

Diseño de un enlace satelital con el empleo del sistema de aumentación satelital WAAS

Design of a satellite link using WAAS, wide area augmentation system

Ing. Elder Antonio Rivero Andux^{1*}, Dr.Ct. José Armando Rojas Rodríguez²

Recibido: 11/2021 | Aceptado: 01/2022

Palabras clave

Radionavegación
aeronáutica

WAAS

GPS

Control de
Tráfico Aéreo

Resumen

El sistema de radionavegación aeronáutica de Cuba está integrado por equipos caracterizados por la obsolescencia tecnológica frente a los sistemas de navegación satelital. Con determinado nivel de inversión y acuerdos de seguridad aeronáutica internacional es posible implementar estaciones de monitoreo WAAS –*Wide Area Augmentation System*–, Sistema de Aumentación de Área Amplia para corregir la señal GPS, con cobertura en toda Norteamérica y parte del Caribe, lo que brinda rangos de precisión, exactitud, integridad y disponibilidad capaces de optimizar el espacio aéreo, el servicio de recepción y los niveles de seguridad establecidos, objetivos principales de los proveedores de servicio de Control de Tráfico Aéreo. En este proyecto se desarrolla el cálculo de la probabilidad de error del lazo de comunicaciones entre los satélites de navegación global GPS, las estaciones de recepción satelital, un satélite geoestacionario de dicho sistema y las aeronaves con el objetivo de validar su uso en territorio cubano y ampliar el servicio de cobertura WAAS en la región.

Keywords

Aeronautical
radionavigation

WAAS

GPS

Air Traffic Control

Abstract

Cuba's aeronautical radionavigation system is made up of equipment aimed at technological obsolescence compared to satellite navigation systems. With a certain level of investment and international aeronautical security agreements, it is possible to implement WAAS (Wide Area Augmentation System) monitoring stations, in order to correct the GPS signal, with coverage throughout North America and part of the Caribbean, providing ranges of precision, accuracy, integrity and availability capable of optimizing the airspace, the reception service and the established security levels, the main objectives of Air Traffic Control

service providers. In this project, the calculation of the error probability of the communications loop among the GPS global navigation satellites, the satellite reception stations, a geostationary satellite of said system and the aircraft is developed with the objective of validating its use in the Cuban territory and expand the WAAS coverage service in the region.

Introducción

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite o GNSS por sus siglas en inglés, proporcionan servicio de ubicación y navegación de excelentes prestaciones mediante dispositivos decodificadores de señales satelitales para los sectores militares, pero de menos calidad para el sector civil. La aeronavegación civil por su parte necesita de mayores prestaciones por lo que se desarrollaron Sistemas de Aumentación Basados en Satélites o *Satellite Based Augmentation System* (SBAS) por sus siglas en inglés, que mediante correcciones aumentan la precisión y exactitud del sistema haciendo posible su uso para la aviación (Figura 1). Con este aumento se logra la retroalimentación del sistema desde satélites geoestacionarios y estaciones terrenas, corrigiendo errores de posicionamiento en los equipos usuarios. Dado que la cobertura de servicio depende de estaciones de recepción en el área de interés se necesita diseñar un enlace satelital entre una estación de referencia decodificadora en el territorio nacional y uno de los satélites que conforman al WAAS.

En esta investigación se caracteriza el sistema de aumentación, se plantea y desarrolla un método de cálculo para la probabilidad de error del enlace que será comparado con resultados de notables trabajos y del propio diseño del sistema original. Con el fin de demostrar una posible implementación del sistema regional en la isla de Cuba para proveer información satelital como ayuda a la navegación en la Región de Información de Vuelo de Cuba.

Este trabajo constituye parte de un grupo de investigaciones sobre tecnologías satelitales encaminadas a su implementación en la Gestión del Tránsito Aéreo que brinda Cuba con el fin de actualizar la técnica existente.

Materiales y Métodos

En esta investigación se toma como base el Sistema de Aumentación de Área Amplia (WAAS). Este es un sistema de navegación extremadamente exacto desarrollado para la aviación civil para proveer desempeño comparable al Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (ILS) Categoría I (CAT I) 60 m de altura (altura de decisión de aterrizaje). Sin el WAAS, los disturbios ionosféricos, las fluctuaciones de reloj y los errores de órbita del satélite crean demasiado error e incertidumbre en la señal GPS para que pueda cubrir los requerimientos de una aproximación de precisión. (García Cañedo, 2007)

El segmento de control está compuesto por: Estaciones de Referencia de Área Amplia, Estaciones Maestras de Área Amplia y Estaciones de Comunicación. Por su parte, el segmento de espacio está compuesto por satélites GEO (geoestacionarios) (figura 2).

WAAS y guía de operación

Estaciones de Referencia de Área Amplia o WRS (del inglés *Wide Area Reference Station*) están espaciadas aproximadamente de 500 a 1000 km. La función principal de estas es observar las señales GPS, las condiciones ionosféricas y la señal de corrección WAAS; y luego transmitir los datos a las estaciones maestras.

Estaciones Maestras de Área Amplia o WMS (del inglés *Wide Area Master Station*), verifican las señales provenientes de las WRS anteriores y generan una nueva señal de corrección WAAS. Esta señal de corrección es transmitida a través de las estaciones terrenas a los satélites geoestacionarios para luego ser transmitida a los receptores.

