

Estimación del Piso de Ruido y Detección Ciega para Análisis Espectral en SDR

1. Estimación del piso de ruido y detección ciega

En esta sección se formalizan dos familias de métodos: (i) la estimación del piso de ruido en el dominio espectral mediante el algoritmo FCME (Forward Consecutive Mean Excision) y variantes adaptativas, y (ii) la detección ciega basada en autovalores (Eigenvalue-based Detection), incluyendo MME y MDL, utilizada en radio cognitiva.

1.1. Notación general

Sea una estimación espectral discreta con N bins:

$$\mathbf{X} = \{X(1), X(2), \dots, X(N)\},$$

donde $X(k)$ representa potencia (o nivel) asociado al bin k . En muchas implementaciones el espectro se maneja en decibelios:

$$X_{\text{dB}}(k) = 10 \log_{10}(X(k)).$$

Para algoritmos basados en promedios y umbrales multiplicativos (como FCME) es preferible trabajar en potencia lineal. Si se dispone de $X_{\text{dB}}(k)$, la conversión es:

$$X(k) = 10^{X_{\text{dB}}(k)/10}.$$

1.2. Algoritmo FCME (Forward Consecutive Mean Excision)

1.2.1. Objetivo

El algoritmo FCME estima la potencia media del ruido $\widehat{\sigma_n^2}$ a partir de un espectro que contiene ruido y posibles señales fuertes, evitando que dichas señales contaminen la estimación del piso.

1.2.2. Paso 1: Ordenamiento de las muestras

Se ordenan las potencias espectrales en forma ascendente:

$$X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \cdots \leq X_{(N)}.$$

Los valores pequeños corresponden con alta probabilidad a ruido, mientras que los valores grandes suelen asociarse a señal.

1.2.3. Paso 2: Conjunto inicial de ruido

Se define un tamaño inicial M_0 (por ejemplo un porcentaje de N) y se selecciona:

$$\mathcal{N}^{(0)} = \{X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(M_0)}\}.$$

1.2.4. Paso 3: Media provisional

La media inicial del ruido es:

$$\mu^{(0)} = \frac{1}{M_0} \sum_{i=1}^{M_0} X_{(i)}.$$

1.2.5. Paso 4: Umbral FCME

Se define un umbral multiplicativo:

$$T^{(0)} = \alpha \mu^{(0)},$$

donde $\alpha > 1$ controla la tolerancia frente a variaciones del ruido.

1.2.6. Paso 5: Regla “Forward Consecutive”

Sea M el tamaño actual del subconjunto aceptado como ruido y μ su media. Se verifica en forma consecutiva:

$$\text{Si } X_{(M+1)} \leq \alpha \mu \Rightarrow \begin{cases} M \leftarrow M + 1, \\ \mu \leftarrow \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_{(i)}. \end{cases}$$

El proceso se detiene cuando:

$$X_{(M+1)} > \alpha \mu.$$

1.2.7. Paso 6: Estimación final del piso de ruido

La estimación final es:

$$\widehat{\sigma_n^2} = \mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_{(i)}$$

y en dB:

$$\widehat{N}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(\widehat{\sigma_n^2}).$$

1.3. Variantes adaptativas: Block-based FCME y umbrales dinámicos

En escenarios wideband, el piso de ruido puede variar con la frecuencia. Por ello, se emplean variantes que estiman un piso dependiente de frecuencia y adaptan el umbral.

1.3.1. Block-based FCME

Se divide el espectro en bloques contiguos de B bins. Para el bloque b :

$$\mathbf{X}_b = \{X(k_b), X(k_b + 1), \dots, X(k_b + B - 1)\}.$$

Se ejecuta FCME por bloque y se obtiene:

$$\widehat{\sigma_{n,b}^2}.$$

Se define un piso por tramos:

$$\widehat{N}(f) \approx \widehat{\sigma_{n,b}^2} \quad \text{para } f \text{ dentro del bloque } b.$$

1.3.2. Umbral dinámico basado en varianza local

Una forma práctica de adaptar α es usar estadísticos robustos en dB. Para cada bloque:

$$m_b = \text{median}(\mathbf{X}_{b,\text{dB}}), \quad \text{MAD}_b = \text{median}(|X_{\text{dB}} - m_b|),$$

$$\sigma_b = 1,4826 \text{ MAD}_b.$$

Luego se ajusta el umbral mediante un α_b dependiente del bloque:

$$\alpha_b = \alpha_0 \cdot 10^{c \sigma_b / 10},$$

donde α_0 y c son constantes de diseño.

1.4. Detección basada en autovalores (Eigenvalue-based Detection)

Estos métodos operan sobre muestras I/Q en el dominio temporal y permiten detección ciega sin conocer la potencia del ruido a priori.

