

Diseño y simulación de antena inteligente asistida por GPS para un vehículo aéreo no tripulado

Francisco Cuesta¹ y René P. Játiva E.^{1*}

¹*Colegio de Ciencias e Ingeniería - Universidad San Francisco de Quito Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.*

**Autor principal/Corresponding author, e-mail: rjativa@usfq.edu.ec*

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 02/05/2013. Aceptado/Accepted: 02/06/2013.

Publicado en línea/Published on Web: 28/06/2013. Impreso/Printed: 06/06/2013.

Abstract

A critical component of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is the communications system. It is in charge of transmitting information from the aircraft to the base station and sending configurations to the aircraft. It is important to keep safe the communication link, considering that energy resources limit the autonomy of operation of the aircraft. For this reason, this paper presents a low complex smart antenna system that manages the transmission power of the communication system based on aircraft position using the positioning module that it is part of the equipment of the aircraft.

Keywords. UAV, Smart Antennas, GPS

Resumen

Un componente crítico de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) es el sistema de comunicaciones. Éste se encarga de transmitir la información de la aeronave hacia la estación base y enviar configuraciones hacia la aeronave. Es importante mantener el enlace de comunicaciones, considerando que los recursos energéticos limitan la autonomía de operación de la aeronave. Por este motivo este artículo plantea un sistema de antena inteligente de baja complejidad que administre la potencia de transmisión del sistema de comunicaciones en función de la posición de la aeronave utilizando el módulo de posicionamiento que es parte del equipamiento de la aeronave.

Palabras Clave. Vehículo Aéreo no Tripulado, Antena Inteligente, GPS.

Introducción

Definimos como aeronaves no tripuladas a aviones teledirigidos remotamente o autómatas que se utilizan generalmente para tareas de monitoreo o para misiones de reconocimiento en áreas geográficas hostiles o extensas en donde se prefiere preservar el recurso humano y reducir los costos de operación. Estas aeronaves conocidas como UAVs (del inglés Unmanned Air Vehicles) se han aplicado en escenarios militares y de seguridad, y actualmente son el foco de investigaciones en aplicaciones civiles tales como: control de tráfico y control de carreteras, control de narcotráfico, fotografía aérea y catastro, detección de incendios, control de migración, asistencia y control de pesca, comunicaciones de telefonía móvil e internet. Una búsqueda rápida por Internet permite localizar proyectos relacionados en diversos estados de desarrollo en España, Argentina, Perú y Ecuador.

El desarrollo de UAVs involucra capacidades multidis-

ciplinares en áreas de Aeronáutica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, de Telecomunicaciones y Control, y en etapas avanzadas de desarrollo se constituyen en autómatas que requieren incluso de inteligencia artificial no solo para su operación individual sino como parte de un conglomerado de autómatas inteligentes [1, 2]. Para su adecuada operación, se han desarrollado modelos de gestión [3], pues el desarrollo de la misión requiere de una correcta interacción entre la nave, la estación base y los subsistemas de despegue y recuperación.

Al tratarse de una aeronave autónoma, sus recursos energéticos son limitados y deben optimizarse para la operación del equipamiento de monitoreo y navegación. En la mayoría de los casos, la información obtenida por la aeronave se transmite a una estación base en tiempo real, por lo que es necesario un sistema eficiente de transmisión de datos. Sin embargo, al tener recursos energéticos limitados, el rango del enlace entre la aeronave y la estación base es un factor neurálgico a resol-

verse, pues este puede verse afectado por la presencia de interferencias, así como por las características inherentes a las señales transmitidas en su propagación entre la aeronave y la estación de control, lo cual ha llevado incluso a la propuesta de esquemas complejos de transmisión/recepción [4] para enlaces por sobre los 50 km.

Se considera que la optimización de potencia en la aeronave, además de incrementar el rango, aumentaría su autonomía de operación; por lo que se vuelve necesario mejorar el sistema de comunicaciones en la aeronave. Las características deseadas para la solución a implementarse son: bajo peso, bajo consumo de potencia y la ausencia de puntos ciegos en el área de cobertura. Una solución sencilla es la adición de amplificadores en transmisión y recepción. La utilización de amplificadores en la estación base aumentaría el rango, pero su utilización en la aeronave aumentaría el peso del equipo y la potencia consumida de forma considerable. Otra solución es la utilización de antenas de alta directividad. Sin embargo, si bien esta solución aumenta el rango, también reduce el área de cobertura. Una forma de compensar este problema es utilizar varias de estas antenas en un arreglo sectorizado; pero no existiría una optimización de potencia.

