Captura y Procesado de Señales de Iridium Next para Posicionamiento con Señales de Oportunidad

Antoni Reus Bergas, Gonzalo Seco Granados, José A. López Salcedo
antoni.reus@uab.cat, gonzalo.seco@uab.cat, jose.salcedo@uab.cat
Dept. de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes. Universitat Autònoma de Barcelona.
Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (UAB-CERES).

***Abstract*—En los últimos años, el uso de constelaciones de satélites en Órbita Terrestre Baja (LEO, por sus siglas en inglés) para navegación ha ganado una atención significativa debido a sus ventajas sobre los sistemas tradicionales en Órbita Terrestre Media (MEO), como señales más fuertes, menor latencia y mayor resiliencia. Este artículo presenta el desarrollo de un receptor software que aprovecha las señales de Iridium Next en LEO como Señales de Oportunidad (SoOp, por sus siglas en inglés) para el posicionamiento. El flujo de trabajo comienza con la captura de señales reales, utilizando una Radio Definida por Software (SDR) como interfaz de RF, seguido del procesamiento de las señales capturadas mediante un receptor basado en software. El receptor implementa algoritmos de adquisición y seguimiento para extraer mediciones de Doppler y la potencia de las señales. Estos observables son evaluadas para determinar su idoneidad en aplicaciones de estimación de posicionamiento, navegación y tiempo (PNT, por sus siglas en inglés), comparándolas con las mediciones esperadas obtenidas mediante la simulación de la dinámica de los satélites. Al aprovechar los desplazamientos dinámicos del efecto Doppler inducidos por el rápido movimiento de los satélites en LEO, este enfoque demuestra su potencial para proporcionar soluciones robustas de navegación en entornos donde las señales tradicionales del GNSS pueden estar indisponibles o degradadas.**

I. Introducción

El posicionamiento es actualmente una tecnología de gran relevancia en la sociedad moderna. Sin embargo, desde el despliegue de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) en Órbita Terrestre Media (MEO), se han identificado múltiples debilidades en estos sistemas, tales como la baja potencia recibida, la limitada diversidad en las bandas de frecuencia y las dinámicas lentas de los satélites, lo que restringe el uso de esta tecnología en ciertos escenarios [1]–[4]. Diversos autores han propuesto el uso de constelaciones en Órbita Terrestre Baja (LEO) para posicionamiento, ya sea como una solución independiente [5]–[7] o como un complemento a los sistemas ya existentes [8].

Dado que actualmente no existe ninguna constelación LEO dedicada exclusivamente a aplicaciones de Posicionamiento, Navegación y Tiempo (PNT), los esfuerzos para lograr posicionamiento mediante satélites LEO se han centrado en el enfoque de Señales de Oportunidad (*Signals of Opportunity*, SoOp). En lugar de utilizar técnicas basadas en medidas de Tiempo de Llegada (*Time of Arrival*, ToA) como en los GNSS, se emplean otras mediciones, como las mediciones del desplazamiento Doppler o Diferencia de Frecuencia de Llegada (*Frequency Difference of Arrival*, FDoA), para estimar la posición del receptor utilizando constelaciones destinadas a comunicaciones como Iridium Next, Orbcomm, Starlink o Globalstar.

Este artículo se centra en la constelación Iridium Next y describe el flujo de trabajo completo para la captura de señales reales utilizando una Radio Definida por Software (*Software-Defined Radio*, SDR), seguido del esquema de procesamiento empleado para tratar el canal Ring Alert (RA) de la señal Iridium Next. Para validar los resultados proporcionados por el receptor, estos se comparan con el desplazamiento Doppler esperado, calculado a partir de la posición y velocidad de los satélites involucrados, obtenidos del archivo TLE correspondiente y del propagador orbital SGP4.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección II introduce la constelación Iridium Next y las características de la señal utilizada. La Sección III describe el equipo y la metodología empleados para capturar las señales reales. La Sección IV presenta el receptor basado en software utilizado para obtener las observables Doppler a partir de las señales grabadas. En la Sección V se muestran los resultados de los experimentos y, finalmente, la Sección VI concluye el artículo.

