



Detección UAV mediante anclas multipath en un sistema pasivo

gmazzei@marsupialrf.com

12 de diciembre de 2025

Introducción

En un escenario urbano semi-residencial, con edificios de entre 1 y 6 pisos y una disposición de calles en grilla, se dispone de un sistema receptor de señales de radio que observa las emisiones de M_T transmisores de posición fija pero desconocida¹, ubicados dentro de un radio < 800 m. El número de transmisores M_T es conocido, típicamente entre 1 y 4.

En un modelo reducido, cada transmisor $m = 1, \dots, M_T$ emite una señal conocida $s_m(t)$ tal que las correlaciones cruzadas $\langle s_m, s_{m'} \rangle$ son pequeñas para $m \neq m'$. Las señales son entonces cuasi-ortogonales y permiten la separación de transmisores mediante correlación directa, sin entrar en detalles de la modulación subyacente.

La señal recibida $r(t)$ se modela como una superposición de trayectorias multicamino provenientes de todos los transmisores, incluyendo transmisión a través de objetos sólidos y reflexiones en edificios:

$$r(t) = \sum_{m=1}^{M_T} \sum_{\ell=1}^{L_m} a_{m,\ell} e^{j2\pi f_{D,m,\ell} t} s_m(t - \tau_{m,\ell}) + n(t),$$

donde $\tau_{m,\ell}$ es el retardo de la trayectoria ℓ del transmisor m , $a_{m,\ell}$ es la ganancia compleja, $n(t)$ es ruido e interferencia y $f_{D,m,\ell}$ es el corrimiento Doppler inducido por el movimiento del sistema receptor, utilizado como señal intermedia para extraer información sobre la dirección de arribo.

Mediante correlación con las señales $s_m(t)$ y procesado en ventanas temporales cortas se estima, para cada transmisor y trayectoria detectable, un conjunto de parámetros intrínsecos

$$(\tau_{m,\ell}, \theta_{m,\ell}, \phi_{m,\ell}),$$

donde θ y ϕ representan azimut y elevación.

Tras un período de operación, el sistema identifica un conjunto finito de trayectorias multicamino estables que llamamos *anclas* o fuentes virtuales. Cada ancla $a = 1, \dots, M_A$ se caracteriza por los parámetros medidos

$$(m_a, \tau_a, \theta_a, \phi_a),$$

donde m_a indica el transmisor asociado. Las anclas se seleccionan por estabilidad en el tiempo de (τ, θ, ϕ) y alta coherencia, y representan los caminos estáticos dominantes del entorno. El resto de las trayectorias observadas se modela como *clutter* difuso de baja coherencia y se descarta para la etapa siguiente.

Descripción del problema

Se considera la aparición de un único vehículo aéreo no tripulado (UAV) que introduce nuevas trayectorias con corrimiento Doppler no nulo. En los datos, esto se manifiesta como un conjunto de nuevas detecciones

$$\mathcal{Y} = \{y_i\}_{i=1}^{N_{\text{obs}}}, \quad y_i = (\tau_i, \theta_i, \phi_i, f_{D,i}), \quad (1)$$

donde $(\tau_i, \theta_i, \phi_i)$ son retardo, azimut y elevación, y $f_{D,i}$ es el corrimiento Doppler asociado.

¹Es posible relajar esta condición y suponer las posiciones conocidas.

De forma esquemática, cualquier interacción electromagnética que involucre al UAV puede describirse como

$$\text{Fuente}_k \longrightarrow \text{UAV} \longrightarrow \text{Reflector final}_j \longrightarrow \text{Receptor},$$

donde:

- Fuente_k es una fuente (real o virtual) de posición desconocida, tal que

$$\text{Fuente}_k \in \{\text{transmisores reales}\} \cup \{\text{anclas}\} \cup \{\text{otras fuentes virtuales no catalogadas en el escaneo}\};$$

- Reflector final_j representa el último tramo de propagación hacia el receptor. De manera cualitativa pueden distinguirse:

- *Caso LOS UAV–receptor.* El Reflector final_j es nulo: existe LOS (*Line Of Sight*) entre el UAV y el receptor. En la Ec. (1) aparecerían observaciones con nuevos valores de $(\tau_i, \theta_i, \phi_i)$, y típicamente varias muestras con el mismo par angular (θ_i, ϕ_i) y distintos valores de $(\tau_i, f_{D,i})$.
- *Caso LOS UAV–ancla–receptor.* Existe un ancla a en el conjunto \mathcal{A} con LOS tanto al receptor como al UAV, de modo que el ancla actúa como “espejo”. En la Ec. (1) se observarían valores conocidos para (θ_i, ϕ_i) (los del ancla) y uno o más valores novedosos para τ_i y $f_{D,i}$. El ancla a es entonces un candidato natural a haber sido la Fuente_k.
- *Caso general.* Pueden existir varias reflexiones intermedias. A medida que aumenta la longitud del trayecto y el número de interacciones con objetos sólidos, la señal se atenúa, por lo que las trayectorias LOS directas y las que involucran una sola reflexión tienden a concentrar la mayor parte de la energía relevante para la detección.

Solo un subconjunto de estas combinaciones produce trayectorias con relación señal–ruido suficiente para ser observadas.

