

Posicionamiento de blancos marítimos en radar pasivo basado en redes DVB-T de frecuencia única

Núñez-Ortuño, José M.^{1,*}, González-Coma, José P.¹, Nocelo López, Rubén¹,
Troncoso-Pastoriza, Francisco¹ y Álvarez-Hernández, María¹

¹ Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar. Plaza de España s/n. 36920 Marín, Pontevedra, España.
Correo electrónico: jnunez@tud.uvigo.es (JMNO), jose.gcoma@tud.uvigo.es (JPGC), rubennocelo@tud.uvigo.es (RNL),
ftroncoso@tud.uvigo.es (FTP) maria-alvarez@tud.uvigo.es (MAH).

* Autor Principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: jnunez@tud.uvigo.es (JMNO)

Resumen

El radar pasivo es una tecnología de baja probabilidad de detección en auge dentro del ámbito militar y de defensa que permite identificar amenazas y estimar su distancia y velocidad biestáticas a partir de la señal emitida por iluminadores de oportunidad. Sin embargo, la distancia biestática estimada por un radar pasivo es una distancia ambigua definida por un elipsoide cuyos focos son el iluminador de oportunidad y el propio radar pasivo. Esta ambigüedad se incrementa al utilizar iluminadores de oportunidad que trabajan exactamente en la misma frecuencia dando lugar a blancos fantasma. En este artículo, se presenta un demostrador de radar pasivo biestático basado en señales de televisión digital terrestre (DVB-T) operando en redes de frecuencia única (SFN) para vigilancia marítima. Este trabajo se focaliza en posicionar unívocamente sobre un mapa blancos marítimos usando un array lineal de antenas que combinado con técnicas de beamforming permite estimar el ángulo de llegada de la emisión principal.

1. Introducción

El radar pasivo es una tecnología de gran interés dentro del ámbito militar y de defensa que se basa en la explotación de las señales electromagnéticas emitidas por los denominados Iluminadores de Oportunidad (IoOs) para realizar la detección de blancos y determinar su localización sin revelar la posición del receptor radar [1], de ahí que sea considerado un sistema con baja probabilidad de detección.

El principio básico de funcionamiento de un radar pasivo se basa en estimar la distancia biestática a la que se encuentra un determinado blanco a partir del retardo temporal (TDOA, Time Difference of Arrival) que hay entre la señal recibida directamente del IoO y el eco reflejado en el blanco [2]. Generalmente, este retardo temporal se mide a partir de la función de correlación cruzada (CAF, Cross Ambiguity Function) entre ambas señales [3], permitiendo obtener un mapa rango-Doppler. Sin embargo, es ampliamente conocido que cualquier blanco situado sobre un elipsoide con sus focos en el IoO y en el radar presenta la misma distancia biestática. Consecuentemente, para determinar unívocamente la posición exacta de un blanco se hace necesario o bien utilizar múltiples transmisores y/o receptores

independientes [4] o bien estimar la dirección de llegada (DoA, Direction of Arrival) del eco reflejado en el blanco [5].

Entre los diferentes IoOs, la transmisión de señales de televisión digital terrestre (DVB-T) se presenta como una de las alternativas más interesantes ya que ofrece simultáneamente una excelente cobertura y un gran ancho de banda, de 8 MHz por canal, lo que permitirá alcanzar una mayor resolución en distancia [6,7]. Sin embargo, el despliegue de redes de frecuencia única (SFN, Single Frequency Network), donde todos los iluminadores transmiten simultáneamente el mismo contenido a la misma frecuencia hace que las señales reflejadas en un mismo blanco sean indistinguibles, originando blancos fantasmas y localizaciones ambiguas [8].

En este artículo, se analizan las prestaciones de un sistema de radar pasivo basado en DVB-T para la detección de blancos en un entorno marítimo a partir de un demostrador instalado en la Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval de Marín dentro de la Ría de Pontevedra. Además, se compara un sistema de transmisión de señales DVB-T operando en redes de frecuencia múltiple (MFN, Multiple Frequency Network) con un sistema de transmisión de señales DVB-T operando en redes SFN con el objetivo de minimizar las ambigüedades de los blancos fantasma. Finalmente, con el uso de técnicas beamforming se estima el DOA de los ecos reflejados y se representan unívocamente su posición sobre un mapa de coordenadas.

