



## 基于双同心圆环拉普拉斯电极的脑电研究\*

郑春厚<sup>1,2)</sup> 何峰<sup>1,2)</sup> 史恬宁<sup>1,2)</sup> 薛佳兴<sup>1,2)</sup> 应炳杰<sup>1,2)</sup> 许敏鹏<sup>1,2)</sup>\*\*

(<sup>1)</sup> 天津大学医学工程与转化医学研究院, 天津 300072; (<sup>2)</sup> 脑机交互与人机共融海河实验室, 天津 300392)

**摘要** 目的 脑电图 (EEG) 是一种记录脑电波的非侵入式电生理监测方法, 然而传统脑电采集电极易受参考活化的影响, 而且空间分辨率低。拉普拉斯电极参考独立, 并且有望提高 EEG 空间分辨率。本研究基于双环拉普拉斯电极, 探究拉普拉斯电极独立参考特性, 对比拉普拉斯电极与传统电极的空间分辨率差异。**方法** 使用 21 个 Ag/AgCl 双环拉普拉斯电极, 进行三维 (3D) 半球水箱试验, 模拟全脑信号采集, 检测 400 mVpp@13 Hz 正弦信号的分布。更换拉普拉斯电极的地电极位置以及传统电极的参考电极位置, 提取并分析 13 Hz 源频率成分的空间分布。**结果** 不同地电极位置下, 拉普拉斯电极信噪比 (SNR) 空间分布基本一致, 其相关系数为 0.94, 而传统电极在不同参考电极位置下的 SNR 分布相关系数为 0.07, 拉普拉斯电极参考独立, 传统电极对参考电极位置敏感。拉普拉斯电极幅值 3 dB 衰减面积比率为 2.1%, 而传统电极 6.9%, 拉普拉斯电极 SNR 3 dB 衰减面积比率为 1.0%, 而传统电极 30.1%。**结论** 拉普拉斯电极不受参考电极影响, 具有参考独立性, 且空间分辨率更高, 有望实现更精确的脑电活动定位, 为拉普拉斯电极用于脑-机接口 (BCI) 奠定了基础。

**关键词** 脑电图, 拉普拉斯, 同心圆环电极, 空间分辨率

**中图分类号** R318

**DOI:** 10.16476/j.pibb.2024.0308

**CSTR:** 32369.14.pibb.20240308

电生理信号的测量对于监测身体状态和促进临床疾病诊断具有至关重要的意义<sup>[1]</sup>。随着与脑-机接口 (brain-computer interfaces, BCI) 相关的计算机技术和传感器技术的不断发展, 以及神经科学、心理学、脑科学等学科理论基础的完善, 脑电图 (electroencephalography, EEG) 的研究受到广泛关注<sup>[2-3]</sup>。

EEG 是一种通过记录头皮表面的电位变化来反映大脑神经元活动的方法。基于 EEG 的非侵入式脑机接口 (brain-computer interface, BCI) 技术具有无创和易使用等优势, 已成为 BCI 研究的主流<sup>[4-5]</sup>。

然而, 由于大脑容积导体效应的存在, EEG 的空间分辨率较低, 容易受到非目标脑源信号或全局噪声的干扰, 因此在进行高精度源定位方面存在一定困难<sup>[6-7]</sup>。此外, 没有“理想”的参考电极, 共参考连接方式易受到参考电极的活化作用, 从而对分析结果产生影响<sup>[8]</sup>。因此, 如何提高 EEG 的空间分辨率、降低全局噪声干扰, 并解决参考电极活化问题, 成为目前面临的一项挑战。有学者提出

使用表面拉普拉斯分析头皮脑电, 表面拉普拉斯是空间的二阶导数, 对空间非常敏感<sup>[9-10]</sup>, 拉普拉斯电极由于参考独立以及空间分辨率高的特点, 受到研究人员关注<sup>[7]</sup>。

1993 年, Law 等<sup>[11]</sup> 推导出了一般椭球的表面拉普拉斯算子, 并结合 EEG 技术获取头皮脑电的表面拉普拉斯电位, 证明了利用该方法获得的脑电信号空间分辨率比传统 EEG 提高了至少 3 倍。