II. Iridium Next: Constelación y Señal

La constelación Iridium NEXT consta de 66 satélites operativos en órbita terrestre baja (LEO, por sus siglas en inglés) dispuestos en seis planos orbitales con 11 satélites por plano, lo que permite una cobertura global continua. La constelación se complementa con 9 satélites de reserva en órbita para garantizar la fiabilidad del servicio. Estos satélites orbitan a una altitud de 780 km en una órbita polar con una inclinación de 86,4°. Los satélites viajan a una velocidad orbital de aproximadamente 7500 m/s, completando cada órbita en aproximadamente 101 minutos. En la Figura 1 se muestra el número de satélites simultáneamente visibles con una elevación mínima de 15, 30 y 45 grados durante un período de 24 horas. En esta figura se observa que, aunque existen breves períodos en los que hasta cuatro satélites son visibles simultáneamente, la mayor parte del tiempo solo hay uno o ningún satélite visible con una elevación superior a 30 grados.

La constelación Iridium Next opera en la banda L, utilizando frecuencias entre 1616 y 1626.5 MHz. Estas frecuencias se distribuyen en 240 canales dúplex, que abarcan el rango de 1616 a 1626 MHz, y 12 canales símplex, que ocupan el rango de 1626 a 1626.5 MHz. Los canales están espaciados por 41.667 kHz. De los 12 canales simplex, solo 5 se utilizan: Quaternary, Tertiary, Secondary, Primary y Ring Alert (RA). Los canales restantes actúan como bandas de guarda.

Además del esquema FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), Iridium Next emplea un esquema TDMA (*Time*

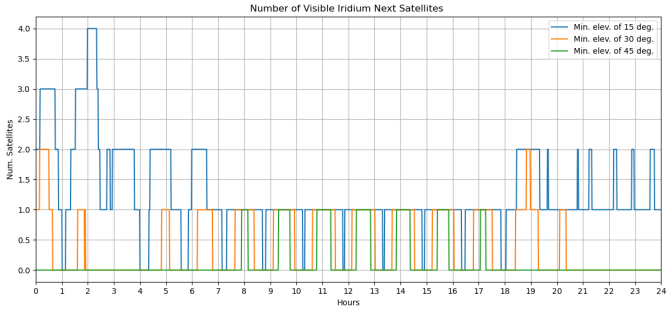

Fig. 1. Número de satélites de Iridium visibles durante 24 horas.

Division Multiple Access) para sincronizar las transmisiones de datos desde cada satélite, permitiendo que todos los satélites utilicen simultáneamente todos los canales. Cada ráfaga TDMA se divide en tres segmentos: el primero, con una duración de entre 6 y 20.32 ms, se utiliza para transmitir datos al usuario a través del canal símplex, el segundo y tercer segmento contiene señales de subida y bajada, para intercambiar datos entre los satélites y el terminal del usuario mediante los canales dúplex. La estructura interna de cada ranura incluye un tono no modulado de 2.6 ms, seguido por una *Unique Word* modulada en BPSK con una duración de 0.48 ms; el resto del tiempo de la ranura se utiliza para transmitir datos modulados en QPSK. Tanto los paquetes de datos BPSK como QPSK se transmiten a una tasa 25 ksps (*kilo symbols per second*).

El receptor descrito en este artículo procesará el canal RA (Ring Alert), ya que este se transmite continuamente, independientemente de si el satélite tiene datos que enviar, por lo que se podrá obtener un mayor número de observables.

III. Captación de la Señal

La captura de señales en vivo se realizó utilizando la Radio Definida por Software (*Software-Defined Radio*, SDR) Blade RF como interfaz de entrada. Este SDR es una opción muy capaz y asequible, con un precio relativamente bajo. Entre sus especificaciones destacan una frecuencia de sintonización que abarca desde 47 MHz hasta 6 GHz, un reloj VCTCXO con una precisión de ± 1 ppm y una tasa de muestreo de hasta 61.44 MHz. Estas características hacen del Blade RF una opción ideal para capturar una amplia variedad de señales, incluyendo la mayoría de las señales transmitidas por las principales constelaciones LEO, como Iridium.

En combinación con el Blade RF, se utilizó una antena helicoidal para banda S, fabricada por Maxtena y específicamente diseñada para Iridium. Esta antena tiene una ganancia de 1 dB y puede registrar hasta 30 MHz de ancho de banda, centrada en 1.621 GHz.

