



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110327043 A

(43)申请公布日 2019.10.15

(21)申请号 201910715578.8

(22)申请日 2019.08.05

(71)申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72)发明人 李海峰 丰上 徐忠亮 马琳
薄洪健 徐聪 李洪伟 陈婧
孙聪珊 王子豪 房春英 丁施航

(74)专利代理机构 成都方圆聿联专利代理事务
所(普通合伙) 51241

代理人 李鹏

(51)Int.Cl.

A61B 5/0476(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

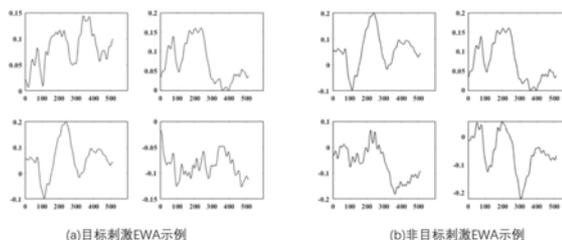
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种基于稀疏建模的事件相关电位波形图
谱求解方法

(57)摘要

本发明给出了一种基于稀疏建模的事件相
关电位波形图谱求解方法。包括:数据预处理,去
燥、分帧和能量归一化;稀疏字典学习,字典初始
化,稀疏建模,字典学习和收敛性判断;波形字典
聚类;波形字典性质判定。本发明的优点在于:针
对数据中固有的事件相关电位活动模式、而非依
据认知实验赋予的标签获取ERP波形,不仅可以
处理实验环境下的EEG数据,也可以处理没有标
签的真实环境下获取的EEG数据,具有更好的普
适性和实用性。此外,使用了面向单次、单帧数
据处理的信号处理方法,能够有效提升EEG分析
处理的灵活性,在脑机接口领域也具有显著的应
用前景。



1. 一种基于稀疏建模的事件相关电位波形图谱求解方法,其特征在于,步骤如下:

步骤1:事件相关电位波形图谱的特征在于以下四点(1):基于含有ERP成分的EEG波形数据,使用任意基于稀疏分解的字典学习方法获取包含EWA和自发成分字典的EEG成分时域波形字典;(2)对波形字典进行无监督聚类,聚类方法可以任意选择;(3)确定聚类后的每类EEG成分时域波形的认知意义;认知意义可以直接通过对时域波形进行分析获取,也可以参考与该类别成分时域波形关联度较高的认知实验数据标签;可以通过一类时域波形的频率分布、最大强度和波峰位置识别认知相关成分与非认知相关(自发脑电)成分;(4)将每类认知相关脑电成分波形求平均值,即可获得具有认知意义的ERP成分波形图谱,用于后续的分析或识别;

步骤2:数据预处理,包含以下子步骤:

步骤201去噪:不同来源的EEG信号一般含有不同强度的白噪声,在进行分析和处理之前需要将噪声去除,任何可行的噪声去除方法如卡尔曼滤波、小波去噪、稀疏去噪等方法均可以使用;

步骤202分帧:将EEG样本数据分解为以认知刺激时间开始,认知活动全过程为帧长的单通道数据帧;

步骤203能量归一化:为了保证帧与帧间的能量差异不会使相关图谱条目的波形失真,每帧数据都必须进行能量归一化处理,即系数向量除以所有采样点平方和的平方根,能量差异在重构过程中可以通过系数补偿加以恢复;

步骤3:稀疏字典学习,包括以下子步骤:

步骤301字典初始化:一般来说,可以将训练数据中相关度最低的若干个样本作为初始波形字典原子;

步骤302稀疏建模:对所有训练样本进行稀疏建模,获取当前字典下所有样本较优的稀疏模型;

步骤303字典学习:使用上一步骤得到的稀疏模型修正现有波形字典;

步骤304收敛性判断:如果当前误差和稀疏程度已满足事先设定的收敛条件,则进入下一步骤,否则返回步骤202;

步骤4波形字典聚类,包括以下子步骤:

步骤401 SOM规模设定:SOM的自组织节点数量需要显著多于ERP成分波形类别以及EEG自发成分类别的总量;

步骤402 SOM自组织聚类:使用SOM算法,获取波形字典原子的聚类结果;

步骤5波形字典性质判定,包括以下子步骤:

步骤501基于平稳性度量的ERP波形评价:首先对每一类EEG成分波形原子取均值,而后使用基于差分平稳性度量的方法评估该均值波形的有序程度,从而发现潜在的未知认知活动所引发的ERP波形;我们依以下指标判定残差的平稳性Smoothness:

$$\text{Smoothness}(e'(t)) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |e'(i) - e'(i+1)|}{\max(e') - \min(e')}$$

