

Trilateración Adaptada para Posicionar Múltiples Objetivos en un Sistema de Radar Armónico

Manuela Chacón y Juan Ordoñez

Universidad de Nariño, Colombia, mavivi95gmail.com, jgabriellordo95@gmail.com.

Resumen— En el presente artículo se propone una técnica de posicionamiento relativo para ubicar múltiples objetivos dispersos en un área definida para un escenario de radar armónico. La propuesta está orientada al monitoreo de insectos o animales de tamaño pequeño y se fundamenta en la técnica de trilateración convencional. En esta versión se presenta un modelo matemático del radar armónico y los parámetros que permiten emular su comportamiento; posteriormente, se estudia la trilateración convencional y se plantea una metodología para extenderla a escenarios de múltiples objetivos y, finalmente, validando el sistema completo mediante simulaciones, se logra posicionar múltiples objetivos con un error menor a 30 cm en un área circular de 90 m de radio.

Palabras clave—Radar armónico, etiqueta armónica, trilateración, seguimiento de fauna.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el seguimiento de fauna es una actividad común para fines de estudio e investigación, encaminándolo a múltiples propósitos como: la preservación de especies, el control de plagas, el fortalecimiento de la biodiversidad biológica y la conservación del equilibrio ecológico. Los métodos de seguimiento de fauna se han modernizado y el uso de la electrónica ha facilitado este proceso; por ejemplo, mediante la aplicación de métodos de comunicación y transmisión de datos, tales como emisores vía satélite, GPS y módulos de radio frecuencia; todos aptos para el rastreo de especies de tamaño considerable [1], [2].

A diferencia de este tipo de especies, para el seguimiento de animales de tamaño pequeño, como insectos, se ha utilizado tradicionalmente métodos de captura, marca y recaptura, a través de trampas de caída, trampas de luz, trampas con cebo y demás [3], [4], que resultan ser inconvenientes, entre otras razones, por la alteración del ambiente y del comportamiento natural de la especie. Para minimizar estos efectos, se han desarrollado sistemas electrónicos especializados para el seguimiento de estas especies, como el radar armónico, que es un sistema caracterizado por el empleo de transpondedores de tamaño reducido, peso ligero y funcionamiento en modo pasivo, pero que solo permite identificar un individuo a la vez debido al uso de una única frecuencia [5]–[8].

El propósito del presente estudio es adaptar teóricamente una técnica de posicionamiento relativo a un sistema de radar armónico, con el fin de encontrar la posición de múltiples objetivos dispersos en un área definida. En este trabajo se propone como punto de partida la trilateración en diferentes escenarios de radares, extendiéndola como solución al problema planteado de localización de múltiples objetivos. Los resultados obtenidos por medio de simulaciones permiten

posicionar múltiples objetivos con un error menor a 30 cm en un área circular de 90 m de radio.

El artículo se organiza en las siguientes secciones: En II se presenta un modelo matemático que permite emular el sistema de radar armónico; luego, en III se estudia la técnica de trilateración orientada a la ubicación relativa de un único objetivo; posteriormente, en IV se propone la extensión de la trilateración al estudio del posicionamiento de múltiples objetivos; finalmente, en V se presentan las conclusiones y las sugerencias para el trabajo futuro.

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE RADAR ARMÓNICO

El problema del seguimiento de insectos radica en el tamaño de estos; al ser virtualmente indistinguibles del entorno, si se aplican técnicas de radar convencional, la energía reflejada por la incidencia de las ondas electromagnéticas sobre el insecto es despreciable en comparación a la energía reflejada por el entorno, y esto conlleva a la invisibilidad del blanco u objetivo. Una posible solución es situar sobre el insecto una etiqueta armónica que contiene un dispositivo no lineal, el cual al ser iluminado por el haz del radar genera armónicos de la señal transmitida, constituyendo lo que se conoce en general como un sistema de radar armónico.

En la Fig. 1 se presenta la propuesta de arquitectura de radar armónico de onda pulsante, conformado por el transmisor, el receptor y la etiqueta armónica.

