

# 利用相锁值算法的脑电相同步测谎研究

陈 冉<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 高军峰<sup>1,2,3</sup>, 顾凌云<sup>1</sup>, 黄文涛<sup>4</sup>, 晏丹丹<sup>1</sup>, 余雨蝶<sup>1</sup>, 丁志雄<sup>1</sup>

(1. 中南民族大学生物医学工程学院认知科学国家民委重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 电子科技大学生命科学与技术学院, 四川成都 610054;

3. 中南民族大学医学信息分析及肿瘤诊疗湖北省重点实验室, 湖北武汉 30074

4. 浙江海洋大学数理与信息学院, 浙江舟山 316022)

**摘 要:** 相锁值(Phase Locking Value, PLV)是由相同步的概念下提出一种描述不同信号相关性(同步性)的算法,在脑电信号领域,其有效性已经得到了验证. 本文针对当前测谎方法中脑电信号特征提取困难的问题,首次将相锁值的算法应用到脑电测谎领域中,研究谎言脑活动下不同脑区之间的相关性,通过相关性发现谎言的认知机制,并利用该相关性作为特征,使用支持向量机对说谎者和诚实者的两类信号进行模式识别,得到了 88.50% 的准确率,提出的方法验证了 PLV 在测谎应用中的有效性,为基于脑电信号的测谎提供了一种新的途径.

**关键词:** 测谎; 相锁值; 脑电; 支持向量机

**中图分类号:** R318

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1289-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.002

## Lie Detection Study Based on Phase Locking Value

CHEN Ran<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, GAO Jun-feng<sup>1,2,3</sup>, GU Ling-yun<sup>1</sup>, HUANG Wen-tao<sup>4</sup>,  
YAN Dan-dan<sup>1</sup>, YU Yu-die<sup>1</sup>, DING Zhi-xiong<sup>1</sup>

(1. School of Biomedical Engineering, South-Central University for Nationalities Key Laboratory of Cognitive Science,  
State Ethnic Affairs Commission, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

3. Hubei Key Laboratory of Medical Information Analysis and Tumor Diagnosis & Treatment, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;

4. School of Mathematics, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

**Abstract:** Phase Locking Value(PLV) is an algorithm describing different signals' correlation (synchronization), which is based on the concept of phase synchronization and its effectiveness has been verified in the field of EEG (Electro Encephalography). Aiming at the issue of extracting EEG signal's feature in the current lie detection method, this study applied PLV to the field of EEG of lie detection for the first time. We find lying cognitive mechanism with the correlation between different brain regions under lying cerebration, and use support vector machine (SVM) to execute pattern recognition between liars and honest' signal utilizing the correlation as a feature. The result of classification accuracy is 88.50%. Therefore, the proposed method verified that the application of PLV in lie detection is effective and it provided a new way to EEG lie detection signal.

**Key words:** lie detection; phase locking value (PLV); EEG; support vector machine

## 1 引言

说谎是人类社会普遍存在的社会及心理现象. 测谎的有效性,已在国内外长期而广泛的应用实践中得到证实. 国内的研究者于90年代末开始了测谎研究,1992年杨文俊<sup>[1]</sup>等人在研究中以受试者熟悉和不熟悉的图片作为刺激,并以P300的波幅和波形面积,实验最后得到的阳性率为95%. 廖四照、周亮<sup>[2,3]</sup>等对模拟盗窃者与熟悉现场者在测谎实验中事件相关电位做了比较研究. 最近,

高军峰等对模拟盗窃事件的认知加工过程做测谎研究,尝试将深度学习理论方法<sup>[4]</sup>引入测谎研究中,虽然分类准确率很高,但是由于特征的高度抽象所以失去了解释的意义. 另外,还有一些研究方法多基于单一时域、频域特征和机器学习方法<sup>[5~8]</sup>,独立的提取不同脑区的特征信息,忽略了不同脑区之间的相关性.