2006 年, 李刚等<sup>[12]</sup> 设计了有源拉普拉斯电极并进行兔试验, 证明拉普拉斯电极可以采集到活体视觉诱发电位。同年, Besio 等<sup>[13]</sup> 也开始探索拉普拉斯电极的应用方案, 为脑电研究开辟了新的道路。他们的研究结果显示, 三同心圆环拉普拉斯电极能够显著提升空间分辨率, 从而在拉普拉斯脑电领域迈出了重要的一步。2007 年, 周鹏等<sup>[14]</sup> 基于三同心圆环拉普拉斯电极, 实现左右手运动想象的

\* 国家重点研发计划 (2021YFF0602902) 和国家自然科学基金 (62122059, 82330064) 资助项目。

\*\* 通讯联系人。

Tel: 022-83612122, E-mail: minpeng.xu@tju.edu.cn

收稿日期: 2024-07-10, 接受日期: 2024-10-02

BCI设计。2014年, Boudria等<sup>[15]</sup>采用拉普拉斯电极, 在运动想象范式下成功实现了一维光标的实时控制, 证实了拉普拉斯电极在正确率方面的优势。2018年, Haddix等<sup>[16]</sup>验证了拉普拉斯电极对于捕捉大脑节律变化更加敏感, 这一发现对于临床诊断和神经反馈等领域具有重要的临床意义。2023年, 许敏鹏等<sup>[17]</sup>首次使用拉普拉斯电极探究稳态视觉诱发电位 (steady state visually evoked potential, SSVEP) 空间分辨率, 有望实现更精确的脑电源定位。

总之, 这些研究共同揭示了拉普拉斯电极在BCI及神经科学研究中的前景, 为未来的探索和应用提供了有力的支持。然而, 拉普拉斯脑电信号更加微弱<sup>[13, 17]</sup>, 人体试验操作繁琐复杂, 本研究首次使用21个Ag/AgCl双环拉普拉斯电极, 基于三维(3D)水箱试验, 模拟全脑电信号采集, 检测并分析400 mVpp@13 Hz信号源的空间分布特征, 探究拉普拉斯电极的参考独立性、高空间分辨率特性, 以及信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)分布, 为拉普拉斯脑电的研究提供新思路。

## 1 试验方法

### 1.1 表面拉普拉斯估计

有限差分法可以从表面的电势分布推导出表面拉普拉斯算子的估计, 是一种简单的表面拉普拉斯估计方法。图1展示了有限差分法估计表面拉普拉斯的示意图。假设在有限空间内的矩形网格分布上, 如果得到了矩形网格上电势分布, 即可估计出表面拉普拉斯分布。

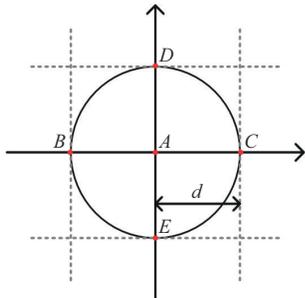


Fig. 1 Finite difference method for estimating surface Laplacian

三点法是在一维坐标上进行拉普拉斯估计<sup>[18]</sup>, 取图1中x坐标轴上A、B、C三点即可得到A点位置的三点法拉普拉斯估计:

$$L_{s,3s} = \frac{1}{d^2}(v_B + v_C - 2v_A) \quad (1)$$

公式(1)中 $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$ 分别为一维坐标上A、B、C位置的电势,  $d$ 为网格间距。

实际头皮脑电采集, 通常在有限的二维头皮表面采集脑电, 根据图1中二维网格电势分布, 即可得到五点法拉普拉斯估计:

$$L_{s,5s} = \frac{1}{d^2}(v_B + v_C + v_D + v_E - 4v_A) \quad (2)$$

公式(2)中 $v_A \sim v_E$ 为矩形网格上对应位置的电势, 整理公式(2)得到公式(3)。

$$L_{s,5s} = \frac{4}{d^2}(\bar{v} - v_A) \quad (3)$$

公式(3)中,  $\bar{v}$ 是网格B、C、D、E 4点的平均电势,  $d$ 为网格间距即双环拉普拉斯电极的半径, 公式(3)离散的五点法拉普拉斯估计可以应用于双极性同心圆环配置。通过沿着半径为 $d$ 的圆环积分, 并按照文献[19]定义 $X = d \cdot \cos(\theta)$ ,  $Y = d \cdot \sin(\theta)$ , 可以推导出公式(4)。

$$L_s = \frac{4}{d^2} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(d, \theta) d\theta - v_A \right] \quad (4)$$

