



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar los valores trascendentales", misión de las universidades en su artículo primero, inspirado en los principios humanísticos. Ley de Universidades 8 de septiembre de 1970.

Development of a method to determine the location of a nanosatellite using ADS-B

*Sergey Frolov¹ , Olga Chadrina^{*2} , Evgeny Titenko¹ , Aleksey Shitov¹ ,
Khanis Andrey³ , Teterin Dmitry⁴ , Gorbunov Andrey¹ *

¹Research Institute of Radioelectronic Systems, Southwest State University, 305040, Kursk, Russian Federation.

²Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Universidad UTE, Quito, Ecuador

³Department of Information Security, Southwest State University

⁴JSC Aviaavtomatika named after V.V. Tarasov, 305040, Kursk, Russian Federation

*Autor Contacto: olga.chadrina@ute.edu.ec

<https://doi.org/10.22209/rt.ve2020a07>

Recepción: 31/10/2019 | Aceptación: 31/01/2020 | Publicación: 01/03/2020

Abstract

The methods used to determine the position of the Cubesat, have important disadvantages, especially when they are in areas without coverage, which is an inconvenience especially for the control. An alternative method is to determine the position of the Cubesat using the ADS-B sensors installed on aircraft and ships; that is, a method that uses mobile references and that are also available all the time. This work allows to ensure that the Cubesat effectively determine their position using the location transmitted by the aircraft, using a signal triangulation method. The calculations show that the proposed method is viable and that the accuracy can be improved by adding new reference sources and narrowing the area of signal intersection.

Keywords: Aircraft, ADS-B; Earth; Nanosatellite; Cubesat

Desarrollo de un método para determinar la ubicación de un nanosatellite utilizando ADS-B

Resumen

El método para calcular las coordenadas aproximadas de ubicación del Cubesat, utilizando los datos históricos de vuelo, tiene un error bastante alto; ya que no considera las características geofísicas de la trayectoria de vuelo. Como regla general, las desviaciones en los cálculos están asociadas con la alta velocidad del vuelo a lo largo de toda la órbita, la limitada área de cobertura del Cubesat sobre la superficie de la tierra (2000-3000 km²) y la dependencia simultánea de la ubicación de los puntos de referencia sobre la superficie de la tierra y la del Cubesat en el espacio. El objetivo del estudio fue desarrollar un método que permita determinar la posición del Cubesat, mediante la recepción de la posición de aeronaves y buques que utilizan ADS-B. Los cálculos demuestran el método y algoritmo propuestos pueden calcular no solamente la posición del Cubesat, sino también determinar su trayectoria. Esta circunstancia permitirá a futuro dejar de utilizar los datos orbitales enviados desde las estaciones radar para determinar la posición de un Cubesat.

Palabras clave: Aeronaves, ADS-B; Tierra; Nanosatélite; Cubesat

Introducción

La aparición de los nanosatélites del tipo Cubesat representa el desarrollo natural de la tecnología aeroespacial. El lanzamiento de los Cubesat en comparación con otros satélites o estaciones espaciales es más económico [1].

Entre las áreas prometedoras de aplicación de los Cubesat, se encuentran las relacionadas con la teledetección de la Tierra, el monitoreo a territorios y seguimiento continuo de objetos que se desplazan sobre la superficie de la tierra.

Sin embargo, las naves espaciales modernas y los Cubesat tienen limitadas capacidades para evaluar y gestionar su propia ubicación, por ejemplo, tienen una cantidad limitada de ciclos carga/descarga de las baterías, las limitaciones de peso hacen que la carga útil lanzada al espacio, no permita resolver las tareas de teledetección de objetos sobre la Tierra. En la mayoría de los casos, las restricciones de masa y tamaño de los Cubesat, no permiten que se implemente un sistema de estabilización activo, por esta razón no pueden determinar su ubicación a partir de los mapas de estrellas del cielo, o de imágenes de la superficie terrestre [2]. Estos requerimientos impuestos al diseño y funcionamiento determinan que los sistemas de control de los Cubesat, adquieran mayor importancia, ya que deben garantizar la determinación continua de su propia ubicación y además determinar las coordenadas de los objetos en la tierra a los cuales realiza seguimiento.