其中 $e(t)$ ($t=1 \cdots N$)为残差, t 为时间点,为残差中值滤波结果, $\max(e'(t))$ 为残差中值滤波结果的最大值, $\min(e'(t))$ 为中值滤波结果的最小值, i 是求和运算的索引;将所有认知相关成分波形类别取均值,并汇总,即得到一个可靠的EWA条目;

步骤502认知事件相关的EWA图谱条目认知意义解析:如果训练数据中有认知事件类别相关的信息,则可以通过认知事件类别与EWA图谱条目类别的相关性解析EWA条目的认知意义;

步骤503基于新数据的EWA扩展:使用训练获取的EWA和自发成分波形字典对新的训练数据进行稀疏建模,若误差超过一定水准则首先对残差进行30HZ低通滤波,而后使用步骤401中的平稳性指标度量其平稳性,若平稳性指标低于7则认为存在新的ERP成分波形,将残差作为一个备选EWA图谱条目纳入EWA中;在出现多个新样本数据与该备选EWA条目对应后,则认为该认知相关电位波形确实存在,将其作为一个正式条目纳入EWA中。

2. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于:步骤502具体的,使用标签向量与条目类别向量的皮尔逊相关系数进行判断,若二者显著相关,即可认为该类EWA条目指示着对应的认知事件类型。

一种基于稀疏建模的事件相关电位波形图谱求解方法

技术领域

[0001] 本发明涉及波形图谱技术领域,特别涉及一种用于脑活动状态解析与脑活动模式识别的事件相关电位波形图谱(Event-related potential Waveform Atlas,EWA)的求解方法。

背景技术

[0002] 在现有的脑认知状态解析领域,数据驱动、不依赖认知实验过程中人工赋予的标签的认知状态分析手段是非常缺乏的。EEG是与认知活动直接对应的大脑电生理活动在头皮上的电位反映,其中蕴含着大量认知活动相关联的重要信息,特别是其中的ERP(事件相关)成分,可以认为是事件诱发的神经元集群活动的直接表征,对其进行解析不仅有助于了解大脑的认知活动机制,对BCI(脑机接口)领域也会产生巨大的价值。然而,现有的ERP分析方法往往必须依赖认知试验过程中的事件标签,使用叠加平均的方法获取;这种方法虽然能得到特定刺激事件相关的大致ERP波形,但完全忽略了实验设计外一些意外事件对认知过程产生的干扰,也没有考虑到主观认知状态的变化(如疲劳、走神等)对认知过程的影响。此外,其需要多帧EEG数据叠加才能得出结果的特性也极大限制了其在认知状态分析及BCI领域的应用。其他一些数据驱动的方法也被应用于EEG信号的解析,如主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)和经验模态分解(EMD)等,这些方法基于统计特性尝试分离EEG信号中的各混合成分,但由于EEG信号的高度时变特性,其统计特性往往很不稳定,从而导致这些方法分离出的成分结果没有明确的认知意义,无法准确表征单一的认知过程,也不能很好地应用于实时的认知状态分析和模式识别过程中。

发明内容

[0003] 本发明针对现有技术的缺陷,提供了一种基于稀疏建模的电位波形图谱求解方法,解决了现有技术中存在的缺陷。

[0004] 为了实现以上发明目的,本发明采取的技术方案如下:

[0005] 一种基于稀疏建模的电位波形图谱求解方法,步骤如下:

[0006] 步骤1:事件相关电位波形图谱的特征在于以下四点(1):基于含有ERP成分的EEG波形数据,使用任意基于稀疏分解的字典学习方法获取包含EWA和自发成分字典的EEG成分时域波形字典;(2)对波形字典进行无监督聚类,聚类方法可以任意选择;(3)确定聚类后的每类EEG成分时域波形的认知意义;认知意义可以直接通过对时域波形进行分析获取,也可以参考与该类别成分时域波形关联度较高的认知实验数据标签;一般来说,可以通过一类时域波形的频率分布、最大强度和波峰位置识别认知相关成分与非认知相关(自发脑电)成分;(4)将每类认知相关脑电成分波形求平均值,即可获得具有认知意义的ERP成分波形图谱,用于后续的分析或识别。

[0007] 步骤2:数据预处理,包含以下子步骤:

[0008] 步骤201去噪:不同来源的EEG信号一般含有不同强度的白噪声,在进行分析和处

理之前需要将噪声去除,任何可行的噪声去除方法如卡尔曼滤波、小波去噪、稀疏去噪等方法均可以使用;

[0009] 步骤202分帧:将EEG样本数据分解为以认知刺激时间开始,认知活动全过程为帧长的单通道数据帧;