近几年来,随着相同步<sup>[9]</sup>的概念的提出,该方法已经演变出不同的算法,应用于许多不同领域,如飞机的

螺旋桨<sup>[10]</sup>, 船舶<sup>[11]</sup>, 电磁学<sup>[12]</sup>等. 不仅如此, 而且还有大量的研究都是致力于大脑认知领域方面. 2005 年, 张爱华等人将其应用在了识别左右手想象运动的研究中<sup>[13]</sup>. 2010 年胡巧莉将相同步的概念用于抑郁症脑电信号的研究<sup>[14]</sup>. 2014 年侯凤贞等作者将其运用在了网络连接度指标的脑梗死患者脑电信号的研究中<sup>[15]</sup>.

本文将相同步的概念与方法首次应用于脑电测谎研究中. 采用基于事件相关电位(ERP)中的 P300<sup>[16]</sup>成分进行脑电测谎研究. 大量研究表明, ERP 中的 P300 成分是一个比较敏锐和稳定的测谎生理指标<sup>[17]</sup>. Frawell 和 Donchin 在 1991 年进行了模拟犯罪测谎的研究<sup>[18]</sup>, 在论文中他们首次提出了三刺激模式的概念, 该协议是本文进行测谎实验的基础. 相锁值(Phase Locking Value, PLV)算法<sup>[19]</sup>是基于相同步概念提出的算法, 该算法用于描述不同信号间相位的相关性, 基于目前该方法在其他领域的研究基础及有效性, 本文利用该算法对 ERP 信号进行特征的提取, 最后利用支持向量机对特征样本进行模式识别, 进而验证 PLV 算法的有效性.

## 2 实验数据描述

本实验数据是由中南民族大学脑认知实验室于 2015 年设计的测谎实验采集所得, 实验设计利用 Frawell 和 Donchin 提出的三刺激实验模式<sup>[18]</sup>. 实验采用了该校中 20 名身体健康的本科生作为受试者, 随机分为无辜和说谎两组(表 1). 具体实验步骤可以参考《基于 P300 和极限学习机的脑电测谎研究》<sup>[20]</sup>一文中的详细介绍, 两类受试者分别对三种不同的刺激类型作出相对应的按键操作, 其中诚实组中的探针刺激是从无关刺激中随机挑选.

表 1 受试者情况

	诚实样本	说谎样本
男/女	7/3	5/5
年龄(均值±标准差)	21.20±1.3984	21.20±1.8738
右利手(是/否)	是	是
神经或精神疾病(有/否)	否	否

每名受试者的实验时间为 5 分钟, 共有 6 张不同的手链的图片随机出现, 每张图片出现的次数为 30 次, 单张图片出现的时间为 1.6s(具体见图 1 所示).

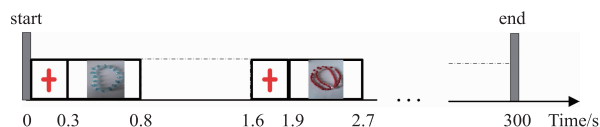


图 1 测谎实验示意图

## 3 方法研究

### 3.1 数据预处理

经 10-20 标准的 14 导的电极帽采集的数据, 采用

Neuroscan 公司的 Synamps 作为放大器, 通带频带为 0.3 ~ 30Hz, 采样频率 500Hz, 导联阻抗小于 3kΩ, 以 ±70μV 作为去除标准, 使用 Scan4.0 自带的工具滤除脑电波形的垂直和水平眼电伪差.

使用 EEGLAB 工具箱对连续的 EEG 波形进行分割, 将受试者在 P 刺激前 300ms 和后 1300ms 分割为一个探针刺激的响应数据集(epoched dataset), 该数据集保存为 12×800 的矩阵.

### 3.2 基于 PLV 算法的相同步分析

相同步分析方法作为在脑电信号相关性研究中的重要工具<sup>[21,22]</sup>, 能够量化描述这种相关性, 本文采用相同步方法中的一个具体应用——相锁值(Phase Locking Value, PLV)<sup>[14,23]</sup>, 仅考虑信号的相位关系.

