

Misión USAT-I: Análisis de factibilidad de las aplicaciones de ciencia y diseño de sus antenas

Marranghelli Ezequiel A., Ozafrain Santiago, Smidt Javier A., Roncagliolo Pedro A.

*Sistemas Electrónicos de Navegación y Telecomunicaciones (SENYT),
Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.*

Contacto de autor correspondiente: santiago.ozafrain@ing.unlp.edu.ar

Resumen

USAT-I es el primer satélite en proceso de desarrollo en la Universidad Nacional de La Plata (UNLP, Argentina) del Programa Satelital Universitario, que planea el desarrollo de una serie de satélites pequeños, impulsado por el Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) de nuestra Facultad de Ingeniería, Centro con el cual nuestra UIDET SENyT mantiene una estrecha colaboración en este y otros proyectos aeroespaciales. Este primer satélite es un CubeSat 3U (30cmx10cmx10cm), y su misión es la demostración de la capacidad de desarrollo tecnológico para la utilización de señales de Sistemas de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS) en aplicaciones de sensado remoto mediante técnicas de radio-ocultación (GNSS-RO) y reflectometría (GNSS-R). Estas técnicas utilizan las señales transmitidas por los sistemas GNSS refractadas en la atmósfera o reflejadas en la Tierra para medir características de la ionósfera o de la superficie terrestre, como la humedad del suelo, vientos oceánicos, altimetría, entre otros. La mayor parte de la carga útil del satélite está siendo diseñada y desarrollada por estudiantes y profesionales de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, por lo que constituye un proyecto simultáneamente educacional y tecnológico.

Las técnicas de GNSS-R y GNSS-RO requieren de antenas de alta ganancia para lograr maximizar la potencia recibida de las señales con las que se estiman los parámetros geofísicos. Un CubeSat de 3U es claramente una plataforma pequeña y de recursos limitados en comparación a otros satélites de mayor escala, lo que impone restricciones en el diseño de estas antenas. El USAT-I no prevé contar con mecanismos de despliegue para las antenas de las aplicaciones de ciencia, y tres de sus caras se encuentran ocupadas por los paneles solares y por las antenas de comunicaciones y telemetría. Por lo tanto, las tres caras restantes son las utilizadas para las antenas GNSS-N (para la navegación del satélite), GNSS-R y GNSS-RO, las cuales son de tipo parche de microtira por ser las más apropiadas para este tipo de aplicaciones. Dado que las caras laterales son las de mayor superficie se reserva su uso para las antenas de aplicaciones de ciencia ya que admiten el uso de diseños basados en parches combinados a fin de aumentar la directividad/ganancia resultante. En condiciones normales el satélite tiene orientación vertical, con las caras más chicas orientadas al cenit y al nadir, de manera que puedan recibirse las señales GNSS que inciden mayormente alrededor del cenit en la antena GNSS-N y las de GNSS-RO desde direcciones rasantes o aproximadamente paralelas a la superficie terrestre. Como su cara inferior está reservada para las antenas de comunicaciones y telemetría, para capturar las señales GNSS-R provenientes de la superficie terrestre, se ha decidido incorporar un mecanismo de rotación que cambia su orientación y apunta la cara lateral de la antena GNSS-R hacia la Tierra. Un requisito adicional de diseño es la necesidad de contar con señales GNSS a doble frecuencia, y por ello las antenas como el receptor se diseñan acorde a fin de cumplir con esta condición.