Este sistema fue configurado para grabar los canales simplex de Iridium Next, desde 1626 MHz hasta 1626.5 MHz, con una tasa de muestreo de 1 Msps (*Mega samples per second*), lo que permite obtener un número entero de muestras por símbolo. Además de la grabación, se descargó el archivo TLE correspondiente al momento de la captura desde el sitio web de Celestrak, con el fin de disponer de datos de referencia proporcionados por las efemérides de los satélites para realizar comparaciones. La grabación utilizada en este artículo se realizó en condiciones de cielo abierto, sin ningún obstáculo significativo que bloquease la visibilidad del receptor con una elevación superior a 15 grados.

IV. Receptor Software

El receptor utilizado opera bloque a bloque, lo que significa que toda la señal se divide en segmentos de aproximadamente 40 ms, un tiempo suficiente para contener una sola ráfaga. Cada uno de estos segmentos se procesa de manera independiente en tres etapas. Primero, se realiza el acondicionamiento de la señal, cuyo propósito es determinar si el segmento contiene una ráfaga; en caso afirmativo, se continúa con el procesamiento, de lo contrario, se clasifica como un bloque vacío. Si la detección de la ráfaga es exitosa, este segmento se transfiere al módulo de adquisición, que estima el desplazamiento Doppler grueso y el error de temporización. Finalmente, después de la adquisición, la etapa de seguimiento concluye el procesamiento proporcionando una estimación más precisa del desplazamiento Doppler. En las subsecciones siguientes, se explican en detalle cada una de estas etapas.

A. Acondicionamiento

Durante esta etapa, el receptor filtra el canal que se desea procesar, en este caso, el canal Ring Alert (RA). El ancho de banda del filtro debe ser suficiente para contener la señal, así como el desplazamiento Doppler que esta pueda experimentar. Dado que la señal de Iridium puede sufrir hasta $\pm$ 40 kHz de desplazamiento Doppler y el ancho de banda del canal RA es de aproximadamente 41.667 kHz, se seleccionó un ancho de banda de 140 kHz para el filtro del canal. Este filtrado permite eliminar todo el ruido fuera de banda y obtener una señal más limpia.

Justo después del filtrado del canal, se aplica el algoritmo de detección de ráfagas en varias etapas. En primer lugar, se estima la densidad de ruido N_o del segmento de señal en el dominio de frecuencia. Esta estimación se realiza dividiendo el espectro de frecuencia en múltiples sub-bandas; en este caso, 28 sub-bandas de 5 kHz cada una, y calculando la media para cada sub-banda. Dado que la señal de 41.667 kHz estará presente como máximo en 9 de estas sub-bandas, el algoritmo selecciona las 5 sub-bandas con menor media y las promedia nuevamente para obtener la estimación final de la densidad de ruido. Esta estimación de la densidad de ruido se utiliza para calcular el umbral th, como se muestra en (1), para decidir si la señal está presente.

$$th = 2.5 \cdot \hat{N}_o \tag{1}$$

Debido al ruido presente en la señal, si se aplica directamente el umbral para detectar la ráfaga, es posible que la detección no funcione correctamente. Para evitar esto, antes de tomar la decisión basada en el umbral, se aplica un filtro de suavizado. El filtro seleccionado es un filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) exponencial, cuya ecuación se presenta en (2). En esta ecuación se observa cómo la salida del filtro depende de un factor α, el cual modifica la respuesta en frecuencia del filtro, ajustando su ancho de banda y eliminando los componentes de alta frecuencia que están compuestos principalmente por ruido.

$$y[n] = \alpha \cdot x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n-1] \tag{2}$$

Después de este procesamiento, si la detección de la ráfaga es exitosa, la señal pasará a la etapa de adquisición.