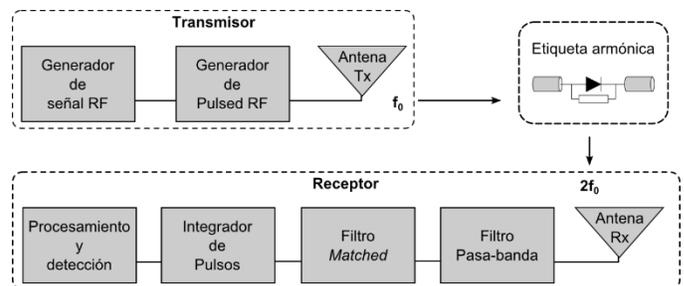


Fig. 1 Arquitectura de radar armónico

A. Transmisor

El transmisor se encarga de generar y transmitir un tono sinusoidal, $v(t) = V_0 \cos(2\pi f_0 t + \theta)$, modulado por un tren de pulsos, $T_r(t + PRT) = u(t) - u(t - PW)$. Donde V_0 es la amplitud del tono, f_0 es su frecuencia fundamental y θ es una fase inicial; PRT es el periodo del tren de pulsos y PW es el ancho del pulso. $u(t)$ es la función escalón unitario.

Los parámetros PRT y PW se relacionan con el alcance máximo no ambiguo y la resolución del sistema,

Digital Object Identifier: (to be inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

respectivamente. El primer concepto hace referencia a la distancia máxima sin ambigüedades a la cual se puede recibir un eco del pulso transmitido antes de transmitir el siguiente; por otro lado, la resolución se define como la distancia mínima que debe existir entre dos objetivos para lograr la detección de ambos. Para una estación transeptora (capaz de transmitir y recibir al mismo tiempo), $PRT = 2R_u/c$ y $PW = r_{es}/c$. En este estudio, se toma un rango máximo no ambiguo $R_u = 100$ m y una resolución $r_{es} = 2$ m. c corresponde a la velocidad de la luz.

B. Etiqueta armónica

La etiqueta armónica se modela mediante una antena tipo dipolo y un dispositivo no lineal. Generalmente se toma un dipolo de longitud $\lambda/2$, donde λ corresponde a la longitud de onda en la frecuencia fundamental [9], [10], y un diodo *Schottky* como dispositivo no lineal. Debido a que el diodo requiere un bajo potencial de operación, la potencia de la señal recibida por el dipolo es suficiente para activarlo.

La corriente característica del diodo, en términos del voltaje de excitación, se describe en (1). El parámetro I_s corresponde a la corriente de saturación y $\alpha = q/n_eKT$, donde q es la carga elemental, n_e es el coeficiente de emisión, K es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta de la unión.

$$i(t) = I_s(e^{\alpha v(t)} - 1) \quad (1)$$

Al expandir en series de potencias la corriente característica del diodo y excitarlo con el tono sinusoidal, se puede apreciar las componentes armónicas generadas por la etiqueta. En (2) se escriben las componentes hasta el segundo armónico, donde f_0 corresponde a la frecuencia fundamental y $f_H = 2f_0$ es la frecuencia en el segundo armónico.

$$i(t) = \frac{I_s\alpha^2}{4}V_0^2 + I_s\alpha V_0 \cos(2\pi f_0 t) + \frac{I_s\alpha^2}{4}V_0^2 \cos(2\pi f_H t) \quad (2)$$

Un parámetro sustancial en los sistemas de radares es la sección de radar equivalente *RCS* (*radar cross-section*), que mide cuan detectable es un objeto. Para el caso de una etiqueta armónica tipo dipolo, este parámetro es una constante que se obtiene con (3), donde σ_n es la *HRCS* (*harmonic radar cross-section*), E_d es la eficiencia de conversión del diodo, G_{tagn} corresponde a la ganancia del dipolo en la frecuencia armónica, A_{eff} es el área efectiva de la etiqueta en la frecuencia fundamental y n el número del armónico al cual se recibe la señal.