El mayor potencial de la técnica GNSS-R se encuentra en su capacidad de capturar muchas reflexiones en simultáneo, logrando alta cobertura espacial. Las características de la antena receptora determinan el número de reflexiones capturadas a lo largo de la trayectoria del satélite. Por lo tanto, como parte del estudio de factibilidad de la misión USAT-I, se analiza la cobertura lograda con el diseño de antena de reflectometría propuesto. Este análisis se realiza mediante un simulador ad-hoc desarrollado en el SENyT que recrea la trayectoria del CubeSat basado en un modelo de órbita precisa para las condiciones realistas del USAT-I y calcula el número y las características geométricas de las reflexiones de las señales de los sistemas GNSS capturadas en función del patrón de radiación de la antena receptora. De esta manera, se logra realizar el relevamiento de la estadística de ocurrencia, duración y distribución espacial de potenciales eventos de interés. En este trabajo se presenta el diseño propuesto para las antenas de GNSS-R y GNSS-RO y sus parámetros más relevantes, que permiten conseguir la suficiente ganancia para obtener mediciones útiles, acompañado de los resultados de simulación que confirman una cobertura satisfactoria con reflexiones capturadas en más del 80 % del tiempo simulado con máximos de 5 eventos simultáneos.

I. INTRODUCCIÓN

El satélite universitario USAT-I es un CubeSat desarrollado en la Facultad de Ingeniería con la misión de realizar mediciones GNSS-R y GNSS-RO. En la Fig. 1 se muestra una representación del satélite. El mismo utiliza un receptor GNSS de diseño propio que es capaz de recibir y procesar las señales de navegación y de almacenar las de ciencia (GNSS-R y GNSS-RO). Está previsto que luego de la realización de un experimento, los datos recolectados se transmitan a Tierra por medio de varias estaciones terrenas distribuidas estratégicamente. El receptor ad-hoc a bordo tiene la capacidad de obtener las señales deseadas, y además determinar la solución puntual de navegación con una precisión menor a 10 m de error RMS en posición 3D, y menor a 1 m/s de error RMS en velocidad 3D. A su vez, también realiza la determinación de órbita precisa por medio de la medición de pseudorange y fase de portadora en doble frecuencia (L1C/A y L2C), lo que permite resolver posición 3D con un error RMS menor a 20 cm, y un error RMS en velocidad 3D menor a 0,2 mm/s. Estas características son necesarias para que puedan obtenerse resultados útiles al momento de procesar las mediciones de los experimentos de ciencia.

Para que la obtención de todas las señales GNSS sea posible, se debe tener en cuenta la geometría del problema, y en base a eso la definición de las especificaciones que las antenas del receptor deben cumplir. A continuación se definen las restricciones impuestas al diseño de las antenas.

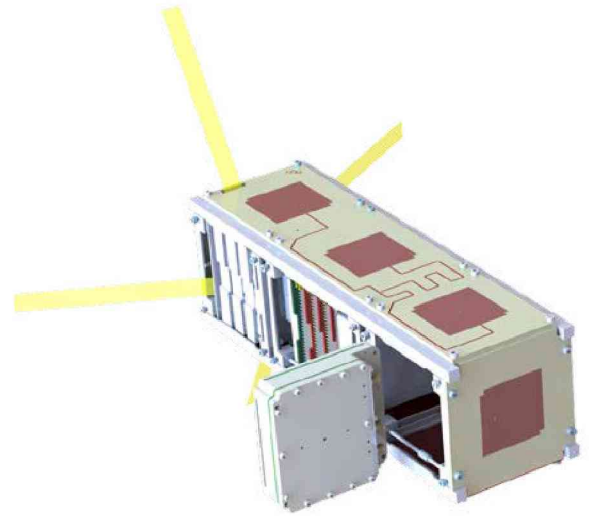


Fig. 1. Forma constructiva del USAT-I.

II. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LAS ANTENAS GNSS

II-A. Antena GNSS-N

Se requiere una antena de ganancia alta para maximizar la relación señal a ruido, pero con cobertura suficiente para adquirir la mayor cantidad de satélites GPS visibles. En la Fig. 2 se presenta una imagen descriptiva del esquema de funcionamiento. La opción más conveniente es una antena tipo parche ya que presenta una relación de compromiso adecuada entre ganancia y cobertura, puede diseñarse para operar con polarización circular con puerto único, puede sintonizarse en doble banda, y su volumen y masa son reducidos. Específicamente, se requiere que la misma opere con polarización circular a derecha (RHCP) [1] y que esté sintonizada para las bandas de GPS L1 (1575.42 MHz) y L2 (1227.6 MHz) [2]. La posición asignada para la antena es la cara -Z.

