

Receptor GNSS satelital con factor de forma CubeSat

Rodríguez, Santiago – García, Javier Gonzalo – Scillone, Germán – Díaz, Juan Gabriel –
López La Valle, Gerardo Ramón – Martire, Lucas – Roncagliolo, Pedro Agustín
santiago.rodriguez@ing.unlp.edu.ar, jgarcia@ing.unlp.edu.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
UIDET SENyT (Sistemas Electrónicos de Navegación y Telecomunicaciones)
Calle 48 y 116 s/n, 3º piso Departamento de Electrotecnia, Tel: (0221) 425-8911 int 3501
La Plata, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y validación de un receptor de señales de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) compatible con el factor de forma del estándar CubeSat. Dicho receptor puede ser configurado para trabajar con diversos sistemas de posicionamiento y a su vez en distintas bandas de frecuencia, lo que lo hace extremadamente versátil para aplicaciones espaciales. En particular se muestra su funcionamiento como receptor GPS doble frecuencia en las bandas L1 y L2C y como receptor multi sistema GPS/GLONASS para la banda L1.

1.- INTRODUCCION

Entre las principales líneas de trabajo de la UIDET SENyT se destaca al desarrollo de sistemas de navegación y telecomunicaciones. En particular, previamente la UIDET ha desarrollado receptores aptos para aplicaciones espaciales destinados a aplicaciones de cierta criticidad y alto desempeño [1]. En este trabajo, se presenta la implementación y pruebas de funcionamiento parciales de un receptor GNSS apto para nanosatélites. El receptor, cuyo diseño inicial fue presentado en [2], posee dos entradas de antena y es capaz de operar en las bandas L1 y L2 de GPS y L1 de GLONASS.

Durante los últimos años, ha habido un importante aumento en el uso de nanosatélites porque ofrecen una alternativa de bajo costo y tiempo de desarrollo corto con respecto a los satélites más grandes destinados a misiones de larga duración. El uso de componentes comerciales (COTS) en lugar de los costosos componentes de grado espacial requeridos para misiones largas es una de las principales razones de la popularidad de los nanosatélites. En comparación con los satélites tradicionales, los nanosatélites suelen utilizar órbitas bajas (LEO) y requieren un volumen pequeño y costos de fabricación bajos. Sin embargo, en los últimos años se han utilizado también en otros tipos de

órbitas más desafiantes incluyendo misiones interplanetarias.

El acceso al espacio experimentó un salto de popularidad con la creación de los CubeSats por parte de la Universidad Politécnica de California hace unos dieciocho años, lo que ha permitido que cientos de organizaciones educativas o privadas lleven a cabo misiones espaciales tanto de interés científico como comercial [3]. Los CubeSats son nanosatélites con volúmenes estandarizados que permiten, dada su forma cúbica, su lanzamiento de a grupos, disminuyendo los costos en comparación con los satélites tradicionales, mucho más voluminosos y pesados. Además, los CubeSats utilizan módulos electrónicos que generalmente se construyen con componentes comerciales (COTS) en lugar de componentes tolerantes a la radiación, los cuales son extremadamente costosos y difíciles de adquirir.

Existen gran cantidad de aplicaciones donde puede ser útil que un CubeSat conozca con precisión su posición, como por ejemplo para el seguimiento orbital de la trayectoria del satélite que se realiza con el fin de descargar en tierra datos de telemetría y datos de ciencia de sus instrumentos. Por otra parte, considerando los recientes avances en desarrollo de cámaras digitales aptas para CubeSat que permiten realizar observación de la Tierra adquiere sentido conocer

la ubicación del CubeSat para poder comandar con precisión una captura de imágenes. En el uso de arquitecturas satelitales segmentadas también es fundamental conocer la posición y velocidad con el fin de que la red satelital pueda funcionar correctamente. Para ello es importante conocer la posición absoluta y relativa de los satélites con alta precisión para que la red pueda efectuar una operación conjunta. Por ejemplo, para la toma de imágenes con radar de apertura sintética (SAR) distribuido, es necesario conocer la posición de los satélites para obtener una correcta integración de la imagen conjunta. Para que el satélite se desempeñe en las aplicaciones mencionadas, el vehículo debe contar con un receptor de sistemas de navegación por satélite (GNSS). Los receptores GNSS utilizan constelaciones de satélites de órbita media (MEO) para determinar la posición y velocidad de un vehículo.