Estaciones de Comunicación o GUS (*Ground Uplink Station*) son estaciones terrenas que se encargan de recibir la trama WAAS de corrección de las estaciones

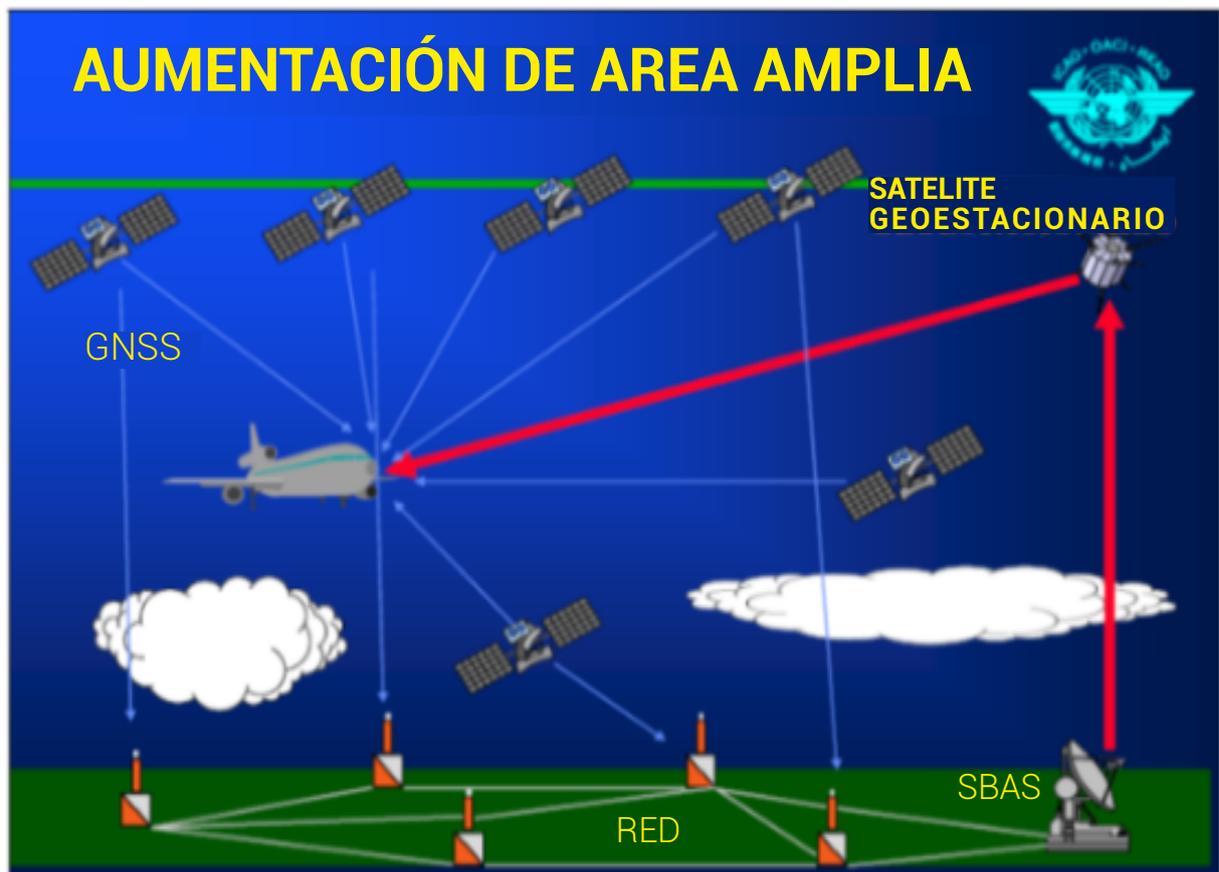


Figura 1. Red SBAS.

maestras de área amplia (WMS) y retransmitirla a los satélites geoestacionarios. (Alay García, 2007)

Satélites Geoestacionarios: El segmento del espacio consiste de múltiples satélites GEO de comunicación los cuales difunden el mensaje generado por las WMS hacia el segmento de usuario. Los satélites también difunden el mismo tipo de información para la estimación de la distancia de los satélites GPS, incrementando de forma efectiva el número de satélites disponibles para una posición fija. (García Cañedo, 2007)

Segmento de usuario: Receptor GPS y WAAS, el cual utiliza la información difundida desde cada satélite GPS y las correcciones WAAS para determinar su localización y tiempo actual. Utiliza dos tipos de mensajes de correcciones recibidas (rápidas y lentas). Las rápidas, que comprenden correcciones satelitales, las aplica para corregir la señal en el momento de enganche de la señal y calcular su posición, luego toma las lentas, con correcciones ionosféricas, para mejorar su posición con el tiempo.

Objetivos del WAAS

El objetivo de WAAS es proveer una mejora de parámetros como integridad, exactitud, disponibilidad, continuidad del servicio SPS del GPS. También proveer un sistema de navegación para todas las fases de vuelo a través de aproximaciones de precisión lateral y vertical destacándose la LPV-200.

