

# Descripción y representación de las señales GNSS

---

Trabajo Fin de Máster  
Junio de 2019

Autor  
Tutor

Sonia Vílchez Benigno  
Gonzalo Seco Granados



Universitat Oberta de Catalunya



<b>1.Introducción</b>	<b>8</b>
<b>1.1.Motivación y Objetivos.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.Marco de Trabajo.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.Estructura de la memoria .....</b>	<b>9</b>
<b>2.Introducción a GNSS</b>	<b>10</b>
<b>2.1.Historia.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.Definición y principio de funcionamiento .....</b>	<b>12</b>
▶ Pseudorrangos.....	13
▶ CDMA.....	13
▶ FDMA.....	14
<b>2.3.Estructura .....</b>	<b>15</b>
▶ Segmento Espacial.....	15
▶ Segmento de Control .....	15
▶ Segmento de Usuario .....	16
<b>3.Sistemas GNSS</b>	<b>17</b>
<b>3.1.GPS .....</b>	<b>17</b>
3.1.1.Características Generales.....	17
3.1.2.Segmento Espacial .....	18
3.1.3.Segmento Control .....	19
3.1.4.Segmento Usuario .....	20
3.1.5.Estructura de Señal.....	21
1. BANDAS DE FRECUENCIA	21
1.1.Señales en la Banda L1 .....	22
1.1.1.Código C/A.....	22
1.1.2.Código P.....	24
1.1.3.Código Y.....	25
1.1.4.Código M.....	25
1.1.5.Señal L1C.....	25
1.2.Señales en la Banda L2 .....	29
1.2.1.Códigos L2CM y L2CL .....	29
1.3.Señales en la Banda L5.....	30

1.3.1.Códigos L5 I y L5Q .....	30
2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN .....	32
2.1.LNAV .....	32
2.2.CNAV .....	35
2.2.1.CNAV L1C (CNAV-2) .....	36
2.2.2.CNAV L2 CM .....	37
2.2.3.CNAV L5 .....	37
2.3.MNAV .....	37
<b>3.2.GLONASS.....</b>	<b>38</b>
3.2.1.Características Generales.....	38
3.2.2.Segmento Espacial .....	38
3.2.3.Segmento Control .....	40
3.2.4.Segmento de Usuario .....	40
3.2.5.Estructura de Señal.....	41
1. BANDAS DE FRECUENCIA.....	41
1. Señales en Banda L1 .....	43
1.1.L1OF .....	43
1.2.L1SF .....	45
1.3.L1OC.....	45
1.4.L1SC.....	46
1.5.L1OCM .....	46
2. Señales en Banda L2.....	46
3. Señales en Banda L3.....	47
3.1.L3OC.....	47
2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN .....	50
2.1.1.Navegación Precisión Estándar.....	50
2.1.2.Navegación Alta Precisión .....	51
2.1.3.Mensaje L3OC .....	51
2.1.4.Mensaje L1OC .....	52
<b>3.3.GALILEO .....</b>	<b>53</b>
3.3.1.Características Generales.....	53
3.3.2.Segmento Espacial .....	53
3.3.3.Segmento Control .....	54
3.3.4.Segmento Usuario .....	55
3.3.5.Estructura de Señal.....	55

1. BANDAS DE FRECUENCIA.....	56
1.1. Señales en Banda E1 .....	56
1.1.1. Códigos E1B y E1C.....	57
1.1.2. Código E1A.....	61
1.2. Señales en Banda E5.....	63
1.3. Señales en Banda E6.....	67
1.4. Señales en Banda L6 .....	68
2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN .....	70
2.1. F/NAV.....	70
2.2. I/NAV.....	72
2.3. C/NAV y G/NAV .....	73

### **3.4 BeiDou.....74**

3.4.1 Características Generales.....	74
3.4.2. Segmento Espacial .....	74
3.4.3 Segmento Control .....	75
3.4.4 Segmento Usuario .....	76
3.4.5 Estructura de Señal.....	76
1. BANDAS DE FRECUENCIA.....	76
1.1. Señales en banda B1 .....	78
1.1.1. Señal B1I.....	78
1.1.2. Señal B1C.....	79
1.2. Señales en banda B2 .....	81
1.2.1. Señal B2a .....	81
1.3. Señales en banda B3 .....	82
1.3.1. Señal B3I .....	82
2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN .....	83
2.1. Mensaje D1 .....	83
2.2. Mensaje D2 .....	85
2.3. Mensaje B-CNAV1 .....	86
2.4. Mensaje B-CNAV2 .....	87

### **3.5 QZSS.....88**

3.5.1 Características Generales.....	88
3.5.2 Segmento Espacial .....	88
3.5.3 Segmento Control .....	89
3.5.4 Segmento Usuario .....	90



3.5.5 Estructura de Señal.....	90
1. BANDAS DE FRECUENCIA.....	90
1.1. Señales en Banda L1.....	90
1.1.1. Señal L1C/A.....	90
1.1.2. Señal L1C.....	91
1.2. Señales en Banda L2.....	92
1.2.1. Señal L2C (L2CM+L2CL).....	92
1.3. Señales en Banda L5.....	92
1.3.1. Señal L5.....	92
1.3.2. Señal LEX.....	93
2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN.....	93
2.1. Mensaje LNAV.....	94
2.2. Mensaje CNAV2.....	95
2.3. Mensaje CNAV.....	96
<b>3.6 IRNSS.....</b>	<b>97</b>
3.6.1 Características Generales.....	97
3.6.2 Segmento Espacial.....	97
3.6.3 Segmento Control.....	98
3.6.4 Segmento Usuario.....	98
3.6.5 Estructura de Señal.....	99
1. BANDAS DE FRECUENCIA.....	99
1.1. Señales en Banda L5 y en Band S.....	99
1.1.1. Códigos PRN.....	100
2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN.....	101
2.1. Servicio SPS.....	101
<b>4. Conclusiones.....</b>	<b>103</b>
<b>5. Referencias y Bibliografía.....</b>	<b>105</b>
<b>5. Glosario de Acrónimos.....</b>	<b>107</b>

“Yo seré el próximo  
Rey de los Piratas”

Los sistemas de posicionamiento por satélite han ido cobrando cada vez más importancia en las últimas décadas, siendo en la actualidad una herramienta que utilizamos a diario e incluso aportando funcionalidades que pueden dar pie al avance de la tecnología en otros ámbitos, como es la referencia temporal exacta para la sincronización en redes de baja latencia como el incipiente 5G. Sea cual sea el uso que se les quiera dar, la precisión en la obtención de los datos es imperativa. En este marco, los países del mundo han ido centrando sus esfuerzos en contar con un sistema propio e independiente de GPS, de cara a asegurar la integridad del servicio en cualquier situación.

En este documento se pretende dar una visión global de los sistemas de posicionamiento más relevantes de la actualidad, cuál ha sido su historia y en qué estado se encuentra su desarrollo y cómo funcionan, centrándonos en los servicios que prestan y las señales que envían para ello. Se detallará, para GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y IRNSS, las bandas de frecuencia en las que operan, qué señales envían en cada banda, cómo se generan estas señales y qué códigos utilizan.

## PALABRAS CLAVE

---

Sistemas de Posicionamiento por satélite, GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, Compass, QZSS, INRSS, NAVIC.

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación y Objetivos

Los sistemas de posicionamiento por satélite suponen en la actualidad una parte muy importante en el día a día de las personas. Tanto si necesitas conocer dónde está la sucursal bancaria más cercana como si quieres saber a dónde puedes ir a comer o cuánto tarda en llegar un vehículo que te lleve al aeropuerto, estamos haciendo uso constante de los servicios de los que nos proveen decenas de satélites en órbita a miles de kilómetros de nosotros. De igual manera juegan un papel fundamental en el proceso productivo de multitud de sectores. Tanto para la industria del transporte, ya sea aéreo, marítimo o terrestre, como para diversas aplicaciones en el ámbito de la Geodesia, la Topografía o la Geomática, suponen una herramienta fundamental.

Entre los servicios que proveen se encuentran:

- **Servicios de navegación**, que son quizás los más extendidos y utilizados de todos sus servicios, y que nos permiten obtener información de posicionamiento y velocidad
- **Servicios de sincronización** que permiten obtener una referencia horaria fiable y con alta disponibilidad.
- **Servicios basados en localización**, como es el caso de la mensajería de aviso de desastres o con fines publicitarios, que se activan por proximidad según el usuario se encuentre en una zona.
- **Recogida de datos topográficos, geográficos y geodésicos**, ya que cuentan con sistemas integrados que permiten capturar, almacenar y procesar datos de distinta índole.
- **Servicios de Emergencia y Rastreo** para identificar y rastrear balizas donde se hayan activado avisos de emergencia.

Pero no se trata únicamente de las aplicaciones que existen ahora, sino de aquellas que pueden surgir en el futuro. Los requerimientos del mundo están llevando a las redes de comunicaciones hacia escenarios de altísimas capacidades y mínima latencia, como es el caso del incipiente 5G y sus múltiples aplicaciones en tiempo real, como el coche autónomo o la realidad virtual. Sin embargo, en esos escenarios de baja latencia la sincronización es un aspecto fundamental, y ahí es donde entran los GNSS y sus servicios que proveen una referencia fiable para gestionar la sincronización.

Es por todo esto que las potencias mundiales, especialmente a partir de la década de los 90, se han embarcado en desarrollar sus propios sistemas GNSS a fin de no depender de los sistemas pioneros, el GPS estadounidense y el GLONASS ruso. En un primer momento surgieron sistemas de aumentación que utilizaban el segmento espacial de estos primeros, desarrollando y perfeccionando el segmento terrestre, para posteriormente dar paso a sistemas propios con constelaciones de satélites que permiten dar servicio global (como es el caso de Galileo o BeiDou) o regional, como es el caso de QZSS e IRNSS.

Por tanto, el **primer objetivo** de este documento es el de presentar cómo funcionan los sistemas de posicionamiento por satélite, cuál es su arquitectura y el principio de funcionamiento en que se basan. En base a esto, se puede profundizar más en los sistemas de posicionamiento que

existen actualmente en servicio. De cada sistema de los anteriormente mencionados se detallará su arquitectura, su estructura de señal y los mensajes de navegación que transmiten.

Por tanto, el **segundo objetivo** de este trabajo es recopilar y presentar de forma ordenada y detallada la información dispersa en los distintos documentos de control de interfaz de los diferentes sistemas, detallando: qué banda de señal utiliza cada sistema, qué códigos utiliza para modular el mensaje de navegación, de qué forma se generan y modulan y cómo se genera el mensaje de navegación, cuál es su estructura y qué datos transmite.

## 1.2. Marco de Trabajo

Este trabajo se ha llevado a cabo dentro del Departamento de Tecnologías de Radiocomunicación, y en la línea de la asignatura de Sistemas de Radionavegación, cuyo material ha servido de apoyo para su realización. El contenido de dicha asignatura se ha complementado con las especificaciones oficiales de cada sistema, publicadas por las organizaciones que los gestionan, y recogidas en documentos llamados *Interface Control Document (ICD)* que se encuentran referenciados al final de este documento.

## 1.3. Estructura de la memoria

En esta memoria se documenta el trabajo realizado durante este semestre, recopilando y clasificando la información perteneciente a los distintos GNSS, así como generando las gráficas, tablas e imágenes que ilustran las señales transmitida en cada una de las bandas de cada uno de los distintos sistemas. Consta de 5 grandes bloques:

- ▶ En el capítulo 2 se hace una introducción general a los sistemas de posicionamiento, haciendo una breve introducción histórica, y describiendo de forma general el principio de funcionamiento en que se basan. Asimismo, se describen también de forma general los segmentos que los constituyen y la estructura de sus señales.
- ▶ En el capítulo 3 se analiza de forma particular para cada sistema los aspectos más relevantes:
  - ▶ **Arquitectura del sistema:** se describen sus segmentos espacial, de control y de usuario.
  - ▶ **Estructura de señal:** se describen las señales transmitidas por cada sistema, distinguiendo entre sus tres componentes principales:
    - ▶ Bandas de Frecuencia: portadoras que modulan la información a RF.
    - ▶ Códigos de Rango: ensanchan el espectro y/o identifican a cada satélite. Se incluye una descripción de cómo se generan estos códigos.
    - ▶ Mensajes de Navegación: contiene la información útil de navegación. Se describe qué información incluyen y cómo se estructura.
    - ▶ Todo esto se detalla para los sistemas más importantes: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS e IRNSS.
- ▶ En el capítulo 4 se exponen las conclusiones a las que se ha podido llegar a la raíz de la realización de este trabajo.
- ▶ En el capítulo 5 se incluye un glosario con todos los acrónimos que se utilizan en esta memoria.
- ▶ En el capítulo 6 se incluyen las referencias que se han consultado para la realización de este trabajo.

## 2. Introducción a GNSS

### 2.1. Historia

A lo largo de la historia la necesidad de conocer su posición siempre ha supuesto un reto para el ser humano. El estudio de los astros en la navegación, la posición de sol, la sombra de una aguja, la luz de un faro o la distribución de la naturaleza son solo algunos de los métodos que ha empleado el hombre a lo largo de los siglos para saber hacia dónde dirigirse.

Sin embargo no fue hasta mediados del siglo XX, durante la Segunda Guerra Mundial, que los avances científicos y tecnológicos de la época, junto con la apremiante necesidad militar, permitieron llevar el posicionamiento un paso más allá. Sistemas hiperbólicos como **DECCA**, **LORAN**, **GEE** u **OMEGA** fueron los primeros en permitir determinar a través de transmisores radio de baja frecuencia la distancia a la que se encontraba el objetivo de varias estaciones esclavas y una maestra, en base al desfase de las señales, conociendo la distancia entre maestro y esclavos.

A pesar de la revolución que supusieron en su momento y de cómo condicionaron el curso de la guerra, la precisión de estos sistemas no era muy alta, especialmente porque dependía de la distancia a la que se encontraba el objetivo, la cual también condicionaba su funcionamiento. Además, con ellos se podía determinar una posición en dos dimensiones, es decir, latitud y longitud. Era por tanto necesario introducir un cambio de paradigma en los sistemas de posicionamiento para poder trabajar a mayores distancias y, sobre todo, con mayor precisión e independencia de las condiciones de propagación.

La puesta en órbita en 1957 del Sputnik, el primer satélite artificial, por parte de la Unión Soviética marcó el inicio de la carrera espacial con un duro golpe para Estados Unidos en plena Guerra Fría. Sin embargo, sembró un precedente para llevar la utilidad de los satélites mucho más allá. Mientras el Sputnik emitía señales que permitían conocer la localización y órbita del satélite, planteó la posibilidad de utilizar esas señales para localizar elementos en la Tierra. Con la creación de la NASA (*National Aeronautic and Space Administration*) para recuperar el liderazgo en el espacio y el ámbito tecnológico, Estados Unidos se mete de lleno en el estudio de las comunicaciones por satélite y comienza a desarrollar un sistema propio de navegación, con el objetivo principal de poder localizar sus misiles nucleares.

Ese primer sistema de navegación por satélite operativo se llamó **TRANSIT**, o NAVSAT. Desarrollado por la marina de Estados Unidos en la década de 1960, prestó un servicio continuo de navegación por satélite, inicialmente militar, para proporcionar información precisa sobre la ubicación de sus submarinos y como sistema de navegación de sus buques durante la Guerra Fría, hasta que finalmente también se abrió al uso civil. Estaba compuesto por seis satélites en una órbita polar baja, por lo que aunque prestaban cobertura global, no lo hacían de forma ininterrumpida. El funcionamiento de TRANSIT se basaba en el efecto Doppler, ya que al ser la posición y la frecuencia de emisión del satélite conocidas, el cambio producido en esta frecuencia por la velocidad relativa del satélite respecto al receptor hacía posible, con varias mediciones y un complejo procesado de señal, inferir la distancia a la que se encontraba el receptor. Desde los satélites del sistema TRANSIT se transmitían dos portadoras de 400MHz (UHF) cada dos minutos,

actualizando incidencias y correcciones de reloj dos veces al día. Este sistema permitió que los relojes de todo el mundo pudieran sincronizarse con una precisión de 50  $\mu$ s, y provocó que se produjeran avances en muchas áreas de la ciencia, cuyo legado ha trascendido en diversas aplicaciones hasta el día de hoy.

Sin embargo, la complejidad de los cálculos de los observables, la precisión del sistema y las limitaciones del servicio, donde era necesario seguir durante 15 minutos al satélite para obtener la posición y donde algunas zonas tardaban casi 2 horas en recibir nuevos datos, hicieron que aparecieran otros sistemas como TIMATION o 621B. Estas iniciativas se llevaban a cabo por las Fuerzas Aéreas o la Marina de manera independiente, por lo que finalmente el Departamento de Defensa de Estados Unidos decidió unificar proyectos y crear un comité llamado NAVSEC (**N**avigation **S**atellite **E**xecutive **C**ommittee) cuyo objetivo era desarrollar el concepto de navegación vía satélite tomando como base las investigaciones previas, para definir un nuevo sistema denominado **NAVSTAR-GPS** (**N**avigation **S**ystem **T**iming and **R**anging-**G**lobal **P**ositioning **S**ystem) que incorporaba las mejores tecnologías de los proyectos existentes y fijaba una configuración que consistía en 24 satélites en órbitas inclinadas de 12 horas de periodo.

Prácticamente en paralelo, durante la década de los 80, la Unión Soviética inicia también la implementación de su propio sistema de navegación, **GLONASS** (**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem), que empezó a estar operativo en 1996. Actualmente GLONASS está administrado por las Fuerzas Especiales rusas y, aunque es un sistema diferente al GPS, ambos pueden trabajar de forma combinada.

Con Estados Unidos y Rusia con el segmento espacial en exclusiva, al inicio de la década de los 90 muchos países se centraron en reforzar el segmento de control en tierra, y de esa forma surgieron sistemas de aumentación como SBAS y GBAS, que permiten obtener un posicionamiento más preciso. Así es como aparece EGNOS, el sistema de aumentación Europeo, que sería la primera inmersión en los GNSS de la Unión Europea junto con la Agencia Espacial Europea. Finalizado EGNOS, la Unión Europea inicia el desarrollo de **Galileo**, un sistema propio de índole civil que aunque inicialmente se planificó para 2008, no ha estado realmente operativo hasta 2016.

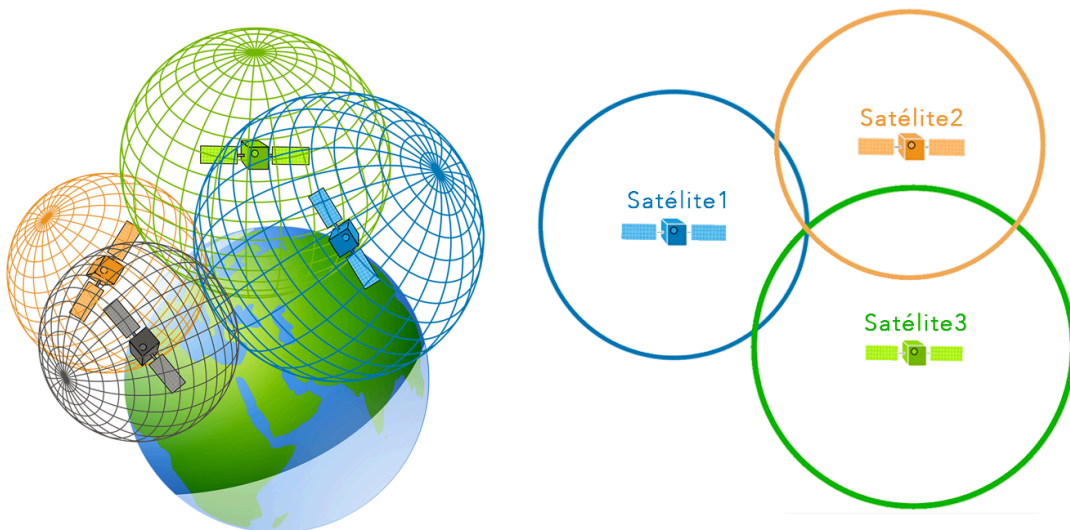
En paralelo al inicio del desarrollo de EGNOS, China también se introduce en los GNSS y comienza con el desarrollo de **BeiDou**, lanzando sus primeros satélites en 1989 y dando un servicio operativo en el territorio chino en 2001. Actualmente da servicio en todo el territorio Asia-Pacífico con su segunda versión, también llamada Compass, y está previsto que en 2020 con su tercera versión dé servicio a escala global.

Japón y la India harían lo mismo con **QZSS** (**Q**uasi-**Z**enith **S**atellite **S**ystem) e **IRNSS** (**I**ndian **R**egional **N**avigation **S**atellite **S**ystem) respectivamente, aunque estos últimos se mantienen a día de hoy como sistemas regionales que solo dan servicio dentro de su territorio, ya que cuentan con constelaciones de satélites más pequeñas, de entre 4 y 7 satélites.

## 2.2. Definición y principio de funcionamiento

Llamamos **Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)** al conjunto de sistemas que, mediante una constelación de satélites artificiales, obtienen rangos de señales que permiten proveer posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire, ya que permiten obtener las coordenadas geográficas y altitud del punto a observar.

El principio de funcionamiento de estos sistemas es medir la distancia entre un satélite y su receptor en base al tiempo que tarda la señal en viajar desde el satélite, para posteriormente con varias de esas medidas realizar un proceso de triangulación y establecer la posición del receptor. Por eso es necesario la existencia de más de un satélite: conociendo la distancia del receptor a un satélite tenemos toda una esfera de posibles localizaciones en el espacio; si en lugar de una tenemos dos, la posibilidad se reduce a una circunferencia; con una tercera, la incertidumbre se reduce a dos puntos. En el siguiente diagrama puede verse una representación sencilla de este fenómeno, con su representación en 2D:



La solución a este problema de trilateración plantea un modelo algebraico de  $n$  ecuaciones en función de los satélites con los que se calcule, siendo  $r_i$  la distancia al satélite,  $(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$  las coordenadas de cada satélite y  $(x_u, y_u, z_u)$  las coordenadas del usuario:

$$\begin{aligned}r_1^2 &= (x_u - x_{s1})^2 + (y_u - x_{s1})^2 + (z_u - z_{s1})^2 \\r_2^2 &= (x_u - x_{s2})^2 + (y_u - x_{s2})^2 + (z_u - z_{s2})^2 \\r_3^2 &= (x_u - x_{s3})^2 + (y_u - x_{s3})^2 + (z_u - z_{s3})^2 \\&\dots \\r_n^2 &= (x_u - x_{sn})^2 + (y_u - x_{sn})^2 + (z_u - z_{sn})^2\end{aligned}$$

El satélite transmite una señal que contiene datos orbitales y la hora exacta en que se transmitió la señal, de manera que el receptor cuando recibe dicha señal puede saber el tiempo que ha transcurrido, y por lo tanto la distancia a la que se encuentra el satélite. Este principio de funcionamiento se basa, por tanto, en la sincronización entre la referencia temporal llevada por el satélite y el receptor.



## ► Pseudorrangos

Ese observable básico del tiempo aparente de propagación desde el satélite al usuario es la base de todos los sistemas de posicionamiento por satélite. Sin embargo, para realizar esa resta entre tiempo de emisión y tiempo de recepción tenemos la problemática de que ambas medidas temporales se están tomando respecto a diferentes escalas de tiempo. Por eso se añade el prefijo “pseudo” a la medida de rango obtenida, ya que en realidad es un valor que depende del tiempo del receptor, del tiempo del emisor y como veremos posteriormente cuando ahondemos en el segmento de control, también de la Estación Maestra que coordina las referencias temporales de la constelación.

Por tanto, considerando que una señal llega al receptor en el instante  $t$  podemos expresar un pseudorrango como:

$$P(t) = c[t_u(t) - t^S(t - \tau)]$$

Siendo:

- $c$  la velocidad de la luz en el vacío.
- $T$  el tiempo de tránsito real.
- $t_u(t)$  el tiempo de recepción de la señal.
- $t^S(t - \tau)$  tiempo de emisión de la señal por el satélite  $s$ .

Podemos, por tanto, expresar la relación entre el tiempo del receptor y el del satélite de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}t_u(t) &= t + \delta t_u(t) \\t^S(t - \tau) &= (t - \tau) + \delta t^S(t - \tau)\end{aligned}$$

Siendo  $\delta t_u$  y  $\delta t^s$  el sesgo de reloj que tienen tanto el receptor como el satélite, considerando la referencia el reloj del segmento de control. Combinando todo ello tenemos una expresión final:

$$P(t) = c((t + \delta t_u(t)) - (t - \tau + \delta t^S(t - \tau))) + \epsilon_\rho(t)$$

Siendo  $\epsilon_\rho(t)$  el término que engloba todos los efectos no deseados del proceso. Finalmente, el objetivo del segmento de usuario es solucionar el sistema de ecuaciones como la anterior de 3 o 4 satélites. Suponiendo que el sesgo de usuario es el mismo en todos los casos, es un sesgo que podemos discernir, mientras que el de satélite es el que se encarga de paliar el segmento de control, monitorizando el reloj de los satélites en todo momento y corrigiendo sus desviaciones.

## ► CDMA

Dado que necesitamos conocer y resolver las ecuaciones correspondientes al pseudorrango de cada satélite y que todos ellos acceden concurrentemente al medio, es necesario establecer la identificación y el discernimiento entre las distintas señales recibidas para saber a qué satélite hacen referencia. La técnica de acceso múltiple más utilizada en los sistemas GNSS es CDMA (**A**cceso **M**últiple por **D**ivisión de **C**ódigo).

CDMA permite que varias señales se transmitan simultáneamente en la misma frecuencia, ya que la multiplexación se realiza en código. Esto es útil en los GNSS, ya que permite discriminar señales provenientes de distintos satélites sin necesidad de que utilicen frecuencias distintas, facilitando los transpondedores equipados en ellos y haciendo un uso más eficiente del espectro.

Para ello, cada satélite tiene asignado un código pseudoaleatorio (**PRN, PseudoRandom Noise**), que consta de unas características particulares que lo hacen ideal para este propósito.

Tienen ese nombre porque, aunque se trata de señales deterministas, tienen un comportamiento similar al ruido blanco; es decir, presenta una función de autocorrelación igual a una delta. En el caso del ruido blanco, esto se interpreta como que la señal en un instante está totalmente incorrelada con la señal el resto del tiempo. En el caso de los satélites, la correlación cruzada entre códigos PRN de distintos satélites será muy baja, mientras que la autocorrelación será muy alta. Esto permite al receptor correlacionar la señal entrante con los códigos PRN conocidos de los satélites, para desvincular la señal y recuperar su versión original, asegurando que las señales transmitidas por otros satélites no han interferido en ella.

Estas técnicas se adaptan perfectamente al escenario de los GNSS, ya que la propia naturaleza del sistema permite paliar sus problemas más importantes. Uno es la limitación en el número de usuarios que pueden acceder simultáneamente al medio, algo que viene determinado por los códigos PRN seleccionados. En este caso, el número de satélites a identificar no supera las 3 o 4 decenas, por lo que no se trata de un factor problemático. Otro de los problemas de estas técnicas es la diferencia en los niveles de potencia recibidos, en caso de fuentes con atenuaciones o distancias diferentes, donde algunas señales pueden enmascarar a otras con niveles más débiles. Este aspecto tampoco condiciona demasiado a los receptores GNSS, ya que todos los satélites están alejados en el mismo orden de magnitud, y los niveles de potencia recibidos no difieren excesivamente.

## ► **FDMA**

Las técnicas de **Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA)** asignan a cada satélite una frecuencia de transmisión diferente, de manera que las señales no se solapen en frecuencia. Esta ventaja sobre CDMA de asegurar la separación entre señales tiene por otro lado una desventaja clara, y es la complejidad y el coste relacionados con el diseño de antenas y receptores, que tienen que implementar filtros y calibración para el uso de todas las bandas posibles. En los GNSS actuales esta técnica es utilizada únicamente en las señales legacy de GLONASS, el cual desde 2011 ha empezado a incluir la técnica CDMA también en algunas de sus señales.

## 2.3. Estructura

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura definida que se compone de tres partes diferenciadas sin las cuales no puede considerarse un GNSS operativo: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario.

### ► Segmento Espacial

Se trata de la constelación de satélites que conforman el sistema, distribuidos en distintos planos orbitales. Es necesario identificar a cada satélite de manera que sepamos a cuál corresponde la señal recibida, y por tanto el pseudorange calculado (distancia). Las formas más comunes de identificarlos son:

- La posición en el plano orbital, ya que cada plano se identifica con una letra y cada satélite dentro del plano con un número. Por ejemplo, F2 sería el segundo satélite de la órbita F.
- Mediante un código previamente asignado. Por ejemplo, en el caso de GPS los satélites se identifican con un código asignado por las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos (SVN 28).
- Mediante un código pseudoaleatorio asignado (PRN, PseudoRandom Noise). Como se ha especificado anteriormente, este código resultará útil por sus propiedades para identificar las señales de cada satélite, ya que al tener una forma similar al ruido blanco presenta una correlación muy baja con el resto de códigos de los demás satélites.

Los primeros lanzamientos de satélites artificiales se produjeron en 1978, con el bloque I de satélites GPS, asociados a su fase de experimentación. Sin embargo, los primeros satélites realmente operativos de GPS comenzaron a lanzarse entre 1989 y 1990, y estaban equipados con relojes atómicos de rubidio y de cesio, y aunque se diseñaron para tener una esperanza de vida de 7,5 años, lograron una media de 11,8. Desde entonces se han lanzados distintos bloques de satélites, mejorando con cada uno las prestaciones de operación y la esperanza de vida de cada uno. En 1995 se alcanzaron los 24 satélites en órbita previstos para GPS, y se consideró el sistema con capacidad total de operación. En el caso de GLONASS, el sistema estaba previsto para ser funcional en 1991, pero sin embargo no llegaría hasta 1996, también con 24 satélites operativos.

En la actualidad hay además otros dos sistemas globales, que son BeiDou, la apuesta china, y Galileo, el europeo, que aunque iniciaran su andadura con varias décadas de retraso frente a sus predecesores, se encuentran en la actualidad operativos con una constelación suficiente en órbita y prestando servicios con señales de nueva generación.

### ► Segmento de Control

Formado por el conjunto de estaciones terrestres que recogen datos de los satélites, el segmento de control ha sido implantado por cada país de una manera diferente para cada sistema, siendo la labor principal del mismo monitorizar el estado de los satélites y corregir anomalías en la órbita y hora del satélite, así como introducir cambios en su mensaje de navegación.

Implementado de distinta manera, funcionalmente este segmento constaría a su vez de tres partes:

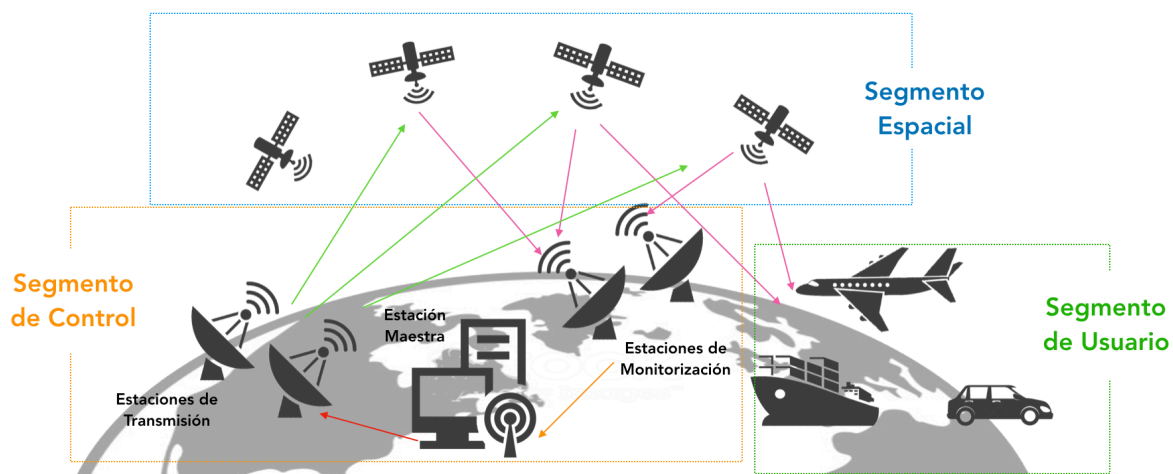
- ▶ Estación maestra que procesa la información y desde la cual se monitoriza el estado de los satélites, se generan los mensajes de navegación y corrige el sincronismo con los satélites para mantener la precisión. Aunque es un elemento central, por su criticidad suele estar redundada a modo de protección.
- ▶ Estaciones de monitorización repartidas por todo el mundo que reciben datos de los satélites, así como datos meteorológicos y los envían a la estación maestra para que los procese.
- ▶ Estaciones de transmisión de datos a los satélites, que se encargan de transmitir a estos las directivas de la estación maestra.

Como se ha visto en el apartado anterior, la sincronización es un aspecto clave de los sistemas de posicionamiento por satélite, por lo que la estaciones de control están equipadas con dos relojes atómicos de cesio que facilitan guardar el sincronismo con los satélites.

### ▶ Segmento de Usuario

Recibe las señales del segmento espacial y las procesa para obtener información sobre posición, velocidad, etc. La gama de equipos que conforman este segmento abarca desde *smartphones* y receptores de mano utilizados por excursionistas hasta receptores sofisticados que se utilizan para aplicaciones de topografía especializada. Para ello el dispositivo debe contar con una antena que permita recibir las señales procedentes de los satélites, generalmente en UHF (en torno a 1.100-1.600MHz), por lo que debe ser omnidireccional.

Se pueden clasificar de varias formas, atendiendo al tipo de servicio que prestan, militar o civil, a la arquitectura de recepción que implementan o a la cantidad de frecuencias que puede recibir, siendo algunos receptores monofrecuencia o multifrecuencia. Estos últimos son especialmente interesantes, ya que permiten corregir algunos efectos degradantes como el efecto ionosférico, al no afectar este de la misma manera a todas las frecuencias.



- Los satélites transmiten su posición al segmento de usuario y a las estaciones de monitorización
- Las estaciones de monitorización llevan a la Maestra la información de los satélites para monitorizar sus órbitas e introducir los parámetros meteorológicos en el cálculo de su posición
- La Estación Maestra computa los datos recibidos, que pasa a la de transmisión
- Las estaciones de transmisión transmiten a los satélite los mensajes de navegación y correcciones de la estación maestra.

## 3. Sistemas GNSS

En este apartado se pretende describir en detalle la situación de los sistemas GNSS más importantes que operan en la actualidad, la estructura de satélites que los componen, las bandas de frecuencia que utilizan y el conjunto de señales que transmiten.

### 3.1. GPS



Como se ha comentado anteriormente, GPS es el sistema de posicionamiento por excelencia, ya que no solo se trata del primero de los actuales sistemas en estar operativo a nivel global, sino que es el más extendido en todo el mundo. Fue desarrollado y es operado por el Departamento de Defensa de **Estados Unidos**.

#### 3.1.1. Características Generales

Se trata del sistema GNSS más antiguo de los existentes, lo que lo convierte en el que tiene mayor trayectoria y desarrollo, y se encuentra en un punto más maduro de implantación. Como se ha comentado anteriormente, el sistema GPS está conformado por una constelación de satélites que envían **señales de rango** que permiten identificar al transmisor original, y que modulan un **mensajes de navegación** que contiene los datos de **efemérides** necesarios para calcular la posición de cada satélite. Cuando hablamos de datos de hora y estado de toda la constelación en general hablamos de **almanaque**. Esta señal combinada de información y código de rango se modula a su vez por varias portadoras a frecuencias ubicadas en la región UHF, concretamente a las frecuencias que en lo sucesivo denominaremos L1, L2 y L5.

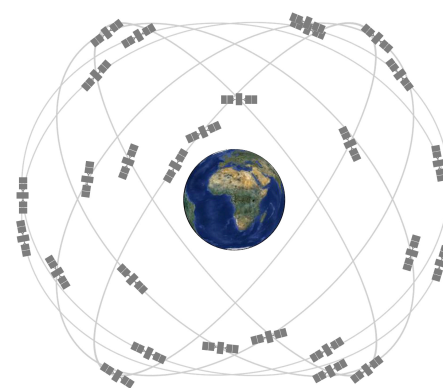
Mientras los satélites de GPS se han ido modernizando, las señales disponibles, los mensajes de navegación y las portadoras a utilizar también lo han hecho:

- ▶ Tenemos las consideradas **señales legacy**, el conjunto original de señales que conformaban GPS en su primera generación. Estas señales modulan un mensaje de navegación *legacy* (LNAV) y son:
  - Código de *Coarse/Acquisition* (C/A).
  - Código de Precisión (P).
  
- ▶ A raíz de la decisión del congreso de modernizar GPS en el año 2000, surge GPS III y se inicia un proceso de modernización de satélites, lanzando el bloque III R-M, estaciones terrestres e inclusión de **señales modernas**. Al contrario que las anteriores, estas no son transmitidas por todos los satélites, sino únicamente por aquellos más modernos del nuevo bloque. Estas señales modulan mensajes de navegación modernos **CNAV** para el uso civil y **MNAV** para el uso militar, y son:
  - Señal L2C.
  - Señal M.
  - Señal L5.
  - Señal L1C.

Las señales civiles son públicas y están descritas en los documentos de *Interface Specification* (IS) publicados en la web oficial, pero las señales con naturaleza militar tienen una codificación cifrada destinada a que sean utilizadas únicamente por las partes autorizadas. A pesar de eso, los civiles también pueden hacer un uso limitado de estas señales restringidas sin descifrarlas, que es lo que se denomina acceso sin codificación/semicodificado.

### 3.1.2. Segmento Espacial

La constelación GPS está conformada por satélites de órbitas medias (MEO) que orbitan a unos 20.200Km de la superficie terrestre, distribuidos en 6 planos orbitales. Se trata de una constelación de como mínimo 24 satélites, dando cada uno la vuelta a la Tierra dos veces al día. Han sido lanzados en distintos bloques a lo largo de los años:



CONSTELACIÓN GPS

- **Bloque I** → Asociado a la fase de experimentación, se trata de 11 satélites lanzados entre 1978 y 1985. De los 10 que consiguieron orbitar con éxito, 4 disponían de relojes de cuarzo, mientras que los otros 6 tenían relojes atómicos, 3 de rubidio y 3 de cesio. Aunque tenían una vida útil de 5 años, algunos de ellos llegaron hasta los 10. Ninguno se encuentra actualmente en servicio.
- **Bloque II** → Gracias a las mejoras que permitió el estudio del bloque I, entre 1989 y 1990 se lanzaron 9 satélites que mejoraban a sus predecesores en factores como la robustez frente a la radiación y en la emisión de señales más fiables en cuanto a la detección de errores. En este caso, todos tenían relojes atómicos de rubidio o cesio, y tenían una vida útil de 7,5 años, que llegó en el mejor de los casos a ser de hasta 15. Al igual que en el bloque I, ninguno se mantiene en servicio en la actualidad.
- **Bloque IIA** → Bloque de satélites similar al II, conformado por 19 satélites que se lanzaron entre 1990 y 1997. Tenían un periodo de operación más largo, de 180 días en lugar de los 14 del bloque II, sin necesidad de contacto con el segmento de control. Sin embargo, la precisión del sistema se va degradando con el paso del tiempo si no se realizan correcciones sobre las efemérides por parte del segmento de control, por lo que a pesar de ello es necesario una actualización diaria de los datos para obtener buenas prestaciones. Fue durante el lanzamiento de este bloque, concretamente en 1994, cuando GPS alcanzó el objetivo de 24 satélites operativos en órbita, por lo que se pudo declarar como sistema con capacidad de operación total. Aún queda un satélite en órbita correspondiente a este bloque que trabaja con las señales legacy, es decir, C/A en la banda L1 y los códigos C/A y P(Y) en la banda L2.
- **Bloque IIR** → Este bloque, lanzado entre 1997 y 2004, se conoce como bloque de reposición, ya que su objetivo fue el de sustituir satélites de bloques anteriores que ya no continuaban operativos. Tienen una vida útil de 7,5 años y como novedad incluían una monitorización del reloj a bordo. En total se lanzaron 13 satélites, de los cuales uno falló y de los restantes hay 11 que siguen estando operativos.
- **Bloque IIR-M** → Bloque de 8 satélites lanzado entre 2005 y 2009, se trata de un bloque de reposición modernizado. Entre las mejoras y nuevas funcionalidades a incluir están las del uso de la nueva señal civil L2C en la banda L2, o la señal militar M en L1 y L2, y el rediseño de las cadenas de radiofrecuencia y de las antenas del satélite para mejorar las prestaciones y la precisión del sistema. De los 8 satélites lanzados, quedan 7 operativos actualmente.
- **Bloque IIF** → Bloque de satélites lanzados entre 2010 y 2016. Además de incluir todas las señales del bloque anterior, incluyen el uso de una nueva portadora L5 y de una nueva señal civil. Se trata de un bloque orientado a satisfacer las necesidades que se prevén en las próximas décadas, ya que son satélites con una vida útil de 12 años que incluyen mejoras que aportan flexibilidad al sistema, como un procesador de a bordo reprogramable que

permita actualizaciones de software de los equipos en remoto. Hay 12 satélites operativos de este bloque.

- **Bloques III-IIIIF** → Bloque actualmente en proceso de lanzamiento. Incluyen, entre otras mejoras, el uso de una nueva señal civil L1C, que se plantea que pueda estar operativa en 2020. Este bloque dejará de incluir la funcionalidad de disponibilidad adaptativa, que permitía degradar la señal e inutilizarla, decisión tomada por el gobierno de Estados Unidos para hacer GPS un sistema más confiable frente a usuarios civiles y comerciales, de manera que deje de haber incertidumbre sobre el rendimiento del sistema. Actualmente no existe ningún satélite de este bloque operativo.

	Satélites Legacy		Satélites Modernizados		
	Bloque IIA	Bloque IIR	Bloque IIR - M	Bloque IIF	Bloques III/IIIIF
Nº Satélites Operativos	1	11	7	12	Ninguno
Señales	L1: C/A y P(Y) L2: P(Y)	L1: C/A y P(Y) L2: P(Y)	L1: C/A y P(Y) L2: P(Y) y L2C Señal Militar M	L1: C/A y P(Y) L2: P(Y) y L2C Señal Militar M L5: L5	L1: C/A, P(Y) y L1C L2: P(Y) y L2C Señal Militar M L5: L5
Vida Útil	7,5 años	7,5 años	7,5 años	12 años	15
Fechas Lanzamiento	1990 - 1997	1997 - 2004	2005 - 2009	2010 - 2016	2018-X

### 3.1.3. Segmento Control

Como se ha comentado anteriormente, el segmento de control consiste en una red global de estaciones terrestres que monitorizan los satélites y sus transmisiones, realizan análisis sobre los datos enviados y envían comandos a la constelación con correcciones y otros datos.