设两个连续信号  $x(t)$  和  $y(t)$ , 利用 PLV 刻画两个信号的同步性:

$$PLV = |[\exp(i\{\varphi_x(t) - \varphi_y(t)\})]| \quad (1)$$

上式中,  $\varphi_x(t)$ ,  $\varphi_y(t)$  是  $x(t)$  和  $y(t)$  的瞬时相位. 相位通过希尔伯特(Hilbert)变换<sup>[24]</sup>计算所得. Hilbert 变换具体描述如下:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} p.v \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(a)}{t-a} da \quad (2)$$

其中, p.v 是指柯西主值.

最后, 瞬时相位可按如下计算:

$$\varphi_x(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \quad (3)$$

定义两个导联间 EEG 离散信号的相位同步性, 设两导联的同步采集的离散实值信号数据长度均为  $N(N=800)$ , 分别记作  $d_1(n)$  和  $d_2(n) \{n=1, 2, \dots, N\}$ . 利用上述的公式分别计算它们的瞬时相位, 分别记作  $\varphi_1(n)$  和  $\varphi_2(n) \{n=1, 2, \dots, N\}$ . 两导联信号的瞬时相位差,

$$\theta(n) = \varphi_1(n) - \varphi_2(n) \quad (4)$$

定义相同步相干指数  $R^{[25]}$  为

$$R = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} e^{i\theta(n)} \right| \quad (5)$$

由式(5)可知  $R$  的取值区间为  $[0, 1]$ , 当  $R=0$  时, 两信号之间无任何相位同步; 当  $R=1$  时, 两信号之间有稳定的相位差, 即生理表现为相位同步.

### 3.3 数据处理与分类

由于原始的脑电信号信噪比极低, 采用叠加平均技术可以较为有效地去除相对于 P300 信号的自发脑电等噪声, 所以对每个人的数据集进行总平均, 观察是否出现 P300, 以判断该受试者的数据可用性.

本文研究的目标之一是基于少次平均的测谎脑电数据的特征提取. 因此, 本文对每个探针刺激响应数据集进行少次平均(3 次), 在此基础上利用 PLV 算法对少次平均后的脑电信号进行计算. 因此, 对每个平均后

的数据集可以产生 66 个电极对 (12 个电极的数据, 则拥有 66 个电极对的 PLV 值) 上的 PLV 值, 然后对每个电极对上的这些特征值, 针对诚实和说谎两类受试者进行  $t$ -test 统计检验, 最后选择出具有显著差异的电极对, 将这些电极对上的 PLV 值作为最终的特征, 输入 SVM 分类器中进行分类。

#### 4 结果

图 2 显示了任取的一名说谎者和一名无辜者分别在 O1、Pz、C4 和 Fz 电极上的总平均的脑电波形, 说谎者出现了较为明显的 P300 波形, 无辜者则没有出现明显的 P300 波形。根据测谎原理, 要求 P 刺激下的说谎组被诱发 P300, 诚实组则不出现 P300。注意到本文的特征提取是基于 P300 波形, 以上实验结果证实本实验采集的脑电数据符合测谎研究的基础, 并与预期的结果相一致。

对图 2 中选择的该名诚实者和说谎者的数据集的每个导联分别进行总平均, 然后运用 PLV 算法, 结果如图 3 所示。

从图 3(a) 和 (b) 可看出该名说谎者的 PLV 在很多电极对上 (如 Pz-Cz, P4-Pz), 比该名诚实者的 PLV 高。图 3(c) 表示说谎者的 PLV 与诚实者的 PLV 的差值, 这些差值进一步说明了对应的电极对上, 该名说谎者的 PLV 大于诚实组的 PLV, 特别是 P4-Pz、P4-C4、P3-Pz。从电极对的分布观察, 差值较大的电极对大多分布在前额区和中心区, 说明前额区和中心区有着更紧密的连接。