LPV-200, —*Localizer Performance with Vertical Guidance* o Desempeño de Localización con Guía Vertical para precisión de Categoría I—. (Furquet Gascón, 2016). Este permite las aproximaciones 3D instrumentales de acuerdo a lo estipulado en el Anexo 10 de OACI para aproximaciones de precisión de Categoría I con requerimientos de SIS —*Signal In Space*— y VAL —*Vertical Alert Limit*— de 35 m (equivalente a ILS CAT I). Proporciona información precisa sobre el enfoque de una aeronave a una pista con el uso de tecnología de posicionamiento GNSS, así como guiado vertical y lateral sin la necesidad de contacto visual de la aeronave con el suelo hasta alcanzar una altura de 200 pies (61 me-



Figura 2. Distribución de Estaciones WAAS.

tros) altura de decisión. En la figura 3 se muestra la cobertura LPV- 200 que proporciona el sistema WAAS (Furquet Gascón, 2016).

Por su parte, la exactitud define los niveles de protección y alerta. La integridad es la capacidad de alerta sobre fallas de exactitud. La disponibilidad es la medida en que el sistema cumple con la integridad y

exactitud requeridas. La continuidad es la medida en que el sistema está disponible durante toda una operación sin interrupciones.

En las tablas 1 y 2 se muestran los requerimientos de desempeño exigidos al SBAS y el desempeño real del WAAS respectivamente (Department of transportation United States of America, 2008)

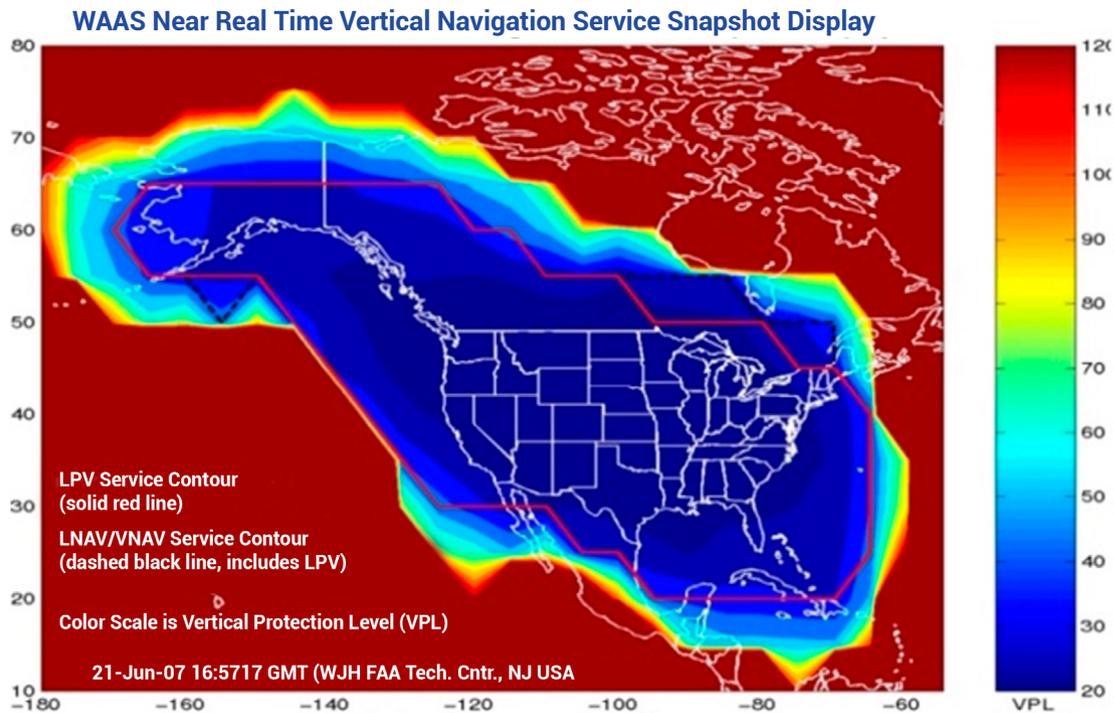


Figura 3. Servicio de navegación vertical en el área de cobertura WAAS.

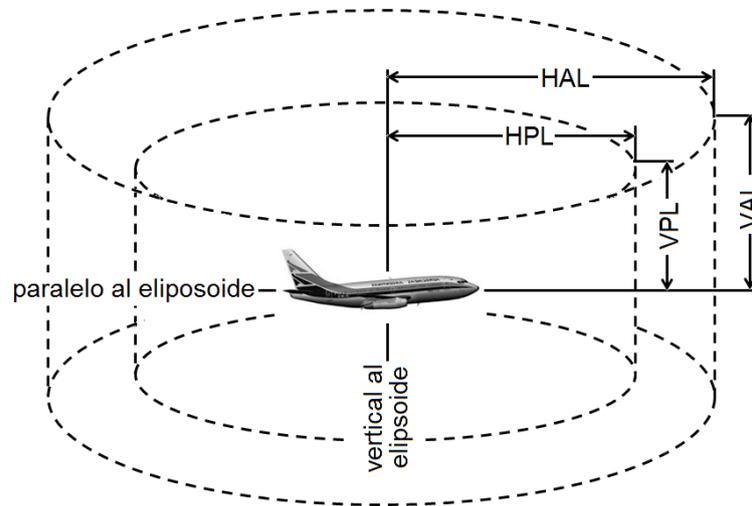


Figura 4. Niveles de protección y límites de alerta para la aviación.