En la actualidad los sistemas GNSS completamente operativos son GPS y GLONASS. En particular para este trabajo son de interés las señales GPS L1, GPS L2C y GLONASS L1. Un receptor GNSS multi-banda permite, en principio, resolver posición y velocidad con mayor precisión y robustez que uno monobanda [4], mientras que un receptor multi-sistema permite eliminar la dependencia de un único sistema agregando robustez a la solución de navegación.

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y validación de un receptor de señales de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) compatible con el factor de forma del estándar CubeSat. Dicho receptor puede ser configurado para trabajar en dos modos: i) multi-sistema, utilizando las señales de la banda L1 de los sistemas GPS y GLONASS y ii) multi-frecuencia, donde utiliza las bandas L1 y L2C del sistema GPS. El trabajo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se describe el hardware del receptor, en la sección 3 el diseño lógico implementado en el dispositivo lógico programable (FPGA) incluido en el mismo, los ensayos realizados y sus resultados se tratan en la sección 4 y finaliza con las conclusiones.

2.- DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE HARDWARE PROPUESTO

El diseño propuesto se basa en la arquitectura típica de un receptor GPS, que consta de una etapa de radiofrecuencia (RF) y una plataforma de procesamiento de señal digital [5]. La etapa de RF (implementada parcialmente en el circuito integrado NT1065 de la compañía NTLabs) recibe las señales de las antenas y proporciona la amplificación y el filtrado necesarios. Las señales de RF se convierten a una frecuencia intermedia más baja (FI) para realizar la conversión de analógico a digital. La plataforma de procesamiento digital implementada en un Sistema en un Chip (SoC, por sus siglas en inglés) en una FPGA de la familia Artix 7 de la firma Xilinx recibe las muestras, realiza las correlaciones necesarias para adquirir los satélites presentes en la antena, demodula los datos y calcula la solución de navegación, que se envía a otro dispositivo mediante una interfaz de comunicación.

En la Fig. 1 puede observarse un diagrama en bloques del diseño del receptor propuesto. La señal de cada antena es amplificada y separada en dos canales por un diplexor de RF. Cada canal es filtrado con un filtro SAW sintonizado para GPS banda L1 y GPS banda L2 o GLONASS banda L1 según la configuración a utilizar. Las señales filtradas ingresan al NT1065, un circuito integrado que realiza la conversión de frecuencia y el muestreo en FI de manera configurable por el usuario. A la salida de este proceso se obtienen, por cada canal, señales digitalizadas a dos bits por muestra que corresponden a la magnitud y al signo de la de la señal de FI muestreada. Dichas muestras junto a la señal de reloj de sincronismo de muestreo ingresan al SoC sintetizado en la FPGA.

El SoC se encuentra formado por lógica sintetizada ad-hoc para el cálculo de las correlaciones necesarias y por un procesador que ejecuta un sistema operativo de tiempo real que comanda las acciones de todo el receptor. Para la implementación del SoC, la placa cuenta con memorias tipo SRAM y FLASH. Para fines de depuración en laboratorio se cuenta con interfaces JTAG o USB-UART. En cuanto a las interfaces de comunicación propias de un CubeSat o micro

satélite el diseño cuenta con una interfaz RS-422, una UART, una I2C y dos interfaces CAN.

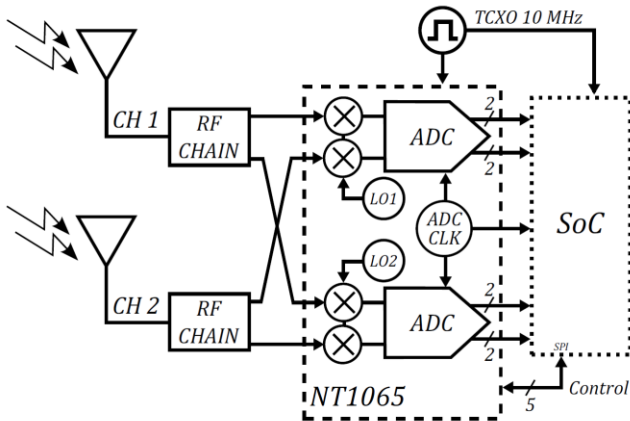


Figura 1 - Diagrama de bloques del receptor GNSS implementado.