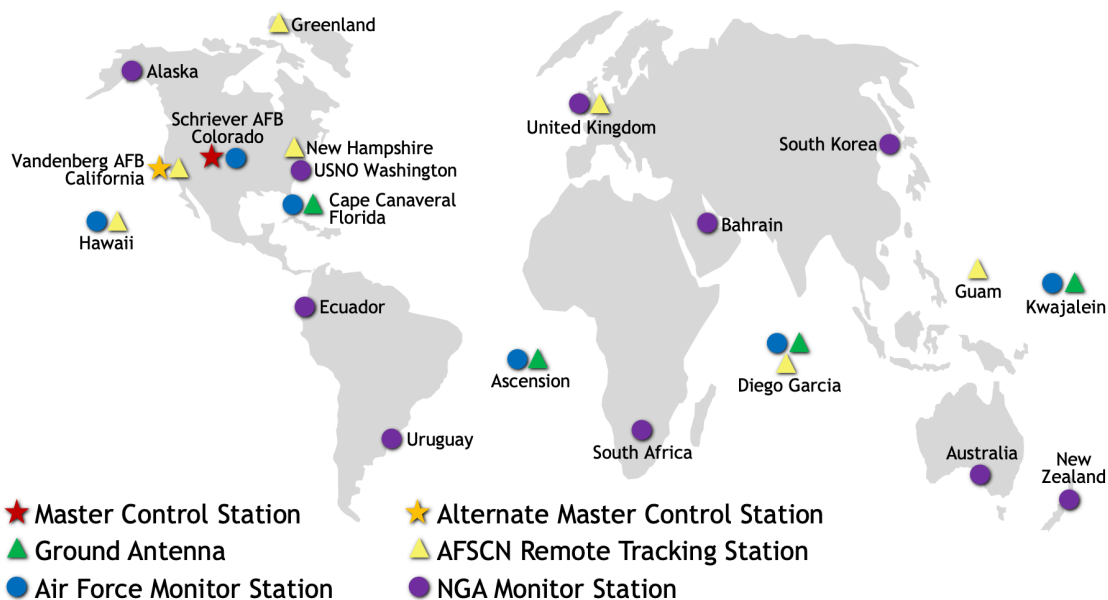
El actual Segmento de Control de Operacional (OCS) de GPS está conformado por una estación de control maestra, una estación de control maestra alternativa, 11 estaciones de transmisión de datos y 16 estaciones de monitorización cuyas funciones son:

- ▶ **Estación de control maestra (MSC):** Es la encargada de centralizar el control de la constelación GPS. Por su importancia está redundada geográficamente de manera que se minimice la posibilidad de fallo. Su función principal es la de monitorizar el estado de los satélites, de manera que se puedan controlar sus órbitas y predecir las efemérides y parámetros orbitales, así como correcciones de reloj que enviar de vuelta a la constelación. Por tanto, es la estación encargada de generar los mensajes de navegación que deben enviar los satélites y de gestionar el sincronismo de reloj. También lleva a cabo el control del mantenimiento de los satélites y la rectificación de sus órbitas, así como definir cuándo deben dejar de estar en servicio y salir de la constelación. Es por tanto el elemento más importante del segmento de control y una parte crítica en el sistema.



- ▶ **Estaciones de monitorización:** Llevan a cabo las labores de seguimiento de las señales transmitidas por los satélites. Deben enviar esta información a la MSC, que será la encargada de gestionar estos datos y generar los mensajes de navegación. Se encuentran en localizaciones próximas al Ecuador para maximizar la cobertura.
- ▶ **Estaciones de Transmisión:** Mientras que las estaciones de monitorización trasladan a la MSC la información recogida de los satélites, son las estaciones de transmisión las que devuelven la información generada en la MSC con los mensajes de navegación, correcciones orbitales y/o de reloj, etc., y la vuelven a modular a las frecuencias de transmisión para que sean recibidas por la constelación de satélites.

Estas estaciones están distribuidas por el planeta de la siguiente manera (Ground Antena = Estaciones de Transmisión):



SEGMENTO DE CONTROL GPS [2]

### 3.1.4. Segmento Usuario

[2] El segmento de usuario de GPS consta de receptores/procesadores y antenas capaces de recibir las señales en banda L provenientes de los satélites y demodular la información para obtener los pseudorangs (y otros observables) que permitan resolver las ecuaciones de navegación y determinar las coordenadas del receptor y su velocidad, así como darle una referencia temporal muy precisa. Esta última utilidad, aunque poco conocida, presenta aspectos muy interesantes en ámbitos distintos al de la geolocalización, como es por ejemplo el las redes de grandes requisitos en términos de sincronismo y latencia como son las topologías de *fronthaul* en el acceso móvil y las futuras redes 5G.

El Informe de mercado GNSS, proporcionado por la Agencia Europea GNSS, ha estimado que la cantidad de dispositivos habilitados para GPS en 2012 fue de aproximadamente **2.000 millones de unidades**.



### 3.1.5. Estructura de Señal

El funcionamiento de GPS se basa en la recepción e interpretación de las señales provenientes de los satélites de la constelación. Para entender la estructura de señal del sistema GPS debemos entender primero el tipo de señales que intervienen:

- ▶ **Bandas de Frecuencia:** modulan la información a la frecuencia de la portadora. Se trata de frecuencias concretas con comportamiento robusto frente a las pérdidas ionosféricas, que son el tipo de degradación más importante en estos sistemas.
- ▶ **Códigos de Rango:** permiten identificar el satélite del que proviene la información, debido al uso de códigos con propiedades de máxima autocorrelación y mínima correlación cruzada. Se basan en el uso de CDMA para multiplexar en código señales de distintas fuentes transmitiendo a la misma frecuencia.
- ▶ **Mensajes de Navegación:** es la información en sí misma que contiene las efemérides y datos orbitales que transmite cada satélite para la operación del receptor.

#### 1. BANDAS DE FRECUENCIA

Para que los códigos de alcance y el mensaje de navegación viajen desde el satélite al receptor estos deben modularse con una portadora que permita que las señales salven el vano tierra-espacio y lleguen al receptor con potencia suficiente. Las señales destinadas a tal fin están localizadas en la región UHF del espectro electromagnético. En el diseño original de GPS se utilizaban dos frecuencias:

##### ▶ Banda L1

(frecuencia central  $L1=1.575,42\text{MHz}$ , longitud de onda  $\lambda_1=19\text{cm}$ )

En los sistemas legacy es la banda utilizada para transmitir los códigos C/A y P(Y). En generaciones posteriores de satélites, y con la introducción de las señales modernas a raíz del bloque IIR-M, también se utiliza para transmitir el código militar M. Está en proceso de incluirse una nueva señal civil L1C que se espera esté disponible en 2020 con el nuevo bloque de satélites.

##### ▶ Banda L2

(frecuencia central  $L2=1.227,60\text{MHz}$ , longitud de onda  $\lambda_2=24\text{cm}$ )

Usada originalmente para transmitir el código de precisión P(Y). Al igual que la señal L1, con la nueva generación de satélites pasó a transmitir también otras señales como la militar M y la nueva señal civil L2C, compuesta por las señales L2 Civil Moderate (L2CM) y el código L2 Civil Long (L2CL)

##### ▶ Banda L5

(frecuencia central  $L5=1.176,45\text{ MHz}$ , longitud de onda  $\lambda_5=25\text{cm}$ )

Introducida a raíz del bloque de satélites IIF, no todos los satélites emiten a esta frecuencia. Las portadoras en esta banda están moduladas por dos trenes de bits, en cuadratura y en fase: la señal de datos L5 y la señal piloto L5. Además, dos códigos se transmiten en L5: el código en fase I5 y el código cuadrifásico Q5. Se especificará en detalle en el apartado correspondiente.

Además de la redundancia y la mayor resistencia a interferencias, un beneficio crítico de tener más de una frecuencia transmitidas desde un satélite es la capacidad de medir directamente, y por lo tanto eliminar el error de retardo ionosférico para ese satélite. Sin dicha medición, un

receptor GPS debe usar un modelo genérico o recibir correcciones ionosféricas de otra fuente (como el Sistema de aumento de área amplia o WAAS). Los avances en la tecnología utilizada tanto en los satélites GPS como en los receptores GPS han hecho del retardo ionosférico la mayor fuente de error restante en la señal. Un receptor capaz de realizar esta medición puede ser significativamente más preciso y, por lo general, se lo denomina receptor de triple frecuencia.

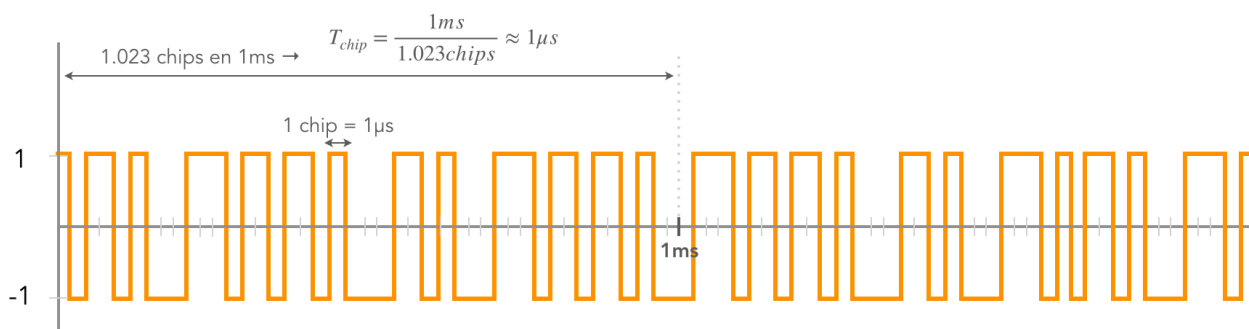
## 1.1. Señales en la Banda L1

La banda de GPS L1 (1575.42 MHz) se ha convertido en la banda más importante para fines de navegación. De hecho, hoy en día la mayor parte de aplicaciones de navegación y geolocalización del mundo se basan en las señales transmitidas en esta frecuencia.

El objetivo de los códigos de rango PRN es permitir que los receptores discriminen a qué satélite hace referencia la información con el mensaje de navegación que se recibe, ya que todos los satélites emiten a la misma frecuencia. Esto se conoce como CDMA, y permite que la multiplexación en lugar de realizarse en frecuencia o en tiempo se realice en código. Hasta GPS III se transmitían tres códigos de rango PRN: el **código adquisición C/A**, el código de **precisión (P)**, y el **código Y**, que es su versión en modo de operación *anti-spoofing* (suplantación). Los satélites también emitirán intencionadamente versiones "incorrectas" de los códigos, cuando sea necesario proteger a los usuarios de recibir y utilizar señales de navegación anómalas. Se trata de los códigos Y no estándar (NSY) y C/A no estándar (NSC). Próximamente se plantea la inclusión de una nueva señal civil **L1C**.

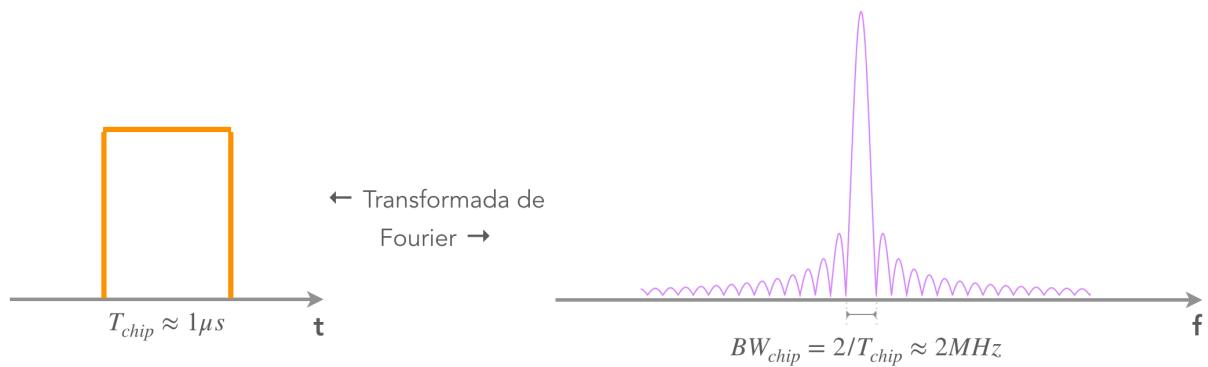
### 1.1.1. Código C/A

Pensada inicialmente como señal para la adquisición del código P (o Y), el código de **Coarse/Acquisition** es actualmente la señal GPS más importante del mercado para la mayor parte de aplicaciones. Se trata de un código PRN que identifica cada satélite, del tipo Gold, que compone una secuencia binaria denominada  $G_i(t)$  en la especificación de GPS, de una longitud de 1.023 chips, que se transmiten en 1ms, es decir, con una tasa de 1,023MCps ( $1,23 \times 10^6$  Chips/seg). Se trata de la suma en módulo 2 de dos sub secuencias G1 y G2 generadas con registros de desplazamiento de 10 bits. Aunque los registros trabajan con los niveles "0" y "1", posteriormente se lleva a cabo una transformación para genera una secuencia entre -1 y 1.



SECUENCIA CHIPS CÓDIGO C/A [5]

Espectralmente, cada chip tendrá la siguiente forma:

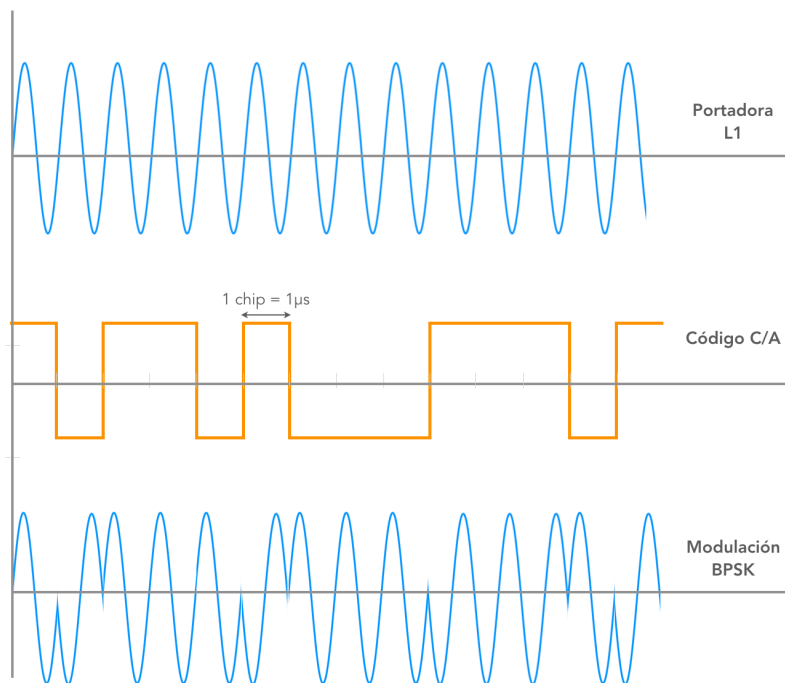


**FORMA TEMPORAL Y ESPECTRAL DE CHIP C/A [5]**

Por tanto, la expresión de la señal, siendo  $T_{per} = 1ms$ , es  $C_i(t)$ :

$$C_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} G_i(t - nT_{per}),$$

El tiempo de chip por tanto es  $1/1.023 = 1\mu s$ . Como se verá posteriormente, estos códigos se multiplicarán por el mensaje de navegación para componer parte de la componente en fase de la señal L1.



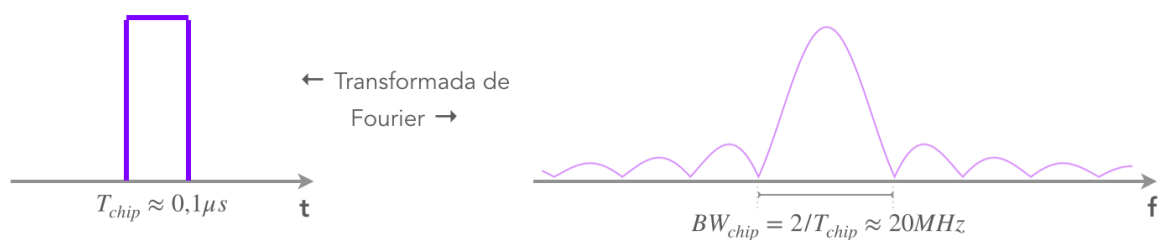
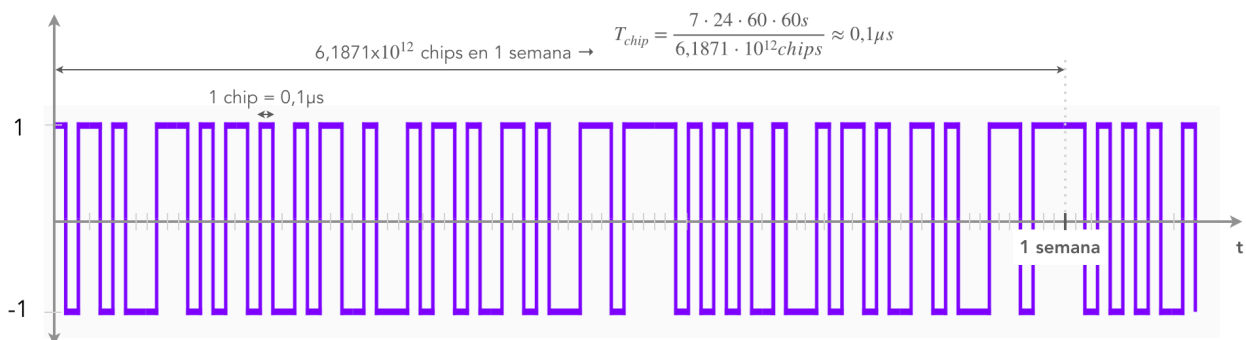
**MODULACIÓN BPSK L1 C/A [5]**

### 1.1.2. Código P

El código P es un código de precisión para uso militar, y se construye de manera similar al código C/A, pero con 4 registros de desplazamiento en lugar de 2, y de 12 bits en lugar de 10. Consta de una longitud de  $6,1871 \times 10^{12}$  chips transmitidos cada 7 días, es decir, con una tasa de  $10,23\text{Mbps}$ , lo cual significa que el periodo de chip es  $T_{chip} = \frac{1}{10,23\text{MCps}} \approx 0,1\mu\text{s}$ . Eso significa que en el dominio temporal es una señal una décima parte más estrecha que la de C/A.

En el dominio frecuencial por tanto posee un espectro 10 veces más ancho, de  $20\text{MHz}$ , por lo que ofrece mayor robustez frente a interferencias de lo que ya lo hacía el código C/A.

Dado que es un código tan rápido y tan largo, se asumió que los receptores se enlazarían con el código C/A para adquirir las efemerides y datos de tiempo y posición aproximados, y luego con el código P rectificarían esos datos para obtener una mayor precisión. Por tanto, no es un código operativo por sí mismo, sino que requiere de una adquisición previa del código C/A.



#### FORMA TEMPORAL Y ESPECTRAL DE CHIP P(Y) [5]

Mientras que el código PRN C/A son únicos para cada satélite, para el código P cada uno transmite un segmento diferente de una secuencia de código P maestro, de aproximadamente  $2,35 \cdot 10^{14}$  chips de largo.

### 1.1.3. Código Y

El código Y es una versión del código P que se utiliza cuando está activo el modo *anti-spoofing* (A/S). La finalidad de este modo es que los receptores no caigan en la trampa de tomar como auténticas señales falsas emitidas con fines maliciosos. Para ello se encripta el código P a través de un código W, generando para ambas portadoras el llamado código Y, al cual solo pueden acceder usuarios autorizados por el Departamento de Defensa. Para facilitar la nomenclatura, suele hacerse referencia genérica al código P(Y) para incluir ambas versiones del código, encriptada o sin encriptar.

### 1.1.4. Código M

La señal militar modernizada (Código M), que apareció en el Bloque IIR-M, está diseñada exclusivamente para uso militar y está destinada a reemplazar como señal de precisión al código P(Y), ya que ofrece un mejor rendimiento y mayor flexibilidad.

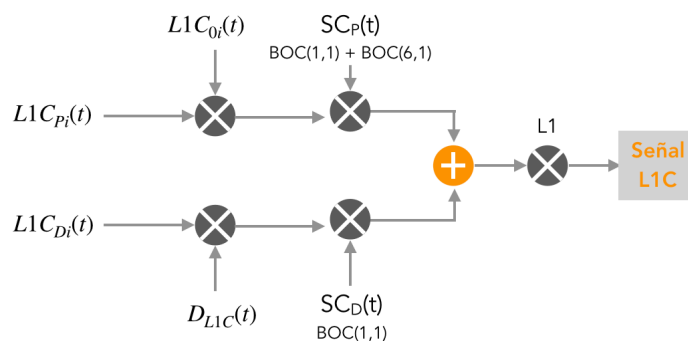
El código M proporciona una mejor resistencia de interferencia que la señal P(Y), principalmente porque permite la transmisión de una potencia mayor sin interferencia con el código C/A o los receptores con código P(Y). Además, la adquisición de la señal es más robusta y ofrece una mayor seguridad en términos de exclusividad, autenticación y confidencialidad que se logra en parte gracias a un sistema optimizado de distribución de claves.

Debido al uso restringido de esta señal, al igual que ocurre con el código P(Y), no se cuenta con gran detalle de cómo se genera la señal.

### 1.1.5. Señal L1C

Actualmente hay una nueva señal civil que se plantea que esté próximamente operativa en banda L1 sobre 2020, la señal L1C. En la especificación de interfaz IS-GPS-800E <sup>[6]</sup>, donde está descrita, se plantea como una señal con dos componentes principales: un piloto **L1C<sub>P</sub>** y una señal de datos **L1C<sub>D</sub>**:

- ▶  $L1C_{P_i}(t)$  es la secuencia pseudoaleatoria de la señal piloto del satélite *i*-ésimo, y que modula por un código de rango de superposición  $L1C_{0_i}(t)$  usando una combinación de modulación BOC(1,1) y BOC(6,1).
- ▶  $L1C_{D_i}(t)$  es la secuencia pseudoaleatoria de la componente de datos que identifica al satélite *i*-ésimo, y que modula al mensaje de navegación  $D_{L1C_i}(t)$  usando únicamente modulación BOC(1,1).



ESQUEMA MODULACIÓN L1C <sup>[6]</sup>

Ambas componentes se transmiten en fase en lugar de en cuadratura, como ocurre con L5. Los códigos rango de ambas componentes,  $L1C_{P_i}(t)$  y  $L1C_{D_i}(t)$ , son secuencias pseudoaleatorias que identifican al satélite  $i$ -ésimo. Tienen una longitud de 10 ms con una tasa de 1,023Mbps, es decir, 10.230 chips. La señal piloto se modula a su vez por un código de superposición  $L1C_{O_i}(t)$  que es independiente y predefinido para cada satélite, con una longitud de 18 segundos y una tasa de 100bps, es decir, una longitud total de 1.800 bits.

Los secuencias de  $L1C_{P_i}(t)$  y  $L1C_{D_i}(t)$  se generan de la misma manera, derivándose de una secuencia única de longitud 10.223 bits a la que se inserta un código de expansión de 7 bits insertado en un punto que depende del valor de  $i$ . La secuencia inicial es conocida como secuencia de Legendre, definida como  $L(t)$  para  $t = 0, \dots, 10.222$ , de la siguiente forma:

$$L(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t = 0 \\ 1 & \text{si existe un entero } x \text{ tal que } t \text{ es congruente con } x^2 \text{ módulo } 10.223 \\ 0 & \text{si NO existe un entero } x \text{ tal que } t \text{ es congruente con } x^2 \text{ módulo } 10.223 \end{cases}$$

Esta secuencia es utilizada en los GNSS para construir lo que se conoce como Código Weil  $W(t)$ , que es el  $\oplus$  exclusivo entre  $L(t)$  y una versión de sí misma desplazada. Ese desplazamiento se conoce comunmente como Índice Weil, denotado como  $w$ , y permite expresar el código Weil como:

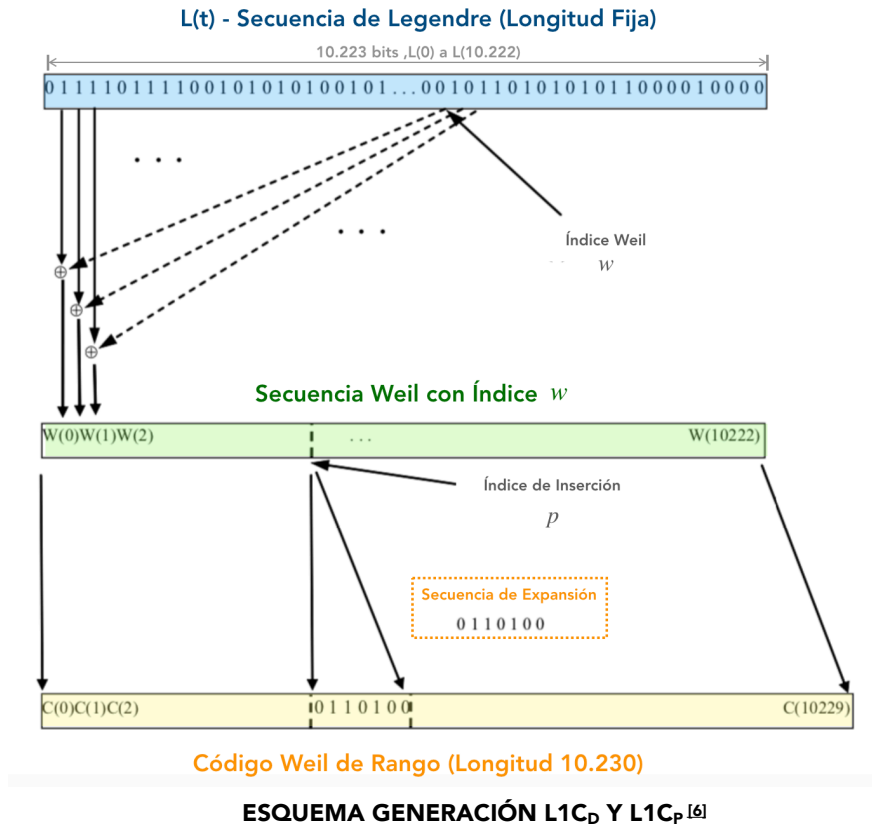
$$W_i(t, w) = L(t) \oplus L((t + w) \text{ módulo } 10.223), \text{ para todo } t = 0, \dots, 10.222$$

Finalmente, el código de rango se construye insertando una secuencia de expansión fija en el código de Weil. La secuencia de expansión se compone de siete valores de bit [0 1 1 0 1 0 0], que se insertan en el punto especificado por el Índice de Inserción  $p$ , donde  $p = 1, \dots, 10.223$ . La secuencia de expansión se inserta antes del valor  $p$ -ésimo del código de Weil.

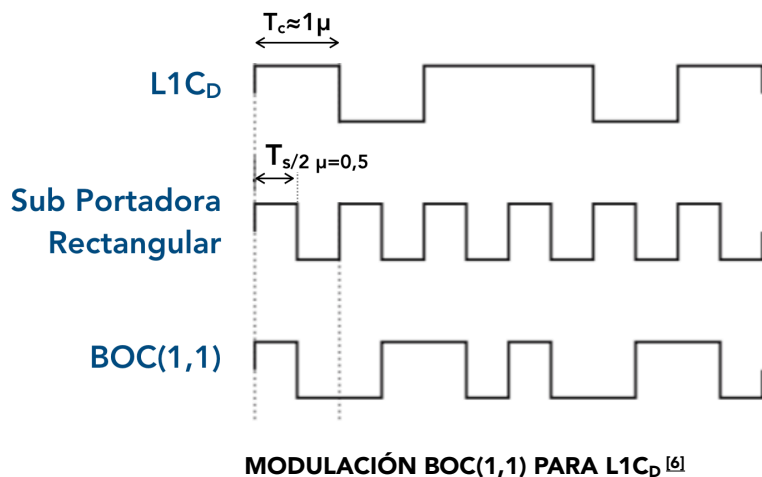
De esa forma, los códigos definidos para  $L1C_{P_i}(t)$  y  $L1C_{D_i}(t)$  están definidos como:

$$\begin{aligned} L1C_{X_i}(t) &= W_i(t; w) && \text{para } t = 0, \dots, p - 2 \\ L1C_{X_i}(t) &= 0 && \text{para } t = p - 1 \\ L1C_{X_i}(t) &= 1 && \text{para } t = p \\ L1C_{X_i}(t) &= 1 && \text{para } t = p + 1 \\ L1C_{X_i}(t) &= 0 && \text{para } t = p + 2 \\ L1C_{X_i}(t) &= 1 && \text{para } t = p + 3 \\ L1C_{X_i}(t) &= 0 && \text{para } t = p + 4 \\ L1C_{X_i}(t) &= 0 && \text{para } t = p + 5 \\ L1C_{X_i}(t) &= W_i(t - 7; w) && \text{para } t = p + 6, p + 7, \dots, 10.229 \end{aligned}$$

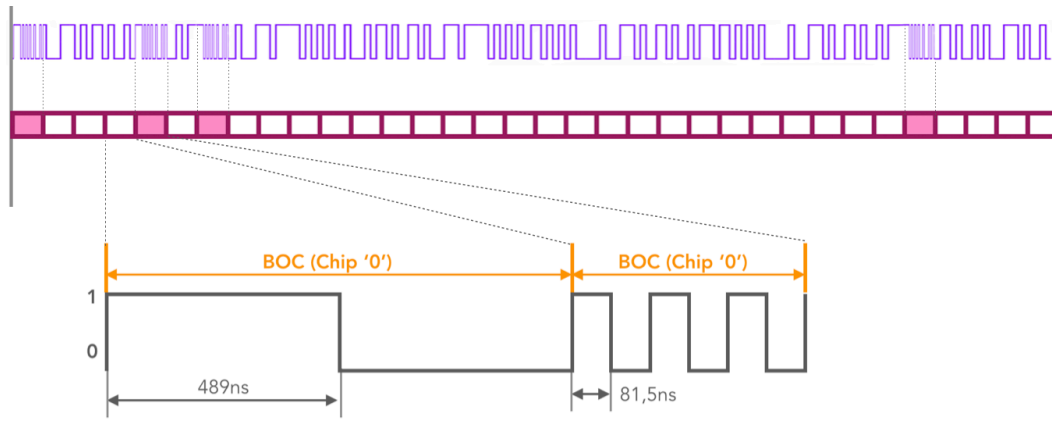
Como hemos comentado, la señal piloto se modula adicionalmente por un código de superposición  $L1C_{O_i}(t)$  que se construye usando registros de desplazamiento (LFSR) de 11 etapas, combinando dos secuencias con un  $\oplus$ -exclusivo. Se trata del truncamiento de un código de 2.047 bits a uno de 1.800bits.



Como se ha comentado, el flujo de datos de la señal  $L1C_{Di}(t)$  se modula con la portadora de RF L1 utilizando BOC(1,1), un tipo de modulación que se explicará más en detalle en el apartado de Galileo, y donde se utiliza una portadora binaria en lugar de una sinusoidal normal, con frecuencia de subportadora  $f_s=1.023\text{MHz}$  y una tasa de chips de  $1.023\text{Mbps}$  y se combinan como una suma de módulo 2:



Para la señal piloto  $L1C_{Pi}(t)$  se usa la modulación TMBOC (**T**ime **M**ultiplexed **BOC**), que resulta de una combinación de BOC(1,1) y BOC (6,1) multiplexadas en el tiempo. En BOC (6,1) tenemos que la portadora binaria tiene una frecuencia de  $6 \times 1,023\text{MHz} = 6,138\text{MHz}$  ciclos de la portadora binaria. El detalle de la multiplexación puede observarse en la siguiente figura:

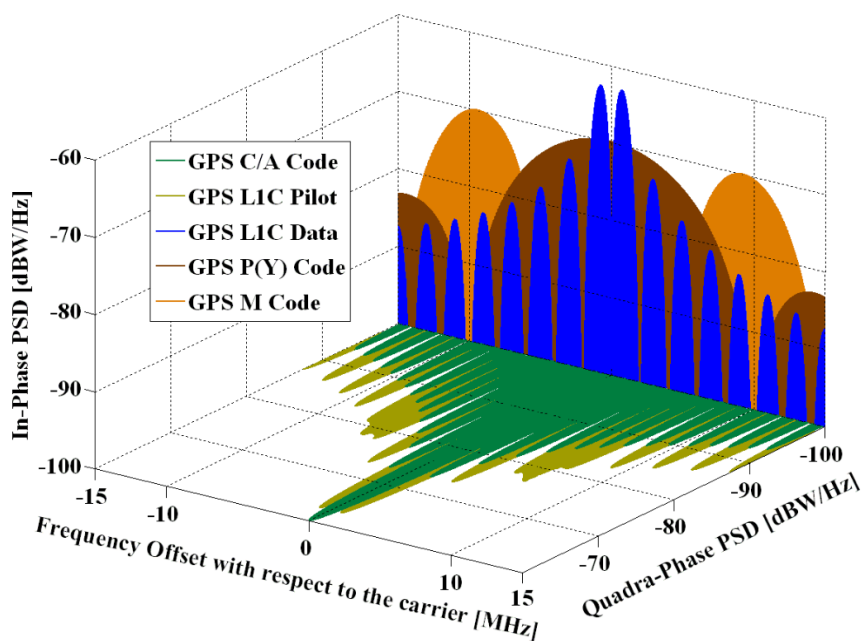


**SECUENCIA COMBINADA CON BOC(6,1) EN LOS CHIPS 0, 4, 6 Y 29 [6]**

Como puede observarse, todo los símbolos de la señal  $L1C_{Pi}(t)$  corresponden con la componente BOC(1,1) exceptos aquellos que se dan en  $t = u_t + 33v_t$  donde  $u_t = 0, \dots, 32$  y  $v_t = 0, \dots, 309$ . Es decir, si dividimos el código total de 10.230 chips en 310 ciclos de 33 chips, habría 29 ciclos con modulación BOC(1,1), mientras que en las posiciones 0, 4, 6 y 29 del ciclo tendríamos los datos modulados con BOC(6,1).

La señal piloto tienen un 75% de la potencia de la señal L1C, mientras que la componente de datos lleva el otro 25%. Esto se debe a que tal y como está diseñado coloca todas las contribuciones de mayor frecuencia en la componente piloto, beneficiando al máximo el seguimiento de esta señal.

Al igual que en el caso de los códigos C/A y P(Y), también se transmitirán versiones incorrectas de estas señales, denominadas L1CP no estándar (NSCP) y L1CD no estándar (NSCD), en caso de que querer proteger a los usuarios de utilizar señales anómalas, pero no existe demasiado detalle sobre ellas.



**ESPECTRO COMPLETO BANDA L1 (L1C<sub>P</sub> SE TRANSMITE EN FASE CON L1C<sub>D</sub>, Y NO EN CUADRATURA COMO SE MUESTRA) [4]**



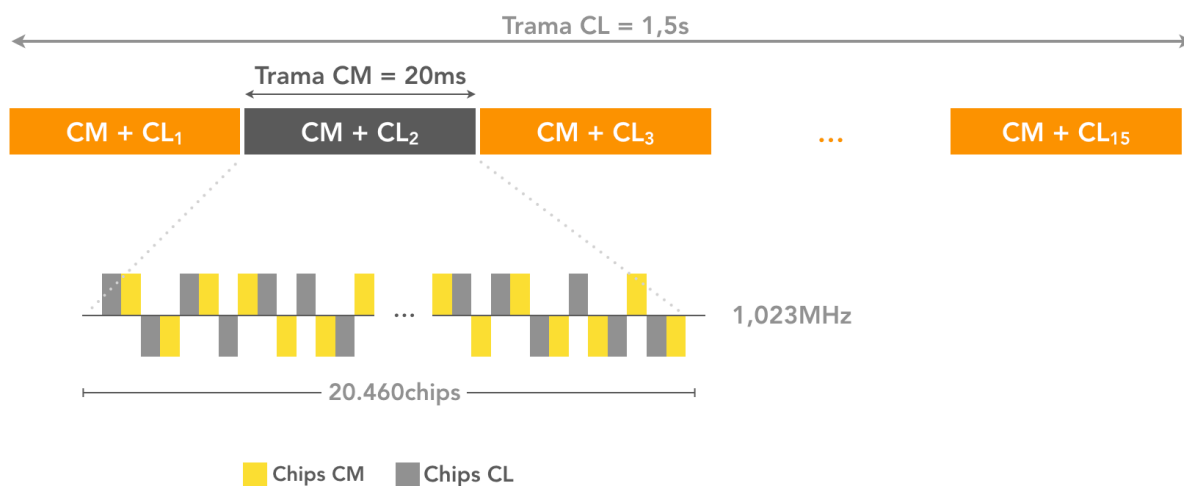
## 1.2. Señales en la Banda L2

Historicamente la banda L2 era utilizada para transmitir el **código P(Y)**, de manera que hubiera redundancia con la banda L1. Sin embargo, a raíz de la generación de satélites IIR-M se introdujeron dos nuevas señales en la banda L2: la señal **militar M**, de la que ya se ha hablado en la banda L1, dado que se modula por las dos portadoras, y una nueva señal civil exclusiva, **L2C**, formada por los códigos **L2CM** y **L2CL**.

### 1.2.1. Códigos L2CM y L2CL

Incluida por primera vez el bloque IIR-M, la señal civil L2C es una señal que no transmiten todos los satélites, sino aquellos posteriores a 2005. Esta nueva señal tiene el objetivo de mejorar la precisión de la navegación, proporcionar una señal fácil de rastrear a la equivalente previa, C/A, y actuar como una señal redundante en caso de interferencia localizada.

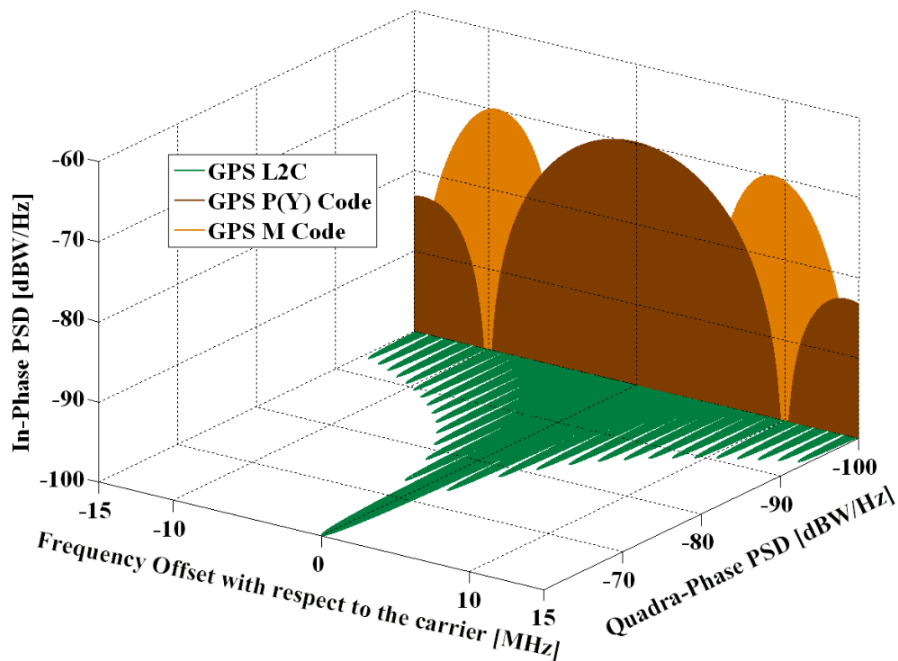
L2C está formada por dos secuencias de código PRN distintas para proporcionar información de alcance; el **código civil-moderado** (llamado **CM**), y el **código civil-largo** (llamado **CL**). Los dos códigos están generados usando el mismo generador polinómico de códigos, con una tasa de 511,5Kbps, con la particularidad de que cada patrón se resetea y vuelve al estado inicial después de un cierto número de chips según el código. En el caso del código CM, esa longitud es de 10.230 chips, por lo que vemos que el periodo de repetición es de  $10.230 \text{ chips} / 511,5 \text{ kbps} = 20 \text{ ms}$ . El código CL, como su nombre indica, es más largo. Tiene una longitud de 767.250 chips, por lo que se repite cada 1.500 ms. Aunque cada señal se transmite a 511,5Kbps, ambas se multiplexan en el tiempo (TDM), dando lugar a una señal de 1,023Mbps.



#### DESCRIPCIÓN SECUENCIAS CM Y CL [5]

Una de las ventajas de transmitir dos frecuencias civiles, la señal C/A y la L2C, al igual que ocurre con el código P(Y) que se transmite en ambas bandas, es que podemos medir mejor el error ionosférico de manera que obtengamos una mayor precisión. Sin embargo, la señal L2C por sí sola no resulta tan útil, ya que los usuarios que utilizan únicamente la señal L2C pueden esperar un 65% más de incertidumbre de posición debido al error ionosférico que con la señal L1 sola.

La señal L2C se transmite en la componente en cuadratura de la señal, mientras que al igual que en la banda L1 los códigos P(Y) y M se transmiten en la componente en fase.