整理公式(4)可以得到公式(5)。

$$L_s = \frac{4}{d^2}(\bar{v} - v_A) \quad (5)$$

公式(5)是双极同心圆环电极进行拉普拉斯电势估计的理论基础。从公式中可以看到, 拉普拉斯电势是提取目标空间位置的电位, 因此不需要参考电极, 这就可以避免参考电极活化带来的问题<sup>[10]</sup>。

### 1.2 试验设计

图2是试验搭建图, 3D球壳直径为16 mm, 厚度为2 mm, 根据国际10-20导联系统, 使用21个双环拉普拉斯电极, 粘贴于球壳内表面, 双环拉普拉斯电极外径为20 mm, 内径为4 mm, 基于烧结Ag/AgCl材料制成<sup>[17]</sup>。使用0.9%的NaCl溶液填充球壳, 信号源放置于枕区P3位置附近, 信号为400 mVpp@13 Hz的正弦信号(SC200, 惠更斯, 中国)。

本实验使用Neuroscan的Synamps 2脑电采集系统, 记录时长为10 s, 采样率为1 000 Hz, 开启1~40 Hz的带通滤波, 并开启50 Hz陷波。由于外环的电极与传统电极性能相似<sup>[15, 20]</sup>, 所以使用拉普拉斯电极外环来代替传统电极, 使用Synamps 2的21个单极导联采集传统电极的信号, 地电极放置于AFz位置, 分别记录参考电极放在FCz和CP5

位置的信号 (图3)。使用双极拉普拉斯电极时, 使用Synamps 2的4个双极导联采集拉普拉斯电极的信号, 由于Synamps 2只有4个双极通道, 因此

拉普拉斯电极记录方式是依次对21个拉普拉斯电极进行记录, 分别记录地电极放置于FCz和CP5位置的信号。

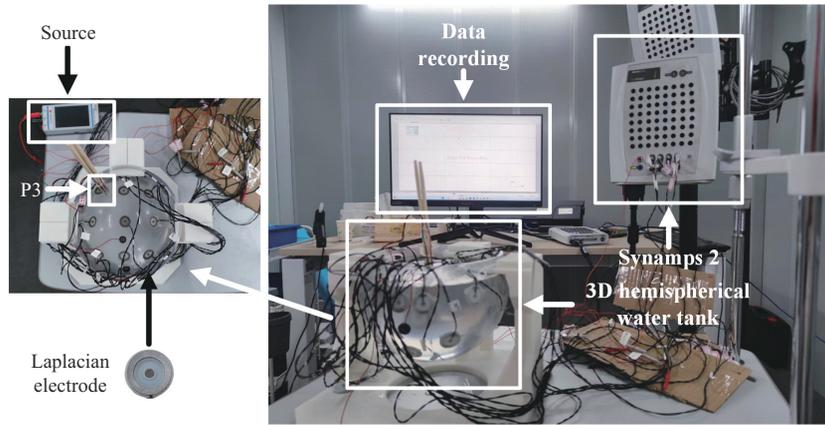


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

## 2 结 果

### 2.1 参考电极敏感性

图3是将采集的信号进行FFT变化后, 取13 Hz信源频率的电位绘制的脑地形图。图3a是拉普拉斯电极所采集的结果, 图3b是传统电极所采集的结果。拉普拉斯电极由于是独立参考, 因此其空间分布特征不受参考电极影响, 而且也不受地电极影响, 从图3a中可以看出地电极分别放置于FCz

和CP5位置下的脑地形图分布基本一致, 而且是靠近信源位置P3的幅值最大。

图3b中的传统电极和参考电极分别放置在FCz和CP5位置时其脑地形图分布不同, 参考电极放置于FCz处时, P3电极幅值最大, FCz电极幅值最低。参考电极放置于CP5处时, Pz电极幅值最大, C3电极幅值最低。本试验证明了拉普拉斯电极的参考独立性, 不受参考电极影响, 而传统电极, 对参考电极敏感。

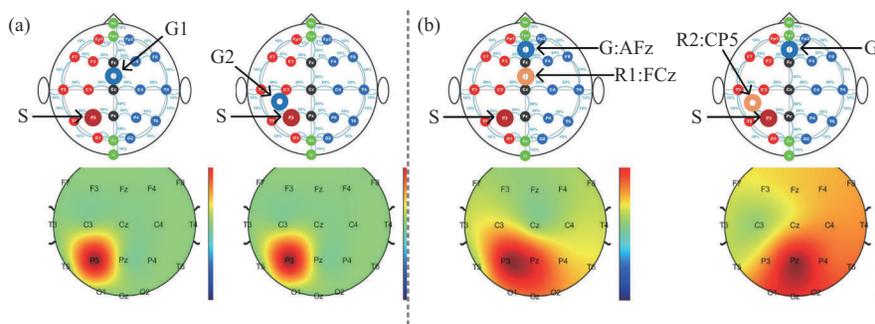


Fig. 3 Distribution of cortical potentials

(a) Distribution of Laplacian electrodes. (b) Distribution of traditional electrodes.

