

## RECEPTOR GNSS DOBLE ANTENA Y MULTI FRECUENCIA PARA NANOSATÉLITES COMPATIBLE CON FORMATO CUBESAT

Rodríguez, Santiago; Díaz, Juan G.; López La Valle, Ramón.; López, Ernesto M.; Scillone, Germán y García, Javier G.

UIDET SENyT, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de la Plata, Calle 116 s/n, B1900, La Plata, Argentina.

Contacto: [santiago.rodriguez@ing.unlp.edu.ar](mailto:santiago.rodriguez@ing.unlp.edu.ar)

### 1. Introducción

Entre las principales líneas de trabajo de la UIDET SENyT se destaca al desarrollo de sistemas de navegación y telecomunicaciones. En particular, previamente a la creación de la UIDET se han desarrollado receptores para Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) de alto desempeño aptos para aplicaciones espaciales en donde se requiere una elevada confiabilidad [1]. En este trabajo, se presenta la implementación y las pruebas de funcionamiento parciales de un receptor GNSS apto para su uso en satélites con factor de forma compatible con los denominados cubesats. El receptor posee dos entradas de antena y es capaz de operar en las bandas L1 y L2 de GPS y L1 de GLONASS, dos de los principales sistemas de navegación por satélite a nivel global.

Durante los últimos años, ha habido un aumento en el uso de nanosatélites porque ofrecen una alternativa de bajo costo y un tiempo de desarrollo menor 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 alta 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. 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 veinte años, lo que ha permitido que cientos de organizaciones educativas o privadas lleven a cabo misiones espaciales tanto de interés científico como comercial [2]. Por su factor de forma particular, los CubeSats permiten su lanzamiento de a grupos utilizando *dispensers*, disminuyendo los costos en comparación con los satélites tradicionales, mucho más voluminosos y pesados.

Existen ciertas 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. Por otra parte, considerando los recientes avances en el desarrollo de cámaras digitales aptas para CubeSat que permiten realizar la observación de la Tierra, adquiere sentido conocer la ubicación del CubeSat para saber qué región del planeta alcanza la cámara. En el uso de arquitecturas satelitales segmentadas también es sumamente útil 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 GNSS que 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 son de interés en este trabajo

las señales GPS L1, GPS L2 y GLONASS L1. Un receptor GNSS multibanda permite, en principio, resolver posición y velocidad con mayor precisión que uno monobanda [3].

## 2. Desarrollo y discusión

### 2.1 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 digital [4]. La etapa de RF, implementada parcialmente en el circuito integrado NT1065, 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 recibe las muestras, realiza las correlaciones necesarias para adquirir los satélites en línea de vista de 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 divisor de RF. Cada canal es filtrado con un filtro SAW (Surface Acoustic Wave) sintonizado para la banda de interés: un canal posee un filtro para banda GPS/GLONASS L1 y el otro para la banda GPS L2. Las señales filtradas ingresan a 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, dos bits por muestra que corresponden a la magnitud y signo de la muestra tomada de la señal de FI. Dichas muestras, junto a la señal de reloj de sincronismo del muestreo, ingresan a un SoC (System on Chip) sintetizado en un dispositivo lógico programable (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 se emplean 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 microsatélite, el diseño cuenta con una interfaz RS-422, una UART, una interfaz I2C y dos interfaces CAN. Con el objetivo de lograr compatibilidad mecánica con módulos comerciales para CubeSats el receptor sigue el factor de forma indicado en [5]. 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. Estos módulos se colocan uno encima de otro formando una estructura vertical. El número de módulos estipula el volumen que deberá tener el satélite que se mide en unidades de CubeSat (denominados U) siendo 1U el volumen mínimo equivalente a 10 cm x 10 cm x 10 cm. Pueden encontrarse 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 de las cuales cuatro son capas de señal, siendo dos de ellas internas, cuatro son planos de tierra para minimizar el acople inductivo y dos son planos de alimentación, utilizados para distribuir las tensiones necesarias por el receptor priorizando la integridad de señal [6]. 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 que es tipo BGA de 484 bolas. Todas las vías utilizadas son pasantes y poseen un diámetro de

agujero de 0.2 mm y una corona de 0.46 mm de diámetro. Para el caso de las líneas de entrada de antena, se fijó una impedancia característica de  $50\Omega$ . 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 verificar que el diseño no poseía 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. Finalmente, el diseño realizado fue fabricado y se ensambló parcialmente 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 a la izquierda un renderizado del diseño colocado en una estructura de un Cubesat de 1U y a la derecha una foto del prototipo construido.