Para determinar la posición de un Cubesat, se utiliza diferentes métodos, algoritmos y/o combinaciones entre ellos, que requieren altos niveles de cálculo computacional. La mayoría utilizan coordenadas de referencia pertenecientes a puntos de control (referencias) o de determinados objetos sobre la superficie de la tierra, que son proporcionados por las Estaciones Terrenas de Control (ETC).

La ventaja de utilizar estos métodos y algoritmos, es la precisión al momento de determinar la ubicación del Cubesat, ya que las operaciones computacionales más pesadas se realizan en los computadores de las ETC. Sin embargo, estos métodos y algoritmos tienen un inconveniente importante, que está asociado con las limitaciones de transmisión de los datos, lo cual está a su vez determinado por la ubicación orbital del Cubesat, ya que existen zonas sin cobertura sobre la superficie de la tierra.

El método para calcular las coordenadas aproximadas de ubicación del Cubesat, utilizando los datos históricos (anteriores) de vuelo, tiene un error bastante alto; ya que no considera las características geofísicas de la trayectoria de vuelo. Como regla general, las desviaciones en los cálculos están asociadas con la alta velocidad del vuelo a lo largo de toda la órbita, la limitada área de cobertura del Cubesat sobre la superficie de la tierra (2000-3000 km²) y la dependencia simultánea de la ubicación de los puntos de referencia sobre la superficie de la tierra y la del Cubesat en el espacio.

Uno de los métodos alternativos para determinar las coordenadas del Cubesat en el espacio es el sistema "Automatic Dependent Surveillance-Broadcast" (ADS-B) y los sensores colocados en los aviones.

ADS-B es un sistema de información y medición que permite a los pilotos en la cabina de la aeronave y los controladores de tráfico aéreo en tierra, observar el movimiento de las aeronaves y recibir datos de navegación aérea, en un computador sin utilizar los radares tradicionales.

ADS-B no está diseñado directamente para resolver el problema de triangulación, el formato del campo "trek" en los sistemas ADS-B es de 5 dígitos, lo cual es suficiente para observar el movimiento de la aeronave; considerando que la propagación de la señal emitida por las aeronaves es omnidireccional, estas pueden ser captadas por los dispositivos electrónicos del Cubesat y servir como base para resolver el un problema de triangulación modificada.

Aplicado el problema de triangulación modificada a los Cubesat y considerando que este es un objeto móvil, el problema debe asumir lo siguiente:

- Objeto de referencia se considera a las aeronaves y buques; cuya posiciones transmitida por el sistema ADS-B;
- Se desconoce el momento exacto en el cual, las señales ADS-B son enviadas
- El objeto de referencia se considera activo, en lo referente a la emisión de paquetes de datos desde los sensores ADS-B, mientras que el Cubesat se considera pasivo.
- El cálculo del cambio de ubicación para la triangulación se realiza a bordo del Cubesat;
- No existe un valor (punto) referencial para sincronización.

Un Cubesat puede estar compuesto por diversos módulos [3] siendo de principal interés el módulo de Control [4], ya que dependiendo de las acciones de control realizadas [5] se puede dividir en:

- 1) Control de la maniobra del Cubesat, es decir, el cambio de posición y velocidad simultánea, cambiando la magnitud y la dirección del vector principal de fuerzas externas;
- 2) Corrección de la trayectoria del Cubesat, es decir, el cambio en el vector de fuerzas externas es pequeño y los motores se encienden por un corto tiempo;
- 3) Inhibición del Cubesat, es decir, la formación de un vector de fuerzas externas con el signo opuesto, sin cambiar la posición del Cubesat en el espacio;

En la Figura 1 se presenta, el método que permite determinar la ubicación de los Cubesat, utilizando las coordenadas de objetos móviles, pudiendo ser estos aeronaves y buques [6], [7], [8].