Para lograr compatibilidad mecánica con módulos comerciales para CubeSats el receptor sigue el factor de forma indicado en [6]. Para la compatibilidad eléctrica se utilizaron dos conectores de 52 pines siguiendo el estándar PC-104 debido a que los módulos de un CubeSat suelen interconectarse mediante este estándar. Los módulos se colocan uno encima de otro, formando una estructura vertical. El número de módulos estipula el volumen que deberá tener el satélite. El volumen se mide en unidades de CubeSat (denominados U) siendo 1U 10cmx10cmx10cm y constituye el mínimo. Existen CubeSats de 1, 2, 3, 6 y hasta 12 U.

El diseño del PCB (printed circuit board) consta de diez capas en un sustrato de material FR4. En detalle se utilizaron cuatro capas de señal, siendo dos de ellas internas, cuatro planos de tierra para minimizar acople inductivo y dos planos de alimentación, utilizados para distribuir las tensiones necesarias por el receptor priorizando la integridad de señal [7]. Los planos de tierra se encuentran intercalados entre capas de señal y por encima y debajo de los planos de alimentación, formando un esquema que favorece la integridad de señal. La mayor parte de los componentes se colocó sobre la capa superior, dejando la capa inferior mayormente para componentes pasivos, como capacitores y resistencias. El ancho de pista promedio utilizado es de 6 mils, debido principalmente al encapsulado de la FPGA, del tipo BGA de 484 bolas. Todas las vías utilizadas son de tipo pasante. Las mismas poseen un diámetro de agujero de 0.2mm y una corona de 0.46mm de diámetro. Para el caso de las líneas de entrada de antena, se fijó una impedancia característica de 50 Ohms. Para ello, se implementó una línea de transmisión de tipo microtira en la capa superior utilizando un ancho de pista de 7 mils. Otras señales de importancia en cuanto a su integridad de señal son las de reloj de sistema y muestreo, así como los pares diferenciales de USB y RS-422. En estas líneas se realizaron simulaciones para asegurar la integridad de las señales. Para

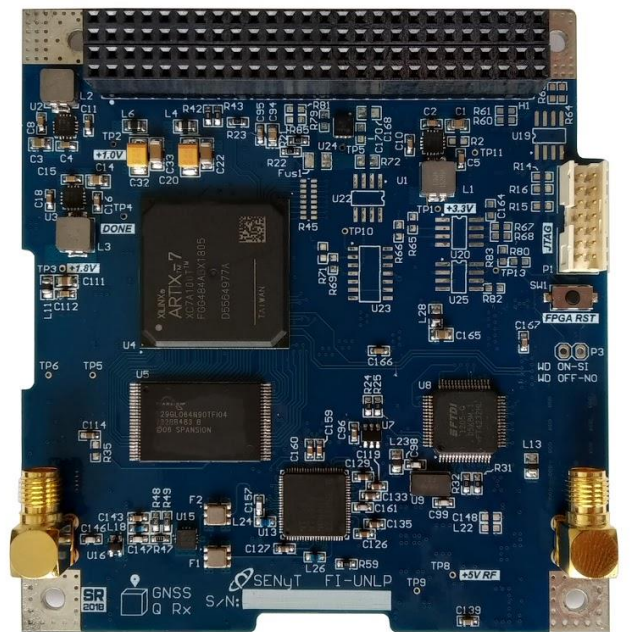
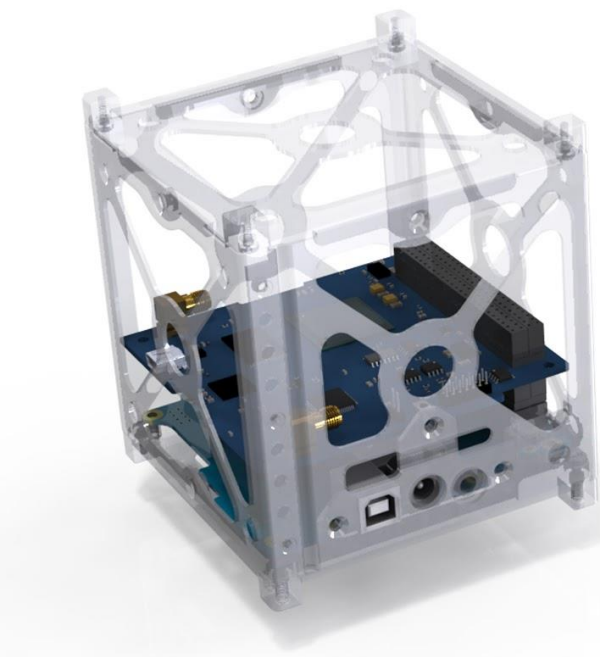