图4是分别计算拉普拉斯电极与传统电极在13 Hz频率点的SNR结果。其中红色曲线为传统电极SNR分布趋势, 蓝色曲线为拉普拉斯电极SNR分布趋势。整体看, 拉普拉斯电极的SNR要低于传统电极, 这也许是由于拉普拉斯信号幅值弱导致的。拉普拉斯电极参考独立, 不受地电极影响, SNR最大位置都是P3电极, 两种地电极的位置下,

拉普拉斯电极的SNR分布基本一致, 相关系数为0.94。而传统电极虽然SNR高, 但是其采用共参考的连接方式, 两种不同参考电极位置下, 其SNR分布相关系数为0.07, 最大SNR分别位于P3和O1电极, 传统电极对参考电极敏感性高, 易受参考电极影响。

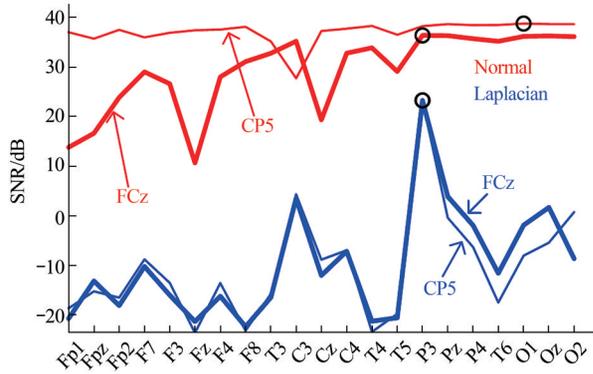


Fig. 4 Results of SNR variations with electrode changes

### 2.2 空间分辨率

图5是时域、频域波形, 包括拉普拉斯电极的时域波形(图5a)、传统电极的时域波形(图5b)、拉普拉斯电极的频域波形(图5c)和传统电极的频域波形(图5d)。拉普拉斯电极所采集信号的幅值低于传统电极, 拉普拉斯电极只有P3电极有明显的13 Hz源信号震荡, 而其他电极基本没有13 Hz成分。传统电极除了P3电极之外, 其余电极也可见到13 Hz源信号震荡, 即拉普拉斯电极的空间分辨率更高。

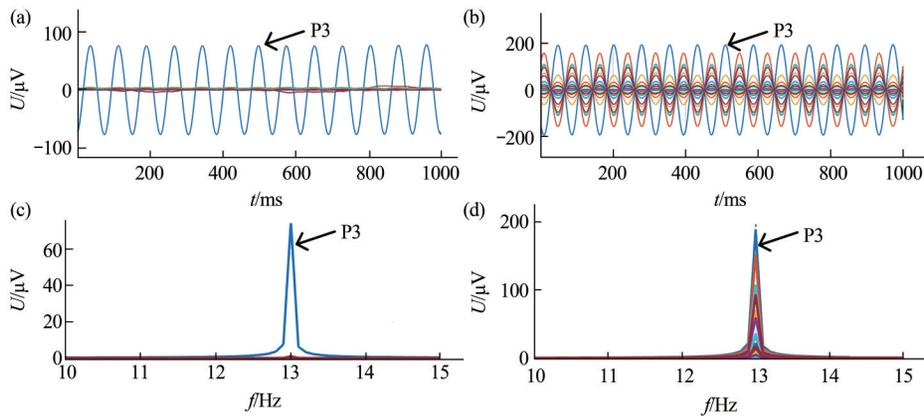


Fig. 5 Time-domain and frequency-domain signals

(a, b) Time domain of Laplacian (a) and traditional (b) electrodes. (c, d) Frequency domain of Laplacian (c) and traditional (d) electrodes.

