

脑功能连接

PLM (Phase Linearity Measurement) 相位线性测量

两个脑区如果存在功能连接（信息交互），它们的脑电振荡会同步，但这种同步 不一定表现为“相位差恒定”。

现实大脑中更常见的是：相位差随时间以接近线性的方式变化

(如果两个脑区在交流，信号的相位差不是平的，而是一条倾斜的直线)

$$\Delta\phi(t) = \phi_x(t) - \phi_y(t) = C - \Delta f \cdot t$$

- Δf = 两个脑区振荡频率的微小差异
- $\Delta\phi(t)$ = 相位差随时间变化
- 线性变化表示两脑区仍同步且存在耦合

步骤	操作	意义
1. 得到相位差	$\Delta\phi(t)$	描述两个脑区的相位关系
2. 构造干涉信号	$z(t) = e^{i\Delta\phi(t)}$	保留纯相位信息，无振幅影响
3. 对 $z(t)$ 做 FFT	得到频谱 $S_z(f)$	看“相位差变化的频率结构”
4. 计算低频能量比例	$PLM = \frac{\int_1^L S_z(f) df}{\int S_z(f) df}$	判断相位差是否呈线性变化

PLM 不要求相位差恒定，只要求相位变化有“规律性”（线性趋势）。

相位差行为	频谱表现	PLM 值	意义
线性变化（有连接）	能量集中在低频	高	两脑区存在耦合
随机变化（无连接）	能量分散	低	两脑区独立

PLM = 相位差时间结构是否“成直线”的程度

因为如果两个脑区是相互驱动的振荡系统：

- 它们的频率不会完全一致
- 但相位差会有规律地随时间变化

PLM 识别的正是这种 规律性同步

这是 真实神经网络连接的本质特征。

其他方法

ImC (Imaginary Part of Coherence) 虚部相干

解决 EEG/MEG 中 体积传导 (一个源信号无延迟地传播到多个电极) 导致的假连接问题。

如果两个电极的信号来自同一个源，信号之间 不会有时间延迟 → 相位差为 0 → 其 互谱的虚部为 0。

ImC 只保留互谱的虚部

$$ImC = \text{Imag} \left(\frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}} \right)$$

特性	说明
✓ 能消除体积传导影响	因为体积传导产生的连接虚部为 0
✗ 受振幅影响，不是纯相位指标	并非只反映相位同步

PLI (Phase Lag Index) 相位滞后指数

比 ImC 更进一步：

完全基于相位来衡量连接，且不受体积传导影响。

如果两个脑区存在真实交互，信号之间会存在 稳定的相位偏移 (相位差 $\neq 0$)，且偏移方向长期一致。

$$PLI = |\langle \text{sign}(\sin(\Delta\phi(t))) \rangle|$$

PLI 假设：

$\Delta\phi(t)$ 必须恒定

但若两个脑区频率略有差别 (现实情况)：

- 相位差会缓慢漂移
- PLI 认为：没有同步（误判）

特性	说明
<input checked="" type="checkbox"/> 纯相位指标	不依赖振幅，反映真实耦合
<input checked="" type="checkbox"/> 抗体积传导	因为体积传导导致相位差为 0，不会贡献值
<input checked="" type="checkbox"/> 对噪声敏感	相位稍微扰动，就容易错判
<input checked="" type="checkbox"/> 两脑区频率稍有差异 → PLI 失效	相位差漂移会使 $PLI \approx 0$