

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE VIGILANCIA AERONAÚTICO BASADO EN TÉCNICAS DE MULTILATERACIÓN

IMPLEMENTATION OF AN AERONAUTICAL SURVEILLANCE SYSTEM BASED ON MULTILATERATION TECHNIQUES

Ing. Alexander Reinoso Díaz¹ (0000-0003-2799-3674), Empresa Cubana de Navegación Aérea

reinosoa439@gmail.com

Dr. C. José Armando Rodríguez Rojas¹ (0000-0002-9117-2371)

Dr. C. Irina Pedroso Rodríguez² (0000-0002-5853-7607), Universidad de Matanzas

Resumen

El presente trabajo aborda la implementación de un sistema de vigilancia aeronáutico basado en redes de sistemas de multilateración. Se caracterizan los radares empleados para garantizar la vigilancia de las operaciones aéreas dentro de la región de información de vuelos de La Habana. Se describe un sistema de vigilancia aeronáutico basado en los métodos de multilateración, a partir de sus componentes y los algoritmos matemáticos que se utilizan para la radiolocalización de los vuelos. Se muestra una propuesta de solución que garantiza la cobertura en regiones remotas y a bajas alturas, y, por ende, las operaciones de sobrevuelos, arribos y despegues en todos los aeródromos nacionales. Para el estudio se tuvieron en cuenta las características de cada uno de los aeródromos seleccionados en cuanto a cantidad de operaciones, disponibilidad de la vigilancia actual y la cobertura radioeléctrica obtenida a partir de simulaciones realizadas con el empleo del *software Radio Mobile*.

Palabras claves: *cobertura radioeléctrica; multilateración; Radio Mobile*

Summary

This article deals with the implementation of an aeronautical surveillance system based on networks of multilateration systems. It raises the social need and the advantages that the development of this

type of system would provide compared to the current ones supported by air traffic control services today. At the beginning of the document, there is a brief description of the characteristics of the radars used to guarantee the surveillance of air operations within the flight information region of Havana, and the surveillance coverage guaranteed with this type of equipment is shown. Subsequently, the description of an aeronautical surveillance system based on multilateration methods is made, where the components that make them up are described, the mathematical algorithms used for the radiolocation of flights, and a proposed solution is proposed to guarantee the coverage in remote regions and at low altitudes, so that overflight, arrival and takeoff operations are guaranteed at all national aerodromes. During its development, the characteristics of each of the selected aerodromes were taken into account in terms of number of operations, availability of current surveillance and radio coverage obtained from simulations carried out with the use of Radio Mobile software.

Keywords: *multilateration; radio electric coverage; radio mobile*

El incremento del flujo de aeronaves sobre la Region de Información de Vuelos de La Habana ha sido motivo de estudio en la Empresa Cubana de Navegación Aérea, encargada de brindar, entre otros servicios, el Control de Tránsito Aéreo a todas las aeronaves que operan dentro del espacio aéreo definido entre el paralelo 20 Norte y 24 Norte. La misma tiene como misión garantizar el flujo ordenado y seguro de todas las aeronaves que operan dentro del espacio aéreo de La Habana, y de mantener los índices de seguridad elevados durante la prestación de los servicios que se les brindan a los operadores.

Actualmente los sistemas de vigilancia que soportan los Servicios de Control de Tránsito Aéreo y que permiten el cumplimiento de la actividad, están basados en redes de *RADAR* desplegados en diferentes localizaciones, de manera que se logre cubrir la mayor parte del espacio aéreo cubano. Sin embargo, este tipo de sistema de vigilancia presenta una serie de inconvenientes a la hora de emplazar las antenas transmisora receptoras, de poner en funcionamiento y garantizar la continuidad del servicio, y de procesar los mensajes transmitidos por los sistemas de vigilancia autónomos a bordo de las aeronaves.

La tendencia actual tanto de la aviación general como la operacional es emplear sistemas de vigilancia autónomos que les permitan no solo estar al tanto del entorno operativo sino también de disponer de las capacidades que les garanticen la realización de las operaciones aéreas con alto grado de precisión (Mohr, 2020).

Todos esos factores que de una u otra forma influyen en la calidad del servicio, y pueden en un momento determinado ser factores contribuyentes a incidentes, llevan a la necesidad de emplear otro tipo de solución que garantice las operaciones tanto en tierra como aéreas. Esto a su vez permite la asimilación de una mayor cantidad de vuelos y por tanto un uso óptimo del espacio aéreo cubano.

La presente propuesta de implementación de *Wide Área MLAT (WAM)* tiene como objetivo fundamental impulsar el proyecto de desarrollo de una red de sistemas de vigilancia aeronáutica basada en sistemas de multilateración, capaces de cubrir las zonas de no cobertura y garantizar la recepción y procesamiento de mensajes provenientes de sistemas de vigilancia autónomos a bordo de las aeronaves.

La Región de Información de Vuelos de La Habana (*FIR Habana*) dispone actualmente de una red de estaciones *Monopulse Secondary Surveillance RADAR (MSSR)* que cubren las regiones Occidental, Centro, inmediaciones del Aeropuerto Internacional José Martí para brindar servicios en el Área Terminal de Maniobras (*TMA*), Aeropuerto Internacional Abel Santamaría de Santa Clara, Aeropuerto Internacional de Holguín, Aeropuerto Internacional de Camagüey, y estación *SSR* convencional en la región Oriental de Santiago de Cuba.

Además, se adquirieron 1 sistema *MLAT* con 6 estaciones receptoras en el Aeropuerto Internacional de Varadero Juan Gualberto Gómez, cada estación tiene capacidad *ADS-B* versión 260B incluido, y otro con 14 estaciones receptoras emplazadas en diferentes posiciones dentro y en las cercanías del Aeropuerto Internacional José Martí de La Habana, de igual forma con capacidad *ADS-B* versión 260B.

Los radares, por sus características de funcionamiento, presentan desventajas respecto a los sistemas de *MLAT*, de ellas se consideran de gran importancia la incapacidad de procesar todos los mensajes de vigilancia empleados por la aviación general, limitados solamente al procesamiento de protocolos *ASTERIX* categorías 034 y 048 (*EUROCAE ED109, February 1, 2021*).