Figura 2 - Modelo del receptor dentro de una estructura Cubesat (izq.). Foto del prototipo construido (der.).

verificar que el diseño no posea interferencias mecánicas de ningún tipo se integró el modelo 3D del receptor junto a modelos 3D de la estructura típica de un CubeSat. De esta manera también se verificó la correcta vinculación mecánica del receptor con otros módulos disponibles en el mercado que utilicen el mismo estándar de diseño. Se envió a fabricación el diseño y se ensambló un primer prototipo con el fin de probar y validar la etapa de recepción y procesamiento de las señales GNSS de interés. En la Fig. 2 se muestra (izquierda) un renderizado del diseño colocado en una estructura de un Cubesat de 1U y (derecha) una foto del prototipo construido.

3.- DISEÑO LÓGICO DEL RECEPTOR

El diseño lógico integrado en la FPGA consta del procesador embebido LEON3 [8] junto con diversos periféricos. Todo el diseño lógico está desarrollado en el lenguaje de descripción de hardware VHDL priorizando la flexibilidad, la escalabilidad y la portabilidad entre diferentes

plataformas. Los periféricos asociados al diseño lógico pueden dividirse en dos grandes grupos: por un lado, se incluyen diversos periféricos provistos por las librerías de código abierto GRLIB [9], ampliamente difundidas y muy utilizadas en este tipo de aplicaciones. Por otro lado, el diseño también cuenta con periféricos desarrollados por el grupo de trabajo que cumplen tareas específicas y le otorgan funcionalidades adicionales al receptor. Dentro del primer grupo, entre los más importantes, pueden mencionarse los controladores de memoria SRAM y FLASH, controladores de interfaces UART, una interfaz de depuración para conexión con la PC (DSU), controladores de interfaces SPI, I2C y CAN y un temporizador de tiempo real (RTC). En el segundo grupo se incluye un controlador de watchdog que permite reinicializar el receptor ante una eventual falla del software. Además, se cuenta con un módulo de adquisición de muestras en frecuencia intermedia (IFAS) [10] que permite obtener las mismas muestras que procesa el receptor para poder descargarlas y procesarlas de forma *off-line* en una PC, funcionalidad muy útil