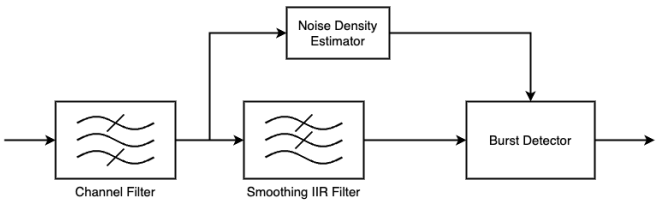

Fig. 2. Diagrama de bloques de la etapa de acondicionamiento

B. Adquisición

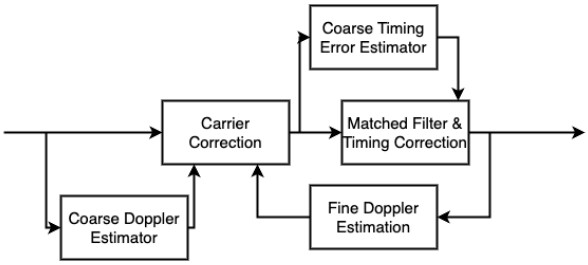

Fig. 3. Diagrama de bloques de la etapa de adquisición

Las principales tareas de esta etapa son dos. La primera consiste en proporcionar una estimación del desplazamiento Doppler de la ráfaga, mientras que la segunda busca estimar un error inicial de sincronización temporal. Para lograr esto, el receptor divide la estimación del desplazamiento Doppler en dos fases: una a nivel de muestras, conocida como estimación gruesa, y otra a nivel de símbolos, denominada estimación fina. Entre ambas estimaciones de Doppler se realiza la estimación del error de sincronización temporal y el filtrado adaptado. En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques de esta etapa.

La parte de estimación del desplazamiento Doppler funciona eliminando la modulación de la señal recibida. Dado que la modulación utilizada por Iridium Next es QPSK, para eliminarla se calcula la cuarta potencia del valor absoluto de la señal compleja. Al hacer esto, la modulación desaparece y el espectro de la señal se convierte en un pico centrado en 4 veces el desplazamiento Doppler. Luego, al identificar el pico en el espectro y dividir su frecuencia por el orden de la modulación, se obtiene una primera aproximación del desplazamiento Doppler. Esta estimación será refinada posteriormente al realizar nuevamente la estimación del desplazamiento Doppler después de corregir el error inicial de sincronización temporal.

Para la estimación del error de sincronización temporal, se utiliza el algoritmo *square timing recovery* [9], que es una técnica *feedforward* que proporciona una primera estimación del error temporal antes de las etapas de seguimiento.

C. Seguimiento

Finalmente, entra en juego la etapa de seguimiento. Esta etapa está constituida por dos bucles de seguimiento: uno para la sincronización temporal y otro para la fase y frecuencia. El diagrama de bloques de esta etapa se muestra en la Figura 4. El bucle de seguimiento temporal es un bucle de segundo orden que opera a nivel de muestras y se encarga de estimar y corregir el error de sincronización temporal. El segundo bucle

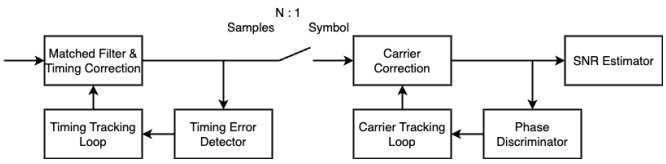

Fig. 4. Diagrama de bloques de la etapa de seguimiento

es el *Phase Locked Loop* (PLL), un bucle de tercer orden que rastrea las variaciones de fase y frecuencia causadas por el efecto Doppler. El PLL opera a nivel de símbolos, eliminando la modulación de fase del símbolo y calculando el error de fase. Una vez estimados los errores de fase y frecuencia, estos se eliminan de la señal.

Para finalizar, el último elemento en esta etapa es el estimador de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), que estima la potencia de la señal y proporciona los valores estimados de SNR y C/N_0.

V. Resultados Experimentales

Para evaluar el algoritmo, se procesó una grabación de 30 minutos. Como se muestra en la Figura 5, durante esta grabación hay un total de 8 satélites visibles. En la misma figura se pueden distinguir dos planos orbitales diferentes: uno que pasa sobre el receptor con una inclinación aproximada de 50° desde el horizonte, y otro con una inclinación de 10°.