Otra de las desventajas son los tiempos de actualización de estos debido a la velocidad de giro de la antena que por lo general se ajustan entre 4 y 6 segundos en dependencia del tipo de servicio que se brinda, y la complejidad que presentan a la hora emplazar las antenas, así como garantizar los mantenimientos preventivo - periódicos.

Las zonas de cobertura que garantizan la prestación del servicio se muestran en la figura 1, la misma presenta zonas de silencio a bajas alturas debido al *tilt* de antena o ángulo de inclinación con que se emplazan las antenas de *RADAR*. Este cono de silencio formado entre la superficie del terreno y la línea inferior que define el haz de interrogación provocan que los vuelos a bajas alturas no puedan ser detectados debido a que se deterioran factores como la relación de verosimilitud y la estadística suficiente para la toma de decisiones (figura 2).

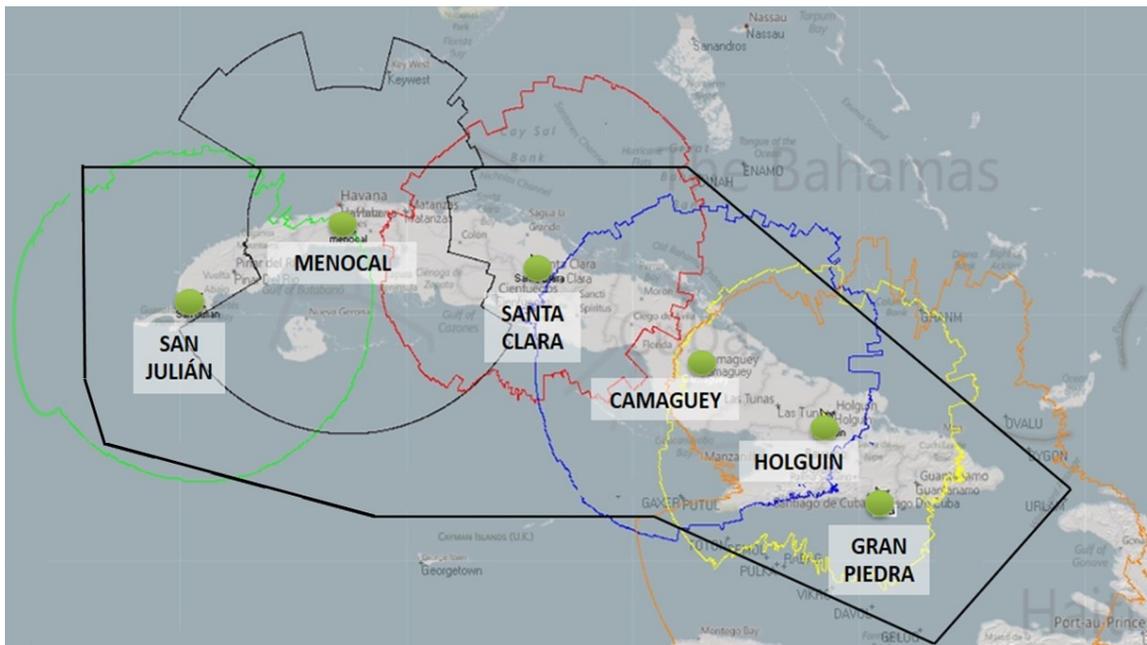


Figura 1. Estaciones de vigilancia basadas en MSSR.

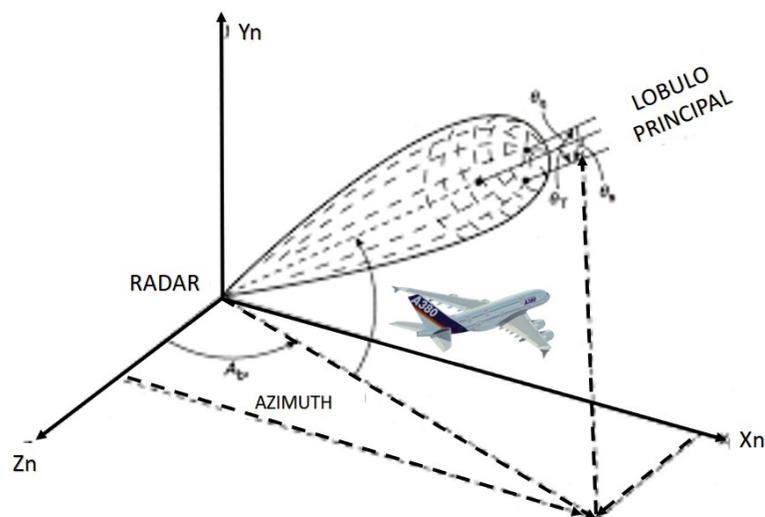


Figura 2. Región de no cobertura.

Dentro de las posibles causas identificadas que pudieran influir en la prestación de un servicio de control de tránsito aéreo eficiente y de calidad y por tanto en la seguridad operacional se tienen:

Deficiencias

- Cobertura de la vigilancia no garantizada en toda la Región de Información de Vuelos de La Habana y a bajas alturas.
- Incumplimiento de las instrucciones controlador – piloto.
- Empleo de procedimientos de control inadecuados.
- Existencia de un límite de sectorización del espacio aéreo a nivel de *software*.

Amenazas

- *Software* de gestión de tránsito aéreo obsoleto.
- *Hardware* de los servicios de control de tránsito aéreo obsoleto (sistemas de vigilancia basados en *MSSR*).
- Aumento de la carga de trabajo en el sector de control.
- Periodos de tormentas solares que afectan las comunicaciones *Very High Frequency (VHF)* y mensajería aeronáutica.
- Fallas aleatorias de los monitores de representación de situación aérea (*ASD*).

A partir de las deficiencias y amenazas que pueden ser factores contribuyentes a la ocurrencia de incidentes de tránsito aéreo, se obtiene el diagrama de Ishikawa (figura 3), donde se hace énfasis en el mejoramiento de los sistemas de vigilancia aeronáutica.

