

Monitorización de Señales de Satélites LEO mediante un Receptor Definido por Software (SDR)

Izuel Ascaso
IEEC-CERES

Universitat Autònoma de Barcelona
Barcelona, Spain
izuel.ascaso@autonoma.cat

Gonzalo Seco-Granados
IEEC-CERES

Universitat Autònoma de Barcelona
Barcelona, Spain
gonzalo.seco@uab.cat

José A. López-Salcedo
IEEC-CERES

Universitat Autònoma de Barcelona
Barcelona, Spain
jose.salcedo@uab.cat

Resumen—En este artículo, exploramos la viabilidad de utilizar señales de satélites de órbita baja (LEO) con el objetivo de obtener datos que nos permitan la navegación y sincronización (PNT) mediante un receptor definido por software (SDR). La creciente constelación de satélites LEO ofrece una oportunidad única para mejorar las soluciones de PNT debido a su proximidad a la Tierra, lo que resulta en una señal más fuerte y menores tiempos de transmisión en comparación con los satélites de órbita media (MEO), los utilizados tradicionalmente para estos propósitos. Al diseñar el receptor nos hemos centrado en el enfoque oportunista, es decir, el receptor que hemos desarrollado se enfoca en procesar las señales de satélites LEO para extraer observables que permitan calcular la posición del usuario, independientemente del propósito principal de dichas señales. Tras examinar las características de las señales LEO, incluyendo su tipo de modulación y su posible efecto Doppler, siendo esta última característica la que permite realizar los cálculos de posicionamiento; presentamos una arquitectura diseñada para la estimación y corrección de este efecto Doppler, el cálculo del retardo temporal y la estimación de la SNR (Relación señal/ruido), esencial para determinar la precisión en los cálculos de la localización y la sincronización. Los resultados experimentales demuestran el funcionamiento de nuestro receptor en la adquisición y seguimiento de señales LEO, lo cual es una prueba de su potencial para mejorar los sistemas de navegación y sincronización globales.

Index Terms—GNSS, satélite LEO, PNT, procesado de señal, receptor definido por software, Doppler, estimación de SNR

I. INTRODUCCIÓN

En el paradigma actual GNSS (Sistemas globales de navegación por satélite) es común el uso de satélites de órbita media (MEO) para la obtención de soluciones PNT (sincronización, posicionamiento y navegación). Sin embargo, en los recientes años, dada la creciente población de satélites de órbita baja (LEO), se han puesto de manifiesto las varias ventajas del uso de este último tipo de satélites para propósitos de navegación.

Entre las varias ventajas que proporcionan los satélites LEO se encuentran una mejor calidad de señal en recepción, un menor coste de diseño y una mayor velocidad orbital, lo que permite el uso del efecto Doppler para posicionamiento. Además, puesto que el número de satélites LEO en órbita aumenta cada año, la necesidad de utilizarlos para proveer soluciones PNT incrementa a medida que pasa el tiempo. Esto revolucionará y de hecho, ya está revolucionando el paradigma GNSS actual.

Mientras que algunos enfoques PNT basados en LEO requieren adaptar los protocolos para apoyar las capacidades PNT, otros enfoques explotan las constelaciones LEO para

PNT de manera oportunista. Los primeros enfoques permiten arquitecturas de receptores y algoritmos de navegación más simples. Sin embargo, requieren cambios significativos en la infraestructura existente, el coste de la cual puede ser que las empresas privadas, no paguen. En este caso, explotar las señales de banda ancha por satélite LEO de manera oportunista para la navegación se convierte en el enfoque más atractivo. [1, cap. 43]- [2]

El enfoque oportunista consiste en aprovecharse de las señales de satélites LEO que se puedan estar transmitiendo, para la obtención de observables que nos permitan calcular la posición del usuario, ajenos al uso principal que se le esté dando a esa señal. [2]

En este enfoque es en el que nos hemos centrado para desarrollar el siguiente receptor, que se encarga de monitorizar señales de satélites LEO para obtener los observables necesarios para los cálculos de navegación.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS SEÑALES DE SATÉLITES LEO

Para empezar, en este apartado se presentará el modelo de las señales LEO y se introducirán las constelaciones utilizadas por el receptor.