ESPECTRO COMPLETO BANDA L2 [4]

### 1.3. Señales en la Banda L5

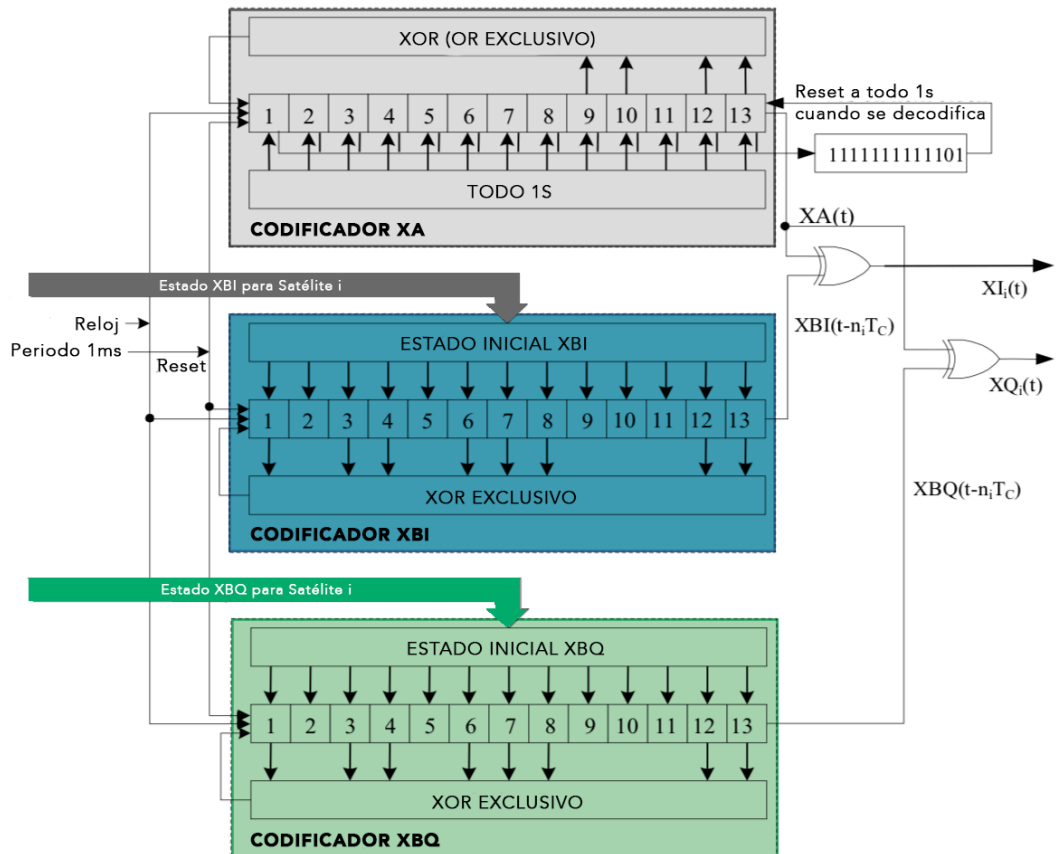
□ A raíz del bloque IIF, en 2010, los satélites tienen disponible una nueva señal civil en una nueva banda de frecuencia: la banda L5. Esta nueva banda aporta robustez frente a las interferencias, al tratarse de una parte de la banda protegida internacionalmente para la radionavegación aeronáutica, además de mejorar las prestaciones del sistema por su coexistencia y redundancia con el resto de bandas.

Se trata de una señal especialmente pensada para aplicaciones *safety-of-life*. En ella se transmiten dos códigos, uno en fase y otro en cuadratura: el código L5I y el código L5Q, respectivamente.

#### 1.3.1. Códigos L5 I y L5Q

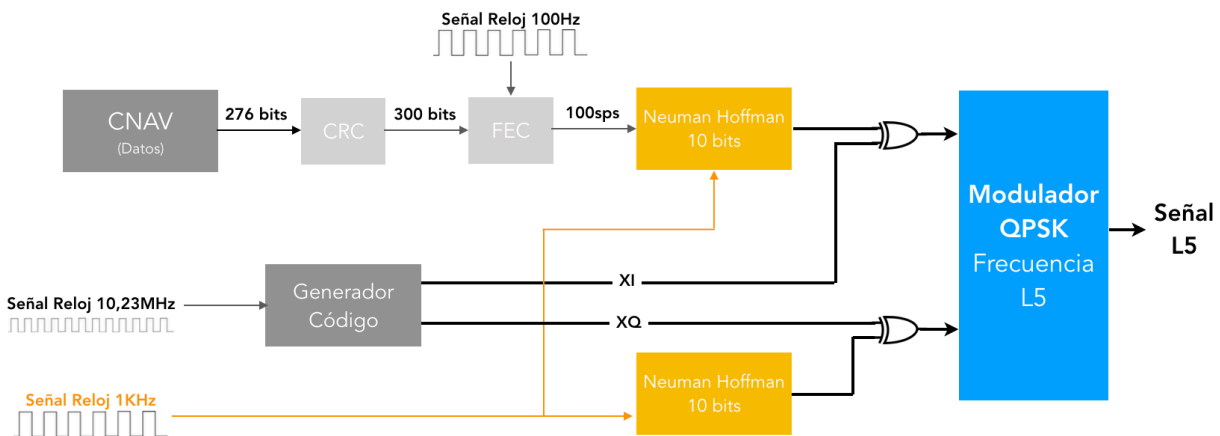
Ambos códigos de rango PRN  $I_5(t)$  y  $Q_5(t)$  se generan usando registros de desplazamiento de 13 bits, donde el vector de inicialización es único para cada satélite y cada código. Aunque se trata de códigos independientes, están sincronizados en el tiempo. Las secuencias que los generan son  $X_A$  y  $X_B$  de longitud 8.190 chips y 8.191 chips respectivamente, que se reinician hasta generar el código de 10.230 chips cada 1ms. Es decir, se trata de señales de 10.23Mbps.

A continuación, el código  $X_I$  se modula con los datos de navegación, conformados en la señal CNAV, de la que hablaremos posteriormente, mientras que  $X_Q$  es una señal piloto, que no modula ningún mensaje con información. Ambas se modulan a continuación con un código de Neuman-Hoffman de 10 bits sincronizado a 1KHz, en el caso de  $X_I$ , mientras que  $X_Q$  lo hace con uno de 20 bits también a 1KHz. Finalmente, ambas se modulan en fase y cuadratura a la frecuencia de la portadora L5. El esquema completo sería el siguiente:

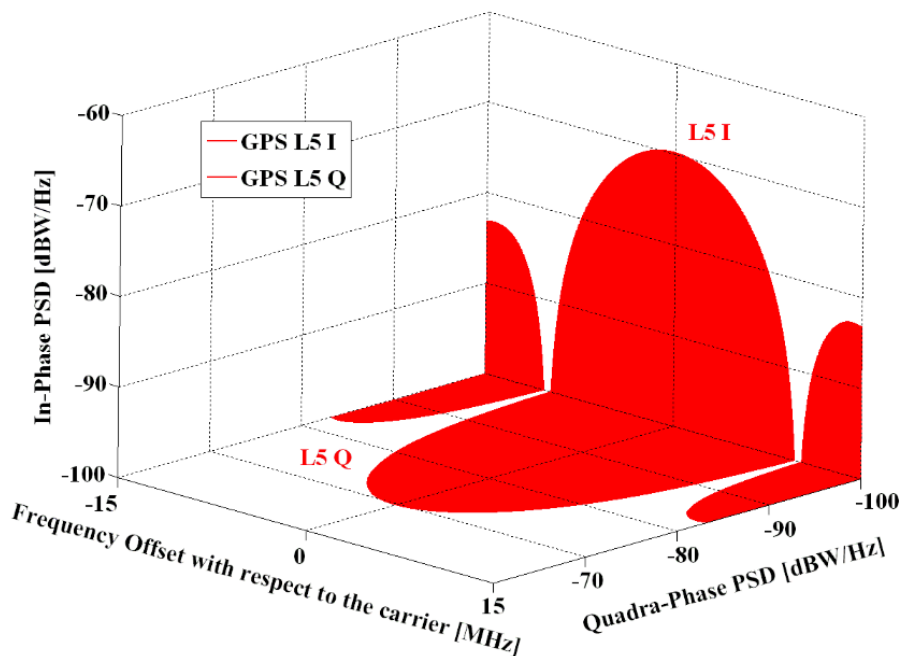


**ESQUEMA GENERACIÓN CÓDIGOS XI Y PORQUE [7]**

Esta señal presenta algunas mejoras con respecto a C/A de L1 y L2C, como una estructura más eficiente que permite obtener un mejor rendimiento. También tiene un ancho de banda más amplio, lo cual permite una potencia de transmisión mayor, así como robustez ya que el procesamiento del cálculo de la autocorrelación es más sencillo.



**MODULACIÓN SEÑALES L5 [7]**



ESPECTRO SEÑALES EN L5 [4]

## 2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN

Mientras los distintos códigos PRN nos permiten identificar al satélite, es necesario enviar información que permita conocer la posición de cada uno para poder calcular la posición del receptor. Esta es la función del mensaje de navegación, que contiene la información necesaria para que el usuario calcule la posición los satélites a raíz del tiempo de transmisión de la señal recibida. Además de esto también aporta otra información útil, como por ejemplo el estado de los satélites, o una referencia horaria.

Al igual que los propios satélites y los códigos a utilizar, los mensajes de navegación también han ido variando con el tiempo conforme se modernizaba el sistema. En un primer momento teníamos un mensaje de navegación denominado LNAV (y que se continúa transmitiendo), mientras que a raíz de bloque IIR-M se introducen nuevos formatos de mensajes de navegación, como CNAV.

### 2.1. LNAV

[5] Es el primer mensaje de navegación, llamado así por denotarse como *Legacy Navigation*, correspondiente a los primeros bloques de satélites puestos en órbita.

El mensaje de navegación  $D_k(t)$  es una señal de 50bps con los datos organizados en tramas o páginas de 30 segundos de duración. A su vez, estas tramas se dividen en 5 subtramas de 6s y 300bits, divididas a su vez en 10 palabras de 30 bists. Estas palabras son:

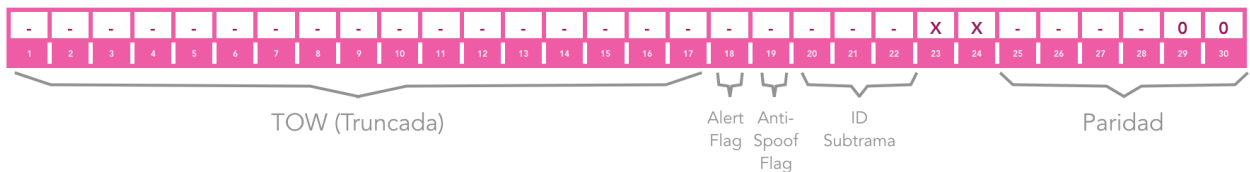
1. **TLM (TeLeMetry)**: Está formada inicialmente por 8 bits de preámbulo (con secuencia 10001011) para indicar al receptor el inicio de la subtrama. Los siguientes 14 bits conforman el mensaje TLM, que contiene información necesaria para posicionamiento preciso, solo para

usuarios autorizados y el segmento de control. Le siguen el bit de estado de la integridad del satélite (Integrity Status Flag, ISF), y un bit reservado y por último hay 6 bits de paridad.



**DETALLE DE TLM WORD (30 BITS) [5]**

2. **HOW (HandOver Word):** Como su nombre indica, es el que permite al receptor pasar del código C/A al código P(Y). Comienza con los 17 bits más significativos del *Time Of Week* (TOW), que indica en qué momento se ha iniciado la transmisión de la subtrama. El truncamiento del TOW deja esta medida con una resolución de 6 segundos. A continuación tenemos el flag de alerta y el de modo *anti-spoofing* ON, seguidos de un código de 3 bits para identificar la subtrama en la que nos encontramos. La palabra termina con 2 bits reservados y 6 de paridad.

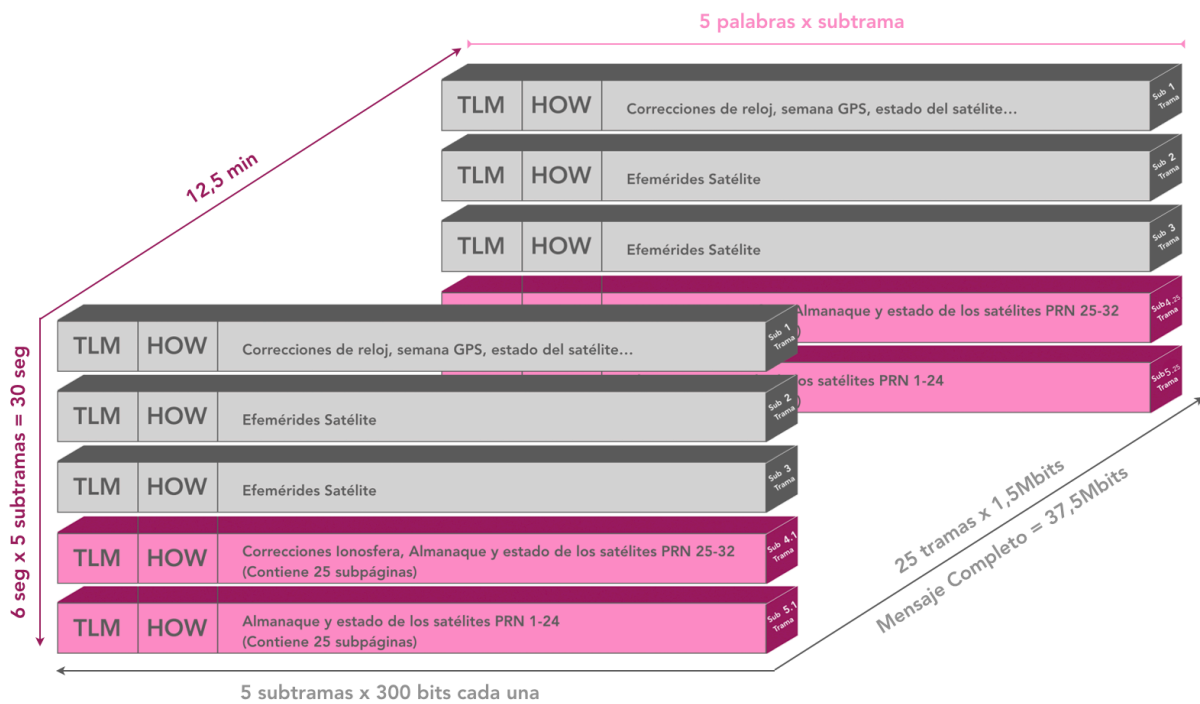


Subtrama	ID
Invalid	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
Invalid	110
Invalid	111

**DETALLE DE HOW WORD (30 BITS) [5]**

3. **Información de subtrama:** Las siguientes palabras no son comunes, sino que difieren según la subtrama:
  - ▶ Subtrama 1: contiene información del número de semana GPS en la que se transmite la señal. También aporta correcciones del reloj del satélite, y cierta información de estado propio de la información que transmite. Se actualiza en cada nueva trama.
  - ▶ Subtramas 2 y 3: contienen las efemérides del satélite, es decir, los parámetros orbitales, anomalías y demás información para determinar su posición. También se actualizan en cada nueva trama.
  - ▶ Subtramas 4 y 5: Contienen información de almanaque de todos los satélites de la constelación, de manera que facilita al receptor poder adquirir señales de otros satélites, así como parámetros de corrección ionosférica y de sincronización del reloj GPS con el sistema UTC de tiempo. No se actualizan en cada subtrama, sino que la información completa se distribuye en 25 subtramas.

Por tanto, la información completa se obtiene tras enviar las 25 tramas que conforman el almanaque de la constelación completa, por lo que todo el mensaje de navegación tarda en transmitirse  $\frac{30s \cdot 25sf}{60s} = 12,5min$ .



### ESTRUCTURA MENSAJE NAVEGACIÓN GPS [5]

ID Tipo Mensaje	Descripción: Tipo Información
10 - 11	Efemérides y estado del satélite
12, 31, 37	Almanaques
13 - 14, 34	Corrección Diferencial
15, 36	Mensajes de Texto
30	Corrección del retardo de grupo e ionosférico
32	Parámetros de orientación de la Tierra
33	Parámetros UTC
35	GPS/GNSS Time Offset

Hay dos tipos de mensajes de navegación LNAV, **LNAV-L**, usado para los satélites con PRN del 1 al 32 (llamados PRN bajos) y **LNAV-U**, usado para los satélites con PRN del 33 al 63 (llamados PRN altos). Las tramas y subtramas tienen un formato similar, pero los almanaques de las subtramas 4 y 5 de los satélites de un tipo no contienen información de los del otro tipo. Es decir, solo propagan información sobre aquellos con el mismo tipo de mensaje de navegación.

Los datos de los satélites se actualizan cada 24 horas, con un histórico de datos de hasta 60 días, por si la actualización se interrumpe por alguna anomalía. Las actualizaciones cargan nuevas

efemérides, y también almanagues, aunque estos se actualizan con menos frecuencia, ya que el segmento de control es el encargado de actualizarlos al menos cada 6 días.

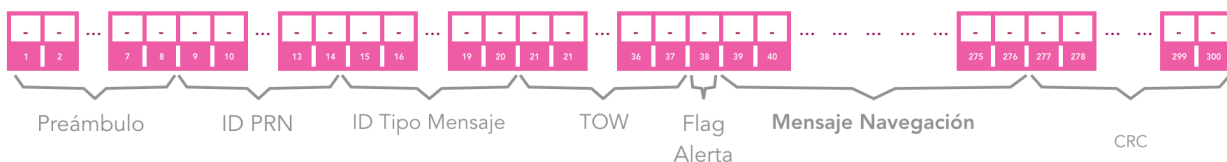
Los satélites emiten una nueva efeméride cada dos horas y suelen ser válidas por unas cuatro más. Uno de los aspectos más críticos en el desarrollo de este sistema es el tiempo necesario para obtener las efemérides, ya que aunque los receptores evolucionan y el tiempo para adquirir las señales del satélite mejora, los datos de las efemérides debido a su baja tasa de transmisión de datos requieren de 18 a 36 segundos para ser recibidos.

## 2.2. CNAV

☒ A raíz del bloque de satélites mejorados, las nuevas señales empiezan a utilizar mensajes de navegación también mejorados. Es cuando surgen los códigos CNAV y MNAV, que reemplazan la estrategia rígida del mensaje legacy conformado por tramas y subtramas mediante un mensaje de datos más flexible y preciso, utilizando un formato pseudo-empaquetado de mensajes de 6 segundos y 300 bits, análogos a los de LNAV.

La diferencia principal es que mientras las tramas de LNAV tienen contenido de información fijo, los mensajes CNAV pueden ser de uno o varios tipos definidos que vienen determinados por el tipo de trama que los contiene. Tiene la siguiente estructura:

- ▶ **Preámbulo (8 bits):** con una secuencia determinada para indicar el inicio del mensaje.
- ▶ **ID PRN (6 bits):** para identificar el satélite que está transmitiendo la información.
- ▶ **ID Tipo Mensaje (6 bits):** identificador que codifica el tipo de información que contiene el mensaje de navegación en sí.
- ▶ **TOW Truncada (17 bits):** al igual que en el caso de LNAV, se trata de los 17 bits más significativos del TOW
- ▶ **Flag de alerta (1 bit):** para indicar si la calidad del mensaje es correcta o si el usuario debe valorar el descarte de la información.
- ▶ **Mensaje de Navegación (238bits):** Contiene el mensaje propiamente, de una naturaleza diferente, y con una estructura particular según el tipo marcado en el ID de Mensaje.
- ▶ **CRC (24 bits):** bits de comprobación de redundancia cíclica que permiten aplicar técnicas avanzadas en la detección de errores.



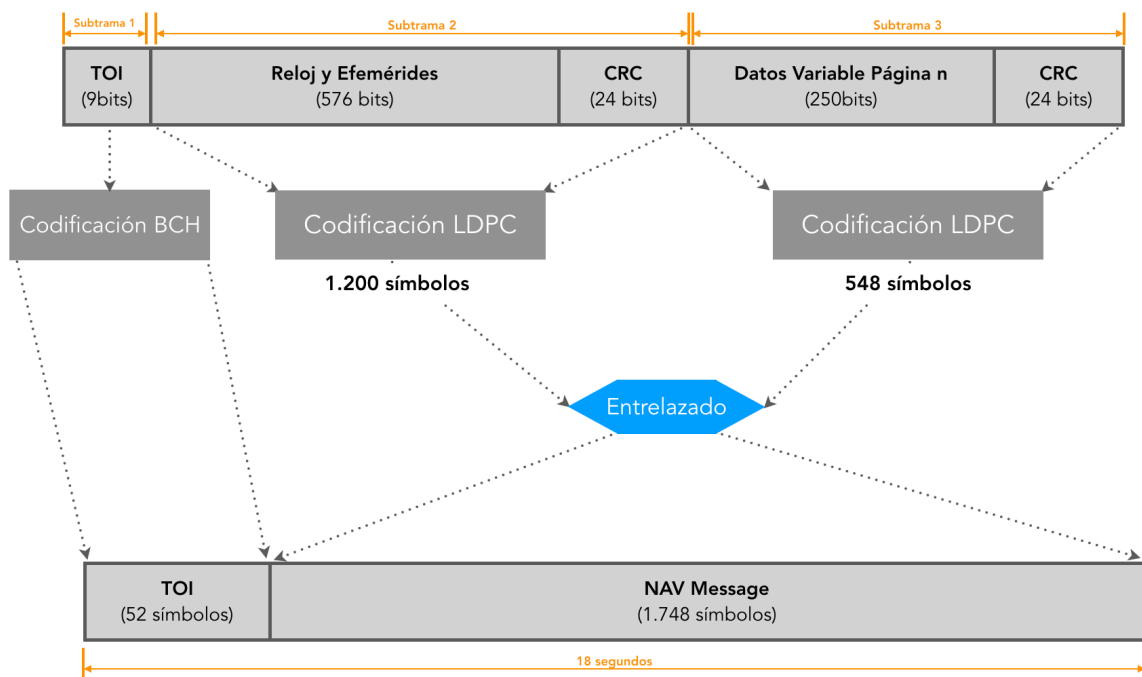
### EJEMPLO MENSAJE CNAV ☒

En CNAV al menos 1 de cada 4 paquetes son datos de efemérides, y el mismo límite aplica a datos de reloj. Con una constelación de 32 satélites y los requisitos actuales de lo que se necesita enviar, se utiliza menos del 75% del ancho de banda. Solo se ha definido una pequeña fracción de los tipos de paquetes disponibles, lo que permite que el sistema crezca y aporte funcionalidades y avances sin necesidad de renovar todo, haciéndolo compatible con lo ya existente.

Los satélites del bloque IIF tienen la capacidad de almacenar al menos 48 horas de datos de navegación CNAV, con los márgenes de memoria actuales, para proporcionar un servicio de posicionamiento CNAV sin contacto con el segmento de control durante ese periodo. En el caso del bloque III, ese margen se amplía hasta 60 días.

### 2.2.1. CNAV L1C (CNAV-2)

La segunda versión del mensaje modernizado CNAV, CNAV-2, está compuesta por tramas y subtramas organizadas de distinto modo a su predecesor, ya que tienen longitud variable. El mensaje completo tiene una longitud de 1.800 bits (incluyendo el FEC) y se transmite a 100bps. Son necesarias múltiples tramas para enviar el mensaje de navegación completo.



**ESTRUCTURA MENSAJE NAVEGACIÓN L1C D<sub>L1C</sub>(T)** [6]

Las subtramas 1-3 se entrelazan siguiendo la siguiente estructura:

- ▶ **Subtrama 1** → TOI (*Time Of Interval*): 9 bits que marcan el tiempo del intervalo, es decir, el comienzo de la siguiente trama. Utiliza una codificación Bose, Chaudhuri y Hocquenghem (BCH), utilizando un registro de 8 bits.
- ▶ **Subtrama 2** → Proporciona datos de reloj y efemérides que son nominalmente invariables en múltiples marcos. También proporciona el recuento de ITOW, que es un contador que representa el número de bloques de dos horas que se han sucedido desde la referencia semanal anterior.
- ▶ **Subtrama 3** → Proporciona otros datos de navegación que se distribuyen en varias páginas. Cada página de la subtrama 3 proporciona datos diferentes, y se plantea la introducción de páginas diferentes en el futuro. Se debe tener en cuenta que la secuencia de transmisión de las páginas del subtrama 3 es variable, y como tal, los usuarios no deben esperar un patrón fijo de secuencia de páginas. El subtrama 3 proporciona un número PRN de 8 bits del SV de transmisión con un rango de 0 (00000000) a 255 (11111111).



Las subtramas 2 y 3 utilizan un algoritmo de paridad CRC para la corrección de errores de 24 bits, y se codifican posteriormente de manera entrelazada con un codificador LDPC (**L**ow **D**ensity **P**arity **C**heck) de 1/2.

### 2.2.2. CNAV L2 CM

☒ Para el bloque de satélites IIF y posteriores, la secuencia de bit  $D_c(t)$  tiene una codificación convolucional de 1/2 sobre la tasa de bits de 50bps, para implementar FEC (**F**orward **E**rror **C**orrection), por lo que finalmente se obtiene una señal con una tasa de información útil de 25bps. Esta secuencia es la que modula el código L2 CM para transmitir los datos hasta los receptores en la banda L2.

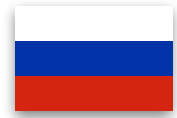
### 2.2.3. CNAV L5

☒ De la misma forma, en la banda L5 la secuencia  $D_s(t)$  para el uso de FEC tiene también una codificación de 1/2 pero sobre una tasa de 100bps, dando lugar a una señal de 50bps, que es la que posteriormente se modula con el códigos de Neuman Hofman de 1KHz y con la propia señal L5, en la componente en fase de la señal L5.

## 2.3. MNAV

Al igual que con los códigos de rango, se sabe poco del mensaje de navegación militar MNAV. Entra a formar parte del sistema con el bloque IIR-M, al igual que en el caso de CNAV, y siguiendo la misma filosofía, tiene un formato flexible de datos en lugar de estar organizado en tramas y subtramas como el mensaje *legacy*. También permite el uso de FEC y técnicas avanzadas de corrección de errores como CRC.

## 3.2. GLONASS



Se trata de un GNSS desarrollado por la Unión Soviética, siendo hoy administrado por la Federación Rusa, y que constituye el homólogo del GPS estadounidense y del Galileo europeo.

### 3.2.1. Características Generales

Durante los 60, la Unión Soviética entra en los sistemas de posicionamiento por satélite con el incipiente sistema *Tsikada* y el *Cyclone* como primer satélite en órbita, con la idea de desarrollar un sistema análogo al GPS estadounidense. Sin embargo, pronto descubren que estos primeros vehículos de órbita baja no pueden satisfacer los requisitos del sistema y se ven obligados a virar el rumbo.

Las pruebas de GLONASS como tal se inician en 1982, con el lanzamiento de los satélites Kosmos-1413, Kosmos-1414 y Kosmos-1415. Su desarrollo continúa tras la disolución de la Unión Soviética, llevado por la Federación Rusa, hasta que en 1993 finalmente se declaró el sistema operativo, llegando a su punto óptimo en 1995 con 24 satélites en órbita.

El sistema ha tenido altos y bajos a lo largo de los años, castigado por el declive en la economía rusa, y el fin de la financiación de los proyectos espaciales. Sin embargo, a principio de la década de los 2000, con la presidencia de Vladimir Putin, Rusia vuelve a impulsar la inversión en este proyecto, decretando en 2007 que GLONASS sería un servicio de posicionamiento capaz de prestar servicio tanto a consumidores rusos como a extranjeros de forma gratuita y sin limitaciones.

Utiliza bandas L1, L2 y L3, contiguas a las bandas L1, L2 y L5 de GPS respectivamente, y a diferencia del satélite americano, utiliza multiplexación el frecuencia (FDMA) en lugar de en código (CDMA) para el acceso al medio de los distintos satélites.

### 3.2.2. Segmento Espacial

La función del segmento espacial de GLONASS, como en cualquier GNSS, es la de almacenar y retransmitir el mensaje de navegación enviado por el segmento de control. Todas estas transmisiones están controladas por relojes atómicos de alta precisión a bordo de los satélites. Está compuesto por una constelación de 24 satélites MEO (*Medium Earth Orbit*) distribuidos en 3 planos orbitales con 8 satélites cada uno a una distancia inferior a la de GPS, de 19.140Km, que tardan unas 11 horas en dar la vuelta completa a la Tierra. Con 18 satélites es suficiente para dar un servicio integral en todo el territorio ruso. El lanzamiento de Satélites en GLONASS se ha distribuido en bloques a lo largo de los años:



**CONSTELACIÓN GLONASS**

- **Bloque Prototipo (Generación Cero)** → Entre 1982 y 1985 se enviaron hasta 18 satélites prototipo de GLONASS. Aunque estaban diseñados para durar únicamente un año, muchos

tuvieron una vida útil real superior a los 14. Se trató de una fase de experimentación, donde aunque no se consiguiera tener operativo el sistema se recopilaron datos que permitieron continuar con el desarrollo.

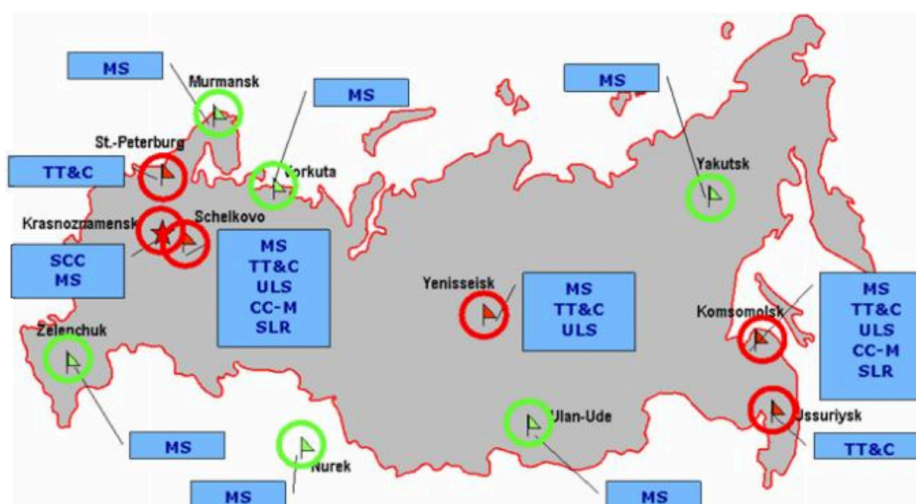
- ▶ **Bloques de la Primera Generación** → Los primeros satélites GLONASS útiles se lanzaron entre 1985 y 1990. Los vehículos se dividieron en distintos bloques de lanzamiento (Ila, IIb y IIv), siendo la principal diferencia entre todos ellos la vida útil que oscilaba entre los 2 y los 3 años, aunque finalmente muchos alcanzaron casi el lustro de vida. Supusieron una mejora sustancial en los estándares de estabilidad en tiempo y frecuencia con respecto a la fase prototipo. Actualmente no queda ninguno de estos satélites en servicio.
- ▶ **Bloques de la Segunda Generación, GLONASS-M (o Uragan-M)** → Generación modernizada de satélites que fueron desarrollados a partir de 1990 y puestos en órbita el primero de ellos en 2003. Estos satélites ya tienen vidas útiles superiores a 7 años, como resultado de mejoras en el sistema de propulsión y en la estabilidad del reloj, que utiliza relojes atómicos de cesio. Aunque supone un salto en durabilidad con respecto a la generación anterior, aún están lejos de alcanzar a sus coetáneos de GPS. Una de las novedades que incorpora esta generación modernizada de satélites es la de incluir una nueva señal civil en la banda G2 que permite a los usuarios civiles cancelar la refracción ionosférica.
- ▶ **Bloques de la Tercera Generación, GLONASS-K** → Esta siguiente generación ya tenía ciclos de vida de unos 10 años, y un peso reducido que permite su lanzamiento en pares. Con esta nueva generación se incluye el uso de CDMA para multiplexar el medio en código, de manera que se combine con las señales *legacy* que lo multiplexaban en frecuencia. Se continúa lanzando satélites de este bloque en la actualidad.
  - **GLONASS K1** → Iniciado en 2011, incluye la nueva banda L3 con una nueva señal civil CDMA.
  - **GLONASS-K2** → Iniciado en 2019, incluye señales compatibles CDMA en las bandas tradicionales L1 y L2: L1OC/L1SC y L2OC/L2SC.
- ▶ **GLONASS-V (Fase de Diseño)** → Evolución de GLONASS-K para el uso de órbitas altamente elípticas. Roscosmos planea lanzar 6 satélites GLONASS-V entre 2023 y 2024. Estos satélites mejorarán la precisión.
- ▶ **GLONASS-KM (Fase Investigación)** → Prevista para 2030, se plantea como un salto en las señales transmitidas por GLONASS, incluyendo las señales abiertas L1OCM, L3OCM y L5OCM, para finalidades de *safety-of-life*. Esto implica la inclusión de una nueva banda L5.

	Satélites Legacy		Satélites Modernizados			
	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K1	GLONASS-K2	GLONASS-V	GLONASS-KM
Estado	Fuera Servicio	En Servicio	En servicio	En servicio	Fase de Diseño	Fase de Investigación
Señales	- L1OF, L1SF - L2SF	- L1OF, L1SF - L2OF, L2SF - L3OC (2014)	- L1OF, L1SF - L2SF, L2SF - L3OC	- L1OF, L1SF, <b>L1OC, L1SC</b> - L2SF, L2SF - L3OC	- L1OC, L1SC - <b>L2OC, L2SC</b> - L3OC	- L1OF, L1SF, L1OC, L1SC, <b>L1OCM</b> - L2SF, L2SF - L3OC, <b>L3OCM</b> - <b>L5OCM</b>
Vida Útil	3	7	10	10	-	-
Fechas Lanz.	1982 – 2005	2003 - ¿?	2011 - ¿?	2019 - ¿?	2023/25 - ¿?	2030 - ¿?

### 3.2.3. Segmento Control

[9] El sistema de control de GLONASS es el responsable de la correcta operación del sistema completo, gestionando la interacción del segmento espacial con el segmento de usuario. Al igual que en el caso de GPS, es el encargado de monitorizar el estado de los satélites, determinar sus efemérides y la señal de reloj, y actualizar los mensajes de navegación dos veces al día. Está distribuido de la siguiente forma:

- **1 Centro de Control del Sistema (SCC)**, en Krasnoznamensk: Responsable del control de la constelación, proporcionando funciones de telemetría y control remoto de los satélites, coordinando todas las funciones y operaciones en base al procesado de las señales recibidas de las centrales TT&C.
- **5 Centros de Telemetría, Seguimiento y control (TT&C)** que reciben y acumulan los datos recibidos por los satélites de señales de rango y demás datos de telemetría, que envían a la estación central para ser procesados.
- **2 Centrales de Control de Reloj (CC-M)**, que establecen la escala de tiempos del sistema por medio de un reloj atómico de hidrógeno de alta precisión y establecen la referencia con la que sincronizar los relojes atómicos de cesio a bordo de los satélites. Una es la redundancia de la otra en caso de fallo.
- **3 Centrales de Transmisión de datos (ULS)**, que envían los datos procesados y los mensajes de navegación de vuelta a los satélites.
- **2 Estaciones de Laser Ranging (SLR)** que monitorizan y aseguran la alta precisión del láser que a su vez es la única fuente de calibración para determinar las efemérides de GLONASS.
- **Una red de 4 Estaciones de Monitorización y Medidas, ampliable a otras 6 (MS)** que son las que reciben los datos de los satélites y los reportan a las centrales TT&C



SEGMENTO DE CONTROL GLONASS

### 3.2.4. Segmento de Usuario

[10] Como en el resto de GNSS, un receptor de GLONASS es un dispositivo capaz de determinar la posición del usuario, su velocidad y obtener una referencia de tiempo preciso, mediante el

procesamiento de las señales recibidas provenientes de los satélites de la constelación en las bandas L1 y L2, basándose en el cálculo del tiempo de propagación desde el satélite hasta el usuario y conociendo la posición del satélite.

Aunque obviamente ha tenido desde su concepción uso en el ámbito militar ruso, en el aspecto civil y comercial es donde GLONASS ha tenido, y tiene, mayor desventaja frente a su homólogo americano, ya que su uso está mucho menos extendido en aplicaciones comerciales. Para mejorar la situación, el gobierno ruso ha estado promoviendo GLONASS activamente, forzando su uso en diversos sectores como el de la aviación o en el del transporte. Por ejemplo, desde 2011 se fuerza a los fabricantes de coches, tanto rusos como extranjeros que fabriquen en Rusia, a que sus vehículos incluyan GLONASS desde 2011.

Deste entonces, diferentes industrias tecnológicas lo han integrado a su oferta. En cuanto a terminales móviles, las empresas más relevantes del mercado han decidido añadir y combinar GLONASS y GPS para reducir los periodos de adquisición de las señales captando más satélites que los de una sola red. También empresas de comunicaciones, de desarrollo de conductores o electrónica de consumo han optado por esta opción. Algunas empresas del norte de Europa han optado por GLONASS frente a GPS porque sostienen que tiene un mejor comportamiento y precisión en latitudes muy al norte.

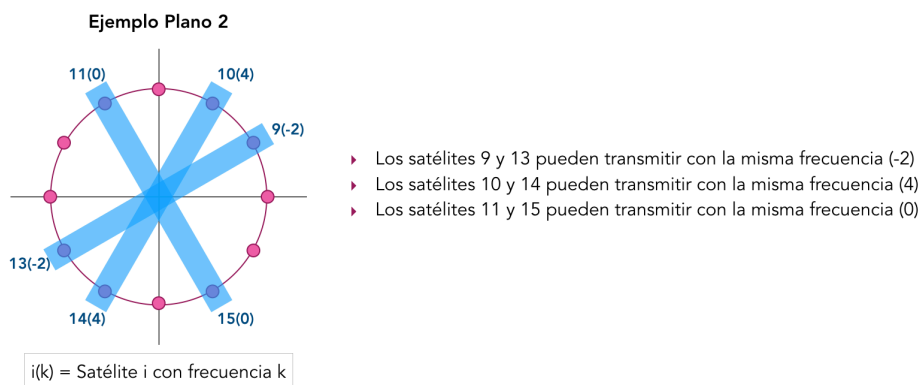
### 3.2.5. Estructura de Señal

Como se ha mencionado, GLONASS tiene la particularidad, frente al resto de sistemas GNSS, de que utiliza técnicas de espectro ensanchado combinadas con Acceso Múltiple en Frecuencia (FDMA) en lugar de en código. Es decir, las señales que entran en juego, al igual que en el caso de GPS, son:

- ▶ **Bandas de Frecuencia:** Las potadoras modulan la información a la frecuencia de RF correspondiente. En este caso, a diferencia de GPS, cada satélite utilizará una frecuencia concreta, asignada en base a un criterio establecido y con un ancho de banda y frecuencia central concreto. Existen 3 bandas adyacentes a las bandas de GPS: L1, L2 y L3. Como ya se ha comentado, la existencia de más de una banda aporta robustez frente a las pérdidas ionosféricas.
- ▶ **Códigos de Rango:** Aunque en este caso no se utilicen para identificar el tipo de satélite, porque al menos en la primera generación no se utiliza CDMA, estos códigos modulan las señales y ensanchan el espectro, de manera que las hacen más robustas frente a interferencias. En lugar de haber un código por satélite, se trata de un código único.
- ▶ **Mensajes de Navegación:** es la información en sí misma que contiene las efemérides y datos orbitales de cada satélite que envía cada satélite al receptor.

## 1. BANDAS DE FRECUENCIA

[11] GLONASS usa técnicas FDMA en las bandas de operación, por lo que cada satélite transmite señales de navegación en su propia frecuencia portadora, que es lo que permite identificar cada satélite. Solo podrán transmitir en la misma frecuencia aquellos satélites que se encuentren en secciones antípodos de un plano orbital, ya que un receptor no podría percibir ambas señales simultáneamente. De hecho, la constelación actual se ha construido en base a este hecho. Se visualiza fácilmente en la siguiente figura, con el plano orbital 2 como ejemplo:



### DISTRIBUCIÓN ANTIPODAL DE FRECUENCIAS GLONASS <sup>[11]</sup>

#### ▶ Banda L1

(frecuencia central  $L1=1.602\text{MHz}$ , longitud de onda  $\lambda_1=19\text{cm}$ )

También se nombra como G1, para diferenciarla de la banda L1 de GPS. Transmite la señal civil C/A y la señal militar de alta precisión P.

#### ▶ Banda L2

(frecuencia central  $L2=1.246\text{MHz}$ , longitud de onda  $\lambda_2=24\text{cm}$ )

Al igual que L1, es también nombrada como G2. También transmite la señal civil C/A y la señal militar P.

#### ▶ Banda L3

(frecuencia central  $L3=1.207\text{ MHz}$ , longitud de onda  $\lambda_3=25\text{cm}$ )

Es la banda más moderna, que empieza a utilizarse a raíz del bloque GLONASS-K. Está centrada en la misma frecuencia que la señal E5b de Galileo y BeiDou, en la región asignada al Servicio de navegación de radio aeronáutica 1 (ARNS). Estas bandas son especialmente adecuadas para aplicaciones de *safety-of-Life*, ya que ningún otro usuario puede interferir con sus señales. Transmite señales CDMA L3OC, con componentes en fase y cuadratura.

El valor nominal de la frecuencia FDMA de cada satélite se define de la siguiente forma:

$$f_{kL1} = f_{0L1} + k\Delta f_{L1}$$

$$f_{kL2} = f_{0L2} + k\Delta f_{L2}$$

$$f_{kL3} = f_{0L3} + k\Delta f_{L3}$$

Donde:

- $k$  representa el canal de frecuencia.
- $f_{0L1} = 1.602\text{MHz}$  es la frecuencia central de la banda G1.
- $\Delta f_{L1} = 562,5\text{KHz}$  es la separación entre portadoras en la banda G1.
- $f_{0L2} = 1.246\text{MHz}$  es la frecuencia central de la banda G2.
- $\Delta f_{L2} = 437,5\text{KHz}$  es la separación entre portadoras en la banda G2.
- $f_{0L3} = 1.201\text{MHz}$  es la frecuencia central de la banda G3.
- $\Delta f_{L3} = 437,5\text{KHz}$  es la separación entre portadoras en la banda G3.

En resumen, los satélites que emiten las señales tradicionales de GLONASS transmiten un único código de rango en diferentes frecuencias, en lugar de transmitir distintos códigos a una misma frecuencia. Sin embargo, las técnicas FDMA hacen un mayor uso del espectro, y dado que la banda a utilizar está cotizada en el ámbito de la radionavegación, varias veces se ha instado a la Federación Rusa a virar la estrategia hacia sistemas CDMA como GPS, algo que en los últimos años ha hecho que empiece a coger fuerza.

En las últimas revisiones de las especificaciones del sistema se ha planteado una nueva señal de *safety-of-Life* en la **banda L5**, de manera similar a la de GPS o a la señal E5a de Galileo o BeiDou, incluidas en el bloque **GLONASS-KM**, cuya fecha de previsión es 2030. Actualmente está en fase de investigación.

## 1. Señales en Banda L1

[12][13] Inicialmente, la banda L1 era utilizada para transmitir la señal civil C/A y el código de precisión militar P con técnicas FDMA. A partir del bloque GLONASS-K2 de satélites, estas señales comienzan a combinarse con nuevas señales CDMA superpuestas. En la bibliografía suele hacerse referencia a ellas como:



Por tanto, en la banda L1 están las señales: **L1OF, L1SF, L1OC, L1SC y L1OCM**.