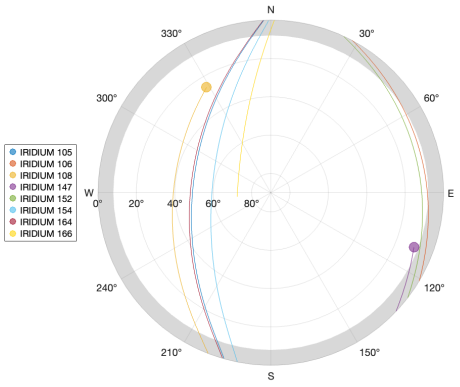

Fig. 5. Posiciones de los Satélites Durante la Grabación

En la Figura 6 se muestran las estimaciones del receptor. Cada línea sólida en el gráfico representa el desplazamiento Doppler verdadero, calculado a partir de las efemérides en el archivo TLE, y cada punto representa las mediciones de una ráfaga detectada y procesada. Cabe destacar que en la figura se utilizan múltiples tipos de marcadores para facilitar la identificación del satélite al que corresponde cada medición. Dado que la señal de Iridium Next no permite obtener la posición del satélite transmisor, ni su identificador, la asociación entre una medición dada y el satélite transmisor se realiza calculando la distancia entre la medición experimental y el desplazamiento Doppler verdadero obtenido con las efemérides. Aunque este método es razonable, pueden ocurrir errores debido a imprecisiones en las efemérides o porque el archivo TLE corresponde a una fecha diferente y desde entonces se han aplicado correcciones orbitales.

Al comparar el desplazamiento Doppler verdadero con el

estimado, se observa que la gran mayoría de las ráfagas se han estimado correctamente y siguen una tendencia muy cercana al desplazamiento Doppler esperado según el TLE. Sin embargo, hay algunas ráfagas que presentan un error notable, visible como una diferencia entre el punto y la curva sólida.

Al analizar el impacto de la elevación en las mediciones, se puede ver, que para los satélites con alta elevación, como los 154, 164, 166 y 108, se detectaron muchas ráfagas, y en su mayoría las mediciones del desplazamiento Doppler coinciden con las esperadas. Por otro lado, para los satélites con menor elevación, como los 147, 106 y 152 (ninguno con una elevación mayor a 20° durante su paso), el número de ráfagas detectadas disminuyó drásticamente. En el caso extremo del satélite 106, cuya elevación máxima es de solo 10°, solo se detectaron dos ráfagas durante su paso, ambas con un error sustancial.

En la Figura 6 también se muestra la C/N_0 (*Carrier to Noise Density*) de la señal recibida. Como se puede observar, todos los valores medidos están dentro del rango esperado para la constelación Iridium Next, entre 52 y 71 dB-Hz [10].

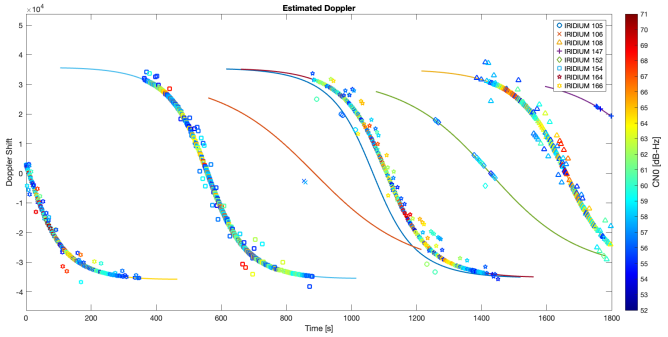

Fig. 6. Comparación entre Doppler estimado y Doppler Real

VI. Conclusions

Este estudio demuestra la viabilidad de utilizar señales de la constelación Iridium Next como Señales de Oportunidad (*Signals of Opportunity*, SoOp) para aplicaciones de Posicionamiento, Navegación y Tiempo (PNT). La implementación y evaluación de un receptor definido por software confirman su capacidad para capturar, procesar y extraer mediciones Doppler del canal Ring Alert (RA), validando el potencial de estas señales para propósitos de PNT.