A. Modelo y parámetros de la señal

Las señales LEO con las que tratará el receptor son señales que utilizan modulaciones digitales lineales. El modelo de la señal que llega al receptor una vez muestreada y convertida a banda base es el siguiente [3]:

$$r(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)p\left(\left(1 + \frac{\nu}{F_c}\right)n - kT - \tau\right) e^{j(2\pi\nu n + \theta)} + w(n) \quad (1)$$

donde $x(k)$ son los símbolos que se quieren transmitir, $p(n)$ es el pulso usado para modular los símbolos, T es el periodo de símbolo, τ es el retardo debido a la distancia entre el satélite y el receptor, θ es la fase residual debida a la distancia y el desfase entre la portadora y el receptor, y $w(n)$ el ruido añadido a la señal.

También consideramos el efecto producido por el cambio de posición del satélite relativo al receptor, que se traduce al efecto Doppler aplicado a la señal. Dicho efecto, representado por el factor ν en la ecuación 1, añade un retardo variable en la señal:

$$\tau_\nu = \frac{\nu}{F_c}n \quad (2)$$

Y también añade una fase variable en la señal, es decir, añade una componente frecuencial adicional a la señal, representada en la ecuación 1 por el término:

$$e^{j(2\pi\nu n)} \quad (3)$$

Debido a esto, a el factor ν se le denomina frecuencia Doppler. El factor ν lo calculamos de la siguiente manera [3]:

$$\nu = \frac{s_t}{c} F_c \quad (4)$$

donde c es la velocidad de la luz, F_c la frecuencia de la portadora y s_t es la velocidad radial a lo largo de la línea de visión entre el satélite y el receptor. Normalmente, s_t no es constante en el tiempo, por lo tanto, ν tampoco lo será y los efectos producidos en consecuencia, como el retardo y la frecuencia Doppler, tampoco lo serán. En realidad la ecuación 1 la podríamos reescribir como:

$$r(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)p \left(\left(1 + \frac{\nu(n)}{F_c}\right)n - kT - \tau \right) e^{j(2\pi\nu(n)n+\theta)} + w(n) \quad (5)$$

Es la frecuencia Doppler la que nos interesa obtener en última instancia para realizar los cálculos de posicionamiento.

B. Características de las diferentes constelaciones

Actualmente, las constelaciones LEO con las que este receptor es capaz de funcionar completamente son:

- Orbcomm
- Iridium
- ARGOS

Orbcomm es una constelación dedicada a ofrecer servicios de comunicación y seguimiento global, principalmente para la gestión de activos móviles y el monitoreo remoto.

La constelación Iridium es un sistema de satélites utilizado para proporcionar cobertura de voz y datos a teléfonos satelitales, dispositivos de rastreo y enrutadores de datos en todo el mundo. Es una de las pocas constelaciones de satélites que ofrece cobertura global, incluyendo los océanos y los polos.

ARGOS es un sistema satelital dedicado al seguimiento medioambiental y la recolección de datos científicos, utilizado principalmente para el monitoreo de la fauna, el clima y las condiciones oceánicas.

Las características principales de las señales utilizadas por estas constelaciones vienen resumidas en la Tabla I.

Las principales diferencias se deben al tipo de modulación, pulso utilizado, tipo de transmisión (continuo o en ráfaga), y tasa de símbolo.

Tanto las señales de Orbcomm como las de Argos, utilizan una modulación BPSK y un modo de transmisión continuo, pero la mayor diferencia entre ambas es el pulso utilizado para transmitir los símbolos, en el caso de Orbcomm el pulso se trata de un pulso SRRC y en el caso de Argos se trata de pulsos de Manchester.

Para las señales de Iridium, el pulso utilizado es SRRC, igual que en Orbcomm, pero el modo de transmisión es mediante ráfagas y la modulación es QPSK.