$$\sigma_n = E_d G_{tagn} A_{eff}^n \quad (3)$$

C. Receptor

La recepción de la señal se realiza al doble de la frecuencia de transmisión. La potencia con la que llega la señal se calcula con (4), donde λ_n es la longitud de onda en la frecuencia armónica, P_T es la potencia de transmisión, G_T es la ganancia

de la antena transmisora, G_{Rn} es la ganancia de la antena receptora en la frecuencia armónica, y d_t y d_r son las distancias transmisor - objetivo y objetivo - receptor, respectivamente.

$$P_{rn} = \frac{\sigma_n G_{rn} \lambda_n^2 (P_T G_T)^n}{(4\pi)^{n+2} d_t^{2n} d_r^2} \quad (4)$$

Para realizar un modelamiento más completo del receptor, la señal que incide se acompaña de una fuente de ruido; en este trabajo, se considera la contaminación con ruido aditivo blanco gaussiano *AWGN* (*additive white Gaussian noise*). Además, para bloquear señales en frecuencias diferentes a f_H se emplea un filtro pasa-banda, y con el propósito de maximizar la relación señal ruido *SNR* (*signal-to-noise ratio*) y facilitar la detección de la señal, se propone un filtro adaptado como en [11], en el cual la señal de salida es la correlación de la señal contaminada con ruido y la de referencia, esta última debe ser la señal transmitida en el doble de la frecuencia fundamental.

Después del proceso de filtrado, y aprovechando que la etiqueta armónica refleja una cierta cantidad de pulsos cuando es iluminada por el haz de radar, se realiza una integración de los ecos recibidos que mejora la probabilidad de detección. Este proceso, dependiendo del sistema, se realiza de forma coherente o no coherente. Particularmente, en el presente estudio se integra un total de 15 pulsos de forma no coherente.

Para realizar la detección final, es necesario también establecer un umbral de detección. Este parámetro se fija con el criterio óptimo de *Neyman - Pearson*, el cual busca maximizar la probabilidad de detección bajo la restricción de que la probabilidad de falsa alarma no exceda un valor constante [12], [13].

D. Simulación de la arquitectura

La simulación de la arquitectura de radar armónico se realiza en el software *MATLAB*® y a partir de los parámetros descritos en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia fundamental	f_0	9.41 GHz
Frecuencia armónica	f_H	18.82 GHz
HRCS	$HRCS$	2×10^{-6} m
Numero de pulsos a integrar	N_i	15
Rango máximo	R_u	100 m
Resolución	r_{es}	4
Ganancia antena de transmisora	G_T	28.5 dBi
Ganancia antena receptora	G_{Rn}	27.4 dBi
Probabilidad de falsa alarma	P_{FA}	10^{-2}
Figura de ruido	N_f	4 dB
Temperatura de referencia	T	290 K

El experimento de simulación ubica dos objetivos a una distancia de 20 y 100 m de la estación transceptora. En la Fig. 2 se ilustran los resultados obtenidos del proceso de recepción de la arquitectura propuesta. La Fig. 2a muestra la potencia de la señal recibida y se observa que el eco reflejado por el objetivo que se ubica a 100 m, el rango máximo, no supera el umbral de detección y su potencia no se diferencia de algunos picos de ruido. Por otra parte, la potencia de la señal del objetivo ubicado a 20 m es mayor que el umbral de detección. En la Fig. 2b se muestra el efecto del filtro adaptado en la *SNR*, evidenciándose que existe una diferencia notoria entre los pulsos reflejados por los objetivos y el ruido del sistema. Finalmente, en la Fig. 2c se traza la señal después de llevar a cabo la integración de pulsos; como resultado se observa que el objetivo en el máximo rango no ambiguo supera el umbral de detección. Nótese como el umbral se ve afectado en los tres procesos indicados, esto se debe a que tanto el filtro como la integración de pulsos introducen una ganancia al umbral.