	En Ruta	Terminal	LNAV	LNAV/VNAV	LPV	LPV-200
TTA	15 s	15 s	10 s	10 s	6.2 s	6.2 s
HAL	2 mn	1 mn	556 m	556 m	40 m	40 m
VAL	-	-	-	50 m	50 m	35 m
Probabilidad HMI	10^{-7} por hora	10^{-7} por hora	10^{-7} por hora	2×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-7}
Continuidad	$1-10^{-5}$ por hora	$1-10^{-5}$ por hora	$1-10^{-5}$ por hora	$1-5.5 \times 10^{-5}$ /15 s	$1-8 \times 10^{-6}$ /15 s	$1-8 \times 10^{-6}$ /15 s
Exactitud Horizontal (95%)	0.4 nm	0.4 nm	220 m	220 m	16 m	16 m
Exactitud Vertical (95%)	-	-	-	20 m	20m	4m
Disponibilidad	100%	100%	100%	100%	80-100%	40-60%

Tabla 1. Requerimientos de Navegación de la OACI al SBAS:

WAAS	Desempeño
Tiempo para Alerta	6.2 s
Probabilidad HMI (Información Engañosa)	$< 1 \times 10^{-7}/h$
Continuidad	$1-8 \times 10^{-6} /15 s$
Exactitud Horizontal nominal	1.6 m (95%)
Exactitud Horizontal máxima	12 m (máximo observado)
Exactitud Horizontal límite	4 m (95%)
Exactitud Vertical nominal	1.6 m (95%)
Exactitud Vertical máxima	12 m (máximo observado)
Exactitud Vertical límite	4 m (95%)
Disponibilidad	99.999%

Tabla 2. Desempeño WAAS.

Características de la señal

La señal WAAS debe cumplir requerimientos como no interferir con la recepción de las señales GPS, proveer una medición adicional de alcance (distancia), garantizar una alta tasa de integridad y corrección de la señal GPS. Para lograr estos objetivos, se usa una señal modulada BPSK —Modulación Binaria por Cambios de Fase—

Resultados y discusión

Método de cálculo de un enlace satelital

Para el cálculo del enlace satelital entre una estación SBAS terrena y un satélite GEO —Órbita Geoestacionaria— se debe tener en cuenta un enlace descendente desde los satélites de navegación GPS a las antenas receptoras; un enlace ascendente desde una estación transmisora de acceso en tierra hasta el satélite GEO del sistema WAAS y el enlace descendente hasta el receptor del usuario como principal lazo de comunicación del sistema.

Nota: Algunos de las siguientes ecuaciones fueron tomadas de las conferencias de la asignatura Comunicación por Satélites impartida por los profesores de la CUJAE Pablo Echenique Véliz y Jesús Franciel Artiles Brito. (Echenique Véliz y Artiles Brito, 2019) y de la tesis de ingeniería de Laureano Jorge Leonjanga (Leonjanga Laureano, 2013).

Establecer los datos del enlace descendente GPS

Datos necesarios del satélite de navegación GPS

Frecuencia portadora descendente Banda L (GPS):	L2C (1227.6 MHz), L5 (1176.45 MHz) y L1C (1575.42 MHz).
Potencia de carga útil	(Valores entre 200W = 23 dBW y 700W = 28 dBW).
Ganancia de la antena	Valores alrededor de 13.4 dBi)
Altura de la constelación	(órbita de los satélites de navegación a unos 20200 km).

Datos necesarios de la antena receptora

Pérdidas del Alimentador Rx (Valores aproximados a 0.1 dB)
Eficiencia de la antena (Valores comprendidos entre 60 y 80%)
Temperatura de Ruido LNB (Depende de la figura de ruido proporcionada por el fabricante).
Temperatura de Ruido de la Antena (Proporcionada por el fabricante).

Cálculo de parámetros del enlace descendente GPS

Cálculo de la potencia isotrópica radiada equivalente del satélite

$$PIRE_{sat} = P_{cu} + G_{txs} \tag{1}$$

Donde:

P_{cu} : Potencia de la carga útil del satélite.

G_{txs} : Ganancia de la antena transmisora del satélite.

Cálculo de temperatura del sistema de recepción

$$T_s = \frac{T_{ant}}{L_{alim}} + 290 \left(1 - \frac{1}{L_{alim}}\right) + T_{LNB} \tag{2}$$

Donde:

T_{ant} - temperatura de antena;

L_{alim} - pérdidas en el alimentador;

T_{LNB} - temperatura en el bloque de bajo ruido.

Conversión de parámetros en decibeles (dB) a veces para la ecuación anterior

$$L_{alim}(veces) = 10^{L_{alim}(dB)/10} \tag{3}$$

Cálculo de las pérdidas del espacio libre en el enlace descendente y ascendente

$$L_{down} = 20 \log D + 20 \log fd + 92.5 \text{ dB} \tag{4}$$

$$L_{up} = 20 \log D + 20 \log fa + 92.5 \text{ dB}$$

Donde:

$D = d_s$ - Distancia desde la estación terrena receptora al satélite (km);

fd - Frecuencia en GHz del enlace descendente.

fa - Frecuencia en GHz del enlace ascendente

Cálculo de ganancia de antenas receptoras

$$G_{Rx}(dBi) = 10 \log \eta + 20 \log fd + 20 \log d + 20.4 \text{ dB} \tag{5}$$

Donde:

η - eficiencia de la antena;

f - frecuencia descendente en GHz;

d - diámetro de la antena receptora.