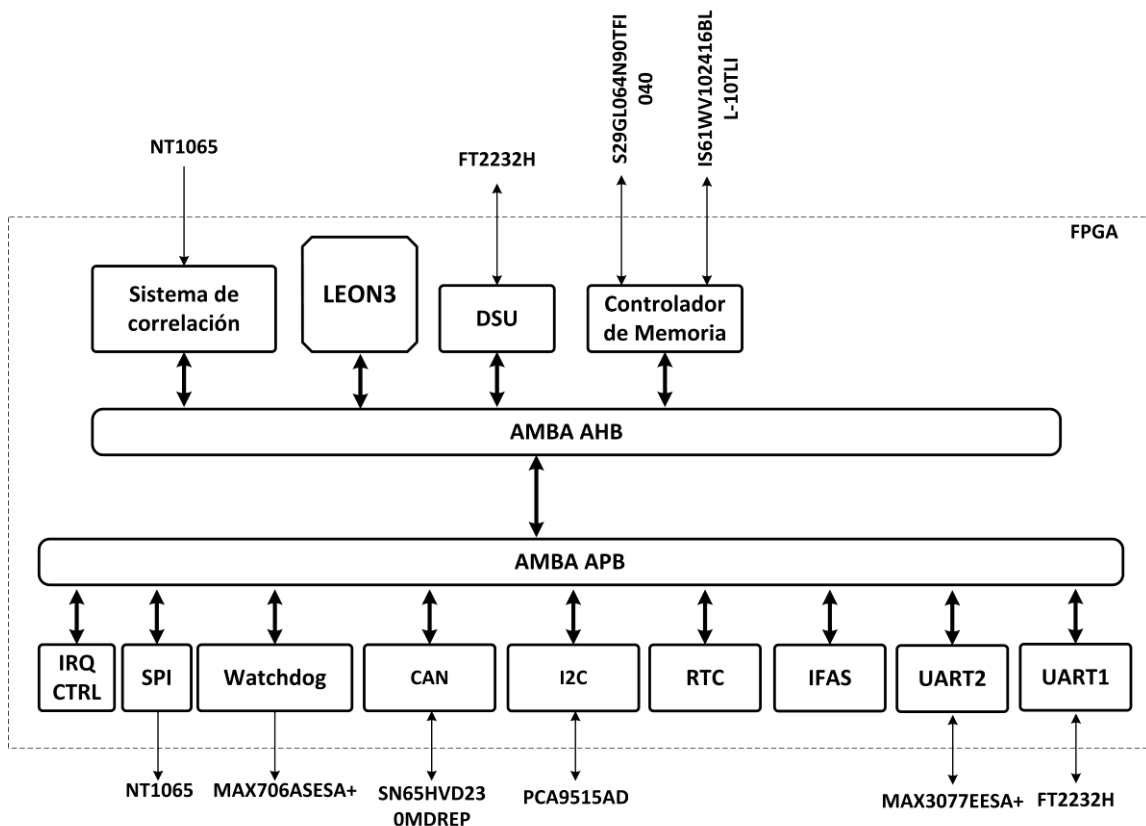


Figura 3 - Diagrama en bloques del diseño lógico.

en las etapas de depuración o bien para verificar o monitorear las etapas de RF del receptor. Por último, se incluye un módulo de correladores destinados a procesar las señales de GNSS digitalizadas provenientes de la etapa de radiofrecuencia.

El módulo de correladores contiene 24 canales independientes para procesar señales de de GPS/GLONASS en la banda de L1 y 12 canales independientes para señales L2C de GPS. Además, se cuenta con un canal de adquisición rápida que está destinado a señales de GPS/GLONASS L1 y que permite acelerar la búsqueda de los satélites que estén en vista del receptor [11]. El diseño lógico se presenta en la Fig. 3.

4.- ENSAYOS Y RESULTADOS

En esta sección se detallan los ensayos realizados sobre el prototipo construido y los resultados obtenidos.

Ensayos eléctricos

El primer ensayo consistió en medir las señales eléctricas críticas para el correcto funcionamiento de la plataforma como son las tensiones de la FPGA (3.3 V, 1.8 V y 1.0 V), la tensión de la etapa de RF (3.3 V obtenidos a partir de un regulador lineal) y las formas de onda de las señales de reloj del diseño. En cuanto a las tensiones, todos los valores medidos cumplieron con el requerimiento de estar dentro del 5% de la tensión nominal. Por su parte, las señales de reloj de ingreso a la FPGA como así también la de ingreso a la etapa de radiofrecuencia poseían frecuencia y formas de onda adecuadas.

Ensayos de configuración del cabezal de RF

Una vez concluidas las pruebas eléctricas se realizó un ensayo de funcionalidad elemental que consistió en la configuración del cabezal de radiofrecuencia por medio de una aplicación de software. El procesador ubicado en la FPGA se comunica con el cabezal de RF utilizando una interfaz SPI. Se implementó un software para el procesador que permitiera leer y escribir distintos registros del NT1065 con el fin de configurar los canales de adquisición del chip y así constatar

luego los resultados con la configuración introducida.

