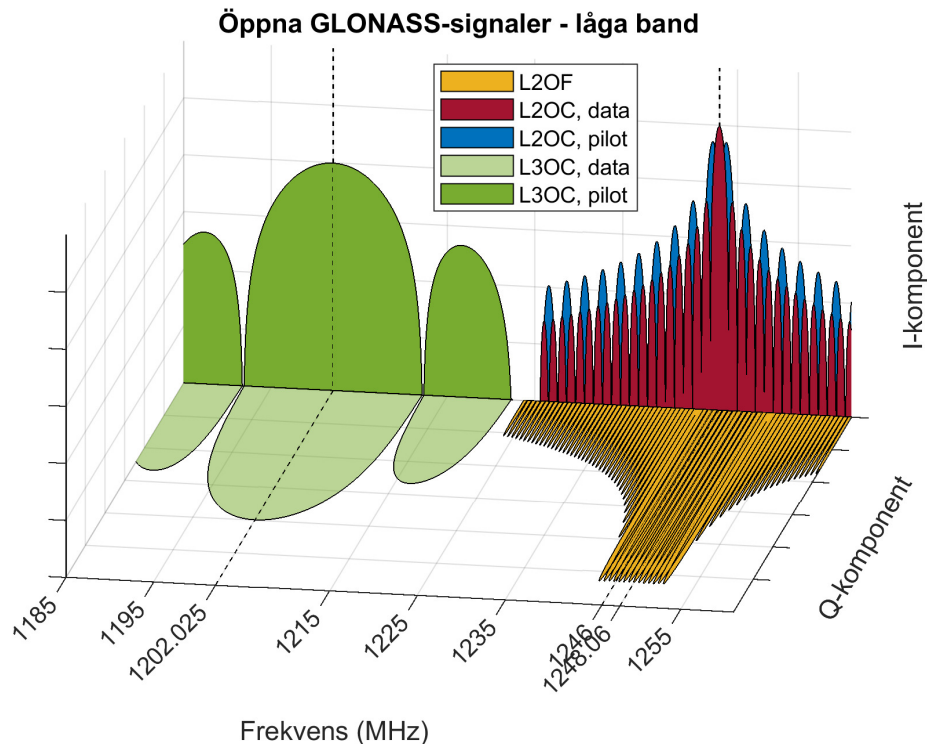
Open Service beräknas att som minst ge ett positionsfel på 1,4 meter med Glonass-M-satelliter. För Glonass-K sjunker felet till 0,5 meter och med Glonass-K2 förväntas felet bli ännu lägre [40]. Alla signaler i de respektive banden går att se i Figur 4.1 och Figur 4.2.

Tabell 4.2: Översikt över de öppna GLONASS-signalerna. Informationen för signalerna L3OC, L1OC och L2OC är preliminär [1].

Signal	Centerfrekvens	Bandbredd	Modulationstyp
L1OF	1598,0625–1605,375 MHz	$\pm 0,511$ MHz	BPSK(0,511 MHz)
L2OF	1242,9375–1248,625 MHz	$\pm 0,511$ MHz	BPSK(0,511 MHz)
L3OC	1202,025 MHz	Ej angivet	BPSK(10)
L1OC	1600,995 MHz	Ej angivet	BOC(1,1), BPSK(1)
L2OC	1248,06 MHz	Ej angivet	BOC(1,1), BPSK(1)



Figur 4.1: De öppna GLONASS-signalerna i de höga GNSS-bandet.



Figur 4.2: De öppna GLONASS-signalerna i de låga GNSS-bandet

4.3.1 L1OF och L2OF

L1OF och L2OF är de civila signaler som sänds i frekvensbanden L1 och L2. Även om benämningen för frekvensbanden är samma som för GPS skiljer sig definitionerna. I och med att de använder FDMA-teknik sänds signalen med samma kod av alla satelliter på olika bärfrekvenser: 1598,0625–1605,375 MHz med 0,5625 MHz mellanrum i L1-bandet och 1242,9375–1248,625 MHz med 0,4375 MHz mellanrum i L2-bandet [1].

L1OF är en del av den ursprungliga signalplanen för GLONASS och var fram till införandet av L2OF den enda civila GLONASS-signalen. L2OF började sändas med Glonass-M-satelliter och sänds idag av alla aktiva satelliter [27]. Förutom att signalerna sänds på olika frekvensband är designen av signalerna densamma. Det som gör L1OF och L2OF unika bland GNSS-signaler är att deras bärfrekvens inte är en multipel av 1,023 MHz [1].

Båda signalerna är BPSK-modulerade och har en bandbredd på $\pm 0,511$ MHz. Sättet som signalen är designad på gör att den både ger mindre noggrannhet i en positionslösning och är mer känslig för interferens i bandet jämfört med GPS C/A. Navigationsmeddelandet som adderas till signalerna har idag en sändningstid på två och en halv minut men det har funnits planer på att ändra uppbyggnaden av navigationsmeddelandet [1].

Mottagare

Näst intill alla multi-GNSS-mottagare tar idag emot och använder GLONASS L1OF. Även de flesta flerfrekvensmottagare tar emot L2OF som till exempel u-blox F9P-modul [20] och TOPGNSS TOP-F906 [41].

4.3.2 L3OC

Den tredje civila GLONASS-signalen är L3OC. L3OC sänds på ett för GLONASS nytt frekvensband, L3, med en bärfrekvens på 1202,025 MHz. Som namnet indikerar sänds

signalen med CDMA-teknik. Den första satelliten att sända signalen var en Glonass-K-satellit som sköts upp 2011. Sedan 2014 sänder även alla nya Glonass-M-satelliter signalen för att snabba på systemets användning av CDMA [27]. Idag sänder mer än hälften av GLONASS satelliter L3OC [28].

L3OC består av två BPSK(10)-signaler som är fasvridna 90 grader mot varandra med en pilotkomponent och en datakomponent. Båda signalerna har samma signalstyrka [42].

Nuvarande navigationsmeddelande från GLONASS är anpassat för en konstellation på 24 satelliter. Det finns plats för att skicka data om fler satelliter läggs till men varje extra satellit ökar tiden för navigationsmeddelandet. Därför kommer antagligen L3OC att kunna sända en annan meddelandestruktur som kan skicka data för fler satelliter [1, 43].

Mottagare

Idag finns inga mottagare som använder GLONASS L3OC.

4.3.3 L1OC och L2OC

L1OC och L2OC ska bli de nya civila signalerna på GLONASS L1, med en bärfrekvens på 1600,995 MHz, respektive L2, med en bärfrekvens på 1248,06 MHz. Den första satelliten att sända signalerna är den första Glonass-K2-satelliten som skickades upp 2023. Tanken är att även framtida Glonass-K-satelliter ska sända L2OC [34, 44].

Båda signalerna är fasvridna 90 grader mot den militära CDMA signalen som ska sändas på samma bärfrekvens [45, 46]. De består båda av en datakomponent och en pilotkomponent som med hjälp av tidsmultiplex turas om att sändas. Båda datakomponenterna är BPSK(1)-signaler och båda pilotkomponenterna är BOC(1,1)-signaler [1].

Meddelandestrukturen för navigationsmeddelanden på datakomponenten av L1OC finns publicerade [45]. L2OC kallas i officiella källor för L2 CSI, *Channel for Service Information*, och meddelandestrukturen finns inte publicerad [46].

Mottagare

Idag finns inga mottagare som använder GLONASS L1OC och L2OC.

5 Galileo

Galileo är det globala satellitnavigeringssystem som drivs av Europeiska unionen genom myndigheterna Europeiska rymdorganisationen (ESA) och Europeiska unionens rymdprogrambyrå (EUSPA). Tanken med Galileo är att det, till skillnad från andra globala satellitnavigeringssystem, ska vara ett civilt system under civil kontroll samt att det ska öka Europas självständighet [47].

Detta kapitel presenterar Galileo ur ett historiskt och arkitektoniskt perspektiv i avsnitt 5.1 och avsnitt 5.2. Öppna signaler och tjänster presenteras i avsnitt 5.3 respektive 5.4.

5.1 Historik

Det som kom att bli Galileo-programmet fick sin start i början av 90-talet då Europeiska kommissionen började undersöka fördelarna med att ha ett civilt satellitnavigeringssystem. Några år senare resulterade det i att kommissionen presenterade två program, varav ett skulle mynna ut i ett tilläggsystem för befintliga GNSS och ett i vilket kommissionen mer konkret skulle verka för ett nytt satellitnavigeringssystem. Det första programmet utvecklades till *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) [47].

Till en början var tanken med det andra programmet att EU med sina globala samarbetspartners skulle driva fram ett nytt system men den idén övergavs inom loppet av ett par år. År 1999 kom resolutionen som skulle starta Galileo-programmet. Systemet skulle vara klart och fullt operativt år 2008 [47].

Sedan projektets start har ett stort problem för länderna i EU varit att bestämma hur projektet ska finansieras. Innan USA stängde av *Selective Availability* på C/A-signalen var finansieringsmodellen att ta betalt för en mer noggrann öppen signal än vad GPS erbjöd. Det fanns också planer från början att systemet skulle finansieras tillsammans med privata aktörer. Till slut bestämdes det att medlemsländerna skulle finansiera projektet. Vilket land som ska leda projektet och vilka länders industrier som ska utveckla olika delar av systemet har det också tvistats mycket om [48].

År 2006 sköts den första testsatelliten upp vid namn GIOVE-A och två år senare GIOVE-B. Det var viktigt att få upp den första testsatelliten i tid för att sända på de frekvenser Galileo reserverat hos ITU [1]. IOV-satelliter (in-orbit validation) började skjutas upp 2011 för validering av systemetkonceptet. 2014 sköts den första FOC-satelliten (full operational capability) upp [49]. En översikt av de olika generationerna av Galileo-satelliter kan ses i Tabell 5.1.