1.4.1. Snapshots y matriz de covarianza

Sea una secuencia compleja $x[n]$, $n = 1, 2, \dots, N$. Con longitud de snapshot L y K snapshots:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x[1] & x[1 + \Delta] & \cdots & x[1 + (K - 1)\Delta] \\ x[2] & x[2 + \Delta] & \cdots & x[2 + (K - 1)\Delta] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x[L] & x[L + \Delta] & \cdots & x[L + (K - 1)\Delta] \end{bmatrix}.$$

La covarianza muestral:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \mathbf{X} \mathbf{X}^H$$

y sus autovalores ordenados:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_L.$$

1.5. MME (Maximum-Minimum Eigenvalue)

El estadístico MME:

$$T_{\text{MME}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_L}$$

y la regla de decisión:

$$T_{\text{MME}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \gamma.$$

1.6. MDL (Minimum Description Length)

Para $q = 0, 1, \dots, L - 1$:

$$g(q) = \left(\prod_{i=q+1}^L \lambda_i \right)^{\frac{1}{L-q}}, \quad a(q) = \frac{1}{L-q} \sum_{i=q+1}^L \lambda_i.$$

Criterio MDL:

$$\text{MDL}(q) = -(L - q)K \ln \left(\frac{g(q)}{a(q)} \right) + \frac{1}{2}q(2L - q) \ln K$$

Estimación:

$$\hat{q} = \arg \min_q \text{MDL}(q).$$

2. Diagrama del flujo implementado en el script

El diagrama de la Figura ?? resume el pipeline del script para comparar estimadores de piso de ruido y detección local tipo CFAR.

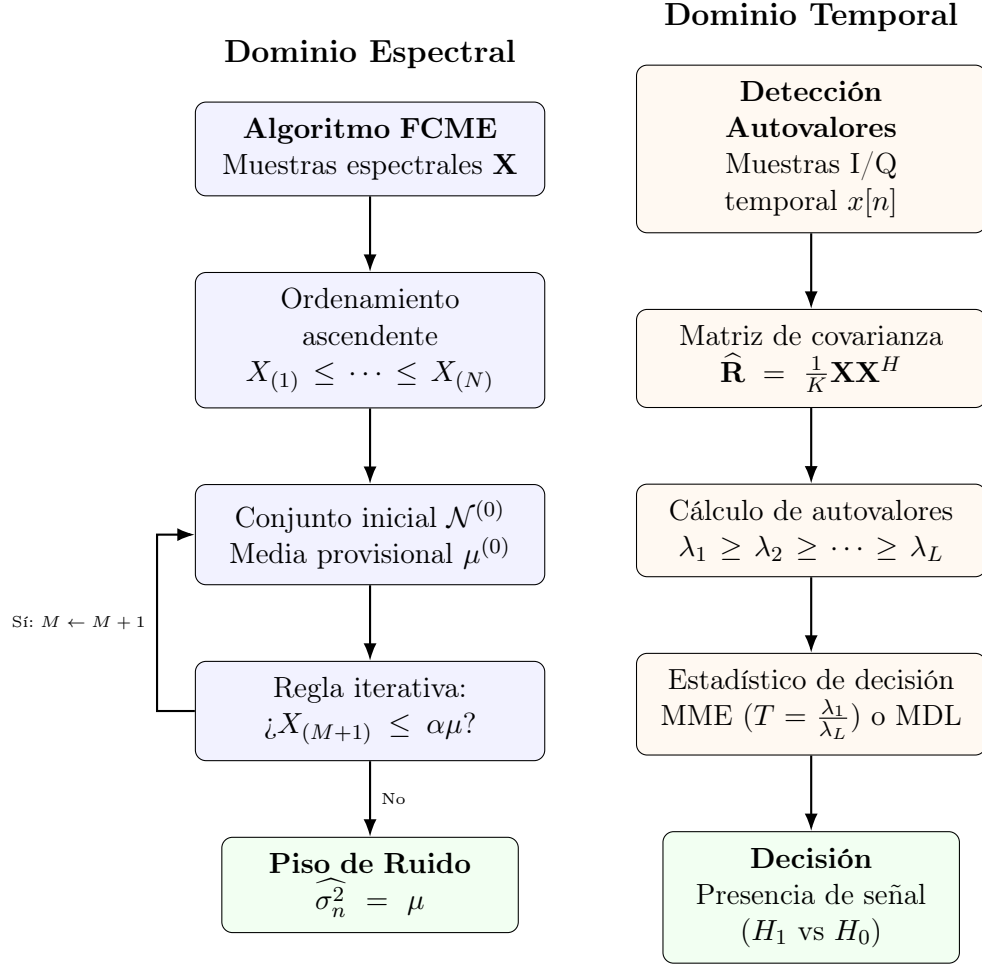


Figura 1: Comparativa de flujos algorítmicos: Estimación de piso de ruido mediante FCME y detección ciega basada en autovalores.