Ya que nuestro objetivo es el de aprovechar estas señales para posicionamiento, independientemente del propio objetivo de la constelación y dado que los tres tipos de señales siguen el mismo modelo de señal (Ecuación 1), se utiliza el mismo receptor para todas las constelaciones.

Tabla I: Características de la señales

	Orbcomm	Argos	Iridium
Núm. de satélites	47	5	66
Altitud de los satélites (Km)	975-740	850	780
Freq. enlace descendente (MHz)	137 - 138 (VHF)	465.987 - 465.988 (UHF)	1616 - 1626.5 (L)
Ancho de banda (MHz)	0.025	0.001	0.0417
Acceso múltiple	FDMA	FDMA	TDMA (ranuras de 90ms) en FDMA
Doppler máximo (KHz)	3	90	31.5
Velocidad radial (Km/s)	6.55	57.90	5.8248
Modo de transmisión	Modo continuo	Modo continuo	En ráfaga
Modulación	BPSK (<i>Symmetric differential encoding</i>)	BPSK	QPSK
Pulso utilizado	Squared root raised cosine (40 % roll-off)	Manchester	Squared root raised cosine (40 % roll-off)
Tasa de símbolo	4800 sps	400 sps	25000 sps

III. ARQUITECTURA DEL RECEPTOR LEO

El objetivo principal del receptor es obtener los siguientes observables de la señal:

- Fase y frecuencia Doppler.
- Retardo temporal o "Delay".
- SNR

La obtención de la fase, y, por lo tanto, de la frecuencia Doppler, es lo que nos permitirá calcular la posición del receptor. Saber el retardo temporal nos permitirá corregir la señal y obtener una buena estimación de la SNR, que nos posibilitará saber la precisión de los cálculos de posición. La arquitectura del receptor (Fig. 1) se divide, principalmente, en dos grandes bloques:

- Bloque de adquisición de la señal (*Acquisition*).
- Bloque de seguimiento de la señal (*Tracking*).

El objetivo del bloque de *Acquisition* es el de adquirir una primera aproximación de los observables necesarios a partir de las primeras muestras de la señal.

Aunque los observables (Doppler, retardo, SNR) en realidad varían con el tiempo, en el bloque de adquisición solo se trabaja con un pequeño número de muestras iniciales, por lo que se asume que estos parámetros son constantes en este pequeño bloque temporal.

Digamos que n_1 es la primera muestra de la señal recibida y $\nu_1 = \nu(n_1)$, entonces podemos definir $\nu(n) = \nu_1 + \nu_2(n)$, teniendo en cuenta que $\nu_2(n_1) = 0$. Escogiendo una muestra n_2 lo suficientemente cerca de n_1 , pero sin ser igual, podríamos conseguir que $\nu_2(n_2) \approx 0$, por ende, $\nu(n_2) \approx \nu_1$ y en consecuencia, podríamos asumir que $\forall n \in [n_1, n_2]$:

$$r(n) = \sum_{k=k_1}^{k_n} x(k)p \left(\left(1 + \frac{\nu_1}{F_c}\right)n - kT - \tau \right) e^{j(2\pi\nu_1 n+\theta)} + w(n) \quad (6)$$

