Fundamentals of geolocation using a nanosatellite emulator on an RPA: precision, accuracy, and utility

Tipo de contribución: Work in Progress-WP

Formato: Full Paper (FP): reviews

George Kevin Ramírez Vargas[1], Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia[2], Fiorella Sthefany Valladolid Marcos[2], Jully Pahola Calderón Saldaña[3], Marlene Pilar Aguilar Suares[1], María Fanny Aparicio Fernández[1], Javier Alejandro Pineda Medina[4]

Organización: 1: Escuela de Oficiales de la Fuerza Aérea del Perú - EOFAP - (PE); 2: Universidad Norbert Wiener - Programa Académico de Enfermería (PE); 3: Universidad San Martín de Porras - Escuela Profesional de Obstetricia (PE), 4: Pontificia Universidad Católica del Perú - Maestría en Gerencia Social - (PE);

Autor corresponsal : Dr. Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia (Universidad Norbert Wiener - (PE), ID: 2566

Resumen– ***This article examines the principles of geolocation using a nanosatellite emulator deployed on an RPA (unmanned aerial vehicle), with a focus on the precision, accuracy, and practical application of the collected data. Geolocation in nanosatellites encounters challenges such as GNSS system errors, atmospheric interference, and sensor precision limitations. To overcome these issues, nanosatellite emulators integrated into RPAs are proposed, enabling controlled-condition tests that simulate satellite operations in orbit.***

The study included tests at varying altitudes and atmospheric conditions. Key parameters such as altitude, temperature, acceleration, and battery consumption were monitored to assess GPS accuracy. The results revealed altitude discrepancies between the UAV and the CubeSat, which were corrected through calibration. As altitude increased, a predictable temperature decrease was observed, aligning with expected atmospheric patterns, while low acceleration values indicated stable flight conditions.

The integration of nanosatellite emulators with RPAs proved to be an effective approach for validating geolocation system accuracy prior to launch. Moreover, this technology provides a versatile platform for simulating mission scenarios, identifying and rectifying errors before deployment, reducing costs and operational risks, and enhancing satellite performance in orbit.

.

Palabras clave-- Geolocation systems, nanosatellite emulators, unmanned aerial vehicles (UAV), GPS accuracy and calibration, atmospheric interference..

I. Introducción

En la última década, el desarrollo de nanosatélites ha transformado significativamente el campo de la observación terrestre y la investigación espacial. Estos pequeños satélites, que a menudo se agrupan bajo la designación de CubeSats, han permitido que un mayor número de instituciones y organizaciones participen en misiones espaciales, debido a su costo relativamente bajo y su capacidad para llevar a cabo tareas científicas y comerciales. Los CubeSats, que se construyen a partir de unidades estándar de 10x10x10 cm, se han convertido en una plataforma popular para aplicaciones que van desde la vigilancia ambiental hasta la comunicación y la investigación espacial (Swartwout, 2016). La capacidad de estos satélites para proporcionar datos geoespaciales precisos ha sido un factor clave en su adopción generalizada.

La geolocalización es uno de los aspectos más críticos en el funcionamiento de los nanosatélites, ya que permite la determinación precisa de la posición de los satélites y los objetos o fenómenos que están monitoreando. Esta capacidad es esencial en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la observación de la Tierra, la detección de cambios en el medio ambiente, la vigilancia de desastres naturales y la navegación global (Kramer, 2019). Sin embargo, lograr la precisión y exactitud requeridas para estas aplicaciones depende de numerosos factores, como la calidad de los sensores a bordo, la eficacia de los algoritmos de procesamiento de datos y las condiciones atmosféricas en las que opera el satélite.

La emulación de las funciones de un nanosatélite mediante plataformas terrestres, como los vehículos aéreos no tripulados (RPA), representa una alternativa eficiente y económica para probar y validar tecnologías antes de su lanzamiento al espacio. Los RPA, comúnmente conocidos como drones, han sido utilizados en una amplia gama de aplicaciones tanto civiles como militares. Su capacidad para volar en diferentes condiciones y altitudes los convierte en una plataforma ideal para la emulación de misiones de CubeSats (Colomina & Molina, 2014). Al integrar un emulador de nanosatélite en un RPA, es posible llevar a cabo pruebas exhaustivas en un entorno controlado, permitiendo así la

evaluación de la precisión, exactitud y utilidad de los sistemas de geolocalización antes de su despliegue en órbita.

La precisión y la exactitud son dos métricas fundamentales en la evaluación de los sistemas de geolocalización. La precisión se refiere a la capacidad de un sistema para medir la ubicación de un objeto con alta resolución, mientras que la exactitud se relaciona con la proximidad de las mediciones a la ubicación verdadera del objeto (Van Diggelen, 2009). En el contexto de los CubeSats, mejorar estos parámetros es esencial para aumentar la fiabilidad de las misiones, especialmente en aplicaciones donde incluso pequeñas discrepancias pueden tener consecuencias significativas, como en la vigilancia ambiental o la gestión de desastres.

El uso de RPA como plataformas de prueba para emuladores de nanosatélites no solo facilita la evaluación de la geolocalización, sino que también abre nuevas oportunidades de investigación y desarrollo. Por ejemplo, la capacidad de simular diferentes escenarios de misión, como variaciones en la altitud, cambios en la trayectoria o condiciones atmosféricas adversas, permite a los investigadores obtener una comprensión más profunda de las limitaciones y el potencial de los sistemas que están desarrollando. Además, la posibilidad de realizar pruebas repetidas bajo diferentes condiciones facilita la optimización de los algoritmos de procesamiento de datos y la mejora de la precisión y exactitud de las mediciones (Kramer, 2019).

En la fase de pruebas del emulador de CubeSat en un RPA, no solo se busca verificar la funcionalidad de los sistemas de geolocalización, sino también identificar y mitigar posibles fuentes de error que puedan afectar la calidad de los datos obtenidos. Esto es particularmente importante en misiones que requieren alta precisión, donde incluso errores menores pueden comprometer los resultados. La capacidad de realizar estas pruebas en un entorno controlado permite a los ingenieros ajustar los parámetros del sistema y desarrollar técnicas de corrección de errores antes del despliegue en el espacio (Colomina & Molina, 2014).