Este enfoque permite determinar las coordenadas de posición de Cubesat, realizando operaciones trigonométricas bastante sencillas, por ejemplo, el método de triangulación [9], [10], que consiste en determinar las coordenadas de posición del Cubesat utilizando tres o más puntos de referencia.

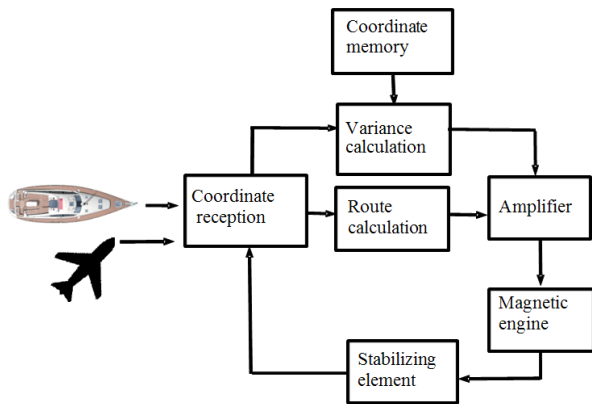


Figura 1. Método para posicionamiento de un Cubesat

La necesidad de obtener información de forma rápida y oportuna sobre el estado de dichos objetos y territorios, determina la necesidad de desarrollar métodos y algoritmos especiales para los sistemas de control de los Cubesat, mismos que proporcionen adecuadamente las coordenadas de posicionamiento, permitan la estabilización del Cubesat durante los períodos de fotografía y la transmisión de datos a la estación terrena con la correspondiente orientación en el espacio.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del estudio fue desarrollar un método que permita determinar la posición del Cubesat, mediante la recepción de la posición de aeronaves y buques que utilizan ADS-B.

Materiales y Métodos

La particularidad del método de triangulación modificado (caso bidimensional) consiste en construir esferas con radios proporcionalmente iguales a la potencia perdida, en el espacio comprendido entre el Cubesat y la aeronave. Conociendo las distancias y coordenadas de los puntos de referencia (contenidos en el paquete ADS-B), es posible determinar la región de ubicación del Cubesat en el espacio.

Para determinar la región donde se encuentra el

Cubesat, es necesario calcular las regiones de intersección de 3 o más esferas de forma interactiva. Después, se deben identificar los puntos extremos de la región roja (Figura 2). La construcción de esta región se realiza secuencialmente, considerando las intersecciones de dos en dos esferas y superponiendo sus regiones intersecadas entre sí.

Para encontrar los límites de la región de intersección de las esferas, primero se debe determinar el área de la intersección y la cantidad de ángulos, que será igual al número de esferas. Luego, es necesario identificar el área mínima de intersección, y cuyos vértices de las esquinas serán los puntos de restricción de la región de ubicación del Cubesat.

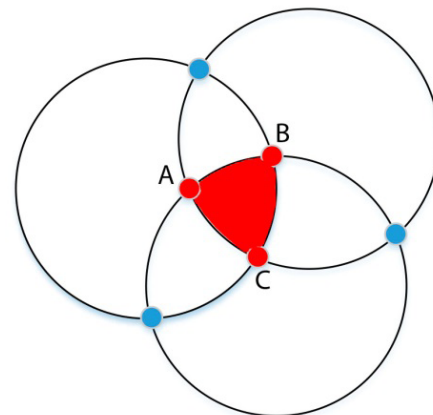


Figura 2. Área de ubicación del Cubesat con tres puntos de referencia

Las proporciones geométricas para determinar los puntos de intersección (coordenadas) de las esferas se presentan en la Figura 3. Dos esferas se intersecan en los puntos P_4 y P_5 , cuyas coordenadas se deben calcular.