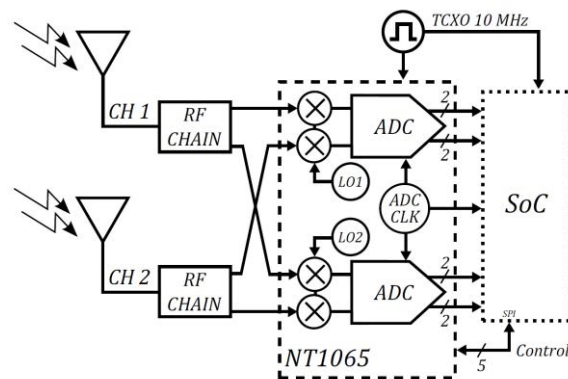


Figura 1 - Diagrama de bloques del diseño de hardware propuesto.

## 2.2. Diseño lógico del receptor

El diseño lógico integrado en la FPGA consta del procesador embebido LEON3 [7] 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

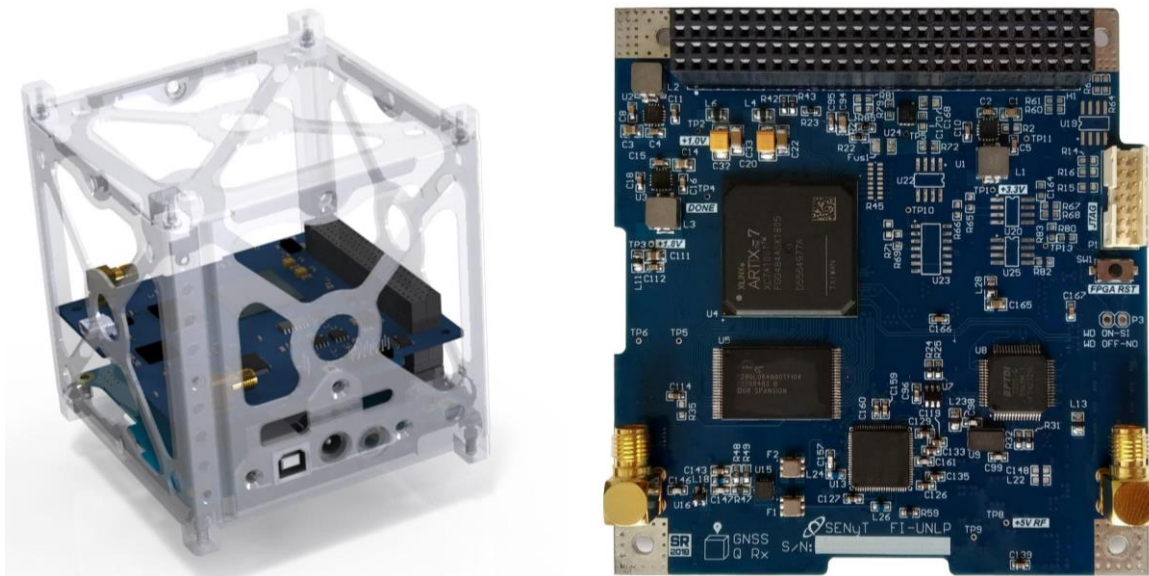


Figura 2 - Modelo del receptor en una estructura Cubesat (izq.). Foto del prototipo construido (der.).

dos grandes grupos: por un lado, se incluyen diversos periféricos provistos por las librerías de código abierto GRLIB [8], 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), un controlador de interfaz SPI 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 que permite obtener las mismas muestras que procesa el receptor para poder descargarlas y procesarlas de forma *off-line* en una PC [9]. Esta funcionalidad es muy útil 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 GPS/GLONASS en la banda de L1 y 12 canales independientes para señales de GPS en la banda de L2. 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 [10].

### 2.3. Resultados

Una vez integrado el prototipo se realizaron distintos ensayos para evaluar el funcionamiento eléctrico y realizar un análisis de la calidad de las señales GNSS que el receptor es capaz de adquirir.

#### 2.3.1 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. 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.

#### 2.3.2 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 por lo que se implementó un software 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.

#### 2.3.3 Ensayo 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 un periférico sintetizado en la FPGA [9] 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 pudo verificar la presencia de satélites en los sistemas analizados al visualizar los correspondientes picos de correlación.