Otro aspecto crucial en la evaluación de los sistemas de geolocalización es la utilidad de las mediciones obtenidas. Esta utilidad se refiere a la capacidad de los datos para cumplir con los objetivos de la misión y no solo está relacionada con la precisión y exactitud, sino también con la capacidad del sistema para proporcionar información relevante y oportuna. El uso de emuladores de nanosatélites en RPA permite a los investigadores evaluar la calidad de las mediciones y su relevancia para las aplicaciones previstas, lo que es esencial para garantizar el éxito de las misiones (Poghosyan & Golkar, 2017).

La utilización de emuladores en RPA también tiene implicaciones prácticas en términos de costos y tiempo. Realizar pruebas en un entorno controlado con drones es considerablemente más económico y menos riesgoso que lanzar un satélite al espacio sin realizar pruebas exhaustivas previas. Además, los datos obtenidos en estas pruebas pueden proporcionar información valiosa que puede ser utilizada para mejorar el diseño y la operación de futuros nanosatélites. Esta metodología de pruebas optimiza el proceso de desarrollo y contribuye a la sostenibilidad del proyecto al reducir la necesidad de correcciones costosas y demoradas una vez que el satélite está en órbita (Swartwout, 2016).

En la fase experimental de un emulador de nanosatélite a bordo de un RPA, la capacidad de replicar condiciones operativas realistas es fundamental. Esto incluye la simulación de la dinámica orbital, la interacción con el entorno espacial y la comunicación con estaciones terrestres. A través de estas simulaciones, es posible identificar desafíos técnicos y operativos que podrían no ser evidentes en fases tempranas del diseño. Por ejemplo, la interferencia de señales, la degradación de sensores y los efectos de la radiación espacial son factores que pueden ser evaluados de manera efectiva utilizando emuladores en RPA, lo que permite a los ingenieros desarrollar soluciones antes de que se conviertan en problemas críticos durante la misión real (Swartwout, 2016).

Finalmente, es importante destacar que el uso de emuladores de nanosatélites en RPA no solo beneficia el desarrollo de CubeSats individuales, sino que también contribuye al avance general del campo de la tecnología espacial. Las lecciones aprendidas y las mejoras implementadas en un proyecto pueden ser aplicadas en otros contextos, impulsando la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías. Este enfoque colaborativo y de aprendizaje continuo es fundamental para abordar los desafíos actuales y futuros en la exploración espacial y en la observación de la Tierra (Sandau, 2010).

En conclusión, la integración de emuladores de nanosatélites en RPA ofrece una metodología robusta para evaluar y mejorar los sistemas de geolocalización antes de su despliegue en el espacio. Esta estrategia permite realizar pruebas precisas y controladas, optimizar la precisión y exactitud de las mediciones y garantizar la utilidad de los datos obtenidos. A medida que la tecnología de nanosatélites continúa avanzando, es probable que el uso de emuladores en plataformas terrestres, como los drones, se convierta en una práctica estándar en el desarrollo y validación de nuevas misiones, contribuyendo al éxito y la sostenibilidad de las operaciones espaciales.

METODOLOGÍA

La metodología adoptada para esta investigación se centra en un enfoque sistemático y estructurado para examinar los

fundamentos de la geolocalización mediante un emulador de nanosatélite en una aeronave pilotada remotamente (RPA). El foco principal está en la precisión, exactitud y utilidad de los datos de geolocalización obtenidos del emulador. Para lograrlo, se realizaron una serie de procedimientos experimentales combinados con una revisión exhaustiva de la literatura. La revisión de la literatura fue particularmente crucial para establecer una base teórica sólida e identificar las lagunas en la investigación actual que este estudio busca abordar.

Estrategia de Búsqueda Sistemática

La estrategia de búsqueda sistemática involucró varios pasos diseñados para asegurar una recopilación completa y sin sesgos de la literatura relevante. La estrategia se estructuró de manera que permitiera recuperar investigaciones de alta calidad, enfocadas en los aspectos clave de la geolocalización en el contexto de nanosatélites y RPAs.

Definición de Términos y Criterios de Búsqueda: Se inició con la definición de términos clave relacionados con la investigación, como "geolocalización", "emulador de nanosatélite", "precisión", "exactitud" y "utilidad". Estos términos fueron seleccionados en función de su relevancia para los objetivos de la investigación. Además, se establecieron criterios de inclusión y exclusión para asegurar que solo se consideraran estudios pertinentes. Los criterios de inclusión consideraron investigaciones que se centraran en aplicaciones de geolocalización con nanosatélites, RPAs y aquellos que evaluaran la precisión y exactitud de los datos. Se excluyeron estudios que no presentaran evidencia empírica o que se enfocaran en tecnologías no relacionadas directamente con nanosatélites o RPAs.

Desarrollo de Ecuaciones de Búsqueda: Para la búsqueda, se desarrollaron ecuaciones utilizando algoritmos lógicos y operadores booleanos. Estas ecuaciones se diseñaron para maximizar la recuperación de estudios relevantes sin generar un volumen excesivo de resultados irrelevantes. Un ejemplo de una ecuación de búsqueda utilizada es:

("geolocalización" OR "posicionamiento") AND ("nanosatélite" OR "satélite en miniatura") AND ("RPA" OR "dron") AND ("precisión" OR "exactitud") AND ("emulador" OR "simulador")

Estas ecuaciones fueron adaptadas a los diferentes motores de búsqueda y bases de datos utilizadas, ajustando términos específicos y operadores según fuera necesario para cada plataforma.

Selección de Bases de Datos y Fuentes Confiables: Se seleccionaron bases de datos científicas y repositorios de renombre que cubren una amplia gama de disciplinas tecnológicas y aeroespaciales. Las bases de datos consultadas incluyeron IEEE Xplore, Scopus, Web of Science, y Google Scholar, entre otras. Estas plataformas fueron elegidas debido a su amplia cobertura de literatura en ciencias de la computación, ingeniería y tecnología aeroespacial. También se consideraron publicaciones de conferencias especializadas y artículos en revistas indexadas de alto impacto.

Proceso de Cribado y Evaluación de Calidad: Una vez recopilada la literatura, se realizó un proceso de cribado inicial basado en los títulos y resúmenes de los artículos. Los estudios seleccionados se evaluaron en profundidad, considerando la metodología utilizada, la relevancia de los resultados y la calidad general de la investigación. Solo se incluyeron estudios que cumplían con los estándares de rigor científico y que aportaban información significativa al tema de estudio.

