

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SIMULADOR DE SEÑAL L1 DEL SISTEMA GPS EN MATLAB

Sanz, Lucas - López García, Ignacio - Lorenzen, Lautaro - López, Ernesto M. - García, Javier G.

UIDET Sistemas Electrónicos de Navegación y Telecomunicaciones (SENyT)
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina
Email: sanz.lucas@alu.ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: gnss, gps, matlab, generador, señal

1. Introducción

Los primeros sistemas de navegación, como Omega y LORAN, precursores de los sistemas satelitales de navegación global (GNSS por sus siglas en inglés) actuales, datan de 1960, y han evolucionado notablemente desde entonces. Su uso es muy difundido en una vasta gama de aplicaciones y las tecnologías asociadas están en constante desarrollo. Existen actualmente 4 sistemas de posicionamiento global, denominados GLONASS, Galileo, BeiDou y GPS (administrados por Rusia, la Unión Europea, China y el Departamento de Defensa de los EEUU respectivamente). El presente trabajo se desarrolla en torno a este último.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) consta de 31 satélites, los cuales transmiten información temporal y orbital a partir de la cual el receptor calcula su posición mediante trilateración, pudiendo lograr precisiones del orden de los metros, incluso centímetros en determinadas implementaciones. Para ello se requiere la información de al menos 4 satélites, a partir de la cual se calcula la distancia a la que se encuentra cada uno de ellos en base al tiempo de viaje de la señal. El sistema GPS implementa distintas señales usando frecuencias de la banda L. En su versión inicial, utilizaba las frecuencias $f_{L1} = 1575,42$ MHz y $f_{L2} = 1227,60$ MHz. La frecuencia f_{L1} es empleada como portadora para el denominado código C/A, utilizado para expandir el espectro. Por otra parte, el código P, también llamado de precisión, es transmitido en ambas frecuencias f_{L1} y f_{L2} .

La comprensión de las técnicas involucradas es imprescindible para la investigación y el desarrollo de proyectos afines. Como se verá oportunamente, existe un considerable grado de complejidad en la estructura de esta clase de sistemas, y es aquí donde surge la importancia de las simulaciones. Simular nos permite modelar problemas del mundo real en un entorno seguro y de manera eficiente, proveyendo una importante herramienta de análisis sencilla de implementar, comunicar y comprender. De esta forma se facilita el desarrollo de tecnologías sin un gran despliegue de infraestructura, así como también la evaluación del impacto de diversos factores.

En el presente trabajo se introducirán los conceptos estructurales del sistema GPS para luego abordar el desarrollo de un generador de señal GPS implementado en Matlab, donde la señal generada es exportada en un formato acorde para su lectura. Finalmente, se presentarán los resultados obtenidos validados mediante el software de código abierto *GNSS-SDR*.

2. Desarrollo y Discusión

2.1. Estructura de las señales del sistema GPS

Con el objetivo de simular la generación de una señal GPS resulta de interés modelarla. La señal que transmite un satélite k es de la forma

$$s^k(t) = \sqrt{2P_C}(C^k(t) \oplus D^k(t)) \cos(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL1}}(P^k(t) \oplus D^k(t)) \sin(2\pi f_{L1}t) \\ + \sqrt{2P_{PL2}}(P^k(t) \oplus D^k(t)) \sin(2\pi f_{L2}t) \quad (1)$$

donde P_C , P_{PL1} y P_{PL2} son las potencias asociadas a las señales de códigos C/A y P transmitidos. C^k y P^k son secuencias de código de expansión (en referencia a las técnicas de espectro expandido), D^k es la secuencia de datos de navegación y f_{L1} y f_{L2} son las frecuencias de portadora L1 y L2 mencionadas previamente [1].

La secuencia de código $C^k(t)$ también llamada Código de Adquisición Gruesa (Coarse Acquisition) es una secuencia de expansión Gold de 1023 chips (bits) única para cada satélite de la constelación. Dicha secuencia se genera a una tasa de 1.023 MHz, de manera que una secuencia completa dura 1 ms. La secuencia de datos de navegación $D^k(t)$ se genera a una tasa de 50 bps. La información se transmite constantemente en frames de 1500 bits (duración 30 segundos) divididos en 5 subframes de 300 bits, cada uno compuesto por 10 palabras de 30 bits. En el primer subframe se transmite información sobre el *reloj de satélite* e indicadores de la confiabilidad de los datos. En los subframes 2 y 3 se transmiten las *efemérides* del satélite, es decir, el conjunto de parámetros orbitales que permiten calcular la posición y velocidad del mismo en la órbita. En los subframes 4 y 5 se transmite información adicional que no resulta de interés para este trabajo. Para el desarrollo del simulador nos concentraremos únicamente en la señal modulada con el código C/A a frecuencia f_{L1} con la cual ya es posible transmitir datos de navegación y definir posición y velocidad.