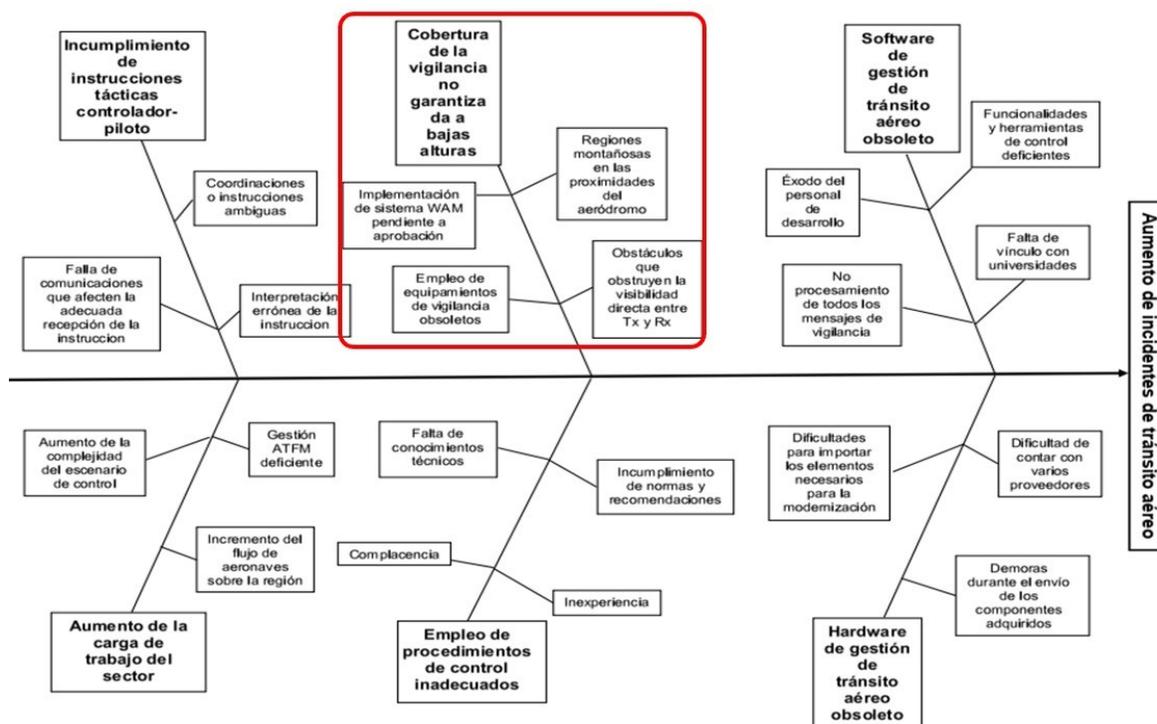


Figura 3. Diagrama de Ishikawa (Causa - Efecto).

Según ED142 (September 1, 2010), un sistema de vigilancia basado en técnicas de multilateración, es un sistema cooperativo independiente que permite la localización del objetivo a partir del *Time Difference of Arrival (TDOA)* de las señales recibidas del *transponder* a bordo de las aeronaves. Cada interrogación está dirigida a un único vuelo a partir del código de 24 *bits* que identifica a cada aeronave en específico, por lo que al ser recibido por el *transponder* el mismo comprueba su propia dirección y tras reconocerla transmite la respuesta oportuna.

Las respuestas son recibidas por receptores en tierra y procesadas obteniéndose el *TDOA* lo cual permite obtener la posición del vuelo. Las marcas de tiempo insertadas en los mensajes de bajada

permiten secuenciar las respuestas evitando el solapamiento de estas (*garbling* síncrono o asíncrono), o las falsas respuestas (*FRUIT*) (figura 4).

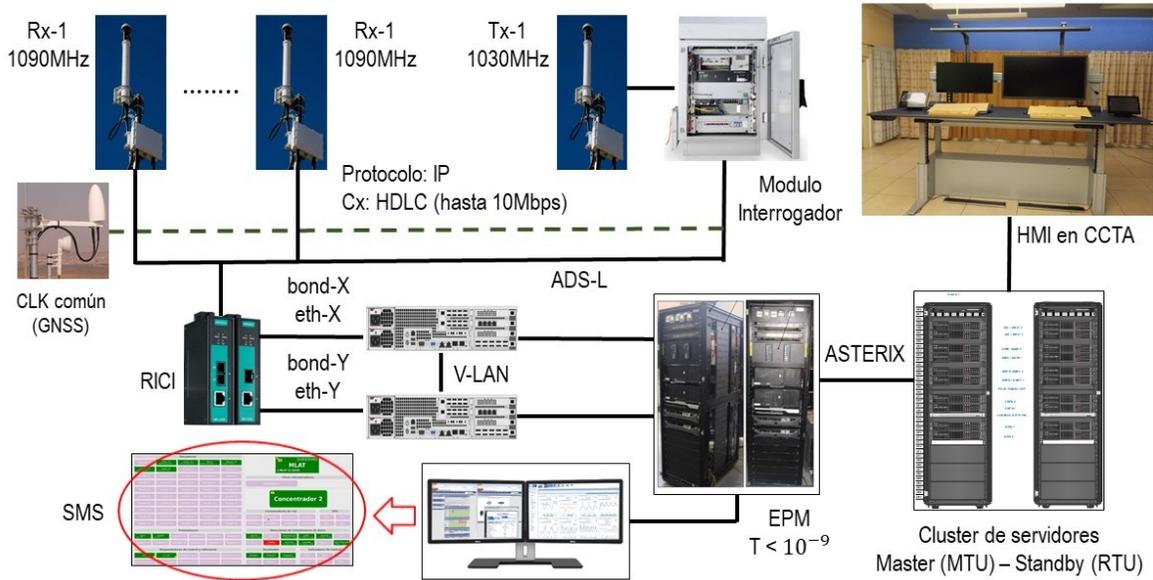


Figura 4. Diagrama básico de sistema de multilateración.

Para la obtención de la posición del objetivo el sistema tiene en cuenta el tiempo de arribo de la señal de respuesta de este, lo cual dependerá de la distancia que lo separa de cada estación receptora. Las variables x , y , z definen las coordenadas en 3D de la posición de la aeronave y de los sensores en tierra. Todo parte de la ecuación de distancia (ecuación 1):

$$d_{1,2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (ec. 1)$$

Luego la distancia entre la aeronave y cada sensor receptor es:

$$i R_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (ec. 2)$$

$$i R_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \quad (ec. 3)$$

$i \dots$

$$i R_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} \quad (ec. 4)$$

Donde:

$$R_i = c \cdot \tau_i \quad (\text{ec. } 5)$$

Por lo que se calcula $TDOA_{i,j}$ como:

$$TDOA_{i,j} = \frac{R_i - R_j}{c} = \frac{R_{i,j}}{c} \quad (\text{ec. } 6)$$

Entonces se tiene que:

$$TDOA_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}{c} \quad (\text{ec. } 7)$$

Finalmente se obtiene sistema de ecuaciones siguientes:

$R_{ij} = c \cdot TDOA_{i,j}$ (ec. 8); Diferencia de arribo de la señal entre S_i y S_j .