Ensayos de adquisición de muestras de señales GPS L1/L2 y GLONASS L1

Luego de verificar exitosamente la configuración del cabezal de RF se procedió a realizar un ensayo para constatar que las muestras que ingresaban a la FPGA fuesen de señales GNSS. En particular se configuró al cabezal para obtener muestras de GPS L1, L2 y GLONASS L1 y se utilizó el módulo IFAS sintetizado en la FPGA [11] que permitió tomar las muestras crudas tal cual se obtienen a la salida del NT1065, guardarlas en memoria RAM y enviarlas a una PC por medio de una interfaz serie. Se corrieron los algoritmos de adquisición en una PC y se constató la presencia de satélites de los sistemas analizados al visualizar los correspondientes picos de correlación.

Ensayos funcionales completos

Para los ensayos funcionales se utilizó al receptor en dos modos: GPS L1/L2 y GPS L1/GLONASS L1. Para el caso de GPS L1/L2 se utilizó una única entrada de antena, mientras que para el segundo modo se utilizó un combinador para que la señal proveniente de la antena pueda ingresar en ambas entradas de antena del receptor. Cabe destacar que se intercaló un amplificador de bajo ruido (LNA) para mejorar la sensibilidad del receptor en los primeros ensayos.

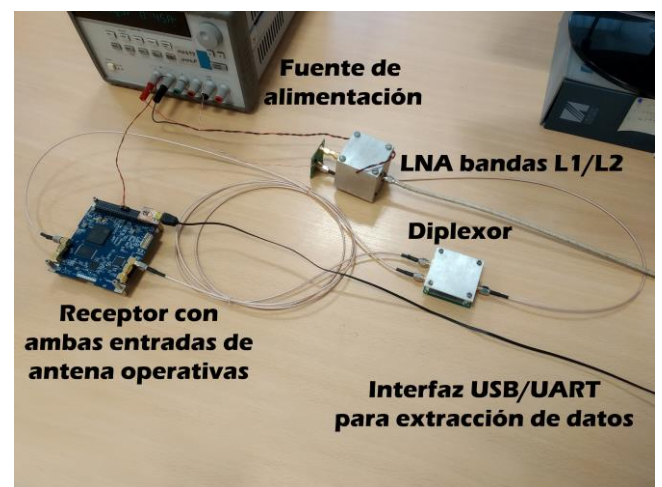


Figura 4 - Configuración adoptada para el ensayo funcional GPS L1/GLONASS L1.

En la Fig. 4 se muestra la disposición de instrumentos utilizada para realizar el ensayo GPS L1/GLONASS L1. De los datos extraídos durante los ensayos se analizaron distintas variables, como el número de satélites en vista, la calidad geométrica de la constelación de satélites en vista y el error cuadrático medio en la solución de posición y velocidad. El receptor pudo resolver posición de manera exitosa para ambos esquemas, validando el diseño de hardware propuesto debido a que se utilizaron ambas entradas de antena y al menos dos sistemas de posicionamiento diferentes. Se deja constancia que para el caso de GPS L2, la adquisición y el seguimiento de los satélites fueron satisfactorios, mientras que los resultados obtenidos como solución de posición aún son preliminares ya que se están depurando los algoritmos de procesamiento de las mediciones para obtener mediciones de distancia entre los satélites y el receptor (conocidas como pseudorangs) libres del retardo de propagación que sufren las señales al atravesar la ionósfera, a este tipo de mediciones se las conoce como pseudorangs libres del error ionosférico que es uno de los errores que más afecta la solución de posición.

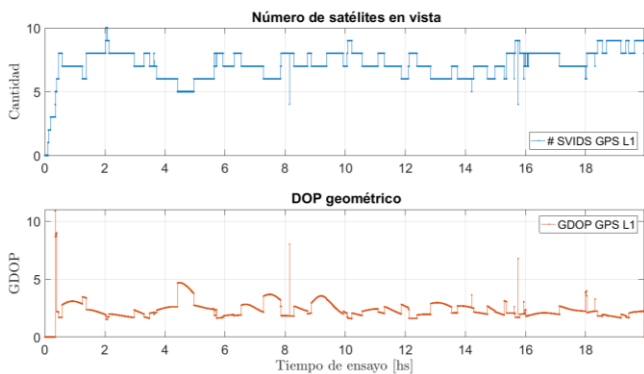


Figura 5 – Cantidad de satélites utilizados y dilución de precisión geométrica para GPS L1.