### 1.1. L1OF

La señal de uso civil de precisión estándar llevaba originalmente el nombre C/A, como en GPS. Se trata de una señal que modula con BPSK el mensaje de navegación con una frecuencia de reloj de 511KHz y un código de rango pseudoaleatorio (PRN) con un tiempo de chip de  $2\mu s$  y duración 1ms, modulado todo ello por una señal auxiliar que se conoce como meandro.

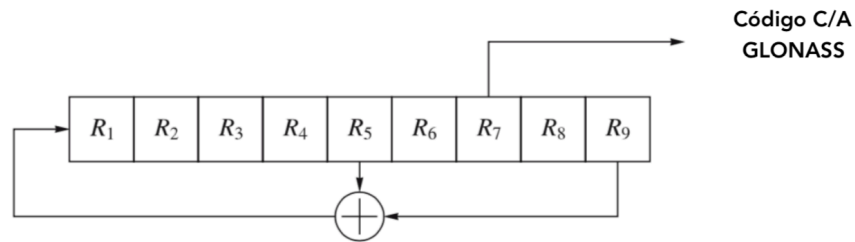
Esto se traduce en una señal con un ancho de banda  $BW_{L1OF} = 2/T_{chip} = 1,022MHz$  por cada uno de los satélites de la constelación. Al hacer distribución de frecuencias de forma antipodal no es necesario que cada satélite tenga su propia frecuencia, sino que aquellos que estén en puntos antipodales pueden compartirla. Eso significa que solo son necesarios 14 canales, del -7 al 6.

El mensaje de navegación se genera por un patrón que se repite cada dos segundos. Durante 1,7 segundos se transmiten 85 bits de los datos de navegación, mientras que durante los otros 0,3 segundos restantes se transmite una marca de tiempo:

- ▶ Los datos de navegación se generan como la suma en módulo 2 de la secuencia de navegación codificada de 50bps y una secuencia meandro. Como hemos visto, el tiempo de chip de esta secuencia es  $T_{chip_{data}} = \frac{1}{511 \text{ kbps}} \approx 2\mu s$

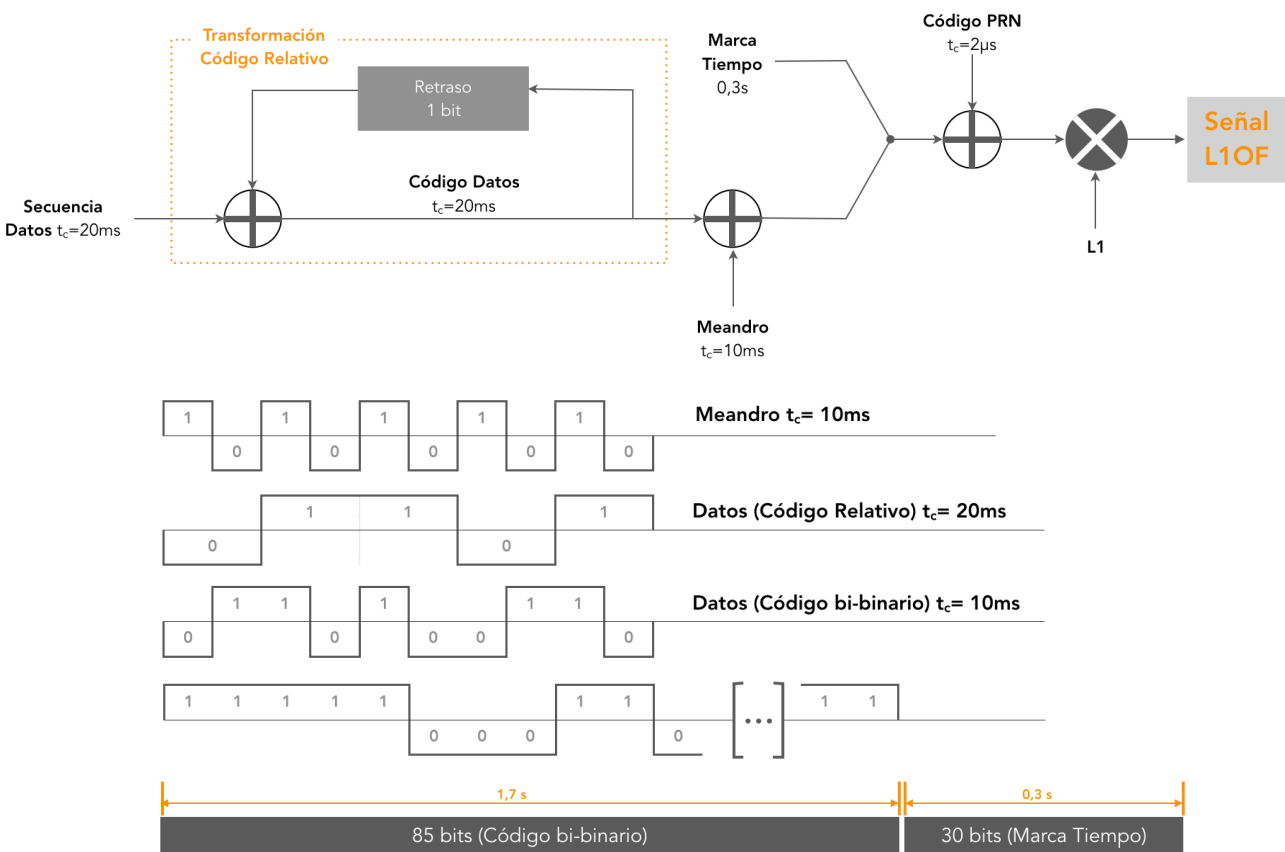


- ▶ La marca de tiempo es un código pseudoaleatorio de 30 bits, por lo que cada bit se transmite a  $30 \text{ bits} / 0,3 \text{ s} = 100 \text{ bps}$ , es decir, el tiempo de bit es  $T_{chip_{tm}} = 10 \text{ ms}$ . El código a utilizar se genera con un registro de desplazamiento de 9 bits de la siguiente manera:
- ▶ Polinomio característico  $\rightarrow p(x)=1+x^5+x^9$



**ESQUEMA GENERACIÓN CÓDIGO C/A [12]**

La subportadora de la banda L<sub>1</sub> por tanto se modula en BPSK con la suma en módulo 2 del código PR, el mensaje de navegación de 50bps y una señal meandro auxiliar de 100Hz de la siguiente forma:



**ESQUEMA GENERACIÓN SEÑAL L1OF [13]**

La señal auxiliar hace que nunca pueda haber más de 3 símbolos iguales seguidos, de manera que sea más fácil de reconocer el preámbulo que precede siempre al inicio del código PRN, y de esa forma gestionar la sincronización.



## 1.2. L1SF

La señal de alta precisión inicialmente se transmitía únicamente en L1. Se genera de la misma forma que la de precisión estándar, pero utilizando códigos con mayor tasa de bit y un espectro más ancho que hace más robusta la señal. Se transmite en la componente en cuadratura de la señal.

El código se genera usando un registro de desplazamiento de 25 bits con polinomio característico  $p(x) = 1+x^3+x^{25}$ . La tasa de bit, en este caso, es de 5,11Mbps, 10 veces mayor que en el caso de C/A, con una duración de 1s. También lo es en la misma proporción el ancho de banda ocupado por esta señal, que pasa a ser de  $BW_{L1SF} = 2/T_{\text{chip}} = 10,22\text{MHz}$

El código C/A se utiliza generalmente para una adquisición aproximada, mientras que el código P aporta una mayor precisión. No es necesario una palabra de *hand-over* como en GPS, ya que mientras el periodo del código P en GPS es de una semana, en GLONASS es de 1 segundo, por lo que el cambio puede realizarse más rápidamente.

Este código, con fines militares, nunca fue publicado por la Federación Rusa, pero se dio a conocer a la comunidad científica. Sin embargo, se reservan el derecho de modificarlo en el futuro, lo que lo hace un código poco apropiado para fines comerciales.

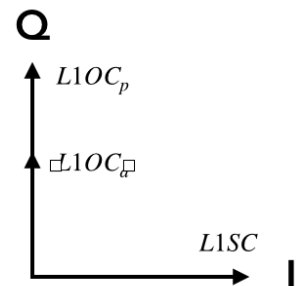
## 1.3. L1OC

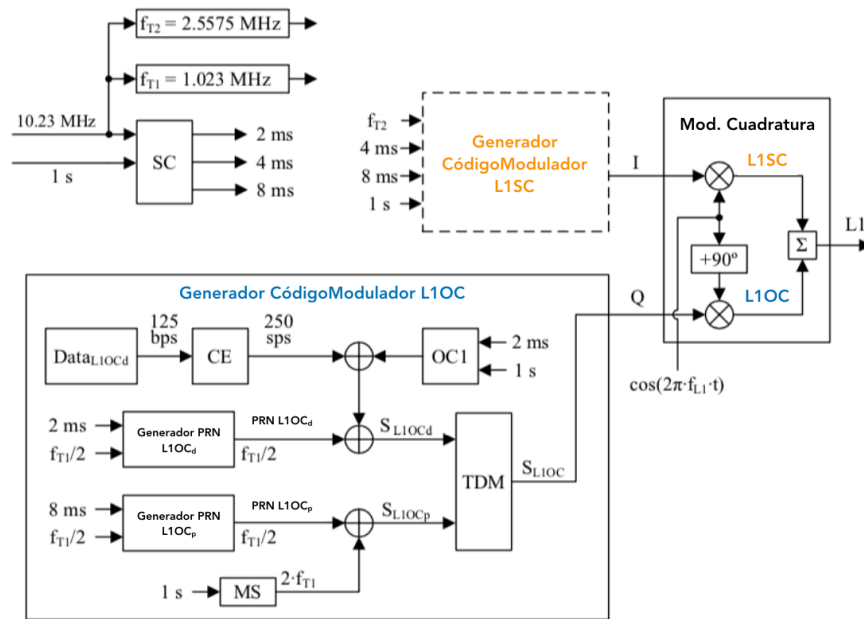
Se trata de una señal modernizada de GLONASS en banda L1, que será incluida en el nuevo bloque de satélites GLONASS-K2 a partir de 2019. Es la primera señal GLONASS en incluir CDMA como técnica de multiplexación en lugar de FDMA, utilizando la misma frecuencia de portadora para transmitir el mensaje, y asignando un pseudorango diferente a cada satélite.

La señal L1OC se transmite con una frecuencia  $f_{L1} = 1.600,995\text{ MHz}$  y consta de dos componentes:  $L1OC_p$  es la componente piloto y  $L1OC_d$  es la componente de datos. Ambas se transmiten en cuadratura respecto al resto de señales de la banda L1.

- ▶ La secuencia de símbolos de  $L1OC_d$  se llama  $S_{L1OC_d}$  y es la suma en módulo 2 de un código PRN de  $f_{T1}/2 = 0,5115\text{MHz}$ , que al igual que en GPS se trata de un código Gold; un código de superposición de 500 sps (OCI) y un codificador convolucional (CE) de 250 sps (x2). El código OCI es periódico de 2 símbolos (01) y sincronizado con el código CE, de 8ms.
- ▶ La secuencia piloto de la señal  $L1OC_p$  se llama  $S_{L1OC_p}$  y es la suma en módulo 2 del código PRN de  $f_{T1}/2 = 0,5115\text{MHz}$ , generado a partir de una secuencia de Kasami troncada, y una señal meandro auxiliar (MS) de  $f_{T1} \times 2 = 2,046\text{MHz}$ , que contiene la secuencia periódica 0101.

El esquema de generación puede verse en la figura de la siguiente página:





**ESQUEMA GENERACIÓN SEÑALES L1 - DETALLE L1OC [12]**

Como se observa, la señal L1OC se transmite en cuadratura con respecto a la señal de uso restringido L1SC.

### 1.4. L1SC

En la figura anterior se especifica cómo se genera esta señal, la cual es de uso restringido, por lo cual no se conocen los detalles de su codificación. Se transmite en fase, es decir, a 90° de la componente L1OC.

### 1.5. L1OCM

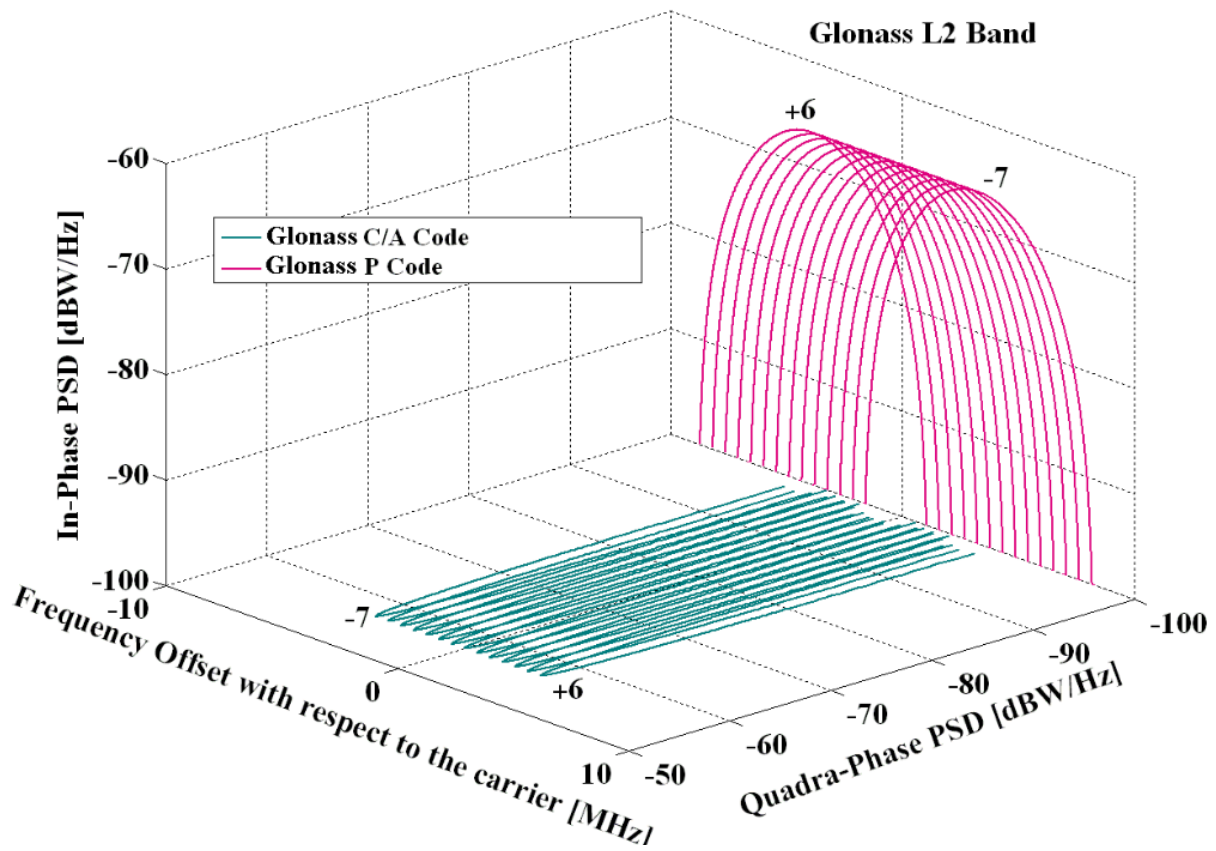
Se plantea como una señal modernizada, del bloque GLONASS-KM con fecha de previsión 2030 que actualmente está en fase de investigación. Se ha planteado como una señal abierta que utilizará la modulación BOC (1,1) centrada en 1575,42 MHz, y será similar a la señal GPS modernizada **L1C** y a la señal Galileo/BeiDou **E1**. En sus respectivos apartados puede verse en detalle.

## 2. Señales en Banda L2

[12][13] En un principio, en la banda L2 solo se transmitía la señal de alta precisión, dejando la señal civil de precisión estándar únicamente para la banda L1. A partir del bloque GLONASS-M también se transmite una señal de precisión estándar en L2, por lo tanto, las señales FDMA de L2 son equivalentes a las de L1, con la excepción de que la frecuencia central de las portadoras que utiliza es de  $1.246\text{MHz} \pm k \cdot 437,5\text{KHz}$ . Las señales CDMA también se introdujeron a raíz del bloque GLONASS-K2, por lo que también las señales L2SC y L2OC son homólogas a las de L1. Serían en conjunto:

- ▶ L2SF
- ▶ L2OF
- ▶ L2SC
- ▶ L2SC

En el planteamiento de evolución a GLONASS-V con señales BOC, esta banda de momento ha quedado fuera del planteamiento y la investigación, siendo sustituida por la banda L5 a 1.176,45MHz.



ESPECTRO SEÑALES LEGACY DE GLONASS EN L2 (EQUIVALENTE AL DEL L1 PERO CON DIFERENTE OFFSET DE FRECUENCIA) [11]

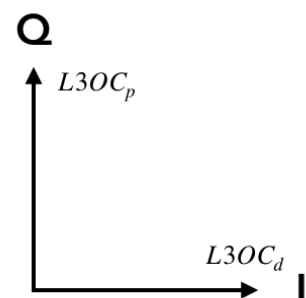
### 3. Señales en Banda L3

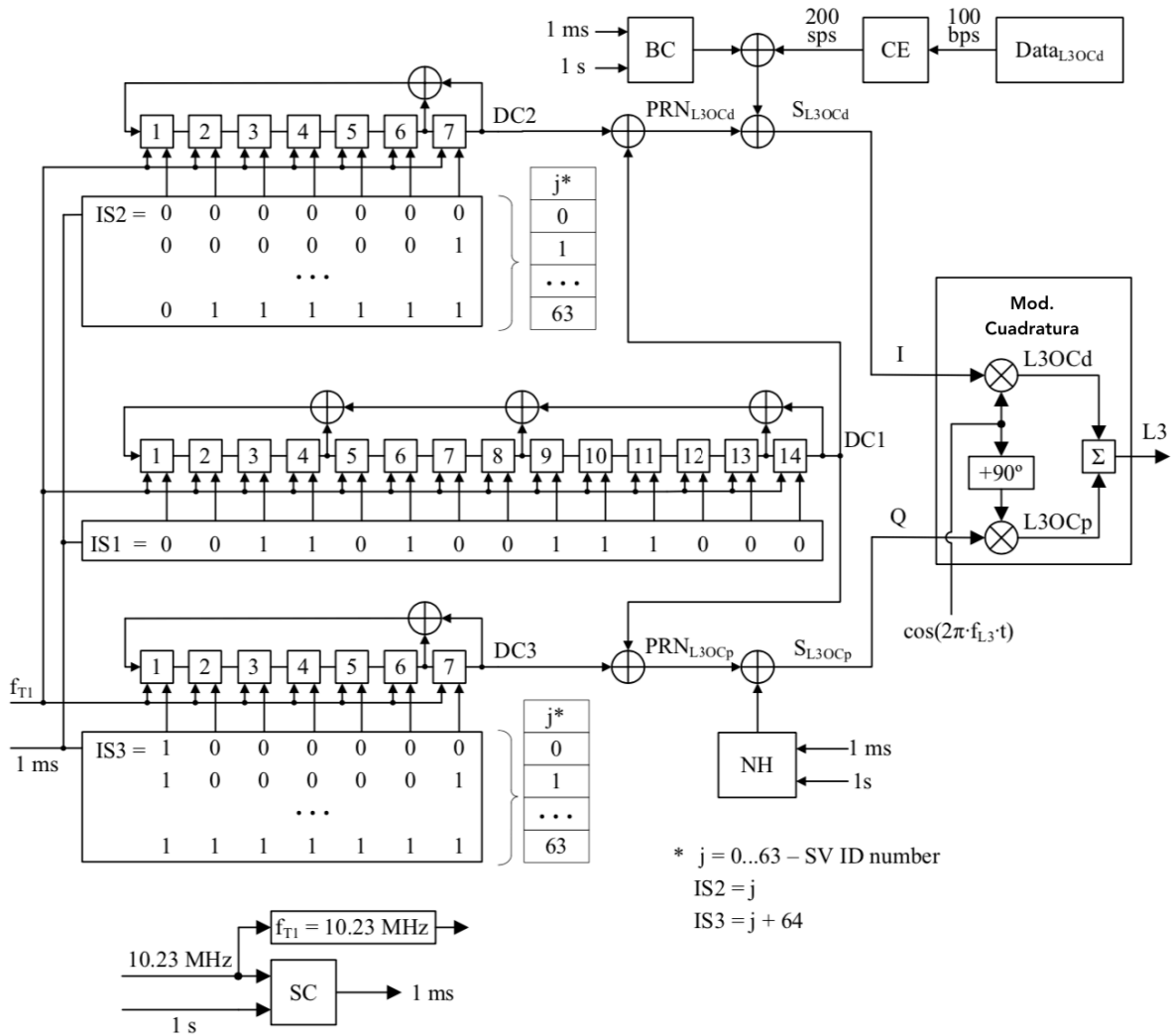
[12][13] A partir de 2014 se incluyó la posibilidad de emitir en banda L3 en los satélites GLONASS-M como en los nuevos satélites del momento GLONASS-K1, para transmitir las primeras señales con naturaleza CDMA. Como hemos visto, posteriormente se incluyeron señales CDMA en las bandas tradicionales L1 y L2.

#### 3.1. L3OC

La señal se transmite con una frecuencia nominal de  $f_{L3} = 1.202,025$  MHz, y consta de dos componentes BPSK (10) en cuadratura, un piloto y una componente de datos.

Ambas tienen la misma potencia, y se generan como podremos ver en el esquema de la página siguiente. La componente de





**ESQUEMA GENERACIÓN L3OC [13]**

datos tiene el nombre de  $L3OC_d$  y el piloto  $L3OC_p$ .

La secuencia de modulación de los símbolos de la señal  $L3OC_d$  es llamada  $S_{L3OC_d}$  y es la suma módulo 2 del flujo de chips  $PRN_{L3OC_d}$  de  $f_{T1} = 10,23\text{MHz}$ , un código de Baker (BC) de 1.000 sps y sincronizado con un codificador convolucional (CE) de 200 sps. La secuencia  $S_{L3OC_d}$  se utiliza para desplazar en fase la componente I de L3 en  $180^\circ$ .

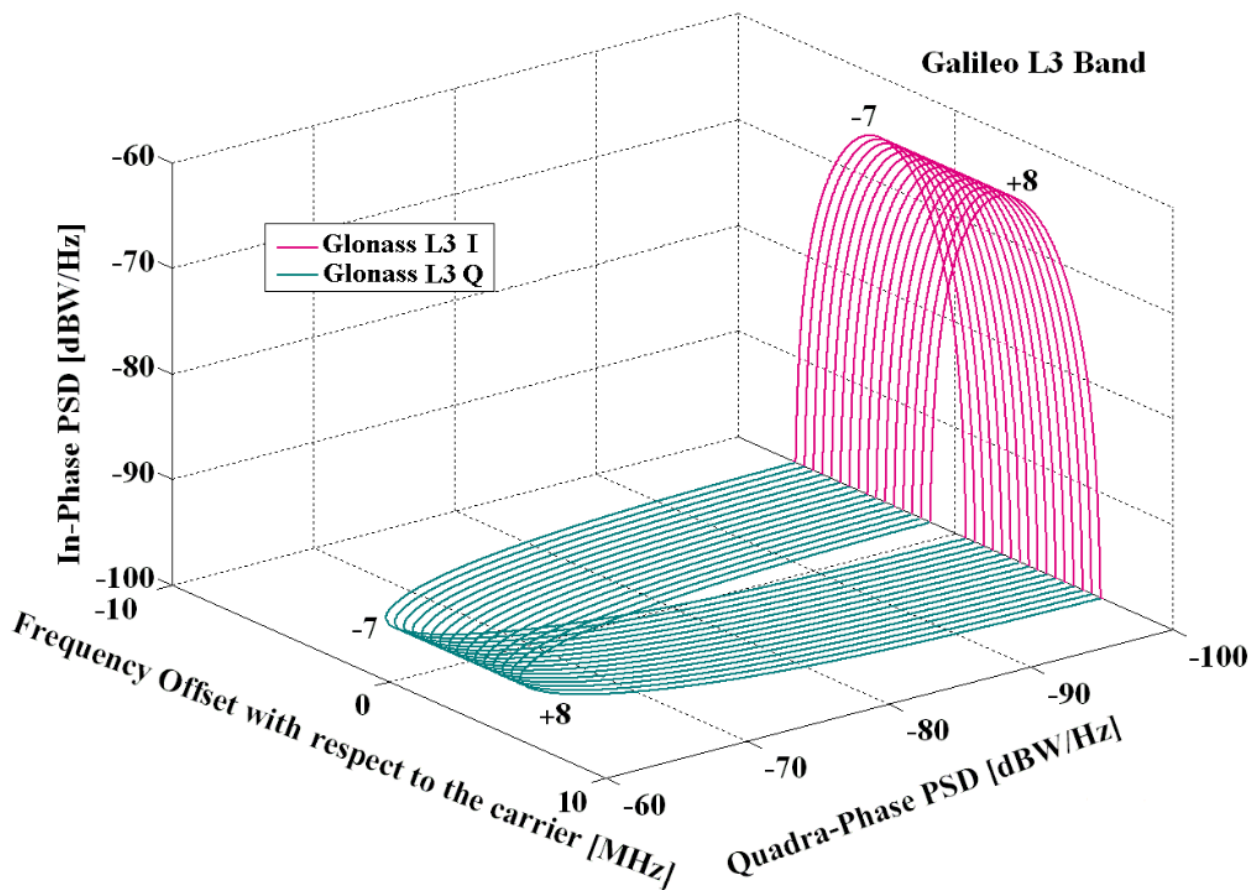
La secuencia de modulación de la componente piloto  $L3OC_p$  es llamada  $S_{L3OC_p}$  y es la suma en módulo 2 del flujo  $PRN_{L3OC_p}$  de  $f_{T1} = 10,23\text{MHz}$  y un código de Newman-Huffman (NH) de 1.000 sps, que es una secuencia periódica de 10 bits 0000110101 que tarda 10ms en transmitirse. La secuencia  $S_{L3OC_p}$  se utiliza para desplazar la componente en cuadratura de L3 en  $180^\circ$ .

Los códigos PRN que identifican a cada satélite,  $PRN_{L3OC_p}$  y  $PRN_{L3OC_d}$  se generan a raíz de una secuencia de Kasami truncada, de longitud  $N=10.230\text{chips}$  y periodo  $T=1\text{ms}$ . Estas secuencias se generan como una suma de módulo 2 de los dígitos de los circuitos digitales DC1, DC2 y DC3 que pueden verse en el esquema anterior, combinando  $DC1+DC2$  para  $PRN_{L3OC_d}$  y  $DC1 + DC3$  para  $PRN_{L3OC_p}$ .

DC1 es un registro de 14 bits, mientras que DC2 y DC3 son de 7. Estableciendo el bit menos significativo de DC2 como 0 y de DC3 como 1 tenemos para ambos la posibilidad de crear códigos que identifiquen a  $2^6 = 64$  satélites diferentes. Por tanto, introduciendo unas condiciones iniciales (IS) dependientes del id de cada satélite en DC2 y DC3 podremos generar 64 códigos diferentes:

- IS1 = 00110100111000
- IS2 = j = 0000000,000001,..., 0111111.
- IS3 = j+64 = 1000000,1000001,...,1111111.

Donde j es el ID de cada satélite, de 0 a 63. Los pulsos de desplazamiento se producen cada 1ms, ya que se generan en el contador síncrono (SC), basado en una señal de 10,23MHz.



ESPECTRO SEÑALES LEGACY DE GLONASS EN L3 [11]

## 2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN

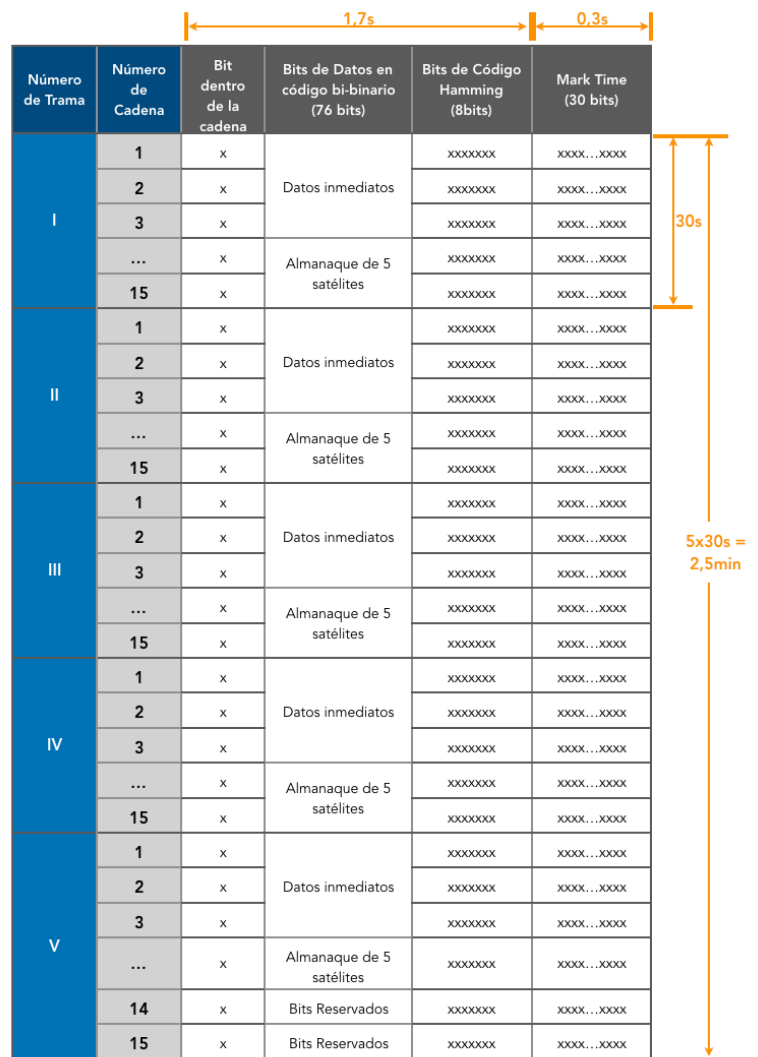
El mensaje de navegación provee información sobre las órbitas y el estado de los satélites, así como de correcciones en los datos y otros efectos de la recepción. Se llaman **"datos inmediatos"** a aquellos que hacen referencia al propio satélite, como efemérides y demás aspectos de su órbita, y **"datos no inmediatos"** a aquellos que referencian a la constelación completa, y que no se generan de manera inmediata, sino que se adquieren del segmento de control con una periodicidad generalmente alta.

La velocidad de esta señal de datos en comparación con los códigos de rango es muy lenta. Sin embargo, las tasas de datos bajas permiten una tasa de error de bits reducida incluso a pesar de que el nivel de potencia recibido sea bajo, como ocurre en estas transmisiones satelitales. La velocidad de datos efectiva corresponde a **50 bps**, aunque la modulación diferencial genera una velocidad de datos de 100 símbolos por segundo. El mensaje de navegación es diferente para la señal de alta precisión o de precisión estándar.

### 2.1.1. Navegación Precisión Estándar

El mensaje de navegación para la señal de precisión estándar se estructura en supertramas, tramas y cadenas. Una supertrama tiene una duración de 2,5 minutos, es decir 7,5Kbit, y se subdivide en cinco tramas de 30 segundos de duración y 1,5Kbit cada una. Una trama contiene datos inmediatos del satélite transmisor y datos no inmediatos de toda la constelación.

Cada trama se compone por 15 cadenas de 100 bits (es decir, 200 símbolos). Una cadena contiene 85 bits de datos y una marca de tiempo. La marca de tiempo o preámbulo corresponde a una secuencia pseudoaleatoria de ciclo corto. Los 85 bits de datos, que incluyen una comprobación de paridad de 8 bits, se transmiten cada 1,7 segundos con una longitud de símbolo de 20ms. Esta es la secuencia que se modula con la señal meandro y el código de rango que hemos visto anteriormente para generar las señales propiamente, y es esa señal meandro la que hace que nunca se repitan más de 3 símbolos iguales seguidos, por lo que es fácil identificar el preámbulo de la cadena y con él las tramas y supertramas.



ESTRUCTURA MENSAJE NAVEGACIÓN [13]

Las primeras cinco cadenas contienen la información inmediata. Los datos inmediatos repetidos en cada trama incluyen: datos de efemérides, una etiqueta de tiempo correspondiente al comienzo de la trama, un flag de estado, la corrección del reloj del satélite y la variación de la frecuencia de la portadora del satélite respecto del valor nominal. Los datos de efemérides se actualizan cada 30 minutos con los datos recibidos del segmento de control y son válidos durante varias horas. Las cadenas 5-15 proporcionan datos no inmediatos, es decir, de almanaque, de cada satélite en la constelación, con las tramas I-IV que incluyen datos de cinco satélites cada una, y la trama V que incluye la de los cuatro satélites restantes. Las dos últimas cadenas de la trama V original están vacías y se utilizan para el contenido del mensaje modernizado. Debido a la codificación de la secuencia del meandro, las cadenas vacías no tienen que rellenarse con ceros y unos alternos como sí lo hace GPS.

### 2.1.2. Navegación Alta Precisión

El mensaje de navegación de la señal de alta precisión es más largo y contiene información más precisa. Consiste en un supertrama que se subdivide en 72 tramas. Cada trama consta de cinco cadenas con 100 bits de longitud cada una. La longitud de una trama corresponde a 10 segundos. En consecuencia, una supertrama necesita 12 minutos para la transmisión, en contraste con la de precisión estándar, que necesita 2,4 minutos.

### 2.1.3. Mensaje L3OC

El mensaje evolucionado de L3OC<sub>d</sub> ya no tiene una estructura predeterminada, sino que está compuesto por **cadenas de longitud específica unidas de manera no predeterminada** para formar un conjunto de campos de datos, que a su vez conforman los distintos servicios que la señal transmite.

El mensaje de navegación de la señal L3OC<sub>d</sub> se transmite a 100 bps, y consta de cadenas de 300 bits de 3 segundos de duración, así como de cadenas anómalas de 200 y 400 bits de 2 y 4 segundos de duración, respectivamente.

Preámbulo 20 bits	Tipo 6 bits	TS 15 bits	j 6 bits	H <sub>i</sub> 1 bit	l <sub>i</sub> 1 bit	P1 4 bits	P2 1 bit	KP 2 bits	A 1 bit	Datos Navegación 219 bits	CRC 24 bits
----------------------	----------------	---------------	-------------	-------------------------	-------------------------	--------------	-------------	--------------	------------	------------------------------	----------------

#### ESTRUCTURA CADENA MENSAJE NAVEGACIÓN L3OC [13]

Los campos que contiene la cadena general de este mensaje es:

- **Preámbulo:** Identifica el inicio de la cadena.
- **Tipo:** Identifica el tipo de cadena.
- **j:** Es el número ID del satélite.
- **H<sub>i</sub>:** Es un bit que identifica la salud del satélite ('0' = *Healthy*, '1' = *Non-Healthy*).
- **l<sub>i</sub>:** Bit que identifica la validez de los datos ('0' = Válido, '1' = No válido).
- **P1:** Bit para identificar que el satélite quiere comunicarse con el segmento de control.
- **P2:** Bit que marca el régimen de orientación del satélite.
- **KP:** Es la indicación de la corrección UTC esperada.
- **A:** Indica si la corrección de tiempo de KP suma o resta.
- **TS:** *Timestamp* de la cadena enviada.

- **CRC:** Bits de check de redundancia cíclica.

### 2.1.4.Mensaje L1OC

El mensaje evolucionado de L1OC<sub>d</sub> sigue una filosofía flexible similar a la de L3OC. Se transmite a 125 bps, y consta de cadenas de 250 bits de 2 segundos de duración, así como de cadenas anómalas de 125 y 275 bits de 1 y 3 segundos de duración, respectivamente.

Preámbulo 12 bits	Tipo 6 bits	j 6 bits	Hj 1 bit	lj 1 bit	P1 4 bits	P2 1 bit	KP 2bits	A 1 bit	TS 16 bits	Datos Navegación 184 bits	CRC 16 bits
----------------------	----------------	-------------	-------------	-------------	--------------	-------------	-------------	------------	---------------	------------------------------	----------------

**ESTRUCTURA CADENA MENSAJE NAVEGACIÓN L1OC <sup>[13]</sup>**



## 3.3. GALILEO



Galileo es el GNSS desarrollado por la Unión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea, para crear la alternativa Europea al GPS americano o al GLONASS ruso. Al contrario de sus precededores se trata de un sistema de uso civil.

### 3.3.1. Características Generales

En la década de los 90, y reconocida la importancia estratégica de los sistemas de posicionamiento por satélite, la Comisión Europea decidió que Europa también debía tener un sistema propio, ya que ante la posibilidad de un conflicto armado existía cierta incertidumbre sobre el uso que se podría hacer de sistemas existentes como GPS o GLONASS. En un primer momento se inició el desarrollo de EGNOS en colaboración con la Agencia Espacial Europea y Eurocontrol, un sistema de aumentación (SBAS) equivalente al WAAS americano, pensado para mejorar la precisión de otros GNSS como GPS o GLONASS que estuvo finalmente operativo en 2009 y abierto oficialmente al uso para la aviación civil en 2011.

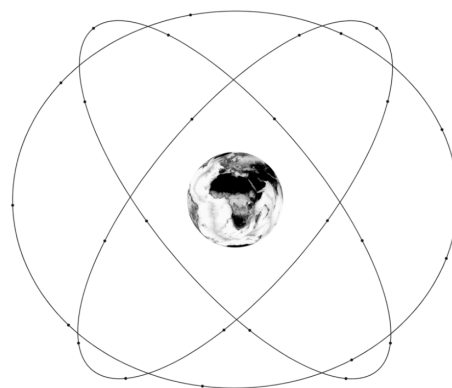
Finalizada esta primera parte, se inicia una segunda etapa: el desarrollo de un sistema propio de geolocalización de índole civil desarrollado y gestionado íntegramente por organismos europeos, que mejore las prestaciones de los sistemas existentes y asegure la independencia de la región. Este nuevo sistema se llamó Galileo, y se planteaba que estuviera operativo en 2008, aunque finalmente entra a estar operativo en 2016.

Al igual que el resto de sistemas se divide en tres segmentos diferentes: el espacial, con los satélites que conforman su constelación, el de control, con el plano terrestre del sistema, y el de usuario. Estos segmentos se han probado y validado en lo que se llama un desarrollo de lógica incremental en tres pasos: en primera lugar se definió un banco de pruebas (**GSTB, Galileo System Test Bed**) que validara la arquitectura general y abordara las tecnologías críticas; en una segunda etapa se lanzaron satélites experimentales para probar tanto la tecnología espacial como los elementos terrestres; por último, se lanzarán los primeros 4 satélites Galileo operativos y se harán las pruebas de la primera realización. Cubierto esto, se iniciaría el despliegue completo tanto del segmento espacial como del terrestre para dar paso a la fase de operación del sistema y a la explotación comercial del mismo.

### 3.3.2. Segmento Espacial

<sup>[14]</sup> Galileo tuvo una primera fase de diseño donde se lanzaron un grupo de satélites experimentales llamados GIOVE (*Galileo In-Orbit Validation Element*), con el objetivo principal de asegurar las frecuencias asignadas a Galileo, además de probar tecnologías más críticas o sensibles y parametrizar las órbitas y otros parámetros espaciales.

Al finalizar los experimentos del grupo GIOVE se lanzaron 4 satélites IOV (*In Orbit Validation*) para validar las señales. Con una vida útil de 12 años, hay 3 de estos satélites que siguen estando en funcionamiento y que se consideran parte de la



**CONSTELACIÓN GALILEO** <sup>[14]</sup>



### 3.3.4.Segmento Usuario

[16] El segmento de usuario de Galileo está compuesto por todos los receptores y dispositivos compatibles que recopilan las señales de Galileo, determinan las pseudodistancias y otros observables y resuelven las ecuaciones de navegación para obtener sus propias coordenadas, su velocidad y una referencia horaria precisa. Al igual que en otros GNSS, los elementos básicos que componen un receptor genérico son una antena con preamplificación, una sección de radiofrecuencia de banda L, un microprocesador, un oscilador de precisión intermedia, una fuente de alimentación, memoria para el almacenamiento de datos y una interfaz con el usuario.

Galileo ha sido concebido como un sistema principalmente de uso civil, ofreciendo los siguientes servicios:

- ▶ **Open Service (OS):** servicio de uso general para proveer información de posición, velocidad y sincronización con el sistema de tiempo de Galileo. Está principalmente enfocado a la telefonía móvil y la navegación de vehículos. Se transmite en las señales E5a, E5b y E1.
- ▶ **Commercial Service (CS):** al contrario que el anterior, se plantea como servicio con enfoque a aplicaciones profesionales, como pueden ser alertas meteorológicas o de accidentes con carácter en tiempo real, o de cartografía. Los datos se transmiten cifrados para restringir su acceso. Se transmite mediante las señales E5b, E6 y E1.
- ▶ **Safety of Life (SOL):** servicio enfocado a maximizar la seguridad de los usuarios, como por ejemplo en aplicaciones de rescate o de transporte marítimo, aéreo y ferroviario. Los datos se envían sin cifrar, pero con un sistema de verificación de que las señales recibidas son veraces y mecanismos de monitorización y notificación de integridad. Se transmite en las señales E5a, E5b y E1.
- ▶ **Public Regulated Service (PRS):** servicio reservado para usuarios autorizados de entidades gubernamentales que necesiten un nivel alto de protección, como pueden ser los cuerpos de seguridad del estado, y donde por lo tanto los datos se envían cifrados. Se transmite en las señales E1 y E6.
- ▶ **Search and Rescue (SAR):** un servicio para detección de balizas y mensajes de socorro. Las mismas señales se transmiten al segmento terrestre para alertar a los servicios de rescate, a la vez que se transmite una señal de asentimiento al usuario que emite la señal de socorro para que sepa que dicha señal se ha recibido. Se transmite en la señal L6.

En 2010 solo había tres fabricantes de receptores adaptados a Galileo. Desde entonces el mercado ha ido evolucionando y hoy día hay multitud de fabricantes de distintos ámbitos, como son la electrónica de consumo, la automoción o la aviación, que ya fabrican sus productos de forma que sean compatibles con Galileo.

### 3.3.5.Estructura de Señal

[17] Como se ha comentado, Galileo emite en varias bandas de señal, utilizando CDMA como técnica de multiplexación del medio. De manera parecida a GPS, la estructura de señal está conformada por tres elementos:

- ▶ **Bandas de Frecuencia:** modulan la información a la frecuencia de la portadora. Se trata de frecuencias concretas con comportamiento robusto frente a las pérdidas ionosféricas, que son el tipo de degradación más importante en estos sistemas, por lo que están cercanas, si no superponiéndose, con bandas de otros GNSS. Concretamente Galileo emite en las bandas E5a, E5b, E6, E1 y L7.