El diseño realizado consta de un PCB multicapa de dimensiones $100 \times 100 \times 3.2 \text{ mm}^3$, tal como puede observarse en la Fig. 1. La selección del material dieléctrico Rogers se debe a la gran estabilidad de sus propiedades eléctricas, baja tolerancia de fabricación, baja variabilidad con la temperatura, y de bajas pérdidas. El material específico RO4003C fue seleccionado por su buena relación de compromiso entre la eficiencia de radiación y las dimensiones admisibles en el satélite [3]. En tanto que el RO4450F es un material adherente que presenta menores pérdidas que el FR4 [4]. Las dimensiones, forma y alineación finales permiten obtener una antena adaptada a doble frecuencia, con polarización RHCP y con un puerto único. Los resultados obtenidos por simulación indican que la ganancia en la banda L1 es de 5,4dBiC, y en la banda L2 es de 4,6dBiC, con anchos de banda de 35MHz y 25MHz respectivamente. Además el ancho de haz de mitad de potencia obtenido ha sido de 90° . En la Fig. 2 pueden observarse los patrones de radiación resultantes.

II-B. Antena GNSS-R

Para esta antena se prioriza la ganancia más que la cobertura ya que las señales son mucho más débiles que por rayo directo. El impacto en utilizar antenas más directivas en la cobertura del sistema de reflectometría se discute en la Sección III. La opción más adecuada es una antena tipo parche basada en varios elementos interconectados.

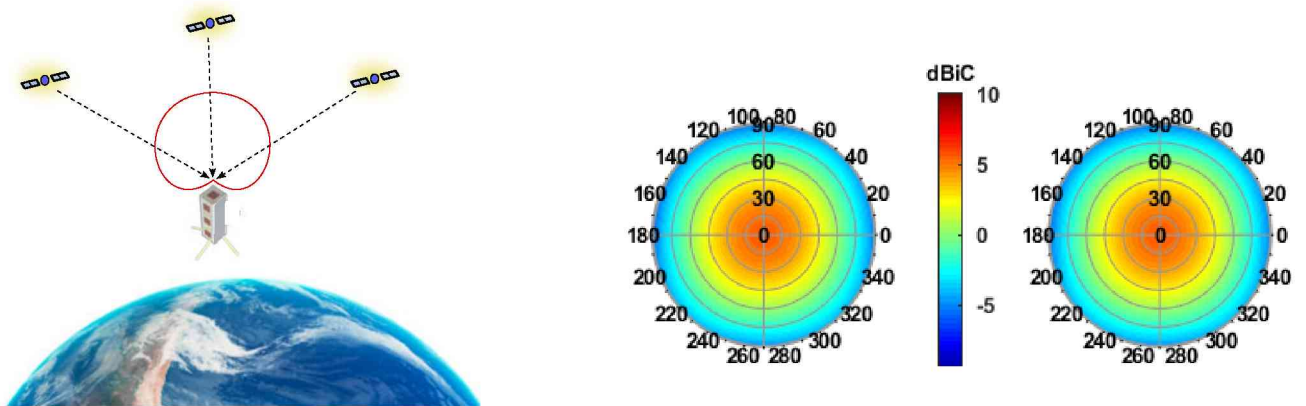


Fig. 2. (Izquierda) Esquema descriptivo del modo de funcionamiento para la adquisición de señales de navegación. (Derecha) Patrones de radiación para las bandas L1 y L2 de la antena GNSS diseñada.

En este caso, se requiere que la misma opere con polarización circular a izquierda (LHCP), ya que la reflexión modifica esta característica de la señal, y que también esté sintonizada para las bandas de GPS L1 y L2.