Cálculo del nivel de iluminación del satélite

$$W = PIRE_{sat} - 20 \log ds - 10 \log (1000)^2 (4\pi) \tag{6}$$

Cálculo de la relación G/T Rx, G ganancia de la antena receptora, T temperatura del sistema:

$$G/T_{rx} = G_{Rx} - 10 \log T_S \quad (7)$$

Cálculo de relación portadora - densidad de ruido (C/No) descendente

$$C/No_d = PIRE_{sat} + IBS - L_{odown} + G/Trx - 10 \log(K) \quad (8)$$

Donde:

IBS: No linealidad de amplificadores del satélite

K: Constante de Boltzman: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W/}^\circ\text{K/Hz}$

Cálculo de la relación energía de bit a densidad de ruido

$$Eb/No_d = C/No_d - 10 \log(Vb) \quad (9)$$

Donde:

Vb: Velocidad de bits

Establecer los datos del enlace ascendente y descendente al satélite GEO.

Datos necesarios del satélite GEO

Posición: todos están situados en la órbita ecuatorial.

Altura: (Alrededor de 35786 km).

Frecuencia de transmisión de señal L1C (1575.42 MHz).

Potencia de carga útil (Valores entre 200W = 23 dBW y 700W = 28 dBW).

Ganancia de la antena transmisora (Valores alrededor de 13.4 dBi).

Factor de calidad (Valores entre -7 y 0).

No linealidad de amplificadores del satélite (IBS)

Datos necesarios de la antena transmisora del GUS.

Diámetro (desde 3.7 a 9 m).

Eficiencia de la antena (Valores comprendidos entre 60 y 80%).

Frecuencia de enlace ascendente (Banda C)

Velocidad de bits.

Potencia (Valores de 80, 125, 250, 500 y hasta 700 Watts)

Datos necesarios de la antena receptora del segmento de usuario

Pérdidas del Alimentador Rx (Valores aproximados a 0.1 dB)

Eficiencia de la antena (Valores comprendidos entre 60 y 80%)

Temperatura de Ruido LNB (Depende de la figura de ruido proporcionada por el fabricante).

Temperatura de Ruido de la Antena (Proporcionada por el fabricante).

Cálculo de parámetros del enlace ascendente

Cálculo de Ganancia de antenas transmisoras:

$$G_{Tx}(dBi) = 10 \log \eta + 20 \log f_a + 20 \log d + 20.4 \text{ dB} \quad (10)$$

Donde:

η - eficiencia de la antena;

f_a - frecuencia ascendente en GHz;

d - diámetro de la antena transmisora.

Cálculo de la potencia isotrópica radiada equivalente del transmisor

$$PIRE_{tx} = P_{tx} + G_{tx} \quad (11)$$

Donde:

P_{tx}: Potencia de la carga útil del satélite.

G_{tx}: Ganancia de la antena transmisora del satélite.

Cálculo de relación portadora - densidad de ruido (C/No) ascendente:

$$C/No_a = PIRE_{tx} + IBS - L_{oup} + G/T_{sat} - 10 \log(K) \quad (12)$$

Donde:

IBS: No linealidad de amplificadores del satélite

K: Constante de Boltzman: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W/}^\circ\text{K/Hz}$.

Cálculo de la relación energía de bit a densidad de ruido ascendente

$$Eb/No_a = C/No_a - 10 \log(Vb) \quad (13)$$

Donde:

Vb: Velocidad de bits

Cálculo del nivel de iluminación del satélite.

$$W = PIRE_{tx} - 20 \log ds - 10 \log (1000)^2 (4\pi) \quad (14)$$

Cálculo el ángulo γ , ángulo central entre la estación terrena y el satélite desde el centro de la tierra:

$$\cos \gamma = \cos \text{Latitud}_{ET_R} * \cos(|\text{Longitud}_{SAT} - \text{Longitud}_{ET_R}|) \quad (15)$$

Cálculo el ángulo de elevación φ , de la antena de la estación terrena:

$$\text{elevación}(E_l) = \varphi = \tan^{-1} \left[\frac{6.610715 - \cos \gamma}{\sin \gamma} \right] - \gamma \quad (16)$$

Cálculo el ángulo de azimut (ϕ):

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\tan|\text{Longitud}_{SAT} - \text{Longitud}_{ET_R}|}{\sin(\text{Latitud}_{ET_R})} \right] \quad (17)$$

Calcular ϕ : (para la zona en cuestión)

$$\phi = 180^\circ - \alpha \quad (18)$$

Calcular la distancia de la estación

terrena al satélite (d_s):

$$d_s(\text{km}) = r_s \sqrt{1.02274 - 0.301596 \cos \gamma} \quad (19)$$

Donde:

$$r_s = r_E + h_s = 42\,164.137 \text{ Km}$$

r_s - Distancia desde el centro de la tierra al satélite, pasando por el punto subsatelital.

$$r_E = 6\,378.137 \text{ Km (radio de la tierra).}$$

h_s - Altura del satélite sobre la superficie terrestre (Km).

h_s se toma igual a 35786 Km.