$R_{jk} = c \cdot TDOA_{j,k}$ (ec.9); Diferencia de arribo de la señal entre S_j y S_k .

$R_{kl} = c \cdot TDOA_{k,l}$ (ec. 10); Diferencia de arribo de la señal entre S_k y S_l .

$R_{li} = c \cdot TDOA_{l,i}$ (ec. 11); Diferencia de arribo de la señal entre S_l y S_i .

El dimensionado de un sistema de vigilancia aeronáutica basado en la multilateración depende de varios factores, entre ellos se tienen en cuenta el área de la cobertura para la prestación del servicio, el tipo de servicio que se pretende brindar, y las características del terreno. Luego teniendo en cuenta lo anterior se determina la cantidad de estaciones receptoras y transmisoras necesarias, y las zonas en las cuales serán emplazadas las mismas.

La figura 5 muestra los componentes básicos que conforman un *MLAT*, las características de cada elemento, dígame velocidades de procesamiento y longitud de los mensajes procesados dependerán del tipo de servicio y del fabricante del componente.



Modulo Tx - Rx
 Frecuencia de *upstream* 1030MHz
 Frecuencia de *downstream* 1090MHz
 Modulación por impulsos
 Consta de 4 bloques preámbulo de 4 impulsos
Bit Rate = 1Mbps
 Bloque de datos de 56 bits a 112 bits (*short squitter - extended squitter*)



RICI Sunhillo 5000
 Protocolo serie – ethernet
 Velocidad de hasta 100Mbps
 4 Cx de entrada
 2 Cx de salida
 Posibilidad de bonderizar

Principales Funcionalidades

SO: COTS Linux
 Velocidades de actualización < 1seg
 Protocolos: NTP, IP
 Soporta entrada de Cx HDLC
 Alta disponibilidad (>99.999%)
 Rack de 19"



Antena Rx MERA
 Polarización vertical
 Frecuencia de *upstream* 1030MHz
 Frecuencia de *downstream* 1090MHz

Figura 5. Componentes básicos de un sistema de multilateración.

Teniendo en cuenta las zonas de no cobertura y el flujo de aeronaves que sobrevuelan por los diferentes sectores, se decide realizar el diseño del sistema en los aeródromos de Jardines del Rey en Cayo Coco, en las localidades de Sierra de las Casas y Sierra Caballos en la Isla de la Juventud, en Gran Piedra Santiago de Cuba, y en La Máquina, Guantánamo.

De esta forma se garantiza la cobertura de la vigilancia a bajas alturas (figura 6), lo cual a su vez mejora la calidad del servicio y por ende disminuye la probabilidad de ocurrencia de incidentes de tránsito aéreo.

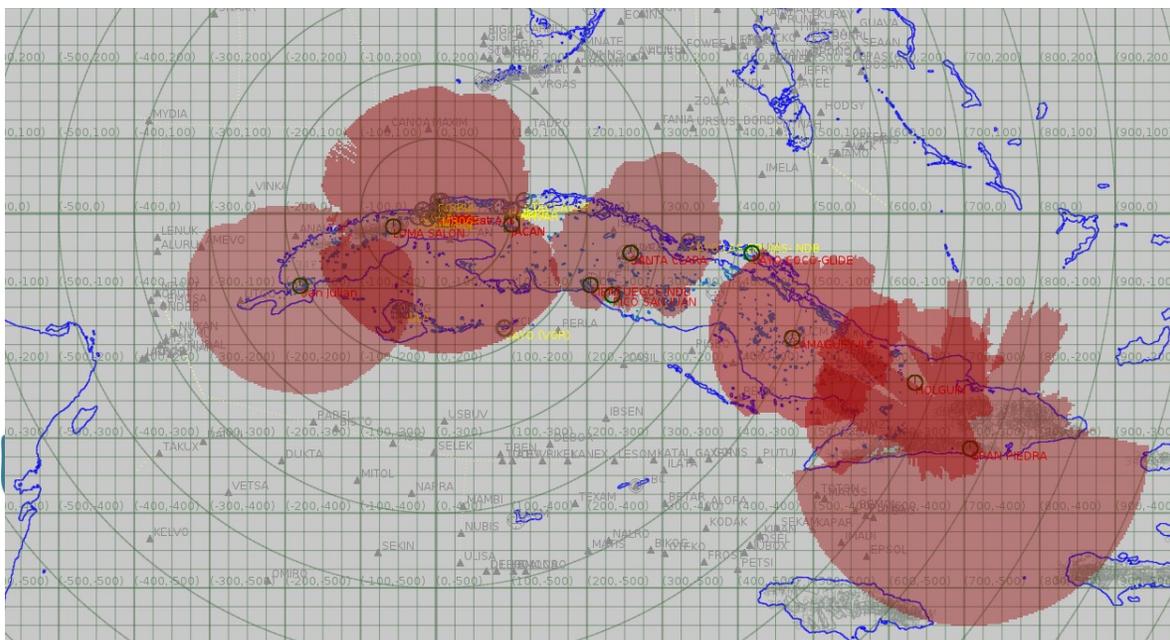


Figura 6. Zonas de cobertura garantizada a bajas alturas.

Teniendo en cuenta las zonas de no cobertura y cantidad de operaciones aéreas que se realizan a diario se propone implementar el sistema de vigilancia en las siguientes localidades:

La Máquina (Guantánamo) (figura 7) y Gran Piedra (Santiago de Cuba), para cubrir los vuelos que operen a bajas alturas al Este de la base naval de Guantánamo.



Figura 7. Estación de La Máquina, Guantánamo.

Sierra de Caballos (Isla de la Juventud), como extensión del sistema de multilateración de La Habana y Varadero, para cubrir los vuelos que operen a bajas alturas al sur de la región (figura 8), y Cayo Coco (figura 9), para cubrir el centro y norte de la Región de Información de Vuelos de La Habana a bajas alturas.