Los puntos P_1 y P_2 (centro de las esferas) junto con los puntos P_4 , P_5 forman un cuadrilátero con lados r_1 y r_2 y diagonales $(h_1 + h_2)$ y $(a + b)$.

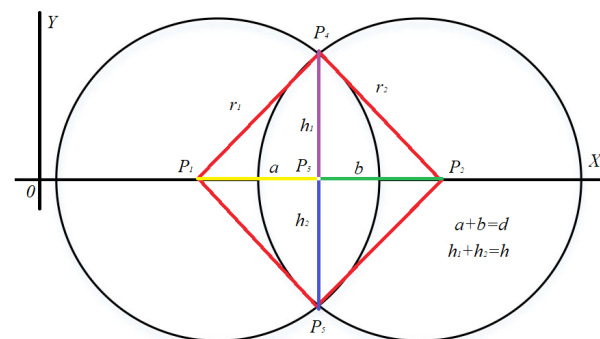


Figura 3. Esquema de intersección de esferas

Inicialmente se determina la distancia entre los centros de las esferas, es decir entre los puntos P_1 y P_2 , (Ecuación 1)

$$d = a + b \tag{1}$$

Si: $d > r_1 + r_2$ entonces no existe solución, porque las esferas no se intersecan.

Si: $d = r_1$ o $d = r_2$ entonces no existe solución, porque una esfera se encuentra dentro de la otra.

Luego considerando [11] se analizan dos triángulos, $\Delta P_1 P_4 P_3$ y $\Delta P_3 P_4 P_2$ (Ecuación 2).

$$a^2 + h_1^2 = r_1^2 \quad y \quad b^2 + h_1^2 = r_2^2 \tag{2}$$

Utilizando la igualdad $d = a + b$ se obtiene la siguiente expresión en función de a , Ecuación 3.

$$a = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \tag{3}$$

El segmento $h_{1,2}$ es igual: (Ecuación 4)

$$h_{1,2} = \sqrt{r_1^2 - a^2} \tag{4}$$

Para encontrar los puntos de intersección, el punto P_4 se escribe de la siguiente forma (Ecuaciones 5 y 6):

$$x_4 = x_3 + \frac{h_1}{d}(y_2 - y_1) \tag{5}$$

$$y_4 = y_3 - \frac{h_1}{d}(x_2 - x_1) \tag{6}$$

De forma análoga se escribe para el punto P_5 (Ecuaciones 7 y 8):

$$x_5 = x_3 - \frac{h_2}{d}(y_2 - y_1) \tag{7}$$

$$y_5 = y_3 + \frac{h_2}{d}(x_2 - x_1) \tag{8}$$

De esta forma, a partir de operaciones trigonométricas básicas, se obtuvieron las coordenadas de dos puntos de la región de ubicación del Cubesat. Con cada nueva esfera se realizan estos cálculos y se forma el área de ubicación, definiendo las coordenadas de los puntos límite (área en rojo de la Figura 2).

Luego en base al método para determinar el área de un polígono (fórmula de Gauss) [12], se forma el área total del polígono a partir de la intersección de todas las esferas.

En la Figura 4, se presenta un algoritmo para determinar la ubicación del Cubesat, determinada por la intersección de esferas cuyos centros se consideran coordenadas de aeronaves.