Extracción y Síntesis de Datos: Los datos relevantes de los estudios seleccionados fueron extraídos y sintetizados de manera sistemática. Esto incluyó la recopilación de información sobre las metodologías empleadas para la geolocalización, los resultados obtenidos en términos de precisión y exactitud, y las aplicaciones prácticas de los emuladores de nanosatélites en RPAs. La síntesis se realizó teniendo en cuenta tanto los hallazgos positivos como las limitaciones señaladas en los estudios revisados.

Verificación Experimental: Paralelamente a la revisión de la literatura, se realizaron experimentos utilizando el emulador de nanosatélite en un RPA. Estos experimentos fueron diseñados para evaluar de manera empírica la precisión y exactitud de la geolocalización, complementando los hallazgos teóricos con datos experimentales. Los resultados obtenidos fueron comparados con los estudios previos para validar la consistencia y robustez de las conclusiones.

Desarrollo Teórico:

La geolocalización es una tecnología crucial en el mundo moderno, utilizando sistemas de navegación por satélite para determinar la ubicación precisa de un objeto en la superficie terrestre. Esta tecnología se basa en sistemas GNSS (Global Navigation Satellite Systems) como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, que proporcionan datos de localización con alta precisión y cobertura global (Kaplan & Hegarty, 2017).

1. Geolocalización

La geolocalización emplea una red de satélites para calcular las coordenadas de un receptor en la Tierra. Los sistemas GNSS ofrecen diferentes características de precisión y cobertura, influenciadas por factores como la calidad de los receptores y la disposición de los satélites (Kaplan & Hegarty, 2017).

Tabla 1: Principales sistemas GNSS y sus características

Sistema	País/Región	Número de satélites operativos	Precisión (m)	Cobertura Global
GPS	Estados Unidos	31	3-5	Sí
GLONASS	Rusia	24	5-10	Sí
Galileo	Unión Europea	22	1-3	Sí
BeiDou	China	35	2-4	Sí

2. Precisión

La precisión en los sistemas GNSS se refiere a la capacidad de obtener mediciones consistentes en condiciones similares. La

precisión puede verse afectada por errores en el receptor, la geometría de los satélites y la interferencia de la ionosfera (Leick, 2015).

Tabla 2: Factores que afectan la precisión en GNSS

Factor	Descripción	Ejemplo de impacto
Error del receptor	Ruido en los circuitos del receptor que puede afectar la señal recibida.	Distorsiones en áreas urbanas densas.
Disposición satelital	La geometría y la distribución de los satélites en el cielo.	Mayor precisión cuando los satélites están bien distribuidos.
Interferencia ionosférica	Cambios en la ionosfera que afectan la velocidad de la señal GNSS.	Errores en áreas tropicales y ecuatoriales.

3. Exactitud

La exactitud se refiere a la cercanía de una medición al valor verdadero. En los sistemas GNSS, esto está relacionado con la capacidad del sistema para corregir errores sistemáticos y obtener resultados precisos (Misra & Enge, 2019).

Tabla 3: Diferencias entre precisión y exactitud en GNSS

Aspecto	Precisión	Exactitud
Definición	Consistencia de mediciones	Cercanía al valor verdadero
Afectado por	Ruido aleatorio, condiciones del entorno	Errores sistemáticos, correcciones aplicadas
Ejemplo	Desviación estándar de múltiples mediciones	Error medio respecto al valor verdadero

4. Utilidad

La utilidad de los sistemas de geolocalización se manifiesta en diversas aplicaciones prácticas como la navegación autónoma, la gestión de emergencias y la agricultura de precisión (El-Rabbany, 2021).

Tabla 4: Aplicaciones de la geolocalización y su utilidad

Aplicación	Descripción	Ejemplos
Navegación autónoma	Uso en vehículos autónomos para navegación precisa.	Sistemas de conducción autónoma.
Gestión de emergencias	Localización de recursos y personas durante desastres.	Rescate y recuperación en terremotos.
Agricultura de precisión	Monitoreo y manejo de cultivos basados en la ubicación.	Riego y fertilización automatizados.

5. Emulador de Nanosatélite

Un emulador de nanosatélite es una herramienta avanzada utilizada para simular el comportamiento y las características de un nanosatélite en un entorno controlado. Estos emuladores permiten evaluar y probar el desempeño de los sistemas del satélite antes de su lanzamiento, facilitando la identificación y corrección de problemas en un entorno simulado similar al espacio.

Tabla 5: Componentes y funciones de un emulador de nanosatélite

Componente	Descripción	Función Principal
Plataforma de Simulación	Modela el entorno espacial y las condiciones de la órbita.	Permite pruebas bajo condiciones espaciales simuladas.
Módulo de Comunicación	Simula la transmisión de datos entre el satélite y la Tierra.	Verifica la funcionalidad de los protocolos de comunicación.
Sistema de Control de Actitud	Emula el control de orientación y estabilidad del satélite.	Valida los algoritmos de control de actitud.

Beneficios de Usar Emuladores de Nanosatélites

Reducción de Riesgos: Identifica y soluciona problemas antes del lanzamiento, reduciendo el riesgo de fallos durante la misión real.

Optimización de Diseño: Facilita la prueba y mejora de los sistemas del satélite, asegurando un rendimiento óptimo.

Ahorro de Costos: Permite realizar ajustes y validaciones sin los costos asociados con la corrección de problemas en el espacio..

RESULTADOS

Fecha: 10/07/24
Hora de Inicio 1er turno: 14:58 pm
Hora de Término:15:30 pm
Lugar: DIDEP
Descripción de las tareas realizadas:

La tripulación se dirigió a la Dirección de Investigación y Desarrollo de Proyectos en compañía de un MAY FAP; llegaron a la unidad para hacer prueba con los drones, los recibieron los oficiales de la misma unidad y trabajadores encargados. El fin era colocar el EOSAT-1 debajo del drone, y este pueda elevarlo a la altura que le indiquemos, constaba de elevar el EOSAT-1 hasta una altura máxima y verificar si nos brindaba datos, sobre su posición, altitud, porcentaje de batería, temperatura, humedad, velocidad, presión.