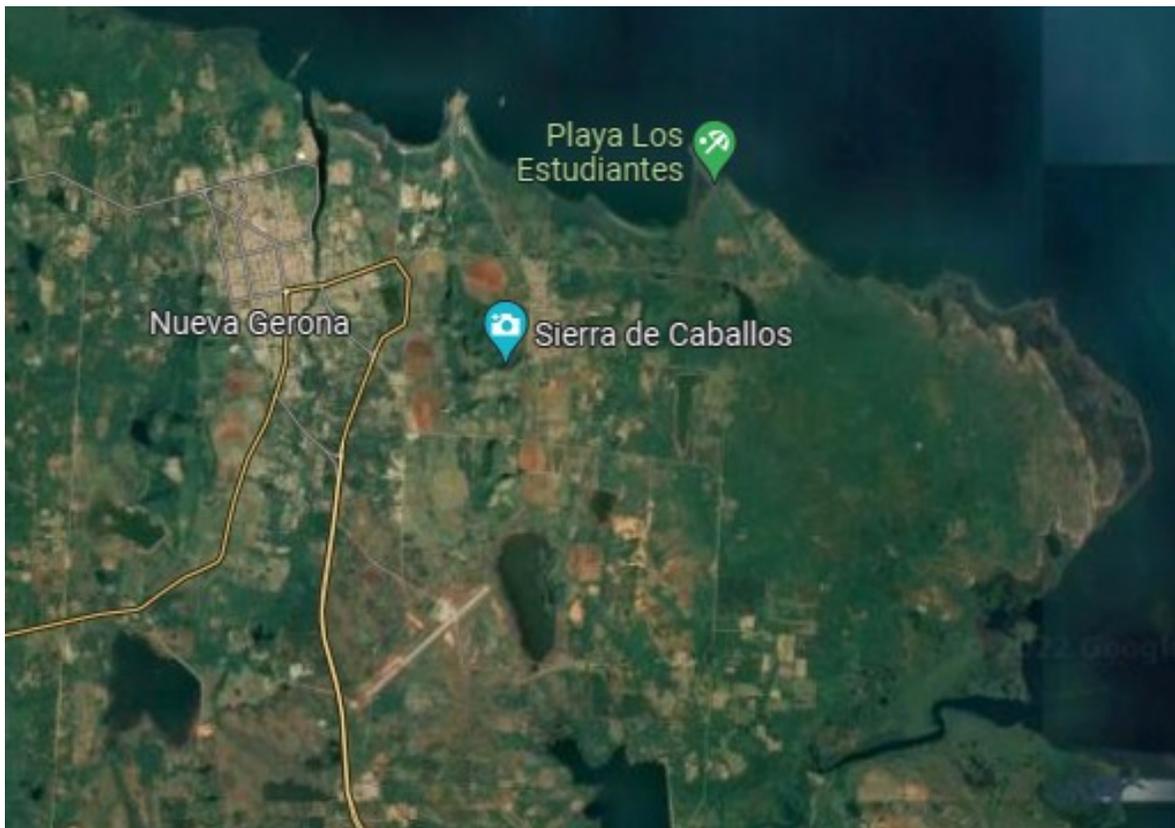


Figura 8. Estación de Sierra de Caballos, Nueva Gerona.



Figura 9. Estaciones de Jardines del Rey, Cayo Coco.

Además, se propone instalar dos estaciones receptoras de señal ADS-B versión 260B en las localidades de Loma del Salón y Esperón para cubrir la región occidental de la isla (RTCA DO-260 – DO-260B, 2020, 17, December). La siguiente imagen muestra el alcance de la cobertura simulada a niveles de vuelo inferiores a 10000 pies con el despliegue del sistema en la región oriental.

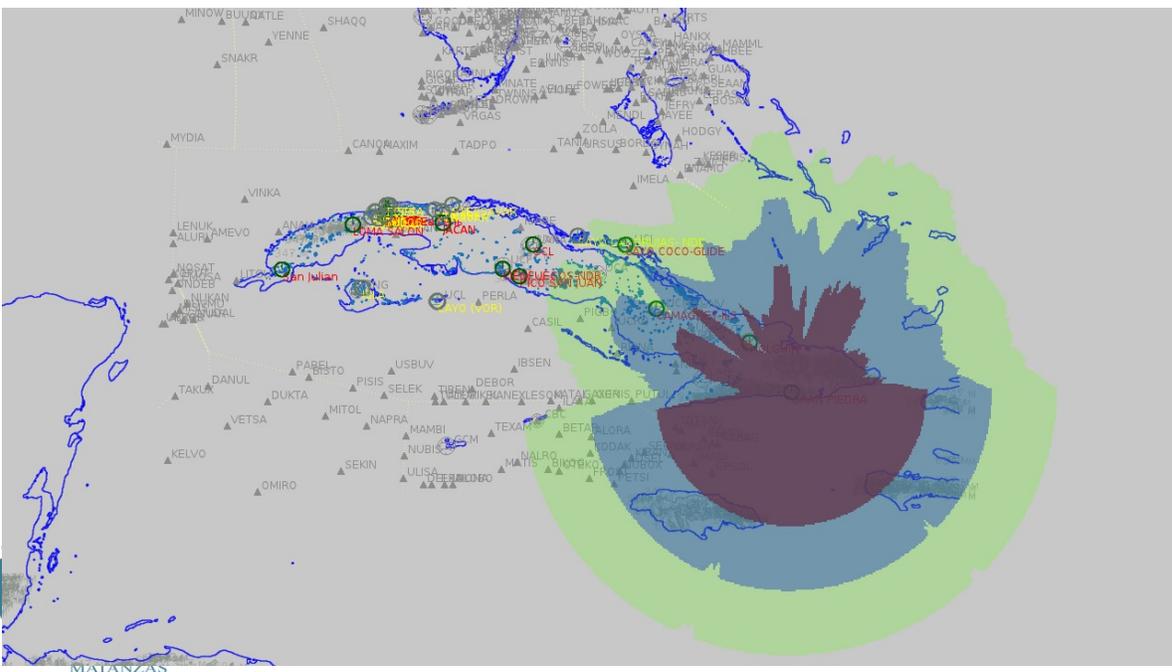


Figura 10. Cobertura garantizada a baja altura en Gran Piedra, Santiago de Cuba (3000ft, 5000ft, 10000ft).