Sedan Galileo-programmets start har fokus varit på interoperabilitet med USAs GPS och 2004 skrevs ett samarbetsavtal. Detta samarbete har främst påverkat hur signalplanen sett ut, bland annat har Galileo ändrat designen på sin krypterade signal [47, 1].

Tabell 5.1: Översikt över de olika generationerna av Galileo-satelliter. [50]

Block	Operativa	Lyckade uppskjutningar	Uppskjutningsperiod	Planerade
GIOVE	0 (sista 2012)	2	2005-2008	2
IOV	3	4	2011-2012	4
FOC	20	23	2014-	34 (10 kvar)
G2G	0	0	?	12

5.2 Arkitektur

Galileo består av ett rymdsegment, ett marksegment och ett användarsegment. Användarsegmentet består av de civila och krypterade mottagare som har en inbyggd Galileo-mottagare.

5.2.1 Rymdsegmentet

Galileo är designat att bestå av 30 MEO-satelliter på 23 222 kilometers höjd. Satelliterna ska vara jämnt fördelade i tre orbitalplan med en reservsatellit per plan. Systemet är designat för att ge bättre täckning än till exempel GPS på högre latituder [1]. Omloppstiden för satelliterna är ungefär 14 timmar. För närvarande finns 22 FOC-satelliter och fyra IOV-satelliter i omlopp [49]. De sista satelliterna i Galileos första generation av satelliter är klara och väntar på uppskjutning [51].

Uppskjutningar av nya satelliter har stått stilla sedan Rysslands invasion av Ukraina, eftersom Galileo-satelliterna sköts upp från Ryssland innan invasionen, med Soyuz-raketer. Tanken var då att den franska raketen Arienne-6 skulle användas men inga uppskjutningar har kunnat genomföras då raketen är mycket försenad. I slutet av 2023 meddelade Europeiska kommissionen att den nya planen är att amerikanska SpaceX ska skjuta upp fyra Galileo-satelliter [52].

En andra generations Galileo-satelliter, kallade G2G, beställdes av ESA år 2021. Satelliterna kommer att vara mer avancerade än sina föregångare och förhoppningen är att de ska leda till bättre noggrannhet och robusthet. Med helt digitala nyttolaster kommer satelliterna att kunna omkonfigureras i omloppsbanan. Det gör att det blir möjligt att addera nya funktioner utan att skicka upp nya satelliter [53].

5.2.2 Marksegmentet

Galileos marksegment har två huvudkontrollcenter med olika funktion. *Ground Control Segment* (GCS) ligger i Oberpfaffenhofen i Tyskland och har som uppgift att sköta konstellationen i rymden. *Ground Mission Segment* (GMS) är i Fucino i Italien och tillhandahåller navigationsdata. I framtiden ska båda centren kunna utföra samma uppgifter för att skapa robusthet i marksegmentet. På båda platserna finns faciliteter som säkerställer att satelliternas klockor har korrekt tid [54].

Förutom huvudkontrollcentren finns två TT&C-stationer, ett antal upplänkstationer och sensorstationer runt om i världen, varav en är i Sverige på rymdbanan Esrange, se kartan i Figur 5.1 [54]. Ett nytt moderniserat marksegment är beställt för att kunna kontrollera andra generationens Galileo-satelliter [55].

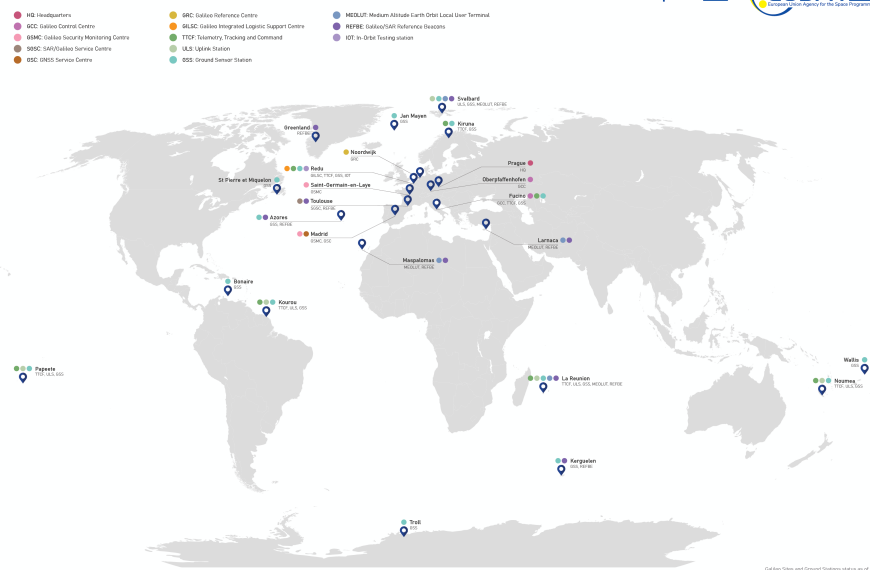
5.3 Öppna signaler

Galileo består idag av fyra öppna signaler E1-OS, E6 och E5 som är uppdelad på två signaler, E5a och E5b, se Tabell 5.2. Alla signaler i de respektive banden går att se i Figur 5.2 och 5.3.

Tabell 5.2: Översikt över de civila Galileo-signalerna. Alla angivna bandbredder är mottagarbandbredd [1].

Signal	Centerfrekvens	Bandbredd	Modulationstyp
E1-OS	1575,42 MHz	24,552 MHz	MSB(6,1,1/11)
E6-OS	1278,750 MHz	40,920 MHz	BPSK(5)
E5	1191,795 MHz	51,150 MHz	AltB(15,10)
E5a	1176,450 MHz	20,460 MHz	QPSK(10)
E5b	1207,140 MHz	20,460 MHz	QPSK(10)

Galileo Sites and Ground Stations



Figur 5.1: Karta över Galileos marksegment. Källa: © EUSPA 2021-2024

5.3.1 E1

Signalen E1-OS har samma bärfrekvens (1575,42 MHz) som GPS C/A-signal för ökad interoperabilitet med GPS. E1-OS är en MBOC(6,1,1/11)-signal som är implementerad som CBOC-signaler på signalens pilot- och datakomponent. I dokumentationen benämns dessa komponenter som E1-C och E1-B. Komponenterna sänds med samma effekt [1, 56].

E1-B skickar navigationsdata med meddelandestrukturen I/NAV. Den är designad för att snabbt kunna behandlas i flerfrekvensmottagare med signalen E5b som har samma meddelandestruktur [56]. Meddelandestrukturen har uppdaterats två gånger för att öka robustheten och minska tiden det tar för mottagare att få en första positionslösning [57]. Mottagarbandbredden för E1-OS är 24,552 MHz.

5.3.2 E6

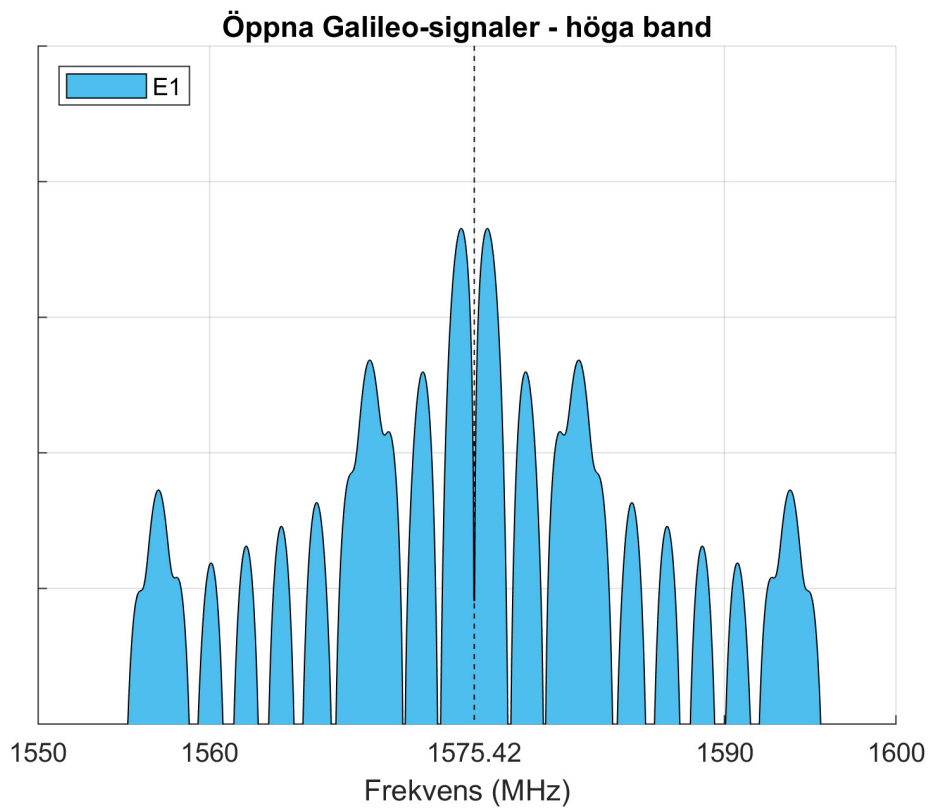
Signalen E6 är en BPSK(5) modulerad signal som har bärfrekvensen 1278,750 MHz. Även denna signal består av en pilot- och datakomponent som i dokumentationen benämns som E6-C och E6-B. Komponenterna delar lika på signaleffekten [1, 56].

Datakomponenten E6-B skickar data med meddelandestrukturen C/NAV. Datatakten på E6-B är fem gånger högre än för andra Galileo-signaler [1]. Pilotkomponenten E6-C är krypterad för användning i autentiseringstjänster [56].