En la figura 5 se muestra la disposición geométrica respecto a la tierra de los datos anteriores.

Cálculo de parámetros del enlace descendente WAAS: (el mismo procedimiento que se utiliza para el cálculo de parámetros del enlace descendente GPS)

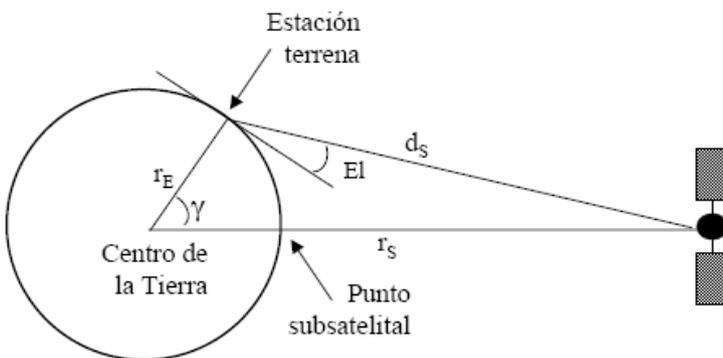


Figura 5. Representación de los parámetros a calcular.

Cálculo de la relación energía de bit a densidad de ruido total

$$(e/n_o)_t^{-1} = (e/n_o)_a \text{WAAS}^{-1} + (e/n_o)_d \text{GPS}^{-1} + (e/n_o)_d \text{WAAS}^{-1} \quad (20)$$

Donde:

$(e/n_o)_t^{-1}$ - energía de bit a densidad de ruido total en veces;

$(e/n_o)_a \text{WAAS}^{-1}$ - energía de bit a densidad de ruido ascendente en veces;

$(e/n_o)_d \text{GPS}^{-1}$ - energía de bit a densidad de ruido descendente GPS en veces;

$(e/n_o)_d \text{WAAS}^{-1}$ - energía de bit a densidad de ruido descendente WAAS en veces.

Cálculo de probabilidad de error para el enlace.

$$\text{Peb} = (2/3)G(\sqrt{6W}(\sin \pi/2)) \quad (21)$$

Donde:

$$W = E_b/N_o \text{ t}$$

G- Función de distribución de densidad gaussiana

Cálculo de la función de distribución de densidad gaussiana

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} \quad (22)$$

Para $t=7$ según fuente.

Método de cálculo de un enlace satelital

Nombre del satélite	Código PRN	NMEA	Localización
Eutelsat 117 West B	131	44	117° W
Galaxy 15	135	48	133° W
Anik F1R	138	51	107.3° W

Tabla 3. Identificación de los satélites GEO/WAAS.

PRN: Secuencia de ruido pseudo-aleatorio. Técnica de encriptación para recepción única del sistema.

NMEA: Código de comunicación GPS.

Para validar algunos de los cálculos del siguiente método se obtuvieron datos a partir del monitoreo satelital efectuado por un receptor GPS mostrado en la figura 6 (<https://www.nstb.tc.faa.gov/images/GeoFootPrint.png>).

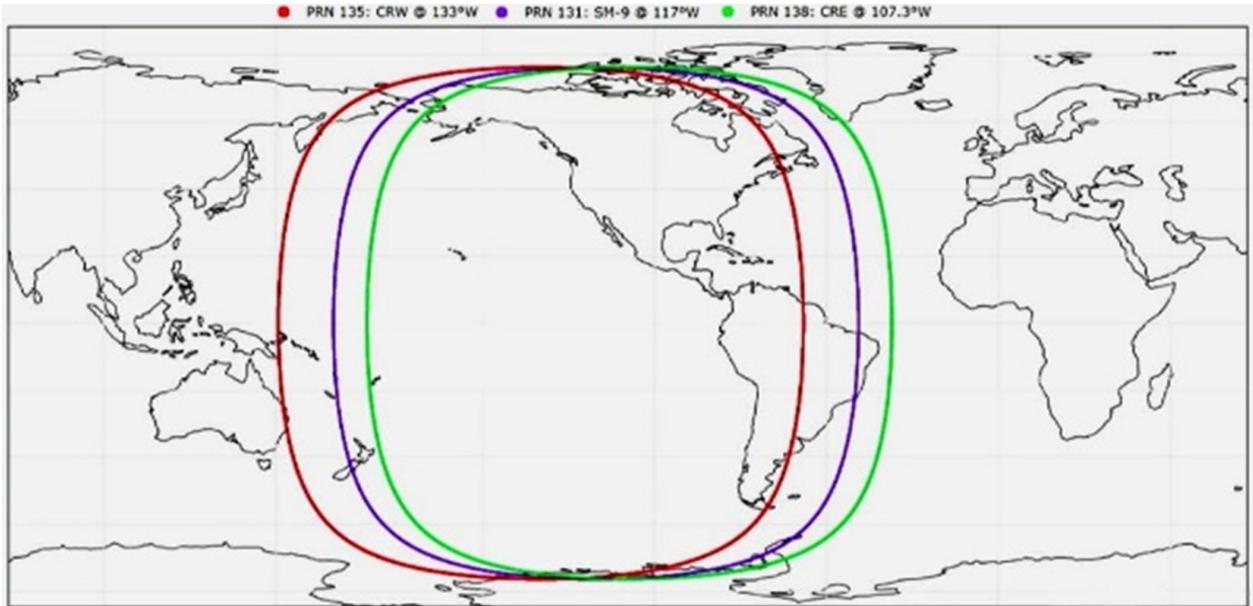


Figura 6. Cobertura regional WAAS para inclinación de 5°



Figura 7. Receptor satelital GPS.