Una solución que aumenta el rango y optimiza el consumo de potencia es un arreglo de antenas; pero al igual que en el caso anterior, un arreglo presenta puntos ciegos en su área de cobertura. La diferencia entre un arreglo y una antena directiva es la capacidad de modificar el patrón de radiación a partir de la amplitud y fase de la señal de cada antena. Limitada por la disposición física de las antenas, y utilizando un sistema de procesamiento de señales, un arreglo puede anular sus puntos ciegos dinámicamente; constituyéndose en un sistema de antena inteligente.

Una antena inteligente es un arreglo de sensores en la cual un procesador determina la alimentación de cada uno de ellos para la transmisión de datos y trata la señal recibida para recuperar la señal transmitida a través del enlace. Una antena inteligente controla únicamente la amplitud y la fase de la señal transmitida o recibida de cada sensor, sin modificar la disposición espacial del arreglo. El rango angular de operación de la antena inteligente se encuentra limitado por la configuración física del arreglo y condicionado por la acción del procesador [5–7].

En la literatura que hace alusión a antenas inteligentes, una de las aplicaciones de interés es precisamente la detección del ángulo de dirección de la señal transmitida, y si bien es cierto que teóricamente, estas configuraciones podrían funcionar incluso en condiciones de obstrucción (NLOS del inglés Non Line Of Sight), el procesamiento requerido es más extenso [5–9]. El uso del módulo GPS incorporado en la aeronave permite el desarrollo de una solución menos pesada computacionalmente desde el punto de vista de nuestro procesador, con la ventaja que la estimación de la posición

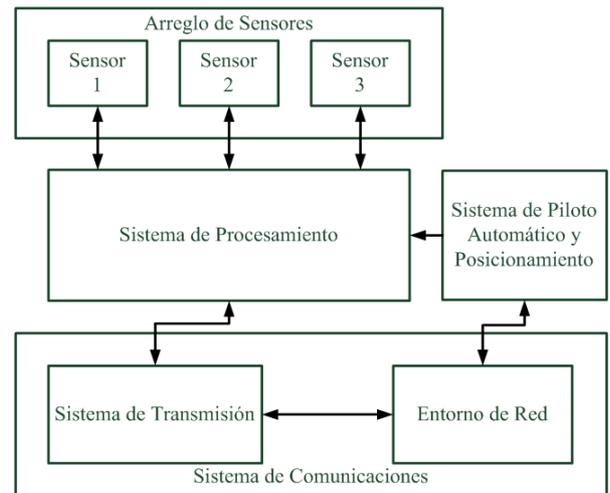


Figura 1: Arquitectura del sistema de antena inteligente.

incluye inherentemente el uso de Filtros de Kalman, con la ventaja que esto supone en términos de estabilidad en el seguimiento de la ruta [10].

Métodos

Arquitectura y funcionamiento de la antena inteligente

En la Figura 1 se muestra el diagrama funcional de la antena inteligente y su interacción con los demás sistemas a bordo de la aeronave. El sistema se conforma por el arreglo de sensores, el procesador de señales, el subsistema de posicionamiento y el sistema de comunicaciones. El sistema de comunicaciones se encarga de la modulación y conversión de datos del entorno de red. El subsistema de posicionamiento se utiliza para determinar la dirección de radiación, pues en este caso partimos del hecho de que es un sistema asistido por GPS.

El procesador de señales se encarga de asegurar la correcta extracción de la señal transmitida por la estación base a partir de las señales disponibles en el arreglo de sensores.

En el modo de transmisión, el procesador se encarga de alimentar cada sensor del arreglo en amplitud y fase con el objetivo que el arreglo amplifique la señal en determinadas direcciones y la cancele en otras.

Los sensores que conforman el arreglo propuesto son monopolos de cuarto de longitud de onda con plano de tierra, cuya ganancia se estima en alrededor de los 6 dB. También se considera que el sistema de comunicaciones es capaz de transmitir con una potencia máxima de 30 dBm.