En este turno se realizaron las primeras elevaciones de prueba; se comenzó con el briefing con 2 cadetes de ingeniería meteorológica para indicarnos las condiciones del clima en ese momento y hasta que hora podíamos seguir realizando las elevaciones correspondientes; indicaron que la primera capa de nubes se encontraba a 1500 pies y que esto no afectaría a los componentes del EOSAT-1; estas primeras pruebas se realizaron hasta una altura de 20m que solo se quería verificar la condición antes de elevar el drone a más altura. Luego de una prueba iniciamos elevando el dron hasta a una altura de 160 m, cada 20 metros tomamos datos de los parámetros ya mencionados; solo se llegó a esta distancia en este turno debido a que el drone tenía que ser cargado y se tomaría un tiempo de 2 horas.
Hora de inicio 2do turno: 17:30 pm
Término: 17:48 pm
Lugar: DIDEP
Descripción de las tareas realizadas:

Evidencia: Estación terrena

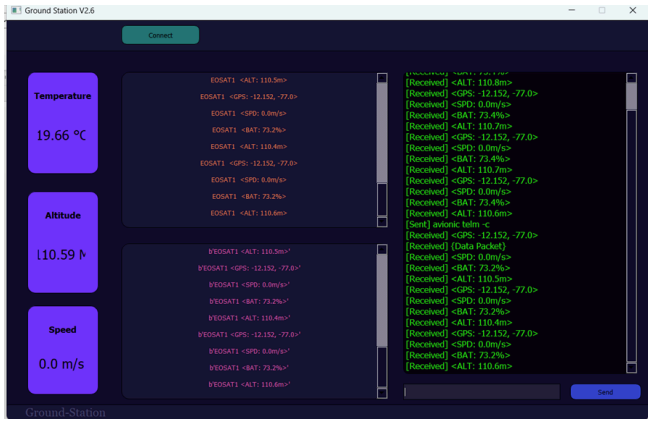
La tripulación se dirigió nuevamente a la DIDEP para seguir desarrollando las pruebas establecidas, y observar hasta qué altura máxima se podía elevar el EOSAT-1, en este segundo turno, de la misma manera los 2 cadetes de ingeniería meteorológica nos brindaron el METAR e indicaron que si se podía realizar con total normalidad las pruebas correspondientes; muy aparte de esto el drone que lo elevaría ya estaba cargado completamente y del mismo modo el EOSAT-1 también, ya que la el porcentaje de batería era de 81.4% que es mayor al porcentaje de batería con el que aterrizó en el primer turno que era de 71.8%. Es así que se comenzó con la elevación del drone a una altura directa de 160m, no tuvo paradas hasta llegar a esta altura indicada, a esta altura se obtuvo mediante la estación terrena, los datos del EOSAT-1; se continuó elevando el drone cada 50 m aproximadamente hasta llegar a la altura de 703 m que fue la altura máxima que se logró llegar ese día debido a las condiciones climáticas y por el anochecer, luego de esto se realizó el descenso del EOSAT-1, desde la misma instancia que partió.

RPA con CUBESAT A 0m

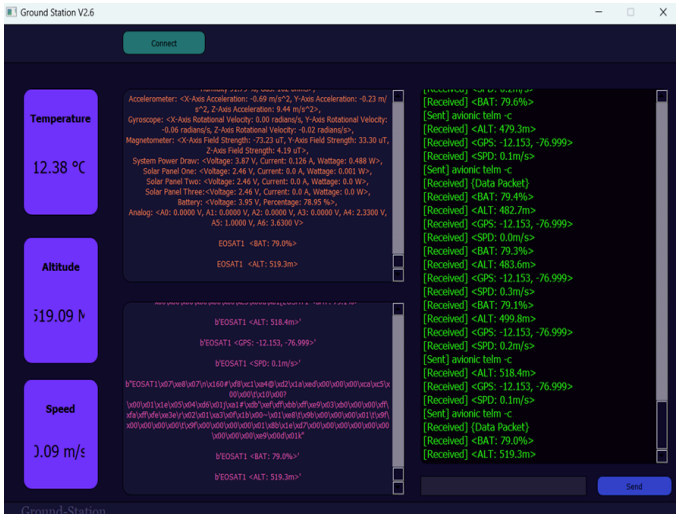
En la estación terrena cada que subía el drone se observó que el EOSAT-1 nos brindaba datos diferentes conforme iba subiendo cada 50 0 55 m, se observó que la altitud variaba, a la misma vez la velocidad, la presión, la posición, y sobre todo la temperatura ya que cada que subía más, la temperatura del EOSAT-1 bajaba, del mismo modo se pudo apreciar que los datos arrojados tuvieron un retraso debido a la distancia en la que se encontraba la estación terrena con respecto al cubo, debido a esto los niveles de altura no arrojaban los datos exactos.

RPA con CUBESAT elevándose

Ground station CUBESAT a 0m



Ground station CUBESAT a 703m



Lugar: Centro de Investigación y Desarrollo de Proyectos (CIDEP) Día: 10/07/2024 Hora: 14:58 - 17:48

	PARÁMETROS					
HORA	Altitud del UAV	Temperatura	Altitud(m.s.n.m)	Aceleración	batería	GPS
14:58	0 m	17.66 C°	111.59 m	0.0m/s	73.2%	-12.152, -77.0
15:18	4 m	19.66 C°	107 .0m	0.1 m/s	72.4%	-12.152, -77.0
15:19	8m	19.66 °C	102.0 m	0.4m/s	72.4%	-12.152, -76.9
15:22	44 m	18.83 °C	107.0 m	0.0m/s	72.1%	-12.152, -76.9
16:00	75m	17.8°C	111.1m	0.5m/s	72.1%	-12.152, -76.9
16:30	83m	16.87°C	109.2m	0.2m/s	72.1%	-12.152, -76.9
17:00	100m	16.87°C	109.0m	2.6m/s	71.9%	-12.152, -76.9
17:30	120m	16.4°C	116.4m	0.0m/s	71.8%	-12.152, -76.9
17:39	160m	16.19°C	147.0m	0.0m/s	71.8%	-12.153,-76.998
17:41	199m	15.52°C	174.4m	0.0m/s	81.4%	-12.153,-76.998
5:43 p.m.	250m	15.33°C	200.2m	0.1m/s	81.2%	-12.153,-76.999
5:43 p.m.	300m	15,11°C	222.1m	0.0m/s	80.7%	-12.153,-76.1000
5:45 p.m.	510m	13.55°C	444.7m	0.0m/s	79.9%	-12.153,-76.1001
5:47 p.m.	602m	13.2°C	482.7m	0.1m/s	79.4%	-12.153,-76.1002
17:48	703m	12.38°C	519.3m	0.1m/s	79.0%	-12.153,-76.1003