El espacio asignado a la antena de reflectometría [5] es la cara +X del CubeSat. Para la recepción de las señales la misma debe estar apuntando a la Tierra, lo cual se logra con un sistema de rueda de inercia incorporado en el satélite. Dado que la información útil de la técnica de reflectometría requiere disponer tanto de la señal reflejada como la directa de un mismo satélite GNSS, se requeriría de una antena adicional que cumpla la tarea de recibir las señales por camino directo. Aprovechando que el sistema cuenta con tres antenas capaces de recibir señales GNSS y que las antenas GNSS-R y GNSS-RO se encuentran en caras enfrentadas, se asigna esta función a la antena de radio-ocultación. En la Fig. 3 se presenta un esquema representativo de este modo de funcionamiento.

El diseño realizado consta de un PCB multicapa que aprovecha la superficie disponible a fin de maximizar la ganancia, por lo que sus dimensiones son $326,5 \times 83 \times 3,2 \text{ mm}^3$, tal como puede observarse en la Fig. 1. Las razones para la selección de los materiales empleados son la misma que para la antena de navegación. Las dimensiones, forma y alineación finales permiten obtener una antena adaptada a doble frecuencia y con polarización LHCP. El diseño propuesto consigue una ganancia en la banda L1 de 9,4dBic, y 8,1dBic en la banda L2, con anchos de banda de 35MHz y 25MHz respectivamente. Dado que el diseño consiste en un conjunto de parches alimentados em paralelo, el ancho de haz de mitad de potencia resultante es más angosto en el eje de alineación de los parches. El mismo es de 30° en esa dimensión, y de 90° en la otra. En la Fig. 3 pueden observarse los patrones de radiación resultantes.

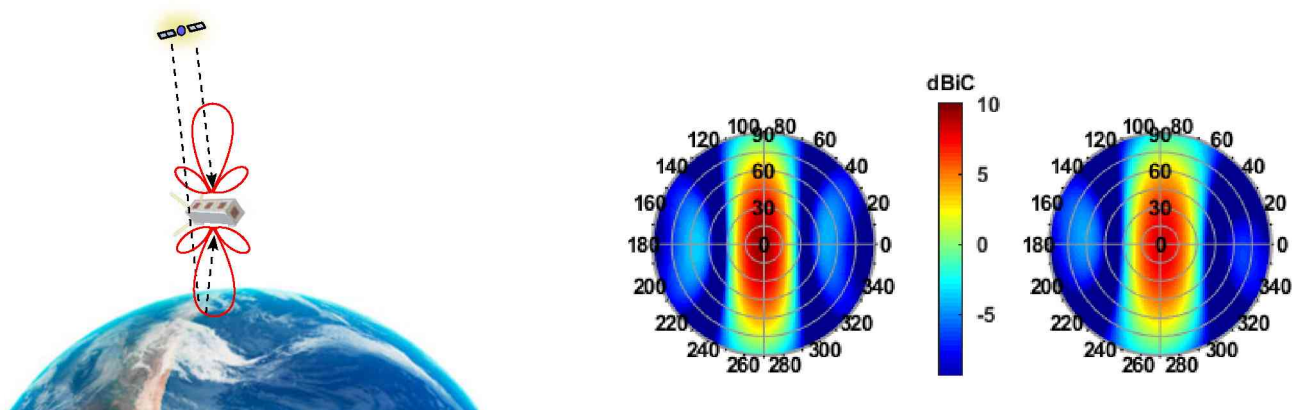


Fig. 3. (Izquierda) Esquema descriptivo del modo de funcionamiento para la adquisición de señales de reflectometría. (Derecha) Patrones de radiación para las bandas L1 y L2 de la antena GNSS-R diseñada.

II-C. GNSS-RO

Esta antena también debe ser de alta ganancia debido a que las señales son atenuadas por efectos atmosféricos y los largos caminos de propagación, y además el rango de visión es mucho menor ya que sólo son de interés las señales provenientes de direcciones rasantes a la Tierra [6]. La opción más adecuada es una antena tipo parche basada en varios elementos interconectados. En este caso, se requiere que la misma opere con polarización circular a derecha (RHCP) y que esté sintonizada para las bandas de GPS L1 y L2.