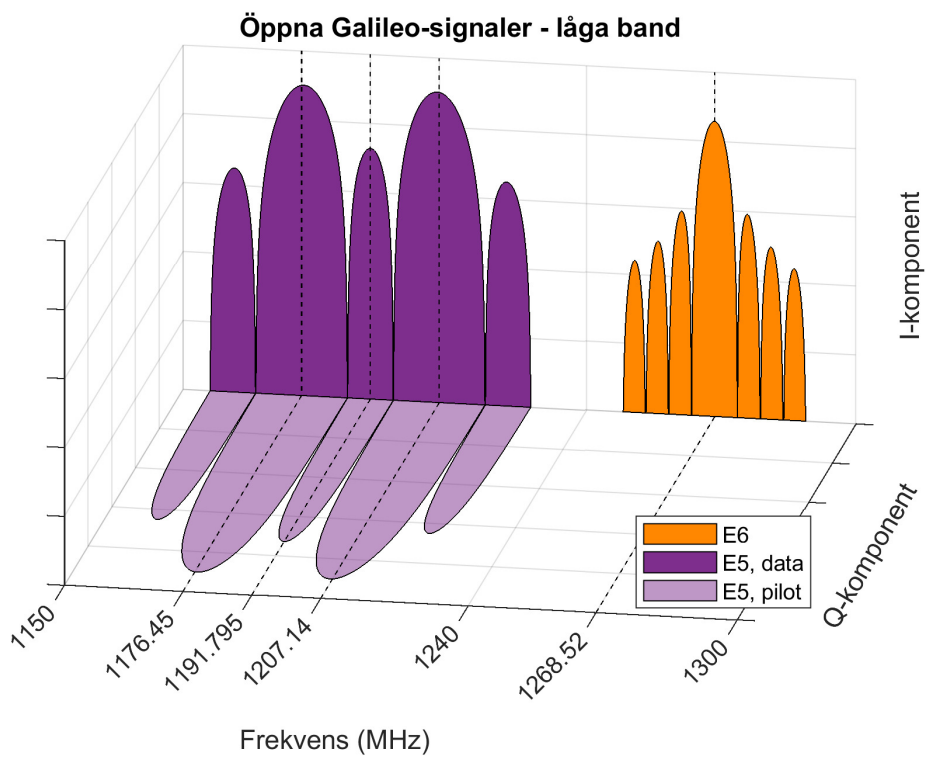
5.3.3 E5

E5 är en AltBOC(15,10)-signal på bärfrekvensen 1191,795 MHz som kan ses både som en signal och tre signaler samtidigt. De två sub-signalerna är E5a och E5b som båda är QPSK(10)-modulerade. AltBOC-modulationen gör att mottagare kan behandla E5 som en hel signal, E5a och E5b som två separata signaler eller bara en sub-signalerna. Både E5a och E5b har var sin pilot- och datakomponent [1, 56].

E5a är designad för att fungera bra med GPS-konstellationens L5-signal samt andra signaler på samma bärfrekvens. Meddelandestrukturen i datameddelandet skiljer sig från den som används i andra Galileo-signaler och kallas för F/NAV. E5b har samma meddelandestruktur som i E1-B, I/NAV [1].



Figur 5.2: De öppna Galileo-signalerna på de höga GNSS-banden med signalernas centerfrekvens utmarkerad.



Figur 5.3: De öppna Galileo-signalerna på de låga GNSS-banden med signalernas centerfrekvens utmarkerad.

5.4 Tjänster

Detta avsnitt beskriver de tjänster som Galileo tillhandahåller. Även planerade tjänster beskrivs. Det finns även en krypterad tjänst vid namn *Public regulated service* (PRS) som är tänkt att användas av myndigheter och militären.

5.4.1 Open Service

Galileo Open Service (OS) är definierad som en kostnadsfri tjänst med global täckning för avstånds-, positions- och tidsbestämmande. OS-signalerna sänds på två av de tre frekvensbanden som Galileo-satelliterna sänder på: E1, E5a och E5b. Det gör att följande tjänster stöds av OS:

- Avståndsbestämning med en eller flera frekvenser.
- Positionsbestämning med en eller flera frekvenser.
- Bestämning av UTC-tid.

OS-signaler kan användas av mottagare i enfrekvensläge, *single-frequency* (SF), eller tvåfrekvensläge, *dual-frequency* (DF). I SF använder en mottagare endast en av de tre signalerna E1-OS, E5a eller E5b för positionering. I DF används E1-OS och en av signalerna på E5. Användningen av två frekvenser leder generellt till bättre prestanda för användaren då jonosfärens effekt på signalerna kan mätas direkt av mottagaren och kompenseras för.

Galileo OS är byggt för att vara interoperabelt med GPS men fungerar även med öppna signaler från andra GNSS. Det gör att användaren har tillgång till fler satellitsignaler och en säkrare positionslösning [58]. OS ska som minimum ge användare följande prestanda:

- Avståndsmätningen mot en satellit ska ha ett fel på max 7 meter 95 % av tiden.
- Avståndsmätning över alla satelliter ska ha ett fel på max 2 meter 95 % av tiden.
- Användare ska 90 % av tiden ha tillgång till OS med ett maximalt positionsfel på 7,5 meter i horisontalled och 15 meter i vertikalled. Det gäller för både SF och DF och mottagaren måste följa minst fyra satelliter som ligger fem grader över horisonten.
- Bestämning av UTC-tid ska vara tillgängligt 95 % av tiden både för SF och DF och får maximalt ha ett tidsfel på 41 nanosekunder. Mottagaren måste följa minst en satellit fem grader över horisonten.

Mottagare

Antalet mottagare som använder Galileo OS har ökat de senaste åren. Moderna mobiltelefoner använder Galileo OS i sin positionslösning och de flesta moderna civila mottagare tar emot signalen på E1-frekvensen.

5.4.2 High Accuracy Service

High Accuracy Service (HAS) är en tjänst som gör det möjligt för användare att beräkna sin position med en så kallad *Precise Point Positioning* (PPP). Användaren får informationen till PPP-algoritmen genom E6-B eller via internet [59]. Galileo har definierat två servicenivåer för HAS. Servicenivå 1 (SL1) ska med global täckning ge korrigeringar för Galileo E1, E5b, E5a, E6 och E5 samt GPS L1, L5 och L2C. Korrigeringsinformationen innehåller rättning av satellitomloppsbanor och satellitklockor i utsända efemerider och satellitbiasar.

Servicenivå 2 (SL2) som ska täcka Europa, inkluderar allt från servicenivå 1 och atmosfärsdata samt ska ha en kortare konvergenstid. Båda servicenivåerna ska ge en positionsnoggrannhet på 20 centimeter i horisontalld och 40 centimeter i vertikallad [60].

HAS är tänkt fylla hålet i prestanda mellan den meterprecision som fås med Galileo OS och den centimeter- eller millimeternoggrannhet som kommersiella aktörer i mer nischade marknader kan ge. Tidigare har marknaderna för mer noggrann data varit relativt liten men med utvecklingen av autonoma fordon, obemannade farkoster och robotar kommer den att växa [61].

Tjänsten är för närvarande i ett utvecklingsstadium (Initial Service) och har endast uppnått SL1 med lösare krav på prestanda [62]. Tidigare beräknades HAS vara i full drift under 2024 men det är i nuläget oklart när det faktiskt sker [61, 63].

Mottagare

För närvarande finns det ett fåtal mottagare som kan ta emot E6-signalen men fler kommer att komma de närmaste åren. Bland annat har Hemisphere tagit fram två kort, Vega och Phantom, som kan ta emot signalen och Google har genomfört tester med HAS-algoritmen och Androidtelefoner [64, 65]. Septentrio har några mottagarkort som till exempel mosaic-T som är tänkt till fordon och automation [66]. Andra tillverkare är EOS Positioning Systems med sin Arrow Gold+ och ComNav med K8-serien [67, 68].

5.4.3 Galileo Open Service Navigation Message Authentication

Galileo Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA) är en autentiseringstjänst som Galileo använder för att öka systems robusthet mot vilseledning. GNSS kan generellt autentiseras på två sätt, antingen genom att autentisera datameddelandet i GNSS-signalen eller genom att autentisera avståndet till satelliterna. Med OSNMA autentiserar Galileo OS datameddelandet genom att lägga in delar i meddelandet som inte kan predikteras av en fientlig aktör. OSNMA ska ses som ett komplement till den planerade tjänsten *Commercial Authentication Service* (CAS) [69].

OSNMA sänds i I/NAV meddelandet på E1-B och använder ett autentiseringsprotokoll som heter *Timed-Efficient Stream Loss-Tolerant Authentication* (TESLA). Autentiseringen består av tre delar, en *TESLA Chain Key*, en tag och en *TESLA Root Key*. I mottagare som kan använda OSNMA verifieras *TESLA Chain Key* och *TESLA Root Key* med nycklar i mottagaren som sedan tillsammans med data i I/NAV-meddelandet beräknar en tag. Tagen jämförs med den tag som sändes i E1-B och om de överensstämmer är signalen en autentisk Galileo-signal. Nycklar till OSNMA-mottagare distribueras av European GNSS Service Centre (GSC) som driver OSNMA-tjänsten [69].

Mottagare

Ett flertal företag så som Safran och Spirent stödjer testning för OSNMA [70, 71]. Hittills har Septentrio annonserat att deras mottagare PolaRX5 GNSS reference receiver ska stödja OSNMA [72]. Rokuban har annonserat ett OSNMA-bibliotek som ska kunna användas i inbyggda system [73].

5.4.4 Search and Rescue

Search and Rescue hänvisar till att Galileo är en del av Cospas-Sarsat-systemet som tar emot nödrop från personer som befinner sig på platser utan mobiltäckning. Galileo-satelliterna har speciella mottagare som tar emot signalen, lokaliserar personen i nöd och skickar sedan vidare informationen till räddningscentral. Sedan 2020 får den

som skickat nödsignalen ett meddelande genom Galileo att deras nödrop har kommit fram [74].

5.4.5 Commercial Authentication Service

Commercial Authentication Service (CAS) ska genom att ge tillgång till den krypterade pilotkomponenten av signalen E6, E6-C, göra det möjligt att autentisera mottagna Galileo-signaler. CAS ska på signalnivå ge *Spreading Code Authentication* (SCA) vilket ger ökat skydd mot vilseledning, i synnerhet repeterstörning [75]. CAS ligger några år efter i utvecklingen jämfört med HAS och OSNMA då utvecklingen av de senare har haft högre prioritet. Någon detaljerad beskrivning av hur tjänsten faktiskt kommer att se ut finns i nuläget inte. Under 2024 förutses det att en initial tjänst vid namn ACAS ska lanseras som första steg till en fullt utvecklad tjänst [76].

