



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105962932 B

(45)授权公告日 2018.09.11

(21)申请号 201610247995.0

(22)申请日 2016.04.20

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105962932 A

(43)申请公布日 2016.09.28

(73)专利权人 西安电子科技大学
地址 710071 陕西省西安市太白南路2号
专利权人 西安中电科西电科大雷达技术协
同创新研究院有限公司

(72)发明人 谢雪梅 柳林 翁昕 焦阳
石光明

(74)专利代理机构 陕西电子工业专利中心
61205
代理人 王品华 朱红星

(51)Int.Cl.

A61B 5/0476(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 102119857 A,2011.07.13,
CN 102172326 A,2011.09.07,
CN 102688032 A,2012.09.26,
CN 102133100 A,2011.07.27,
WO 2012/153965 A2,2012.11.15,
US 2014/0018693 A1,2014.01.16,

审查员 孙晓彤

权利要求书1页 说明书3页 附图2页

(54)发明名称

基于子空间正交向量的峰电位检测方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于子空间正交向量的峰电位检测方法,主要用于解决现有同类技术计算复杂度高,且对高噪脑电信号检测准确率过低的问题。其实现步骤为:1)根据输入信号构建冗余字典D;2)将字典D分解到l个子空间中;3)将输入信号投影到各子空间得到l个系数矩阵;4)设定阈值T,取出各系数矩阵中大于T的值构成重构系数向量;5)计算D的伪逆与系数向量的乘积得到检测结果。本发明计算复杂度低,检测准确率高,实验表明,本发明对信噪比为+30dB至-11.6dB的低噪脑电信号峰电位检测准确率为100%,对信噪比为-11.6dB至-16.2的高噪脑电信号峰电位的检测准确率为80%以上,可用于对胞外单电极峰电位的分类。



1. 一种基于子空间正交向量的峰电位检测方法,包括:

(1) 根据输入信号 $x \in \mathbb{R}^{1 \times m}$ 的标准峰波,构造不完备冗余字典 $D \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times m}$,其中 m 表示输入脑电信号的长度, l 表示标准峰波的长度;

(2) 通过步骤(1)中构建的不完备冗余字典 D 构建子空间 $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_l$,其中 $V_j \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 表示第 j 个子空间, $1 \leq j \leq l$,其中 $n = \left\lfloor \frac{m}{l} \right\rfloor$;

(3) 将输入脑电信号分别投影到各个子空间中,得到 l 个系数向量: $C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_l$, $C_t \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 表示第 t 个系数向量, $1 \leq t \leq l$;

(4) 设定阈值 T 为 1.25-1.45,保留 C_t 中大于阈值 T 的值并将小于 T 的值全部置 0,将 $C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_l$ 依次拼接得到重构系数向量 $L \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times 1}$;

(5) 将字典 D 的伪逆与重构系数向量 L 相乘得到重构信号 \hat{x} ,此时 \hat{x} 中非零坐标就是检测到的输入信号中的峰波,峰波中的最大值即为峰电位。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其中步骤(1)中根据输入信号 x 的标准峰波构造字典 D ,按如下步骤进行:

(1a) 设矩阵 $A(a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_m)^T \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times m}$ 中所有元素为 0, $1 \leq s \leq m$,将 A 中的第 s 个行向量 a_s 的第 i 个到 $i+1$ 个元素置为标准峰波,对 a_s 进行归一化处理,使其模值 $\|a_s\| = 1$;

(1b) 令 $a_s = d_i$,其中 d_i 表示字典 D 中的第 i 个原子, $1 \leq i \leq m$,得到字典 $D(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_m)^T$, d_i 的模值为 $\|d_i\| = 1$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其中步骤(2)中构建子空间 $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_l$,按如下步骤进行:

(2a) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第一子空间 V_1 的原子,其中标准峰波起始于原子 v_{11} 的第 1 个元素、原子 v_{12} 的第 $1+1$ 个元素、原子 v_{1k} 的第 $k+1$ 个元素和 v_{1n} 的第 $n+1$ 个元素,得到第 1 个子空间 $V_1(v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1k}, \dots, v_{1n})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$,其中 $1 \leq k \leq n$, $n = \left\lfloor \frac{m}{l} \right\rfloor$;