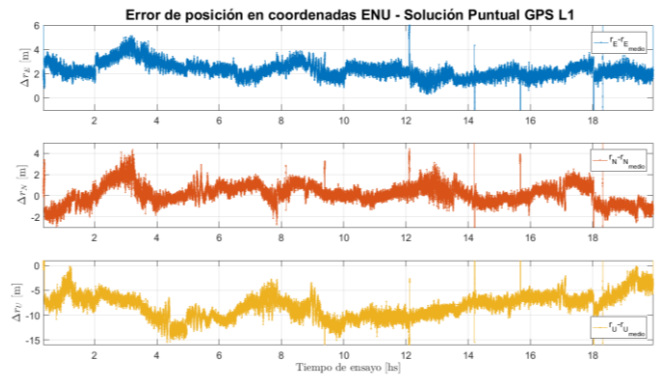


Figura 6 – Error en coordenadas ENU en la solución de posición obtenida para GPS L1.

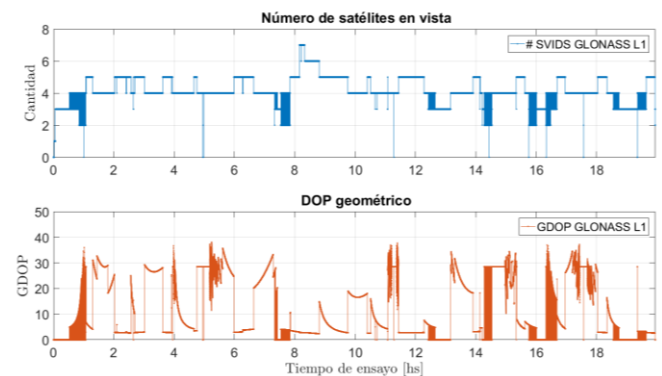


Figura 7 – Cantidad de satélites utilizados y dilución de precisión geométrica para GLONASS L1.

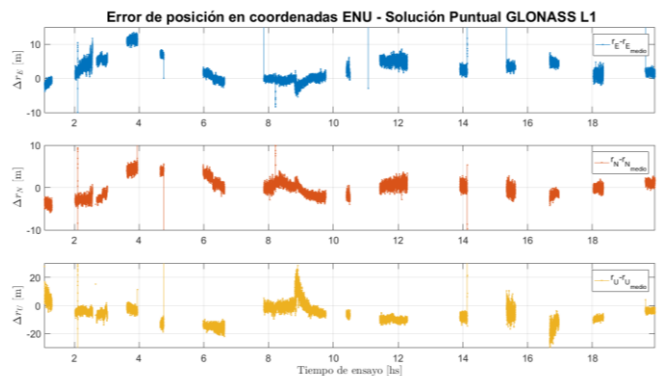


Figura 8 – Error en coordenadas ENU en la solución de posición obtenida para GLONASS L1.

A modo de ejemplo se considerarán los resultados obtenidos de un ensayo realizado desde las 18hs del día 18/3/19 hasta las 14 hs del día 19/3/19. En la Fig. 5 se grafica la cantidad de satélites en vista y la calidad geométrica de la solución de posición (GDOP, por sus siglas en inglés Geometric Dilution of Precision, que da una medida de

cuánto afecta en la solución de posición la geometría de los satélites en vista), mientras que en la Fig. 6 puede observarse el error de posición en coordenadas locales (Este, Norte y Vertical) para la solución puntual de GPS L1. De la Fig. 5 puede concluirse que el número de satélites durante el ensayo es adecuado, aunque por instantes (épocas) el número disminuyó hasta cuatro, que es el mínimo número de satélites para el cuál el receptor puede operar. En estos casos es notorio como el GDOP aumenta considerablemente indicando una mala condición geométrica de la constelación utilizada por el receptor, lo que provoca saltos en dichos instantes en la solución de navegación, como se constata en la Fig. 6. A pesar de estas perturbaciones eventuales, la solución de posición posee una desviación promedio menor a 5 m para las coordenadas horizontales y menores a 10 m para la coordenada vertical, valores más que aceptables para una solución no filtrada de GPS L1. Para el cálculo del error de posición se utilizó una posición de referencia obtenida a partir de otros receptores de funcionamiento ya validado.