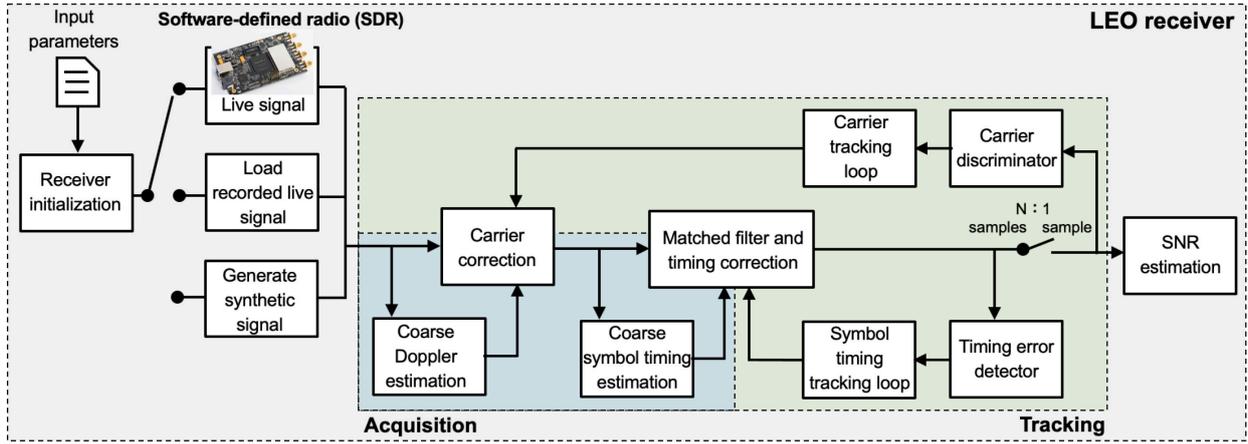


Fig. 1: Arquitectura de alto nivel del receptor software LEO desarrollado.

donde $x(k_1) \dots x(k_n)$ son los símbolos capturados entre las muestras n_1 y n_2 . Idealmente, n_2 debería estar lo más cerca posible de n_1 , sin embargo, los métodos utilizados para realizar la adquisición se aproximan más al valor real cuanto mayor es el número de muestras utilizado, de manera que, lo ideal, es encontrar un balance entre la aproximación de $\nu(n)$ y el rendimiento de los estimadores. Generalmente, el número de muestras utilizado en la adquisición para las tres constelaciones oscila entorno a las 8000 muestras.

La finalidad de todo esto es la de realizar un primera corrección a la señal (eliminar retardo, fase y frecuencia Doppler) y obtener un valor que sirva de punto de partida para el bloque de seguimiento y facilite su funcionamiento.

El bloque de adquisición se divide en los siguientes sub-bloques:

- *Coarse Doppler estimation.*
- *Coarse Doppler correction.*
- Diezmado (solo si es necesario).
- *Time-delay estimation.*
- *Matched filter and timing correction.*
- *Fine Doppler estimation.*
- *Fine Doppler correction.*

En el bloque de *Tracking*, como ya se ha comentado anteriormente, se busca utilizar los valores de observables obtenidos en el bloque de adquisición y la señal corregida como punto de partida para realizar un seguimiento de los mencionados observables a medida que la señal avanza temporalmente. Es decir, siguiendo la nomenclatura presentada anteriormente, en el bloque de adquisición se ha estimado ν_1 y se ha corregido de la señal, y ahora el objetivo es estimar $\nu_2(n)$.

El bloque de *Tracking* se divide en los siguientes sub-bloques:

- *Timing error detector.*
- *Symbol timing tracking loop.*
- *Timing correction.*
- *Carrier discriminator.*
- *Carrier tracking loop.*
- *Carrier correction.*
- *SNR estimation.*

A continuación se detalla el funcionamiento de cada uno de los sub-bloques de adquisición y seguimiento.

A. Acquisition

1) *Coarse Doppler estimation - correction:* Tal y como dice el propio nombre, en este bloque se realiza una estimación “tosca” o “basta” de los valores iniciales de la componente frecuencial debida al Doppler.

Para llevar a cabo este proceso se utiliza el cálculo de la PSD (Densidad Espectral de Potencia) de la señal mediante el método Welch [4, cap. 2.7.2]. Una vez obtenidas las componentes espectrales de la señal, se identifica el valor de frecuencia con mayor densidad de potencia y se desplaza en frecuencia hasta banda base.

Dicho de otro modo, identificando el valor de frecuencia con mayor densidad de potencia se haya un valor estimado de ν_1 , llamémosle ν'_1 . Por lo que:

$$\nu'_1 = \nu_1 + \epsilon \quad (7)$$

donde ϵ representa el error de la estimación respecto al verdadero valor y $\epsilon \ll \nu_1$. Si multiplicamos la señal $r(n)$ por $e^{j(2\pi\nu'_1 n)}$ obtenemos:

$$\sum_{k=k_1}^{k_n} x(k)p \left(\left(1 + \frac{\nu_1}{F_c}\right)n - kT - \tau \right) e^{j(2\pi\epsilon + \theta)} + w(n) \quad (8)$$

Siendo ϵ un valor mucho más pequeño que ν_1 , hemos conseguido corregir la señal para su posterior procesado. Cabe decir que esta corrección no solo corrige el valor inicial debido Doppler, sino que también corrige posibles errores provocados en el mezclador al bajar la señal a banda base.