NAVSTAR	
Frecuencia portadora L1 C/A (Banda L)	1575.42 MHz
Velocidad de bits	1.023 Mbps
Potencia de carga útil	26.8 dBW
Ganancia antena	13.4 dBi
Altura	20200 km
Eficiencia de la antena transmisora	0.6

Tabla 4. Datos necesarios del satélite de navegación GPS

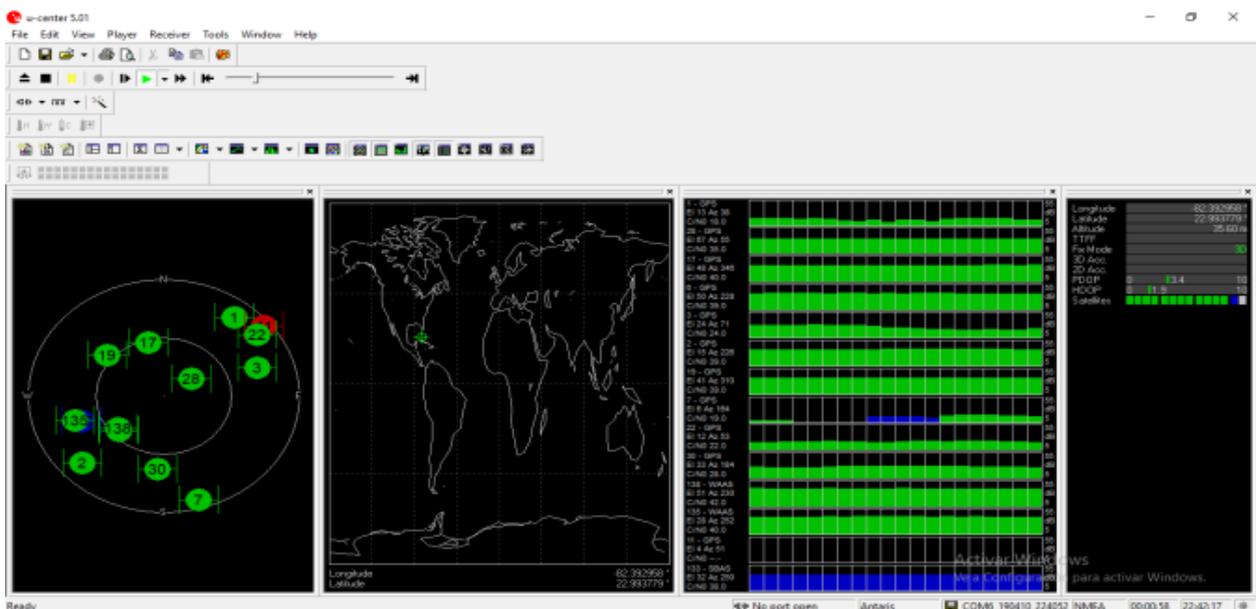


Figura 8. Interfaz U-center.

Dichos datos satelitales fueron decodificados por el software U-center en su interfaz como se muestra a continuación:

Establecer los datos del enlace descendente GPS - WRS.

Diámetro	3.7 m
Pérdidas del Alimentador Rx	0.1 dB
Eficiencia de la antena	0.75
Temperatura de Ruido LNB	60 K
Temperatura de Ruido Antena	30 K

Tabla 5: Datos necesarios de la antena receptora de la estación de referencia:

Resultados enlace descendente:

PIRE del Satélite	40.2 dBW
Temperatura del sistema de recepción	95.098K
Pérdidas del espacio libre	182.56 dB
Ganancia de antenas receptoras.	35 dBi
Nivel de iluminación del satélite.	-799.9 dBW/m ²
Factor de calidad (G/T) del receptor.	15.21 dB/K
Relación portadora – densidad de ruido	102.05 dB/Hz
Relación energía de bit - densidad de ruido	dB

Establecer los datos del enlace ascendente y descendente WAAS

Posición	133° W
Altura	35786 km
Frecuencia de transmisión de señal L1C	1575.42 MHz
Potencia de carga útil	24.8 dBW
Ganancia de la antena	13.4 dBi
Factor de calidad	-6
No linealidad de amplificadores del satélite (IBS)	0.6

Tabla 6. Datos necesarios del satélite GEO Galaxy 15:

Transmisor	
Diámetro	6m
Eficiencia de la antena	0.75
Frecuencia de enlace ascendente (Banda C)	6 GHz
Velocidad de bits	1.023 Mbps
Potencia	28.45 dBW

Tabla 7. Datos necesarios de la antena transmisora del GUS.

Receptor usuario	
Ganancia nominal del receptor WAAS	3dB
Pérdidas del Alimentador Rx	0.1 dB
Eficiencia de la antena	0.75
Temperatura de Ruido LNB	60 K
Temperatura de Ruido Antena	30 K

Tabla 8. Datos necesarios de la antena receptora del segmento de usuario.