En las Figs. 7 y 8 pueden observarse los mismos resultados para la solución GLONASS L1. Los efectos más notables son la discontinuidad en la solución de posición, la notable disminución de cantidad de satélites en vista y el aumento significativo del GDOP. Todos estos efectos tienen una raíz común que es la poca cantidad de satélites GLONASS que el receptor es capaz de seguir. Esta situación puede deberse a que la constelación de GLONASS posee menos satélites que la de GPS (24 contra 31 actualmente) y que el conjunto antena más receptor GNSS no tiene la sensibilidad adecuada para poder seguir satélites que si bien pueden estar en vista, al tener elevaciones bajas no poseen señales cuya relación señal a ruido es adecuada para que el receptor pueda detectar y seguir estas señales. Si se deja de lado este efecto puede observarse que en aquellos intervalos en los que la cantidad de satélites es adecuada (4 o más) y el GDOP es bueno, los resultados son similares (aunque algo más ruidosos) a los que se obtienen con GPS L1.

CONCLUSIONES

Se presentó el diseño, construcción y validación parcial de un receptor GNSS doble antena y multifrecuencia orientado a CubeSats. El receptor se encuentra en una etapa avanzada de desarrollo apta para realizar ensayos funcionales que permitieron validar el diseño de hardware propuesto para esquemas multifrecuencia (GPS L1/L2) y multisistema (GPS L1/GLONASS L1) en lo referido a adquisición, seguimiento de satélites y demodulación de datos. Con respecto a la navegación, también se pudo validar la solución de posición de GPS L1 y GLONASS L1, aunque en este último caso la cantidad de satélites presentes no permitió tener continuidad en la solución. Se está analizando si la baja cantidad de satélites es debida a un problema exclusivo de la constelación GLONASS o si el receptor tiene algún problema que impide que se puedan adquirir todos los satélites en vista. Con respecto a GPS L2C, se está trabajando en implementar una solución de navegación conjunta con GPS L1 para mejorar la precisión de esta última utilizando combinación de mediciones de pseudorange libre de error ionosférico.

REFERENCIAS

- [1] Jorge Cogo, Ramón G. López La Valle, Gerardo L. Puga, Javier A. Smidt, Juan G. Díaz, Javier G. García, Pedro A. Roncagliolo y Carlos H. Muravchik. (2013). **Receptor GNSS Multiantena para aplicaciones Aeroespaciales; Segundas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión; FI-UNLP.**
- [2] S. Rodriguez, R. López La Valle, G. Puga, Javier G. García y P. A. Roncagliolo. (2017) **Design of a dual-antenna and dual-band GPS receiver for CubeSats.** *Congreso "2017 IEEE URUCON"*.
- [3] M. Swartwout. (2013). **The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look.** *Journal of Small Satellites*, vol. 2, no. 2, pp. 213-233.

- [4] Kaplan, Elliot D. and Hegarty, Christopher J. (2005); **Understanding GPS: Principles and Applications**. *Second Edition*; Artech House.
- [5] Y. T. James Bao. (2005). **Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A software Approach**. *Hoboken: John Wiley & Sons*.
- [6] Pumpkin incorporated. (2003). **CubeSat Kit PCB Specification**.
- [7] H. Ott. (2009). **Electromagnetic Compatibility Engineering**. *Hoboken: John Wiley & Sons*.
- [8] SPARC International Inc. (1992). **The SPARC Architecture Manual**.
- [9] Cobham. (2018). **GRLIB IP Library User's Manual**. *Version 2018.1*.
- [10] J. G. Díaz, Germán Scillone, J.G. García. (2018). **Sistema de adquisición en FPGA para receptores SDR**. *26° Congreso Argentino de Control Automático (AADECA'18)*, págs. 440 a 445.
- [11] J. G. Díaz, P. A. Roncagliolo, J. G. García. (2013). **Canal de correlación de adquisición no-coherente GPS/GLONASS**. *XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control - RPIC 2013*, págs. 445-450.