2) *Diezmado:* De manera opcional, si la señal resulta tener muchas muestras por símbolo a la frecuencia de muestreo elegida, se puede llevar a cabo un diezmado para reducir este número de muestras por símbolo y así facilitar el procesado.

El diezmado se realiza utilizando un filtro del tipo SRRC [5], con un número de muestras en función del factor de diezmado elegido por el usuario.

El diezmado se aplica a toda la señal, no solo a las muestras utilizadas en la adquisición.

3) *Time-delay estimation*: Una vez realizada la primera corrección de la frecuencia Doppler, se continúa con una estimación del retardo temporal inicial τ . Esta estimación se lleva a cabo para poder corregir el retardo inicial y obtener correctamente los símbolos en el siguiente bloque. Dado que n_2 es un valor relativamente cercano a n_1 y ν_1/F_c es un valor muy pequeño, se asume que el retardo es constante en las muestras utilizadas.

Para realizar la estimación se utiliza el estimador de *Oerder and Meyr square timing* [6]. Este algoritmo aprovecha las propiedades de la FFT para calcular el coeficiente de Fourier a la tasa de símbolo de la señal y se obtiene el retardo a partir de la fase de dicho coeficiente.

4) *Matched filter and timing correction*: Después de obtener el retardo inicial, la señal pasa por el correspondiente filtro adaptado y se corrige el retardo para obtener los símbolos.

5) *Fine Doppler estimation - correction*: Una vez obtenidos los símbolos, se realiza la misma técnica que en el bloque de *Coarse Doppler estimation* con los primeros símbolos de la señal. En este caso se realizará una estimación del valor de ϵ descrito anteriormente para conseguir un error aún más pequeño. El objetivo es conseguir una estimación del Doppler un poco más precisa y ajustar mejor la corrección realizada en el primer bloque.

B. Tracking

En esta sección, para resumir la explicación, se pueden juntar los bloques de *Timing* en un mismo bloque denominado SLL (*symbol-locked loop*) y los bloques de *Carrier* en un mismo bloque denominado PLL (*phase-locked loop*) [7].

6) *SLL*: El bloque SLL se encarga de calcular el retardo variable de la señal y hacer un seguimiento de este a medida que la señal avanza y el retardo cambia.

El SLL funciona como un bucle cerrado. A partir de un trozo de la señal lo suficientemente pequeño como para que el retardo se pueda considerar invariable, se estima el retardo mediante un discriminador. Este retardo estimado se filtra para evitar que la presencia de ruido altere el resultado y se aplica la corrección al siguiente trozo de la señal, el cual vuelve a entrar al discriminador y se sigue el mismo proceso una y otra vez hasta que la señal acaba. [7] El discriminador utilizado es el *Gardner Timing Error Detector* [8, cap. 6 y 9].

El SLL también se encarga de muestrear la señal y así enviar los símbolos al siguiente bloque, el PLL.

7) *PLL*: El funcionamiento del bloque PLL es similar al del bloque SLL, es un bucle cerrado en el cual lo que se desea obtener en este caso es la fase de los símbolos y no el retardo. La única diferencia en el comportamiento es el uso del discriminador y los filtros utilizados para filtrar el ruido. Al corregir y estimar la fase a medida que la señal avanza, se está corrigiendo y estimando también el Doppler, ya que la variación de la fase es la propia frecuencia Doppler. [7]

8) *SNR estimation*: Finalmente, una vez la señal ha sido totalmente corregida y los símbolos obtenidos con el mínimo error posible, se calcula la SNR. Esto nos permite saber la calidad de los observables obtenidos y en caso de utilizarlos para posicionamiento, el posible error en la posición calculada.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Por último, en este apartado se exponen los resultados conseguidos al procesar señales de Orbcomm y Iridium. En las figuras referenciadas en los resultados de cada constelación se muestra la evolución de los observables obtenidos (Fase, Doppler, retardo temporal, SNR) y un diagrama y una constelación de los símbolos procesados.