(2b) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第二子空间 V_2 的原子,其中标准峰波起始于原子 v_{21} 的第 2 个元素、原子 v_{22} 的第 $2+1$ 个元素、原子 v_{2k} 的第 $2+(k-1) \times 1$ 个元素和 v_{2n} 的第 $2+(n-1) \times 1$ 个元素,得到第 2 个子空间 $V_2(v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2k}, \dots, v_{2n})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$;

(2c) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第 j 个子空间 V_j 的原子, $1 \leq j \leq l$,标准峰波起始于原子 v_{j1} 的第 j 个元素、原子 v_{j2} 的第 $j+1$ 个元素、原子 v_{jk} 的第 $j+(k-1) \times 1$ 个元素和 v_{jn} 的第 $j+(n-1) \times 1$ 个元素,得到第 j 个子空间 $V_j(v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jk}, \dots, v_{jn})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$;

(2d) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第 l 个子空间 V_l 的原子,标准峰波起始于原子 v_{l1} 的第 1 个元素、原子 v_{l2} 的第 2×1 个元素、原子 v_{lk} 的第 $k \times 1$ 个元素和 v_{ln} 的第 $n \times 1$ 个元素,得到第 l 个子空间 $V_l(v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{lk}, \dots, v_{ln})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 。

基于子空间正交向量的峰电位检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于信号处理技术领域,特别涉及对脑电信号的峰电位的检测,可用于对胞外单电极峰电位的分类。

背景技术

[0002] 大脑是生命活动最复杂和最重要的器官之一,是神经系统最重要的组成部分。神经元是大脑信号加工传递和信息处理的基本单元,大脑中传递的信息都通过神经元产生的电信号表现出来,因而神经电信号是研究大脑信息传递的重要方面,其中包括单个神经元细胞外动作电位,又称作峰电位。而胞外单电极记录作为一种非常成熟的神经信号采集的传统手段,在目前的神经电生理学领域仍然被广泛使用。由于胞外单电极记录所获得的信号含有比较高的背景噪音,而且依赖于不同的电极尖端阻抗和形状,单根电极可能记录到多个神经元的信号,因此从单根电极电压信号提取和分类动作电位一直是研究点。通过研究峰电位,知晓峰电位序列,可以了解神经元编码机制和神经元之间的相互连接关系,能够为大脑神经机制的研究提供重要信息。大脑神经元胞外单细胞峰电位的检测与分类,是许多脑功能研究的前提。但由于高强度的背景噪声的存在,以及同一脑区内的神经元发放的峰电位在形态和尺度上很相似,通常很难将单个神经元发放的峰电位有效地提取出来。然而,使用神经元峰电位检测与分类算法,可以大大地提高对于单个神经元发放的峰电位的提取效果,从而更好的满足神经生理学实验的要求。

[0003] 目前为止,从峰电信号中检测并提取出峰电位的各种算法中,应用最广泛的仍是幅度阈值检测法及其改进算法。该算法在对峰电位检测之前,首先对其进行降噪,可以不同程度的降低信号中噪声对检测效果的影响。阈值法是设定一个阈值,当峰电信号超出此阈值时,认为是有峰电位出现。关于阈值的设定,起初通常根据实验经验设置定阈值,改进的阈值设定方法通常根据采集信号的标准差或者灰度值等。其中阈值的选定对检测结果也有很大的影响。阈值设置过大,可能无法将幅值较小的峰电位检测出,形成漏检;阈值设置过小,可能将幅值较大的噪声当做峰电位检出,形成误检。