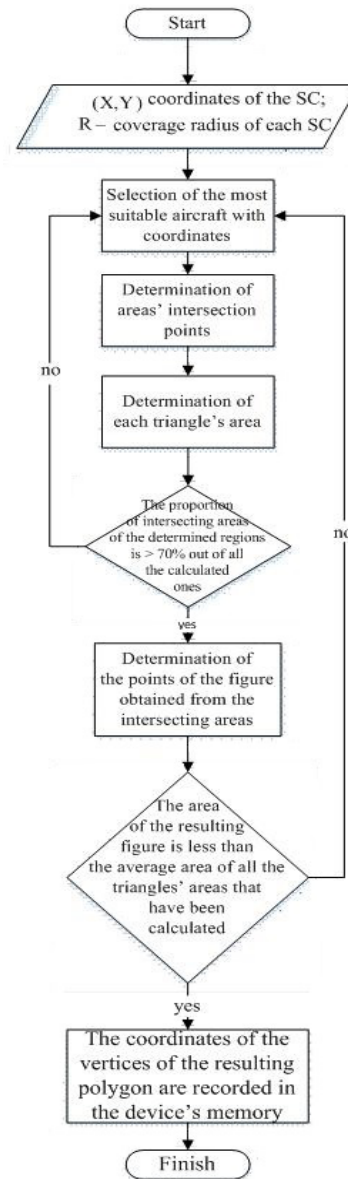


Figura 3. Algoritmo para determinar la ubicación del Cubesat

Resultados y Discusión

Para verificar el funcionamiento del método propuesto, se calcula la ubicación del Cubesat, utilizando los métodos de triangulación directa [13], el cual se presenta en la Tabla 1 y los cálculos que se obtienen con el método de triangulación inversa [14] presentado en la Tabla 2.

Tabla 1. Cálculo de la ubicación del Cubesat según el método de triangulación directa.

| Nº | X1,Y1 | | X2,Y2 | | α | β | Coordenadas del Cubesat | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|-------------------------|----------|
| | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | | | x_{p1} | y_{p1} |
| 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 15 | 25 | 3,89 | 2,45 |
| 2 | 1 | 2 | 5 | 4 | 15 | 24 | 3,83 | 2,57 |
| 3 | 2 | 1 | 4 | 4 | 15 | 17 | 2,80 | 1,80 |
| 4 | 2 | 3 | 5 | 3 | 26 | 30 | 3,62 | 2,21 |
| 5 | 0 | 2 | 5 | 3 | 20 | 30 | 3,29 | 1,50 |
| 6 | 2 | 1 | 4 | 4 | 27 | 18 | 3,37 | 1,70 |
| 7 | 2 | 2 | 5 | 5 | 12 | 7 | 3,30 | 2,80 |
| Valores promedio | | | | | | | 3,4 | 2,1 |

Tabla 2. Cálculo de la ubicación del Cubesat según el método de triangulación inversa.

| Nº | X1,Y1 | | X2,Y2 | | X3,Y3 | | α | β | Coordenadas del Cubesat | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|-------------------------|----------|
| | x_1 | y_1 | x_2 | y_2 | x_3 | y_3 | | | x_{p2} | y_{p2} |
| 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 1 | 1 | 15 | 16 | 3,70 | 2,90 |
| 2 | 1 | 2 | 5 | 4 | -3 | -2 | 10 | 55 | 2,60 | 2,10 |
| 3 | 2 | 1 | 4 | 4 | -2 | -4 | 35 | 35 | 2,40 | 0,62 |
| 4 | 2 | 3 | 5 | 3 | 3 | 0 | 90 | 89 | 2,90 | 1,60 |
| 5 | 0 | 2 | 5 | 3 | 3 | 0 | 83 | 84 | 3,40 | 0,23 |
| 6 | 2 | 1 | 4 | 4 | 6 | 5 | 105 | 16 | 4,90 | 2,60 |
| 7 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 0 | 25 | 30 | 3,18 | 3,28 |
| Valores promedio | | | | | | | | | 3,3 | 2,0 |

Se puede apreciar, que los resultados arrojados por el método de triangulación directa e inversa, son muy similares entre sí, lo cual indica que ambos métodos arrojan valores muy parecidos cuando se utilizan para ubicar el Cubesat.

En la Tabla 3 se presenta los resultados utilizando el método de intersección de esferas, se puede apreciar que con este método se obtiene adicionalmente tres puntos, de las posibles coordenadas del Cubesat lo cual da una mayor probabilidad de ubicación. La gran ventaja de este método es que se utilizaría la información de otras aeronaves sin esperar la información de las ETC.