2. Descripción general del radar pasivo

2.1. Receptor radar pasivo basado en DVB-T

El sistema receptor de radar pasivo basado en señales DVB-T está formado por un sistema de antenas de vigilancia y de referencia, un sistema de adquisición de los datos proporcionados por cada uno de los canales DVB-T y un sistema de sincronización basado en señales GPS (ver Figura 1a).

El sistema de antenas receptoras está formado por una antena de referencia comercial Yagi Televés Ellipse UHF,

con una ganancia y un ancho de haz a -3 dB aproximadamente de 40 dB y 30° respectivamente, apuntando hacia uno de los transmisores de oportunidad para obtener la señal de referencia y un array de vigilancia formado por 4 antenas Yagi Televés DINOVA BOSS UHF de 34 dB de ganancia y ancho de haz a -3 dB de 30° alineadas horizontalmente y que permiten dirigir el haz dentro de la zona de interés posibilitando estimar el DOA.

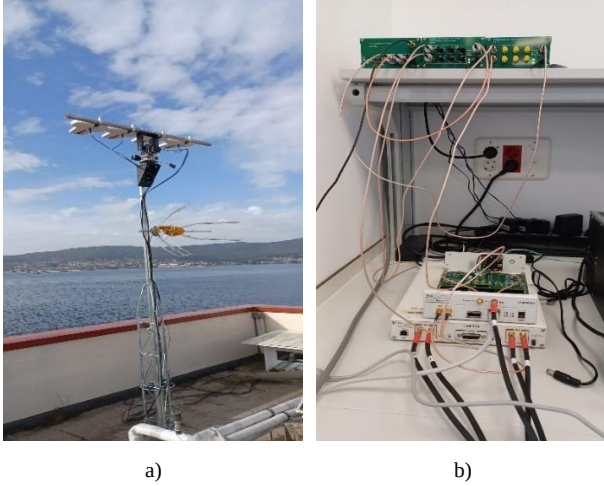


Figura 1. a) Sistema de antenas receptoras de radar pasivo; b) Sistema de adquisición de datos y sistema de generación de señales de reloj.

El sistema de adquisición de datos está compuesto por un equipo de radio definida por software USRP X310 de National Instruments que permite adquirir la información simultáneamente de los cuatro canales de vigilancia y por un equipo USRP N220 que permite adquirir la información del canal de referencia (ver parte inferior de la Figura 1b). Además, estos equipos permiten incluso adquirir simultáneamente múltiples canales contiguos de DVB-T multiplicando el ancho de banda y mejorando la resolución en distancia.

Debido a que el sistema básico de funcionamiento de un radar pasivo se basa en la estimación del TDOA, se hace esencial la perfecta sincronización temporal de los diferentes sistemas de adquisición de información a partir de una señal temporal de referencia común para todos ellos. Por tal motivo, se dispone de un sistema de sincronización compuesto por un sistema externo de generación de señales de reloj basado en GPS de 10 MHz (ver parte superior de la Figura 1b).

2.2. Descripción general del procesamiento de datos en radar pasivo

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques del procesamiento de los datos desde que son adquiridos y digitalizados por el equipo radio hasta la generación de una imagen rango-Doppler después de aplicar las técnicas de beamforming.

En los sistemas de radar pasivo, la detección de blancos y la estimación de su velocidad se realiza generalmente a

partir de la correlación entre la señal de referencia $r[n]$ con versiones retardadas y desplazadas en frecuencia de las diferentes señales de vigilancia $s_i[n]$ ($i=0, 1, \dots, M-1$, siendo M el número de elementos del array y n el número de muestras temporales adquiridas), es decir evaluando individualmente la CAF. Como resultado se obtienen M mapas rango-Doppler $c(\tau, l)$, siendo τ el rango posibles de frecuencias Doppler y l el rango de posibles distancias biestáticas.

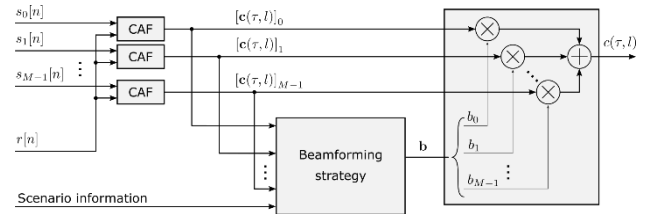


Figura 2. Descripción general del procesamiento de datos en radar pasivo [9].