进一步地, 测谎研究的主要目的是能够通过特征提取区分出诚实者和说谎者。通过对 66 个电极对的 PLV 值进行  $t$ -test 统计检验 (由于多重检验, 使用了

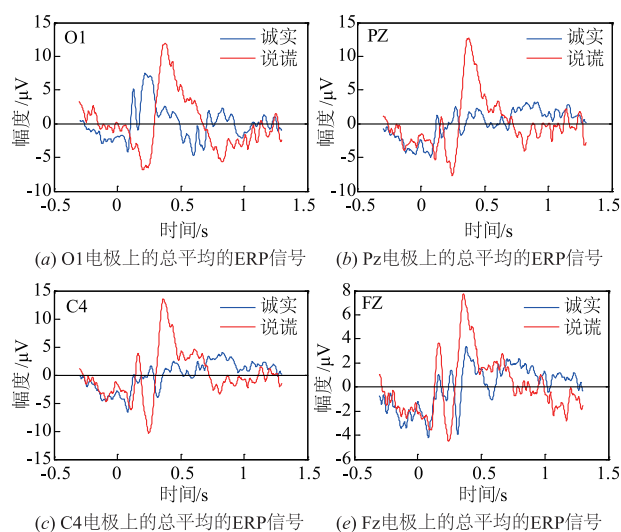
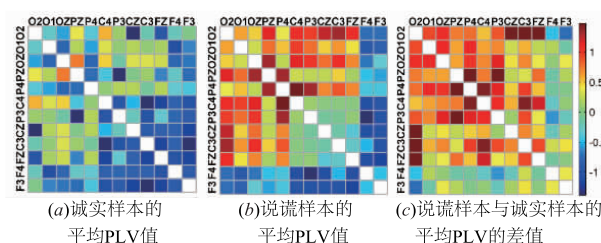


图2 一名诚实者和一名说谎者在O1、Pz、C4和Fz电极上的总平均的ERP信号



## 5 讨论

在本文的研究中,通过三刺激协议下设计的测谎实验得到样本数据,数据被适当的预处理后,经相同步的 PLV 算法计算,并对计算结果做统计分析挑选出显著差异的电极对上的 PLV 值作为分类特征,最后利用 SVM 分类器进行模式识别。

本文将相同步的方法首次应用在测谎领域中,旨在调查不同脑区之间的相位同步性,利用两类受试者的同步性性质差异区分不同类别受试者,并探索人类在说谎时的认知机制。

实验结果显示人们在说谎时的前额区、中心区和枕区之间的 PLV 值,相对诚实者,有比较明显的提高,说明这 3 个区域之间拥有更高的相关性(同步性),与现有的一些研究结果<sup>[26,27]</sup>相符合。测谎的一个重要重要目的是同时高效的区分两类人员,进一步地,基于 PLV 这一同步性的特征,本文尝试将谎言过程与诚实状态进行区分。SVM 分类器的较高分类准确率也表明 PLV 算法在测谎的实际应用中的有效性。

同时需要指出的是,本文的另一个目的是研究基于少次刺激下的测谎技术,在实际测试过程中,本文提出的测谎方案可以仅仅对被试人员使用大约 3 次刺激。相对于当前的 BCD 和 BAD 等方法,可使得测谎过程更加简便,大大降低了被测人员的疲劳程度,也可以有效地降低反测谎行为的发生,也因此可以提高测谎的准确率。

由于 PLV 算法本身的局限性,对容积导体效应较为敏感。因此将来需要通过逆源等方法去除容积导体效应,改进 PLV 算法,更精确地揭示说谎状态下各脑区的同步性规律,进一步揭示说谎过程的认知加工处理机制。