En la Figura 4, se presenta el área de intersección de tres esferas (con aproximación lineal de segmentos) como un triángulo ΔABC , obtenida con el método de intersección de esferas, el punto rojo muestra las coordenadas calculadas a partir del método de triangulación directa, y con la x , se muestra las coordenadas calculadas a partir del método de triangulación inversa.

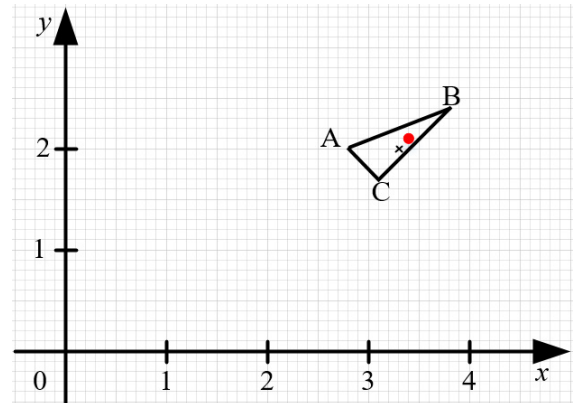


Figura 4. Posición calculada del Cubesat según las Tablas 1, 2 y 3.

De la Figura 4, se puede evidenciar que las coordenadas calculadas mediante los métodos de triangulación directa e inversa se encuentran en el área obtenida mediante el método de intersección de esferas, lo que indica la posibilidad de utilizar el método para determinar la posición del Cubesat a partir de las coordenadas de las aeronaves.

La característica geométrica del método de intersección de esferas, que contiene los puntos de las posibles coordenadas de ubicación del Cubesat, justifica la aplicabilidad del método desarrollado.

Cuando se cumple el criterio experimental, que el área de intersección deba ser superior al 70%, y se superponen n esferas, la precisión del cálculo de la posición del Cubesat aumentará al reducir el área de intersección de todas las esferas.

El método desarrollado complementado con un algoritmo de búsqueda de intersección de esferas, se basan en cálculos computacionales básicos, en comparación con los cálculos necesarios para los métodos de triangulación directa e inversa. Esta característica, junto con la presencia constante de aeronaves y buques en movimiento, justifica el uso de este método para determinar las coordenadas de posición de un Cubesat.

Por lo tanto, queda demostrado el desarrollo de un método y algoritmo para calcular la ubicación de un Cubesat, basado en información suministrada por los sensores de referencias móviles, como aeronaves y buques.

Tabla 3. Ubicación del Cubesat según el método de intersección de esferas.

| № | X1,Y1 | R1 | X2,Y2 | R2 | X3,Y3 | R3 | Región de ubicación del Cubesat | | | | | | | | |
|--|-------|----|-------|----|-------|----|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | A | | B | | C | | | | |
| | | | | | | | X1.1 | Y1.1 | X2.2 | Y2.2 | X3.3 | Y3.3 | | | |
| 1 | 3 | 4 | 2 | 5 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3,26 | 2,98 | 3,77 | 2,15 | 3,00 | 2,00 |
| 2 | 1 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 1 | 2 | 4,92 | 2,77 | 4,87 | 1,00 | 2,51 | 2,33 |
| 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 | 2 | 5 | 1 | 3 | 2,51 | 2,67 | 2,67 | 2,89 | 2,28 | 2,98 |
| 4 | 2 | 3 | 2 | 5 | 3 | 3 | 5 | 0 | 3 | 2,40 | 1,50 | 3,99 | 2,83 | 2,67 | 1,11 |
| 5 | 0 | 2 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 2,00 | 2,83 | 3,91 | 2,86 | 3,63 | 0,33 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 | 3 | 5 | 1 | 2 | 3,01 | 1,17 | 3,50 | 2,23 | 4,00 | 1,00 |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 4 | 0 | 3 | 1,41 | 0,41 | 3,74 | 2,93 | 3,82 | 1,18 |
| Valores promedio de las coordenadas de los puntos límite A, B, C | | | | | | | | | | 2,8 | 2,0 | 3,8 | 2,4 | 3,1 | 1,6 |

Conclusión

El método y algoritmos desarrollados permiten determinar la posición del Cubesat, a partir de las ubicaciones aleatorias de los objetos de referencia sean estos aeronaves o buques, siempre y cuando sus señales emitidas sean captadas por la electrónica del Cubesat.