Assisted Commercial Authentication Service (ACAS) ska använda både E6-C och OSNMA för att autentisera Galileo. Användandet av OSNMA kommer göra det möjligt att dekryptera E6-C-signalen utan att behöva lagra någon hemlig nyckel. Med ACAS kommer fragment, kodsekvenser, av den krypterade E6-C-signalen att omkrypteras med TESLA-nycklar enligt OSNMA-protokoll i E1-B-signalen. Dessa omkrypterade kodsekvenser kommer att kunna laddas ner från till exempel GSC och dekrypteras med en TESLA-nyckel. De dekrypterade kodsekvenserna jämförs med tidigare kodsekvenser från E6-C-signalen för att fastställa om den är autentisk eller inte [77].

Mottagare

För närvarande finns det inga mottagare på marknaden som stöder CAS eller ACAS.

6 BeiDou

BeiDou Navigation Satellite System (BDS) är ett globalt satellitnavigeringssystem som ägs av Kinas nationella rymdstyrelse (CNSA). Det har tidigare gått under namnet *Compass Navigation Satellite System* (CNSS). Detta kapitel beskriver utvecklingen av BeiDou i avsnitt 6.1, dess arkitektur i avsnitt 6.2 samt dess civila signaler och tjänster i avsnitt 6.3 och 6.4.

6.1 Historik

Under mitten av 1980-talet började Kina utveckla ett eget satellitnavigeringssystem efter att det visade sig att USA hade en stor fördel på slagfältet på grund av sitt navigeringssystem GPS. Dessutom ville Kina redan då inte vara beroende av USA [78]. Under 80- och 90-talen hade Kina stora problem med uppskjutning av satelliter och vände sig till USA och Europa för teknisk hjälp. Detta ledde till att Kinas teknikutveckling inom området tog ett kliv framåt, men också till att USA år 1999 förbjöd export av teknik och information efter att känslig information läckt till Kina. Kina ingick år 2004 ett partnerskap med EU och väntades bidra med 200 miljoner euro till Galileo-projektet, som var kraftigt försenat. EU såg ingen risk med detta utan bara ett sätt att finansiera ett civilt GNSS-projekt som kunde mäta sig med GPS och GLONASS. EU visste att Kina parallellt utvecklade ett militärt GNSS, men när det stod klart att detta även skulle ha en civil del som konkurrerar med Galileo avbröts samarbetet 2010. Då hade Kina redan fått tillgång till europeiskt teknik, i synnerhet de atomur som håller tiden i satelliterna [79].

Första generationens BeiDou-system, BeiDou-1, började skjutas upp år 2000 och bestod då endast av tre satelliter i geostationär bana och täckte därför endast Kina med omnejd. Den sista satelliten från BeiDou-1 togs ur bruk år 2012 då BeiDou-2 blev operativt. Med BeiDou-2 utökades täckningen till Asien och stillahavsområdet och då tredje fasen, BeiDou-3, stod klar 2020 fick BeiDou global täckning. En översikt över de tre generationerna BeiDou-satelliter finns i Tabell 6.1.

Tabell 6.1: Översikt över de olika generationerna av BeiDou-satelliter [80, 81]. Observera att som förväntad livslängd på satelliterna anges de siffror som oftast förekommer, dock är det svårt att hitta en officiell källa.

Generation	Operativa	Lyckade uppskjutningar	Uppskjutningsperiod	Förväntad livslängd
BeiDou-1	0 (sista 2012)	4	2000-2007	5-8 år
BeiDou-2	15	20	2007-2019	8 år
BeiDou-3	29	31	2015-	12 år

6.2 Arkitektur

BeiDou består precis som andra GNSS av ett rymdsegment, ett marksegment och ett användarsegment, men med några detaljer som skiljer BeiDou från övriga system.

6.2.1 Rymdsegment

Rymdsegmentet består av idag av satelliter från BeiDou-2 och BeiDou-3. Till skillnad från övriga GNSS används tre olika typer av satelliter: geostationära satelliter, geosynkrona satelliter (IGSO) och satelliter i mediumhög omloppsbana. De geostationära satelliterna är placerade längs ekvatorn över Asien på en ungefärlig höjd av 35 786 km. IGSO-satelliterna rör sig på samma höjd som de geostationära satelliterna med en bana som lutar 55°. Detta gör att satelliterna rör sig i en åtta, från

jorden sett. MEO-satelliterna rör sig på en höjd av 21 528 km och har en lutning på 55°, likt bland annat GPS. Inom BeiDou-3 är 35 satelliter tänkta att användas; 27 MEO, fem GEO och tre IGSO [1, 82].

6.2.2 Marksegment

Marksegmentet består av en *Master control station* (MCS) placerad i Peking, tids-synkroniserings- och uppladdningsstationer (TS/US) och övervakningsstationer (MS). MCS tar emot information från de övriga stationerna och använder den för att styra och kontrollera systemet. TS/US mäter satelliternas klockfel och skickar upp navigationsmeddelanden till satelliterna medan MS observerar navigationsmeddelanden och skickar vidare informationen till MCS för bearbetning [83].

Utöver den del av marksegmentet som kontrollerar och övervakar satelliterna, finns det även markstationer som hanterar de olika tjänsterna som BeiDou tillhandahåller. Bland annat finns *BDS operation and control center* (BOCC) och service center för meddelandetjänsten [84], och över 2 200 basstationer för GBAS, *ground based augmentation system* [85].

6.2.3 RDSS

En utmärkande drag för Beidou är *Radio determination satellite system* (RDSS), vilket är en annan positionsbestämningsmetod än övriga GNSS använder. Denna metod lever kvar från när BeiDou var ett regionalt system och idag har BeiDou gått över till samma trilateringsmetod som GPS, GLONASS och Galileo [1]. Det är svårt att hitta information om RDSS eller hur mycket det används, men det verkar leva kvar i BeiDou-3 [86].

RDSS innebär att markstationer (BOCC) skickar ut meddelanden till mottagaren via satelliter med dess position istället för att mottagaren själv beräknar sin position med hjälp av trilaterering. Detta görs genom fyra steg [1]:

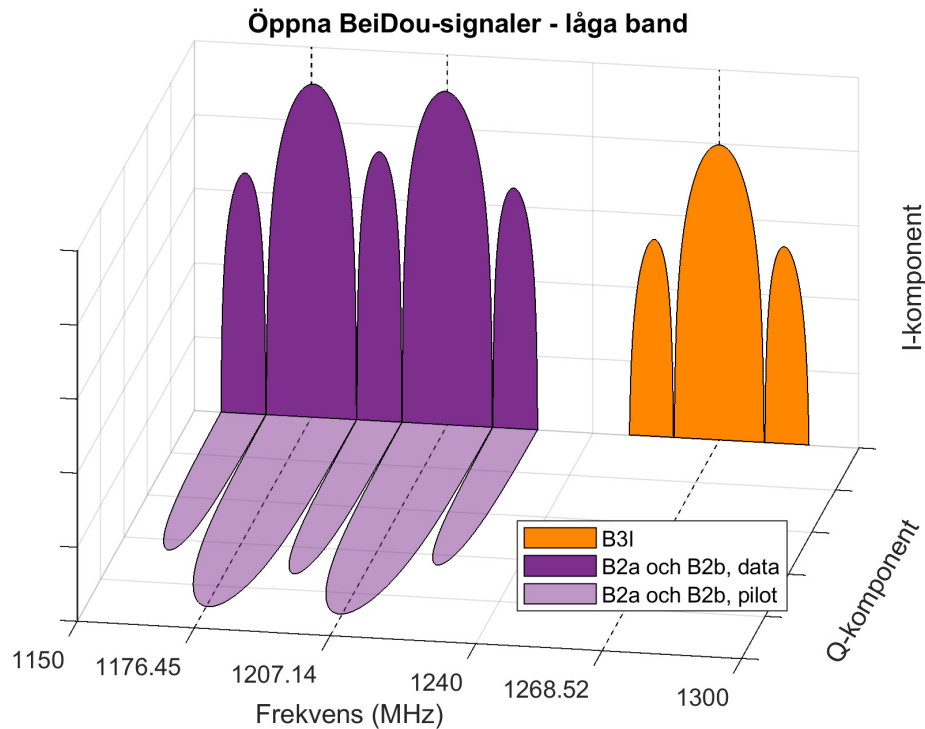
1. Markstation skickar en fråga till mottagaren via en geostationär satellit.
2. Mottagaren svarar genom att skicka sin höjd över marken till markstationen genom minst två olika geostationära satelliter.
3. Markstationen beräknar mottagarens position med hjälp av tidsförskjutningen av signalen mellan satelliterna, satelliternas positioner och en terrängdatabas.
4. Markstationen skickar ett meddelande till mottagaren via satelliten med dess position.

Både frågemeddelandet och svarsmeddelandet kan innehålla information upp till 160 bytes, vilket gör att RDSS har både positions- och kommunikationsmöjligheter. Detta introducerades i BeiDou-1 och har fördelen att det inte behövs lika många satelliter. Nackdelarna är att noggrannheten blir lägre, mottagaren måste konstrueras för att skicka meddelanden och det finns ett begränsat antal användare av systemet. RDSS är planerat att leva kvar i BeiDou-2 och BeiDou-3 [1]. I de senare generationerna av BeiDou finns stöd både för traditionell RDSS samt för *comprehensive RDSS* (CRDSS) som använder RDSS i kombination med den öppna tjänsten för position, navigering och tid [86].

6.3 Öppna signaler

BeiDou har, likt övriga GNSS, en öppen och en krypterad del. Detta avsnitt beskriver de öppna signalerna och deras egenskaper. Samtliga signaler är idag operativa och det finns mottagare på marknaden som tar emot alla öppna signaler.