Al utilizar cualquier antena omnidireccional, ésta irradia en todas direcciones. Por este motivo se considera que existe un uso inadecuado de la potencia, el cual degrada el rango de operación del enlace de comunicaciones. Si se consigue direccionar la potencia de tal manera de irradiar en las direcciones de interés, se optimizaría la potencia y el rango del enlace. El problema

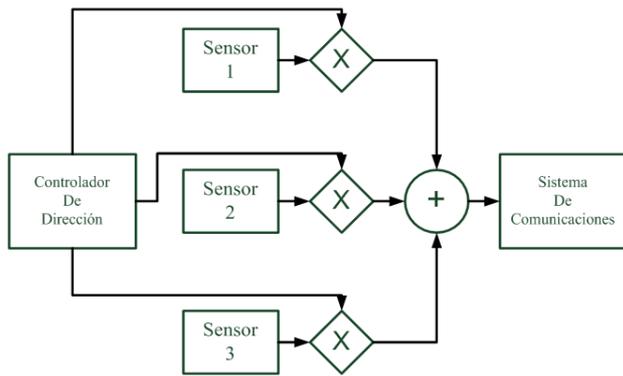


Figura 2: Diagrama de bloques del procesador para la recepción de señal.

es precisamente que al reducir el área de cobertura, podría perderse el enlace al quedar el objetivo fuera del área cubierta. La inteligencia del arreglo soluciona este inconveniente.

Procesamiento de señal en transmisión y recepción

Uno de los escenarios donde potencialmente podrían utilizarse UAV's (Unmanned Aerial Vehicle) son precisamente las reservas ecológicas, tales como el Parque Nacional Galápagos en nuestro país. Bajo el supuesto de misiones de monitoreo marítimo alrededor del archipiélago de Colón, y el uso de frecuencias que corresponden internacionalmente al espectro no licenciado y disponible para aplicaciones científicas; se trabaja a lo largo de este artículo sobre la banda de 900 MHz. En este escenario, es razonable considerar el canal de comunicaciones en condiciones de línea de vista LOS (del inglés Line Of Sight), y afectado por bajo ruido debido a la naturaleza del problema. Por lo tanto se modela el medio de transmisión únicamente por las pérdidas de propagación a 900 MHz.

Para la recepción, el procesador captura las señales recibidas por los sensores, las pondera y retarda en base a la información del controlador de dirección; son sumadas y el resultante es enviado al sistema de comunicaciones; como se muestra en la Figura 2.

Para la transmisión, la señal de salida del sistema de comunicaciones es amplificada y retardada para cada sensor en función de la información provista por el controlador de dirección; como se muestra en la Figura 3.

Diseño del Arreglo de Antenas

A pesar que existen variaciones en el ángulo de elevación entre la aeronave y la estación terrena, se considera por lo pronto que la elevación no será modificada por el arreglo, lo cual simplifica la solución.

Se realizaron simulaciones con arreglos lineales basados en el método de los polinomios de Schelkunoff [11], sin embargo el control de la dirección de radiación se mostró completamente deficiente. Finalmente se decidió modificar la distribución de los sensores para buscar simetría angular del arreglo, ubicando los sensores en

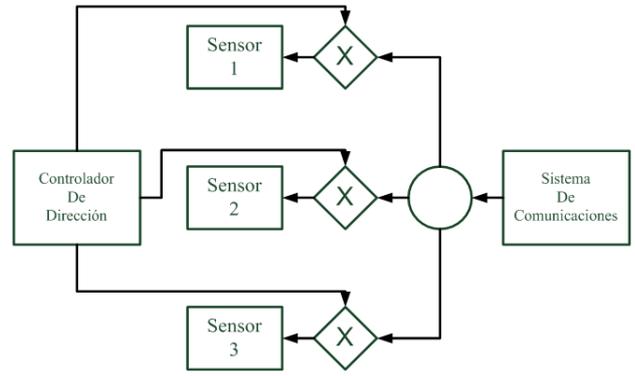


Figura 3: Diagrama de bloques del procesador para la transmisión de señal.

una circunferencia de radio determinado. Bajo esta condición, es necesario analizar únicamente un segmento angular para caracterizar completamente el arreglo. Con el objeto de reducir costos y la complejidad del sistema, se determinó que se utilizaría el mínimo requerido de tres sensores, como se muestra en la Figura 4.

Criterios de Diseño del Algoritmo del Ángulo de Radiación basado en GPS

La mayoría de las antenas inteligentes estiman la dirección del transmisor a partir de las características de la señal recibida en cada sensor; pero, gracias al módulo de posicionamiento global que tiene la aeronave no tripulada se puede determinar la dirección de radiación sin tener que estimar la señal.

En la Figura 5 se explica el diagrama de bloques del controlador de dirección del sistema de procesamiento. Los objetivos de almacenar las posiciones de la aeronave son: estabilizar la señal, y estimar el azimuth de dirección de la aeronave según su historial de coordenadas.

Definimos el azimuth como el ángulo comprendido en sentido horario entre el vector que apunta al norte y la dirección de interés desde un centro de referencia; En este caso, el centro de referencia es la posición actual de la aeronave.