[0004] 通过输入脑电信号的标准峰波构建冗余字典的检测方法目前也常常被采用,由上海交通大学提出的专利申请“基于稀疏重表示的脑电信号检测方法”,专利申请号为CN201110051448.2,公开了一种基于稀疏重表示的用于检测驾驶员是否疲劳驾驶的脑电信号检测方法。该方法主要采用小波变换来检测与驾驶员的疲劳驾驶状态相关的脑电信号的频率特征信息,构建一个模板矩阵,对于任意的外来脑电信号序列,通过求解模板矩阵用来构建外来序列的稀疏解来实现对驾驶员脑电信号的检测。然而该方法需要对输入脑电信号进行较复杂的预处理工作,且对脑电信号做小波变换后,利用压缩感知理论,转化为求解一范数凸优化问题,该方法计算复杂度高,检测效率低下。

[0005] 综上所述,仅仅根据输入脑电信号的几何特征设定相应阈值的阈值检测法虽然实现简单且易于操作,但该算法不具有良好的鲁棒性,容易形成漏检或者误检;而采用直接将输入信号投影到冗余的即稀疏重表示的字典中,然后转化为优化问题的求解方式虽然在—

一定程度上提高了检测成功率,但是计算复杂度太高,导致检测效率低下。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于针对上述已有技术中的不足,提出一种基于子空间正交向量的脑电信号峰电位检测方法,以降低计算复杂度,提高检测效率。

[0007] 本发明的技术方案是:根据输入脑电信号的特征构建一个不完备的冗余字典,再通过字典构建子空间,其中子空间中的向量是标准正交的,然后将输入脑电信号投影到各个子空间中,设定阈值,将保留的系数用反变换的方法重构信号,完成对峰电位的检测。其实现步骤包括如下:

[0008] (1) 根据输入信号 $x \in \mathbb{R}^{1 \times m}$ 的标准峰波,构造不完备冗余字典 $D \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times m}$,其中 m 表示输入脑电信号的长度, l 表示标准峰波的长度;

[0009] (2) 通过步骤(1)中构建的不完备冗余字典 D 填充子空间 $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_l$,其中 $V_j \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 表示第 j 个子空间, $1 \leq j \leq l$,其中 $n = \left\lfloor \frac{m}{l} \right\rfloor$ 。

[0010] (3) 将输入脑电信号分别投影到各个子空间中,得到 l 个系数向量: $C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_l, C_t \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 表示第 t 个系数向量, $1 \leq t \leq l$;

[0011] (4) 设定阈值 T 为 $1.25-1.45$,保留 C_t 中大于阈值 T 的值并将小于 T 的值全部置 0 ,将 $C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_l$ 依次拼接得到重构系数向量 $L \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times 1}$ 。

[0012] (5) 将字典 D 的伪逆与重构系数向量 L 相乘得到重构信号 \hat{x} ,此时 \hat{x} 中非零坐标就是检测到的输入信号中的峰波,峰波中的最大值即为峰电位。

[0013] 本发明与现有技术相比具有以下优点:

[0014] 1. 计算复杂度低

[0015] 本发明将脑电信号投影到子空间中,且子空间中的原子是相互正交的,通过设定阈值再反变换得到检测结果,极大的降低了计算复杂度。

[0016] 2. 鲁棒性好

[0017] 实验结果表明,本发明对噪声方差为 $0.05-0.55$,信噪比为 $+30\text{dB}-11.6\text{dB}$ 的低噪脑电信号峰电位检测准确率可达 100% ,同时对噪声方差为 $0.55-0.7$,信噪比为 $-11.6\text{dB}-16.2$ 的高噪脑电信号峰电位的检测准确率达到 80% 以上,表现出良好的鲁棒性。

附图说明

[0018] 图1为本发明的实现总流程图;

[0019] 图2为本发明中冗余字典构建示意图;

[0020] 图3为本发明中子空间构建示意图。

具体实施方式

[0021] 下面结合附图和实例对本发明进行详细说明。

[0022] 参照图1,本发明的实现步骤如下:

[0023] 步骤1,根据输入信号构建冗余字典 D 。

[0024] 参考图2,本步骤的具体实现如下:

[0025] (1a) 设矩阵 $A(a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_m)^T \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times m}$ 中所有元素为 0, $1 \leq s \leq m$, 将 A 中的第 s 个行向量 a_s 的第 i 个到 $i+1$ 个元素置为标准峰波, 对 a_s 进行归一化处理, 使其模值 $\|a_s\| = 1$;