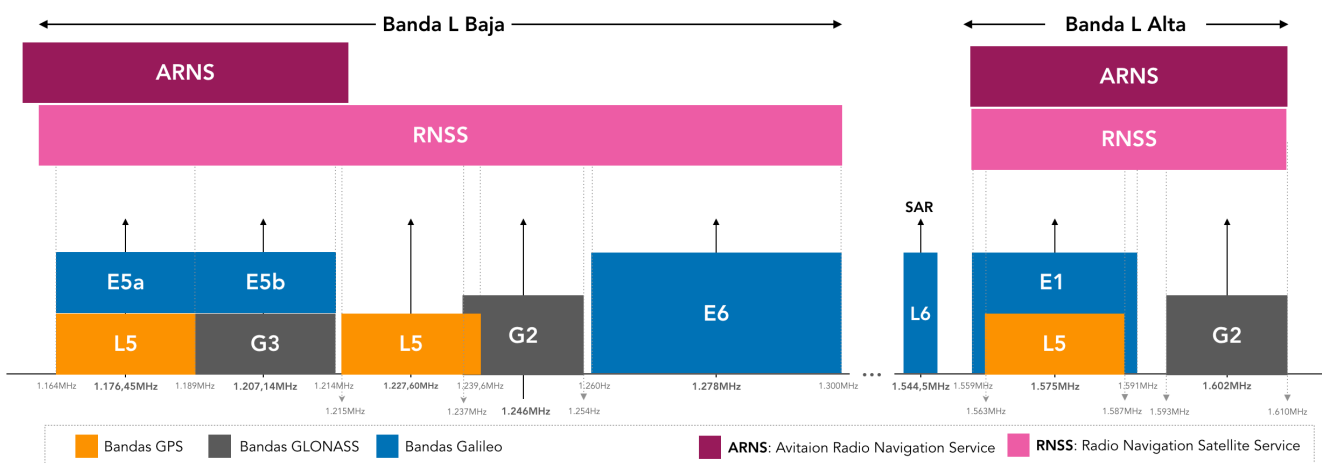
- ▶ **Códigos de Rango:** permiten identificar el satélite del que proviene la información, y se trata de unos códigos preestablecidos estudiados durante la fase de diseño y seleccionados por sus propiedades de máxima autocorrelación y mínima correlación cruzada. Se distinguen tres tipos de códigos: los códigos de rango de acceso abierto, que no están encriptados y se conocen públicamente; los códigos de rango encriptados con encriptación comercial; y finalmente, los códigos de rango encriptados con encriptación gubernamental.
- ▶ **Mensajes de Navegación:** es la información en sí misma que contiene las efemérides y datos orbitales de cada satélite que envía cada satélite al receptor. Los satélites Galileo emiten cinco tipos de datos en cuatro mensajes de navegación: el mensaje de navegación de acceso libre (**F/NAV**), el de integridad (**I/NAV**), el comercial (**C/NAV**) y el gubernamental (**G/NAV**).

## 1. BANDAS DE FRECUENCIA

Como se ha avanzado anteriormente, los diversos servicios de Galileo se transmiten mediante la utilización de diferentes señales en diferentes bandas de frecuencia. Estas son:

- ▶ **Banda E1 (centrada en 1.575,42 MHz):** transmite los servicios OS, CS, SOL y PRS.
- ▶ **Banda E5:** está dividida en dos sub-bandas:
  - **Banda E5a (centrada en 1.176,45 MHz):** transmite los servicios OS, CS y SOL.
  - **Banda E5b (centrada en 1.207,14 MHz):** transmite los servicios OS, CS y SOL.
- ▶ **Banda E6 (centrada en 1.278,75 MHz):** transmite los servicios CS y PRS.
- ▶ **Banda L6 (centrada en 1.544,50 MHz):** transmite únicamente el servicio SAR.

Estas bandas están cercanas a las bandas utilizadas en GPS y GLONASS dentro de los considerados **ARNSS** (Aviation Radio Navigation Services) y **RNSS** (Radio Navigation Satellite Services).



**BANDAS GALILEO VS GPS Y GLONASS [19]**

### 1.1. Señales en Banda E1

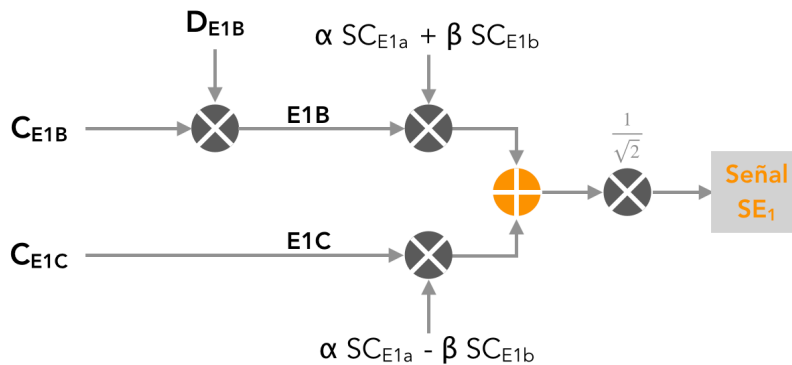
[17] Como ya se ha comentado, la señal E1 transmite los servicios OS, CS, SOL y PRS mediante tres componentes de señal, moduladas a su vez por la portadora a 1.575,42MHz. Las señales **E1B** y **E1C** no están encriptadas y son accesibles para todos los usuarios, conteniendo E1B el mensaje

de navegación general, la información de integridad y los datos comerciales encriptados, mientras E1C es un canal piloto. Ambas son compatibles con los servicios OS, CS y SoL. La componente de señal **E1A** está cifrada y solo es accesible para los usuarios autorizados de PRS, modulando un mensaje de navegación gubernamental.

### 1.1.1. Códigos E1B y E1C

Estas componentes de uso civil tienen distinta naturaleza:

- ▶ **E1B** es la componente que transmite los datos del mensaje de navegación I/NAV mediante los símbolos  $D_{E1B}$ , modulados por el código de rango pseudoaleatorio  $C_{E1B}$ . Posteriormente se modula a su vez por una combinación de portadoras denominadas  $SC_{E1a}$  y  $SC_{E1b}$ .
- ▶ **E1C** es la componente piloto que transmite únicamente la secuencia de chip  $C_{E1C}$ , sin información de navegación. Posteriormente se modula a su vez por otra combinación de las portadoras  $SC_{E1a}$  y  $SC_{E1b}$ .



ESQUEMA MODULACIÓN GALILEO E1 [17]

Matemáticamente podemos expresar la señal  $SE_1$ , por tanto, como:

$$SE_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E1B}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) + \beta SC_{E1b}(t)) - e_{E1C}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) - \beta SC_{E1b}(t))]$$

Siendo:

- ▶  $e_{E1B}(t)$  la secuencia de chip  $C_{E1B}$  multiplicada por los datos de navegación  $D_{E1B}$ , y se expresa como:

$$e_{E1B}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E1B} |i|_{L_{E1B}} D_{E1B}[i]_{DC_{E1B}} \prod (R_{c_{E1B}} t - i)$$

• Siendo:

- $L_{E1B}$  la longitud de código de rango de la componente E1B.
- $R_{c_{E1B}}$  el ratio de chips por segundo.
- $DC_{E1B}$  el ratio de bits por símbolo de la componente E1B, es decir  $R_{c_{E1B}}/R_{s_{E1B}}$ , siendo  $R_{s_{E1B}}$  la tasa de símbolos por segundo.
- $[i]_{DC_{E1B}}$  una operación que nos da el entero más próximo de  $\frac{i}{DC_{E1B}}$
- $\prod(t)$  un pulso rectangular de duración y amplitud unidad.

- ▶  $e_{E1C}(t)$  la secuencia de chip  $C_{E1C}$  correspondiente al piloto, y se expresa matemáticamente como:

$$e_{E1C}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E1C} |i|_{L_{E1C}} \prod (R_{c_{E1C}} t - i)$$

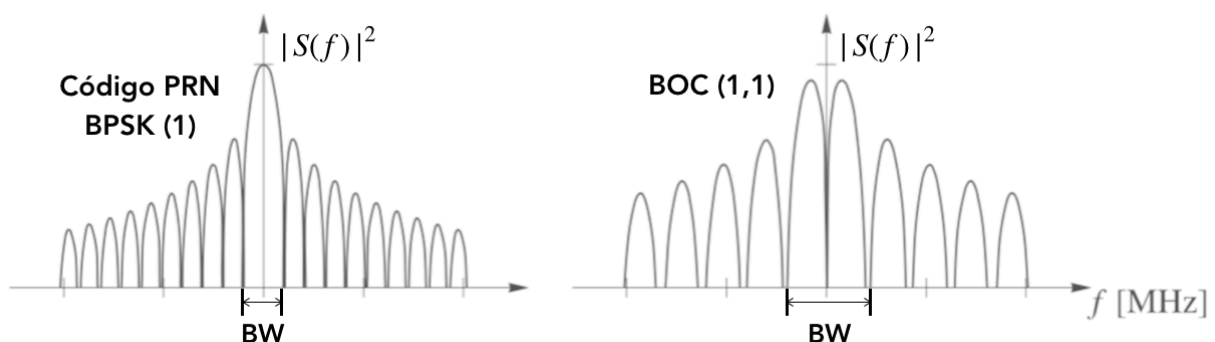
- Siendo:
  - $L_{E1C}$  la longitud de código de rango de la componente E1C.
  - $R_{c_{E1C}}$  el ratio de chips por segundo de E1C.

►  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros constantes que ponderan la combinación de portadoras para componer una frecuencia de portadora diferente utilizando la modulación CBOC, de la que hablaremos a continuación. En Galileo, esos valores están normalizados, y son  $\alpha = \sqrt{\frac{10}{11}}$  y  $\beta = \sqrt{\frac{1}{11}}$

Los parámetros concretos de estas ecuaciones son:

Componente	Tipo Subportadora	Longitud Código $L_{E1x}$	Tasa de Chip (Mchip/s) $R_{c_{E1x}}$	Tasa Símbolos $R_{s_{E1x}}$ (símb/s)	Frecuencia Subportadora $SC_{E1x}$
E1B	CBOC (Fase)	4.092 chips	1,023 Mchips/s	250 símbolos/s	1,023 Mchips/s
E1C	CBOC (Cuadratura)	102.300 chips		Sin datos (piloto)	1,023 Mchips/s

Mientras en los sistemas GNSS tradicionales era común el uso de la modulación BPSK, en 2002 John Betz desarrolló la modulación de Desplazamiento Binario de Portadora (**BOC, Binary Offset Carrier**), donde utilizaba una portadora rectangular con frecuencia  $f_s$  para modular el código de expansión de espectro de frecuencia  $f_c$ . De esta manera en lugar de tener un espectro con forma de sinc centrada a la frecuencia de la portadora que concentra la potencia en un lóbulo principal, obtenemos un espectro de dos lóbulos simétricos respecto a la frecuencia central  $f_s$  y una señal, por tanto, de mayor ancho de banda:

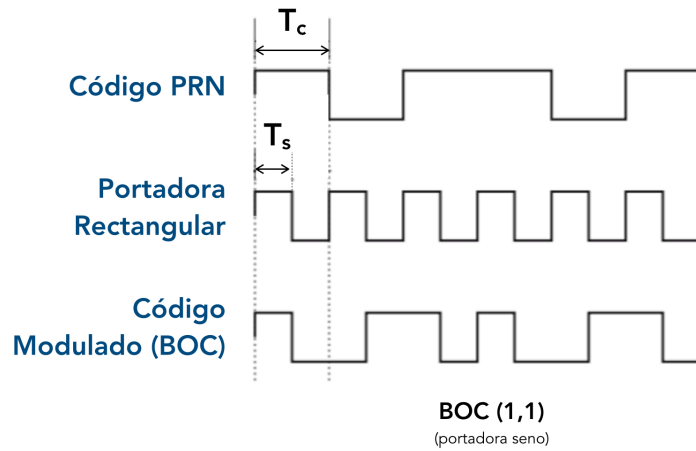


DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA BPSK VS BOC (1,1) [17]

Para ello, las subportadoras implicadas son una sucesión de 1 y -1 alternados, que pueden expresarse matemáticamente como el signo de una sinusoide. Esta sinusoide podría ser seno o coseno, pero es una elección que condiciona el modelo. En los GNSS lo habitual es utilizar señales seno, expresadas matemáticamente de la siguiente forma:

$$SC(t) = \text{sign}(\text{sen}(2\pi f_s t))$$

Para estas señales suele usarse la nomenclatura BOC ( $f_s$ ,  $f_c$ ), determinando las frecuencias de portadora y de chip para componer la señal de la siguiente manera:



**DETALLE BINARY OFFSET MODULATION (BOC) [17]**

En la nomenclatura habitual de BOC se utiliza una frecuencia de referencia  $f_0$  a la que se referencian tanto  $f_s$  como  $f_c$ , y que generalmente es  $f_0=1,023\text{MHz}$ . De manera que tenemos:

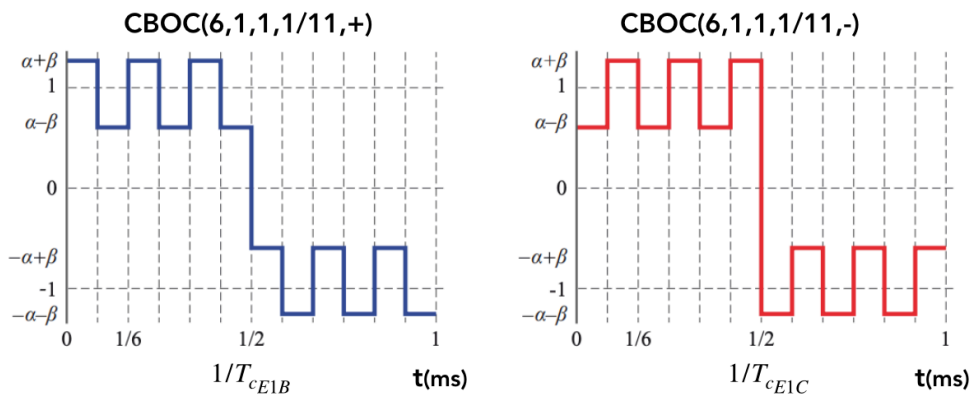
$$- f_s = n f_0 = \frac{1}{2T_s}$$

$$- f_c = m f_0 = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{kT_s} = \frac{2}{k} f_s$$

Denotamos por tanto a la señal como  $\text{BOC}(n,m)$ , siendo los parámetros  $n$  y  $m$  la separación espectral y la forma del lóbulo respecto a la frecuencia central. El factor  $k$  que relaciona ambos es una medida del número de picos positivos y negativos en la función de autocorrelación. Por ejemplo, los BOC con portadora seno tienen  $2^{k-1}$  picos.

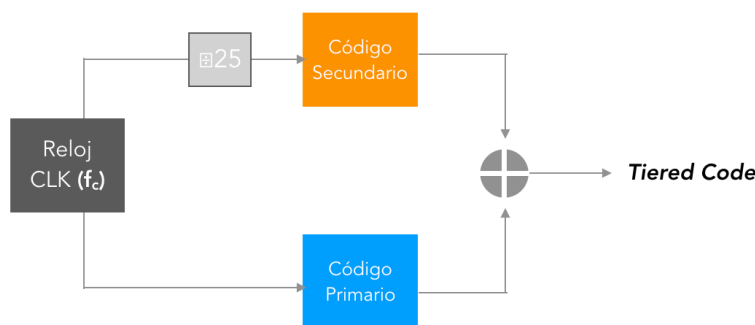
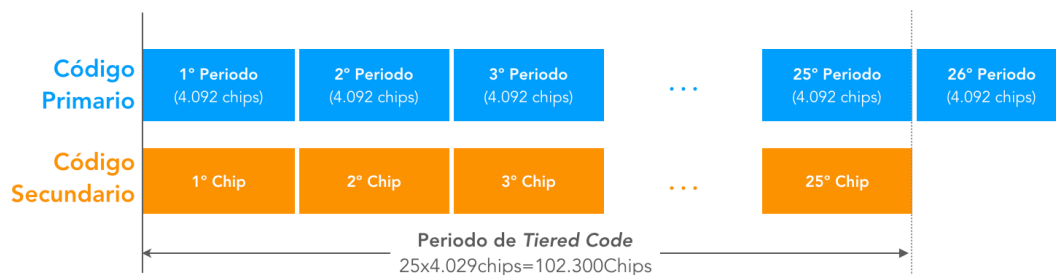
La ventaja principal de este tipo de señales es que al tener un ancho de banda efectivo más ancho, se hace más robusta frente a interferencias, ruido y efectos de propagación multicamino y facilita la sincronización, por lo que las medidas son más precisas. Además, los parámetros  $f_s$  y  $f_c$  permiten mayor flexibilidad a la hora de situar la señal en el espectro, lo que a su vez facilita la compartición del medio con el resto de señales del resto de sistemas, que en muchos casos se solapan espectralmente. Esta es la razón de que GPS haya optado por este sistema para sus señales de nueva generación, como es L1C.

En este caso las señales CBOC que se utilizan no tienen una única subportadora, sino que son la combinación de dos ( $\alpha \text{SC}_{E1a} \pm \beta \text{SC}_{E1b}$ ). Las señales CBOC utilizadas en Galileo tienen la nomenclatura abreviada de **CBOC(6,1,1,1/11,+)** para la componente E1B y **CBOC(6,1,1,1/11,-)** para las componentes E1C. Como ya se ha visto, los dos primeros valores indican las frecuencias de subportadora de las dos componentes, es decir,  $f_s$  para  $\text{SC}_{E1a}$  y  $\text{SC}_{E1b}$ ; el tercero corresponde a la frecuencia de chip  $f_c$ ; el cuarto es la fracción de potencia asignada a la primera subportadora, pudiendo obtener la otra de la relación que cumplen  $\alpha$  y  $\beta$ ; y por último el quinto símbolo indica si las subportadores se suman (+) o se restan (-).



**SUBPORTADORAS CBOC UTILIZADAS EN E1B Y E1C [17]**

Los códigos de rango están optimizados, deben almacenarse en la memoria, por lo que a menudo se les llama *memory codes*, y se generan en base a registros como combinaciones de dos secuencias M truncadas. El código para la componente E1B es de longitud 4.092 chips, mientras que para el piloto E1C son de 102,3Mchips. Sin embargo, un código de esa longitud tendría una adquisición muy lenta, por lo que en realidad se trata de un código primario de 4.092 chips concatenado con un código de 25chips. Esta concatenación de códigos recibe el nombre de *tiered codes* y se construye de la siguiente forma:



**ESQUEMA GENERACIÓN TIERED CODE [17]**

Estos códigos conforman la componente de señal correspondiente a los servios OS, CS y SoL, quedando el servicio PRS en la componente E1A.



### 1.1.2. Código E1A

Se trata de la componente PRS de la señal, por lo que no se ha publicado información muy detallada al respecto. Además, al tratarse de una señal propietaria pueden producirse cambios sin necesidad de que sean notificados. Sin embargo, lo que se conoce de esta señal es que se transmite en cuadratura con modulación BOC (15, 2'5) de tipo coseno.

Introduciendo esta componente en la expresión anterior de  $SE_1(t)$  obtenemos la siguiente expresión de envolvente compleja normalizada de potencia, donde las componentes en fase y en cuadratura se representan como la parte real y la imaginaria de la señal respectivamente:

$$SE_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E1B}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) + \beta SC_{E1b}(t)) - e_{E1C}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) - \beta SC_{E1b}(t))] + j\gamma e_{E1A}(t) SC_{E1c}(t)$$

► Siendo :

- $e_{E1A}(t)$  la señal que contiene los datos de navegación modulados con el código aleatorio.
- $SC_{E1c}(t)$  la subportadora binaria BOC (15, 2'5).
- $\gamma$  el parámetro que pondera la potencia de esta componente.

El problema de esta señal es que tal y como está planteada no tiene amplitud constante, sino que tiene la forma:

$$\begin{aligned} A^2(t) &= \frac{1}{2}(\alpha SC_{E1a}(t) + \beta SC_{E1b}(t))^2 + \frac{1}{2}(\alpha SC_{E1a}(t) - \beta SC_{E1b}(t))^2 - \\ &- e_{E1B}(t)e_{E1C}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) + \beta SC_{E1b}(t))(\alpha SC_{E1a}(t) - \beta SC_{E1b}(t)) + \gamma^2 = \\ &= (\alpha^2 + \beta^2) - e_{E1B}(t)e_{E1C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 = 1 - e_{E1B}(t)e_{E1C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 \end{aligned}$$

Esta ecuación sería constante si  $\alpha = \beta$  y si  $\gamma = 1$ , sin embargo hemos visto anteriormente que  $\alpha$  y  $\beta$  tienen los valores adecuados para el funcionamiento óptimo de Galileo, por lo que finalmente no es posible a priori que esta señal tenga envolvente constante. El problema causado por la falta de una envolvente constante se origina por la falta de linealidad de los amplificadores de a bordo, que de cara a obtener la mayor eficiencia en potencia trabajan en zona de saturación. Por tanto, para distintos valores de amplitud a la entrada estos amplifican de manera diferente, por lo que se producen distorsiones tanto de amplitud como de fase en la señal de salida. Esta problemática, además de afectar a las prestaciones del propio sistema, puede introducir interferencias en las bandas más próximas.

Esto se podría solucionar, por ejemplo, reduciendo la potencia de transmisión para que los amplificadores trabajaran en régimen lineal, pero la pérdidas de esos pocos dBs es crítica en un sistema como este, donde las transmisiones tierra-satélite introducen pérdidas de propagación muy grandes. Este es un problema común en otros ámbitos de las telecomunicaciones, resuelto de diversas formas, y que en la señal E1 de Galileo se ha resuelto utilizando técnicas conocidas como **CASM** (*Coherent Adaptive Subcarrier Modulation*) e **Interplex Modulation**.

Ambas son técnicas con filosofías similares, ya que finalmente la clave está en incluir una cuarta componente de señal conocida como componente de intermodulación  $s_{IM}(t)$ . Al ser una

componente que en principio no lleva información, sino que es una mera utilidad para mantener la amplitud constante, también supone una pérdida de potencia. Actualmente está estudiándose la posibilidad de introducir información útil en esa componente, para aprovechar esa potencia asignada.

$$SE_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E1B}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) + \beta SC_{E1b}(t)) - e_{E1C}(t)(\alpha SC_{E1a}(t) - \beta SC_{E1b}(t))] + j(\gamma e_{E1A}(t) SC_{E1c}(t) + s_{IM}(t))$$

Para que la amplitud de esta nueva señal sí sea constante analizamos cómo impacta este nuevo término a la ecuación anterior de la amplitud de la señal:

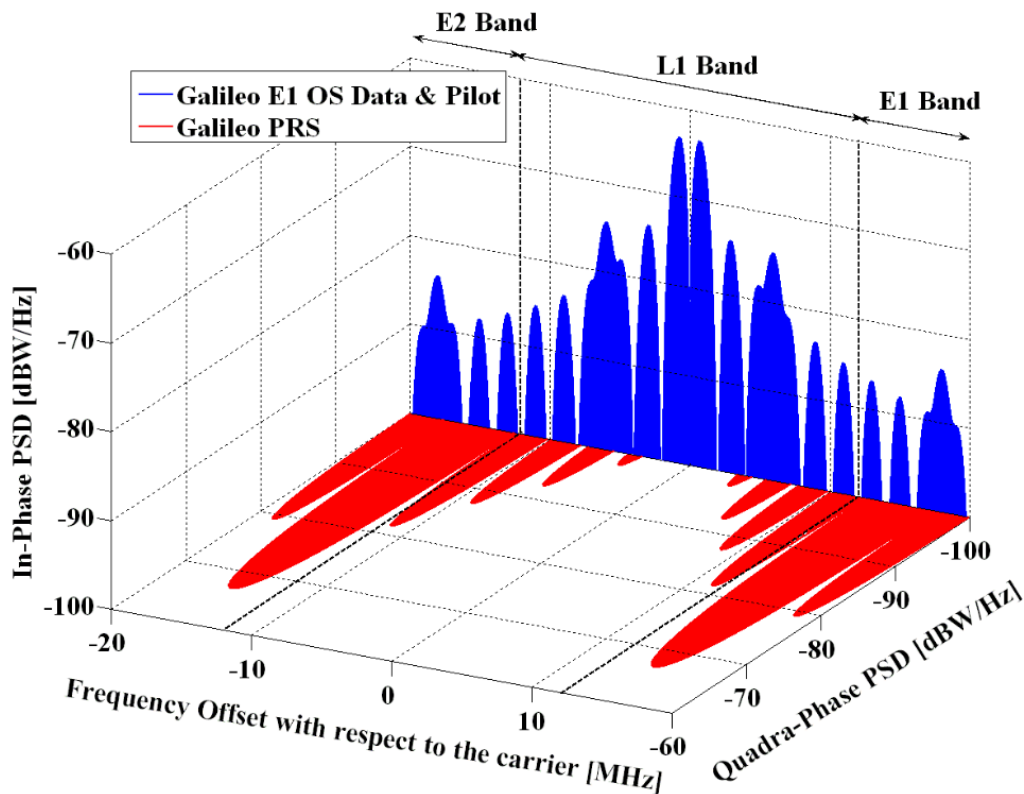
$$A(t) = 1 - e_{E1B}(t)e_{E1C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 + s_{IM}^2(t) + 2\gamma e_{E1A}(t)sc_{E1C}(t)s_{IM}(t)$$

Para que se mantenga constante, siendo  $s_{IM}^2(t)$  binaria si  $s_{IM}(t)$  lo es, deben igualarse los términos 2 y 5, por lo que debe cumplirse que:

$$-e_{E1B}(t)e_{E1C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) = 2\gamma e_{E1A}(t)sc_{E1C}(t)s_{IM}(t)$$

$$s_{IM}(t) = -\frac{1}{2\gamma} e_{E1B}(t)e_{E1C}(t)e_{E1A}(t)sc_{E1C}(t)(\alpha^2 - \beta^2)$$

Introducir esta componente de intermodulación supone una pérdida del 7,7% de la potencia total de esta señal. La componente A transmite un 46,14% de la potencia total, mientras que el resto de potencia se reserva para el resto de servicios en la componente B (de datos) y la C (piloto), que tienen un 23,07% de potencia cada una.



ESPECTRO SEÑAL E1 GALILEO [19]

## 1.2. Señales en Banda E5

[17] La banda E5 de Galileo se utiliza para transmitir los servicios OS, CS y SOL. Tiene una particularidad sobre las demás, y es que puede tanto considerarse una única banda de 51MHz que va desde 1.164MHz a 1.215MHz con una frecuencia central de 1.195,795MHz, como considerarla la combinación de dos sub-bandas **E5a** y **E5b** de 20,46MHz cada una y con frecuencias centrales de 1.176,45 MHz y 1.207,14 MHz respectivamente.

Utilizarla como una única banda tiene la ventaja de que permite un gran ancho de banda, lo cual hace la señal más robusta frente al *jitter* causado por el ruido y el efecto del multicamino. Sin embargo, esto encarece considerablemente el receptor, ya que se hace más complejo y con unas necesidades de potencia mayores debido al uso de frecuencias de muestreo mayores. Por tanto, para que pueda ser explotada para las aplicaciones extendidas en el mercado de consumo se plantea la posibilidad de utilizar las dos sub-bandas E5a y E5b de manera independiente.

Con esta premisa la señal E5 se genera como la suma de cuatro componentes moduladas como **AltBOC**, que pueden filtrarse en el procesamiento de señal del receptor de manera que seleccionemos dos de ellas, una en fase y otra en cuadratura, cuando filtremos una banda y otras dos de la misma forma cuando sintonicemos la otra:

- ▶  $e_{E5aI}$  es la componente de datos de la banda E5a que transmite el mensaje de navegación F/NAV modulando la secuencia de datos  $D_{E5aI}$  con el pseudocódigo asociado a esa componente,  $C_{E5aI}$ .
- ▶  $e_{E5aQ}$  es la componente piloto de la sub-banda E5a, que no transmite datos, sino únicamente el pseudocódigo  $C_{E5aQ}$ .
- ▶  $e_{E5bI}$  es la componente de datos análoga de la banda E5b que transmite el mensaje de navegación I/NAV modulando la secuencia de datos  $D_{E5bI}$  con el pseudocódigo asociado a esa componente,  $C_{E5bI}$ .
- ▶  $e_{E5bQ}$  es la componente piloto de E5b, que transmite el pseudocódigo  $C_{E5bQ}$ .

La formulación matemática de estas señales es:

$$e_{E5aI}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E5aI} |i|_{L_{E5aI}} D_{E5aI}[i]_{DC_{E5aI}} \prod (R_{c_{E5aI}} t - i)$$

$$e_{E5aQ}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E5aQ} |i|_{L_{E5aQ}} \prod (R_{c_{E5aQ}} t - i)$$

$$e_{E5bI}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E5bI} |i|_{L_{E5bI}} D_{E5bI}[i]_{DC_{E5bI}} \prod (R_{c_{E5bI}} t - i)$$

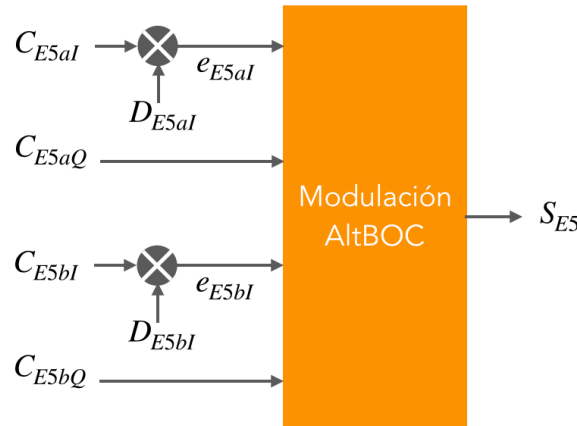
$$e_{E5bQ}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E5bQ} |i|_{L_{E5bQ}} \prod (R_{c_{E5bQ}} t - i)$$

- Siendo:

- $L_{E5xx}$  la longitud de código de rango de la componente E5xx.
- $R_{c_{E5xx}}$  el ratio de chips por segundo.
- $DC_{E5xx}$  el ratio de bits por símbolo de la componente E5xx.  $DC_{E5xx} = R_{c_{E5xx}} / R_{s_{E5xx}}$

- $[i]_{DC_{E5xx}}$  una operación que nos da el entero más próximo de  $\frac{i}{DC_{E5xx}}$
- $\Pi(t)$  un pulso rectangular de duración y amplitud unidad.

La señal también utiliza portadoras binarias, pero la modulación es algo especial, por eso se denomina *Alternative BOC*, **AltBOC**, y se genera de la siguiente manera:



**ESQUEMA MODULACIÓN ALTBOC PARA E5 [17]**

Sub-banda	Componente	Longitud Código $L_{E5xx}$	Tasa de Chip $R_{c_{E5xx}}$	Tasa Símbolos $R_{s_{E5xx}}$
E5a	i	204.600 chips	10.230 Mchips/s	50 símb/s
	Q	1.023.000 chips		Sin datos (piloto)
E5b	i	4.092 chips		250 símb/s
	Q	1.023.000 chips		Sin datos (piloto)

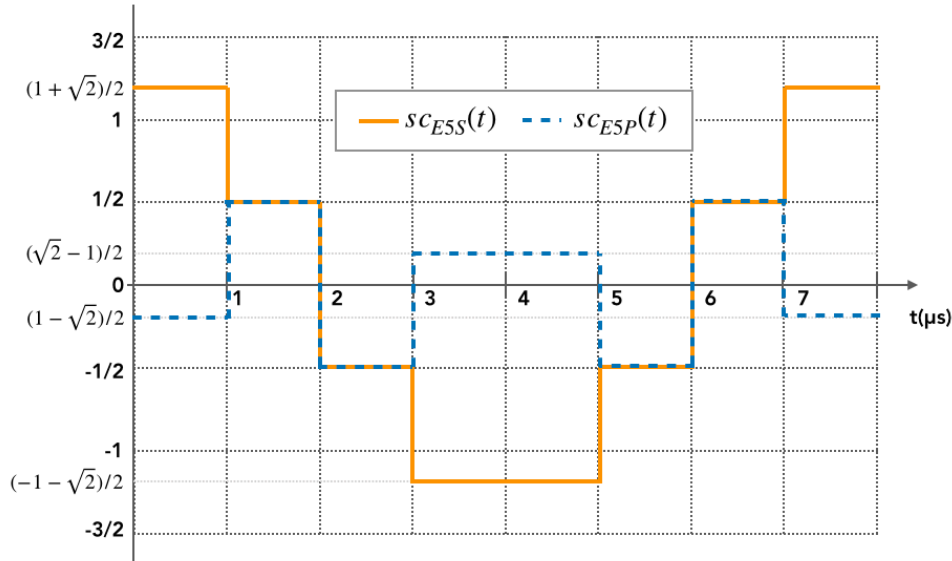
Este tipo de modulación permite que la señal resultante tenga envolvente constante, lo cual hemos visto antes que es lo ideal cuando se trabaja con amplificadores en régimen no lineal. Para generarla es necesario definir previamente dos sub-portadoras  $s_{c_{E5S}}(t)$  y  $s_{c_{E5P}}(t)$  de frecuencia  $R_{SE5} = 1/T_{SE5} = 15,345\text{MHz}$  ( $15 \times 1,023\text{MHz}$ ). Esto nos permite expresar la ecuación total de  $s_{E5}(t)$  como:

$$\begin{aligned}
 s_{E5}(t) = & \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5aI}(t) + je_{E5aQ(t)})[sc_{E5S}(t) - jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4)] + \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5bI}(t) + je_{E5bQ(t)})[sc_{E5S}(t) + jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4)] + \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5aI}(t) + j\bar{e}_{E5aQ(t)})[sc_{E5P}(t) - jsc_{E5P}(t - T_{SE5}/4)] + \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5bI}(t) + j\bar{e}_{E5bQ(t)})[sc_{E5P}(t) + jsc_{E5P}(t - T_{SE5}/4)]
 \end{aligned}$$

Las señales de la expresión anterior  $\bar{e}_{E5aI}(t)$ ,  $\bar{e}_{E5bI}(t)$ ,  $\bar{e}_{E5aQ}(t)$  y  $\bar{e}_{E5bQ}(t)$  son productos de intermodulación conformados de una forma similar a como se hacía en la señal E1 con CASM e Interplex, que tienen la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{E5aI}(t) &= e_{E5aQ}(t)e_{E5bI}(t)e_{E5bQ}(t) & \bar{e}_{E5aQ}(t) &= e_{E5aI}(t)e_{E5bI}(t)e_{E5bQ}(t) \\ \bar{e}_{E5bI}(t) &= e_{E5bQ}(t)e_{E5aI}(t)e_{E5aQ}(t) & \bar{e}_{E5bQ}(t) &= e_{E5bI}(t)e_{E5aI}(t)e_{E5aQ}(t) \end{aligned}$$

Para interpretar su significado y connotaciones, en primer lugar hay que analizar la forma de las subportadoras  $sc_{E5S}(t)$  y  $sc_{E5P}(t)$ :



PERIODO FUNCIONES BÁSICAS ALTBOC  $sc_{E5S}(T)$  Y  $sc_{E5P}(T)$  [17]

Como se ve, la subportadora  $sc_{E5S}(t)$  es un coseno cuantificado con 4 niveles, que si se retrasa un cuarto de periodo se convierte en un cuarto de periodo. Por tanto, podemos reescribir la expresión anterior de  $s_{E5}(t)$ , haciendo la asociación de que:

$$sc_{E5S}(t) \pm jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4) \approx e^{\pm j2\pi R_{SE5}t}$$

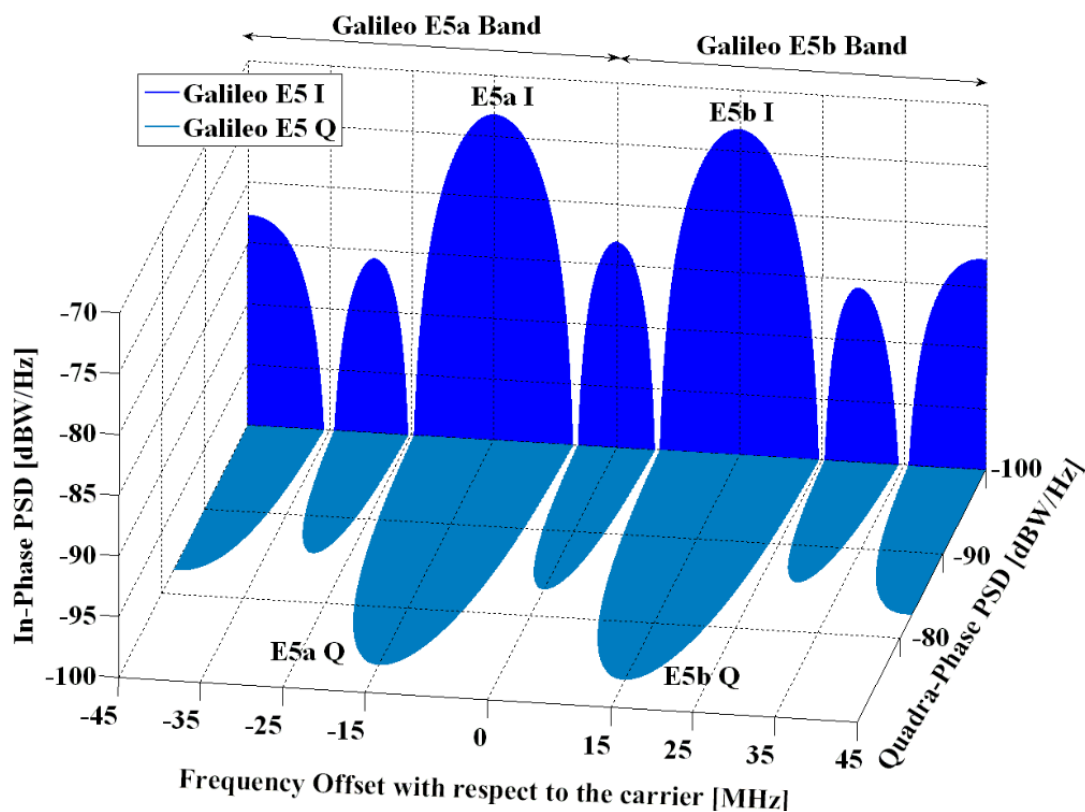
Por tanto, el último factor de todos los sumandos de la expresión anterior de  $s_{E5}(t)$  puede interpretarse como una traslación de  $\pm 15,345\text{MHz}$  de la señal de datos que multiplica en el primer término:

$$\begin{aligned} s_{E5}(t) &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \underbrace{(e_{E5aI}(t) + je_{E5aQ}(t))}_{\text{Componente Señal}} \underbrace{[sc_{E5S}(t) - jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4)]}_{\text{Modulación a } SC_{E5S}} + \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}} \underbrace{(e_{E5bI}(t) + je_{E5bQ}(t))}_{\text{Componente Señal}} \underbrace{[sc_{E5S}(t) + jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4)]}_{\text{Modulación a } SC_{E5S}} + \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}} \underbrace{(\bar{e}_{E5aI}(t) + j\bar{e}_{E5aQ}(t))}_{\text{Componente Señal}} \underbrace{[sc_{E5P}(t) - jsc_{E5P}(t - T_{SE5}/4)]}_{\text{Modulación a } SC_{E5P}} + \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}} \underbrace{(\bar{e}_{E5bI}(t) + j\bar{e}_{E5bQ}(t))}_{\text{Componente Señal}} \underbrace{[sc_{E5P}(t) + jsc_{E5P}(t - T_{SE5}/4)]}_{\text{Modulación a } SC_{E5P}} \end{aligned}$$

Ese término de componente de señal se compone por  $e_{E5xI}(t) \pm js_{E5xQ}(t)$  y solo toma valores de  $1 \pm j$ , por lo que puede interpretarse como una modulación QPSK. Por tanto, en conjunto la señal  $s_{E5}(t)$  puede verse como dos señales QPSK desplazadas  $\pm 15,345\text{MHz}$  sobre la frecuencia central de la banda. Los términos 3 y 4 correspondientes a los productos de intermodulación no tienen una justificación clara, sino que son utilizados para cumplir la condición de amplitud de envolvente constante.

Los códigos PRN utilizados se generan como *tiered codes*, combinando códigos primarios y secundarios al igual que en E1. A diferencia los códigos de E1, no se trata de códigos de memoria, sino que son códigos Gold que se generan mediante dos registros de desplazamiento de 14 bits, de manera similar a como se generan en GPS. Los códigos primarios son diferentes para cada satélite, mientras que los secundarios serán iguales para todos los satélites en las componentes E5aI y E5bI pero serán diferentes para las componentes E5aQ y E5bQ.

Componente Señal	Periodo Tiered Code (ms)	Logitud del Código (chips)	
		Primario	Secundario
E5aI	20	10.230	20
E5aQ	100		100
E5bI	4		4
E5bQ	100		100
E1B	4	4.092	-
E1C	100		25



### 1.3. Señales en Banda E6

[17] La señal E6 de Galileo transmite los servicios CS y PRS. Se transmiten en la banda que va desde 1.260 MHz a 1.300 MHz con una frecuencia central de 1.278,75MHz. Su estructura es muy similar a la de E1, pero con la diferencia de que utiliza BPSK como modulación en lugar de utilizar BOC con portadoras binarias.