El espacio asignado a la antena de radio-ocultación es la cara -X del CubeSat ya que para la recepción de las señales la misma debe estar apuntando en direcciones rasantes a la Tierra. En la Fig. 4 se presenta un esquema representativo de este modo de funcionamiento. Cabe resaltar que además de obtener señales de radio-ocultación, esta antena también debe cumplir la función de recibir señales GNSS por camino directo al realizar experimentos de reflectometría (ver Fig. 3). Por lo tanto, la detección simultánea de las señales directas y reflejadas se logra si ambas antenas son prácticamente idénticas. En consecuencia, se ha resuelto utilizar un diseño similar a la antena GNSS-R, aunque con polarización RHCP. Los patrones de radiación resultantes se presentan en la Fig. 4.

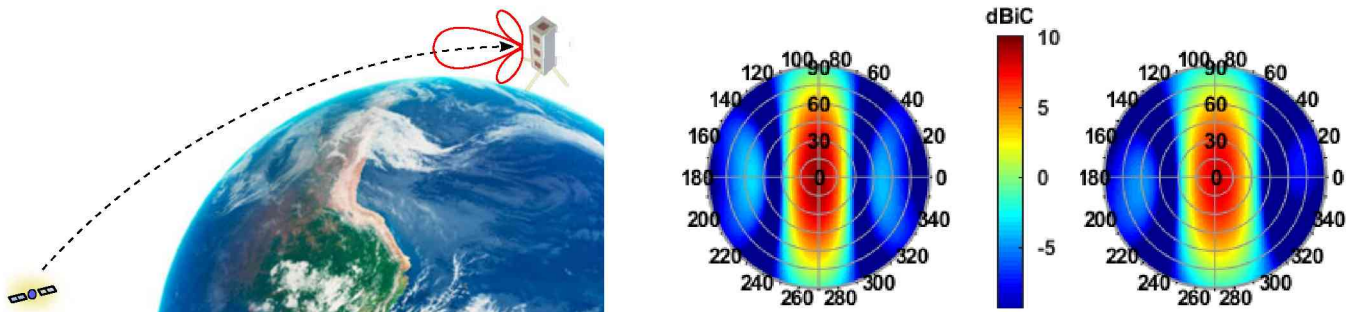


Fig. 4. (Izquierda) Esquema descriptivo del modo de funcionamiento para la adquisición de señales de radio-ocultación. (Derecha) Patrones de radiación para las bandas L1 y L2 de la antena GNSS-RO diseñada.

III. COBERTURA DE EVENTOS DE REFLECTOMETRÍA

Es de interés verificar que el diseño propuesto para las antenas de aplicaciones de ciencia es apropiado para los objetivos propuestos en la misión. En particular, la ganancia y apertura de antena tiene un impacto directo en la cobertura de eventos de reflectometría. Como se dijo previamente, es necesaria una alta ganancia debido a que las reflexiones de las señales GNSS llegan al receptor con una potencia muy baja. Las dimensiones del CubeSat imponen una restricción en la cantidad de elementos que componen al arreglo de antenas destinado a GNSS-R, lo que limita la ganancia máxima implementable. Por otro lado, la huella de la antena sobre la superficie de la Tierra determina la cantidad de reflexiones simultáneas capturadas y la duración de sus trayectorias. En esta sección se presenta un análisis de la cobertura de eventos de reflectometría basado en la simulación de la trayectoria del USAT-1 durante una semana utilizando el patrón de la antena receptora descrita en la Sección II-B.

