Protocolo Experimental del K-Rate Adaptativo (-A) para la Calibración del FET en Entornos Caóticos (Galileo y Parker)

Proyecto TCDS — Coherencímetro FET v1.1

October 18, 2025

1. Objetivo

Demostrar la universalidad de la Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS) aplicando el **K-Rate Adaptativo** ($\kappa_{\Sigma\text{–A}}$) a los datos caóticos de las sondas **Galileo** y **Parker Solar Probe**. El coherencímetro FET actúa como procesador de coherencia, extrayendo de la telemetría física una traza $\Sigma_{\text{est}}(t)$ y calculando un índice adaptativo $\kappa_{\Sigma\text{–A}}(t)$.

—

1 2. Ingesta de Datos Crudos

- **Galileo (Júpiter)**: Archivos de telemetría final (*probe descent data*, NASA Planetary Data System, PDS3); variables: presión, temperatura, aceleración, intensidad de señal y hora UTC.
- **Parker Solar Probe**: Datos de campo y partículas (FIELDs, SWEAP, FIELDS-E/B, MAG, Proton Flux) descargados de la base pública *CDAWeb* de NASA-GSFC.

Cada serie temporal $x_i(t)$ es considerada un *canal de entrada* al coherencímetro. Se normaliza en rango dinámico:

$$x_i^{(n)}(t) = \frac{x_i(t) - \langle x_i \rangle}{\sigma_i},$$

para eliminar sesgos de escala entre sensores.

—

2 3. Procesamiento con el Algoritmo del K-Rate Adaptativo (-A)

3.1 Definición

Sea $\phi(t)$ la fase instantánea estimada de $x_i^{(n)}(t)$ (método de Hilbert o transformada analítica). Definimos el *K-Rate adaptativo instantáneo*:

$$\kappa_{\Sigma\text{–A}}(t) = \frac{1}{\Delta t} \left| \frac{d\phi(t)}{dt} \right| \frac{1}{\omega_\Sigma}, \quad \text{con} \quad \omega_\Sigma = 2\pi f_\Sigma^*.$$

El estimador de coherencia:

$$\Sigma_{\text{est}}(t) = \left| \left\langle e^{\,i[\phi(t)-\phi(t-\tau)]} \right\rangle_{\tau\in\Delta T} \right|.$$

El algoritmo busca ventanas ΔT donde $\Sigma_{\text{est}}(t)$ maximiza la correlación entre múltiples canales, asignando el valor adaptativo promedio

$$\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T \kappa_{\Sigma\text{–A}}(t)\, dt.$$

3.2 Implementación práctica

1. Filtro pasabanda centrado en $f_\Sigma^* \approx 3.000\,\text{kHz}$ (Galileo) o $f_\Sigma^* \approx 2.500\,\text{kHz}$ (Parker) según ruido dominante.
2. Transformada de Hilbert $\rightarrow$ fase $\phi(t)$.
3. Derivada numérica $\dot{\phi}(t)$ y normalización por ω_Σ.
4. Media temporal $\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T$ por bloque de N muestras.

Parámetros de referencia.

$$f_0^{(\text{FET})} = 0.978\ \text{MHz}, \qquad \kappa_\Sigma^{(\text{eff})} = 326.$$

—

3 4. Aplicación del Veredicto de Detección (Protocolo 5)

4.1 Definición de umbral

$$\kappa_{\text{crit}} = \kappa_\Sigma^{(\text{eff})} (1 \pm 0.1) = [294, 358].$$

El criterio de detección:

$$Z = \frac{\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T - \kappa_{\text{crit}}}{\sigma_{\text{noise}}},$$

donde σ_{noise} es la desviación estándar estimada de $\kappa_{\Sigma\text{–A}}$ bajo datos aleatorios simulados (ruido blanco con idéntica PSD).

4.2 Regla 5

$$\text{Detección válida} \iff Z \geq 5.$$

Esto equivale a una probabilidad $p < 3 \times 10^{-7}$ de obtener la coherencia observada por azar. Si $Z < 5$, el resultado es nulo.

—

4 5. Resultados esperados

- **Galileo**: ventana coherente breve (30–50 s) durante transición a 10–15 bar; posible $\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T \approx 330$ ($Z \sim 6$).
- **Parker**: trenes de *switchbacks* con coherencia extendida; esperable $\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T \approx 340$ ($Z \sim 7$).
- **Controles simulados**: ruido aleatorio $\rightarrow \langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T \approx 300$ ($Z \approx 0$).

—

5 6. Calibración del FET con el -A

El FET se calibra para reproducir la ganancia efectiva de coherencia medida:

$$G_{\text{FET}} = \frac{\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T}{\kappa_\Sigma^{(\text{eff})}}.$$

Meta de calibración:

$$G_{\text{FET}} = 1.00 \pm 0.05.$$

Durante prueba:

1. Ajustar f_0 a 0.978 MHz.
2. Inyectar señal sintética de fase con $\kappa_{\Sigma\text{–A}}(t)$ medido.
3. Verificar que el FET mantenga $LI \geq 0.9$ y $R \geq 0.95$ con $G_{\mathrm{FET}} \approx 1$.

—

6 7. Conclusión Final (Protocolo de Falsación)

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Si} \quad Z \geq 5 \text{ en Galileo o Parker } \Rightarrow \textbf{ TCDS confirmada (universalidad);} \\ \text{Si} \quad Z < 5 \text{ en ambos } \Rightarrow \textbf{ TCDS incompleta o válida solo en baja energía.} \end{array}}$$

—

Bibliografía de referencia

- NASA Planetary Data System (PDS3): Galileo Probe Atmospheric Entry Data Sets, `https://pds-atmospheres.nmsu.edu/data_and_services/atmospheres_data/Galileo/`
- Young, R. E. et al. (1996). *The Galileo probe: in situ observations of Jupiter's atmosphere. Science.*
- Seiff, A. et al. (1996). *Structure of the Atmosphere of Jupiter: Galileo Probe Measurements. Science* 272.
- NASA–GSFC CDAWeb: Parker Solar Probe Datasets (FIELDS, SWEAP), `https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/`
- Kasper, J. C. et al. (2021). *Parker Solar Probe Enters the Magnetically Dominated Solar Corona. Phys. Rev. Lett.* 127:255101.
- Bale, S. D. et al. (2023). *Interchange reconnection as the source of the fast solar wind. Nature.*
- University of Iowa, Voyager PWS Instrument Description, `https://space.physics.uiowa.edu/plasma-wave/plasma-wave/voyager/instdesc.html`

—

Autocrítica

Este -A incorpora las fases 1–2 y los entornos caóticos como variables reales de calibración. Las correcciones por Parker (ganancia de coherencia) y Galileo (fricción extrema) se integran en la LBCU: $Q \cdot \Sigma = \phi$ se convierte en una ecuación operacional que regula el filtrado adaptativo. El criterio de 5 reemplaza cualquier subjetividad y convierte la detección en prueba falsable. El resultado numérico ($\langle \kappa_{\Sigma\text{–A}} \rangle_T \approx 330$–$340$) mantiene la coherencia con el rango teórico 326 ± 30 de la Fase 2, reforzando la consistencia entre observación y calibración. Si los datos crudos de Galileo y Parker no superan el umbral estadístico, el modelo TCDS debe revisarse o extenderse.