Alla BeiDous signaler finns inom tre frekvensband som kallas B1, B2 och B3. Med BeiDou-2 introducerades tre civila signaler, B1I, B2I och B3I, vilka alla har



Figur 6.1: De civila BeiDou-signalerna på de låga GNSS-banden.

fått sitt namn på grund av att de är modulerade på I-komponenten av signalen på respektive frekvensband. För bakåtkompatibilitet fortsatte B1I och B3I att sändas även med BeiDou-3. Med BeiDou-3 introduceras ytterligare öppna signaler: B1C, B2a och B2b. En sammanställning av de nu aktiva öppna signalerna finns i Tabell 6.2 samt i Figur 6.1 och 6.2.

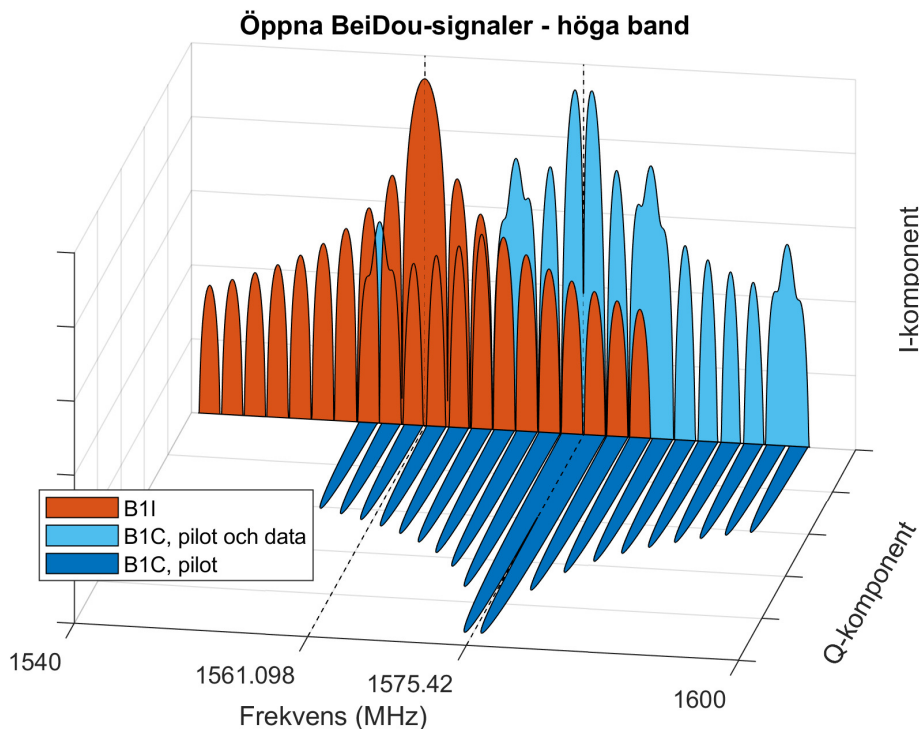
Tabell 6.2: Översikt över de civila BeiDou-signalerna [82, 87, 88, 89, 90]. Observera att bandbredden på B1C-signalen är återgiven som den anges i [88].

Signal	Centerfrekvens	Bandbredd	Modulationstyp
B2a	1176,45 MHz	20,46 MHz	BPSK(10), ACE-BOC(15,10)
B2b	1207,14 MHz	20,46 MHz	BPSK(10)
B3I	1268,52 MHz	20,46 MHz	BPSK(10)
B1I	1561,098 MHz	4,092 MHz	BPSK(2)
B1C	1575,42 MHz	32,736 MHz	BOC(1,1), QMBOC(6,1)

De nya BeiDou-signalerna är designade för att tillgodose krav på hög noggrannhet från användare samtidigt som allt fler produkter även behöver en positionslösning. Hos produkterna är istället kravet att komplexiteten ska vara lägre, med billigare och energisnålare mottagare. Ytterligare krav på de nya signalerna är att vissa signaler ska vara kompatibla med andra GNSS-signaler genom gemensam signalstruktur [5]. De signaler som introducerades med BeiDou-3 delar frekvens med signaler från andra GNSS och detta löses bland annat genom att sprida energin utanför centerfrekvensen samt att utnyttja den gemensamma standarden med olika varianter av BOC-modulation.

6.3.1 Signaler från BeiDou-2 (B1I och B3I)

B1I- och den numera borttagna B2I-signalen hade samma uppbyggnad kring en BPSK-modulerad signal och skiljde sig endast med avseende på centerfrekvens och bandbredd. B3I är också BPSK-modulerad fast med en högre chip-hastighet. B1I, B2I



Figur 6.2: De civila BeiDou-signalerna på det höga GNSS-bandet.

och B1I har samma navigeringsmeddelanden, D1 NAV och D2 NAV. Signalerna har dock olika navigeringsmeddelande och olika datatakt beroende på om signalen sänds från en geostationär satellit eller från någon av de övriga satelliterna.

Mottagare

B1I-signalen tas emot bland annat av u-blox F9 [20] och Novatels OEM7500 [19]. Det är svårt att hitta information om B1I i mottagare från väst. Sannolikt är den vanligare i kinesisktillverkad teknik.

6.3.2 B1C

Eftersom B1-signalen har högst frekvens har den också lägst jonosfärsfördröjning vilket betyder att frekvensen är det naturliga valet för en-frekvens-användare. B1C-signalen är designad för att vara användbar både för mottagare som kräver hög noggrannhet och för mottagare med lägre komplexitet eftersom signalen består av en bredbandig och en smalbandig komponent [5].

För att vara kompatibel med GPS L1C och Galileo E1, har B1C samma signaltyp som dessa, det vill säga en MBOC. B1C-signalen består av tre signalkomponenter: BOC(1,1) för datameddelandet, BOC(6,1) för pilotmeddelandet på I-komponenten av signalen och BOC(1,1) för pilotmeddelandet på Q-komponenten, se Figur 6.2. Pilotkomponenterna sätts samman med QMBOC(6,1,4/33) där *Q* står för *quadrature* [88]. Förutom att uppfylla kravet att spektraltätheten är lika, så har QMBOC även fördelen att effekten kan fördelas mellan dess olika signalkomponenter. Navigationsmeddelandet till B1C-signalen benämns B-CNAV1 och har en ramlängd på 18 sekunder [5].

Mottagare

Många moderna mottagare som tar emot på L1-frekvensen tar även emot B1C-signalen, till exempel telefonen Samsung Galaxy S8 från 2017¹.

6.3.3 B2a och B2b

I moderniseringen av BeiDou ersätts B2I-signalen med de nya signalerna B2a och B2b. B2-signalerna har en större jonosfärsfördröjning men om de används tillsammans med B1 fås en stor frekvensdifferens mellan signalerna och det totala positionsfelet blir mindre. B2a/B2b-signalerna fokuserar på hög känslighet, bärvågsmätningar och motståndskraft mot interferens. Signalerna är tänkta att kunna användas tillsammans som en bredbandig signal eller som två separata signaler. Dessa signaler sänds endast från MEO- och IGSO-satelliterna [5]. Båda signalerna är BPSK-modellerade med en chiprate på 10,23 Mbps, se Figur 6.1. B2a-signalen består av data och pilot på I- respektive Q-komponenten av signalen med lika hög effekt. På B2b-signalen finns endast I-komponenten beskriven [82]. Navigationsmeddelandet på B2a kallas B-CNAV-2 och har en ramtid på 3 sekunder [87]. Navigationsmeddelandet på B2b, B-CNAV-3, har en ramtid på 1 sekund [82].

B2a och B2b sänds via en gemensam sändare genom att signalerna läggs samman med en modulering som kallas *asymmetric constant envelope BOC* eller ACE-BOC. Galileo använder en motsvarande teknik som heter AltBOC (alternative BOC), som är ett specialfall av ACE-BOC. Fördelen med ACE-BOC är att effekten i respektive signalkomponent kan sättas oberoende av varandra, eller stängas av [5].

Mottagare

Många mottagare som tar emot GPS L5 tar även emot B2a däribland u-blox F10 [21]. Det finns multifrekvensmottagare likt Novatels högprecisionsmottagare OEM7 [19] som tar emot B2b-signalen.

6.4 Tjänster

BeiDou tillhandahåller sju specifika tjänster till användaren varav tre har global täckning, se Tabell 6.3. Endast några av dessa behandlas i detta avsnitt.

6.4.1 RNSS

BeiDous öppna tjänst för PNT kallas RNSS, *Radionavigation satellite service*, vilket också är namnet på hela de frekvensband där bland andra GNSS-signalerna är allokterade. PNT-lösningen kan använda alla öppna signaler. Enligt [92] ska RNSS bland annat ha följande prestanda förutsatt att vissa villkor är uppfyllda:

- Ett globalt positionsfel (i medeltal) på under 9 meter i horisontalled och under 10 meter i vertikalled 95 % av tiden.
- Ett klockfel hos satelliterna på mindre än 20 nanosekunder 95 % av tiden.

6.4.2 Short message communication

Tjänsten att kunna skicka meddelanden är unik för BeiDou. Infrastrukturen som möjliggör tjänsten, RDSS, finns beskriven i avsnitt 6.2.3. *Short message communication* (SMC) demonstrerades med två geostationära satelliter redan 2003 och byggdes i och med BeiDou-2 ut till regional SMC (RSMC). Denna tjänst hade år 2020 över 500 000 användare [84]. Med BeiDou-3 utökades tjänsten till global

¹Det är möjligt att via android-applikationer se vilka satelliter som telefonen för närvarande använder.

Tabell 6.3: Översikt över de globala och regionala tjänsterna från BeiDou, där signalerna och de satelliter som används är beskrivna [91].