III-A. Detalles de la simulación

La simulación se realiza con los parámetros de órbita nominal para el USAT-1, considerando variaciones debido al arrastre atmosférico y perturbaciones gravitacionales por armónico zonal J_2 . Se utilizaron datos de efemérides de 26 satélites GPS para las órbitas de la constelación. Con esta información y el modelo de Tierra WGS84, se pueden calcular los puntos sobre la superficie del planeta sobre el que impactan las señales transmitidas por los satélites GNSS y son reflejadas en dirección al CubeSat. Éstos se denominan puntos de reflexión especular y existen métodos numéricos para hallar su posición. En este trabajo se utilizó el simulador presentado en [7] desarrollado en nuestro lugar de trabajo. Por otro lado, utilizando el patrón de radiación de antena se determina su huella tomando como criterio los ángulos de apertura para los cuáles la ganancia cae 3 dB del máximo. Esto es aproximadamente

$\pm 15^\circ$ en la dirección de desplazamiento y $\pm 45^\circ$ en la dirección perpendicular. Si el punto de reflexión especular de una dada señal se ubica dentro de la huella de antena, entonces se declara que el receptor captura satisfactoriamente esa reflexión. De esta forma, se determina cuáles son las reflexiones recibidas por el USAT-1 a partir de los puntos de reflexión especular que yacen dentro de la huella para cada instante. Como resultado de la simulación, se almacena para cada señal capturada, la posición de su punto de reflexión especular, su ángulo de incidencia sobre la superficie de la Tierra, la ganancia de antena receptora, entre otros. La secuencia temporal de estos resultados para una señal reflejada en el intervalo de tiempo en el que su punto de reflexión especular permanece dentro de la huella de la antena receptora se almacenan en una trayectoria. La Fig. 5 muestra la posición de las trayectorias capturadas sobre la superficie de la Tierra durante un día de simulación.

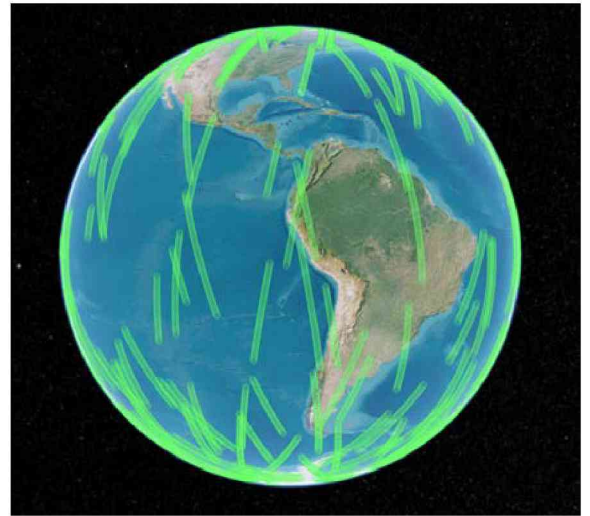


Fig. 5. Trayectorias capturadas durante 1 día.

III-B. Resultados de simulación de cobertura

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección anterior, se obtuvieron resultados para un período de siete días de simulación. La Fig. 6 (izquierda) muestra la cantidad de reflexiones simultáneas capturadas a lo largo del tiempo. Este parámetro depende directamente de la superficie abarcada por la huella de antena, es decir, de su apertura. Para el diseño propuesto se obtienen hasta un máximo de 5 reflexiones en simultáneo con un valor medio de 1.2 aproximadamente. El análisis estadístico de estos resultados indica que se capturan al menos una señal el 76 % del tiempo. La Fig. 6 (derecha) muestra el histograma normalizado de la duración de las trayectorias, es decir, el tiempo en el que el punto de reflexión especular de las reflexiones capturadas permanece dentro de la huella de antena. La duración media de las trayectorias es cercana a los 6 mins, con una desviación estándar de 1 min 30 segs.