Los resultados indican que la precisión y disponibilidad de las mediciones Doppler están significativamente influenciadas por la elevación del satélite. Los satélites con elevaciones superiores a 20° proporcionaron mediciones más consistentes y precisas, mientras que aquellos con elevaciones más bajas mostraron tasas de detección reducidas y mayores errores. Sin embargo, es importante señalar que las mediciones Doppler extraídas no son perfectas, ya que están sujetas a ruido y otras fuentes de error inherentes a la cadena de procesamiento de señales, así como a las características de los dispositivos utilizados. Estas imperfecciones resaltan la necesidad de una mayor refinación en el diseño del receptor y en los algoritmos de procesamiento para mejorar la fiabilidad de las mediciones.

Además, este estudio subraya las ventajas de utilizar constelaciones en órbita terrestre baja (LEO), como Iridium Next, en entornos donde los sistemas GNSS tradicionales están degradados o no disponibles. Este enfoque basado en LEO demuestra resiliencia en condiciones desafiantes, convirtiéndose en una alternativa prometedora o un complemento a los sistemas GNSS existentes.

Sin embargo, el uso de este enfoque para la determinación de la posición del receptor, presenta algunas desventajas claras respecto a GNSS, principalmente la precisión que se puede obtener, la necesidad de obtener los archivos TLE, y el tamaño y coste del dispositivo utilizados para la recepción de estas señales, por lo que los escenarios en los que se podría aplicar esta técnica, serían principalmente espacios o instantes de tiempo donde los sistemas tradicionales, no estén disponibles, ya sea por falta de potencia o por un fallo de los sistemas GNSS.

Las investigaciones futuras deberían centrarse en abordar las limitaciones observadas en escenarios de baja elevación, mejorar la precisión de las mediciones Doppler y una caracterización más profunda de los errores de estimación. Asimismo, explorar la integración de señales provenientes de múltiples constelaciones LEO podría abrir el camino hacia soluciones PNT más robustas y completas.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación de la Generalitat de Cataluña en el marco de la Estrategia de New Space de Cataluña.

References

[1] Y. J. Morton, F. van Diggelen, J. J. Spilker Jr, B. W. Parkinson, S. Lo, and G. Gao, *Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, volume 1*. John Wiley & Sons, 2021.

[2] F. S. Prol, R. M. Ferre, Z. Saleem, P. Välisuo, C. Pinell, E. S. Lohan, M. Elsanhoury, M. Elmusrati, S. Islam, K. Çelikbilek, K. Selvan, J. Yliaho, K. Rutledge, A. Ojala, L. Ferranti, J. Praks, M. Z. H. Bhuiyan, S. Kaasalainen, and H. Kuusniemi, "Position, Navigation, and Timing (PNT) Through Low Earth Orbit (LEO) Satellites: A Survey on Current Status, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 83971–84002, 2022. Conference Name: IEEE Access.

[3] H. More, E. Cianca, and M. De Sanctis, "Comparing Positioning Performance of LEO Mega-Constellations and GNSS in Urban Canyons," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 24465–24482, 2024. Conference Name: IEEE Access.

[4] W. Stock, R. T. Schwarz, C. A. Hofmann, and A. Knopp, "Survey on Opportunistic PNT With Signals From LEO Communication Satellites," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 27, pp. 77–107, Feb. 2025.

[5] E. Grayver, R. Nelson, E. McDonald, E. Sorensen, and S. Romano, "Position and navigation using starlink," in *2024 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–12, IEEE, 2024.

[6] M. Orabi, J. Khalife, and Z. M. Kassas, "Opportunistic navigation with doppler measurements from iridium next and orbcomm leo satellites," in *2021 IEEE Aerospace conference (50100)*, pp. 1–9, IEEE, 2021.

[7] Z. M. Kassas, S. Kozhaya, H. Kanj, J. Saroufim, S. W. Hayek, M. Neinavaie, 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)*, pp. 338–343, IEEE, 2023.

[8] B. Li, H. Ge, M. Ge, L. Nie, Y. Shen, and H. Schuh, "Leo enhanced global navigation satellite system (legnss) for real-time precise positioning services," *Advances in space research*, vol. 63, no. 1, pp. 73–93, 2019.

[9] M. Oerder and H. Meyr, "Digital filter and square timing recovery," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 36, no. 5, pp. 605–612, 1988.

[10] R. M. Ferré, *Interference Management and System Optimization with GNSS and non-GNSS Signals for Enhanced Navigation*. Doctoral dissertation, University of Somewhere, nov 2022.