	Tjänst	Signal/band	Sänds via
Globala tjänster	Position, navigering och tid (RNSS)	BI1, B3I	3 GEO, 3 IGSO, 24 MEO
		BIC, B2a, B2b	3 IGSO, 24 MEO
	Global short message communication (GSMC)	Upplänk: L Nedlänk: GSMC-B2b	Upplänk: 14 MEO Nedlänk: 3 IGSO, 24 MEO
	Internationell Search and Rescue (SAR)	Upplänk: UHF Nedlänk: SAR-B2b	Upplänk: 6 MEO Nedlänk: 3 IGSO, 24 MEO
Regionala tjänster	Satellite based augmentation system (SBAS)	BDSBAS-B1C, BDSBAS-B2a	Upplänk: 3 GEO
	Ground augmentation system (GAS)	2G, 3G, 4G, 5G	Telefonnätverk, internet
	Precise point positioning (PPP)	PPP-B2b	3 GEO
	Regional short message communication (RSMC)	Upplänk: L Nedlänk: S	3 GEO

SMC (GSMC). Den använder MEO-satelliterna för upplänken och B2b-signalen från IGSO- och MEO-satelliter för nedlänken. Tjänsten har en kapacitet på 40 kinesiska tecken eller 560 bytes, per meddelande. Den regionala meddelandetjänsten kan skicka 1000 kinesiska tecken per meddelande [93].

Denna funktion har fått kritik internationellt för att dels kunna identifiera användarnas positioner och dels kunna skicka meddelanden till och från mottagarna utan användarens vetskap, potentiellt med datorvirus. Säkerhetsrisken med virus och spioneri tonas ner i [94] eftersom det är okänt hur ett datorvirus skulle kunna överföras via ett navigationsmeddelande och eftersom meddelandet är relativt litet. Angående överföringen av positionsdata hävdar författaren att telefoner redan avslöjar sin position genom uppkoppling till mobilnätet eller med applikationer som *Find my iPhone* och att andra GNSS även kan skicka positionsdata via dess Search and Rescue-funktion.

Denna funktion finns sannolikt inte i enheter som stödjer BeiDou om inte tillverkaren säger att så är fallet. Detta för att det krävs annan hårdvara för att sända signaler, vilket leder till både en högre produktionskostnad och strömförbrukning [94]. Antagligen kommer förmågan att skicka meddelanden byggas ut med fler markstationer. Även möjligheten att komplettera BeiDou med satelliter i låg omloppsbana väntas utvecklas, vilket skulle göra det möjligt att skicka mer data [78].

6.4.3 Search and Rescue

BeiDous Search and Rescue-tjänst (SAR) är en del av det internationella Cospas-Sarsat-systemet, med skillnaden att BeiDou använder tjänsten GSMC för att ta emot nödmeddelanden och skicka bekräftelse om att hjälp är på väg. Detta har, jämfört med övriga system, reducerat antal falsklarm, gett bättre positionsnoggrannhet och kortare responstid enligt Li et al. [84].

7 Tilläggssystem och regionala system

Detta kapitel beskriver vad tilläggssystem är och vilka som finns. En längre beskrivning ges av de som drivs av USA, Ryssland, Europa och Kina. Även de regionala navigeringssystem som drivs Indien och Japan beskrivs.

7.1 Tilläggssystem

Tilläggssystem är rymdbaserade system som med hjälp av markstationer med kända positioner kan mäta avvikelser i utsända signaler. En beräkningscentral producerar korrektionsdata som sedan sänds ut av systemets satelliter. På engelska benämns de som *satellite-based augmentation systems*, förkortat SBAS. Systemen består av geostationära satelliter som följer jordens rotation och befinner sig därav på samma plats på himlen, från jorden sett, hela tiden. SBAS är viktigt för applikationer där hög noggrannhet och robusthet är nödvändigt [95].

Ett flertal SBAS är i drift och fler är under uppbyggnad för att täcka olika delar av jorden. De är:

- USA - Wide Area Augmentation System (WAAS).
- Europa - European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS).
- Japan - Michibiki Satellite Augmentation System (MSAS).
- Indien - GPS-aided GEO-Augmented Navigation (GAGAN).
- Kina - BeiDou SBAS (BDSBAS).
- Sydkorea - Korea Augmentation Satellite System (KASS).
- Ryssland - System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM).
- ASECNA - Augmented Navigation for Africa (ANGA).
- Australien och Nya Zeeland - Southern Positioning Augmentation Network (SouthPAN).

7.1.1 Wide area augmentation system (WAAS)

Wide area augmentation system (WAAS), är utvecklat av den federala luftfartsmyndigheten i USA (FFA) som ett stödsystem till GPS som först aktiverades under år 2003. WAAS består av 38 referensstationer, tre styrstationer varav två är reserv, tre geostationära satelliter och sex markantenner som skickar data till GEO-satelliterna. Denna infrastruktur är placerad runt om i Nordamerika och täcker således inte Europa [96]. I Europa är det istället SBAS-systemet EGNOS som skickar korrektionsdata till GPS.

7.1.2 SDCM

System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM) är ett SBAS som är tänkt att täcka Ryssland. Systemet har varit under utveckling i ett antal år men sedan 2020 har inga nya uppdateringar med information om systemet skett och nuvarande status är okänd [95].

7.1.3 EGNOS

European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), är ett regionalt SBAS över Europa som drivs av EU. Systemet byggdes för att förbättra noggrannheten för GPS och Galileo i Europa. Mätstationer runt om i Europa gör mätningar på

sända GNSS-signaler och dessa skickas till ett beräkningscentrum som tar fram korrekitioner. Dessa korrekitioner sänds sedan ut av geostationära satelliter som befinner sig över Europa [97]. EGNOS är framförallt till för att öka säkerheten för navigering inom flyg och sjöfart. Till exempel har många små flygplatser inte råd med dyra landningshjälpmedel och där kan EGNOS vara till hjälp [98]. EGNOS ska byggas ut för att få en större och bättre täckning i länder runt om Europa [97].

7.1.4 BDSBAS

BeiDou Satellite Based Augmentation System, (BDSBAS) är BeiDous regionala tilläggsystem för att förbättra noggrannheten på positionering över Kina och intilliggande områden. Systemet använder tre GEO-satelliter. Tjänsten har ett enfrekvensläge som använder BDSBAS-B1C och ett tvåfrekvensläge som även använder BDSBAS-B2a [99].

7.2 Regionala system

Två länder har utvecklat regionala satellitnavigeringssystem, Indien och Japan. Indiens system heter *Navigation with Indian Constellation* (NavIC), och byggdes för att Indien inte skulle vara beroende av andra länders GNSS. Systemet består idag av åtta satelliter som täcker Indien och vissa länder runt omkring, målet är att NavIC ska ha tolv satelliter. Positions noggrannheten med NavIC i Indien uppges vara ungefär 10 meter [100].

Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) är Japans regionala system. QZSS består av geostationära satelliter och kvasi-zenitsatelliter, på engelska *quasi-zenith*, och är till för att förbättra tillgängligheten av GPS i Japan. Kvasi-zenitsatelliter oscillerar från norr till söder i en åttaformad bana över Östasien och Oceanien [101]. Lutningen på banan mot ekvatorn är sådan att satelliterna spenderar längre tid över Japan och kortare tid över Oceanien [102]. Systemet sänder både vanliga GPS-signaler och sedan ett par år tillbaka även MSAS korrektionsdata [103].

8 Avslutande reflektioner

På kort tid har marknaden för satellitnavigering gått från att nästan exklusivt använda GPS till att idag bestå av flera konkurrerande system. Under Gulfkriget i början av 1990-talet såg omvärlden vilket övertag amerikanska trupper hade tack vare den då relativt nya GPS-tekniken. Idag ska varje stormakt ha sitt eget GNSS. Dels för att minska sitt beroende av GPS och stärka den egna nationella säkerheten, dels för att dra fördel av den expanderande GNSS-marknaden och inte minst för nationell prestige. Denna kapplöpning har varit till gagn för den civila användaren. Från att förut främst bestå av GPS-mottagare som endast tar emot signalen GPS L1 C/A, går de flesta idag omkring med en multi-GNSS-mottagare i fickan i form av sin mobiltelefon. Alla system erbjuder, eller kommer att erbjuda, öppna signaler på flera frekvenser vilket gör att multikonstellation- och multifrekvensmottagare kommer att bli standard i framtiden.

Stora delar av det civila samhället har idag någon form av beroende av GNSS, antingen för att få noggrann tid eller position. Även i militära applikationer är GPS viktig för genomförande av operationer. Det gör att både civila och militära aktörer är sårbara för störning och vilseledning av GNSS. Idag är avsiktlig störning av GNSS, både i och utanför krigszoner, inget ovanligt och sker under dygnets alla timmar. Det är därför viktigt att användare funderar kring hur deras beroende av GNSS ser ut och hur de kan skydda sig från störning och vilseledning. Det läggs stora resurser på att framtidssäkra systemen för att undvika att de blir obsoleta. Det sker både genom investeringar i det egna systemet men också genom att kombinera GNSS med andra tekniker. De senaste åren har speciellt LEO-PNT, navigering med satelliter i låg omloppsbanan, kommit upp som ett potentiellt alternativ. GNSS används idag tillsammans med andra sensorer för navigering såsom radar, kameror och LIDAR. Hur den här typen av sensorer kan användas i navigeringssystem där en GNSS-mottagare ses som en delsensor är ett stort forskningsområde.

Inom Försvarsmakten är det bestämt att militär GPS ska användas i första hand. Det är dock viktigt att även militära aktörer följer utvecklingen inom civil GNSS och ställer sig frågan om och hur civila mottagare skulle kunna användas. Detta bör dock inte leda till att civila GNSS-mottagare, eller för den delen onycklade militära mottagare, används istället för militär GPS inom Försvarsmakten. Civila mottagare utvecklas i en helt annan takt än militära och många av de nya funktioner och tjänster som finns skulle kunna användas i en militär kontext, speciellt på små plattformar. Nya tjänster som Galileos OSNMA skulle till exempel vara ett alternativ för mindre plattformar för att minska sin känslighet mot vilseledning. Speciellt UAV:er kommer förmodligen att använda civil GNSS en lång tid framöver. I kriget i Ukraina används små UAV:er som engångsartiklar och därför används oftast inte dyrare militära mottagare.