Resultados Enlace Ascendente GUS – GEO

Ganancia de la antena transmisora	46.62 dBi
PIRE del transmisor	75.07 dBW
Relación portadora - densidad de ruido	98.96 db/Hz
Energía de bit a densidad de ruido	38.86 dB
Nivel de iluminación del transmisor	-770.15 dBW/m ²
Coseno del ángulo γ (Centro de la Tierra)	0.9074
Elevación (φ)	28°
Azimut (φ)	252°
Distancia de la estación terrena al satélite	36492,62 km

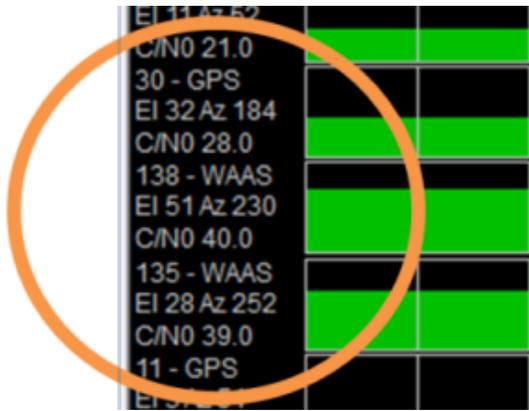


Figura 9. Muestra de datos en U-center.

El satélite Galaxy 15 de código 135 muestra los siguientes datos durante el monitoreo mediante el software U-center, como se aprecia en la figura 9.

$$elevation(E_t) = \varphi = 28^\circ$$

$$azimut(\phi) = 252^\circ$$

Enlace descendente GEO – Usuario

PIRE del satélite	38.2 dBW
Temperatura del sistema de recepción.	95.098 K
Pérdidas del espacio libre	187.69 dB
Factor de calidad (G/T) del receptor	-16,78 dB/K
Relación portadora - densidad de ruido	39 dB/Hz
Relación energía de bit a densidad de ruido	-21.09 dB

Cálculo de la relación energía de bit a densidad de ruido total.

$$(e/n_o)_t^{-1} = (e/n_o)_{aWAAS}^{-1} + (e/n_o)_{dGPS}^{-1} + (e/n_o)_{dWAAS}^{-1}$$

$$(e/n_o)_t^{-1} = 128.53489$$

$$\frac{E_b}{N_o} t = -21.09 \text{ dB}$$

Cálculo de la función de distribución de densidad gaussiana.

$$Gt = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \right) e^{\left(\frac{-t^2}{t} \right)}$$

$$G_{(0)} = 3,433 \cdot 10^{-12}$$

Cálculo de probabilidad de error para el enlace.

$$P_{eb} = \left(\frac{2}{3} \right) G(\sqrt{6W}) \left(\sin \frac{\pi}{2} \right)$$

$$P_{eb} = 1.0683496 \cdot 10^{-13}$$

Valor calculado para una señal BPSK con C/No = 30

dB/Hz y FEC = 1/2 [1]

$$P_{eb} = 10^{-12}$$

Conclusiones

En este proyecto se puede constatar que mediante el diseño de un enlace satelital y el cálculo de la probabilidad de error del lazo de comunicaciones es posible acceder al SBAS WAAS proveyendo de señales GPS corregidas a las aeronaves con niveles de prestación fiables para la aviación. Los beneficios regionales comenzarían por el aumento de cobertura del servicio en el Caribe, la posibilidad de cooperar con este sistema aumentaría la posibilidad de sobrevuelos al brindar un servicio más directo a aerolíneas norteamericanas cuyas aeronaves portan receptores WAAS. Debido al espaciamiento entre estaciones, de mil kilómetros, y su amplia cobertura de servicio solo sería necesaria la instalación de una Estación de Referencia y una Estación de Comunicaciones y contribuiría a la evolución de los sistemas, sustituyendo los equipos tradicionales de vigilancia y navegación.

Referencias bibliográficas

- García Cañedo, Marta Oliva. (2007). Propuesta para la implementación de un sistema WAAS en México. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D. F.
- Alay García, Edgar René. (2007). Estudio de la migración de sistemas de navegación aérea por radioayudas terrestres, a los basados por satélites en Guatemala/Centroamérica. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Furquet Gascón, María del Carmen. (2016). "Estudio y análisis de la certificación y diseño de un SBAS (Satellite Based Augmentation System) para aeropuertos/heliódromos". Trabajo de Grado en Universidad Politécnica de Valencia.

Brunini, Claudio. (2015). Sistemas de aumentación GNSS utilizados por la aeronáutica civil desde la perspectiva de SIRGAS. Universidad Pedro Henríquez Ureña, Santo Domingo, República Dominicana.

<http://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf>. Department of transportation United States of America, Federal Aviation Administration. Global Positioning System Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Standard. 1st Edition, 31 Octubre 2008.

Echenique Véliz Pablo J. (2019). Presupuesto Enlace Satelital. Comunicaciones por satélite. Presentación.

Leonjanga Laureano, Jorge. (2013). Diselo y cálculo de un enlace vía satélite entre dos puntos.

<https://www.nstb.tc.faa.gov/images/GeoFootPrint.png>.