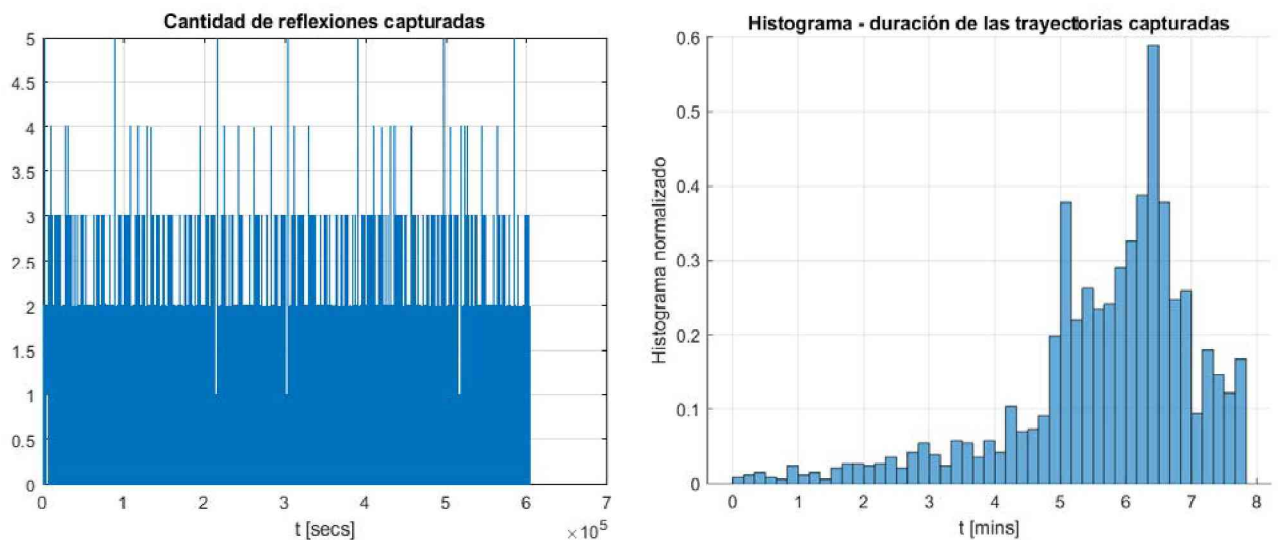


Fig. 6. (Izquierda) Número de reflexiones capturadas en cada instante. (Derecha) Histograma normalizado de duración de las trayectorias capturadas.

Por otro lado, también se calcularon los valores de ganancia de antena con los que se capturaron las distintas reflexiones. Esto se debe a que la ganancia máxima se encuentra en el centro de la huella, pero decae hacia sus límites. Estos resultados se muestran en el histograma de la Fig. 7. El valor de ganancia media es de 7.84 dB, el cual satisface los requerimientos de ganancia de antena mínima para una relación señal a ruido aceptable para su procesamiento según el estudio realizado en [8]. El trabajo citado analiza reflexiones sobre la superficie rugosa

del océano afectado por el viento. En reflexiones sobre otro tipo de superficies, como el suelo, hielo o aguas continentales, la potencia de la señal reflejada es aún mayor por lo que también podrían procesarse las de este tipo.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo del satélite universitario USAT-I es sumamente valioso para la demostración de la capacidad de desarrollo tecnológico, siendo la reflectometría y la radio-ocultación GNSS las aplicaciones de ciencia a cumplir en esta misión. El presente trabajo presenta el estudio de factibilidad para el cumplimiento de la misión. Tres de las caras del satélite están destinadas a las antenas de navegación y de ciencia, todas ellas destinadas a operar con señales GNSS. Los diseños presentados han sido realizados conforme a todas las restricciones de diseño más importantes, aprovechando todo el espacio disponible y la disposición óptima para maximizar la probabilidad de recepción. Debe tenerse en cuenta que además del diseño propio de las antenas es necesario analizar sus desempeños finales una vez ensamblado en el satélite. Las propiedades de radiación y en la eficiencia de las antenas cambian debido al efecto de los materiales propios de la estructura y a la interferencia mutua entre antenas contiguas dado que resuenan a las mismas frecuencias.

Además, como son antenas de banda muy angosta, debe considerarse que la tolerancia de fabricación y de los materiales es crítica para llegar a obtener las características de desempeño detalladas. Parte del desarrollo futuro incluye un análisis más detallado de estos aspectos.