La figura 11 muestra de igual manera el resultado de la cobertura lograda con el despliegue del sistema en Cayo Coco. En la misma se definen por colores las diferentes áreas de cobertura alcanzadas en dependencia de las alturas (en rojo 3000ft, en azul 5000ft, y en verde 10000ft).

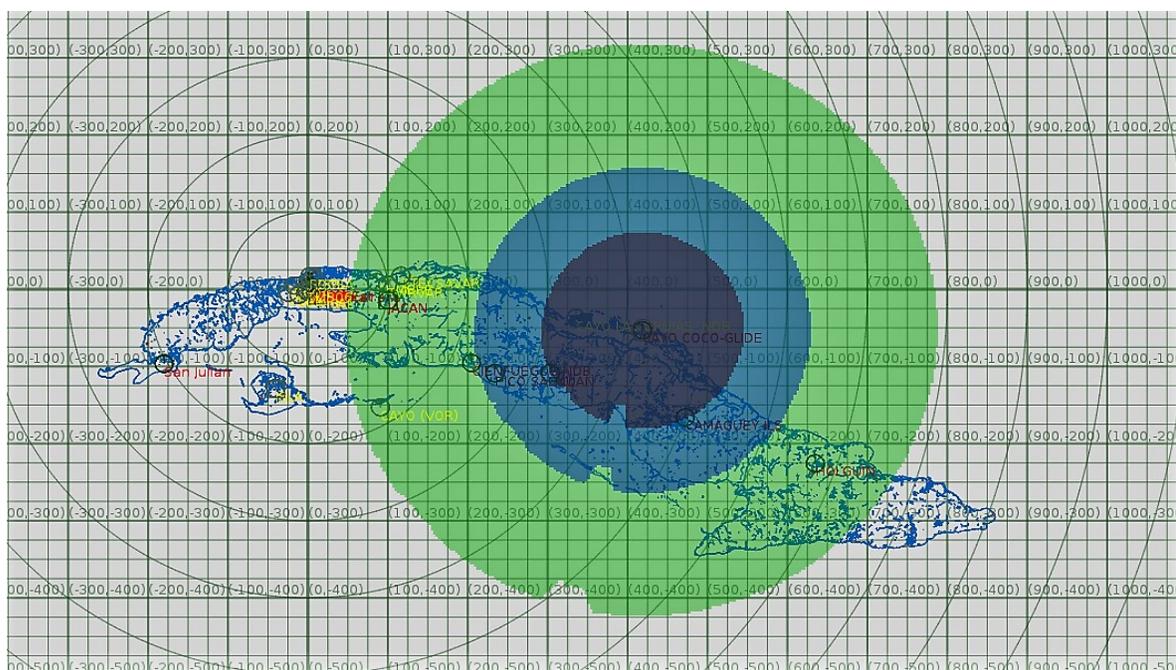


Figura 11. Cobertura garantizada en Cayo Coco (3000ft, 5000ft, 10000ft).

Y finalmente se muestran en la figura 12, figura 13, y figura 14 la cobertura alcanzada con el despliegue de estaciones ADS-B DO-260B en las localidades de Loma Salón, Esperón, e Isla de la Juventud. De esta manera se lograría garantizar la vigilancia a bajas alturas en la región Occidental y Sur de la isla de Cuba. En las simulaciones se logró alcanzar hasta 180 NM de distancia

garantizando la precisión del sistema dentro de los niveles establecidos en Anexo 10 de Telecomunicaciones Aeronáuticas.

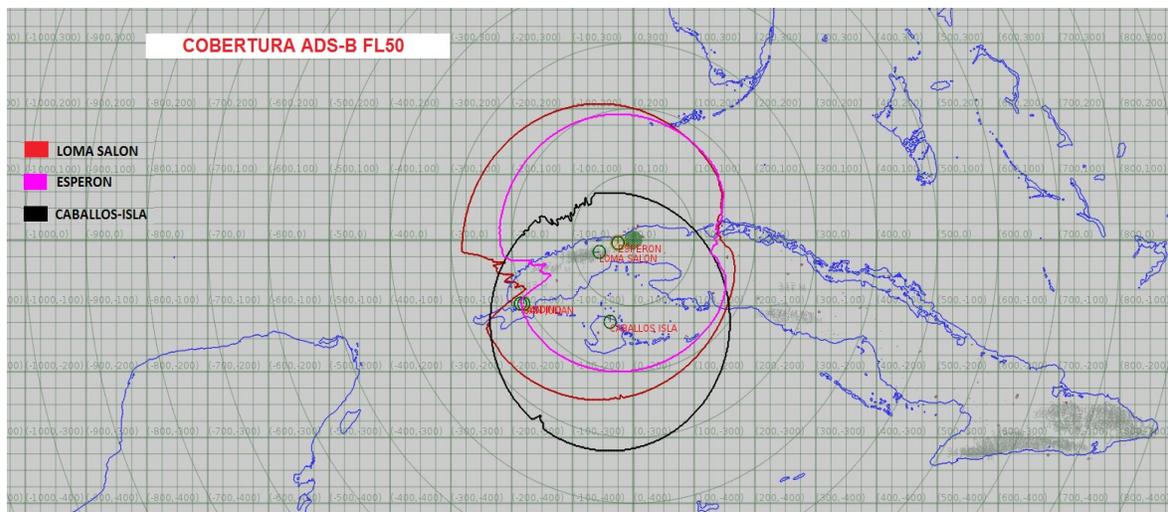


Figura 12. Cobertura de estaciones ADS-B a 5000 pies de altura en Loma Sal3n, Esper3n, y Sierra de Caballos.