La señal E6 se compone de la modulación de dos componentes de uso civil:

- ▶  $e_{E6B}(t)$  es la componente de datos que transmite el mensaje de navegación C/NAV con secuencia binaria  $D_{E6B}$  modulado por una secuencia pseudoaleatoria  $C_{E6B}$ .
- ▶  $e_{E6C}(t)$  es la componente piloto, que no envía datos sino únicamente el código de rango  $C_{E6C}$ .

$$e_{E6}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E6B}(t) - e_{E6C}(t)]$$

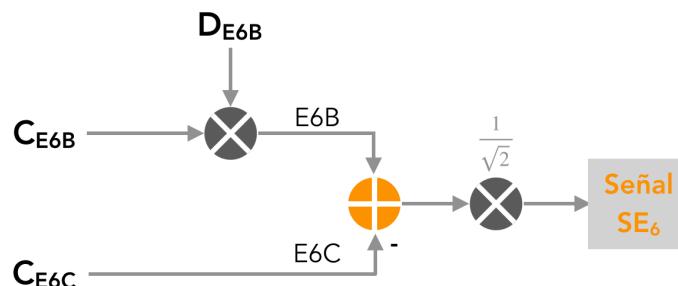
La expresión matemática de estas componentes se formula de la siguiente manera:

$$e_{E6B}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E6B} |i|_{L_{E6B}} D_{E6B}[i]_{DC_{E6B}} \prod (R_{c_{E6B}} t - i)$$

$$e_{E6C}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{E6C} |i|_{L_{E6C}} \prod (R_{c_{E6C}} t - i)$$

- $L_{E6x}$  es la longitud de código de rango de la componente E6x.
- $R_{c_{E6x}}$  es el ratio de chips por segundo.
- $DC_{E6x}$  es el ratio de bits por símbolo de la componente E6x.
  - $DC_{E6x} = R_{c_{E6x}} / R_{s_{E6x}}$
- $[i]_{DC_{E6x}}$  es una operación que nos da el entero más próximo de  $\frac{i}{DC_{E6x}}$
- $\prod(t)$  es un pulso rectangular de duración y amplitud unidad.

La información publicada sobre estos códigos no es completa ya que se trata de señales de uso comercial, no abiertas para las aplicaciones *mass-market*. Sin embargo, de lo publicado en la especificación de Galileo, sabemos lo siguiente:



ESQUEMA MODULACIÓN DE E6 [17]

Componente	Tasa de Chip $R_{CE6X}$ (MChip/s)	Tasa de símbolo $R_{sE6X}$ (símb/s)
B	5,115	1.000
C	5,115	Sin datos (Piloto)

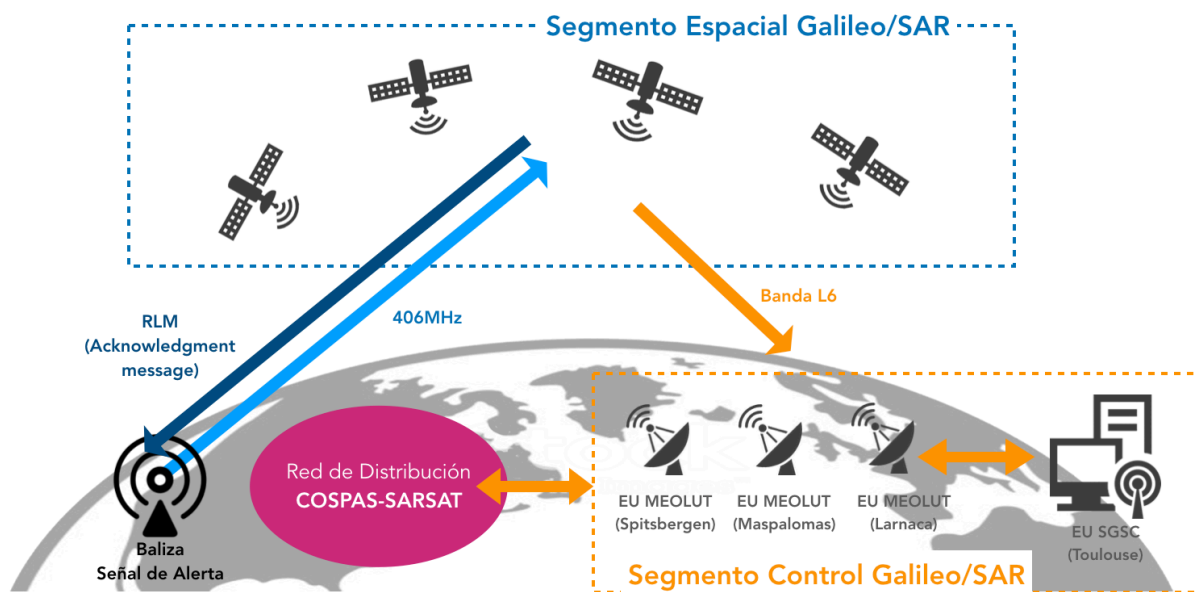
Tanto la componente piloto como la de datos se combinan en una única portadora, compartiendo cada una el 50% de la potencia.

### 1.4. Señales en Banda L6

[18] Esta es una banda especial del sistema Galileo utilizada para dar soporte al servicio de Apoyo a la Búsqueda y Rescate (SAR) definido en el documento de especificación del servicio. Representa la contribución de Europa al esfuerzo cooperativo internacional de la iniciativa COSPAS-SARSAT, fundada inicialmente por Rusia, Estados Unidos, Francia y Canadá.

Este sistema ha ido evolucionando e incluyendo nuevos satélites desde el lanzamiento del primer satélite COSPAS-1 en 1982, pasando por satélites de órbitas bajas (LEOSAR) y satélites geostacionarios (GEOSAR), para finalmente pasar a los satélites de órbitas medias MEOSAR (**M**edium **E**arth **O**rbit **S**earch and **R**escue system) sobre el año 2000. El programa MEOSAR de los Estados Unidos se denominó DASS (**D**istress **A**lerting **S**ystem); el ruso, SAR/Glonass, y el europeo, SAR/Galileo, que es el que nos ocupa.

Los satélites Galileo incluyen transpondedores que permiten captar las señales de las balizas de emergencia transportadas en barcos, aviones, etc, y enviarlas de vuelta a los centros nacionales de rescate. A partir de esto, los centros de rescate pueden conocer la ubicación precisa donde se ha producido un accidente. Al menos un satélite Galileo estará a la vista de cualquier punto de la Tierra, por lo que es posible una alerta de socorro en tiempo casi real. Galileo además permite, en algunos casos, enviar de vuelta una señal de ACK que confirma a la baliza la recepción de la alerta.



ARQUITECTURA SERVICIO SAR GALILEO [18]



Para prestar este servicio la infraestructura de Galileo necesaria es, además de la constelación de satélites:

- 3 MEOLUTs (*European MEO Local User Terminal*) que reciben la señal de los satélites, localizados en Maspalomas (España), Spitsbergen (Noruega) and Larnaca (Chipre).
- 1 SGSC (*SAR Galileo Service Center*) localizado en Toulouse (Francia), que actúa también como centro de seguimiento y coordinación, siendo el punto central de control de este servicio.
- 5 balizas de referencia localizadas en Maspalomas (España), Spitsbergen (Noruega), Larnaca (Chipre), Toulouse (Francia) y Santa María (Portugal)
- La red SAR/Galileo (SARN)

El transpondedor SAR de los satélites detecta la alerta de socorro de cualquier baliza COSPAS-SARSAT que emite una alerta en la banda 406-406.1 MHz, y transmite esta información a estaciones terrestres a través de la banda L6, a 1.544.1 MHz. Los Centros de Control de la Misión (MCC) de COSPAS-SARSAT llevan a cabo la determinación de la posición de las balizas emisoras de alerta de socorro. De igual manera, desde los satélites se envía una señal de asentimiento a la baliza para confirmar la recepción de la alerta en lo que se llama RLS (**R**eturn **L**ink **S**ervice), un servicio que se planteó de acuerdo a dos formatos:

1. **RLM (Return Link Message)**: el sistema Galileo es el único responsable de la respuesta de retorno una vez la señal de alerta es detectada y localizada.
2. **RCC RLM**: el sistema Galileo envía el RLM a la baliza emisora una vez que tiene la autorización del Centro de coordinación de rescate (RCC).

Este mensaje se envía a través de la señal Galileo E1 (1.575,42 MHz), como un mensaje de 80 bits (Short RLM) o 160 bits (Long RLM).

Return Link Service	Beacon ID			Message Code				Short-RLM Parameters Field															
	60			4				16															
	Bit 1**	To..	Bit 60	Bit 61	Bit 62	Bit 63	Bit 64	Bit 65	Bit 66	Bit 67	Bit 68	Bit 69	Bit 70	Bit 71	Bit 72	Bit 73	Bit 74	Bit 75	Bit 76	Bit 77	Bit 78	Bit 79	Bit 80
<b>Acknowledgment Service Type-1</b>	15 HEX ID			0	0	0	1	1	0	Spares													Parity
<b>Test Service</b>	15 HEX ID			1	1	1	1	Spares													Parity		

**EJEMPLO TRAMA SHORT RLM [18]**

Los requisitos de rendimiento del servicio SAR Galileo se describen en la siguiente tabla:

SAR/Galileo	
<b>Capacidad</b>	Cada satélite puede gestionar señales de 150 balizas activas simultáneamente.
<b>Latencia</b> (desde que se activa baliza hasta la determinación de su ubicación)	La comunicación de las balizas a las estaciones terrestres del SAR permitirá la detección y ubicación de una transmisión de socorro en menos de 10 minutos.
<b>Calidad de Servicio</b>	Bit Error Rate < 10 <sup>-5</sup> (Comunicación Baliza a Central Terrestre)
<b>Tasa de datos de asentimiento (ACK)</b>	6 mensajes de 100 bits por minuto
<b>Disponibilidad</b>	> 99.8%

## 2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN

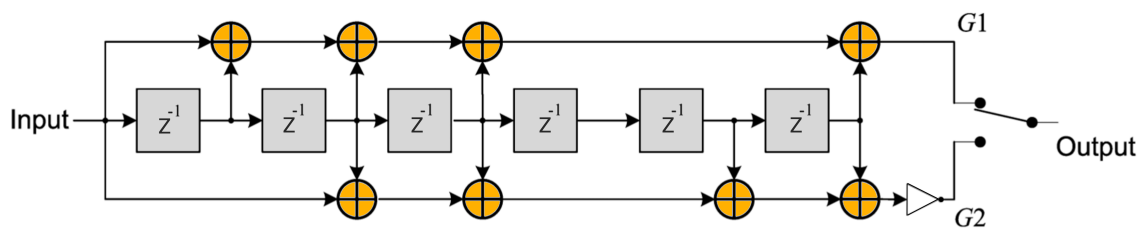
[17] Los canales de datos de las señales Galileo transmiten diferentes mensajes en función del tipo de servicio que emitan. Estos mensajes son los siguientes:

Tipo	Servicios	Componente
F/NAV	OS	E5a1
I/NAV	OS/CS	E5b1 y E1B
C/NAV	OS	E6B

Los datos del mensaje de navegación se estructuran en tramas, subtramas y páginas, de una forma similar a como se estructuraban en GPS. La página es la estructura básica en la que se construye todo el mensaje, y es en la que aparece un campo "tipo" para identificar la clase de información que contiene.

Galileo incorpora una protección frente a errores FEC en todos los tipos de mensajes de navegación mediante una **codificación convolucional entrelazada** previa a la modulación del mismo. La decodificación se puede implementar utilizando un decodificador viterbi estándar.

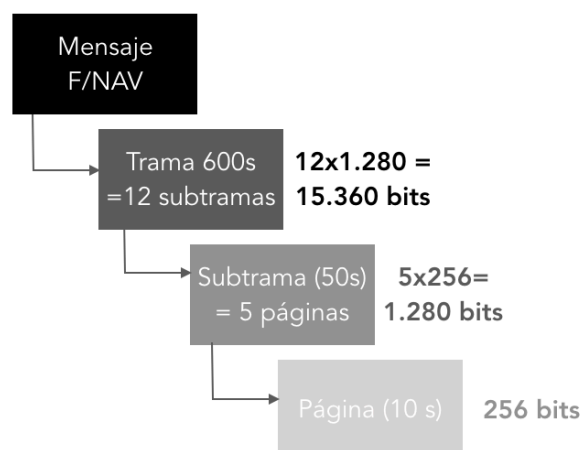
Se trata de una codificación FEC con una tasa de código de 1/2, por lo que dado que la velocidad de símbolo del mensaje de navegación es de 250 símbolos/seg, en realidad tenemos una tasa efectiva de datos menor de 125 símbolos/seg, ya que además de la protección de errores hay que añadir ciertos bits de sincronización. Por tanto, la tasa real efectiva es de 114 símbolos/seg.



ESQUEMA DE LA CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL FEC [17]

### 2.1. F/NAV

Se trata del código de acceso libre usado para OS en la componente E5a1, con una tasa de 25,6bps. Se estructura de la siguiente manera:

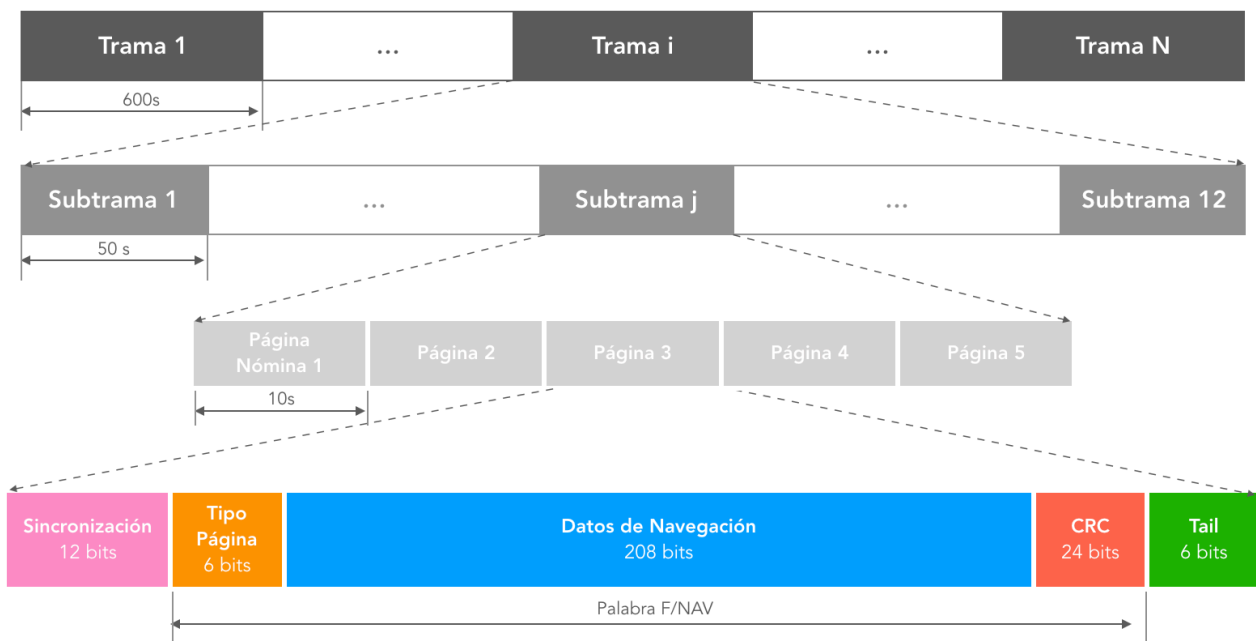


Cada trama del mensaje F/NAV tiene una duración de 600 segundos y está compuesta por 12 subtramas. A su vez, cada subtrama tiene una duración de 50 segundos y está compuesta por 5 páginas con una duración de 10 segundos cada una. La página en sí consta 256 bits en 3 campos principales:

- ▶ **Patrón de sincronización:** tiene una longitud de 12 bits y siempre es 101101110000. Es equivalente al preámbulo de GPS y tiene como propósito permitir la sincronización del receptor con el límite de la página.
- ▶ **Palabra F/NAV:** Con una longitud de 238 bits, es la parte codificada por el FEC. Contiene:
  - Tipo de página (6 bits): campo para identificar el tipo de información. Los diferentes tipos son:

Tipo de Página	Contenido de la página
1	Svid, Correcciones de reloj, correcciones ionosféricas, SiSa (Signal in Space Accuray), retardo de grupo, estado de salud de la señal, referencia de tiempo y estado de validez de los datos.
2	Efemérides (1/3) y referencia de tiempo (GSt)
3	Efemérides (2/3) y referencia de tiempo (GSt)
4	Efemérides (1/3) y referencia de tiempo (GSt) convertida a UTC, GSt-GPS y ToW
5-6	Información de almanaque para el satélite k y para el k+n (parte n)

- Datos de navegación (208 bits): contiene los datos de la naturaleza marcada por el tipo de página
- CRC (24 bits): contiene datos de verificación por redundancia cíclica.
- ▶ **Cola (Tail):** Tiene una longitud de 6 bits, y consta de 6 valores que se utilizan para permitir la decodificación FEC de cada página.

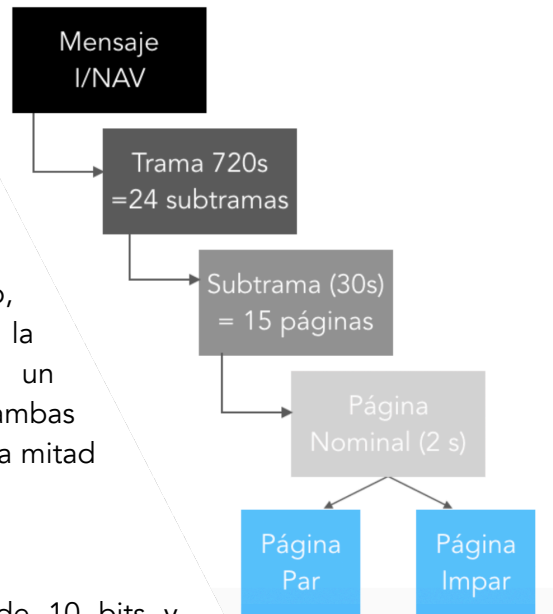


**ESTRUCTURA MENSAJE F/NAV [17]**

## 2.2.I/NAV

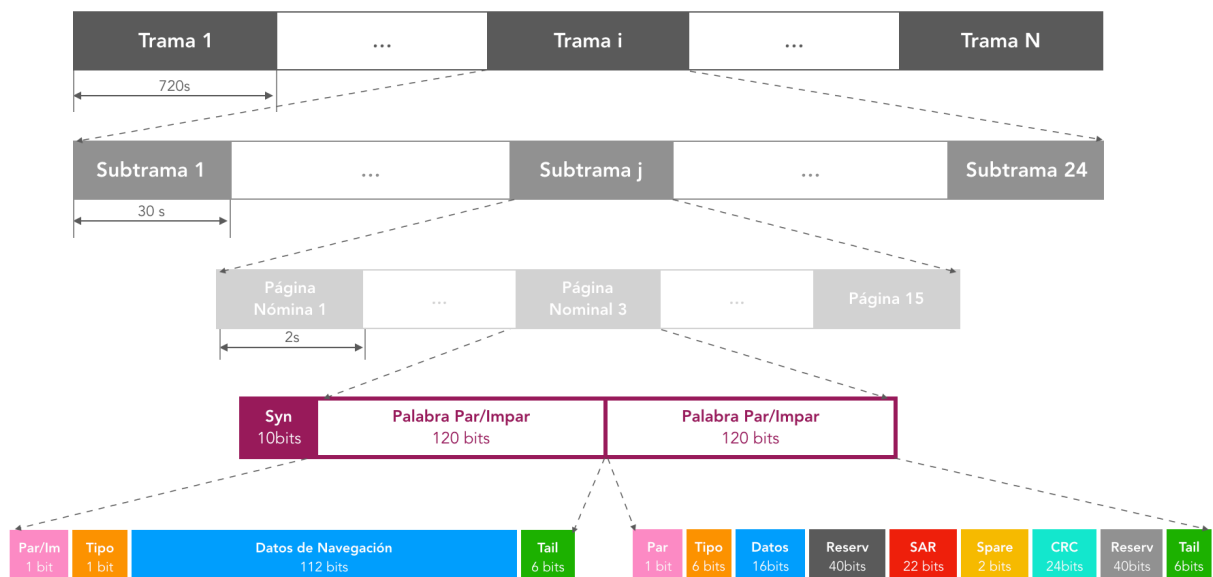
Es el mensaje de navegación de integridad usado tanto para OS como para CS por las componentes E5bl y E1B, con una tasa de 120bps. La unidad mínima en la que se estructura la información es la página nominal, formada por una página par y otra impar provenientes de una de E5bl y otra de E1B, y que se transmite cada 2 segundos.

Cada trama del mensaje I/NAV tiene una duración de 720 segundos y está compuesto por 25 subtramas. A su vez, cada subtrama tiene una duración de 30 segundos y está compuesta por 15 página nominales, que es como se llama al conjunto de dos páginas, una par y otra impar, que compone la unidad mínima de este tipo de mensajes. En el canal E1B, la página par se transmite primero, mientras que en el canal E5b-l se transmite primero la impar. La ventaja de esta configuración es que un receptor que decodifica el mensaje I/NAV en ambas frecuencias puede decodificar las mismas páginas en la mitad del tiempo que un receptor de una sola frecuencia.



Cada página tiene la siguiente estructura:

- ▶ **Patrón de sincronización:** tiene una longitud de 10 bits y siempre es 0101100000.
- ▶ **Página (par o impar) de I/NAV:** está compuesta por 120 bits, que dependiendo de si se trata en segundo par o impar transmiten un mensaje diferente, como se ve en el esquema de la figura siguiente.
- ▶ **Cola (Tail):** 6 bits que, al igual que en el caso de F/NAV, se utilizan para permitir la decodificación FEC de cada página.



ESTRUCTURA MENSAJE I/NAV [17]

### 2.3. C/NAV y G/NAV

Se trata de los mensajes de navegación comercial (C/NAV) y el gubernamental (G/NAV). En ambos casos, dado que el código es restringido a usuarios autorizados, no se ha publicado el detalle.

En resumen, los mensajes de navegación, por servicio y señales, son los siguientes:

Tipo Mensaje	F/NAV	I/NAV	C/NAV	G/NAV
Servicio Galileo	OS	OS/CS/SoL	CS	PRS
Señales	E5al	E1B/E5bl	E6B	E1A/E6A
Tasa Datos (bps)	25	125	500	50
Navegación/Posicionamiento	Sí	Sí		Sí
Integridad		Sí		Sí
Suplementario			Sí	
Público Regulado				Sí
SAR		Sí		

## 3.4 BeiDou



BeiDou es el sistema GNSS que la República Popular de China ha estado desarrollando durante las últimas décadas a fin de alcanzar la autosuficiencia en el campo de la geonavegación y que se encuentra en su fase final de lanzamiento, previsto para 2020.

### 3.4.1 Características Generales

[20] Si bien ya en los años 70 el Gobierno Chino comenzó a plantearse las posibilidades del desarrollo de un sistema de geonavegación tras el lanzamiento de su primer satélite, no fue hasta la consecución en 1989 del proyecto Twin Stars, una pareja de satélites geoestacionarios experimentales con los que realizaron sus primeras pruebas de posicionamiento, cuando China dio luz verde a un ambicioso proyecto denominado BeiDou. Bautizado con el nombre chino que reciben las siete estrellas más brillantes de la Osa Mayor, BeiDou se basaría en un plan de tres fases iniciado en 1994 con el que desarrollar un sistema GNSS que compitiera de igual a igual con GPS. A partir de entonces China ha llevado a cabo de manera implacable un enorme despliegue que se ha dividido en tres fases diferenciadas, **BeiDou-1**, BeiDou-2 o **Compass** y BeiDou-3 o **BDS-3**.

BeiDou-1 comenzó a dar servicio en el año 2001, cubriendo únicamente el territorio chino. En esta primera fase el sistema se diferenciaría de manera importante del resto de sistemas GNSS al basarse no solo en la recepción de la señal de los satélites en los terminales, sino también en la capacidad del terminal de responder al segmento de control a través de los satélites, habilitando la funcionalidad de **mensajería corta** además de los servicios básicos de navegación y sincronización de tiempo. Sin embargo, si bien el sistema se implementó ampliamente en el país para funciones militares y gubernamentales, encontró un *handicap* importante para su éxito en el tamaño y coste de los terminales de usuario necesarios para realizar transmisiones espaciales.

Sería a partir de 2011 cuando la segunda fase de BeiDou, Compass, empezaría a ofrecer servicio, esta vez con el modelo típico GNSS de recepción pasiva en los terminales. Así, en 2012 sería capaz de ofrecer cobertura en la región Asia-Pacífico y pondría en pie la estructura básica para comenzar a afrontar el servicio a nivel global, que se ha ido complementando con la última fase del proyecto, BDS-3, cuyos satélites incluyen nuevas señales de navegación y cuyo final está previsto para 2020.

Cabe destacar que la información liberada sobre BeiDou es limitada y existe poca documentación oficial que facilite el estudio de sus características.

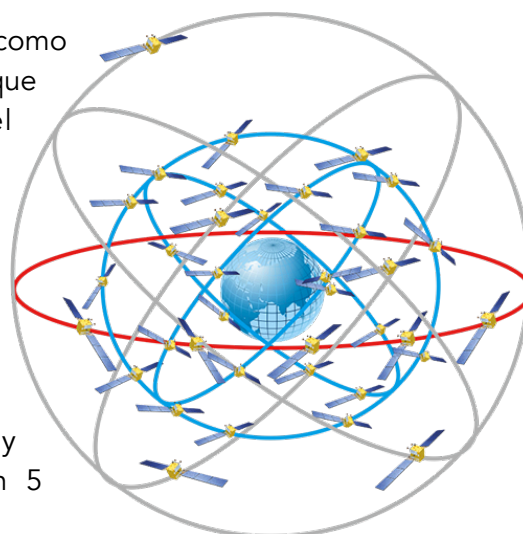
### 3.4.2. Segmento Espacial

[21] El proyecto BeiDou se ha dividido fundamentalmente en tres fases diferenciadas que han determinado el programa espacial chino.

- **BeiDou-1:** en su primera etapa, BeiDou se limitaría a ofrecer posicionamiento en el ámbito regional. Para ello recurriría a ubicar sus satélites en órbita geoestacionaria, lo que si bien limita el espacio de cobertura, reduce el número de satélites necesarios para trabajar dentro de la región elegida, en este caso el territorio chino. Así, BeiDou-1 comenzaría a dar

servicio en 2001, al año siguiente de lanzar sus dos primeros satélites, BD 1A y BD 1B. En 2003 se completaría con BD 1C y se abriría su uso al público civil chino en el año 2004. Un cuarto satélite de apoyo, BD 1D, sería puesto en órbita de manera fallida en 2007, si bien el Gobierno Chino reportaría posteriormente haber conseguido recuperarlo. Actualmente este bloque espacial está retirado del servicio.

- **BeiDou-2:** en su segunda etapa, conocida también como Compass o BDS-2, BeiDou alcanza una cobertura que abarca el territorio de Asia-Pacífico. Desde el lanzamiento en 2007 del satélite experimental, el BD-M1, el programa chino ha conseguido poner en servicio un total de 15 satélites. Este sistema comienza a combinar satélites de órbita geostacionaria (GEO) con satélites tanto de órbita media (MEO) como satélites de órbita inclinada geosincronizada (IGSO). A fecha de febrero de 2019 se compone de una solución de 5 satélites GEO, 5 IGSO y 4 MEO. Durante este periodo se lanzaron también 5 satélites experimentales para probar lo que a futuro sería BeiDou-3.



**CONSTELACIÓN BEIDOU**

- **BeiDou-3:** llamada también BDS-3, denomina a la constelación final de satélites con la que BeiDou alcanzará una cobertura global para 2020, cuando se estima que se finalizará su despliegue. Actualmente cuenta ya con 3 satélites GEO, 3 IGSO y 24 MEO.

### 3.4.3 Segmento Control

[21] El segmento de control del sistema BeiDou está compuesto por tres tipos de estaciones terrestres.

- ▶ **Monitor Stations (MS):** estaciones encargadas de la monitorización en tiempo real de la información enviada por los satélites, a fin de facilitársela a la estación maestra.
- ▶ **Time Synchronization/Upload Stations (TS/US):** estaciones con dos funcionalidades distintas. Por un lado, se encargan de medir de manera constante el desvío temporal en la referencia horaria de los satélites. Por otro, son las estaciones responsables de enviar a los satélites los mensajes de navegación actualizados.
- **Master Control Station (MCS):** estación principal de control y operación del sistema. Se encarga de recolectar la información facilitada por el resto de estaciones para poder calcular los nuevos mensajes de navegación, además de monitorizar las anomalías que presenten los satélites y llevar a cabo funciones de control y mantenimiento.

Cabe destacar que durante el servicio BeiDou-1 era el segmento de control el que, tras recibir la señal de los terminales de usuario a través de los satélites pertinentes, calculaba la posición del usuario, que luego devolvía a este mediante el mismo mecanismo. Si bien el cálculo de la posición pasó a ser pasivo con la segunda fase de BDS, se mantiene la capacidad de cursar

comunicación vía satélite entre los terminales y el segmento de control para dar soporte al **servicio de mensajería corta**.

### 3.4.4 Segmento Usuario

Como se ha comentado, aunque actualmente los receptores de BeiDou, al igual que los del resto de GNSS, permiten calcular la posición y velocidad del terminal en base a las señales recibidas por los satélites, no era así en la primera generación, donde esa información era calculada y enviada de vuelta al usuario por el segmento de control. Por tanto, originalmente los terminales con soporte BeiDou-1, dado que debían poder establecer comunicación bidireccional con los satélites, tenían un coste elevado y un tamaño considerable, contando con antenas de al menos 20 cm.

En junio de 2011, el sistema completó la puesta en servicio del segmento terrestre, incluida la sección de prueba del desarrollo del terminal de usuario. Sin embargo, los primeros terminales aparecieron en 2009 basados en ASIC y comprendían ya la integración de GPS. Sin embargo, en la actualidad existe una gran variedad de terminales BeiDou, desde simples *smartphones* hasta dispositivos de navegación aeromárítima, así como se pretende expandir sus posibilidades de comunicación activa en servicios tales como los de emergencia y rescate (SAR). Todo ello en un ámbito de cooperación internacional para facilitar la interoperabilidad entre BeiDou y el resto de GNSS.

### 3.4.5 Estructura de Señal

De modo análogo al resto de sistemas estudiados, las señales de BeiDou se componen de tres partes fundamentales:

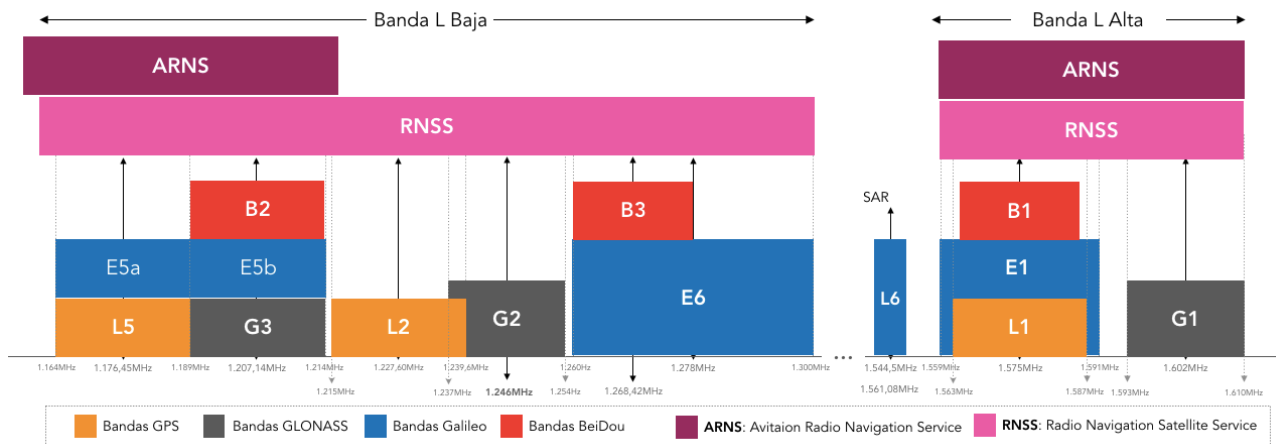
- **Frecuencias de portadora:** BeiDou transmite utilizando las bandas B1, B2, B3 y Bs.
- **Códigos de rango:** para identificar el satélite del cual proviene la información, modulando el mensaje de navegación.
- **Mensajes de navegación:** con los propios datos de efemérides y demás observables orbitales que permiten inferir la posición del receptor.

## 1. BANDAS DE FRECUENCIA

<sup>[22]</sup> Actualmente BeiDou opera sobre las siguientes bandas de frecuencia.

- **Banda B1:** originalmente centrada en 1.561,098 MHz, se encuentra en proceso a migración de sus señales a 1.575,42 MHz, banda que compartiría con Galileo y GPS.
- **Banda B2:** centrada en 1.207,14 MHz, compartiendo espectro con la banda E5b de Galileo y G3 de GLONASS.
- **Banda B3:** centrada en 1.268,52 MHz, superpuesta con la banda E6 de Galileo.
- **Banda BS:** centrada en 2.492,028 MHz. También llamada banda de test, es una región frecuencial en actual estado de experimentación. No se conocen actualmente señales que trabajen en esta banda.



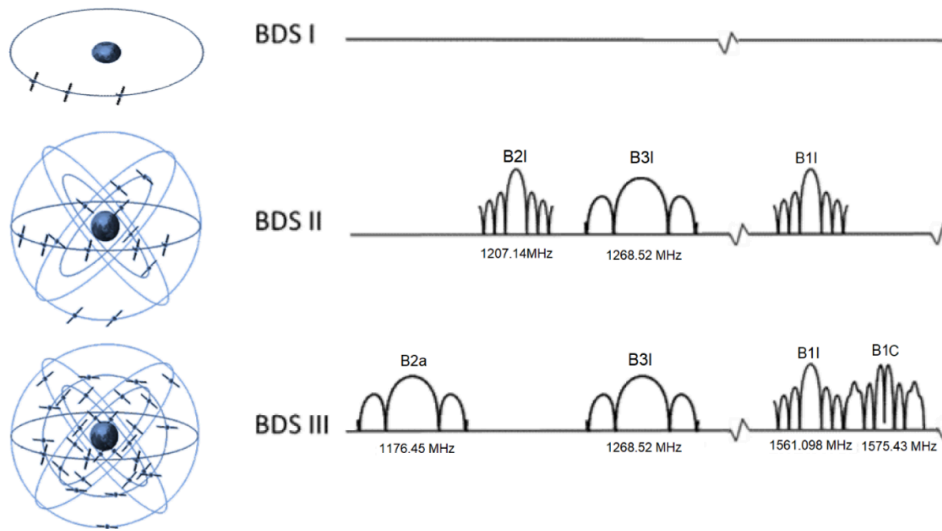


### SITUACIÓN GENERAL ESPECTRO GNSS (GPS-GLONAS-GALILEO-BEIDOU)

La última información que se liberó sobre las distintas señales y servicios soportados por BeiDou queda detallada en la siguiente tabla [22]:

Servicios		Señales	Satélites
Servicios Básicos de Navegación	Abierto	B1I, B3I, B1C, B2a	3 IGSO + 24 MEO
	Autorizado	B1I, B3I	3 GEO
Servicios de Mensaje Corto	Regional	L (uplink), S (downlink)	
	Global	L (uplink) B2B (DownLink)	
Servicio de Aumentación (Regional)		BDSBAS-B1C BDSBAS-B2a	3 GEO
Servicio de SAR		UHF (uplink) B2B(downlink)	6 MEO 3 IGSO +24 MEO
Servicio de Posicionamiento Preciso (Regional)		B2B	3 GEO

Sin embargo, actualmente solo se han liberado por parte de la Oficina de Navegación Satélite China (CSNO) los documentos de control de interfaz (SCI) de las señales abiertas para el servicio de navegación civil: B1I, B3I, B1C y B2a. La pareja B1I /B3I, aunque ha sufrido cambios y mejoras, son las señales de navegación originales de BeiDou-2, mientras que la pareja B1C/B2a llega con BeiDou-3. Para los servicios monofrecuencia es preferible el uso de B1I o B1C, mientras que para los servicios multifrecuencia la CSNO recomienda el uso de las combinaciones B1I/B3I o B1C/B2a.



**EVOLUCIÓN DEL ESPECTRO DE SEÑALES DE BEIDOU [22]**

## 1.1. Señales en banda B1

La banda B1 tiene una frecuencia central de 1.575,42 MHz, Inicialmente en BDS-II la banda B1 contaba con las señales B1I y B1Q, mientras que con la introducción de BDS-III aparece la señal B1C, que utiliza la modulación BOC, como el resto de evoluciones de los demás sistemas GNSS.

### 1.1.1. Señal B1I

[23] La señal B1I es una de las dos primeras señales de navegación civil liberadas por la CSNO durante la fase II de BeiDou. Su forma puede descomponerse en la siguiente expresión:

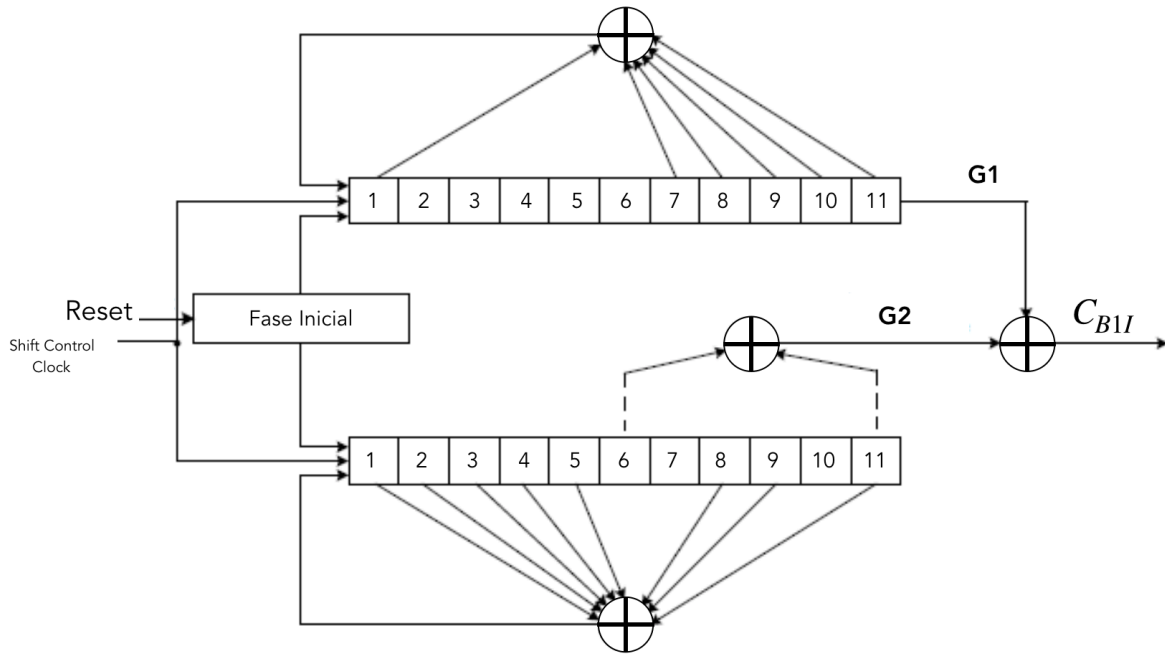
$$S_{B1I}^j(t) = A_{B1I} C_{B1I}^j(t) D_{B1I}^j(t) \cos(2\pi f_1 t + \phi_{B1I}^j)$$

Siendo:

- ▶  $j$  el número de satélite.
- ▶  $A_{B1I}$  la amplitud de la seal B1I.
- ▶  $C_{B1I}(t)$  la señal binaria correspondiente al código de rango.
- ▶  $D_{B1I}(t)$  la señal binaria que contiene los datos con el mensaje de navegación.
- ▶  $f_1$  la frecuencia de portadora de la banda B1.
- ▶  $\phi_{B1I}^j$  la fase inicial de la portadora.

B1I opera sobre la frecuencia portadora de 1.561,098 MHz con un ancho de banda de 4,092 MHz y modulada en BPSK. Como hemos visto en otros sistemas, B1I permite la multiplexación CDMA mediante la designación de códigos de rango para cada uno de los satélites, los cuales tienen una longitud de 2.046 chips a una velocidad de 2,046 Mcps. Estos códigos de rango se generan mediante un código Gold que es a su vez construido mediante la suma en módulo 2 de dos registros LFSR de 11 bits.

Para conseguir obtener distintos códigos de rango se aplica al registro G2 una fase de selección lógica distinta para cada satélite.



**ESQUEMA GENERACIÓN CÓDIGO  $C_{B1I}$  [23]**

### 1.1.2. Señal B1C

[25] La señal B1C es una señal de banda de 32,736 MHz que apareció con la evolución de BeiDou en BDS-III. Está formada por dos partes fundamentales, la componente de datos y la componente piloto, en cuadratura. Se pueden representar en la forma de envolvente compleja normalizada modulada de la señal B1C como:

$$S_{B1C}(t) = S_{B1C_{data}}(t) + jS_{B1C_{pilot}}(t)$$

Donde a su vez podemos descomponer cada una de las partes en fase (parte real) y cuadratura (parte imaginaria) de la señal en:

$$S_{B1C_{data}}(t) = \frac{1}{2} D_{B1C_{data}}(t) C_{B1C_{data}}(t) SC_{B1C_{data}}(t)$$

$$S_{B1C_{pilot}}(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} C_{B1C_{pilot}}(t) SC_{B1C_{pilot}}(t)$$

Como podemos observar, la señal  $S_{B1C_{Data}}(t)$  está formada por el mensaje de navegación  $D_{B1C_{Data}}(t)$  y el código de rango  $C_{B1C_{Data}}(t)$  modulados por una subportadora BOC(1,1). La expresión de la subportadora BOC es:

$$SC_{B1C_{data}}(t) = \text{signo}(\sin(2\pi f_{sc_{B1C_a}} t))$$

Donde la frecuencia  $f_{sc_{B1C_a}}$  se corresponde con la frecuencia de chip, que en este caso es 1,023 MHz.

Por otro lado,  $S_{B1C_{pilot}}(t)$  se compone únicamente del código de rango  $C_{B1C_{pilot}}(t)$  modulado por una señal QMBOC(6,1,4/33). La función QMBOC representa la conjunción de una BOC(1,1) con

otra BOC(6,1) en cuadratura y con una relación de potencias designada por el tercer parámetro. Así, la expresión de la subportadora QMBOC de la componente piloto tendría la forma:

$$SC_{B1C_{pilot}}(t) = \sqrt{\frac{29}{33}} \text{signo}(\sin(2\pi f_{scB1C_a} t)) - \sqrt{\frac{4}{33}} \text{signo}(\sin(2\pi f_{scB1C_b} t))$$

Donde  $f_{scB1C_b}$  sería la frecuencia de la BOC (6,1), esto es  $6 \times 1,023 \text{MHz} = 6,138 \text{MHz}$ . Así, la expresión final de la señal puede extenderse como:

$$S_{B1C}(t) = \frac{1}{2} \frac{D_{B1C_{data}}(t) C_{B1C_{data}}(t) \cdot \text{signo}(\sin(2\pi f_{scB1C_a} t))}{S_{B1C_{data}}(t)} + \sqrt{\frac{1}{11}} C_{B1C_{pilot}}(t) \cdot \text{signo}(\sin(2\pi f_{scB1C_b} t)) + j \sqrt{\frac{29}{44}} C_{B1C_{pilot}}(t) \cdot \text{signo}(\sin(2\pi f_{scB1C_a} t))$$

$S_{B1C_{pilot_b}}(t)$

$S_{B1C_{pilot_a}}(t)$

Podemos resumir las características de la modulación según la siguiente tabla:

Componente	Modulación		Fase	Ratio Potencia
$S_{B1C_{data}}(t)$	BOC (1,1)		I	1/4
$S_{B1C_{pilot_a}}(t)$	QMBOC (6,1,4/33)	BOC (1,1)	Q	29/44
$S_{B1C_{pilot_b}}(t)$		BOC(6,1)	I	1/11

Con respecto a los códigos de rango, la señal B1C utiliza dos esquemas distintos según la componente. Mientras que la señal de datos lleva asociado un código de rango primario, en el caso de la componente piloto B1C trabaja con *tiered codes*, la unión de un código primario y otro secundario, tal y como hemos visto en otros sistemas.