En ambos casos se puede comprobar que la adquisición y el seguimiento de los observables es satisfactorio.

A. Resultados para Orbcomm

En Fig.2 se muestran los observables obtenidos de una señal Orbcomm de 2,00083 segundos de duración y muestreada a 1228800 muestras por segundo. La señal se obtuvo de una grabación subida a GitHub [9].

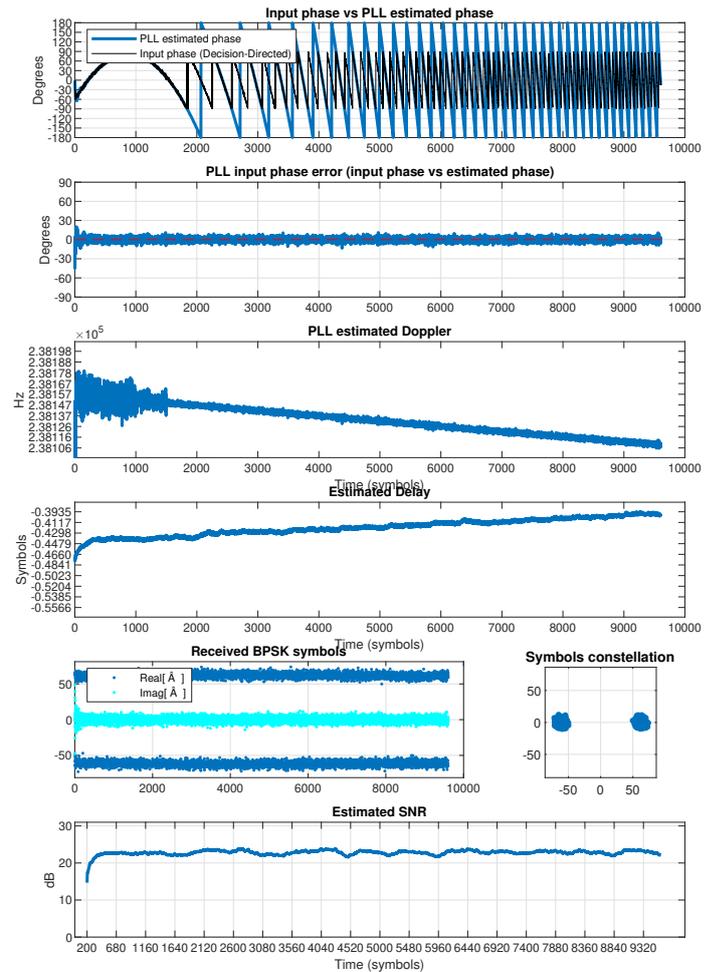


Fig. 2: Observables obtenidos de una señal Orbcomm.

B. Resultados para Iridium

En Fig.3 se muestran los observables obtenidos de una señal Iridium de 0,0203 segundos de duración y muestreada a 2000000 muestras por segundo. La señal Iridium ha sido capturada mediante un receptor RTL-SDR conectado a una antena.