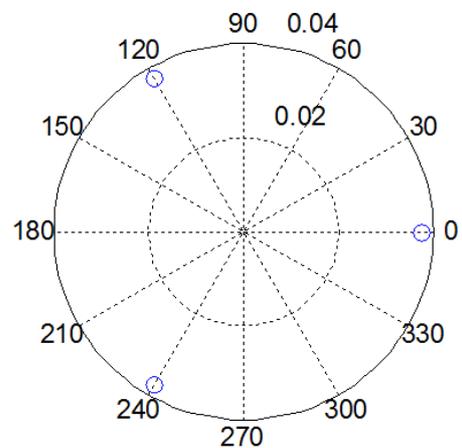


Figura 4: Disposición de los sensores en el arreglo en el plano xy: sensor 1 a 0°, sensor 2 a 120° y sensor 3 a 240°.

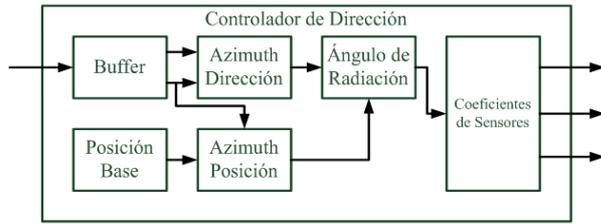


Figura 5: Diagrama de bloques del Controlador de Dirección

Los azimuts determinados son los denominados azimut de posición, el cual referencia la estación base desde la aeronave; y el azimut de dirección que referencia la dirección de la aeronave a partir del historial de coordenadas.

El cálculo del ángulo de radiación se obtiene mediante la diferencia entre el azimut de posición y el azimut de dirección, como se muestra en la Figura 6. Utilizando un algoritmo de control según el ángulo de radiación se determinan los coeficientes para cada sensor.

El reto del controlador de dirección se encuentra en el algoritmo de cálculo del azimut. Para ello se utiliza un punto auxiliar, y se asume que existe un triángulo plano conformado por el centro de referencia, el punto objetivo y el punto auxiliar. Las coordenadas del punto auxiliar es la latitud del centro de referencia y la longitud del punto objetivo. Para obtener la distancia entre puntos se utiliza la Ecuación 1.

$$d = R_T \arccos \left[\begin{array}{c} \cos(Lat_1) * \cos(Lat_2) * \\ \cos(Long_1 - Long_2) \\ + \sin(Lat_1) * \sin(Lat_2) \end{array} \right] \quad (1)$$

Donde d es la distancia en kilómetros entre los puntos P₁(Lat₁,Long₁) y P₂(Lat₂,Long₂), siendo R_T el radio terrestre en kilómetros [12]. Conocidas las distancias, se calcula el ángulo “γ” entre la paralela y la línea entre el centro y el objetivo. Para convertir γ en el ángulo de azimut en sentido horario “α” es necesario aplicar criterios basados en la posición del objetivo relativa al centro de referencia, como se muestra en la Tabla 1.

Modelamiento de las señales en el Arreglo de Antenas

Para simular el funcionamiento del arreglo de sensores se utilizaron la ecuación de intensidad de radiación en campo lejano en la Ecuación (2) que dependen de los

Posición Relativa	Signo Diferencia Latitud	Signo Diferencia Longitud	Azimuth α (grados)
Noreste	Positivo	Positivo	90° - γ
Sureste	Negativo	Positivo	90° + γ
Suroeste	Negativo	Negativo	270° - γ
Noroeste	Positivo	Negativo	270° + γ

Tabla 1: Criterios para el cálculo del ángulo de azimuth

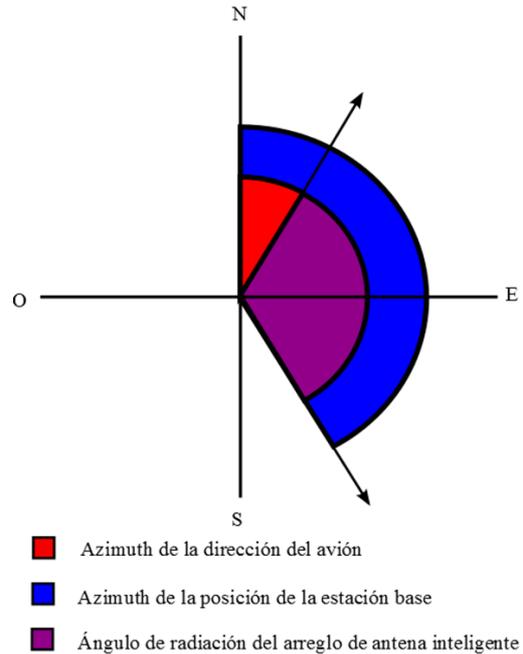


Figura 6: Esquema de cálculo de ángulo de radiación del arreglo de antenas.