Los resultados en el análisis de factibilidad para reflectometría indican que pese a las limitaciones constructivas que impone las dimensiones del CubeSat, se la cobertura de antena es aceptable para realizar ensayos útiles. Con la adquisición satisfactoria de registros de algunos minutos de duración que cuenten con al menos una reflexión con la relación señal a ruido apropiada, los mismos se pueden lograr procesar y así verificar el correcto funcionamiento del sistema completo y el potencial del mismo para aplicaciones de sensado remoto con señales GNSS a bordo de este tipo de nanosatélites, lo que podría dar un gran impulso al uso de estas técnicas. Cabe destacar que este desafío también lo están llevando adelante otros grupos de investigación y desarrollo, pero utilizando satélites de mayor dimensión y/o con antenas desplegadas [9].

Por parte de la aplicación de radio-ocultación, los estudios preliminares indican que es factible la detección de múltiples eventos a lo largo de un mismo día, y que la cobertura de la antena es apropiada para las direcciones de incidencia típicas. No es necesario realizar una maniobra de apuntamiento ya que en condiciones normales la antena se encuentra orientada al horizonte. Esto permite que el tiempo destinado a la recepción de señales de radioocultación pueda ser mayor que para reflectometría. Los eventos son de corta duración (sólo algunos segundos) con lo cual es menos probable que ocurran de manera simultánea. Como trabajo futuro, está previsto realizar un análisis más detallado de la capacidad de detección de eventos de radio-ocultación.

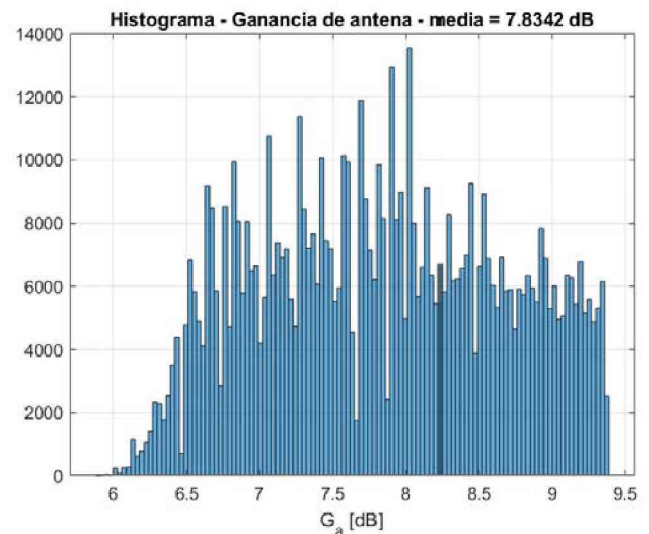


Fig. 7. Histograma normalizado de ganancia de antena receptora.

REFERENCIAS

- [1] Balanis, C. A. "Antenna theory: analysis and design". John Wiley & sons, 2015.
- [2] Kaplan, E. D. y Hegarty C., eds. "Understanding GPS/GNSS: principles and applications". Artech house, 2017.
- [3] RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B - Data Sheet
- [4] RO4400™ Series Bondply Data Sheet - RO4450F™ and RO4460G2™ Bondply
- [5] Jin, S., Cardellach E. y Xie, F. "GNSS remote sensing". Vol. 16. Dordrecht: Springer, 2014.
- [6] Gorbunov, M., Irisov, V., y Rocken, C. "The Influence of the Signal-to-Noise Ratio upon Radio Occultation Retrievals". Remote Sens. 2022, 14, 2742.
- [7] Sanz L., Scillone G. y Díaz J. G., "Radio Ocultación y Reflectometría GNSS en satélites de órbita baja". Trabajo final de grado para la carrera de Ingeniería Electrónica en Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 2021.
- [8] Ozafrain S., Roncagliolo P. A. y Muravchik C. H., "Sensado remoto con señales de GPS en satélite de órbita baja". XVI Reunión de trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC 2015), junio 2015.
- [9] Carreno-Luengo H. et al., "3Cat-2—An Experimental Nanosatellite for GNSS-R Earth Observation: Mission Concept and Analysis", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 9, no. 10, oct. 2016.