图6是3 dB面积脑地形图分布。图6a, b分别是拉普拉斯电极与传统电极最大电位降低3 dB的面积分布。图6c, d分别为拉普拉斯电极和传统电极最大SNR降低3 dB的所形成的面积, 3 dB面积与全脑面积比率见表1。表1结果显示, 拉普拉斯电极幅值降低3 dB的面积与全脑面积比为2.1%,

传统电极幅值降低3 dB的面积与全脑面积比为6.9%和9.0%, 拉普拉斯电极SNR降低3 dB面积与全脑面积比为1.0%, 而传统电极为30.1%和72.5%。拉普拉斯电极的空间分辨率更高, 传统电极空间分辨率低, 而且参考电极在不同位置时, 传统电极3 dB面积也不同。

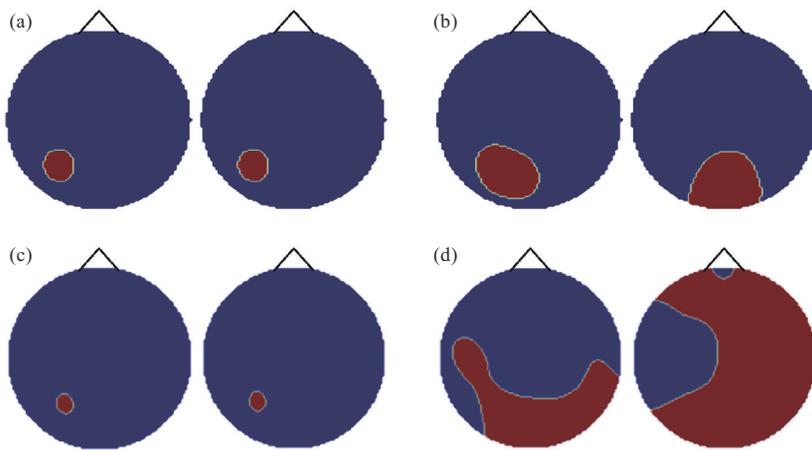


Fig. 6 Distribution of cortical potentials and SNR

(a, b) 3 dB potential distribution of Laplacian (a) and traditional (b) electrodes. (c, d) 3 dB SNR distribution of Laplacian (c) and traditional (d) electrodes.

Table 1 3 dB area ratio

Area ratio/%	Laplacian G1	Laplacian G1	Traditional R2	Traditional R2
Potentials	2.1	2.1	6.9	9.0
SNR	1.0	1.0	30.1	72.5

### 3 讨 论

理想的参考电极应具有零电位或恒定电位，但在人体上无法找到这样的位点。实际应用中，不同参考电极位置往往给 EEG 研究带来不确定性，限制了 EEG 的发展。为此，许多学者提出了如乳突参考和平均参考等分析方法，但这些方法仍与理想参考存在差距<sup>[21]</sup>。为此，Yao<sup>[22]</sup>提出了参考电极标准化技术，该技术基于单极电极，可以将参考电极近似标准化到无限远，具有重要意义。

然而，拉普拉斯电极作为一种特殊的多极电极，其采集的拉普拉斯脑电与单极电极采集的脑电不同。拉普拉斯电极能够反映从头皮流入或流出颅骨的电流通量。由于拉普拉斯电极不依赖参考电极，因此其电位分布也不依赖于参考电极的位置。本研究通过水箱实验探讨了拉普拉斯脑电图 (laplacian EEG, LEEG) 的特性，真实大脑条件下的 LEEG 特性和电位分布仍需进一步研究。

本研究基于 3D 半球形水箱，首次实现了 21 通道拉普拉斯信号采集，分析了拉普拉斯电极的参考独立性以及高空间分辨率特性。结果表明，拉普拉斯电极参考独立，可以不受参考电极影响，而且其空间分辨率远高于传统电极。但是拉普拉斯信号的幅值低于传统电极，传统脑电信号只有微伏级别，已经属于微弱信号，而拉普拉斯信号幅值更低，传统脑电信号大约是  $\mu\text{V}$  级别，拉普拉斯脑电只有 nV 级别<sup>[17]</sup>，对放大器而言是一项不小的挑战，这对采集系统提出了更高的要求，极大增加了拉普拉斯电极的研究和应用门槛。Boudria 等<sup>[15]</sup>设计了专用的前置放大器来缓解这一问题，然而随之而来的是高昂的设备价格以及更复杂的试验过程，这也限制了人们研究拉普拉斯电极的积极性。而且，电极与头皮的接触阻抗、电极自身的噪声也会降低拉普拉斯脑电的 SNR，也需要探究噪声更低材料，降低电极噪声，降低接触阻抗，以提高拉普拉斯脑电的 SNR。