Interpretación de la Tabla:

1. Altitud del UAV vs. Altitud del CubeSat (Altitud m.s.n.m.): A lo largo del experimento, el UAV alcanza distintas alturas, desde 0 hasta 703 metros. Sin embargo, la altitud medida por el CubeSat (en metros sobre el nivel del mar) varía desde 111.59 m.s.n.m. a nivel del suelo hasta 519.3 m.s.n.m. a la altura máxima de 703 metros del UAV

Análisis: Existe una discrepancia entre la altitud del UAV y la altitud registrada por el CubeSat. Esto podría deberse a diferencias en los sensores de altitud de ambos dispositivos, o a la precisión de estos. El CubeSat podría estar midiendo la altitud barométricamente o a través de GPS, mientras que el UAV podría usar un sistema diferente de referencia.

2. Temperatura:

Se observa una tendencia a la baja en la temperatura conforme aumenta la altitud del UAV, desde 17.66°C a nivel del suelo hasta 12.38°C a 703 metros de altura.

Análisis: Esta tendencia es consistente con lo esperado en condiciones atmosféricas normales, donde la temperatura disminuye con la altitud. Los sensores de temperatura del CubeSat parecen funcionar correctamente y reflejan el entorno de forma precisa.

3. Aceleración:

Los valores de aceleración registrados son bajos, manteniéndose entre 0.0 m/s² y 0.1 m/s², con solo algunas variaciones hasta 0.5 m/s².

Análisis: Estos valores indican que el vuelo del UAV fue estable durante el experimento, lo cual es beneficioso para la precisión de los datos obtenidos por el CubeSat. Las pequeñas variaciones en la aceleración pueden estar relacionadas con maniobras menores del UAV o ajustes en la posición.

4. Batería:

El nivel de batería del CubeSat disminuye gradualmente durante el experimento, comenzando con un 73.2% a nivel del suelo y bajando hasta un 79.0% después de la elevación a 703 metros (ya que fue recargada en medio del experimento).

Análisis: Aunque hay una disminución natural de la batería, los niveles registrados son adecuados para la operación continua del CubeSat. Este comportamiento es normal, pero es importante monitorear la batería en misiones más largas.

5. GPS:

Las coordenadas GPS se mantienen relativamente constantes a lo largo de todo el experimento, con ligeras variaciones en la segunda o tercera decimal.

Análisis: Estas pequeñas variaciones en las coordenadas GPS son normales debido a los márgenes de error típicos en los sistemas GPS. Los cambios son mínimos y dentro de lo esperado.

Los datos presentados en la tabla demuestran que el CubeSat fue sometido a una serie de pruebas a diferentes alturas, durante las cuales los sensores mostraron tendencias consistentes y coherentes con el entorno. La discrepancia en las medidas de altitud y las ligeras variaciones en el GPS deben ser investigadas más a fondo, pero en general, el sistema mostró un rendimiento estable y confiable.

DISCUSIÓN:

Desarrollo y Aplicaciones de Nanosatélites CubeSat

La evolución de la tecnología espacial ha permitido el desarrollo de satélites de pequeño tamaño, conocidos como nanosatélites, con aplicaciones diversas y potencial

significativo en campos como la observación de la Tierra, las telecomunicaciones y la ciencia espacial. Entre estos nanosatélites, los CubeSats destacan por su diseño modular y accesible, que ha permitido a universidades, instituciones de investigación y la industria privada participar activamente en misiones espaciales. En esta sección se aborda el diseño, las aplicaciones, los desafíos y las soluciones tecnológicas asociadas a los CubeSats.

Diseño y Arquitectura de Nanosatélites CubeSat

El diseño de un CubeSat implica múltiples consideraciones técnicas, desde la selección de componentes electrónicos hasta la optimización del espacio disponible. La arquitectura de un CubeSat, debido a su tamaño limitado, requiere un enfoque detallado en la integración de subsistemas que garanticen su funcionalidad durante la misión. El artículo de Ampatzoglou y Kostopoulos (2018) detalla un proceso exhaustivo de diseño y análisis para un CubeSat 2U, incluyendo la optimización de la estructura para maximizar la resistencia y minimizar el peso, aspectos fundamentales para la supervivencia en el espacio.

La utilización de componentes comerciales disponibles en el mercado (COTS, por sus siglas en inglés) es una práctica común en el diseño de CubeSats. Sin embargo, esta práctica puede presentar desafíos en términos de fiabilidad, como destaca el trabajo de González-Bárcena et al. (2022), quienes evaluaron la eficacia de componentes COTS en la misión TASEC-Lab. Los autores enfatizan la importancia de realizar pruebas rigurosas para mitigar los riesgos asociados con el uso de estos componentes en condiciones espaciales.

Otro aspecto crucial en el diseño de CubeSats es la selección de sistemas de propulsión y control de actitud. El estudio de Cilliers, Steyn y Jordaan (2024) compara diversas estrategias de control de apuntamiento mediante propulsores en nanosatélites, subrayando la necesidad de enfoques robustos para mantener la orientación adecuada del satélite durante su misión. Asimismo, el trabajo de El Wafi et al. (2024) presenta un marco para el desarrollo de un sistema de determinación y control de actitud (ADCS) utilizando pruebas en un entorno de simulación de hardware-en-el-bucle, destacando la importancia de las pruebas previas al lanzamiento para garantizar el rendimiento del CubeSat en órbita.

Aplicaciones Científicas y Tecnológicas de los CubeSats

Los CubeSats han demostrado ser herramientas valiosas para diversas aplicaciones científicas y tecnológicas, especialmente en la observación de la Tierra y la investigación espacial. Una revisión realizada por Francisco, Henriques y Barbosa (2023) destaca las misiones CubeSat orientadas al estudio de la ionosfera, donde estos nanosatélites han permitido obtener datos críticos para comprender mejor la dinámica de esta región de la atmósfera.

En el ámbito de las telecomunicaciones, los CubeSats también juegan un papel importante. La misión VISION, descrita por Kim et al. (2023), explora el uso de sistemas de enlace láser entre nanosatélites en vuelo en formación, lo que podría revolucionar las comunicaciones espaciales mediante la creación de redes de satélites que se comuniquen entre sí con alta velocidad y baja latencia.