Con el objetivo de estimar el DOA y mejorar la relación señal a ruido de la señal de vigilancia, los diferentes canales de vigilancia son combinados linealmente después de la CAF utilizando técnicas de beamforming. Estas combinaciones coherentes añaden la dimensión angular al sistema, una dimensión que dependerá de la información disponible del escenario (por ejemplo, rango de ángulos azimutales del escaneo, ...).

Una vez que se forma el mapa rango-Doppler para cada ángulo de azimuth, se aplica un algoritmo de detección de blancos para una probabilidad de falsa alarma dada (CFAR, Constant False Alarm Rate). Como resultado del algoritmo de detección, se obtiene la frecuencia Doppler del blanco, la distancia biestática y el DOA a partir del máximo angular de los puntos detectados de $c(\tau, l)$.

2.3. Posicionamiento unívoco de blancos a partir de la distancia biestática y el DOA

A partir del escenario genérico mostrado en la Figura 3, la geometría radar biestática nos permite determinar la distancia cartesiana entre el blanco y el radar como [10]:

$$R_{\text{blanco-radar}} = \frac{R_{\text{bist}}^2 - L^2}{2(R_{\text{bist}} - L \cdot \cos(\theta))} \quad (1)$$

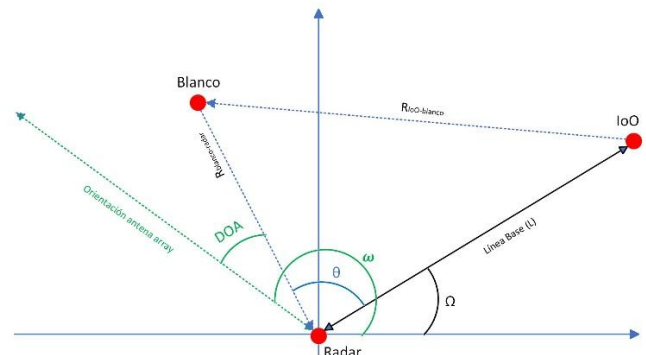


Figura 3. Geometría del escenario de radar pasivo.

donde la distancia biestática R_{bist} (definida como la suma de la distancia entre el IoO y el blanco $R_{IoO-blanco}$ y entre el blanco y el radar $R_{blanco-radar}$), la línea base L, (definida como la línea recta que une el IoO y el radar) y el ángulo del DOA son estimadas y donde θ es el ángulo de inclinación del blanco dado por:

$$\theta = \omega - \Omega - DOA \quad (2)$$

siendo ω el ángulo de inclinación del sistema de array de antenas y Ω el ángulo de inclinación de la línea base.

Finalmente, con esta información, los blancos detectados pueden ser representados unívocamente en coordenadas cartesianas a partir de la distancia biestática y del DOA estimado.

3. Resultados y Discusión

3.1. Escenario del experimento

La campaña de medidas se ha llevado a cabo en un entorno marítimo dentro de la Ría de Pontevedra, en particular en las inmediaciones de la Escuela Naval Militar de Marín. Dentro del área de trabajo, varios transmisores de DVB-T pueden ser utilizados como iluminadores de oportunidad (Monte Tomba, San Xulián, Domaio, Monte Xesteiras, ...). En este experimento, el IoO situado en el Monte Tomba nos servirá como señal de referencia. Con el objetivo de analizar y detectar blancos fantasmas, se realiza un primer experimento en el canal 29 (538 MHz) donde únicamente el IoO del Monte Tomba situado a 6.28 km dispone de ese canal al transmitir información local simulando el efecto de una red de frecuencia múltiple y un segundo experimento en el canal 24 (498 MHz) que es usado por todos los IoOs para transmitir información al pertenecer a una red de frecuencia única (aunque solamente se recibirán ecos a mayores del IoO situado en San Xulián a 2,6 km del radar).

Los datos fueron adquiridos para un ancho de banda de 8 MHz y fueron procesados en intervalos coherentes (CPI, Coherent Processing Intervals) de 2 s, lo que resulta en una resolución de la frecuencia Doppler biestática de 0.6 Hz y una resolución de la distancia biestática de 18 m.