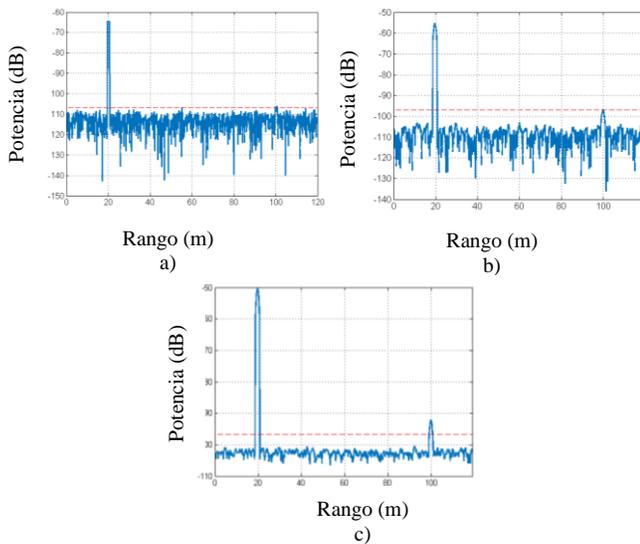


Fig. 2 Proceso de recepción. a) Señal recibida. b) Señal filtrada. c) Señal integrada.

En un sistema de radar armónico convencional, como el emulado, se obtiene el rango en el cual se encuentra ubicado el objetivo; no obstante, se hace necesario la proposición de una técnica que permita estimar las coordenadas relativas sobre las cuales se ubica el objetivo.

III. POSICIONAMIENTO EMPLEANDO TRILATERACIÓN

La trilateración es una técnica de posicionamiento que emplea las medidas de las distancias, entre el objetivo y varias estaciones receptoras, para determinar las coordenadas relativas en las que se ubica el objetivo. En esta sección se describe la aplicación de la técnica mencionada al sistema de radar analizado en el apartado anterior [14], en un escenario de estudio en dos dimensiones y que consta de tres estaciones

transceptoras y un objetivo disperso en el área de búsqueda. Para este espacio se hace necesario un mínimo de tres estaciones receptoras no colineales.

Las coordenadas del objetivo (x^*, y^*) , deben satisfacer el conjunto de ecuaciones descritas en (5), donde (x_i, y_i) corresponden a las posiciones de las estaciones transceptoras y d_i son las distancias estimadas entre el objetivo y cada una de las estaciones $(i = 1, 2, 3)$.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (5)$$

La ecuación (5) se puede expresar como un sistema lineal de la forma $Ax = B$, cuya solución, (6), corresponde a las coordenadas (x^*, y^*) .

$$2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

A. Simulación de la trilateración

Para analizar los resultados de esta técnica se plantea un escenario con tres estaciones transceptoras ubicadas en las coordenadas $(0,0)$, $(-10,0)$ y $(0,10)$. Se generan 50 posiciones aleatorias para un objetivo localizado dentro del área de detección segura. Se considera que la detección del objetivo es probable mientras sea detectado por las tres estaciones transceptoras. Si cada una de estas estaciones tiene un rango máximo no ambiguo de 100 m, y se ubican en las coordenadas antes mencionadas, el área sobre la cual un objetivo podrá ser detectado por todas las estaciones corresponde a la intersección de tres circunferencias, de radio 100 m y centros equivalentes a las coordenadas de las estaciones. Para nuestro caso, corresponde a un área circular aproximada de 90 m de radio.

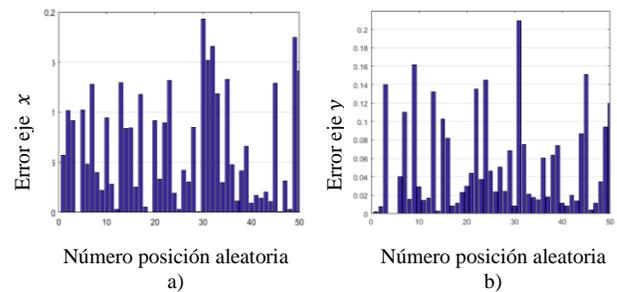


Fig. 3 Error de estimación de posiciones aleatorias para un objetivo.