Los códigos primarios se generan mediante el truncado de códigos Weil, de la misma manera a como se generaban en la señal L1C de GPS, concretamente truncando un código Weil a raíz de una secuencia de Legendre. El código secundario se genera de una manera similar, con un código Weil de longitud 3.607 del que tras el truncado se obtiene el código secundario de 1.800 chips.

Componente	Tipo Código Primario	Longitud Código Primario (chips)	Periodo Código Primario (ms)	Tipo Código Secundario	Longitud Código Secundario (chips)	Periodo Código Secundario (ms)
$S_{B1C_{data}}(t)$	Weil Truncado	10.230	10	-	-	-
$S_{B1C_{pilot}}(t)$	Weil Truncado	10.230	10	Weil Truncado	1.800	18.000

## 1.2. Señales en banda B2

La banda B2 tiene actualmente una frecuencia central de 1.176,45MHz, solapándose con la banda E5b de Galileo. Sin embargo, en un inicio en BDS-II la banda correspondía con E5a de Galileo y transmitía la señal B2I a 1.207,14 MHz, aunque las recientes evoluciones hacia BDS-III han llevado la señal a la parte superior de la banda y han evolucionado su modulación para transmitir finalmente la señal evolucionada B2a.

### 1.2.1. Señal B2a

[26] Al igual que la señal B1C, B2a consta de una componente de datos y una piloto que se pueden expresar en forma de envolvente compleja normalizada como:

$$S_{B2a}(t) = S_{B2a_{data}}(t) + jS_{B2a_{pilot}}(t)$$

Sin embargo, a diferencia de en la señal B1C, se trata de una modulación BPSK(10), donde se modula por una portadora sinusoidal, y no binaria, pudiendo expresarse sus componentes de la siguiente forma:

$$S_{B2a_{data}}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} D_{B2a_{data}}(t) C_{B2a_{data}}(t)$$

$$S_{B2a_{pilot}}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} C_{B2a_{pilot}}(t)$$

Donde D y C continúan representando el mensaje de navegación y el código de rango respectivamente. Esta señal opera en la frecuencia de 1.176,45 MHz con un ancho de banda de 20,46 MHz. El mensaje de navegación tiene una tasa de símbolos de 200 símb/s.

Señal	Componente	Frecuencia Portadora (MHz)	Modulación	Tasa Símb (símb/s)
B2a	$S_{B2a_{data}}(t)$	1.176,45	BPSK (10)	1/4
	$S_{B2a_{pilot}}(t)$		BPSK (10)	-

B2a, al igual que B1C, utiliza códigos de rango de tipo *tiered* a partir de la combinación de códigos primario y secundario, pero en este caso tanto para la señal de datos como para la señal piloto. Asimismo, el tipo de códigos utilizados difiere, ya que para los códigos primarios utiliza los códigos Gold, ya utilizados previamente en GPS:

Señal	Componente	Tipo Código Primario	Longitud Código Primario (chips)	Periodo Código Primario (ms)	Tipo Código Secundario	Longitud Código Secundario (chips)	Periodo Código Secundario (ms)
B2a	$S_{B2a_{data}}(t)$	Gold	10.230	1	Secuencia Fija	5	5
	$S_{B2a_{pilot}}(t)$	Gold		1	Weil Truncado	100	100

Para los códigos primarios, ambos de 10.230 chips, se recurre a códigos Gold generados a partir de dos registros de 13 bits, constando de diferentes coeficientes según se corresponda a la componente de datos o a la piloto. De un modo similar a como ocurre con las señales B1I y B3I, mientras que el registro 1 se inicia siempre con un valor 1, el valor de inicio del registro 2 sirve

para diferenciar los códigos por satélite, tanto en el de la componente de datos como en la piloto.

En el caso de los códigos de rango secundarios, mientras que el de la componente de datos es un código fijo de 5 bits con valor 00010, el de la componente piloto es un código de longitud 100 chips generado a partir de un código Weil, siguiendo el mismo procedimiento explicado en la señal B1C, donde los valores  $w$  (fase) y  $p$  (bit de truncado) caracterizan a los distintos satélites.

### 1.3. Señales en banda B3

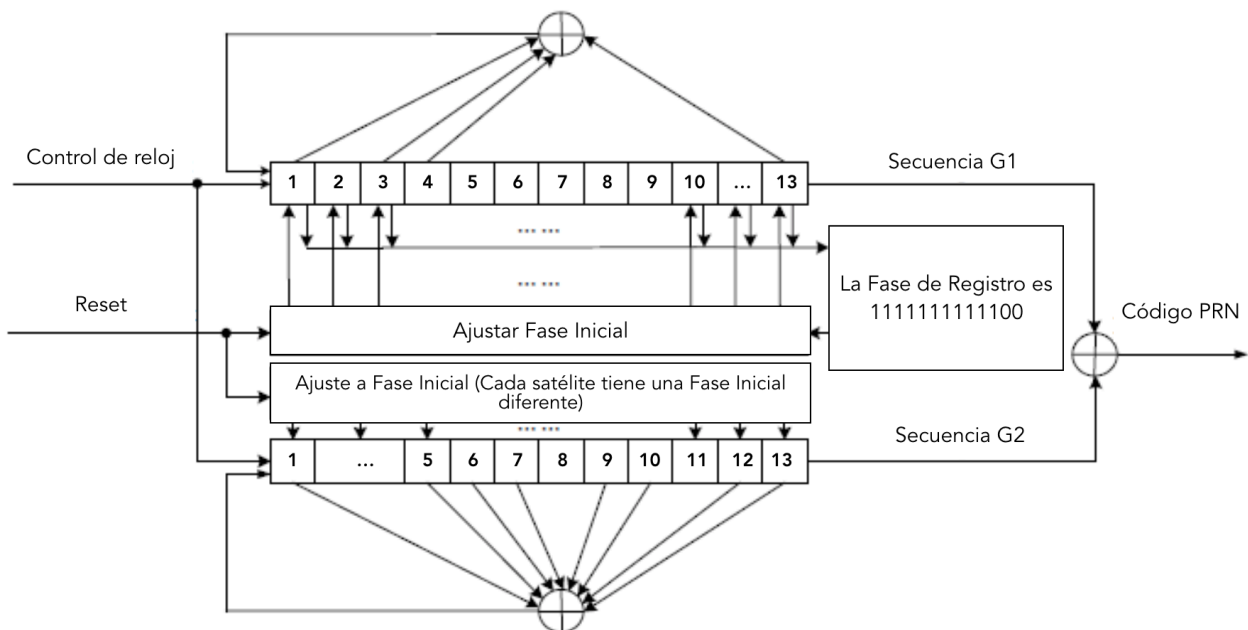
La banda B3 está centrada en 1.268,52 MHz, solapándose con la banda E6.

#### 1.3.1. Señal B3I

[24] Con la reciente actualización de las dos señales de navegación originales, B1I y B2I, esta última fue migrada a una nueva versión que opera en la banda B3. Las características y estructura de la señal B3I son análogos a las de B1I, siendo su expresión matemática:

$$S_{B3I}^j(t) = A_{B3I} C_{B3I}^j(t) D_{B3I}^j(t) \cos(2\pi f_3 t + \phi_{B3I}^j)$$

Sus diferencias fundamentales son la frecuencia sobre la que opera, 1.268,52 MHz, y su ancho de banda 20,46 MHz. Asimismo, los códigos de rango para esta señal son de mayor longitud que los de B1I, contando con 10.230 chips y una velocidad de 10,23 Mcps. Para ello consta de un código Gold generado a partir del truncado de dos secuencias, G1 y G2. Dichas secuencias provienen de sendos registros LFSR de 13 bits, cada una con un periodo de 8191 chips, y sobre las que se aplican fases iniciales. Mientras que la de G1 está establecida en 1 y se restaura al alcanzar el valor 1111111111100, la de G2 se establece de distinta manera para cada satélite. Gracias a esta operativa se consigue finalmente un código de rango con el periodo deseado de 10.230 chips.



ESQUEMA GENERACIÓN CÓDIGO  $C_{B3I}$  [24]

## 2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN

Actualmente el servicio de navegación civil de BeiDou utiliza fundamentalmente cuatro mensajes de navegación distintos según la señal utilizada y el tipo de satélite [22].

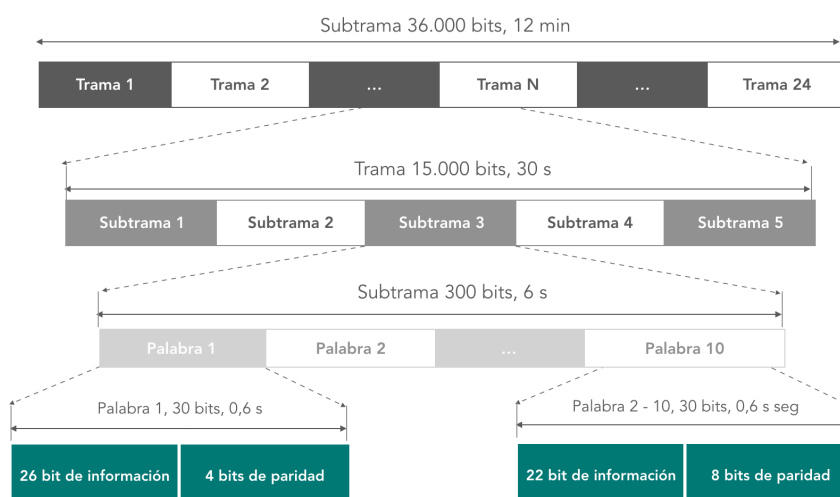
Tipo Satélites	Señales Transmitidas	Mensaje de Navegación
BDS-2M BDS-2I	B1I, B3I	D1
BDS-2G	B1I, B3I	D2
BDS-3M	B1I, B3I	D1
	B1C	B-CNAV1
	B2a	B-CNAV1

### 2.1. Mensaje D1

[23] El mensaje D1 tiene una velocidad de transmisión de 50 bps y su función es transmitir información básica de navegación, como las características fundamentales de los satélites, el almanaque de toda la constelación y los sesgos de tiempo con respecto a otros sistemas (UTC u otros sistemas GNSS). De manera similar a otros sistemas, el mensaje sigue una estructura según la que se divide jerárquicamente en supertramas, tramas, subtramas y palabras.

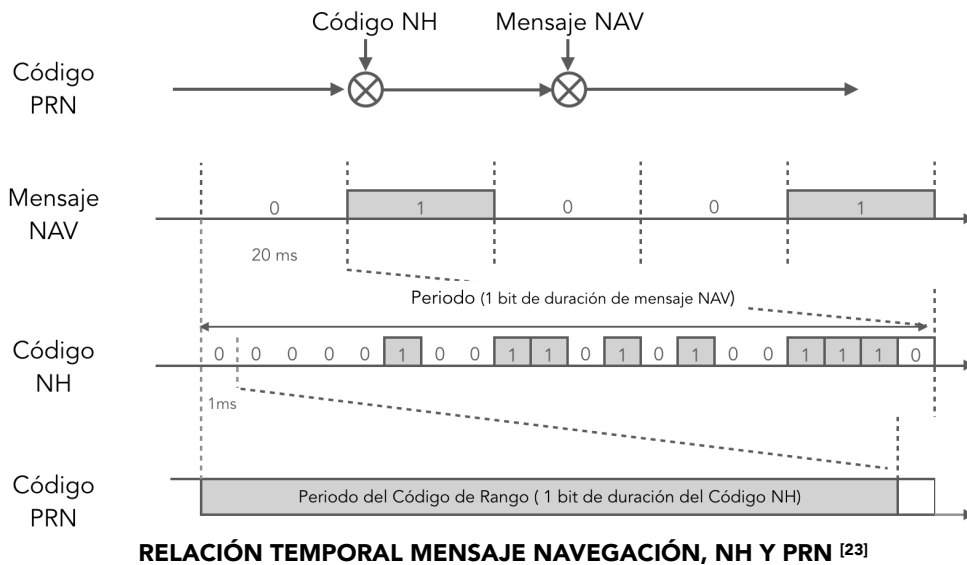
Una supertrama es la unidad mayor de un mensaje D1, se compone de 3.600 bits y tiene un tiempo de transmisión de 12 minutos. Se compone de 24 tramas o páginas, cada una de 1.500 bits y un tiempo de 30 segundos. Cada trama se divide a su vez en 5 subtramas de 300 bits, los cuales se dividen por último en 10 palabras de 30 bits.

Estas palabras se forman por una serie de bits de datos y otros de paridad, generados a partir de una codificación de tipo BCH(15,11,1), esto es, que introducen 4 bits de paridad por cada 11 bits de datos. Así, las palabras de una subtrama cuentan con 22 bits de información y 8 para la corrección de errores, a excepción de la primera palabra de la subtrama, que aplica solo sobre un grupo de 15 bits la codificación BCH. Esto se debe a que el primer parámetro de cada subtrama es un preámbulo de 11 bits destinado a la sincronización, y sobre el que no se debe aplicar la codificación.

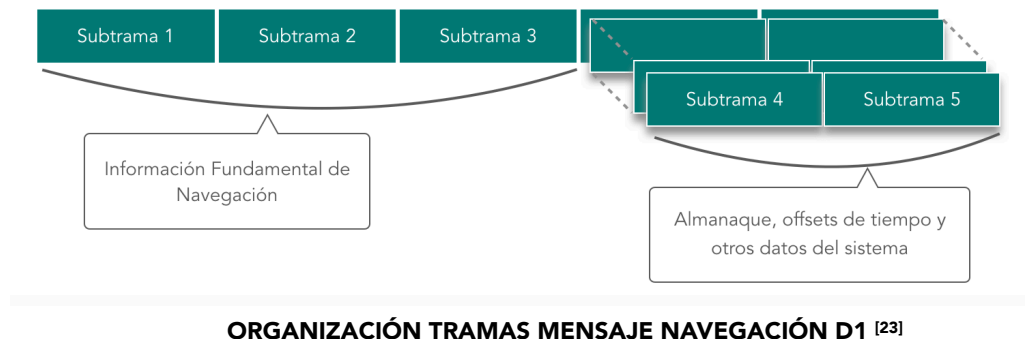


ESQUEMA MENSAJE NAVEGACIÓN D1 [23]

Hay que destacar que este mensaje llevan una modulación secundaria basada en la combinación en módulo-2 del código de rango con un código Neumann-Hoffman (NH) de 20 bits, que modulan conjuntamente el mensaje siguiendo el esquema de la siguiente figura:



Las subtramas 1, 2 y 3 facilitan en cada página los datos básicos de navegación, mientras que las subtramas 4 y 5, que transmiten el almanaque y los parámetros de tiempo en relación a otros sistemas, requieren los datos de 24 páginas.



El inicio de cada trama se encabeza con los parámetros:

- *Preamble* (Pre): consta de 11 bits fijos para todas las subtramas utilizados para favorecer la sincronización. Son el motivo por el que la primera palabra de la subtrama solo aplica una vez la codificación BCH.
- *Subframe identification* (FraID): 3 bits para la identificación del número de subtrama dentro de una trama.
- *Seconds of week* (SOW): 20 bits para el tiempo en BDT (escala de tiempos de BeiDou) medido en segundos transcurridos desde el último domingo a las 0:00.

Las subtramas 1 a 3 incluyen en cada página parámetros como el número de semana (*Week Number*), la precisión en metros de la señal (*User Range Accuracy Index*), los flags de salud del satélite, parámetros de retardo ionosférico y de corrección de reloj o efemérides.

- *Week number* (WN)
- *Autonomous satellite health flag* (SatHI)
- *User range accuracy index* (URAI)

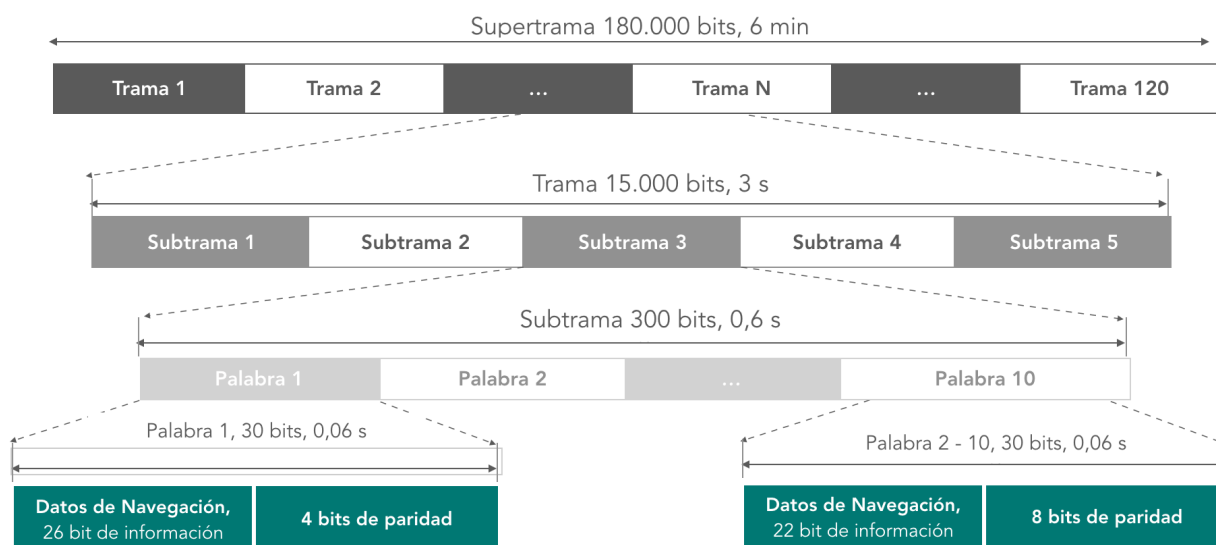


- Parámetros del retardo ionosférico ( $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ,  $n=0\sim 3$ )
- *Equipment group delay differential* (TGD1, TGD2)
- *Age of data clock* (AODC)
- Parámetro de corrección de reloj ( $t_{oc}$ ,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ )
- *Age of data ephemeris* (AODE)
- Parámetros de Efemérides ( $t_{oe}$ ,  $A$ ,  $e$ ,  $\omega$ ,  $\Delta n$ ,  $M_0$ ,  $\Omega_0$ ,  $i_0$ , IDOT,  $C_{uc}$ ,  $C_{us}$ ,  $C_{rc}$ ,  $C_{rs}$ ,  $C_{ic}$ ,  $C_{is}$ )

Por otro lado, las subtramas 4 y 5, a lo largo de 24 páginas diferenciadas mediante el parámetro de número de página (*Page Number*, Pnum) contienen la información referente al almanaque de la constelación completa, así como los parámetros temporales relativos a distintas escalas, como UTC, GPS, Galileo o Glonass.

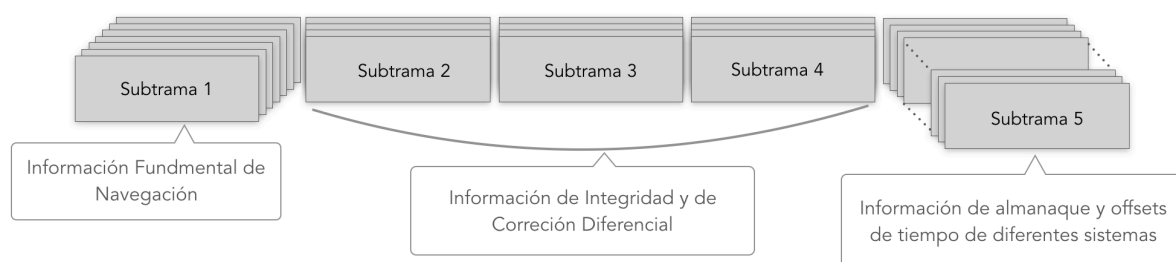
## 2.2. Mensaje D2

[23] El mensaje D2 está estructurado de una manera muy similar al D1, solo que tiene una velocidad de transmisión de 500 bps y una mayor extensión. Las supertramas tienen un tamaño de 180.000 bits con una duración de 6 segundos y están divididas en 120 tramas o páginas. Estas se dividen a su vez siguiendo el mismo patrón que D1, 5 subtramas compuestas por 10 palabras de 30 bits. A estas palabras se les aplica la codificación BCH(15,11,1) siguiendo la misma lógica que en D1. La modulación secundaria con código NH no aplica.



### ESQUEMA MENSAJE NAVEGACIÓN D2 [23]

A diferencia de D1, todos los datos de navegación de D2 ocupan varias páginas. En concreto, los datos de la subtrama 1 se reparten entre 10 páginas, los de las subtramas 2, 3 y 4 entre 6 páginas, y los de la subtrama 5, los más extensos, entre las 120 totales.



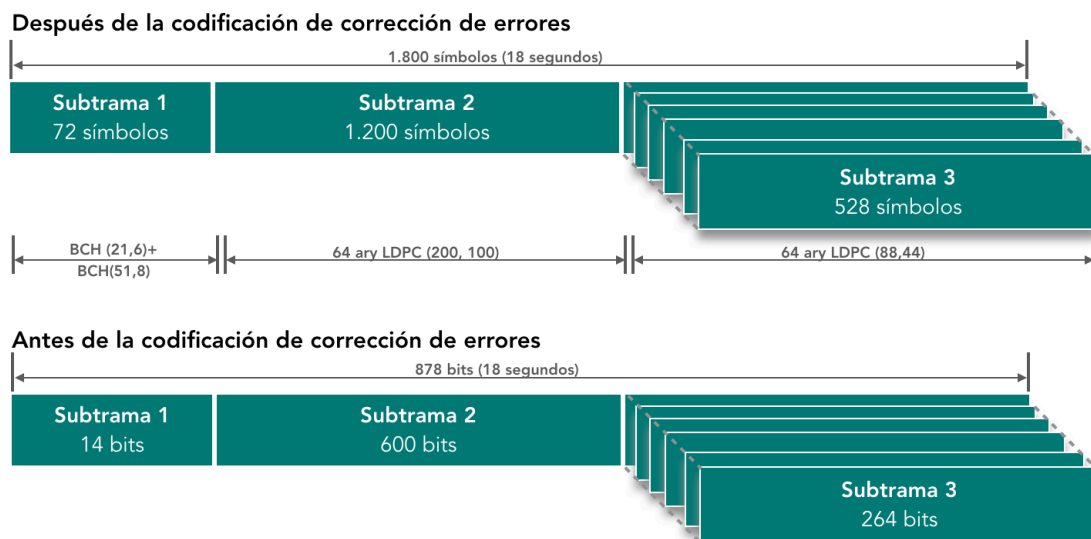
### ORGANIZACIÓN TRAMAS MENSAJE NAVEGACIÓN D2 [23]

La información que alberga el mensaje D2 es en esencia la misma que D1 con el añadido de:

- El parámetro de estado del satélite es un flag de dos bits en este caso, con información tanto del estado del RURA (*Regional User Range Error*), UDRE (*User Differential Range Error*) y corrección de reloj equivalente como del estado de la información ionosférica.
- Información de integridad y corrección diferencial para todos los satélites de la constelación.
- Los índices de RURA, UDRE y correcciones de reloj.
- Tabla de información de retardo ionosférico.

## 2.3.Mensaje B-CNAV1

[25] El mensaje B-CNAV1 es el transmitido por la señal B1C a través de su componente de datos. Se emite a una velocidad de 100 símbolos por segundo y tiene una longitud de 1.800 bits. Sin embargo, esta longitud es la resultante de aplicar distintas codificaciones para la protección contra errores en las distintas partes de la trama, siendo el tamaño útil de información de 878 bits divididos entre tres tipos de subtramas.



### ORGANIZACIÓN SUBTRAMAS MENSAJE NAVEGACIÓN B-CNAV1 [25]

La subtrama 1, de 14 bits útiles, consta de dos parámetros: PRN, un entero indefinido entre 1 y 63, y SOH (*Seconds Of Hour*). Estos parámetros son sometidos a dos codificaciones distintas, BCH(21,6) y BCH(71,8), que dan como resultado la subtrama total de 72 bits con protección.

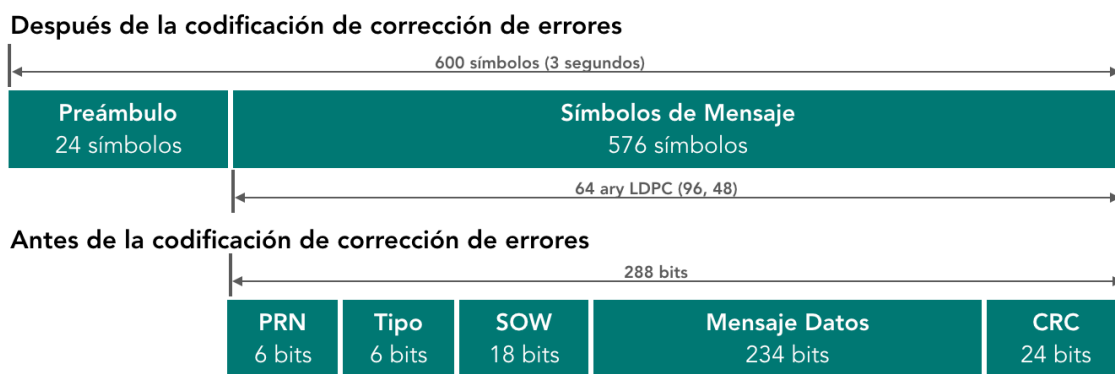
La subtrama 2 consta de 600 bits útiles e incluye distintos parámetros tales como las efemérides, los parámetros del reloj del sistema y de corrección de este o de retardo diferencial de grupo. Asimismo, incluye 24 bits de CRC (*Cyclic Redundancy Check*) que mejoran la detección de errores. Sobre esta subtrama se aplica una codificación de tipo 64-ary LDPC(200,100) que la amplía a 1.200 bits.

Por último, la subtrama 3, de 264 bits previa codificación, contiene diversa información como parámetros de corrección de retardo ionosférico, de orientación de la Tierra (EOP), *offsets* de

reloj, almanaque de la constelación, etc. Codificada también por LDPC(88,44) para llegar a 528 bits, divide su información a lo largo de múltiples páginas, tal y como hemos visto en los anteriores mensajes de navegación. Sin embargo, en este caso no tenemos un número definido de ellas, además de que las páginas se diferencian según el parámetro PageID, que si bien puede designar hasta 63 tipos distintos, actualmente solo se utilizan cuatro. Según la página sea de un tipo u otro, su asociación de bits a los parámetros de navegación será distinta. Por último, cabe destacar que las subtramas 3 contienen también al final del mensaje los 24 bits de CRC citados anteriormente.

## 2.4.Mensaje B-CNAV2

[26] El mensaje B-CNAV2 se transmite sobre la componente de datos de la señal B2a. Al contrario que los mensajes estudiados previamente, tiene una composición mucho más simple, constando únicamente de una trama de 600 bits transmitida a una velocidad de 200bps. Esta trama consta de 576 bits de mensaje a los que se suman 24 de parámetro de preámbulo (PRE) con la función de mejorar la sincronización. Asimismo, el mensaje de 576 bits es el resultado de aplicar sobre la información original de 288 bits una codificación de tipo LDPC(96,48).



**ORGANIZACIÓN SUBTRAMAS MENSAJE NAVEGACIÓN B-CNAV2 [26]**

Como podemos observar, el parámetro que diferencia al mensaje B-CNAV2 del resto que hemos visto es el *Message Type* (MesType), con 63 valores posibles. Este parámetro determina de un modo similar al *Page Type* visto en la subtrama 3 de B-CNAV1 los distintos esquemas de datos que llevará el mensaje transmitido. Actualmente han sido definidos ocho identificadores de tipo MesType: 10, 11, 30, 31, 32, 33, 34 y 40. El orden de difusión de estos tipos de mensaje es totalmente flexible, a excepción de los mensajes de tipo 10 y 11, que deben transmitirse juntos de manera continua para que el usuario pueda interpretar correctamente sus datos. Entre los distintos parámetros enviados a través de estos ocho mensajes distintos podemos encontrar información tal como las efemérides, los parámetros de *offset* de tiempos, corrección de reloj, retardo ionosférico, almanaque, EOP, etc.

### 3.5 QZSS



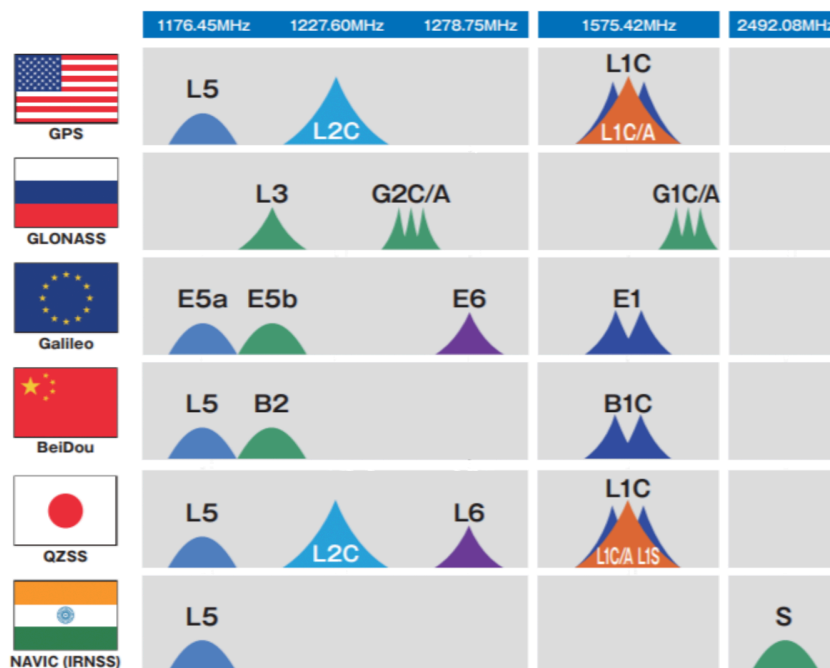
El **QZSS** (**Q**uasi-**Z**enith **S**atellite **S**ystem) o Sistema Satelital Cuasi-Zenital es el sistema de navegación regional japonés. Nace en 2002, desarrollado por el equipo *Advanced Space Business Corporation* (ASBC), conformado por las empresas *Mitsubishi Electric Corp.*, *Hitachi Ltd.*, y *GNSS Technologies Inc.* En 2007, este grupo colapsó y JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) y el *Satellite Positioning Research and Application Center*, continuaron su desarrollo.

#### 3.5.1 Características Generales

[27] La idea de este proyecto surge como respuesta a la naturaleza de Japón. Usar el GPS en grandes ciudades japonesas es complicado debido a la verticalidad de la arquitectura de las mismas, porque la señal de los satélites no caía lo suficientemente vertical para alcanzar los espacios que hay entre edificios altos. Esto, sumado a la posibilidad de no disponer de GPS, generaron la necesidad de un sistema regional de geoposicionamiento.

Una de las grandes ventajas de este sistema es la gran similitud con GPS. Esto permite combinar ambos sistemas y ofrecer una precisión que en áreas como Tokio puede llegar hasta de un centímetro.

Las señales de las que consta son muy similares a las de GPS y Galileo, y están en las bandas **L1**, **L2**, **L5** y **L6**.



RESUMEN DE SEÑALES Y BANDAS DE SISTEMAS GNSS [27]

#### 3.5.2 Segmento Espacial

El área de servicio cubre zonas del este de Asia y Oceanía. Este sistema consta de 3 satélites HEO (Highly Elliptical Orbit) y un cuarto satélite en una órbita geoestacionaria. La altitud del perigeo de la órbita elíptica de los tres primeros satélites es de 32.000 km y la altitud del apogeo es de

40.000 km. Este sistema está diseñado para que al menos uno de los satélites esté cerca del zenit en Japón. Dada su órbita, cada satélite aparece casi vertical la mayoría del tiempo (más de 12 horas al día con una elevación superior a 70°). Esto da sentido al nombre que recibe el sistema (Quasi-Zenith). El tiempo de vida para el que están diseñados estos satélites es de 10 años.

El primer satélite que se lanzó fue el Michibiki (**QZSS-1**), el 11 de septiembre de 2010. Se inyectó a la órbita Quasi-Zenith el 27 de septiembre. Tras ello se desplegaron los **QZSS-2** el 1 de junio de 2017, el **QZSS-3** el 19 de agosto y el **QZSS-4** el 9 de octubre del mismo año.

El satélite QZSS-2 mejoró los paneles solares y aumentó la capacidad de combustible. El satélite QZSS-3 es el satélite geostacionario y tiene un diseño más pesado. Añadió una antena adicional en banda S. El satélite QZSS-4 volvió a mejorar los paneles solares y la capacidad del tanque de combustible. En 2023 se planea tener una constelación de 7 satélites.



**ZONA DE COBERTURA QZSS**



**CRONOLOGÍA LANZAMIENTOS SATELITAES QZSS [27]**

### 3.5.3 Segmento Control

El Segmento Control está compuesto por una estación maestra de control (MCS), estaciones de control y seguimiento (TT&C), estaciones de medición láser y estaciones de monitorización. La red de monitorización cuenta con estaciones en Japón (Okinawa, Sarobetsu, Koganei, Ogasawara) y en el extranjero: Bangalore (India), Guam, Canberra (Australia), Bangkok (Tailandia) y Hawai (USA).

La **estación maestra de control (MCS)** es la responsable de la generación de mensajes de navegación que son cargados al satélite cenital a través de la estación de control y seguimiento ubicada en Okinawa.

Las **estaciones de monitorización (TT&C)** reciben las señales de posicionamiento proporcionadas por QZSS, GPS y otros sistemas GNSS.

### 3.5.4 Segmento Usuario

Dada la reducida constelación de satélites, QZSS solo ofrece servicio de posicionamiento en Japón. Sin embargo, el hecho de que sus señales sean similares a las de GPS y Galileo lo hace fácilmente interoperable, por lo que funciona a menudo como sistema de aumentación sobre GPS o alguno de los demás sistemas globales, permitiendo una mayor precisión.

QZSS ofrece distintos servicios, como son:

- ▶ Servicio de Posicionamiento, Navegación y Sincronización.
- ▶ Servicio de Aumentación por debajo del metro (**SLAS**, *Sub-meter Level Augmentation Service*).
- ▶ Servicio de Aumentación al Centímetro (**CLAS**, *Centimeter Level Augmentation Service*).
- ▶ Servicio de Avisos de Desastres y Crisis (DC Report).
- ▶ Verificación de posicionamiento.

### 3.5.5 Estructura de Señal

QZSS y GPS tienen el mayor grado de interoperabilidad de entre todos los sistemas de navegación. La estructura de señal, y por tanto las propiedades espectrales de ambos sistemas, es idéntica.

## 1. BANDAS DE FRECUENCIA

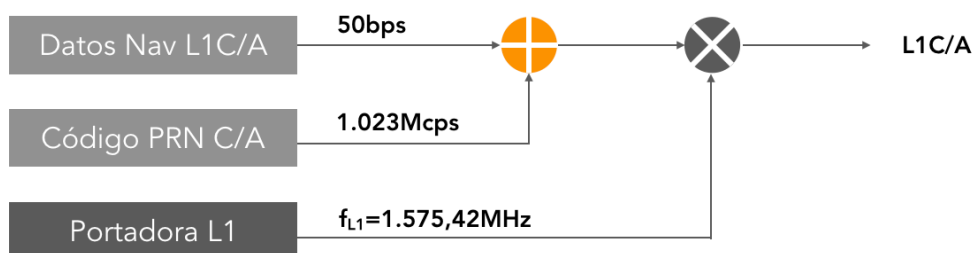
[28] Las bandas de frecuencia utilizadas por QZSS son idénticas a las utilizadas en GPS. Sin embargo, existe una excepción, y es que además de las señales en bandas L1, L2 y L5, el sistema QZSS cuenta con dos señales en banda E6. Las señales pertenecientes a esta banda no se estudiarán al no formar parte del servicio de posicionamiento y navegación.

### 1.1. Señales en Banda L1

Esta banda tiene su frecuencia portadora en 1575.42 MHz, que modula un código de adquisición L1C/A y L1C, muy similares a las homónimas de GPS.

#### 1.1.1. Señal L1C/A

Esta señal está modulada en BPSK. Los datos de navegación se generan a 50bps y se modulan con un XOR (suma en módulo 2) con el código PRN identificador de cada satélite. Esta señal se modula posteriormente por la portadora, para generar la modulación BPSK.

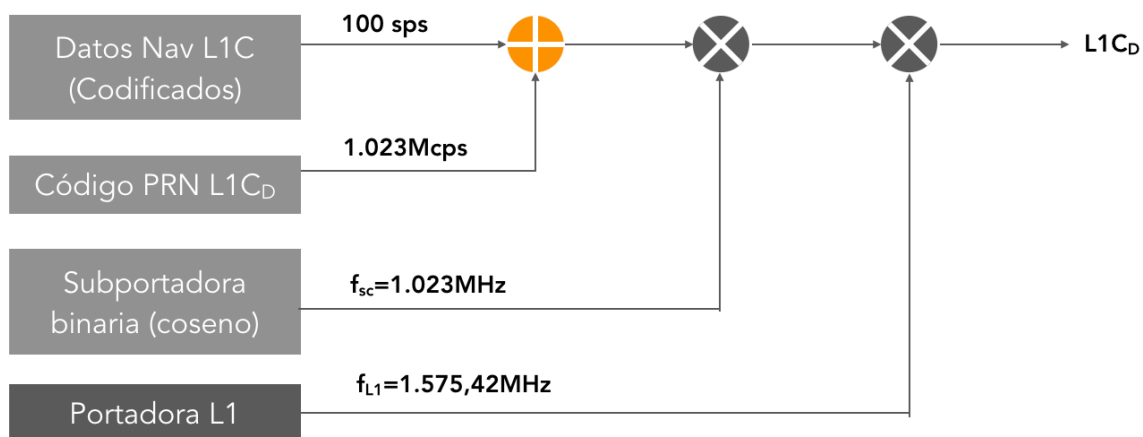


ESQUEMA DE GENERACIÓN DE L1C/A [28]

### 1.1.2. Señal L1C

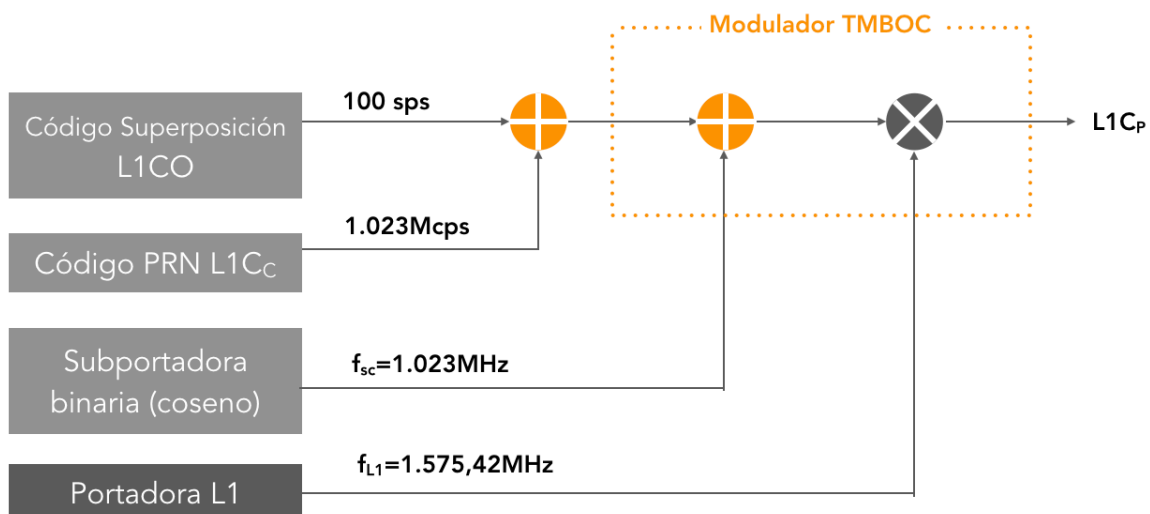
Esta señal consta de dos componentes: la señal de datos y la señal piloto.

La señal de datos contiene mensajes de navegación y está modulada utilizando una técnica de modulación BOC. Estas señales son generadas a partir de mensajes de navegación codificados, códigos PRN y subportadoras BOC en una operación de suma en módulo 2 y después modulándolas a la frecuencia de la portadora de L1. Aquí, la subportadora se modula con una onda cuadrada a 1.023MHz, iniciando con un 1. Estas señales moduladas a esta frecuencia de subportadora y un código PRN con una tasa de chips 1.023 Mcps son llamadas BOC(1,1).



ESQUEMA DE GENERACIÓN DE L1C<sub>D</sub> [28]

La señal piloto se genera de una forma parecida, pero sin datos de navegación, incluyendo en su lugar un código de superposición L1CO. Este código se suma en módulo 2 con el código PRN L1C<sub>C</sub> mediante un XOR y después modulándolos con un multiplexador temporal BOC (TMBOC) con la portadora y la subportadora de L1.



ESQUEMA DE GENERACIÓN DE L1C<sub>C</sub> [28]

Este multiplexador temporal utiliza una mezcla de un BOC(1,1) y un BOC(6,1). Este último BOC consiste en 6 ciclos de una onda cuadrada 1,023MHz. En el apartado de L1C en GPS se puede ver en detalle cómo funciona esta modulación y cómo la señal se modula a BOC(6,1) en los chips 0, 4, 6 y 29, quedando los otros 29 chips modulados por BOC(1,1).