GPS har länge dominerat marknaden men blir nu utmanade från flera håll. Kina har på rekordtid byggt upp ett system som på vissa plan är bättre än GPS, men även privata aktörer spås bli viktiga i framtiden. Samtidigt drabbas alla aktörer av att det blir trängre i frekvensbanden, något man inte minst kan se i Figur 1.1, där endast de öppna signalerna visas. Det blir också trängre i rymden när fler satelliter skickas upp och kasserade satelliter blir till rymdskrot. Komplexiteten i systemen ökar hela tiden vilket gör utveckling och underhåll dyrare. Något som inte minst illustreras av förseningar och fördröjningar i både GPS och Galileos mark- och rymdsegment. Samtidigt är det inte möjligt att gå tillbaka. Dagens samhälle är helt beroende av tid och position och en aktör som erbjuder en sämre lösning blir snabbt utkonkurrerad.

GNSS har länge varit ett politiskt verktyg för både USA och Ryssland, och det har spridit sig till andra regioner i världen när de har utvecklat sina egna system. Till exempel är BeiDou en viktig del i Kinas projekt Nya sidenvägen och Sydkorea och Japan utvecklar individuellt varsitt regionalt tilläggssystem trots att de är grannländer. Risken finns att GNSS blir en ny konfliktomän, med attacker både i cyberdomänen, nedskjutning av satelliter och sabotage mot marksegmenten. Störning mot

motståndarens mottagarutrustning pågår redan i konflikthärda. Samtidigt ökar valfriheten med flera system och nationer blir inte lika beroende av en aktör. Utvecklingen inom området går snabbt framåt och både tillgängligheten, noggrannheten och robustheten ökar för användarna. Vem vet var tekniken kan vara i framtiden när GNSS kombineras med tekniker som LEO-PNT, AI och kvantdatorer.

Referenser

- [1] J. W. Betz, *Engineering Satellite-Based Navigation and Timing*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2016.
- [2] "EUSPA EO and GNSS Market Report," https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/euspa_market_report_2024.pdf, 2024, hämtad: 2024-02-19.
- [3] E. D. Kaplan och C. J. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and applications*. Artech house, inc., 2006.
- [4] T. Stansell *et al.*, "BOC or MBOC? The common GPS/Galileo civil signal design: a manufacturers dialog, part 1," *Inside GNSS*, Juli/augusti 2006.
- [5] M. Lu, W. Li, Z. Yao och X. Cui, "Overview of BDS III new signals," *NAVIGATION*, 2019.
- [6] W. Guier och G. Weiffenbach, "Genesis of satellite navigation," *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 18, nr. 2, s. 178–181, 1997.
- [7] R. B. Langley, "Innovation: Easy peasy, lemon squeezy," *GPS World*, oktober 2012.
- [8] *Navstar Global Positioning system - Projekt management plan*, Department of the Air Force, juli 1974.
- [9] M. S. Braasch, "Another golden anniversary: Navstar, the global positioning system," *IEEE A&E Systems Magazine*, vol. 38, nr. 1, s. 4–12, 2023.
- [10] W. Reynish, "The real reason selective availability was turned off," *Aviation today*, 2020.
- [11] "Official U.S. government information about the global positioning system (GPS) and related topics," <https://www.gps.gov/systems/gps/>, hämtad: 2024-02-28.
- [12] *Report to Congressional Committees. GLOBAL POSITIONING SYSTEM. Better Planning and Coordination Needed to Improve Prospects for Fielding Modernized Capability*, United States Government Accountability Office, december 2017.
- [13] B. Davis, "Washington view: Fiscal 2024 defense budget, continues push for greater GPS capability," *Inside GNSS*, maj 2023.
- [14] A. Decker, "Long-overdue GPS ground stations delayed by pandemic, chinese hardware," *Defence one*, augusti 2023.
- [15] *NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment L1C Interfaces*, MilComm & PNT Directorate, Space Systems Command (SSC), 2022.
- [16] *NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces*, MilComm & PNT Directorate, Space Systems Command (SSC), 2022.
- [17] *NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment User Segment Interfaces*, MilComm & PNT Directorate, Space Systems Command (SSC), 2022.
- [18] "DoT opposes early start for navigation messages on new civil GPS signals," *Inside GNSS*, 2014.
- [19] *OEM7500 Product Sheet, D23295 Version 9*, Novatel, juli 2023.

- [20] "NEO-F9P module," <https://www.u-blox.com/en/product/neo-f9p-module>, hämtad: 2024-02-19.
- [21] *Product summary UBX-F10 series, (UBX-23011131 - R02)*, U-blox, 2024.
- [22] "Vad är GPS?" <https://www.garmin.com/sv-SE/aboutgps/>, hämtad: 2024-04-03.
- [23] J. W. Betz *et al.*, "Enhancing the future of civil GPS - overview of the L1C signal," *Inside GNSS*, 2007.
- [24] M. Petovello, "What is navigation message authentication?" *Inside GNSS*, 2018.
- [25] *Global positioning system standard positioning service performance standard*, Office of the Department of Defense, april 2020.
- [26] "Transition to MEOSAR," <https://www.cospas-sarsat.int/en/system-overview/transition-to-meosar>, hämtad: 2024-03-01.
- [27] "About GLONASS," https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/, hämtad: 2024-02-20.
- [28] "GLONASS OPERATIONAL SATELLITES," <https://www.n2yo.com/satellites/?c=21>, hämtad: 2024-02-20.
- [29] "GLONASS," https://ilrs.gsfc.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/g137_general.html, hämtad: 2024-02-20.
- [30] M. Saines, "Russia launches Glonass-K2 no. 13," *World GPS*, augusti 2023.
- [31] "GLONASS constellation status," <https://glonass-iac.ru/en/sostavOG/>, hämtad: 2024-02-22.
- [32] P. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. Artech House, 2013.
- [33] U. Roßbach, "Positioning and navigation using the russian satellite system GLONASS," Dissertation, Univ. der Bundeswehr München Studiengang Geodäsie und Geoinformation, 2001.
- [34] R. B. Langley, "Innovation: GLONASS — past, present and future," *World GPS*, november 2017.
- [35] I. GNSS, "Third GLONASS-K — the first in six years — to launch in october," *Inside GNSS*, september 2020.
- [36] G. W. Staff, "First GLONASS station outside Russia opens in Brazil," *World GPS*, februari 2013.
- [37] C. Grill, "A GLONASS ground station will appear in Venezuela. The system will become much more accurate on a global level," *Medium*, december 2022.
- [38] T. Cozzens, "India to host GLONASS ground station for Russia," *World GPS*, januari 2019.
- [39] I. GNSS, "Russia will install GLONASS monitoring stations in China; China to reciprocate," *Inside GNSS*, september 2021.
- [40] S. Karutin, "Directions 2023: GLONASS renews its constellation," *World GPS*, januari 2021.