3.2. Resultados en redes de frecuencia múltiple

En el caso de transmisores en redes de frecuencia múltiple, se identifican un par de blancos en un caso alejándose del radar a una frecuencia Doppler aproximada de 32 Hz y n el otro acercándose hacia el radar a una frecuencia Doppler de -8 Hz. Para el blanco se está alejando del radar, en el instante inicial de medidas ($t = 0$ s) se encuentra a una distancia biestática de 375 m, mientras que al final de la captura de datos ($t = 60$ s) se encuentra a una distancia biestática de aproximadamente 700 m. Para el blanco que se está acercando a una frecuencia Doppler de 8 Hz su distancia biestática va decreciendo desde 1500 m a 1300 m aproximadamente en este intervalo de tiempo. La figura 4 muestra el mapa rango-Doppler para estos dos instantes

de tiempo. Como se puede comprobar en la Figura 4 y sin pérdida de generalidad, no se ha eliminado el clutter correspondiente a blancos con frecuencia Doppler en torno a 0 Hz. Además, como se corresponde con un canal emitido por un único transmisor el nivel de interferencia es mínimo, de ahí que la respuesta del mapa rango-Doppler aparezca con poco ruido.

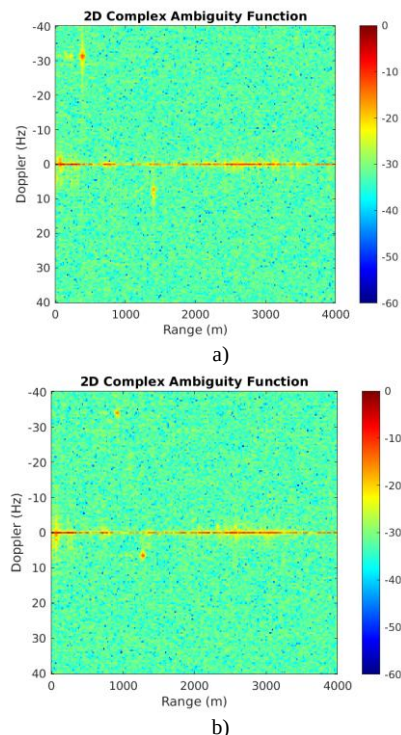


Figura 4. Mapa rango-Doppler con un IoO en Monte Tomba. a) $t = 0$ s; b) $t = 60$ s.

3.3. Resultados en redes de frecuencia única

A diferencia del experimento anterior, los diferentes IoOs en el entorno de trabajo transmiten información en el canal 24 (498 MHz). Esto se traduce en que un mismo blanco puede generar ecos con diferentes retardos en función del transmisor que lo ilumina en cada momento. En este experimento, se puede ver como un blanco alejándose del radar a una frecuencia Doppler de -12.25 Hz se encuentra posicionado a una distancia biestática de 800 m, teniendo en cuenta que el IoO de referencia es el situado en el Monte Tomba. Sin embargo, a la misma velocidad Doppler, pero a una distancia biestática negativa de -1000 m aproximadamente se consigue detectar una réplica del mismo blanco, es decir, un blanco fantasma. La distancia biestática negativa se debe a que se ha tomado como línea base, es decir como IoO el transmisor situado en el Monte Tomba, mientras que el eco proviene del IoO situado en San Xulián, transmisor que se encuentra situado a una menor distancia del radar. En caso de haber escogido como referencia el IoO situado en San Xulián, se detectaría igualmente el blanco fantasma, pero a una distancia biestática positiva y mayor a las de este caso. La figura 5 muestra el mapa rango-Doppler para $t = 0$ s y $t = 60$ s. En comparación con el caso anterior, se puede apreciar un

nivel de ruido y clutter mucho mayor en consonancia con las múltiples posibles reflexiones incontroladas de las señales procedentes de varios transmisores. Matizar que para este escenario es factible distinguir cuando un blanco es real o es un blanco fantasma dada su geometría, sin embargo, al aumentar el número de transmisores o variar el emplazamiento de los blancos en el área de interés esta tarea puede resultar no ser unívoca e inmediata.