2.2. Diseño del simulador de la señal GPS L1

Para poder simular una señal GPS fidedigna, se debe partir de una posición y un tiempo de receptor conocidos. Es en base a esta información, junto con las efemérides vinculadas a los satélites, que es posible determinar la posición y velocidad de los mismos, y con ello, aquellos que estarían en vista para el receptor. Es también a partir de estos parámetros que se calcula el corrimiento Doppler que experimentaría la señal a raíz del movimiento relativo entre transmisor y receptor, las correcciones por efecto Sagnac (asociado a la rotación terrestre durante el tiempo de viaje de la señal), las correcciones por efectos relativistas, la influencia del *offset* y el *drift* en el reloj del satélite, efectos ionosféricos y/o troposféricos, entre otros. En este punto, conociendo la localización del receptor, es posible calcular los tiempos de viaje de señal para cada satélite.

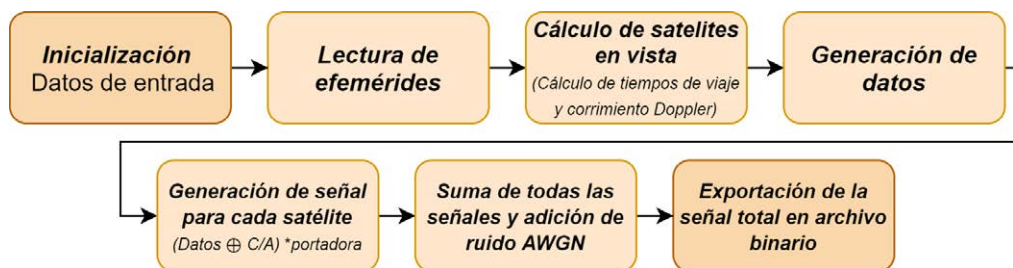


Figura 1: Bloques del simulador

Es evidente que para lograr generar datos relevantes es preciso contar con efemérides válidas, que representen datos realistas. Para ello, se emplean los archivos denominados **RINEX** (*Receiver INdependent EXchange*), un formato de ficheros de texto orientado a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite [6]. De esta forma, se dispone de efemérides “reales” válidas para un determinado momento.

Los parámetros de configuración del simulador, por su parte, serán la ubicación del receptor, el tiempo de interés en el cual se realiza la simulación (necesario para una correcta selección de las efemérides que correspondan), la relación entre la potencia de portadora y la

densidad espectral de potencia de ruido C/N_0 que se quiera considerar, y las frecuencias intermedia y de muestreo. Cabe mencionar que no se ha considerado dinámica para el receptor, es decir, su velocidad en el espacio es nula.

Como los satélites sí están en movimiento y todos los cálculos que se describirán corresponden a variables físicas, estos se realizan cada 1 ms actualizando el estado de manera que se asemeje a una señal real.

Una vez definidos los parámetros de simulación y leídos los datos de efemérides es posible calcular los satélites que están en vista para el receptor. Si un satélite está en vista, se calculan para el mismo las variables anteriormente mencionadas (corrimiento Doppler, tiempo de viaje de la señal, etc.) a partir de las cuales es posible calcular la fase de código y de portadora para cada satélite. Además, se generan los bits de datos que corresponden al tiempo de simulación, en los cuales se codifican las efemérides seleccionadas [8].

Con los parámetros hasta aquí definidos y calculados, se generan y se suman las señales para cada satélite usando la expresión (2), resultando la señal muestreada $S_M[k]$. Notar que por el hecho de tratarse de una simulación, la señal que se genera no es continua, debiendo considerarse las versiones muestreadas (discretas) de las secuencias C y D mencionadas anteriormente. Además, las fases de código ϕ_{CA_i} y ϕ_{D_i} representan el corrimiento en muestras consecuencia del tiempo de viaje calculado para cada satélite en vista y la fase ϕ_{p_i} es la fase de la portadora producto del viaje de la señal. En lugar de la frecuencia L1 se ha utilizado una frecuencia intermedia, ya que es de interés probar receptores completos o algoritmos utilizados en los mismos, donde es usual que la señal esté a frecuencia intermedia luego de haber pasado por la primera etapa de radiofrecuencia.

$$S_M[k] = \sum_{i_{PRN}} (C_i[k - \phi_{CA_i}] \oplus D_i[k - \phi_{D_i}]) \cdot \sin(2\pi f_{FI} k + \phi_{p_i}) \quad (2)$$

Finalmente se añade ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN sus siglas en inglés) para simular lo “visto por la antena receptora”. La señal resultante es exportada en un archivo binario con un formato adecuado para su lectura.