本研究中使用的拉普拉斯电极尺寸为 20 mm，可以实现 21 通道全脑信号采集，如果要实现更多通道、更高密度的脑电信号采集，需要使用更小的

拉普拉斯电极，而更小的电极尺寸，容易使得内外环短路，这可能降低拉普拉斯电极的有效性，因此有待进一步探究更合适的拉普拉斯电极尺寸以实现更高密度脑电信号采集。

本研究以幅值降低 3 dB 所形成的面积与 SNR 降低 3 dB 所形成的面积评估拉普拉斯电极的空间分辨率 (图 6c, d)，结果表明，使用 SNR 的方法可以得到更精准的源定位。这意味需要探究新算法，来深入挖掘拉普拉斯电极的特性。

总之，需要从电极、放大电路、范式与算法这一系统性角度来研究拉普拉斯电极的应用，如果没有合适的采集系统与范式、算法，也许不会充分发挥出拉普拉斯电极的优势。

### 4 结 论

本文通过使用基于双同心圆环拉普拉斯电极的脑电研究，探讨了拉普拉斯电极在提高脑电信号的空间分辨率和参考独立性方面的优势。研究采用了 21 个 Ag/AgCl 双环拉普拉斯电极进行 3D 半球水箱试验，模拟全脑信号采集，并检测了 400 mVpp@13 Hz 正弦信号的分布。通过改变拉普拉斯电极的地电极位置和传统电极的参考电极位置，提取并分析了 13 Hz 源频率成分的空间分布。

研究结果显示，拉普拉斯电极在不同地电极位置下的 SNR 空间分布基本一致，相关系数高达 0.94，表明其参考独立性。相比之下，传统电极在不同参考电极位置下的 SNR 分布相关系数仅为 0.07，显示出对参考电极位置的敏感性。此外，拉普拉斯电极的电位 3 dB 衰减面积比率为 2.1%，而传统电极为 6.9%，表明拉普拉斯电极具有更高的空间分辨率。

总的来说，拉普拉斯电极因其参考独立特性和高空间分辨率，能够实现更精确的脑电活动定位。这些特性为拉普拉斯电极在 BCI 等领域的应用奠定了基础，展现出其在神经科学研究和临床诊断中的重要价值。尽管拉普拉斯信号的幅值较低，对采集系统提出了更高的要求，但通过采用合适的采集系统、范式和算法，可以充分发挥拉普拉斯电极的优势。未来的研究需要从电极设计、放大电路、信号