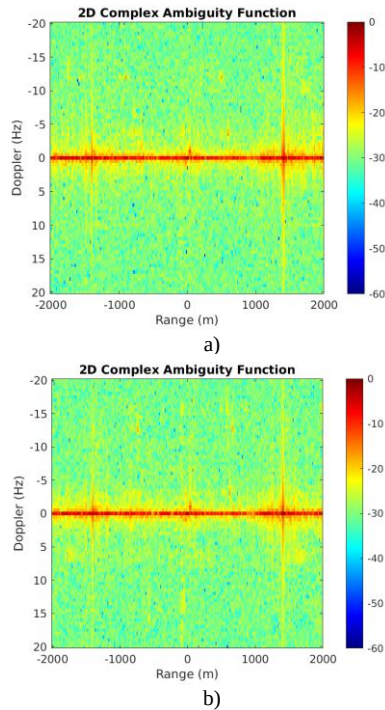


Figura 5. Mapa rango-Doppler con dos IoOs en Monte Tomba y San Xulián. a) $t = 0$ s; b) $t = 60$ s.

Finalmente, en la Figura 6 se muestra el emplazamiento real de los blancos identificados en los ejemplos anteriores. Los puntos de color rojo y amarillo representan los blancos identificados en el canal 29 alejándose y acercándose al radar respectivamente. En color verde se muestra la posición en tiempo del blanco identificado en el segundo de los experimentos. Comentar que el blanco fantasma una vez identificado como tal se posicionaría en los mismos puntos que el blanco real.



Figura 6. Posicionamiento en coordenadas latitud/longitud de los blancos detectados en los ejemplos anteriores para $t=0 \dots 60$ s. Los círculos rojos y amarillos representan los dos blancos alejándose y acercándose al radar identificados en MFN. Los círculos verdes representan el blanco detectado en SFN.

4. Conclusiones

El sistema de radar pasivo basado en señales DVB-T que operan en redes SFN ofrecen una interesante oportunidad para la detección sigilosa de blancos marítimos. Sin embargo, se hace necesario un conocimiento preciso del escenario de trabajo para detectar y corregir los blancos fantasmas tanto a la hora de representarlos en un mapa rango-Doppler como a la hora de hacer una representación de posicionamiento. En este último caso, implementar en el demostrador herramientas del sistema de identificación automática de barcos (AIS, Automatic Identification System) permitiría verificar que las detecciones realizadas son correctas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el proyecto PICUD-2021-06 del CUD-ENM y el proyecto PID2021-128898OB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

- [1] Jarabo P, Rosa M, de la Mata D, Bárcena JL, del Rey N, Álvarez J, Gaitán J. APIS, radar pasivo en el JIP-ICET. Boletín de Observación Tecnológica en Defensa. 2013; 38, pp. 27-31.
- [2] Kuschel H, Cristallini D, Olsen K. Tutorial: Passive radar tutorial. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2019; 34(2), pp. 2-19.
- [3] Langelloti D, Colone F, Bongioanni C, Lombardo P. Comparative study of Ambiguity Function evaluation algorithms for passive radar. International Radar Symposium IRS 2009. pp. 325-329.
- [4] Malanoski M, Kulpa K. Two methods for target localization in multistatic passive radar. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012;48(1), pp. 572-580.
- [5] Bucci O, Mazzarella G, Panariello G. Array synthesis with smooth excitation. In proceedings of the Antennas and Propagation Society International Symposium AP-S Merging Technologies for the 90's Digest. 2019; 2, pp. 856-859.
- [6] Palmer J, Harms H, Searle SJ, Davis, LM. DVB-T Passive Radar Signal Processing. IEEE Transactions on Signal Processing. 2013; 61(8), pp. 2116-2126.
- [7] Langelloti D, Colone F, Lombardo P, Sedehi M, Tilli E. DVB-T based passive bistatic radar for maritime surveillance. 2014 IEEE Radar Conference. pp. 1197-1202.
- [8] Petri D, Moscardini C, Conti M, Capria A, Palmer J, Searle SJ. The effects of DVB-T SFN data on passive radar signal processing. 2013 International Conference on radar. pp. 280-285.
- [9] Nuñez-Ortuño JM, González-Coma JP, Nocelo R, Troncoso-Pastoriza F, Álvarez-Hernández M. Beamforming techniques for passive radar: an overview. Sensors. 2023; 23(3435).
- [10] Nezhlin D, Kostylev V, Blyakhman A, Ryndyk A, Myakinkov A. Bistatic radar: Principles and practice. John Wiley & Sons. 2007