El error entre las coordenadas estimadas y las diferentes posiciones aleatorias generadas, se presenta en la Fig. 3. Debido a que los rangos estimados por el radar no son precisos, las coordenadas encontradas por medio de trilateración no serán exactas y se calcularán con un error inferior a 20 cm en cada eje. Teniendo en cuenta los valores mostrados en las anteriores

gráficas, una cota de error máximo de la distancia entre la posición real y la estimada, de acuerdo con los máximos errores obtenidos en cada eje (ε_x y ε_y), se puede definir como:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2} \quad (7)$$

Y que resulta para los valores simulados, de $\varepsilon \approx 28$ cm.

IV. EXTENSIÓN A MÚLTIPLES OBJETIVOS

A. Planteamiento del problema

Bajo condiciones ideales, considerando un escenario de radar armónico con varios objetivos N y una configuración de M estaciones receptoras, todas las estaciones reciben un vector correspondiente a las medidas de la distancia entre estas y el objetivo i , se tiene en la estación M y en general para cualquier estación un vector de la forma (8), donde d_{M1} corresponde a la distancia estimada entre la estación M y el objetivo más cercano, de manera que d_{MN} es la distancia entre la estación y el objetivo más lejano. Es fácil notar que $d_{M1} < d_{M2}$ y, de manera general, $d_{Mi} < d_{M(i+1)}$.

$$d_M = [d_{M1} \quad d_{M2} \quad \dots \quad d_{Mi} \quad d_{M(i+1)} \quad \dots \quad d_{MN}] \quad (8)$$

Para cada estación se construyen vectores similares y como se puede observar, el orden de las componentes de cada vector no se relaciona con el mismo objetivo. Para llevar a cabo una técnica de posicionamiento en un espacio bidimensional, es necesario contar con mínimo tres distancias estimadas entre las estaciones y un objetivo. En consecuencia, el problema ahora se traslada a encontrar la combinación correcta de distancias que correspondan a un mismo objetivo con las diferentes estaciones. Luego de ser identificadas las distancias correctas, se puede aplicar una técnica de posicionamiento relativo y encontrar para cada i -ésimo objetivo sus coordenadas (x_i^*, y_i^*) .

Además de lo planteado, se debe considerar dos situaciones relevantes: En primer lugar, al existir más de un objetivo en el área se presentarán reflexiones no deseadas entre estos, y si se encuentran lo suficientemente cerca de la estación receptora, de manera que la potencia de la reflexión no deseada supere la potencia mínima de recepción, se recibirán ecos con información falsa. Este fenómeno se ilustra en la Fig. 4 y sucedería entre los *Tag* 1 y 2.

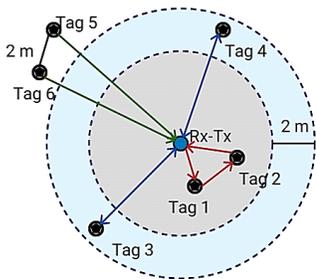


Fig. 4 Situaciones no deseadas en un escenario de radar armónico con múltiples objetivos

En segundo lugar, el concepto de resolución, previamente definido, afecta la identificación de objetivos que estén separados por distancias menores a la resolución del sistema; por ejemplo, en la Fig. 4 los ecos reflejados por los *Tag* 5 y 6 son detectados como uno solo. Así mismo, el problema de la resolución se extiende a objetivos dispersos pero ubicados en radios que no difieran más de la resolución del sistema, esta situación se ilustra en la Fig. 4 y sucedería con los *Tag* 3 y 4. En conclusión, todos los objetivos ubicados en la región azul serán asumidos como uno solo.