## 参考文献

- [1] 杨文俊,黄煌镜. 利用视觉事件相关电位了解思维内容: 测谎[J]. 中国心理卫生杂志,1992,6(5):204-206.
- [2] 周亮,杨文俊. 模拟盗窃者与熟悉现场者在测谎实验中事件相关电位的比较研究[J]. 中国临床心理学杂志,2000,8(2):86-88.  
ZHOU Liang, YANG Wen-jun, LIAO Shi-zhao et al. Compared study of event-related potentials in lie detection between subjects for simulated crime condition and subjects for visiting condition[J]. Chinese Journal of Clinical Psychology, 2000, 8(2): 86-88. (in Chinese)
- [3] 周亮,杨文俊,廖四照,等. P300 用于模拟盗窃测谎的实验性研究[J]. 中国临床心理学杂志,1999,7(1):31-33.
- [4] 顾凌云,吕文志,杨勇,等. 基于 PCANet 和 SVM 的谎言测试研究[J]. 电子学报,2016,44(8):1969-1973.  
GU Ling-yun, LV Wen-zhi, YANG Yong, GAO Jun-feng, GUAN Jin-an, ZHOU Dao. detection study based on pcanet and support vector machine[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1969-1973. (in Chinese)
- [5] GAO J, LU L, YANG Y, et al. A novel concealed information test method based on independent component analysis and support vector machine[J]. Clinical EEG and Neuroscience, 2012, 43(1): 54-63.
- [6] GAO J, TIAN H, YANG Y, et al. A novel algorithm to enhance P300 in single trials: Application to lie detection using F-Score and SVM [J]. PloS one, 2014, 9(11): e109700.
- [7] GAO J, WANG Z, YANG Y, et al. A novel approach for lie detection based on F-score and extreme learning machine[J]. PloS One, 2013, 8(6): e64704.
- [8] GAO J, YAN X, SUN J, et al. Denoised P300 and machine learning-based concealed information test method [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2011, 104(3): 410-417.
- [9] 卢静. 广义同步与相同步若干问题的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.  
LU Jing. Research on Several Problems of Generalized Synchronization and Phase Synchronization [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010. (in Chinese)
- [10] 王洋洋. 基于相同步控制的多螺旋桨飞机主动降噪研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
WANG Yang-yang. Active Noise Control Study in Multi-Propeller Driven Plane Based on Propeller Synchrophasing Control [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] 张敬南. 船舶电力推进六相同步电动机控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.  
ZHANG Jing-nan. Six-phase Synchronism Motor Control System for the Ship Electric Propulsion [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [12] 傅乐. 多相同步发电机电磁场分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2012.
- [13] 张爱华, 赵予晗. 脑电信号相同步分析在识别左右手想象运动中的作用[J]. 中国临床康复, 2005, 9(48): 4-6.  
ZHANG Ai-hua, ZHAO Yu-han. Effect of phase synchronization analysis of electroencephalogram in the recognition of hands imagine motion [J]. Chinese Journal of Clinical Rehabilitation, 2005, 9(48): 4-6. (in Chinese)
- [14] 胡巧莉. 基于相位同步分析方法的抑郁症脑电信号的研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2010, 34(4): 246-249.  
HU Qiao-li. Quantitative analysis of electroencephalograph in depression based on phase synchronization [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2010, 34(4): 246-249. (in Chinese)