### 2.3.4 Ensayo funcional

Para una prueba de funcionamiento del receptor en condiciones operativas se realizó un ensayo mediante un simulador de constelaciones GNSS en un escenario de simulación a bordo de un CubeSat de 2U en una órbita polar heliosincrónica. Esta órbita referencia fue generada en forma previa mediante un modelado de alta precisión de la dinámica del sistema y pasada luego al generador de señales, cuya salida fue conectada a una de las entradas de antena del receptor. Este último fue configurado en modo GPS L1/L2 con el fin de analizar los resultados de la navegación a bordo funcionando con una única frecuencia L1 y en el modo doble frecuencia. Se obtuvieron además las mediciones crudas de pseudorangs y fases de portadora para su posterior procesamiento offline en la llamada determinación precisa de órbita.

La Fig. 3 muestra el error de posición con respecto a la órbita referencia de las soluciones de navegación a bordo en modo simple y doble frecuencia, ambas basadas en pseudorangs. Puede observarse la presencia de errores sistemáticos en el modo simple frecuencia, producto del retardo ionosférico no corregido, ya que dicha corrección es válida solamente para receptores terrestres. En cambio, el uso de mediciones en doble frecuencia permite eliminar dicho retardo mediante el armado de la llamada combinación libre de ionósfera de pseudorangs y fases de portadora, a costa de un incremento en el ruido de las mediciones. Por último, con el objetivo de analizar la calidad de las mediciones crudas se realizó la determinación precisa de órbita basada en mediciones de pseudorangs y fases de portadora en doble frecuencia, logrando así una solución de órbita de alta precisión. Para este procesamiento se empleó un filtro/suavizador de Kalman extendido con un enfoque de dinámica reducida [11]. La Fig. 4 grafica los errores de posición y velocidad en el marco de referencia orbital radial-tangencial-normal.

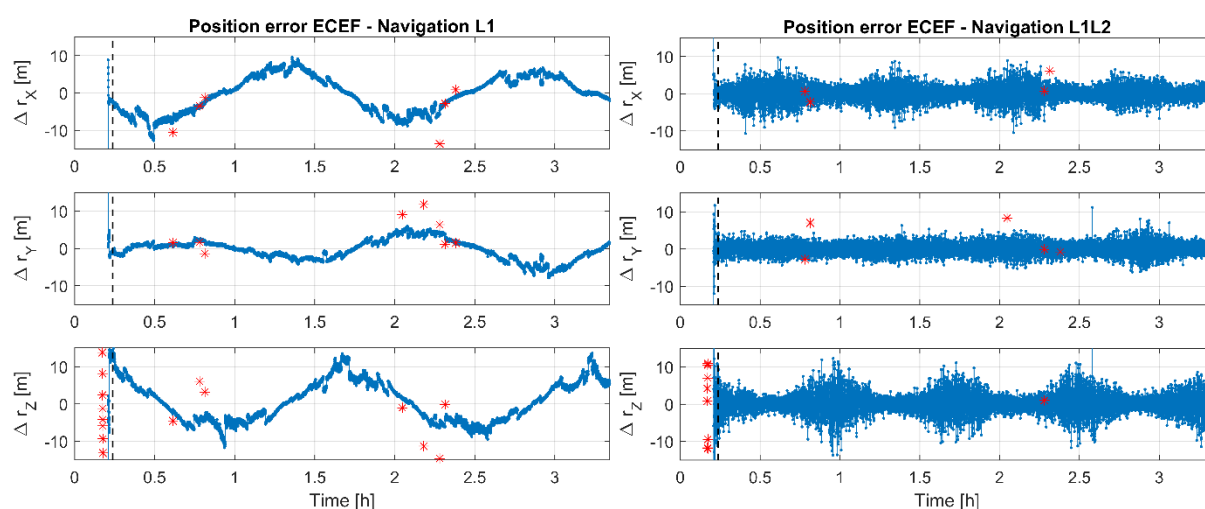


Figura 3 - Error en la solución de posición puntual a bordo de GPS L1 y GPS L1/L2. La línea punteada negra indica el tiempo de sincronización con el tiempo GPS. En rojo se marcan soluciones no validadas internamente.