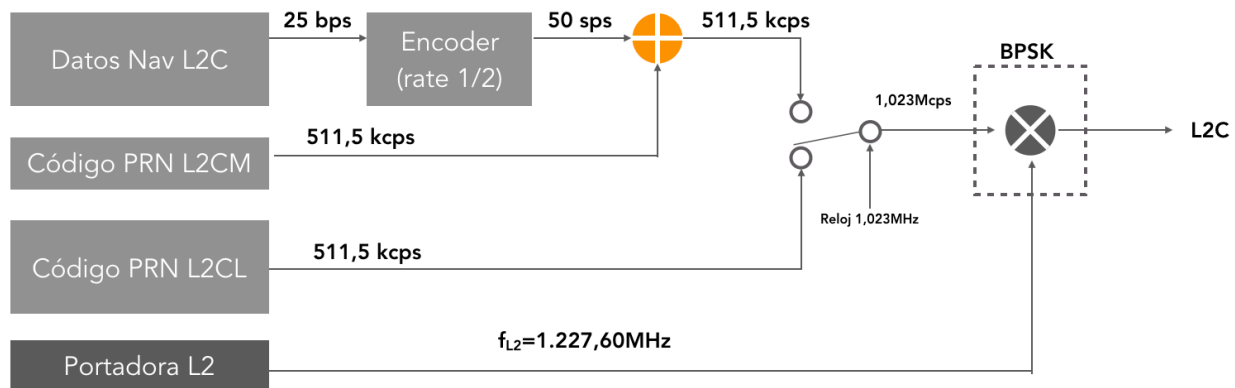
## 1.2. Señales en Banda L2

Esta banda tiene su frecuencia portadora en 1.227,60 MHz, y modula fundamentalmente la señal L2C

### 1.2.1. Señal L2C (L2CM+L2CL)

Muy similar a cómo se genera la señal homónima en GPS, estas dos señales son multiplexadas temporalmente con cada chip y después moduladas en BPSK para obtener la señal completa L2C. Contiene el código Civil moderado (L2CM) y el Civil Largo (CL).

Los mensajes de navegación L2C con una tasa de datos de 25bps son codificados con un codificador convolucional a una tasa de  $\frac{1}{2}$ , lo cual convierte la tasa de datos a 50bps. Estos datos se suman en módulo 2 con el código PRN de la señal L2CM a 511,5kcps. Posteriormente esa señal resultante de 511,5kcps se multiplexa en el tiempo con el código largo L2CL a 1,023MHz PRN, para posteriormente modularlo a la frecuencia de la portadora, obteniendo la señal BPSK resultante.



ESQUEMA DE GENERACIÓN DE L2C [28]

## 1.3. Señales en Banda L5

Esta banda tiene su frecuencia portadora en 1.176,45 MHz, y modula fundamentalmente la señal L5.

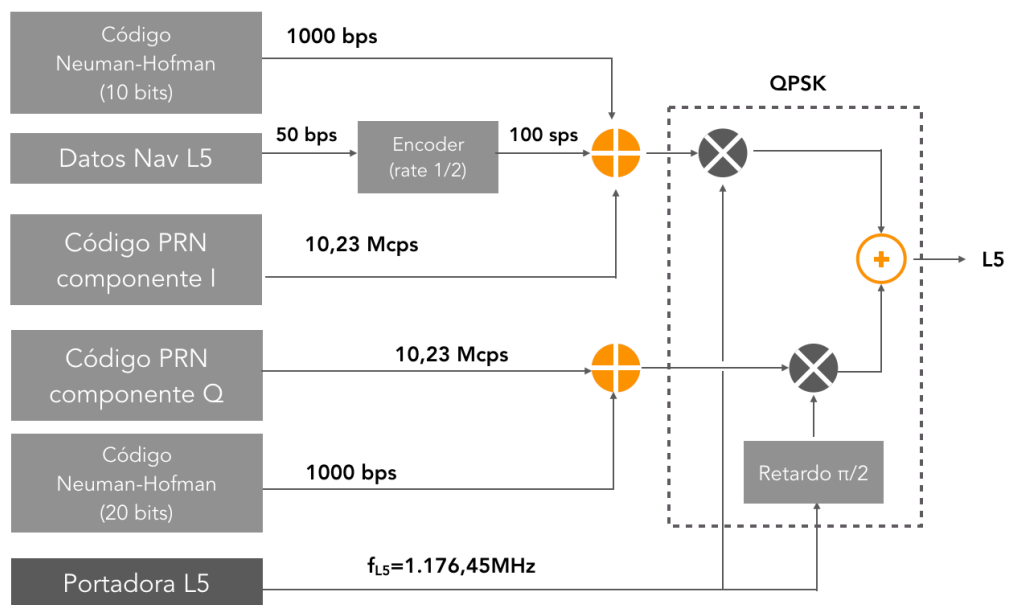
### 1.3.1. Señal L5

También es muy similar a su homónima de GPS. La señal L5 está compuesta por dos componentes en cuadratura, denominadas L5I y L5Q. Ambas señales están moduladas en QPSK.



Los datos de navegación de L5I se generan con una tasa de datos de 50bps y luego codificados convolucionalmente con una tasa 1/2, para dar tasa de 100 sps, que después son modulados mediante un OR exclusivo con códigos PRN I5 y un código de 10 bits Neuman-Hofman.

Por otro lado, la componente L5Q actúa como piloto, ya que no modula ningún mensaje de navegación, sino únicamente un código PRN Q5 que es modulado con un OR exclusivo con un código de 20 bits Neuman-Hofman a 100 bps. Las dos componentes son moduladas con un desfase de 90°, en cuadratura, se suman para conformar la señal L5.



ESQUEMA DE GENERACIÓN DE L5 [28]

### 1.3.2. Señal LEX

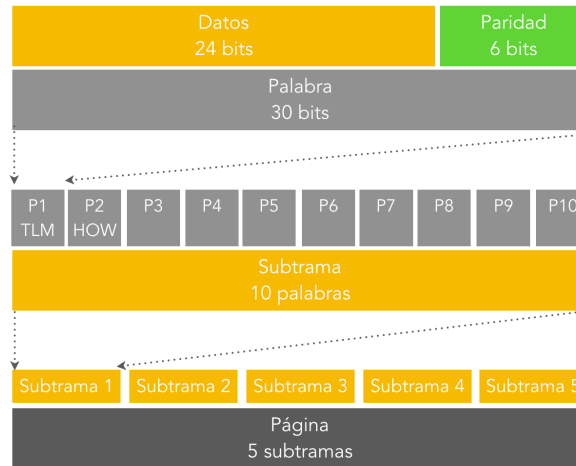
La señal está compuesta por diferentes mensajes experimentales. Cada uno está compuesto de 2.000 bits, de los cuales 49 son la cabecera, 1.695 bits son la sección de datos y un código Reed-Solomon de 256 bits. Al no ser una de las señales del servicio de posicionamiento no se entra más en detalle en ella.

## 2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN

[28] Las señales QZSS modulan cada una un mensaje de navegación diferente: L1C/A utiliza el mensaje **LNAV**, L1C **CNAV2** y L5 **CNAV**.

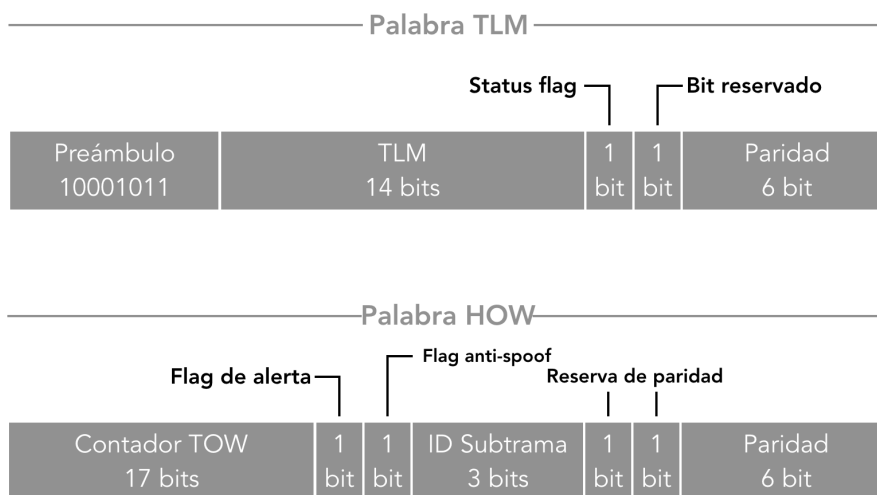
## 2.1. Mensaje LNAV

Transmitido por la señal L1C/A, el mensaje de navegación LNAV consta en cada trama o página de cinco subtramas compuestas cada una de ellas por 10 palabras. Estas palabras constan de 30 bits, de los cuales 6 se corresponden a los bits de paridad generados al aplicar un código hamming (32,26) a los 24 de datos.



**ESTRUCTURA MENSAJE LNAV [28]**

Todas las subtramas constan en su comienzo de una palabra con el preámbulo de sincronización (con valor 10001011) y el parámetro de telemetría, y de una segunda palabra con el conjunto de parámetros HOW ya visto en GPS.



**ESTRUCTURA PALABRAS TLM Y HOW LNAV [28]**

La información respectiva a los parámetros de corrección de reloj del satélite es transportada sobre la subtrama 1, mientras sus efemérides se reparten entre las subtramas 2 y 3. En el caso de las subtramas 4 y 5 encontramos distinta información secundaria, tal como el almanaque de la constelación, los modelos ionosféricos (tanto de la región nipona como del total del territorio cubierto por QZSS), los parámetros relativos a UTC o mensajes especiales. Para la transferencia de esta información se recurre a dividirla entre distintas páginas, identificando el tipo de

parámetros que se está aportando en cada una mediante un identificador llamado *Data ID* y un identificador de satélites *SV ID*. La combinación de estos dos parámetros permite clasificar la información que se recibe en cada trama. Actualmente se utilizan las siguientes codificaciones:

Data ID	SV ID	Descripción
3	0	Modo test *
	1-9	Almanaque QZS
	51	Almanaque de estado QZS
	55	Mensajes especiales
	56	Parámetros ionosféricos (área ampliada) + UTC
	61	Parámetros ionosféricos (área Japón) + UTC

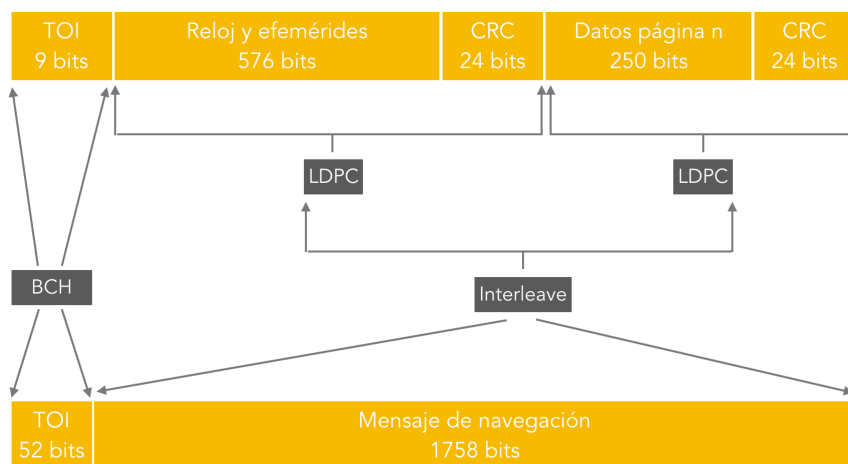
\*El identificador 0 para el número de satélite indica que el mensaje está en modo de pruebas y que por lo tanto el usuario debe descartar su información.

## 2.2.Mensaje CNAV2

El mensaje de navegación CNAV2 es utilizado por la señal L1C, y está compuesto por tres subtramas. La subtrama 1 representa el *Time Of Interval* (TOI) de cada periodo de dos horas en la transmisión de la señal. La subtrama 2, de 576 bits más 24 de CRC, transmite los parámetros de corrección de reloj y de efemérides, mientras que la subtrama 3, de 250 bits más 24 de CRC, usa el mismo método descrito en LNAV de paginación e identificación, en este caso mediante ID de página y de PRN, para dividir la información entre distintos mensajes.

Nº Página	Descripción
0	Modo test
1	Parámetros UTC + ionosféricos (área ampliada)
2	GGTO + EOP
3	Almanaque QZS reducido
4	Almanaque QZS
6	Mensaje de texto
...	...
61	Parámetros UTC + ionosféricos (área Japón)

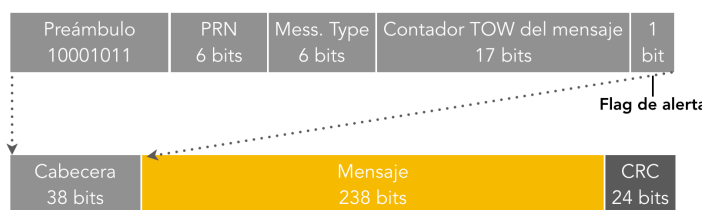
Las distintas subtramas del mensaje CNAV2 están sometidas a diferentes codificaciones para la protección contra errores. En el caso de la subtrama 1 se le aplica una codificación BCH(51,8), mientras que las subtramas 2 y 3 están codificadas mediante LDPC. Cabe destacar que estas dos subtramas resultantes se combinan en una sola mediante el método de *interleave*. Con ello, finalmente la trama tiene una longitud de 1.800 bits.



**ESQUEMA GENERACIÓN MENSAJE CNAV2 [28]**

### 2.3.Mensaje CNAV

Tanto la señal L2C como L5 transmiten información a través del mensaje de navegación CNAV. Este mensaje consta únicamente de una trama de 300 bits transmitidos a una velocidad de 25 bps y 50 bps en L2 y L5 respectivamente. Este mensaje está encabezado por un preámbulo de sincronización de 8 bits, identificadores de PRN y de tipo mensaje para la clasificación de la información transportada, valor de TOW y un bit de alerta.



**ESTRUCTURA TRAMA CNAV [28]**

A continuación, la trama está formada por los datos del mensaje, con una longitud de 238 bits finalizados con 24 bits más de CRC. Como en mensajes anteriores, la información que contienen los datos del mensaje está especificada por los parámetros PRN y *Message Type ID*. Actualmente se utilizan los siguientes códigos.

ID Mensaje	Descripción	ID Mensaje	Descripción
0	Modo test	31	Reloj + almanaque QZS reducido (Sat <sub>i</sub> )
10	Efemérides 1	32	Reloj + EOP (Sat <sub>i</sub> )
11	Efemérides 2	33	Reloj + parámetros UTC (Sat <sub>i</sub> )
12	Almanaque QZS reducido	35	Reloj + GGTO (Sat <sub>i</sub> )
15	Mensaje de texto	37	Reloj + almanaque QZS (Sat <sub>i</sub> )
30	Reloj + parámetros ionosféricos (área ampliada) + ISC (Sat <sub>i</sub> )	61	Reloj + parámetros ionosféricos (área Japón) + ISC (Sat <sub>i</sub> )

## 3.6 IRNSS



El Sistema Regional de Navegación por Satélite de la India rebautizado como **NavIC (Navigation Indian Constellation)**, con el lanzamiento de uno de los satélites en abril de 2016, es un sistema GNSS regional, independiente y autónomo desarrollado y operado por la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO). La guerra de Kargil entre India y Pakistán en 1999 promovió en parte la creación de este sistema indio independiente al no poder confiar en el GPS en conflictos hostiles como el mencionado. Se trata del sistema de posicionamiento desarrollado por la India. Al igual que QZSS, no es un sistema global, sino únicamente regional, enfocado en esa región del planeta.

### 3.6.1 Características Generales

[32] Actualmente el sistema cuenta con una constelación de siete satélites que otorgan un área de servicio rectangular que además de cubrir el territorio indio, cubre 1.500 kilómetros alrededor del país con planes de expansión en un futuro añadiendo otros cuatro satélites a la constelación. El NavIC provee a sus usuarios de dos niveles de servicios; el posicionamiento a tiempo real estándar (SPS), abierto y de uso civil; y otro restrictivo y encriptado restringido a los usuarios autorizados, y también de uso militar.

Algunas aplicaciones del IRNSS son:

- Navegación terrestre, aérea y marina.
- Gestión de desastres.
- Seguimiento de vehículos y gestión de flotas.
- Integración con teléfonos móviles.
- Temporización precisa.
- Captura de datos de cartografía y geodesia.
- Apoyo a senderistas y viajeros.
- Navegación visual y de voz para la conducción.

Además este GNSS tiene la particularidad de una interfaz de mensajería, una característica que permite al centro de control mandar mensajes broadcast de alerta a un área geográfica específica para avisar de alto oleaje, ciclón y tsunamis.

### 3.6.2 Segmento Espacial

Tres de los siete satélites que componen la constelación del IRNSS, están localizados en órbita geoestacionaria mientras que los cuatro restantes están en una órbita geosíncrona con la inclinación requerida y cruces ecuatoriales en dos planos diferentes.

Todos los satélites están configurados con el bus I-1K (INSAT-1000), también desarrollado por ISRO, para ser compatibles con el vehículo de lanzamiento PSLV (*Polar Satellite Launch Vehicle*). Las consideraciones tomadas en el diseño de la constelación fueron mayoritariamente: minimizar la DOP (*Dilution of Precision*) máxima, minimizar el número de satélites y la visualización continua con las estaciones de control mediante ranuras orbitales.

Los satélites operan en la banda L5 y S. Tienen un reloj atómico de rubidio que es parte de la carga útil de navegación, y la carga útil de alcance consiste en un transpondedor en la banda C que facilita una determinación precisa del rango de alcance del satélite.

Bloque Satélites	IRNSS-1A	IRNSS-1B	IRNSS-1C	IRNSS-1D	IRNSS-1E	IRNSS-1F	IRNSS-1G	IRNSS-1H	IRNSS-1I
Estado	Fuera Servicio	En Servicio	En Servicio	En Servicio	En Servicio	En Servicio	En Servicio	<b>Lanzamiento Fallido.</b> La cofia no se separó y el satélite no llegó a la órbita deseada	En Servicio
Tipo Órbita	Geosíncrona	Geosíncrona	Geoestacionaria	Geosíncrona	Geosíncrona	Geoestacionaria	Geoestacionaria		Geosíncrona
Vida Útil	11 años	11 años	9,5 años	11 años	11 años	9,5 años	9,5 años		11 años
Fecha de Lanz	Jul 01, 2013	Abr 04, 2014	Oct 16, 2014	Mar 28, 2015	Ene 20, 2016	Mar 10, 2016	Abr 28, 2016	Ago 31, 2017	Abr 12, 2018

### 3.6.3 Segmento Control

[34] Este segmento del IRNSS está compuesto por:

- ▶ **Centro de control de Naves Espaciales (SCC).**
- ▶ **Centro de navegación (INC):** establecida en Byalalu, lleva a cabo operaciones remotas y colección de datos con todas las estaciones de tierra.
- ▶ **Estaciones de TT&C y de enlace ascendente (IRTTTC).**
- ▶ **Estaciones de monitorización de rango e integridad (IRIMS):** actualmente son 14 las IRIMS operativas que ofrecen soporte a las operaciones del sistema IRNSS.
- ▶ **Centro de control de reloj (IRNWT):** provee del reloj al sistema con una precisión de 2ns con respecto al UTC.
- ▶ **Estaciones de rango de CDMA (IRCDR):** son cuatro las estaciones que llevan a cabo el rango CDMA.
- ▶ **Estación de rango de láser (ILRS):** opera con la ayuda de la red global de estaciones SLR (*Satellite Laser Ranging*)
- ▶ **Red de comunicación de datos (IRDCN):** establece enlaces terrestres y VSAT entre las estaciones de tierra.

El SCC y el INC son el núcleo del segmento de control y los encargados de estimar y predecir la posición de los satélites, de calcular las correcciones ionosféricas, de integridad y de reloj, así como de ejecutar el software de navegación.

### 3.6.4 Segmento Usuario

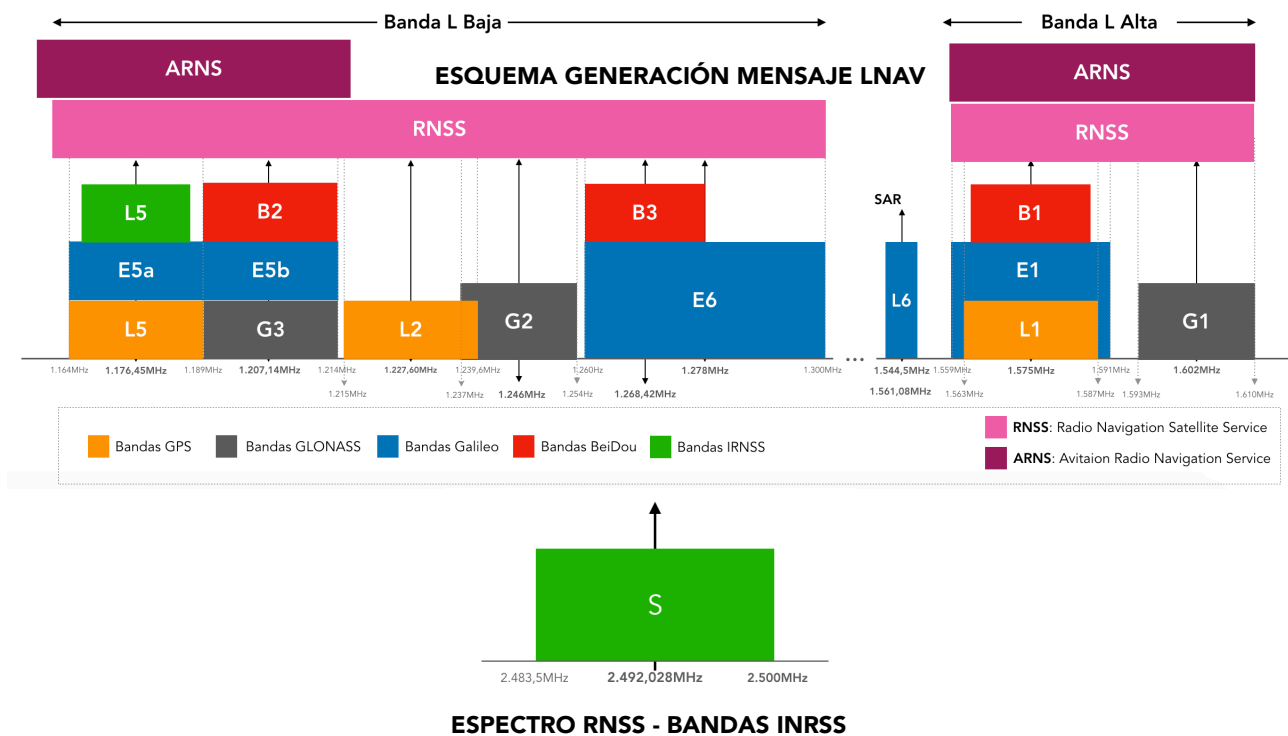
Los receptores y antenas de IRNSS que componen este segmento están especialmente diseñados para recibir las señales de este sistema. Estos receptores son bien de frecuencia dual o de frecuencia única, pudiendo recibir de las frecuencias en las que operan los satélites, L5 y S, ambas o solamente una ellas respectivamente. Además tienen la capacidad de recibir las correcciones ionosféricas.

Los siete satélites del sistema IRNSS son rastreados continuamente por los receptores otorgando el servicio de navegación ininterrumpidamente. Además, están diseñados para recibir señales multi-constelación incluyendo GPS, GLONASS y Galileo. Está previsto difundir la diferencia

horaria entre la hora del IRNSS y la hora de las otras constelaciones para que los usuarios puedan aprovechar todas las señales que tienen a su disposición.

### 3.6.5 Estructura de Señal

[34] Las señales utilizadas por el sistema IRNSS consisten en dos servicios: **SPS** (*Standard Positioning Service*) y **RS** (*Restricted Service*) ambos transmitidos en la banda L5 (1.164,45 – 1.188,45 MHz) y en la banda S (2.483,5-2.500 MHz)



## 1. BANDAS DE FRECUENCIA

### 1.1. Señales en Banda L5 y en Band S

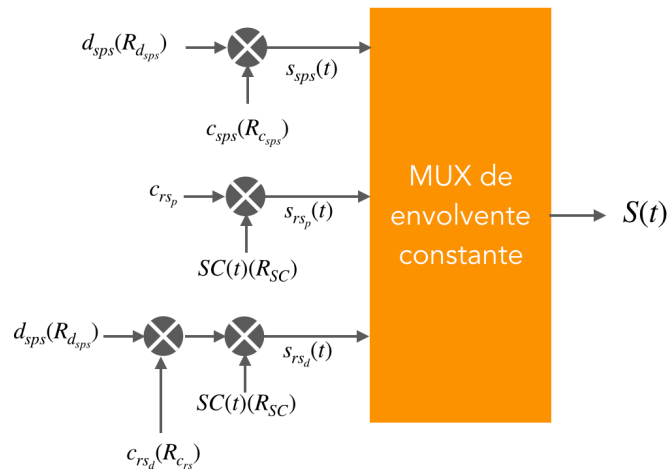
[34] IRNSS transmite la misma señal tanto por la banda L5 como por la banda S, y dicha señal unifica tanto el servicio **SPS** como el **RS**, separados mediante tres componentes distintas:

- ▶ La componente de datos SPS se encuentra modulada por una BPSK(1). Su mensaje de navegación, con una velocidad de 50 símbolos por segundo, se suma en módulo 2 con un código PRN de 1.023 chips.
- ▶ El servicio restringido RS consta de dos componentes, una **piloto** y una de **datos**, que están sometidas a una modulación BOC(5,2), y que en el caso de la de datos se combina de igual modo que la SPS con un código de rango equivalente.

A estas tres señales se les añade una cuarta,  $I(t)$ , que igual que hemos visto anteriormente con el método *Interplex*, sirve para conseguir que la señal sea de envolvente constante. Finalmente nos queda una expresión tal que:

$$s(t) = \frac{1}{3}[\sqrt{2}(s_{sps}(t) + s_{rsp}(t)) + j(2s_{srd}(t) - I(t))]$$

Pudiendo descomponer la generación de la señal en el siguiente diagrama:



**ESQUEMA MODULACIÓN S(T) [34]**

Siendo:

- ▶  $R_{d_{sps}}$  y  $R_{d_{rs}}$  la tasa de datos del servicio SPS y RS, respectivamente.
- ▶  $R_{c_{sps}}$  y  $R_{c_{rs}}$  la tasa de chip del código PRN en SPS y RS, respectivamente.
- ▶  $R_{sc}$  la frecuencia de la subportadora

### 1.1.1. Códigos PRN

Como hemos comentado y se ha visto en otros sistemas, IRNSS hace uso de códigos PRN a fin de poder utilizar multiplexación CDMA para las señales de los distintos satélites. Para la generación de los PRN asociados a la señal pública SPS dispone de códigos de tipo **Gold** como los vistos anteriormente en este trabajo, tanto en banda L5 como S. Son seleccionados basándose en las propiedades de autocorrelación y correlación cruzada y son generados usando registros de desplazamiento LFSR. En ambos casos se trata de códigos de longitud de código primario 1ms y 1.023 chips

Para la generación de los códigos se hace uso de dos registros LFSR definidos mediante los siguientes polinomios G1 y G2:

$$\mathbf{G1: } X^{10} + X^3 + 1$$

$$\mathbf{G2: } X^{10} + X^9 + X^8 + X^6 + X^3 + X^2 + 1$$

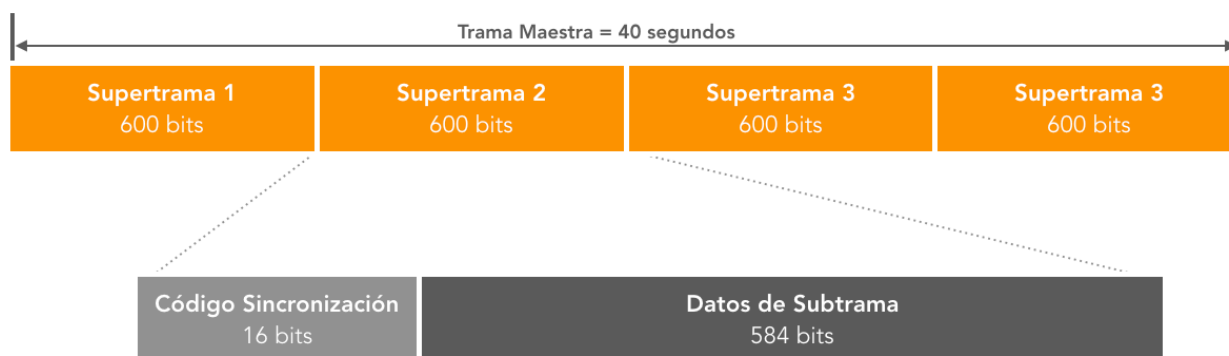
Estos polinomios son similares a los utilizados en la señal C/A de GPS, y se generan usando MLFSR (*Maximum Length Feedback Shift Registers*) de 10 bits. Mientras que el registro G1 se inicializa a 1, el estado inicial de G2 es el que define la fase del PRN y permite generar códigos distintos para cada satélite. Así, combinando ambos polinomios con una operación XOR, se obtienen códigos de 1.023 chips de longitud.



## 2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN

### 2.1. Servicio SPS

[34] El mensaje de navegación de las señales SPS se basa en una trama maestra formada a su vez por cuatro subtramas de 600 bits cada una y transmitidas a una velocidad de 60 símbolos por segundo.

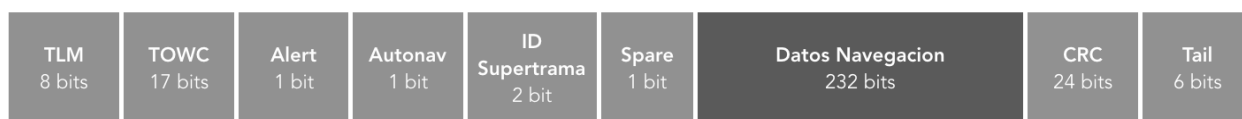


ESTRUCTURA MENSAJE SPS [34]

Todas las subtramas se encabezan con la misma información, esto es:

- ▶ **TLM:** telemetría, bits reservados para un uso futuro.
- ▶ **TOWC** (*Time of Week Count*)
- ▶ **Flag de Alerta:** informa a los usuarios de que la utilización de los datos de ese satélite en particular correrá por cuenta y riesgo de los usuarios.
- ▶ **Autonav:** bits de aviso de que el satélite se mantiene en modo *autonav*, esto es, no más de siete días sin actualización terrestre de sus datos de efemérides.
- ▶ **ID de subtrama**
- ▶ **Bit de reserva**
- ▶ **Datos de navegación**
- ▶ **CRC:** para la comprobación de errores.
- ▶ **Bits de cola (Tail):** 6 bits a cero para indicar el fin de trama a la FEC

La información transmitida en los datos de navegación se puede dividir entre parámetros primarios y secundarios. Los parámetros primarios engloban las efemérides del satélite, parámetros de corrección de reloj, flags de estado del satélite, URAI y el retardo de grupo. Estos parámetros se transmiten sobre las subtramas 1 y 2.



ESTRUCTURA SUBTRAMAS 1 Y 2 [34]

Por otro lado, los parámetros secundarios recopilan el almanaque de la constelación, los parámetros del modelo ionosférico y de *offsets* de tiempo con respecto a otros sistemas,

coeficientes de retardo ionosférico y EOP y los mensajes de texto para el servicio de emergencias, todo ello a través de los datos de navegación de las subtramas 3 y 4. Esta información, de mayor longitud, se divide entre tramas maestras gracias al uso de identificación de mensajes, permitiendo que los datos transmitidos cambien entre trama y trama. Es por ello que el esquema de parámetros de las subtramas 3 y 4 añade dos parámetros más, el Message ID y el PRN ID, que identifica el satélite al que corresponden los datos transmitidos.

TLM 8 bits	TOWC 17 bits	Alert 1 bit	Autonav 1 bit	ID Supertrama 2 bit	Spare 1 bit	ID Mensaje 6 bits	Datos Navegacion 232 bits	ID PRN 6 bits	CRC 24 bits	Tail 6 bits
---------------	-----------------	----------------	------------------	------------------------	----------------	----------------------	------------------------------	------------------	----------------	----------------

#### ESTRUCTURA SUBTRAMAS 3 Y 4 <sup>[34]</sup>

Si bien el campo Message ID, de 6 bits, da lugar a 63 mensajes distintos, por el momento se trabaja con siete tipos de mensaje, reservando el resto para posibles usos futuros.

Parámetros	ID Mensaje	Parámetros	ID Mensaje
Parámetros Ionosféricos	5	Mensaje de Texto	18
Almanaque	7	Parámetros de tiempo (GNSS)	26
Parámetros de tiempo (GPS)	9	Mensaje Nulo	0
Coeficientes EOP e Ionosféricos	11	Reservados para el futuro	1-4, 6, 8, 10, 12, 13, 15-17, 19-25, 27-63
Correcciones Diferenciales	14		

## 4. Conclusiones

El objetivo de este trabajo era analizar en detalle la arquitectura de los distintos GNSS y su estructura de señal, haciendo un análisis pormenorizado de los distintos documentos de Control de Interfaz de las distintas organizaciones que los gestionan, para documentar todas las señales transmitidas.

Con ello, la primera conclusión a la que podemos llegar es que todos son conscientes de la importancia de este tipo de sistemas y de la dependencia que existe actualmente con GPS. Aunque Estados Unidos ha asegurado en más de una ocasión la integridad de GPS en su servicio abierto, todas las potencias mundiales han decidido tener su propio sistema y no depender de GPS. Sin embargo, aunque podríamos decir que son iniciativas que surgen en un primer momento de la desconfianza, existen sinergias en el uso de ambas y la integración y compatibilidad de los sistemas entre sí permite mejorar la precisión de todos ellos, por lo que finalmente también se benefician unos de otros.

Otro de los aspectos a recalcar es que **CDMA** se alza como método de multiplexación de acceso al medio predilecto. Mientras inicialmente GLONASS mantenía un planteamiento opuesto a GPS, apostando por la multiplexación en frecuencia, posteriormente la tendencia de los nuevos sistemas y el rendimiento de ambos han dado la razón a GPS. Como hemos podido ver, el espectro de RNSS donde se localizan estas señales se encuentra muy saturado dado que es compartido por todas las señales, por tanto hacer un uso eficiente de él se hace crítico. Los códigos PRN permiten ensanchar la señal, lo cual tiene efectos positivos de cara a la robustez frente a efectos adversos como el retardo ionosférico o el multicamino, de manera que en CDMA el mismo código de ensanchamiento, por sus propiedades de máxima autocorrelación, permite identificar al satélite que la emite, cumpliendo una doble función.

Otro de los aspectos técnicamente más relevantes de los últimos tiempos es el de la **sustitución de las modulaciones BPSK por BOC**. Estas presentan principalmente dos ventajas:

- **Permiten un ancho de banda efectivo mayor**, para una misma frecuencia de chip, ya que sustituimos el espectro en sinc con un lóbulo central por un espectro con dos lóbulos, y mayor ancho de banda. Esto, como hemos comentado, tiene ventajas sobre la sincronización y los errores producidos por el multicamino y el retardo ionosférico, lo que permite obtener mayor precisión.
- **Permite obtener cierta flexibilidad**, al poder ubicar la energía de señal según nos convenga, ya que la forma de onda dependerá de los parámetros de frecuencia de portadora y de chip que elijamos para las subportadoras binarias a utilizar.

Parece que la evolución tecnológica avanza cada vez más hacia el uso de **componentes piloto**, donde no se transmite ningún mensaje de datos. Estas señales facilitan la integración coherente, incluso durante tiempos de integración muy largos, lo que permite aumentar la sensibilidad en los receptores. Son componentes que utilizan *tiered codes*, combinando un código primario con uno secundario, de manera que el primario asegure una adquisición rápida y el secundario permita aumentar la sensibilidad. Por tanto, su principal utilidad es la de agilizar la adquisición incluso en entornos degradados.

Por último, las bandas tradicionales L1 y L2 se mantienen como bandas con mayor concurrencia de señales, pero empiezan a plantearse nuevas bandas adyacentes y menos saturadas como es el caso de la banda L5, de GPS, o la banda E6 de Galileo.

## 5. Referencias y Bibliografía

1. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_Space\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Space_Segment)
2. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_Ground\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Ground_Segment)
3. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_User\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_User_Segment)
4. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan)
5. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>
6. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800E.pdf>
7. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705E.pdf>
8. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS\\_Space\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Space_Segment)
9. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS\\_Ground\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Ground_Segment)
10. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS\\_User\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_User_Segment)
11. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan)
12. [https://www.unavco.org/help/glossary/docs/ICD\\_GLONASS\\_4.0\\_\(1998\)\\_en.pdf](https://www.unavco.org/help/glossary/docs/ICD_GLONASS_4.0_(1998)_en.pdf)
13. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf>
14. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_Space\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Space_Segment)
15. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_Ground\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment)
16. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_User\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_User_Segment)
17. [https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo\\_documents/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf](https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf)
18. [https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo\\_documents/Galileo-SAR-SDD.pdf](https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-SAR-SDD.pdf)
19. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan)
20. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more (Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, Elmar Wasle)
21. Development of the BeiDou Navigation Satellite System (Version 3.0) (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201812/P020190523251292110537.pdf>)
22. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 2.0) (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201812/P020181227424526837905.pdf>)
23. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0) (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201902/P020190227601370045731.pdf>)
24. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B3I (Version 1.0) (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525869304359.pdf>)
25. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0) (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525871869457.pdf>)
26. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2a (Version 1.0) (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525870555377.pdf>)
27. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/QZSS>
28. IS-QZSS-PNT-003 (<http://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-pnt-003.pdf?t=1560699932636>)
29. <https://www.isro.gov.in/spacecraft/list-of-navigation-satellites>
30. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/irnss>

31. <https://www.isro.gov.in/irnss-programme>
32. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC>
33. <https://www.isro.gov.in/spacecraft/list-of-navigation-satellites>
34. IRNSS SIS ICD FOR STANDARD POSITIONING SERVICE, ISRO SATELLITE CENTRE INDIAN SPACE RESEARCH ORGANIZATION, 2017 ([https://www.isro.gov.in/sites/default/files/irnss\\_sps\\_icd\\_version1.1-2017.pdf](https://www.isro.gov.in/sites/default/files/irnss_sps_icd_version1.1-2017.pdf))
35. SIGNAL-IN-SPACE ICD FOR INCOIS MESSAGES via NavIC MESSAGING SERVICE, U.R.RAO SATELLITE CENTRE INDIAN SPACE RESEARCH ORGANIZATION, 2019 ([https://www.isro.gov.in/sites/default/files/article-files/irnss-programme/sis\\_icd\\_irnss1a\\_messaging\\_app\\_developer\\_29032019.pdf](https://www.isro.gov.in/sites/default/files/article-files/irnss-programme/sis_icd_irnss1a_messaging_app_developer_29032019.pdf))
36. <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1874>
37. <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2016/pf-16/5.pdf>

## 5. Glosario de Acrónimos

<b>AltBOC</b>	<i>Alternative Binary Offset Carrier</i>
<b>ASBC</b>	<i>Advanced Space Business Corporation</i>
<b>ARNS</b>	<i>Aviation Radio Navigation Services</i>
<b>BOC</b>	<i>Binary Offset Carrier</i>
<b>CASM</b>	<i>Coherent Adaptative Subcarrier Modulation</i>
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<b>CNAV</b>	<i>Civil Navigation</i>
<b>CS</b>	<i>Commercial Service</i>
<b>CSNO</b>	<i>Center of China Satellite Navigation Office</i>
<b>DASS</b>	<i>Distress Alerting System</i>
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
<b>FOC</b>	<i>Final Operation Capability</i>
<b>GLONASS</b>	<i>Glogal Navigation Satellite System</i>
<b>GIOVE</b>	<i>Galileo In-Orbit Validation Element</i>
<b>GCS</b>	<i>Ground Control Segment</i>
<b>GMS</b>	<i>Ground Mission Segment</i>
<b>GNSS</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>GSTB</b>	<i>Galileo System Test Bed</i>
<b>HEO</b>	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
<b>IGSO</b>	<i>Inclined Geosynchronous Satellite Orbit</i>
<b>INRSS</b>	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
<b>IOV</b>	<i>In Orbit Validation</i>
<b>IS</b>	<i>Interface Specification</i>
<b>ISRO</b>	<i>Indian Space Research Organisation</i>
<b>JAXA</b>	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
<b>LEOSAR</b>	<i>Low-altitude Earth Orbir Search and Rescue</i>

<b>LFSR</b>	<i>Linear Feedback Shift Register</i>
<b>LORAN</b>	<i>LONg RANge Navigation</i>
<b>MEO</b>	<i>Medium Earth Orbit</i>
<b>MEOLUTs</b>	<i>European MEO Local User Terminal</i>
<b>MEOSAR</b>	<i>Medium Earth Orbit Search and Rescue system</i>
<b>MCC</b>	<i>Motor Control Center</i>
<b>MCS</b>	<i>Master Control Station</i>
<b>MNAV</b>	<i>Militar Navigation</i>
<b>MS</b>	<i>Monitor Stations</i>
<b>MSC</b>	<i>Master Station Controller</i>
<b>NASA</b>	<i>National Aeronautic and Space Administration</i>
<b>NavIC</b>	<i>Navigation Indian Constellation</i>
<b>NAVSEG</b>	<i>Navigation Satellite Executive Committee</i>
<b>NAVSTAR-GPS</b>	<i>Navigation System Timing and Ranging-Global Positioning System</i>
<b>OCS</b>	<i>Operational Control Segment</i>
<b>OS</b>	<i>Open Service</i>
<b>PRN</b>	<i>PseudoRandom Noise</i>
<b>PRS</b>	<i>Public Regulated Service</i>
<b>PSLV</b>	<i>Polar Satellite Launch Vehicle</i>
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
<b>QZSS</b>	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
<b>RLM</b>	<i>Return Link Message</i>
<b>RLS</b>	<i>Return Link Service</i>
<b>RNSS</b>	<i>Radionavigation-Satellite Service</i>
<b>SAR</b>	<i>Search and Rescue</i>
<b>SBAS</b>	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
<b>SGSC</b>	<i>SAR Galileo Service Center</i>
<b>SOL</b>	<i>Safety of Life</i>



<b>SPS</b>	<i>Standard Positioning Service</i>
<b>TMBOC</b>	<i>Time Multiplexed BOC</i>
<b>TS/US</b>	<i>Time Synchronization/Upload Stations</i>
<b>UHF</b>	<i>Ultra High Frequency</i>
<b>ULS</b>	<i>Uplink Stations</i>
<b>WAAS</b>	<i>Wide Area Augmentation System</i>