2.3. Pre procesamiento

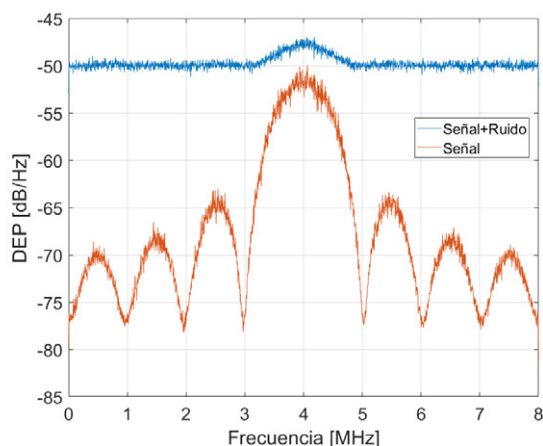
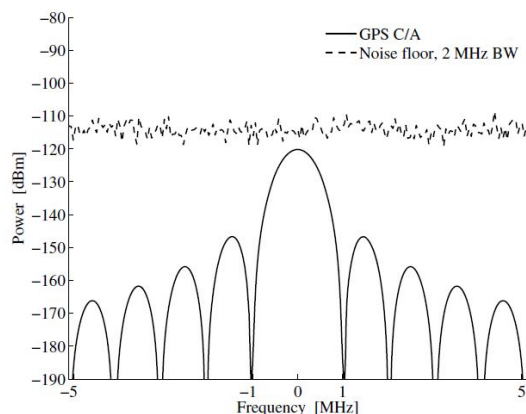
2.3.1. Densidad espectral de potencia

En primer lugar, es de gran importancia verificar que la densidad espectral de potencia (DEP) de la señal generada tenga cierta similitud con la DEP de la señal teórica. En la Figura 2 es posible observar dicha similitud, teniendo en cuenta que la señal generada posee una frecuencia intermedia de 4 MHz.

2.3.2. Adquisición

A la hora de comprobar si se encuentran satélites en vista, el receptor realiza una serie de operaciones que, en su conjunto, son conocidas como *adquisición* [5].

La adquisición consiste en encontrar un pico de correlación para un determinado satélite a una determinada frecuencia, a partir de la cual se puede inferir el corrimiento doppler y la fase de código de la señal. La correlación es realizada con una copia local del código C/A correspondiente al del satélite que se desea adquirir. Para hacerlo de manera correcta, es necesario conocer con cierta precisión (± 250 Hz) la frecuencia de la señal recibida. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la Figura 3.

(a) DEP de la señal generada centrada en f_{FI} 

(b) DEP teórica centrada en banda base[1]

Figura 2: Comparación de densidades espectrales de potencia de las señales C/A de la banda L1. Notar que los valores del eje vertical no coinciden entre sí debido a que se utilizan valores arbitrarios de potencia para la simulación. Solo resulta de interés comparar cualitativamente la forma de los espectros

Un ejemplo de la adquisición resultante con la señal generada por el simulador para el satélite identificado con la secuencia PRN 7 y un doppler de 2.25 KHz se observa en la Figura 3, donde es evidente que la adquisición fue hecha de manera satisfactoria, reflejando la visibilidad del satélite en cuestión.