[0026] (1b) 令 $a_s = d_i$, 其中 d_i 表示字典 D 中的第 i 个原子, $1 \leq i \leq m$, 得到字典 $D(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_m)^T$, d_i 的模值为 $\|d_i\| = 1$, 字典 D 中的第 i 行 d_i 是由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成, 标准峰波起始于 d_i 的第 i 个元素。

[0027] 步骤 2, 构建子空间 $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_l$ 。

[0028] 参考图 3, 本步骤的具体实现如下:

[0029] (2a) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第一子空间 V_1 的原子, 其中标准峰波起始于原子 v_{11} 的第 1 个元素、原子 v_{12} 的第 1+1 个元素、原子 v_{1k} 的第 $k+1$ 个元素和 v_{1n} 的第 $n+1$ 个元素, 得

到第 1 个子空间 $V_1(v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1k}, \dots, v_{1n})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$, 其中 $1 \leq k \leq n$, $n = \lfloor \frac{m}{l} \rfloor$;

[0030] (2b) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第二子空间 V_2 的原子, 其中标准峰波起始于原子 v_{21} 的第 2 个元素、原子 v_{22} 的第 2+1 个元素、原子 v_{2k} 的第 2+ $(k-1) \times 1$ 个元素和 v_{2n} 的第 2+ $(n-1) \times 1$ 个元素, 得到第 2 个子空间 $V_2(v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2k}, \dots, v_{2n})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$;

[0031] (2c) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第 j 个子空间 V_j 的原子, $1 \leq j \leq l$, 标准峰波起始于原子 v_{j1} 的第 j 个元素、原子 v_{j2} 的第 $j+1$ 个元素、原子 v_{jk} 的第 $j+(k-1) \times 1$ 个元素和 v_{jn} 的第 $j+(n-1) \times 1$ 个元素, 得到第 j 个子空间 $V_j(v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jk}, \dots, v_{jn})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$;

[0032] (2d) 由标准峰波与 $m-1$ 个 0 元素构成第 l 个子空间 V_l 的原子, 标准峰波起始于原子 v_{l1} 的第 1 个元素、原子 v_{l2} 的第 2×1 个元素、原子 v_{lk} 的第 $k \times 1$ 个元素和 v_{ln} 的第 $n \times 1$ 个元素, 得到第 l 个子空间 $V_l(v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{lk}, \dots, v_{ln})^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 。

[0033] 步骤 3, 将输入脑电信号投影到子空间。

[0034] 将输入脑电信号分别投影到各个子空间中, 得到 l 个系数向量: $C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_l$, 其中 $C_t \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 表示第 t 个系数向量, $1 \leq t \leq l$ 。

[0035] 步骤 4, 设定阈值, 得到重构系数向量。

[0036] 4a) 设定阈值 T 为 1.25-1.45, 将 C_t 中的各元素依次与阈值 T 进行比较, 如果 C_t 中元素大于 T , 则保留该元素, 如果 C_t 元素小于或等于 T , 则将该元素置为 0;

[0037] 4b) 将经过 3a) 步骤处理后的 $C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_l$ 按列依次拼接, 得到重构系数向量 $L \in \mathbb{R}^{(m-1+1) \times 1}$ 。

[0038] 步骤 5, 计算重构信号, 完成检测。

[0039] 将字典 D 的伪逆与重构系数向量 L 相乘得到重构信号 \hat{x} , 此时 \hat{x} 中非零坐标就是检测到的输入信号中的峰波, 峰波中的最大值即为峰电位。

[0040] 以上描述仅是本发明的一个具体实例, 并不构成对本发明的任何限制。显然对于本领域的专业人员来说, 在了解了本发明内容和原理后, 都可能在不背离本发明原理、结构的情况下, 进行形式和细节上的各种修正和改变, 但是这些基于本发明思想的修正和改变仍在本发明的权利要求保护范围之内。