B. Solución propuesta

Debido a que no es posible identificar las distancias estimadas que representan el mismo objetivo para las diferentes estaciones, se propone construir un arreglo en el cual cada columna represente una posible combinación para un objetivo. Este arreglo contiene un total de M filas y N^M columnas, de las cuales solo N son correctas; por ejemplo, en un escenario con tres estaciones transceptoras y dos objetivos, el arreglo asociado corresponde a la matriz que se muestra en (9).

$$C = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{11} & d_{11} & d_{11} & d_{21} & d_{21} & d_{21} & d_{21} \\ d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{22} & d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Una vez que se ha construido el arreglo de combinaciones, para extender la técnica de trilateración a múltiples objetivos, se debe encontrar la combinación correcta de distancias y posteriormente estimar la posición. La metodología propuesta consiste en obtener las coordenadas (x^*, y^*) para cada columna de la matriz C y por medio de la resolución del sistema de ecuaciones (6). Como criterio para seleccionar la combinación que corresponde a cada uno de los objetivos, las coordenadas estimadas deben satisfacer el sistema de ecuaciones (10), y para nuestro caso con un error menor a $\varepsilon = 28$ cm, que corresponde a la diferencia entre la posición estimada y la real cuando el objetivo se ubica en el máximo rango no ambiguo; de este modo, se tiene en cuenta el error de estimación de rangos en el sistema de radar y el error en la técnica de posicionamiento.

$$\begin{cases} (x^* - x_1)^2 + (y^* - y_1)^2 - d_{1i}^2 < \varepsilon \\ (x^* - x_2)^2 + (y^* - y_2)^2 - d_{2i}^2 < \varepsilon \\ (x^* - x_3)^2 + (y^* - y_3)^2 - d_{3i}^2 < \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

C. Análisis de la solución

Para analizar la viabilidad de la metodología propuesta, primero se ubican 7 objetivos dispersos en posiciones aleatorias dentro del área de detección segura; es decir, ninguna de las posiciones genera situaciones no deseadas. Los rangos estimados por las tres estaciones de radar generan una matriz de 343 combinaciones, de las cuales solo 7 permiten estimar las posiciones reales de los objetivos.

Los errores en la estimación de las posiciones para cada coordenada se presentan en la Fig. 5. Se evidencia que la totalidad de objetivos fueron posicionados con un error por

debajo de los 20 cm y que el método propuesto es capaz de desechar las 336 combinaciones restantes.

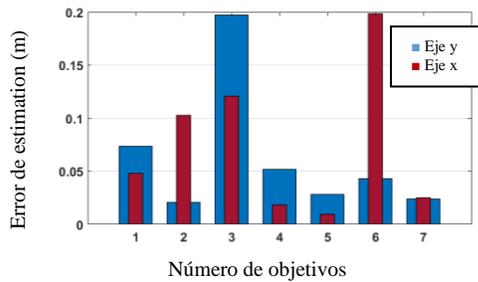


Fig. 5 Error de estimación para un escenario de 7 objetivos

Por otra parte, para evaluar el desempeño del método propuesto en situaciones no deseadas, se propone el escenario ilustrado en la Fig. 6. Las estaciones transeptoras mantienen las posiciones anteriores fijadas: (0,0), (-10,0) y (0,10), y cinco objetivos o *Tag* se disponen de tal forma que: los rotulados como 1, 2 y 3 reflejan un solo eco a la estación uno; del mismo modo, los rotulados como 1 y 3 lo hace a la estación tres y las reflexiones entre 4 y 5 generan un eco adicional en la estación dos. Los vectores de rangos estimados para las estaciones uno, dos y tres son respectivamente: [10.40 11.64 29.96], [2.96 5.96 8.93 19.96 33.48 39.96] y [10.72 12.16 31.6 41.96].

Con estos rangos se generan 72 posibles combinaciones para estimar las posiciones de los 5 objetivos, de las cuales 12 son generadas por el rango adicional estimado en la estación 2. El criterio de decisión (10) permite ubicar sin inconvenientes los objetivos 1, 3, 4 y 5; sin embargo, las coordenadas estimadas para el objetivo 2 generan un error ϵ superior al establecido, debido a que el rango visto por la estación uno tiene un error de 2.14 m. En la Fig. 6, los objetivos que fueron posicionados por el método se resaltan de color azul.