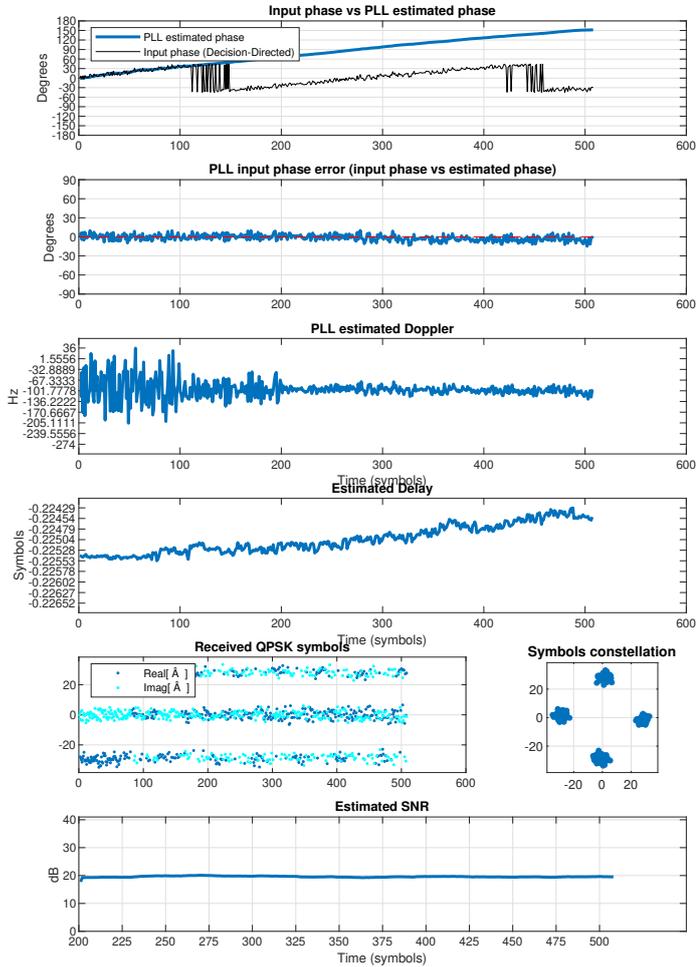


Fig. 3: Observables obtenidos de una señal Iridium.

El mayor problema con las señales Iridium es su corta duración. Dado que el modo de transmisión de los satélites Iridium es en ráfaga, sus señales no permiten un seguimiento tan largo ni efectivo como los otros tipos de señales. Esto se ve reflejado en la Fig.3, si la comparamos con la Fig.2, podemos ver que los observables obtenidos de la señal de Iridium no llegan a converger tanto como los obtenidos de Orbcomm.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado el primer paso para el desarrollo de receptores LEO-PNT completamente funcionales. Se ha mostrado como, mediante una arquitectura basada en los bloques de *Acquisition* y *Tracking* (parecida a la arquitectura de los receptores GNSS tradicionales), es posible adquirir los observables necesarios para llevar a cabo los cálculos de posicionamiento a partir de señales de satélites LEO. Todo esto sin necesidad de alterar los protocolos ni los objetivos de las transmisiones realizadas, lo cual lo convierte en un beneficio a corto y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Esta actividad ha sido posible gracias a la Generalitat de Cataluña en el marco de la estrategia NewSpace Catalonia.

REFERENCIAS

- [1] M. Connor and D. Whelan, *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., 2021.
- [2] Z. M. Kassas, S. Kozhaya, H. Kanj, J. Saroufim, S. W. Hayek, M. Neinaivaie, N. Khairallah, and J. Khalife, "Navigation with multi-constellation leo satellite signals of opportunity: Starlink, oneweb, orbcomm, and iridium," in *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2023, pp. 338–343.
- [3] K. Borre, I. Fernandez-Hernandez, J. A. López-Salcedo, and M. Z. H. Bhuiyan, *GNSS software receivers. Ch. 9: Snapshot Receivers*. Cambridge University Press, 2022.
- [4] P. Stoica and R. Moses, "Spectral analysis of signals," *Prentice Hall*, 01 2005.
- [5] I. Glover and P. M. Grant, *Digital Communications*. Pearson Education Ltd., 2004.
- [6] M. Oerder and H. Meyr, "Digital filter and square timing recovery," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 36, no. 5, pp. 605-612, 1988.
- [7] F. M. Gardner, *Phaselock Techniques*. Wiley, 2005.
- [8] H. Meyr, M. Moeneclaey, and S. A. Fechtel, *Digital Communication Receivers*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [9] <https://github.com/fbieberly/ORBCOMM-receiver/blob/master/data/1552071892p6.mat>.