parámetros f_θ y f_ϕ que se expresan en las Ecuaciones (3) y (4); siendo theta el ángulo de elevación y phi el ángulo de dirección en coordenadas esféricas. Las componentes de J_x , J_y y J_z son las transformadas de Fourier de la corriente que circula por la antena modelada en coordenadas cartesianas [11–15]. El modelamiento de una antena puntual de en el centro de coordenadas se modela en la Ecuación (5) y (6).

$$U(\theta, \phi) = \frac{15\pi}{\lambda^2} [|f_\theta|^2 + |f_\phi|^2] \quad (2)$$

$$f_\theta = \cos(\theta) \cos(\phi) J_x + \cos(\theta) \sin(\phi) J_y - \sin(\theta) J_z \quad (3)$$

$$f_\phi = -\sin(\phi) J_x + \cos(\phi) J_y \quad (4)$$

$$J = \begin{cases} J_x = 0 \\ J_y = 0 \\ J_z = i_0 * F \{ \sin(K_z * z) \delta(x) \delta(y) \} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} z &= r \cos(\theta) \\ x &= r \sin(\theta) \sin(\phi) \\ y &= r \sin(\theta) \cos(\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

Dado que el control no estima la señal recibida y aprovecha la señal GPS, el algoritmo de coeficientes puede trabajar en configuraciones preestablecidas del arreglo. Esto cataloga a la antena inteligente como una antena de conformación de haz conmutado.

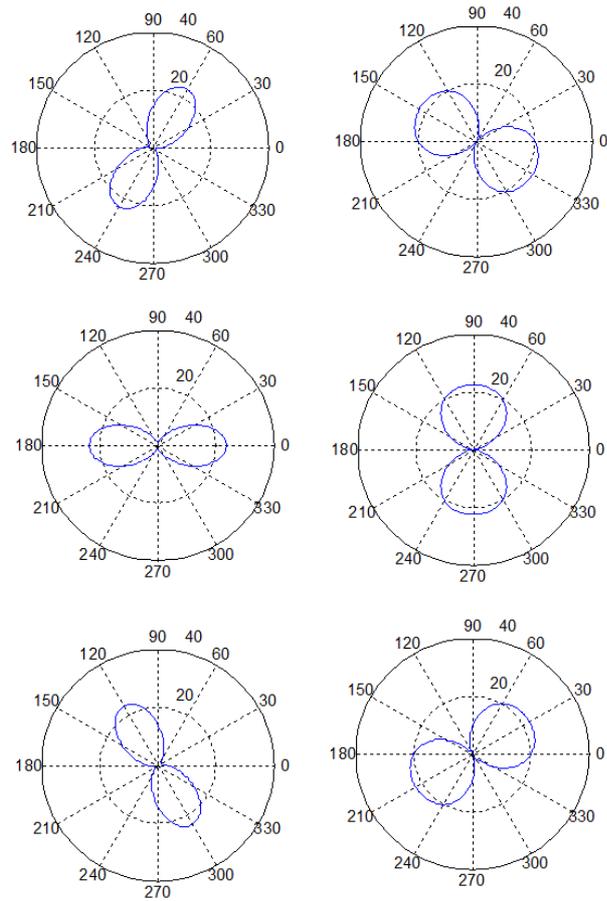


Figura 7: Ganancia del arreglo en magnitud para las configuraciones broadside (a la izquierda) y endfire (a la derecha) para las combinaciones de sensores 1 y 2 (Superior), 2 y 3 (Medio); y 3 y 1 (Inferior).