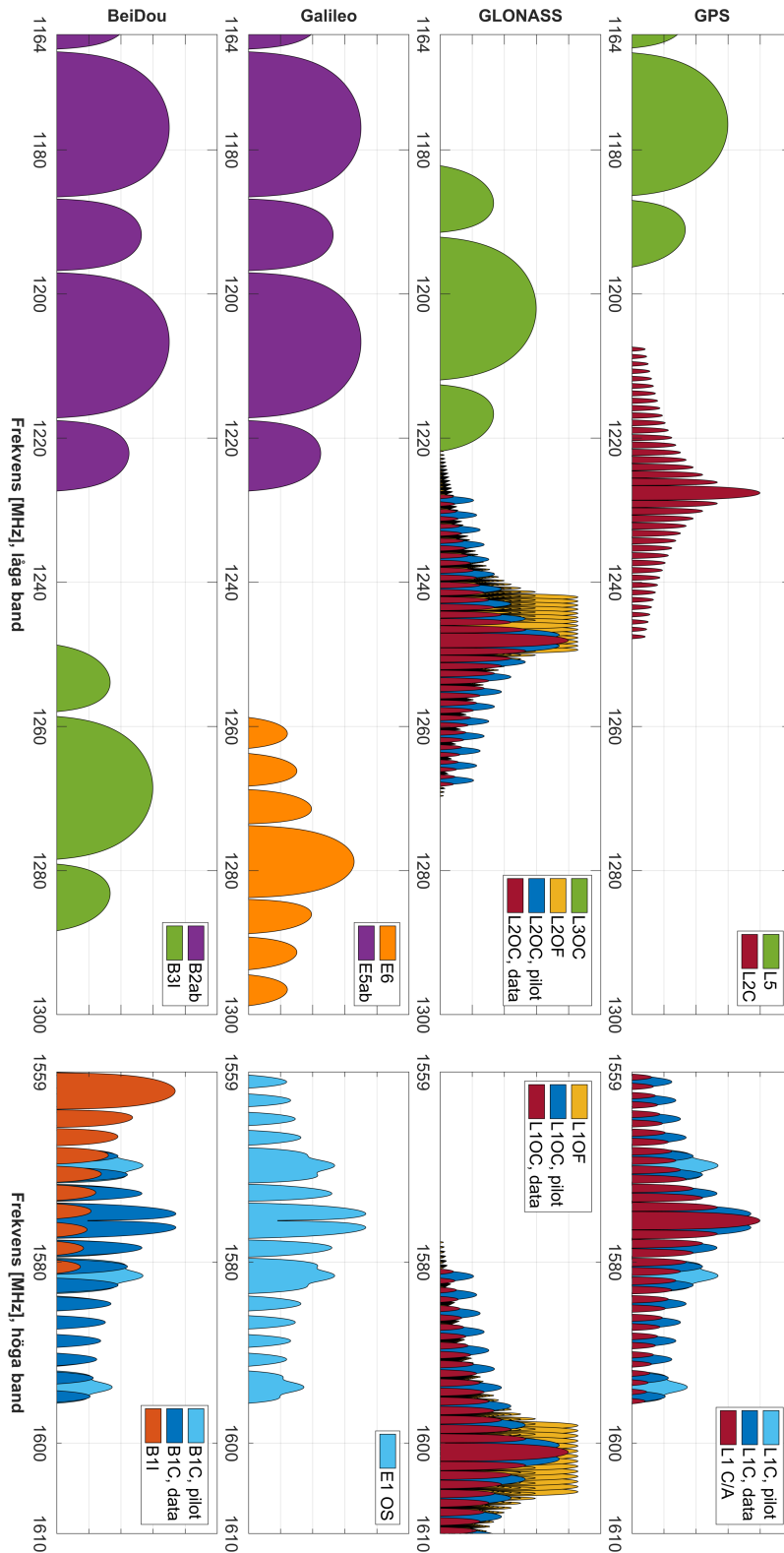
- [41] "RTK high precision GNSS module ZED-F9P," <https://www.topgnss.store/en-fr/collections/gnss-l1-l2-module/products/rtk-high-precision-gnss-module-zed-f9p-module-gnss-board-output-rtcm-nmea-top906-rtk-gps-base-uav-ugv-module-1>, hämtad: 2024-02-19.
- [42] *GLONASS Interface Control Document Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L3 frequency band Edition 1.0*, Russian Space Systems, JSC, 2016.
- [43] G. W. Staff, "New structure for GLONASS nav message," *World GPS*, november 2013.
- [44] S. Karutin, "GLONASS: The decade of transition to CDMA signals," *World GPS*, december 2023.
- [45] *GLONASS Interface Control Document Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L1 frequency band Edition 1.0*, Russian Space Systems, JSC, 2016.
- [46] *GLONASS Interface Control Document Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L2 frequency band Edition 1.0*, Russian Space Systems, JSC, 2016.
- [47] V. Reillon, "Galileo: Overcoming obstacles - history of EU global navigation satellite systems," European Parliamentary Research Service, tekn. rapp. FOA-R-98-00891-201,504-SE, april 2017.
- [48] N. Bonnor, "A brief history of global navigation satellite systems," *Journal of Navigation*, vol. 65, nr. 1, s. 1-14, 2012.
- [49] "Euspa: Programme," <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/programme>, hämtad: 2024-02-27.
- [50] "Evolution," <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/galileo/evolution>, hämtad: 2024-07-02.
- [51] G. Pont, M. Falcone och M. M. Bautista, "Directions 2023: Galileo offers new services," *World GPS*, januari 2023.
- [52] J. Khalil, "EU, SpaceX finalizing plan to launch Galileo satellites," *World GPS*, november 2023.
- [53] "Galileo second generation," https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/05/Galileo_Second_Generation, hämtad: 2024-02-27.
- [54] "Galileo on the ground," https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_on_the_ground, hämtad: 2024-02-28.
- [55] P. Gutierrez, "GMV building Galileo second generation ground segment," *Inside GNSS*, september 2023.
- [56] *Galileo Open Service Signal-In-Space Interface Control Document Issue 2.1*, European Union, 2023.
- [57] *I/NAV Navigation Message Improvements Info Note*, European Union, 2023.
- [58] *Galileo Open Service Service Definition Document Issue 1.3*, European Union, 2023.
- [59] *GALILEO HIGH ACCURACY SERVICE SERVICE DEFINITION DOCUMENT (HAS SDD) v1.0*, European Union Agency for the Space Programme, 2023.

- [60] "Euspa: Galileo high accuracy service HAS," <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>, hämtad: 2024-03-05.
- [61] *Galileo HIGH ACCURACY SERVICE (HAS) Info Note*, European Union Agency for the Space Programme, 2020.
- [62] J. R. Centre, "Europeiska kommissionen: World's most accurate positioning service, Galileo's HAS, goes live," https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/worlds-most-accurate-positioning-service-galileos-has-goes-live-2023-01-24_en, hämtad: 2024-03-05.
- [63] "Galileo HAS days," https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/2.HAS_DAYS_EUSPA_HAS_status-architecture-roadmap.pdf, hämtad: 2024-03-05.
- [64] "Hemisphere: HAS for agriculture and machine control," https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Afternoon_4.Hemisphere.pdf, hämtad: 2024-03-05.
- [65] I. Fattouch och F. van Diggelen, "Google: Evaluation of Galileo high accuracy service (HAS) with android smartphone data," https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Afternoon_5.Google.pdf, hämtad: 2024-03-05.
- [66] "mosaic-t," <https://www.septentrio.com/en/products/gps/gnss-receiver-modules/mosaic-t>, hämtad: 2023-09-13.
- [67] "Comnav's K8 series GNSS modules can track the Galileo E6b signal and has verified the HAS service in most countries," https://www.comnavtech.com/News_details/4.html, hämtad: 2023-09-13.
- [68] "Arrow gold+ and arrow gold RTK GNSS receivers - centimeter-level accuracy worldwide," <https://eos-gnss.com/products/hardware/arrow-gold#gold-plus>, hämtad: 2023-09-13.
- [69] *Galileo Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA)*, European Union Agency for the Space Programme, 2021.
- [70] "Testing a receiver's Galileo OS-NMA capability using Skydel," https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/, hämtad: 2023-09-20.
- [71] T. Cozzens, "Spirent and Qascom collaborate on OSNMA simulation tools for Galileo," *World GPS*, september 2021.
- [72] —, "OSNMA anti-spoofing tech now on PolARx5 GNSS reference receivers," *World GPS*, juni 2022.
- [73] P. Gutierrez, "Rokubun unveils OSNMA library for embedded platforms," *Inside GNSS*, juli 2023.
- [74] "European union agency for the space programme: Search and rescue (SAR) / Galileo service," <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/search-and-rescue-sar-galileo-service>, hämtad: 2024-02-01.
- [75] R. Terris-Gallego, I. Fernandez-Hernandez, J. A. López-Salcedo och G. Seco-Granados, "Guidelines for Galileo assisted commercial authentication service implementation," *2022 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 2022, s. 01–07.

- [76] P. Gutierrez, "Galileo authentication and high-accuracy service: Coming on fast," *Inside GNSS*, juli 2021.
- [77] F. Ardizzon, L. Crosara, N. Laurenti, S. Tomasin och N. Montini, "Authenticated timing protocol based on Galileo ACAS," *Sensors*, vol. 22, nr. 16, 2022.
- [78] S. Seewall, T. Vandenberg och K. Malden, *China's BeiDou: New dimensions of great power competition*. Belfer center for science and international affairs, 2023.
- [79] D. Lague, "Special report: In satellite tech race, China hitched a ride from Europe," *Reuters*, december 2013.
- [80] "Beidou navigation system satellites," <https://www.n2yo.com/satellites/?c=35>, hämtad: 2024-03-13.
- [81] "Test and assessment research center of China satellite navigation office," <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>, hämtad: 2024-03-13.
- [82] *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document - Open Service Signal B2b (Version 1.0)*, China Satellite Navigation Office, 2020.
- [83] *BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (version 3.0)*, China Satellite Navigation Office, 2021.
- [84] G. Li, S. Guo, J. Lv, K. Zhao och Z. He, "Introduction to global short message communication service of BeiDou-3 navigation satellite system," *Advances in Space Research*, vol. 67, nr. 5, s. 1701–1708, 2021.
- [85] *Applications of the BeiDou Navigation Satellite System*, China Satellite Navigation Office, 2018.
- [86] D. Wang, R. Guo, N. Xing, Z. Liu, T. Zhang, H. Ren och X. Li, "Performance analysis of two RDSS positioning modes of BeiDou-3 system," *Astrodynamics*, vol. 6, nr. 3, s. 317–327, 2022.
- [87] *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document - Open Service Signal B2a (Version 1.0)*, China Satellite Navigation Office, 2017.
- [88] *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document - Open service Signal B1C (Version 1.0)*, China Satellite Navigation Office, 2017.
- [89] *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document - Open Service Signal B1I (Version 3.0)*, China Satellite Navigation Office, 2019.
- [90] *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document - Open Service Signal B3I (Version 1.0)*, China Satellite Navigation Office, 2018.
- [91] *The Application Service Architecture of BeiDou Navigation Satellite System (version 1.0)*, China Satellite Navigation Office, 2019.
- [92] *BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (version 3.0)*, China Satellite Navigation Office, 2021.

- [93] *Development of the BeiDou Navigation Satellite System (version 4.0)*, China Satellite Navigation Office, 2019.
- [94] J. Wilson, *China's Alternative to GPS and its Implications for the United States*. U.S.-China Economic Security Review Commission, 2017.
- [95] "What is SBAS?" <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>, 2024, hämtad: 2024-03-26.
- [96] "Satellite navigation - WAAS - how it works," https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks, hämtad: 2024-02-28.
- [97] "European union agency for the space programme: What is egno?" <https://www.euspa.europa.eu/european-space/egnos/what-egnos>, hämtad: 2024-03-04.
- [98] "Europeiska kommissionen: Safety-of-life service," https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/egnos/safety-life-service_en, hämtad: 2024-03-04.
- [99] *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document - Satellite Based Augmentation System Service Signal BDSBAS-B1C (Version 1.0)*, China Satellite Navigation Office, 2020.
- [100] "FAQ Navigation," https://www.isro.gov.in/FAQ_Navigation.html, 2024, hämtad: 2024-03-26.
- [101] "Overview of the Quasi-zenith satellite system (QZSS)," https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv01_what.html, 2024, hämtad: 2024-03-26.
- [102] "Quasi-zenith satellite orbit (QZO)," <https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>, 2024, hämtad: 2024-03-26.
- [103] "Transmission signals," https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv03_signals.html, 2024, hämtad: 2024-03-26.

A Appendix



Figur A.1: Alla öppna GNSS-signaler som sänds på det höga och låga GNSS-banden per konstellation. Färg indikerar moduleringsform. Notera att det utöver dessa även förekommer flera krypterade signaler och signaler från regionära system och tillägssystem.