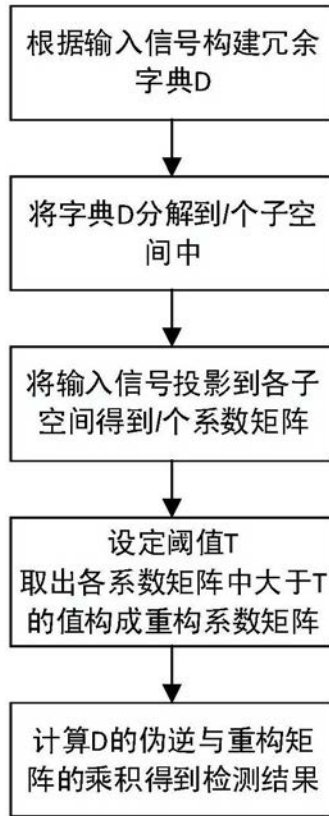


图1

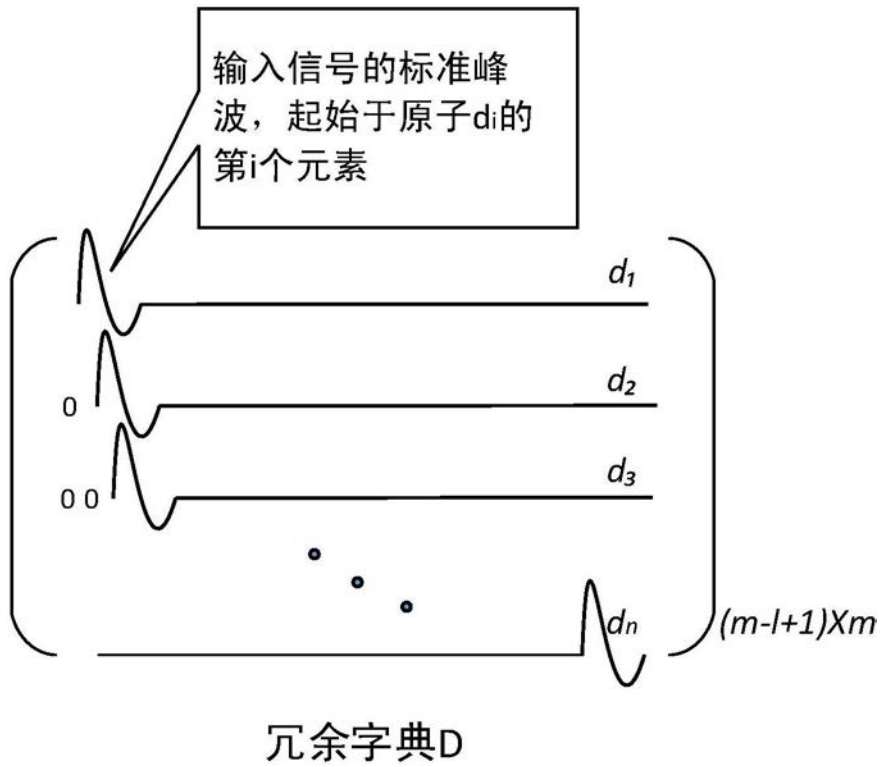


图2

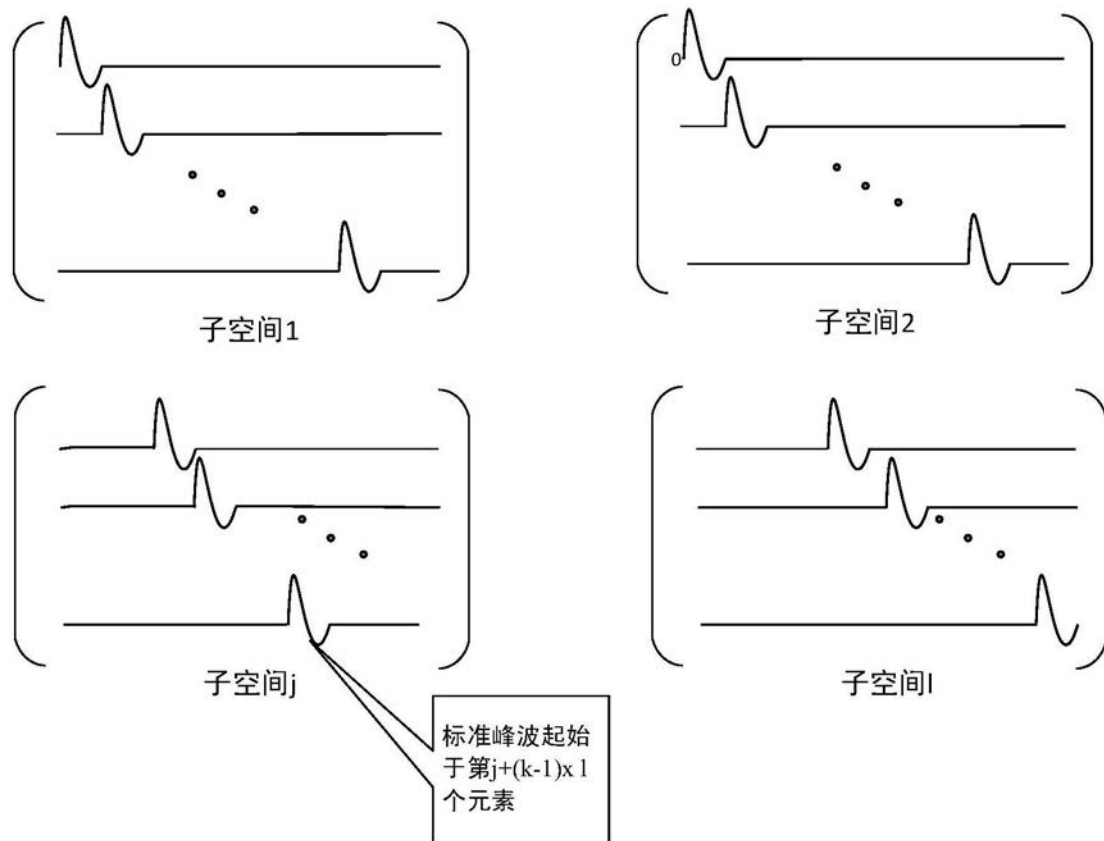


图3

专利名称(译)	基于子空间正交向量的峰电位检测方法		
公开(公告)号	CN105962932B	公开(公告)日	2018-09-11
申请号	CN201610247995.0	申请日	2016-04-20
[标]申请(专利权)人(译)	西安电子科技大学 西安中电科西电科大雷达技术协同创新研究院有限公司		
申请(专利权)人(译)	西安电子科技大学 西安中电科西电科大雷达技术协同创新研究院有限公司		
当前申请(专利权)人(译)	西安电子科技大学 西安中电科西电科大雷达技术协同创新研究院有限公司		
[标]发明人	谢雪梅 柳林 翁昕 焦阳 石光明		
发明人	谢雪梅 柳林 翁昕 焦阳 石光明		
IPC分类号	A61B5/0476 A61B5/00		
CPC分类号	A61B5/04012 A61B5/0476 A61B5/7235		
代理人(译)	朱红星		
审查员(译)	孙晓彤		
其他公开文献	CN105962932A		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明公开了一种基于子空间正交向量的峰电位检测方法，主要用于解决现有同类技术计算复杂度高，且对高噪脑电信号检测准确率过低的问题。其实现步骤为：1)根据输入信号构建冗余字典D；2)将字典D分解到l个子空间中；3)将输入信号投影到各子空间得到l个系数矩阵；4)设定阈值T，取出各系数矩阵中大于T的值构成重构系数向量；5)计算D的伪逆与系数向量的乘积得到检测结果。本发明计算复杂度低，检测准确率高，实验表明，本发明对信噪比为+30dB至-11.6dB的低噪脑电信号峰电位检测准确率为100%，对信噪比为-11.6dB至-16.2的高噪脑电信号峰电位的检测准确率为80%以上，可用于对胞外单电极峰电位的分类。