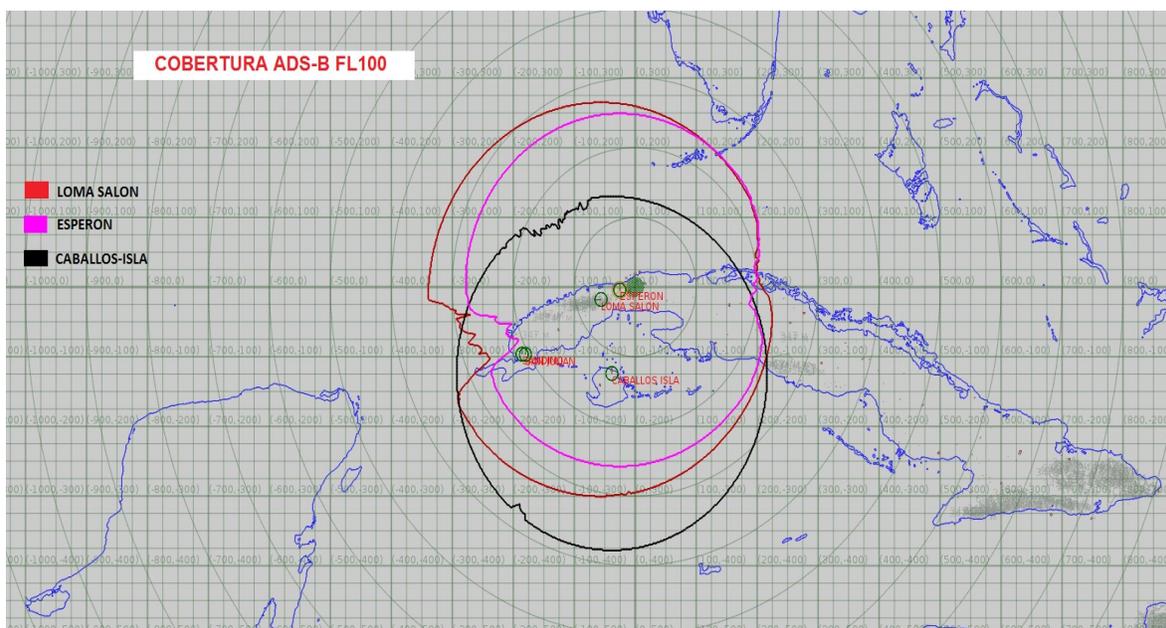


Figura 13. Cobertura de estaciones ADS-B a 10000 pies de altura en Loma Salón, Esperón, y Sierra de Caballos.

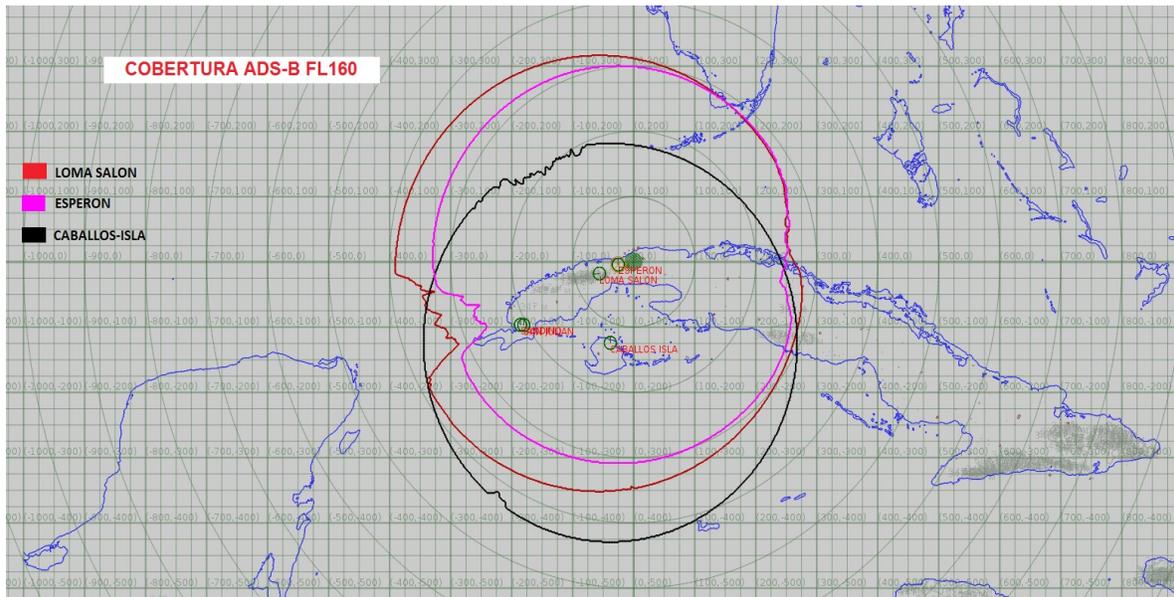


Figura 14. Cobertura de estaciones ADS-B a 16000 pies de altura en Loma Salón, Esperón, y Sierra de Caballos.

En la figura 15 se muestra el resultado del procesamiento del sistema de multilateración implementado en el Aeropuerto Internacional de Varadero Juan Gualberto Gómez. El mismo se obtuvo a través del *software* de gestión de sistemas de vigilancia aeronáutica *PPI (Plain Position Indicator)*, para una aeronave despegando a baja altura, donde se muestran los parámetros de Probabilidad de Detección de Código (pC) y precisión del dato de vigilancia entregado (SDP).