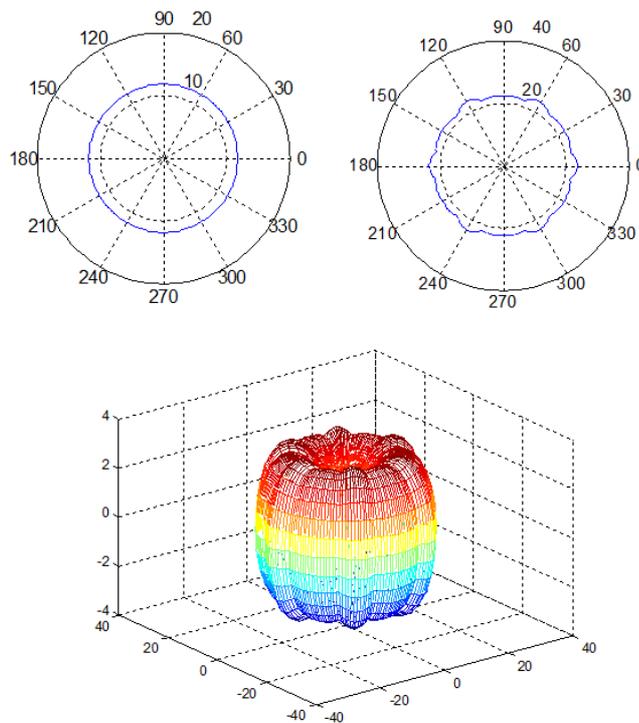


Figura 8: Superior: Comparación en vista superior de los patrones de radiación. Izquierda: Patrón de radiación de una antena. Derecha: Patrón de radiación de la antena inteligente. Inferior: Patrón de radiación de la antena inteligente en tres dimensiones.

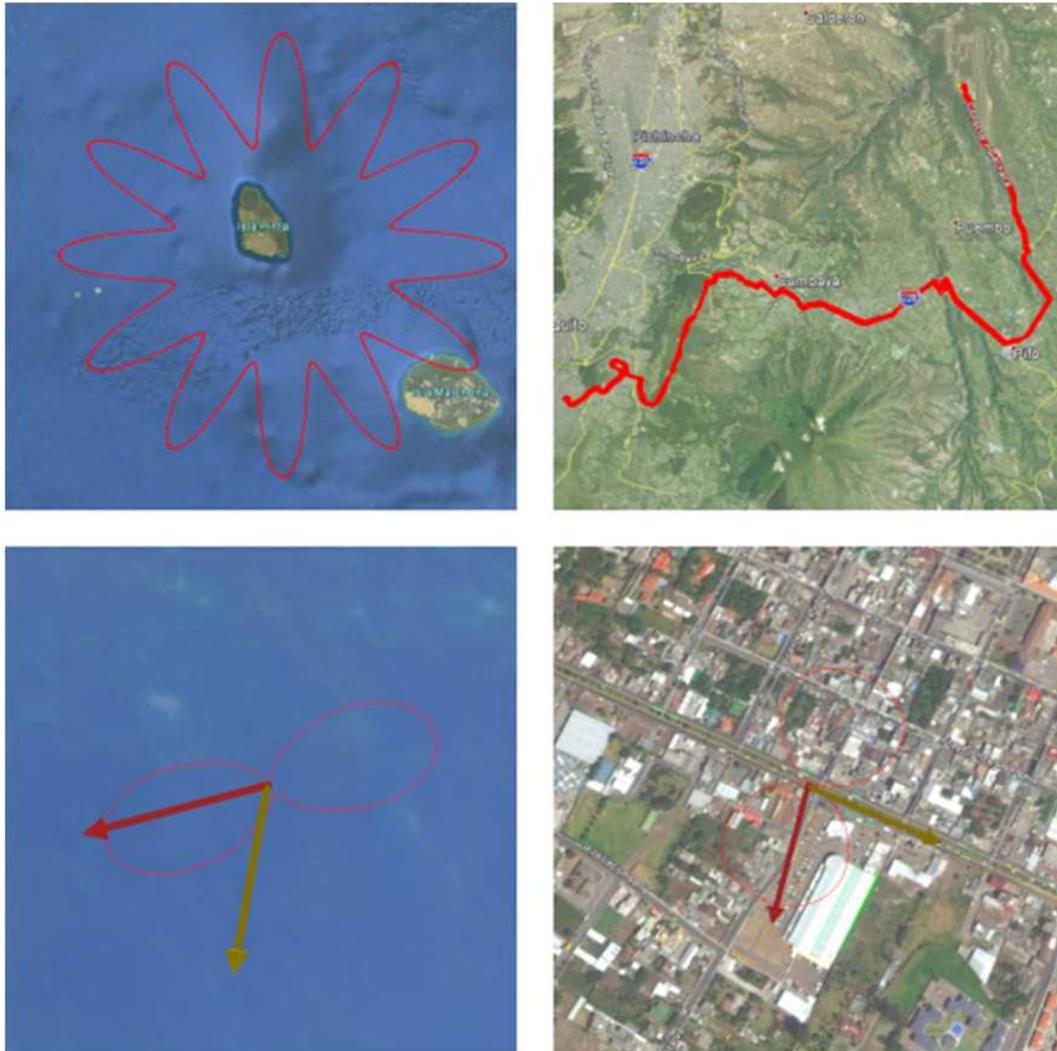


Figura 9: Patrón de radiación en función de la trayectoria. Izquierda: Simulaciones en el escenario generado con Matlab. Derecha: Simulaciones a partir de la base de datos registrados. Superior: Trayectorias de la aeronave. Inferior: relaciones entre la dirección en la cual se desplaza la aeronave (flecha amarilla), la dirección en la cual se encuentra la estación base (flecha roja), y el patrón de radiación activo (en color rojo).