De manera abstracta, cada observación puede modelarse como

$$y_i \sim \begin{cases} P_{\text{clutter}}(\cdot) & \text{con probabilidad } 1 - \pi, \\ P_{\text{UAV}}(\cdot \mid x, \mathcal{A}) & \text{con probabilidad } \pi, \end{cases}$$

donde x denota el estado desconocido del UAV, por ejemplo con p la posición y v la velocidad:

$$x = (p_x, p_y, p_z, v_x, v_y, v_z),$$

$\mathcal{A} = \{(m_a, \tau_a, \theta_a, \phi_a)\}_{a=1}^{M_A}$ es el conjunto de anclas, y P_{UAV} resume, sin explicitar el número de reflexiones ni los materiales, el efecto agregado de las trayectorias que involucran al UAV y a un subconjunto de anclas visibles.

El problema matemático que se propone, dado \mathcal{A} y \mathcal{Y} , es:

- Decidir entre las hipótesis

$$H_0 : \text{no hay UAV presente}, \quad H_1 : \text{existe un UAV con estado } x,$$

es decir, determinar si las nuevas detecciones pueden explicarse razonablemente como *clutter* residual o requieren postular la presencia de un UAV.

- Bajo la hipótesis H_1 , inferir de forma probabilística una región plausible de posición y altura para el UAV, por ejemplo mediante una distribución posterior $\pi(x \mid \mathcal{A}, \mathcal{Y})$, teniendo en cuenta que solo una fracción de las anclas puede reflejarlo y que la visibilidad efectiva está modulada por la geometría estadística del entorno y la relación señal–ruido (que agrupa efectos de distancia, materiales y sección eficaz del blanco).

Preguntas de diseño y objetivos de modelado

Desde el punto de vista del producto, el interés de este problema no es solo “detectar un UAV” en abstracto, sino entender qué tipo de modelos y algoritmos son razonables para nuestro esquema de propagación

$$\text{Fuente}_k \rightarrow \text{UAV} \rightarrow \text{Reflector final}_j \rightarrow \text{Receptor},$$

y qué decisiones de diseño podemos tomar a partir de ese análisis.

En particular, nos interesan las siguientes preguntas abiertas:

1. Modelado conjunto de trayectorias y diseño de un test H_0 vs. H_1

- ¿Qué modelos estadísticos y/o geométricos son adecuados para describir, de manera tractable, las trayectorias que involucran a una fuente (real o virtual), el UAV y uno o más reflectores hasta el receptor?
- ¿Qué algoritmos de ajuste (por ejemplo, métodos de máxima verosimilitud, enfoques bayesianos, algoritmos tipo EM, RANSAC, etc.) podrían utilizarse para ajustar estos modelos a las observaciones $Y = \{(\tau_i, \theta_i, \varphi_i, f_{D,i})\}$?
- ¿Cómo derivar a partir de dicho modelo una regla práctica de decisión entre

$$H_0 : \text{no hay UAV} \quad \text{vs.} \quad H_1 : \text{hay un UAV con estado } x,$$

por ejemplo, una aproximación a un test de razón de verosimilitudes u otras reglas de decisión razonables?

2. Localización bajo H_1 e incertidumbre (sesgo y varianza)

- Bajo la hipótesis H_1 , ¿qué modelos permiten inferir regiones plausibles para el estado del UAV $x = (p, v)$ a partir de las observaciones Y y del conjunto de anclas A ?
- ¿En qué condiciones geométricas y de relación señal–ruido es posible esperar una buena capacidad de localización, y en cuáles el problema se vuelve intrínsecamente ambiguo o mal condicionado?
- Para los estimadores de posición/altura que se propongan, ¿cómo se pueden caracterizar su sesgo y su varianza (aunque sea en modelos simplificados), de modo de entender las limitaciones fundamentales del sistema?

3. Decisión de diseño: receptor fijo vs. receptor móvil y necesidad de calibrar anclas

- Una decisión clave de ingeniería es si el receptor puede permanecer fijo, sin conocer con precisión las posiciones de los transmisores y anclas, o si es necesario (o conveniente) mover el receptor para auto-calibrar esas posiciones a partir de desplazamientos.
- Nos interesa que el análisis de modelado ayude a responder, al menos en escenarios simplificados:
 - ¿En qué medida es viable la detección y localización del UAV con un receptor fijo y posiciones de anclas aproximadas?
 - ¿Qué beneficios teóricos se obtienen al permitir que el receptor se mueva y se ajusten las posiciones de las anclas/transmisores a partir de los datos?
 - ¿Existen configuraciones en las que la localización del UAV sea esencialmente imposible sin esa auto-calibración?

Los participantes tienen libertad para proponer niveles de abstracción y simplificaciones (por ejemplo, trabajar en 2D, suponer ciertos modelos para el *clutter*, restringirse a trayectorias con una sola reflexión, etc.), siempre que las decisiones estén justificadas y conectadas con estas preguntas de diseño del sistema.

Posibles productos del trabajo en el TAMI

Algunos ejemplos de resultados que serían especialmente útiles para nosotros son:

- Propuestas de modelos simplificados que capturen los aspectos esenciales del problema y permitan simular escenarios representativos.
- Algoritmos concretos de detección/localización (aunque sean prototipos numéricos) junto con curvas de desempeño en escenarios de prueba.
- Análisis (aun cualitativo o en modelos de juguete) de condiciones geométricas “buenas” y “malas” para la localización, y de la ganancia de pasar de receptor fijo a receptor móvil.
- Cotas o aproximaciones a sesgo/varianza para estimadores de posición del UAV en configuraciones sencillas.

Simplificaciones en una o más secciones son también bienvenidas