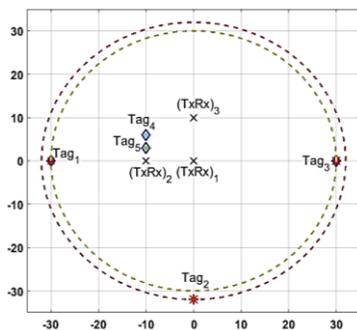


Fig. 6 Escenario de 5 objetivos en situaciones no deseadas

V. CONCLUSIONES

Los sistemas de radar armónico son una herramienta eficiente para el monitoreo de especies de tamaño pequeño,

debido a que presentan ventajas sustanciales frente a los métodos manuales; pero aún existen problemas que limitan su uso y campos de aplicación.

Se desarrolló teóricamente una técnica de posicionamiento para un sistema de radar armónico en un ambiente ideal. Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta permite posicionar, en la mayoría de los casos, múltiples objetivos en un área determinada (zona segura).

En un ambiente real, los rangos estimados por el radar presentan errores; por consiguiente, como trabajo futuro se pretende robustecer la técnica propuesta y extenderla a objetivos móviles. Otro aspecto para tener en cuenta a futuro es la mejora del costo computacional de la metodología propuesta, ya que el arreglo de combinaciones crece potencialmente con el número de objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Wilson Achicanoy Martínez asesor de la investigación realizada, a la Universidad de Nariño, al Departamento de Electrónica y al Grupo de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Electrónica – GIIEE, por su apoyo académico y financiero para la consecución de los objetivos propuestos en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] W. Bouten, E. W. Baaij, J. Shamoun-Baranes, and K. Camphuysen, "A flexible GPS tracking system for studying bird behaviour at multiple scales," *Springer-Verlag*, pp. 571–580, 2013.
- [2] H. A. Baldwin, "Long-Range Radio Tracking of Sea Turtles and Polar Bear Instrumentation and Preliminary Results," *NASA, Washingt. Anim. Orientat. Navig.*, pp. 19–37, 1972.
- [3] J. R. Hagler and C. G. Jackson, "Methods for marking insects: current techniques and future prospects.," *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 46, pp. 511–543, 2001.
- [4] J. Márquez Luna, "Técnicas de colecta y preservación de insectos," *Boletín Soc. Entomológica Aragón*, vol. 37, pp. 385–408, 2005.
- [5] Z. M. Tsai *et al.*, "A high range resolution 9.4/18.8 GHz harmonic radar for bees searching," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 4–6, 2012.
- [6] N. Tahir and G. Brooker, "The investigation of millimetre wave optical harmonic transponders and radar for monitoring small insects," *WiSNet 2013 - Proc. 2013 IEEE Top. Conf. Wirel. Sensors Sens. Networks - 2013 IEEE Radio Wirel. Week, RWW 2013*, pp. 22–24, 2013.
- [7] D. Psychoudakis, W. Moulder, C. C. Chen, H. Zhu, and J. L. Volakis, "A portable low-power harmonic radar system and conformal tag for insect tracking," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 444–447, 2008.
- [8] Z. Tsai, F. Chang, K. Lin, E. Yang, F. Lian, and H. Wang, "Application of Harmonic Radar on the Research of Bees' Behavior," pp. 5–8, 2016.
- [9] B. Colpitts, D. Luke, G. Boiteau, and M. Doyle, "Harmonic radar identification tag for insect tracking," *Eng. Solut. Next Millenn. 1999 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (Cat. No.99TH8411)*, vol. 2, pp. 602–606, 1999.
- [10] D. Milanesio, M. Sacconi, R. Maggiora, D. Laurino, and M. Porporato, "Design of an harmonic radar for the tracking of the Asian yellow-legged hornet," *Ecol. Evol.*, vol. 7, no. 13, pp. 4599–4606, 2017.
- [11] J. M. Pérez, "Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones aeronáuticas," Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- [12] J. P. Pascual, "Procesamiento de Señales de Radar en Presencia de Clutter Dinámico," Universidad Nacional de La Plata, 2014.
- [13] D. Dardari, "Detection and accurate localization of harmonic chipless tags," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2015, no. 1, p. 13, 2015.
- [14] A. Pineda, "Enrutamiento y Posicionamiento Integrado en Redes Móviles AD HOC," Instituto Politécnico Nacional, 2013.