Las configuraciones preestablecidas de los arreglos provienen de un par de sensores activos en configuraciones “broadside” y “endfire”. Una configuración broadside permite radiar a la dirección ortogonal de la recta formada por los sensores al alimentarlos con la misma señal, mientras que una configuración endfire irradia en la misma dirección a la recta formada por los sensores, mediante la alimentación desfasada de los sensores.

El objetivo de la simulación es determinar los factores característicos del factor de arreglo combinado, como son la directividad y la ganancia del arreglo de sensores. Es necesario por tanto discriminar los efectos del modelo del sensor utilizado en el arreglo, para lo cual se lo compara con el patrón de radiación de la antena modelada en las Ecuaciones (5) y (6). Para asegurar que la potencia de alimentación sea mantenga constante en ambos modelos, se utiliza la Ecuación (7).

$$|i_{ef}| = \sqrt{\frac{|i_0|^2}{\sum_{k=1}^n |a_k|^2}} \quad (7)$$

Donde i_{ef} es la corriente efectiva en el arreglo a partir de la corriente de la antena única i_0 y en función de la magnitud de corriente de cada sensor a_k . La corriente en cada sensor es igual al producto entre el coeficiente a_k y la corriente efectiva i_{ef} .

Resultados y Discusión

Ganancia de arreglos individuales y Ganancia compuesta de la antena inteligente

Los resultados de la simulación de configuraciones broadside y endfire para cada par de sensores alimentados se muestran en la Figura 7.

Utilizando el controlador de coeficientes es posible “mostrar” el arreglo combinado de las 6 configuraciones de antenas en función del ángulo de radiación, como se muestra en la Figura 8 junto con el modelo de antena única.

Algoritmo del Ángulo de Radiación

Para la simulación de la nave en vuelo se utilizaron los programas Matlab y Google Earth, además del toolbox de Google Earth para Matlab [16, 17]. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 9.

Se manejaron dos escenarios: el primero, en el cual las trayectorias se generan en Matlab; y el segundo con trayectorias extraídas de una base de datos a través de un dispositivo móvil GPS asistido. En ambos escenarios se envían las coordenadas al controlador de dirección.

El dispositivo utilizado para la captura es un teléfono celular basado en Android con la aplicación Google MyTracks. Los parámetros de captura son de una distancia de captura mínima de 5 metros, una distancia máxima de 200 metros, y una precisión del GPS de 200 metros, después de la cual se rechazan valores del GPS. Estos parámetros son adecuados para un escenario generado por un auto que se dirige a través de una autopista.

Conclusiones

A partir de los datos de la simulación del arreglo, se confirma que se irradia hacia cualquier dirección, en base a configuraciones broadside y endfire, con un valor de ganancia alrededor de 3 dB, como se observa en la figura 8; que se explica a partir de la Ecuación (7). Si no se procede a la normalización de potencia, la ganancia se estima en 6 dB: 3 dB correspondientes a la configuración del arreglo, y 3 dB correspondientes a la duplicación de potencia en la alimentación. Según la Ecuación (7), si se aumenta el número de sensores activos, podría aumentarse la ganancia hasta algo más de 4.5 dB. La directividad de la antena inteligente se determina a partir de los modos broadside y endfire. En el modo Broadside se tiene un ancho de haz cercano a los 60° , y en el modo endfire cercano a los 120° . Aunque el uso de los modos endfire es suficiente para garantizar una cobertura omnidireccional con una ganancia de 3dB, se utilizan también los modos broadside para mejorar el nivel medio de ganancia.

La estabilidad del arreglo dependerá drásticamente de la estabilidad y el error en los datos del receptor GPS. Sin embargo, el error en las coordenadas de posición no imposibilita utilizar el azimut de posición. El mayor inconveniente se encuentra en determinar el azimut de dirección, necesario para determinar el ángulo de radiación. Para solventar el error, es necesario utilizar un receptor de GPS robusto que establezca la información, de lo contrario se tendría que mejorar los algoritmos de procesamiento en el controlador de dirección.