- [15] 侯凤贞,戴加飞,刘新峰,等. 基于网络连接度指标的脑梗死患者脑电信号相同步分析[J]. 物理学报,2014,63(4):040501-040506.
- [16] Rosenfeld J P, Biroshak J R, Furedy J J. P300-based detection of concealed autobiographical versus incidentally acquired information in target and non-target paradigms [J]. International Journal of Psychophysiology, 2006, 60(3):251-259.
- [17] Abootalebi V, Moradi M H, Khalilzadeh M A. A new approach for EEG feature extraction in P300-based lie detection[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2009, 94(1):48-57.
- [18] Farwell L A, Donchin E. The truth will out: Interrogative polygraphy ("Lie detection") with Event-Related brain potentials[J]. Psychophysiology, 1991, 28(5):531-547.
- [19] Basler M, Krech W, Platov K Y. Theory of phase-locking in generalized hybrid Josephson-junction arrays[J]. Physical Review B, 1996, 55(2):1114-1122.
- [20] 高军峰,张文佳,杨勇,等. 基于 P300 和极限学习机的脑电测谎研究[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(2):301-305.  
GAO Jun-feng, ZHANG Wen-jia, YANG Yong, HU Jia-jia, TAO Chun-yi, GUAN Jin-an. Lie detection study based on P300 and extreme learning machine[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(2):301-305. (in Chinese)
- [21] Dauwels J, Vialatte F, Musha T, et al. A comparative study of synchrony measures for the early diagnosis of Alzheimer's disease based on EEG [J]. NeuroImage, 2010, 49(1):668-693.
- [22] SUN J, HONG X, TONG S. Phase synchronization analysis of EEG signals: an evaluation based on surrogate tests [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2012, 59(8):2254-2263.
- [23] 胡剑锋,包学才,穆振东. 基于相位同步的脑电信号分类算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(9):138-140.  
HU Jian-feng, BAO Xue-cai, MU Zhen-dong. Classification of motor imagery EEG based on phase synchronization[J]. Microelectronics & Computer, 2008, 25(9):138-140. (in Chinese)
- [24] 郑近德,程军圣,曾鸣. 基于改进的局部特征尺度分解和归一化正交的时频分析方法[J]. 电子学报, 2014, 43(7):1418-1424.  
ZHENG Jin-de, CHENG Jun-sheng, ZENG Ming. A new time-frequency analysis method based on improved local characteristic-scale decomposition and normalized quadrature[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 43(7):1418-1424. (in Chinese)
- [25] Quiroga Rq, Kraskov A, Kreuz T, Grassberger P. On the

performance of different synchronization measures in real data: a case study on EEG signals[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2002, 65(1):041903

- [26] 常文文,王宏,化成诚. 基于听觉 ERP 功能脑网络特征和 SVM 的测谎方法研究[J]. 电子学报, 2016, 44(7):1757-1762.

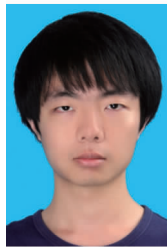
CHANG Wen-wen, WANG Hong, HUA Cheng-cheng. Study on lie detection method based on auditory ERP functional brain network characteristic and SVM[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(7):1757-1762. (in Chinese)

- [27] GAO J, YANG Y, HUANG W, et al. Exploring time-and frequency-dependent functional connectivity and brain networks during deception with single-trial event-related potentials[J]. Scientific Reports, 2016, 6:37065.

#### 作者简介



陈 冉 男, 1993 年, 生于河南省永城市, 2016 年毕业于新乡医学院. 现今中南民族大学国家民委认知科学重点实验室研究生, 研究方向为脑电信号处理分析及脑认知及功能研究分析.



王 鹏 男, 1996 年 1 月生, 湖北武汉人. 现为中南民族大学生物医学工程学院本科生, 主要研究方向为脑电信号处理和深度学习.



高军峰(通讯作者) 男, 1973 年 10 月出生, 湖北武汉人. 副教授, 硕士生导师, 2005 年和 2011 年分别在武汉理工大学和西安交通大学获得工学硕士和工学博士学位. 现为中南民族大学教师, 主要从事生物医学信号处理、神经网络和机器学习等方面的研究工作.

E-mail: junfengmst@163.com



黄文涛 男, 1977 年生于湖北广水, 副教授, 2003 年和 2007 年分别在华中师范大学和中国科学院获得理学硕士和理学博士学位. 现为浙江海洋大学教师, 主要从事生物医学信号处理、脑功能网络和数据挖掘等方面的研究工作.

E-mail: ccnuhwt@aliyun.com