El método y algoritmo propuestos permiten calcular además de la posición del Cubesat, también determinar su trayectoria. Esta circunstancia permitirá a futuro dejar de utilizar los datos orbitales enviados desde las estaciones radar para determinar la posición de un Cubesat.

Agradecimiento

Agradecemos al Ministerio de Educación y Ciencia de la Federación de Rusia, Proyecto 9.2108.2017 / 4.6 y Asignación Estatal (№2.9102.2017/BCH).

Referencias Bibliográficas

- [1] Samburov S.N., Kolmykova T.S. and Shilenkov E.A. "Deployment of an autonomous intellectual grouping of nanosatellites launched from the board of the SSC". Materials of the 53rd Scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky, (2018), 26 - 27.
- [2] Shilenkov E.A., Samburov S.N. and Kolmykova T.S. "Development of an autonomous intellectual grouping of small spacecraft". Materials of the 52nd Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky, (2017), 62-64.
- [3] Zelentsov V.V. "Executive bodies of spacecraft and rocket motion control systems". Bauman MSTU, (2014), 306 p.
- [4] Kazakov A.I. "Theoretical concept of creating a system for controlling the movement of ultra-small spacecraft". Scientific forum: Innovation science: Collection of articles based on the materials of the II International Scientific-practical Conf. - No. 1 (2). - M: Publishing house "MTzNO", (2017), 30-35.
- [5] Bobyr M.V. "Intelligent system for determining rotation angles by a mobile robot". Mechatronics, automation and robotics, № 1, (2017), 46-47.
- [6] Bobyr M.V. "Algorithms for stabilizing the movement of the links of a robotic manipulator". Industrial ACS and controllers, № 7, (2018), 34-40.
- [7] Andronov V.G. "Autonomous Determination of the Exterior Orientation Parameters of Satellite Images". Proceedings of the Southwest State University. Series Management, computer facilities. Computer science. Medical instrument making, Vol. 19, № 2, (2016), 77-87.
- [8] Andronov V.G. "Geometrical model of space panoramic shooting in direct gridding problem". Proceedings of the Southwest State University. Series Management, computer facilities. Computer science. Medical instrument making, № 1, (2013), 186-190.
- [9] Dobroserdov, O.G. "The approach to the structural parametric synthesis of multiposition radio engineering system realising goniometric and time methods of koordinatometriya". Proceedings of the Southwest State University. Series Management, computer facilities, Computer science. Medical instrument making. № 4, (2013), 63-68.
- [10] Dobroserdov O.G. "Mathematical multiposition model of totally differential distance-measuring radio engineering system". Proceedings of the Southwest State University. Series Management, computer facilities. Computer science. Medical instrument making, № 4, (2013), 57-63.

-
- [11] Atakishcheva I.V. "Reference model of the dual-attribute translating metagrammmar and structural-linguistic method of processing complexly organized data", Proceedings of the Tula State University. Series Technological system engineering, N^o 14,(2006), 24-27.
- [12] Titenko E.A. "Multi-agent systems in technical diagnostics of difficult technical objects".Proceedings of the Southwestern State University, Vol. 60, N^o 3, (2015), 18-25.
- [13] Teterin D.P. "Algorithm for planning the trajectory of an unmanned aerial vehicle during search and rescue operations".Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences, Vol. 20, N^o6, (2018), 210-214.
- [14] Teterin D.P. "Matrix method of planning the trajectory of an unmanned aerial vehicle of variable mass".Proceedings of the Institute of engineering physics.N^o4, (2018).



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2020, No. 1, pp. 03 - 55 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Febrero de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientifica.luz.edu.ve