Otro inconveniente detectado en el algoritmo, se descubre cuando la aeronave se encuentra detenida, y por

lo tanto no es posible detectar la dirección de radiación por medio de la diferencia de coordenadas. Este escenario es más probable en el momento de despegue de la aeronave. Una alternativa para solucionar este inconveniente se constituye el utilizar una antena independiente al arreglo y que se conecte directamente con el sistema de comunicaciones, lo cual es factible en un receptor MIMO (del inglés Multiple Input-Multiple Output). También se podría utilizar únicamente uno de los sensores del arreglo, aumentando la inteligencia en el controlador de dirección. También sería factible estimar el ángulo de radiación a partir de la estimación de la DOA a partir de métodos de análisis espectral.

Uno de los retos principales del arreglo se encuentra en el desarrollo del plano de tierra de los monopolos. Es necesario que exista un plano de tierra lo suficientemente grande para su funcionamiento adecuado, pero en una aeronave las superficies planas y abiertas son limitadas. Se necesita llegar a un compromiso entre los requerimientos técnicos del arreglo y las posibilidades de implementación.

El algoritmo de cálculo de azimut se sustenta en la utilización de un punto auxiliar y las consideraciones de un triángulo plano. La complejidad del algoritmo de detección del ángulo de radiación dependerá de la estabilidad de los datos y de la posibilidad de asumir una proyección sobre un espacio plano en lugar de un espacio esférico.

Las simulaciones, y otras pruebas realizadas con datos reales, demuestran un funcionamiento consistente entre los algoritmos de ángulo de radiación y el algoritmo de control de configuración del arreglo. La evidencia muestra que la dirección del arreglo nunca se encuentra fuera de los patrones de radiación de las diferentes configuraciones.

Referencias

- [1] Doherty, P. 2005. “Knowledge Representation and Unmanned Aerial Vehicles”. *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, Doi: 10.1109/WI.2005.89.
- [2] Chaumette, S.; Laplace, R.; Mazel, C.; Mirault, R.; Dunand, A.; Lecoutre, Y.; Perbet, J. 2011. “CARUS, an operational Retasking Application for a Swarm of Autonomous UAVs: First Return of Experience”. *Military Communications Conference*, Doi: 10.1109/MIL-COM.2011.6127613.
- [3] Alexander, S. 1994. “A mission management system architecture for cooperating air vehicles”. *Proceedings of the IEEE National Conference Aerospace and Electronics Conference*, 1:156 – 163.
- [4] Edrich, M.; Schmalenberger, R. 2002. “Combined DSSS/FHSS Approach to Interference Rejection and Navigation Support in UAV Communications and Control”. *IEEE 7th Int. Symp. On Spread-Spectrum Tech. and Appl.*, 3:687 – 691.

- [5] Bellofiore, S.; Balanis, C.; Foutz, J.; Spanias, A. 2002. "Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks Part 1: Overview and Antenna Design". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44(3):145 – 154.
- [6] Bellofiore, S.; Foutz, J.; Balanis, C.; Spanias, A. 2002. "Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks Part 2: Beamforming and Network Throughput". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44(4):106 – 114.
- [7] Stoica, P.; Moses, R. 1997. "Introduction to Spectral Analysis". *Prentice Hall*.
- [8] Játiva, R.; Vidal, J. 2009. "Estimación del Tiempo de Llegada en un Canal Rayleigh desde una perspectiva de la Cota Inferior de Cramer-Rao". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1:5 – 10.
- [9] Játiva, R.; Vidal, J. 2012. "Cota Inferior de Cramer-Rao en la Estimación del Tiempo de Llegada en un Canal Rice". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 4(1): C14 – C21.
- [10] Proaño, S.; Játiva, R. 2009. "Seguimiento de dispositivos móviles en un sistema de comunicaciones móviles celulares". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1.
- [11] Balanis, C. 2005. "Antenna Theory: Analysis and Design". 2ed. *John Wiley & Sons*.
- [12] Cardama, A. 2002. "Antenas". *Politecnos Series*. 2^o edición. *Univ. Politèc. de Catalunya*.
- [13] Ulaby, F. 2007. "Fundamentals of Applied Electromagnetics". 5ed. *Pearson/Prentice Hall*.
- [14] Pozar, D. 2005. "Microwave Engineering". 3rd edition. *John Wiley & Sons*.
- [15] Orfanidis, S. 2010. "Electromagnetic Waves and Antennas". *ECE Department Rutgers University 94 Brett Road Piscataway, NJ 08854-8058*.
- [16] El-Rabbany, A. 2002. "Engineer's Guide to GPS: The Global Positioning System". *Artech House Mobile Communications Series - Artech House telecommunications library Mobile Communications Series*.
- [17] MATLAB to Google Earth Toolbox. 2007. Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics. Computational Biogeography and Physical Geography. University of Amsterdam. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12954-google-earth-toolbox>.