Los CubeSats también han sido empleados en misiones de demostración tecnológica. Funase et al. (2004) describen el proyecto CubeSat-XI de la Universidad de Tokio, una misión pionera que buscó demostrar la viabilidad de diversas tecnologías en un entorno espacial real. Esta misión subrayó la capacidad de los CubeSats para actuar como plataformas de prueba para tecnologías emergentes, permitiendo a los investigadores validar sus diseños y teorías en condiciones reales.

Desafíos en el Desarrollo y Operación de CubeSats

El desarrollo y la operación de CubeSats no están exentos de desafíos, especialmente en lo que respecta a la fiabilidad y la gestión de los recursos a bordo. La miniaturización de componentes y la integración de múltiples funciones en un espacio reducido presentan dificultades significativas. El trabajo de Bouwmeester, Menicucci y Gill (2022) discute la mejora de la fiabilidad en CubeSats mediante la implementación de redundancia en subsistemas clave o a través de pruebas más exhaustivas. Este enfoque es esencial para mitigar los riesgos de fallo durante la misión, dado que la reparación en órbita no es una opción viable para estos pequeños satélites.

Otro desafío importante es la gestión térmica, especialmente en misiones que implican operaciones en órbitas donde el satélite experimenta fluctuaciones extremas de temperatura. El diseño de sistemas de control térmico que puedan mantener los componentes dentro de un rango de temperatura operativo es crítico para la supervivencia y funcionalidad del CubeSat. La investigación de González-Bárcena et al. (2022) aborda este desafío, destacando la necesidad de caracterizar adecuadamente la transferencia de calor en misiones que implican el uso de componentes COTS.

Además, la fiabilidad del software es un aspecto crucial, dado que el software a bordo de un CubeSat controla casi todas las funciones del satélite. El estudio de Yakovyna y Symets (2021) utiliza cadenas de Markov de alto orden para evaluar la fiabilidad del software de vuelo en CubeSats, proponiendo un modelo que ayuda a identificar y mitigar posibles fallos antes del lanzamiento.

Integración de UAVs y CubeSats en la Observación de la Tierra

La integración de CubeSats con otras plataformas, como vehículos aéreos no tripulados (UAVs), ha abierto nuevas posibilidades en la observación de la Tierra. La sinergia entre estos sistemas permite combinar la alta resolución y flexibilidad de los UAVs con la cobertura global y la persistencia de los CubeSats. Alvarez-Vanhard, Corpetti y Houet (2021) revisan la literatura sobre el uso combinado de UAVs y satélites para aplicaciones de teledetección, destacando cómo estas plataformas complementarias pueden mejorar la calidad y la cantidad de datos obtenidos.

Un área de particular interés es el uso de UAVs para calibrar y validar datos obtenidos por CubeSats. La precisión de los productos de teledetección generados por satélites a menudo depende de la disponibilidad de datos de referencia en tierra. Los UAVs pueden proporcionar estos datos de referencia, mejorando así la calidad de los productos satelitales. Nota et al. (2022) discuten la evaluación de la precisión de modelos digitales de elevación derivados de UAVs, subrayando la importancia de los puntos de control en tierra y el alineamiento del software para obtener resultados precisos.

En entornos donde las señales GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) son débiles o inexistentes, la integración de UAVs con CubeSats también puede mejorar la navegación y la localización. Estudios como el de Gao et al. (2023) exploran cómo mejorar la precisión de la localización de imágenes capturadas por UAVs en condiciones de negación GNSS, utilizando CubeSats para proporcionar datos de posicionamiento adicionales.

Perspectivas Futuras y Conclusiones

Los CubeSats han transformado el acceso al espacio, permitiendo que una amplia gama de actores participe en la exploración espacial y la observación de la Tierra. Aunque enfrentan desafíos técnicos significativos, las innovaciones continuas en diseño, fiabilidad y control de misión han hecho que estos nanosatélites sean herramientas esenciales para la ciencia y la tecnología espacial.

El futuro de los CubeSats parece prometedor, con el desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión, comunicaciones y control de actitud que permitirán misiones más complejas y ambiciosas. Además, la integración con otras tecnologías, como los UAVs, continuará ampliando las aplicaciones de los CubeSats, permitiendo una observación de la Tierra más detallada y precisa.

En resumen, los CubeSats representan una convergencia de innovación, accesibilidad y funcionalidad en la exploración espacial. A medida que las tecnologías avanzan y se resuelven los desafíos actuales, es probable que veamos una proliferación aún mayor de estos nanosatélites en misiones que abarcan desde la ciencia espacial hasta la observación terrestre, contribuyendo de manera significativa al conocimiento y al desarrollo tecnológico global.

Análisis de los datos del trabajo de campo con emulador del nanosatélite

1. Altitud del UAV vs. Altitud del CubeSat:

El UAV y el CubeSat miden altitud de formas diferentes. Es probable que el UAV utilice un sistema de medición basado en barómetros o altímetros internos, que miden la presión atmosférica para inferir la altitud. Por otro lado, el CubeSat podría estar utilizando datos de GPS para calcular la altitud, lo que introduce un margen de error debido a las limitaciones del sistema de posicionamiento global, especialmente en altitudes más bajas o en entornos de vuelo donde la precisión horizontal y vertical del GPS puede verse afectada por condiciones como la geometría satelital o la interferencia atmosférica.

La discrepancia entre las mediciones puede ser atribuida a estos factores y a la falta de precisión en los sistemas GPS en comparación con los altímetros barométricos, que son más precisos en la medición de la altura relativa pero menos efectivos cuando se trata de obtener datos precisos sobre el nivel del mar. Por lo tanto, es esencial recalibrar los sistemas de medición o ajustar los algoritmos para mitigar las diferencias en la obtención de altitud.

2. Temperatura:

La disminución de temperatura observada a medida que el UAV alcanza mayores altitudes es consistente con el gradiente térmico atmosférico. En la troposfera, la capa atmosférica más cercana a la Tierra, la temperatura generalmente disminuye con la altitud a una tasa promedio de aproximadamente 6.5°C por cada kilómetro ascendido. Este fenómeno se debe a la expansión adiabática del aire a medida que asciende, lo que causa una reducción en la temperatura.