处理算法等多个角度进行系统性探索, 以进一步挖掘拉普拉斯电极的潜力, 并降低其研究和应用的门槛。

### 参 考 文 献

- [1] 孟佳圆, 姚旺, 孟强帆, 等. 预测性编码在视听觉神经活动中的典型表征. 生物化学与生物物理进展, 2023, **50**(7): 1501-1516  
Meng J Y, Yao W, Meng Q F, *et al.* Prog Biochem Biophys, 2023, **50**(7): 1501-1516
- [2] Xu M, He F, Jung T P, *et al.* Current challenges for the practical application of electroencephalography-based brain-computer interfaces. Engineering, 2021, **7**(12): 1710-1712
- [3] Li B, Cheng T, Guo Z. A review of EEG acquisition, processing and application. J Phys Conf Ser, 2021, **1907**(1): 012045
- [4] Han J, Xu M, Xiao X, *et al.* A high-speed hybrid brain-computer interface with more than 200 targets. J Neural Eng, 2023, **20**(1): 016025
- [5] 单宝莲, 张力新, 徐舫舟, 等. 基于脑电信号的癫痫发作预测特征及识别. 生物化学与生物物理进展, 2023, **50**(2): 322-333  
Shan B L, Zhang L X, Xu F Z, *et al.* Prog Biochem Biophys, 2023, **50**(2): 322-333
- [6] Kayser J, Tenke C E. Issues and considerations for using the scalp surface Laplacian in EEG/ERP research: a tutorial review. Int J Psychophysiol, 2015, **97**(3): 189-209
- [7] Besio W G, Martínez-Juárez I E, Makeyev O, *et al.* High-frequency oscillations recorded on the scalp of patients with epilepsy using tripolar concentric ring electrodes. IEEE J Transl Eng Health Med, 2014, **2**: 2000111
- [8] Lei X, Liao K. Understanding the influences of EEG reference: a large-scale brain network perspective. Front Neurosci, 2017, **11**: 205
- [9] Oostendorp T F, van Oosterom A. The surface Laplacian of the potential: theory and application. IEEE Trans Biomed Eng, 1996, **43**(4): 394-405
- [10] Murzin V, Fuchs A, Scott Kelso J A. Detection of correlated sources in EEG using combination of beamforming and surface Laplacian methods. J Neurosci Methods, 2013, **218**(1): 96-102
- [11] Law S K, Nunez P L, Wijesinghe R S. High-resolution EEG using spline generated surface Laplacians on spherical and ellipsoidal surfaces. IEEE Trans Biomed Eng, 1993, **40**(2): 145-153
- [12] 李刚, 王立丽, 王越, 等. 脑电有源拉普拉斯电极设计. 数据采集与处理, 2006, **21**(4): 487-491  
Li G, Wang L L, Wang Y, *et al.* J Data Acquis Process, 2006, **21**(4): 487-491
- [13] Besio W G, Koka K, Aakula R, *et al.* Tri-polar concentric ring electrode development for Laplacian electroencephalography. IEEE Trans Biomed Eng, 2006, **53**(5): 926-933
- [14] 周鹏, 曹红宝, 熊屹, 等. 一种新型拉普拉斯电极的设计及其在脑机接口中的应用. 传感技术学报, 2007, **20**(9): 2108-2112  
Zhou P, Cao H B, Xiong Y, *et al.* Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, **20**(9): 2108-2112
- [15] Boudria Y, Feltane A, Besio W. Significant improvement in one-dimensional cursor control using Laplacian electroencephalography over electroencephalography. J Neural Eng, 2014, **11**(3): 035014
- [16] Haddix C, Al-Bakri A F, Besio W, *et al.* A comparison of EEG alpha rhythm detection by tripolar concentric ring electrodes and conventional disk electrodes//IEEE. 2018 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT). Louisville, KY, USA: IEEE, 2018: 68-72
- [17] 许敏鹏, 丁茹梦, 郑春厚, 等. 基于头皮拉普拉斯脑电电极的高空间分辨率 SSVEP 信号采集与分析研究. 信号处理, 2023, **39**(8): 1455-1464  
Xu M P, Ding R M, Zheng C H, *et al.* J Signal Process, 2023, **39**(8): 1455-1464
- [18] Liu D, Xu X, Li D, *et al.* Intracranial brain-computer interface spelling using localized visual motion response. Neuroimage, 2022, **258**: 119363
- [19] Huiskamp G. Difference formulas for the surface Laplacian on a triangulated surface. J Comput Phys, 1991, **95**(2): 477-496
- [20] Makeyev O, Boudria Y, Zhu Z, *et al.* Emulating conventional disc electrode with the outer ring of the tripolar concentric ring electrode in phantom and human electroencephalogram data//IEEE. 2013 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB). Brooklyn, NY, USA: IEEE. 2013: 1-4
- [21] Yao D, Qin Y, Hu S, *et al.* Which reference should we use for EEG and ERP practice?. Brain Topogr, 2019, **32**(4): 530-549
- [22] Yao D. A method to standardize a reference of scalp EEG recordings to a point at infinity. Physiol Meas, 2001, **22**(4): 693-711

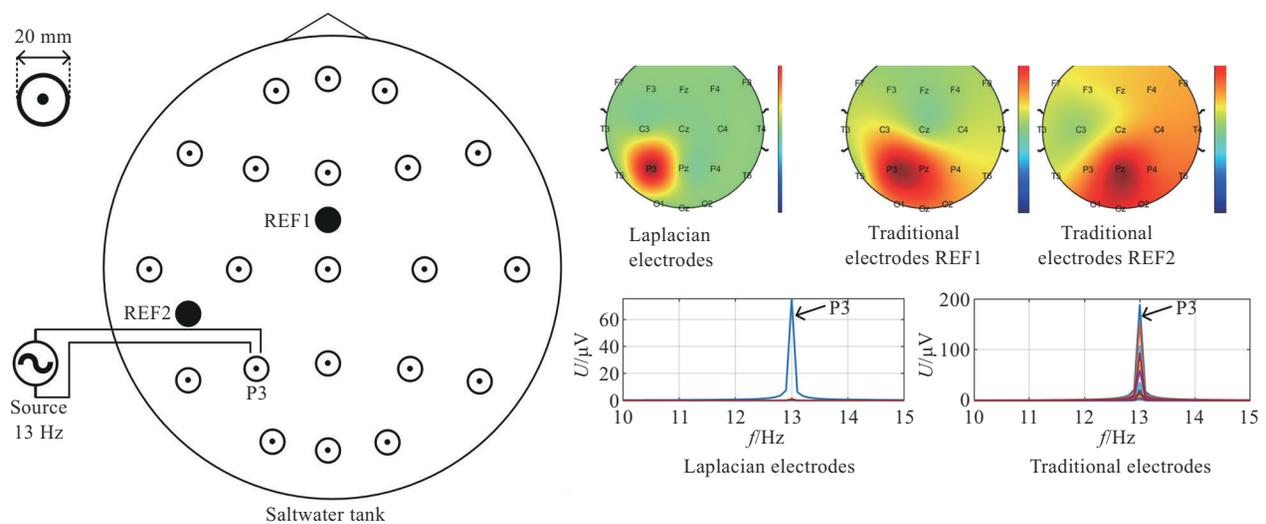
## EEG Study Based on Bipolar Concentric Ring Laplacian Electrodes\*