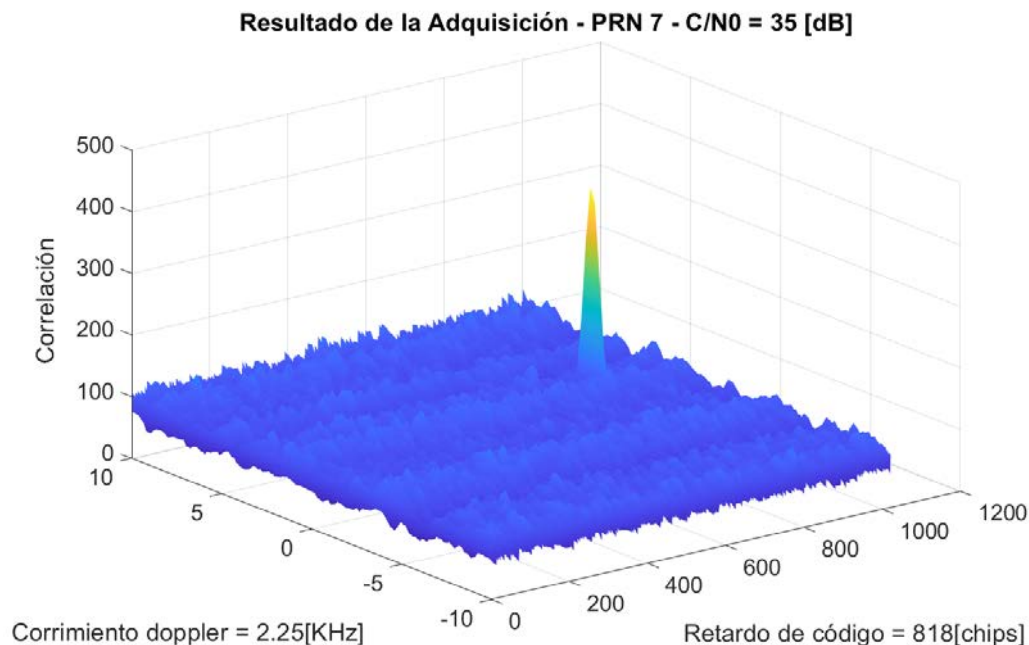


Figura 3: Resultado de la adquisición para el PRN 7

2.4. Obtención de posición

2.4.1. GNSS-SDR

Como se mencionó previamente, para validar las señales se hizo uso del software GNSS-SDR [2], un receptor de señales GNSS definido por software. El mismo es capaz de realizar todas las operaciones necesarias para demodular una señal GPS e interpretar sus mensajes, dando así una solución PVT (de Posición, Velocidad y Tiempo).

La principal ventaja es que ofrece una forma sencilla y tecnológicamente poco demandante de validar las señales generadas, pudiendo prescindir de un receptor GPS físico dedicado que puede resultar costoso e impráctico según la aplicación deseada. Además, con este programa es posible observar y analizar todas las señales intermedias, lo que resulta muy conveniente para la detección y corrección de errores. Para realizar las pruebas, el GNSS-SDR usa como fuente de datos el archivo binario generado por el simulador.

Para la definición de posición se requiere de, como mínimo, 4 satélites, lo que refleja la importancia de la determinación de los satélites en vista, esto es, el proceso de *adquisición*. Para este caso, el GNSS-SDR utilizó la información de 5 satélites, logrando definir la posición que se presenta a continuación.

2.4.2. Resultados obtenidos

Una vez obtenidas las soluciones PVT generadas por el receptor, se convirtieron al sistema coordenado LTP (por sus siglas en inglés *Local Tangent Plane*). LTP es un marco de coordenadas referenciado localmente, y define un plano tangente a partir de la vertical local y al eje de rotación terrestre. El motivo de esta conversión es su difundido uso como medio para la representación de los errores de posición.

Teniendo presente que el origen del marco LTP definido es la posición de simulación deseada, se observaron diferencias cuyas desviaciones resultaron $\sigma_{Norte} = 2,6028$ m, y $\sigma_{Este} = 1,3247$ m, usando el conjunto de datos que dieron lugar a los gráficos de las Figuras 4 y 5. Es importante notar que distintas simulaciones en distintos puntos geográficos dieron lugar a desviaciones del mismo orden en metros. Se observa a su vez la correspondencia entre los gráficos: la Figura 4 muestra una media cercana a cero para el error en la coordenada Norte y media no nula y positiva para la coordenada Este, lo cual se refleja en el scatter plot de la Figura 5.