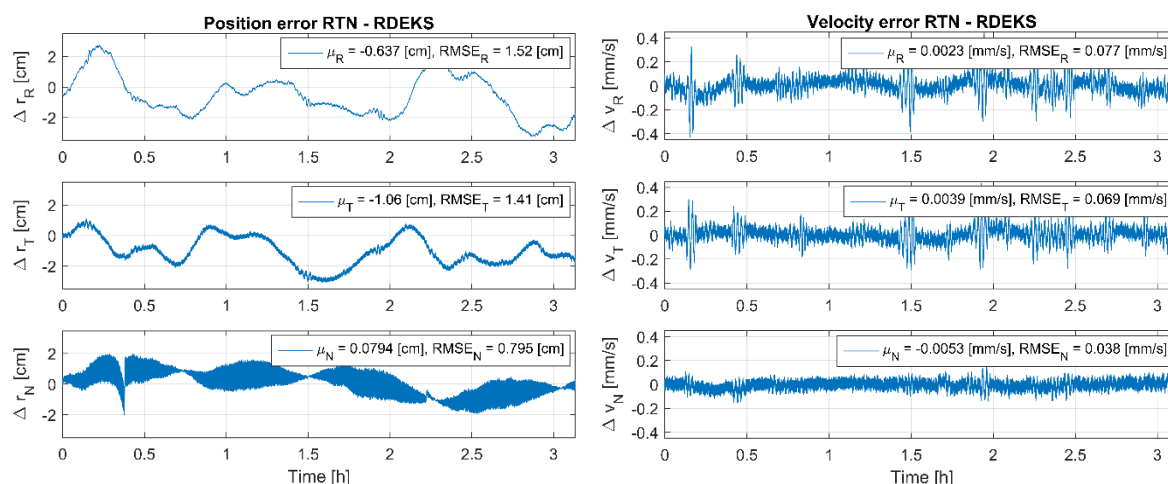


Figura 4 - Error de posición y velocidad en la determinación precisa de órbita.

Estos resultados permiten validar no solo el buen desempeño del receptor en las condiciones de funcionamiento en órbita, sino también verificar la alta calidad de las mediciones generadas, con vistas a su aplicación en misiones científicas que requieran de una solución de órbita con precisión del orden de los centímetros.

### 3. Conclusiones

Se presentó el diseño, construcción y validación parcial de un receptor GNSS doble antena y multifrecuencia orientado a CubeSats. Los ensayos realizados hasta el momento permitieron validar el diseño propuesto y verificar su correcto funcionamiento bajo la dinámica a la que se vería sometido en un satélite en órbita. El análisis de calidad de mediciones permite afirmar la aptitud del receptor para su uso en misiones satelitales con requerimientos de alta precisión. A su vez, estos ensayos sientan las bases para futuros ensayos más completos donde se utilicen ambas entradas de antena y un esquema multi-sistema.

### 4. Bibliografía

- [1] J. Cogo, R. G. López La Valle, G. L. Puga, J. A. Smidt, J. G. Díaz, J. G. García, P. A. Roncagliolo y C. H. Muravchik; "Receptor GNSS Multiantena Para Aplicaciones Aeroespaciales"; Segundas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión; FI-UNLP; 2013.
- [2] M. Swartwout, "The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look", Journal of Small Satellites, vol. 2, no. 2, pp. 213-233, 2013.
- [3] Kaplan, Elliot D. and Hegarty, Christopher J. (editores); *Understanding GPS: Principles and Applications*; Second Edition; Artech House; 2005.
- [4] Y. T. James Bao, *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A software approach*. Hoboken: John Wiley & Sons., 2005.
- [5] Pumpkin incorporated, "CubeSat Kit PCB Specification", 2003.
- [6] H. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons., 2009.
- [7] The SPARC Architecture Manual. SPARC International Inc, 1992.
- [8] GRLIB IP Library User's Manual, Cobham, 2018, Version 2018.1.
- [9] J. G. Díaz, G. Scillone, J.G. García, "Sistema de adquisición en FPGA para receptores SDR", 26° Congreso Argentino de Control Automático, AAECA'18, pág. 440-445. Buenos Aires, Argentina, 2018.
- [10] J. G. Díaz, P. A. Roncagliolo, J. G. García, "Canal de correlación de adquisición no-coherente GPS/GLONASS", XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2013, pág. 445-450. S. C. de Bariloche, Argentina, 2013.
- [11] O. Montenbruck, T. Van Helleputte, R. Kroes, E. Gill, "Reduced-dynamic orbit determination using GPS code and carrier measurements", Aerospace Science and Technology, 9(3), págs. 261-271, 2005.