ZHENG Chun-Hou<sup>1,2)</sup>, HE Feng<sup>1,2)</sup>, SHI Tian-Ning<sup>1,2)</sup>, XUE Jia-Xing<sup>1,2)</sup>,  
YING Bing-Jie<sup>1,2)</sup>, XU Min-Peng<sup>1,2)</sup>\*\*

<sup>1)</sup>Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2)</sup>Haihe Laboratory of Brain-computer Interaction and Human-machine Integration, Tianjin 300392, China)

### Graphical abstract



**Abstract Objective** Electroencephalography (EEG) serves as a non-invasive electrophysiological monitoring technique employed to record brain electrical activity. Nonetheless, traditional EEG electrodes are susceptible to reference activation influences and exhibit limited spatial resolution. Laplacian electrodes, devoid of reference dependencies, possess the potential to amplify the spatial resolution of EEG recordings. Anchored in the utilization of bipolar concentric ring Laplacian electrodes, this study delves into the autonomous referencing attributes intrinsic to Laplacian electrodes. Furthermore, it conducts a comparison of spatial resolution disparities between Laplacian electrodes and their conventional counterparts. **Methods** A three-dimensional (3D) hemispherical tank experiment was conducted utilizing 21 Ag/AgCl bipolar concentric ring Laplacian electrodes to simulate whole-brain signal acquisitions. A sinusoidal signal with an amplitude of 400 mVpp@13 Hz was employed for detection. The positions of the ground electrodes in the Laplacian electrode array were varied, alongside the reference electrode positions in the case of the traditional electrodes. Subsequently, the spatial distribution of the 13 Hz source frequency component was extracted and subjected to comprehensive analysis.

\* This work was supported by grants from National Key Research and Development Program (2021YFF0602902) and The National Natural Science Foundation of China (62122059, 82330064).

\*\* Corresponding author.

Tel: 86-22-83612122, E-mail: minpeng.xu@tju.edu.cn

Received: July 10, 2024 Accepted: October 2, 2024

**Results** With varying ground electrode positions, the spatial distribution of the signal-to-noise ratio (SNR) among Laplacian electrodes maintains remarkable consistency, yielding a correlation coefficient of 0.94. In contrast, for traditional electrodes, the correlation coefficient for SNR distribution under distinct reference electrode positions barely reaches 0.07. While Laplacian electrodes exhibit independence from reference electrodes, traditional counterparts display a notable susceptibility to changes in reference electrode positions. Comparing amplitude's 3 dB attenuation area ratio, Laplacian electrodes showcase a mere 2.1% reduction, a significantly favorable outcome when juxtaposed with the 6.9% reduction evident in traditional electrodes. Similarly, the SNR's 3 dB attenuation area ratio for Laplacian electrodes is a mere 1.0%, contrasting with the considerably higher figure of 30.1% for traditional electrodes. **Conclusion** Laplacian electrodes remain impervious to reference electrode influence, displaying distinctive reference-independent attributes, in addition to boasting a heightened spatial resolution. These characteristics imbue them with the capacity to achieve heightened precision in localizing brain electrical activities, thus constituting a cornerstone for the integration of Laplacian electrodes into brain-computer interfaces (BCIs).

**Key words** EEG, Laplacian, bipolar concentric ring electrode, spatial resolution

**DOI:** 10.16476/j.pibb.2024.0308

**CSTR:** 32369.14.pibb.20240308