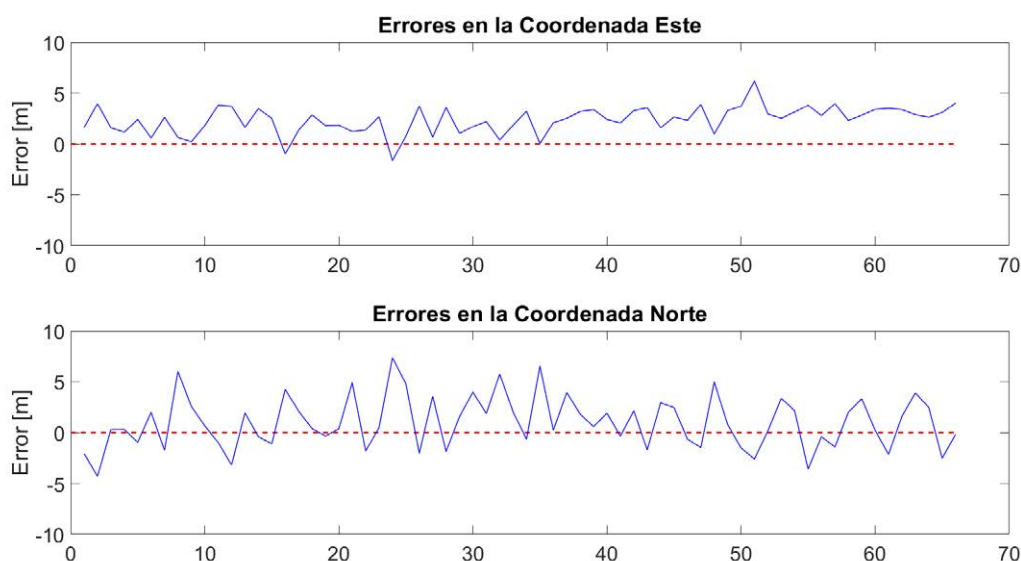
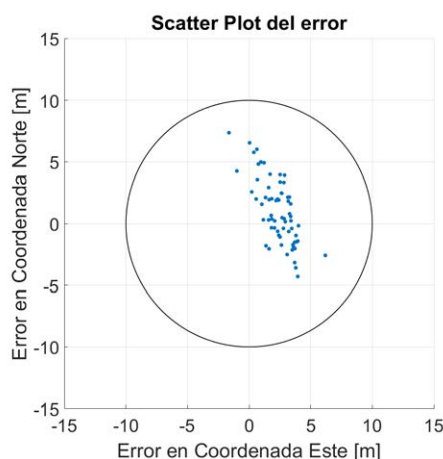
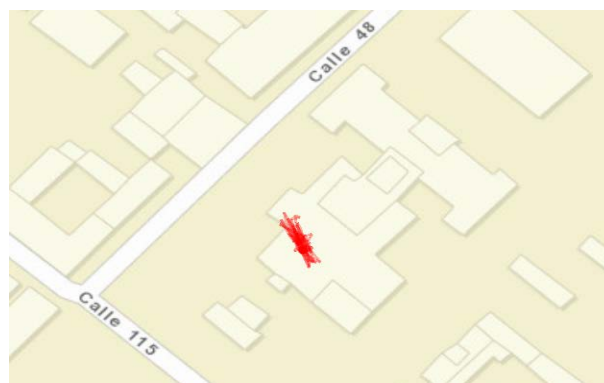


Figura 4



(a)



(b)

Figura 5: Comparación cualitativa del error en el mapa

3. Conclusiones

En este trabajo se diseñó e implementó un simulador de la señal L1 del sistema GPS que fue validado exitosamente utilizando el software GNSS-SDR. Esto lo convierte en una herramienta de gran utilidad para el estudio y validación de sistemas GPS tanto en la modulación como en la demodulación de datos, dado que no resulta laborioso modificar las características de la señal ni diseccionarla de una forma concreta.

En un futuro la generación de señal podría mejorarse, incorporando factores de mayor complejidad como un receptor en movimiento, retardos asociados al paso por la ionósfera y la tropósfera, caracterización realista de las relaciones C/N_0 de cada satélite en vista, y el efecto del multicamino. Además, se podría optimizar la implementación para generar señales de mayor duración en tiempos de ejecución menores con el objetivo de simular transmisión y recepción en tiempo real.

Referencias

1. Borre, K., Akos, D.M., Bertelsen, N., Rinder, P., Jensen, S.H.: A software-defined GPS and Galileo receiver. Birkhäuser, Boston, Massachusetts (2007)
2. Fernandez-Prades, C., Arribas, J., Esteve, L., Closas, P.: GNSS SDR, an open source global navigation satellite systems software-defined receiver (2013), <https://gnss-sdr.org/>
3. Guo, J., Wang, W., Chao, B.: Model of GPS IF signal and its simulation. Geo-spatial Information Science **12**(2), 100–103 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11806-009-0225-x>
4. Joseph, A.: GNSS Solutions - Measuring GNSS signal strength. Inside GNSS column pp. 20–25 (2010), <http://www.insidegnss.com>
5. Kaplan, E.D., Hegarty, C.: Understanding GPS: Principles and Applications. Artech House Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062 (2006)
6. NASA: https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/broadcast_ephemeris_data.html
7. Teunissen, P.J.G., Montenbruck, O.: Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlín, Alemania (2017)
8. U.S. Government: Interface control document for GPS, <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200L.pdf>