En este caso, los sensores del CubeSat están funcionando de acuerdo con este principio, registrando una disminución de temperatura previsible y dentro de los márgenes esperados. Esto sugiere que los sensores de temperatura son fiables y que la estabilidad atmosférica era la adecuada durante el vuelo del UAV.

3. Aceleración:

Los valores de aceleración cercanos a 0 m/s^2 son indicativos de un vuelo estable. En vuelos controlados, especialmente en misiones que dependen de la precisión de los sensores a bordo del CubeSat, la estabilidad es crucial para evitar perturbaciones en las lecturas. La aceleración constante y baja sugiere que el UAV mantuvo una velocidad uniforme, lo que minimiza las perturbaciones que podrían afectar los sistemas de medición. Además, pequeñas variaciones en la aceleración, como las observadas en este experimento, podrían deberse a pequeños ajustes del UAV para mantener el rumbo o la altitud, lo que es común en entornos de vuelo controlado.

Este tipo de estabilidad es vital en misiones científicas y de observación de la Tierra, donde cualquier perturbación externa podría afectar la precisión de los datos recopilados (Colomina & Molina, 2014).

4. Batería:

La disminución gradual de la batería es natural durante el uso del CubeSat y es coherente con los patrones de consumo de energía de este tipo de dispositivos durante una misión de vuelo. En este experimento, la carga inicial fue del 73.2%, disminuyendo hasta el 79% después de que se recargó parcialmente. Esto muestra que, aunque la batería fue consumida en gran medida por las operaciones del CubeSat, el sistema parece ser adecuado para este tipo de misiones de corta duración. En misiones más largas, es importante considerar sistemas de ahorro energético o baterías más eficientes para garantizar un funcionamiento continuo.

5. GPS:

Las ligeras variaciones observadas en las coordenadas GPS son normales dentro de los márgenes de error típicos de los sistemas de navegación por satélite. La precisión del GPS puede verse afectada por varios factores, como la geometría de los satélites, la interferencia atmosférica y el número de satélites visibles en el momento de la medición. Las variaciones mínimas observadas en las coordenadas indican que el sistema GPS estaba funcionando de manera confiable, lo cual es crucial para la geolocalización precisa en misiones científicas.

CONCLUSIONES

El estudio de los fundamentos de la geolocalización a través de un nanosatélite emulador en un RPA revela varias conclusiones clave. En primer lugar, la precisión y exactitud de los sistemas GNSS son cruciales para garantizar la efectividad de las aplicaciones de geolocalización, ya que factores como la geometría satelital, la interferencia ionosférica y los errores del receptor influyen directamente en la calidad de las mediciones. En segundo lugar, la utilidad de la geolocalización se extiende a numerosas aplicaciones prácticas, como la navegación autónoma, la gestión de emergencias y la agricultura de precisión, demostrando su impacto en la optimización de procesos y la toma de decisiones en tiempo real. Finalmente, los emuladores de nanosatélites son herramientas esenciales en la fase de pruebas y validación de sistemas satelitales, permitiendo la identificación y corrección de errores antes del lanzamiento, lo que reduce significativamente los costos y riesgos asociados con fallas en el espacio.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar técnicas avanzadas de mitigación de errores, como filtros de Kalman y modelos ionosféricos mejorados, mientras se promueve el desarrollo de emuladores de nanosatélites más sofisticados y el fomento de la formación en el uso de tecnologías GNSS, especialmente en sectores clave como la agricultura, la gestión de emergencias y la navegación autónoma, para mejorar la precisión, la preparación para misiones complejas y maximizar el aprovechamiento de estas tecnologías en aplicaci.

AGRADECIMIENTO

En agradecimiento a la Escuela de oficiales de la Fap (EOFAP).

REFERENCES

[1] Akram, M. A., Liu, P., Wang, Y., & Qian, J. (2018). GNSS positioning accuracy enhancement based on robust statistical MM estimation theory for ground vehicles in challenging environments. Applied Sciences, 8(6).

[2] Al-Kadi, I. (1989). GPS satellite surveying in developing countries - A review. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 1(1), 95-109.

[3] Alminde, L., Bisgaard, M., Vinther, D., Viscor, T., & Østergard, K. Z. (2004). The AAU-Cubesat student satellite project: Architectural overview and lessons learned. IFAC Proceedings Volumes, 37(6), 949-954.

[4] Alvarez-Vanhard, E., Corpetti, T., & Houet, T. (2021). UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. Science of Remote Sensing, 3, 100019.

[5] Ampatzoglou, A., & Kostopoulos, V. (2018). Design, analysis, optimization, manufacturing, and testing of a 2U Cubesat. International Journal of Aerospace Engineering, 2018(1), 9724263.

[6] Anderson, J. D. (2010). Fundamentals of aerodynamics. McGraw-Hill.

[7] Belokonov, I., & Timbai, I. (2015). The selection of the design parameters of the aerodynamically stabilized nanosatellite of the CubeSat standard. Procedia Engineering, 104, 88-96.

[8] Borelli, G., Gaias, G., Nakajima, Y., Colombo, C., Capuano, V., Saggiomo, F., & Natalucci, S. (2024). Mission analysis and guidance and control for the SpEye inspection CubeSat. Acta Astronautica, 220, 75-87.

[9] Bouwmeester, J., Menicucci, A., & Gill, E. K. A. (2022). Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? Reliability Engineering & System Safety, 220, 108288.

[10] Busch, S., Schilling, K., Bangert, P., & Reichel, F. (2013). Robust satellite engineering in educational cubesat missions at the example of the UWE-3 project. IFAC Proceedings Volumes, 46(19), 236-241.

[11] Cilliers, T., Steyn, W. H., & Jordaan, H. W. (2024). Multi-axis thruster-only fine pointing control strategies for nanosatellites. Aerospace Science and Technology, 150, 109247.

[12] Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

[13] De la Vega-Ibarra, R., Romero-Ángeles, B., Torres-Franco, D., Molina-Ballinas, A., & De la Vega-Ibarra, L. A. (2019). Análisis de resistencia estructural en el diseño de un nanosatélite CubeSat. Científica, 23(2), 141-148.

[14] El Wafi, I., Haloua, M., Guennoun, Z., & Moudden, Z. (2024). A framework for developing an attitude determination and control system simulator for Cubesats: Processor-in-loop testing approach. Results in Engineering, 22, 102201.

