



Detección UAV mediante anclas multipath en un sistema pasivo

gmazzei@marsupialrf.com

7 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).

Simplificaciones en una o más secciones son también bienvenidas