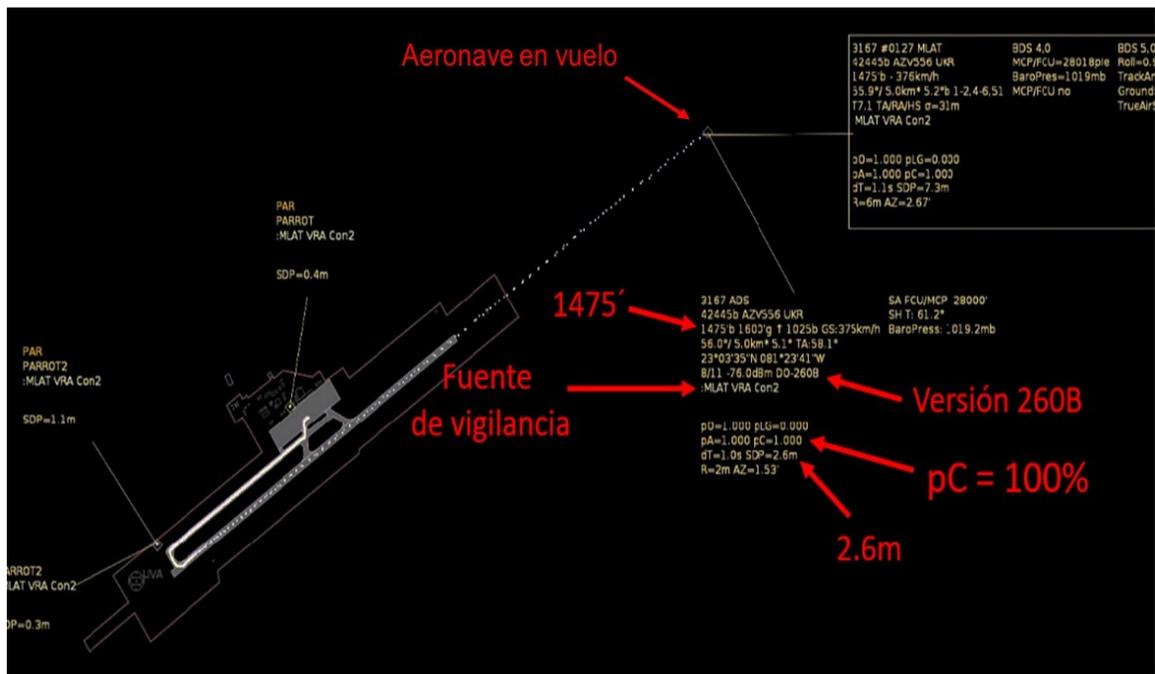


Figura 15. Resultado del procesamiento de señales del sistema MLAT de Varadero para aeronave a baja altura.

El aporte social de este sistema de vigilancia aeronáutica basado en técnicas de multilateración está en que favorece no solo la gestión y servicios de control de tránsito aéreo, sino también a los operadores de aerolíneas, dado que eleva los niveles de seguridad operacional.

A continuación se exponen algunas de las ventajas que aportan este tipo de sistemas:

- Soluciones a medida que garantizan la cobertura deseada: La cobertura WAM es escalable y fácil de ampliar, todo depende de la cantidad de estaciones receptoras del diseño.
- Redundancia N-1 o N-2 que incrementa la disponibilidad: Con un despliegue adecuado la WAM resultante será completamente operativa incluso con 1 o 2 estaciones fuera de servicio, lo que da la posibilidad de realizar mantenimientos preventivos a cada una de las estaciones receptoras sin interrumpir el servicio (un MSSR requiere canal de transmisión duplicado para garantizar la redundancia) (RAC 10, 2020).

- Fácil emplazamiento de estaciones RX/TX en lugares remotos y de difícil acceso: Las antenas receptoras presentan poco peso y longitudes de alrededor de 1m, por lo que no se dificulta la transportación de las mismas.
- Alta precisión (entre 3m-30m): La precisión obtenida dependerá de la cantidad de estaciones emplazadas y calidad de las señales recibidas, no obstante, los tiempos de procesamiento no superan 1seg por lo que se tendrá la posición de la aeronave lo más actualizada posible.
- No contienen elementos rotatorios por tanto siempre están recibiendo mensajes en todas las direcciones.
- Tiempos de refrescamiento o de actualización inferior a 1 seg.
- Alcance de más de 250 NM (en dependencia de los ajustes de potencia del sistema).
- Componentes de bajo peso y fáciles de instalar.
- Diseño modular que permite dar mantenimiento sin afectaciones en el servicio (aunque disminuye la precisión) (RAC 10, 2020).
- Capacidad de más de 600 blancos por cada estación de procesamiento y monitoreo.
- Bajo consumo de potencia de transmisión.
- Procesamiento de mensajes ACAS/TCAS (*Traffic Collision Avoidance System*), GBS (*Grounded Bit Signal*).
- Bajo MTBF (*Medium Time Between Fails*), (tasa de errores mínima).
- Posibilidad de actualización de *software* de forma remota.
- Elimina las importaciones que conllevaría la mantención de componentes de sistemas basados en MSSR (Marín, 2016).
- Fácil desmontaje en caso de condiciones meteorológicas adversas.

Se concluye que:

Garantizar la seguridad de las operaciones y el uso óptimo del espacio aéreo son factores esenciales de la ECNA, la prestación de los servicios de control de tránsito aéreo con el apoyo de los sistemas de vigilancia garantiza de cierta manera el cumplimiento de estos objetivos. Además, con la implementación de un sistema de vigilancia basado en MLAT se lograría cubrir las zonas de poca cobertura y eliminar cualquier riesgo de incidente. Además, con la implementación de un sistema de Multilateración de Área Amplia (WAM) en las localizaciones seleccionadas se

garantizaría la cobertura de la vigilancia para los vuelos que operen a bajas alturas en la Región de Información de Vuelos de La Habana, disminuyendo de esta manera las posibilidades de incidentes de tránsito aéreo. Esto permitiría además elevar los niveles de seguridad operacional dentro del espacio aéreo de Cuba y la prestación de un servicio de control de tránsito aéreo de calidad, eliminando la necesidad de importación de componentes para la sustitución y el mantenimiento de los MSSR.

Referencias bibliográficas

ED142 (2010). *Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM systems)*.

RAC 10 (2020). Reglaciones Aeronáuticas Cubanas–Telecomunicaciones Aeronáuticas. Capítulo 2, Generalidades, SECCION SEXTA: Confiabilidad y Disponibilidad de los sistemas de comunicaciones, navegación y vigilancia. Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba–IACC.

Marín, E. (2016). Evaluación de la cobertura y precisión de los sistemas de vigilancia aeronáutica por Multilateracion para cualquier región del territorio de Cuba. Tesis en opción al título de Master en Telecomunicaciones, CUJAE, La Habana, Cuba.

UIT K.116 (2019, Julio). Requisitos de compatibilidad electromagnética y métodos de prueba para equipos terminales de radiotelecomunicaciones.

ITU-T (2019). *Electromagnetic compatibility requirements and test methods for radio telecommunication terminal equipment*.

Anexo 10 OACI (2007, Julio). Telecomunicaciones Aeronáuticas. Volume 3, segunda edición.

EUROCAE ED109 (2021, 1, February). *Software Integrity Assurance Considerations for Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems. Corrigendum 1*.

Mohr, M. (2020, 3, September). *Airline CNS Requirements for the Future. AD SESAR, Safety and Flight Operations, IATA. LATO Meeting*.

RTCA DO-260 – DO-260B (2020, 17, December). *Supplemental Data Information – Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)*.



Monografías 2023
Universidad de Matanzas © 2023
ISBN: 978-959-16-5074-0