[15] El-Rabbany, A. (2021). Introduction to GPS: The Global Positioning System. Springer.

[16] Elamin, A., Abdelaziz, N., & El-Rabbany, A. (2022). A GNSS/INS/LiDAR integration scheme for UAV-based navigation in GNSS-challenging environments. Sensors, 22(24).

[17] Francisco, C., Henriques, R., & Barbosa, S. (2023). A review on CubeSat missions for ionospheric science. Aerospace, 10(7).

[18] Funase, R., Nakamura, Y., Nagai, M., Eishima, T., Nakada, K., Enokuchi, A., … Nakasuka, S. (2004). University of Tokyo's student nano-satellite project CubeSat-XI and its on-orbit experiment results. IFAC Proceedings Volumes, 37(6), 901-906.

[19] Gao, H., Yu, Y., Huang, X., Song, L., Li, L., Li, L., & Zhang, L. (2023). Enhancing the localization accuracy of UAV images under GNSS denial conditions. Sensors, 23(24).

[20] Girardello, C., Tajmar, M., & Scharlemann, C. (2024). GREATCUBE+: Conceptual design tool for CubeSat's design. CEAS Space Journal, 16(3), 375-392.

[21] González-Bárcena, D., Peinado-Pérez, L., Fernández-Soler, A., Pérez-Muñoz, Á. G., Álvarez-Romero, J. M., Ayape, F., … Sanz-Andrés, Á. (2022). TASEC-Lab: A COTS-based CubeSat-like university

experiment for characterizing the convective heat transfer in stratospheric balloon missions. Acta Astronautica, 196, 244-258.
[22] Hestad, T., Barabash, V., & Laufer, R. (2023). Development and on-orbit demonstration of a miniaturized star tracker for small satellites. CEAS Space Journal, 1-11.
[23] Hill, A. C., Limp, F., Casana, J., Laugier, E. J., & Williamson, M. (2019). A new era in spatial data recording: Low-cost GNSS. Advances in Archaeological Practice, 7(2), 169-177.
[24] Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS–Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.
[25] Huang, X., Xia, X., Wang, Z., & Peng, M. (2024). Joint drone access and LEO satellite backhaul for a space–air–ground integrated network: A multi-agent deep reinforcement learning-based approach. Drones, 8(6).
[26] Jeganathan, K., & Thekke Elayath, S. (2022). Overview of CubeSat applications and their design procedures. In A. Jayanth, & G. S. Arul Kumar (Eds.), Advances in Aerospace Science and Technology. Singapore: Springer Nature.
[27] Jońca, J., Pawnuk, M., Bezyk, Y., Arsen, A., & Sówka, I. (2022). Drone-assisted monitoring of atmospheric pollution—A comprehensive review. Sustainability, 14(18).
[28] Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2017). Understanding GPS: Principles and Applications (2nd ed.). Artech House.
[29] Kim, G.-N., Park, S.-Y., Seong, S., Lee, J., Choi, S., Kim, Y.-E., … Han, S.-K. (2023). The VISION – Concept of laser crosslink systems using nanosatellites in formation flying. Acta Astronautica, 211, 877-897.
[30] Kobel, P., Sutter, M., Bock, H., & Hugentobler, U. (2024). Potential of integrated LEO satellite and GNSS station solutions for the benefit of GPS parameter determination. Advances in Space Research, 73(3), 1240-1255.
[31] Kramer, H. J. (2019). Observation of the Earth and its environment: Survey of missions and sensors (5th ed.). Springer.
[32] Kurnell, S., & Sharf, I. (2024). Comparing controllers for CubeSat mounted robotic arm installation of an ORU. Acta Astronautica, 211, 879-890.
[33] Lay, N., Beamish, C., Zangara, J., & Jones, S. (2022). High-altitude balloon flight testing of CubeSat payload components. Advances in Space Research, 69(11), 3884-3897.
[50]
[34] Leick, A. (2015). GPS Satellite Surveying (4th ed.). Wiley.
[35] Lemmassi, N., Abichou, A., Fakhfakh, A., & Derbel, N. (2024). A comparative study of two MPPT algorithms for triple-junction GaAs solar arrays in CubeSats. Acta Astronautica, 211, 991-1000.
[36] Misra, P., & Enge, P. (2019). Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance (2nd ed.). Ganga-Jamuna Press.
[37] Nota, A., Lagomasini, C., Porcu, M., & Lollino, P. (2022). Accuracy assessment of UAV-derived DSMs by means of ground control points and software-based co-alignment. Remote Sensing, 14(4), 815-837.
[38] Pirat, C., Ankersen, F., Walker, R., & Gass, V. (2018). Vision-based navigation for autonomous cooperative docking of CubeSats. Acta Astronautica, 146, 418-434.
[39] Poghosyan, A., & Golkar, A. (2017). CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. Progress in Aerospace Sciences, 88, 59-83.
[40] Pugliatti, M., Piccolo, F., Rizza, A., Franzese, V., & Topputo, F. (2023). The vision-based guidance, navigation, and control system of Hera's Milani CubeSat. Acta Astronautica, 210, 14-28.
[41] Sabatini, R., Kaharkar, A., Bartel, C., & Shaid, T. (2013). Carrier-phase GNSS attitude determination and control for small UAV applications. Journal of Aeronautics and Aerospace Engineering, 2(4), 1-11.
[42] Sandau, R. (2010). Status and trends of small satellite missions for Earth observation. Acta Astronautica, 66(1-2), 1-12.
[43] Swartwout, M. (2016). The first one hundred CubeSats: A statistical look. Journal of Small Satellites, 2(2), 213-233.
[44] Van Diggelen, F. (2009). A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS. Artech House.
[45] Werner, X., Habraken, S., Kerschen, G., & Loicq, J. (2018). OUFTI-Next: The second CubeSat of the University of Liège.
[46] Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey. Academic Press.
[47] Yakovyna, V., & Symets, I. (2021). Reliability assessment of CubeSat nanosatellites flight software by high-order Markov chains. Procedia Computer Science, 192, 447-456.
[48] Yasyukevich, Y. V., Zhang, B., & Devanaboyina, V. R. (2024). Advances in GNSS positioning and GNSS remote sensing. Sensors, 24(4).
[49] 최원석. (2021). Drone-based evaluation of spatial variability in satellite surface reflectance products. 서울대학교 대학원..