[0010] 步骤203能量归一化:为了保证帧与帧间的能量差异不会使相关图谱条目的波形失真,每帧数据都必须进行能量归一化处理,即系数向量除以所有采样点平方和的平方根,能量差异在重构过程中可以通过系数补偿加以恢复;

[0011] 步骤3:稀疏字典学习,包括以下子步骤:

[0012] 步骤301字典初始化:一般来说,可以将训练数据中相关度最低的若干个样本作为初始波形字典原子;

[0013] 步骤302稀疏建模:对所有训练样本进行稀疏建模,获取当前字典下所有样本较优的稀疏模型;

[0014] 步骤303字典学习:使用上一步骤得到的稀疏模型修正现有波形字典;

[0015] 步骤304收敛性判断:如果当前误差和稀疏程度已满足事先设定的收敛条件,则进入下一步骤,否则返回步骤202;

[0016] 步骤4波形字典聚类,包括以下子步骤:

[0017] 步骤401 SOM规模设定:SOM的自组织节点数量需要显著多于ERP成分波形类别以及EEG自发成分类别的总量;

[0018] 步骤402 SOM自组织聚类:使用SOM算法,获取波形字典原子的聚类结果;

[0019] 步骤5波形字典性质判定,包括以下子步骤:

[0020] 步骤501基于平稳性度量的ERP波形评价:首先对每一类EEG成分波形原子取均值,而后使用基于差分平稳性度量的方法评估该均值波形的有序程度,从而发现潜在的未知认知活动所引发的ERP波形;我们依以下指标判定残差的平稳性Smoothness:

$$[0021] \quad \text{Smoothness}(e'(t)) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |e'(i) - e'(i+1)|}{\max(e') - \min(e')}$$

[0022] 其中 $e(t)$ ($t=1 \cdots N$)为残差, t 为时间点,为残差中值滤波结果, $\max(e'(t))$ 为残差中值滤波结果的最大值, $\min(e'(t))$ 为中值滤波结果的最小值, i 是求和运算的索引;将所有认知相关成分波形类别取均值,并汇总,即得到一个可靠的EWA条目;

[0023] 步骤502认知事件相关的EWA图谱条目认知意义解析:如果训练数据中有认知事件类别相关的信息,则可以通过认知事件类别与EWA图谱条目类别的相关性解析EWA条目的认知意义;

[0024] 步骤503基于新数据的EWA扩展:使用训练获取的EWA和自发成分波形字典对新的训练数据进行稀疏建模,若误差超过一定水准则首先对残差进行30HZ低通滤波,而后使用步骤401中的平稳性指标度量其平稳性,若平稳性指标低于7则认为存在新的ERP成分波形,将残差作为一个备选EWA图谱条目纳入EWA中;在出现多个新样本数据与该备选EWA条目对应后,则认为该认知相关电位波形确实存在,将其作为一个正式条目纳入EWA中。

[0025] 进一步地,步骤502具体的,可以使用标签向量与条目类别向量的皮尔逊相关系数进行判断,若二者显著相关,即可认为该类EWA条目指示着对应的认知事件类型。

[0026] 与现有技术相比,本发明的优点在于:

[0027] 针对数据中固有的事件相关电位活动模式、而非依据认知实验赋予的标签获取ERP波形,不仅可以处理实验环境下的EEG数据,也可以处理没有标签的真实环境下获取的EEG数据,具有更好的普适性和实用性。此外,使用了面向单次、单帧数据处理的信号处理方法,能够有效提升EEG分析处理的灵活性,在脑机接口领域也具有显著的应用前景。

附图说明

[0028] 图1是本发明实施例EWA图谱示意图。

具体实施方式

[0029] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下根据附图并列实施例,对本发明做进一步详细说明。

[0030] 现有的脑认知研究工作已经证明,不论实验范式如何设计,如果触发了同样的认知活动,则获得的ERP成分必然具有非常高的相似性,例如错误相关电位等。单次提取ERP方法研究表明,可以从EEG信号中找到ERP成分波形。那么,如果能够提炼出具有认知意义的ERP波形构建一个ERP波形图谱,就可以实现基于认知活动而不是实验范式进行ERP提取和脑活动模式解析。ERP波形图谱(ERP Waveform Atlas,EWA)是具有认知意义的一系列ERP波形的集合,其中每个波形都表征着特定的认知过程,研究EWA、找到与人类脑认知过程对应的可靠头皮脑电图词典,这将对脑活动研究和脑机接口技术的研发具有重要意义。

[0031] 该电位波形图谱具有以下特点:

[0032] 1.图谱的每一个条目都是EEG信号中ERP成分、或其他认知相关成分的时域波形,每个条目一般与一种特定的认知过程对应、具有明确的认知意义。

[0033] 2.一般来说,EWA是使用认知事件关联的EEG信号,由数据驱动的方法训练得出的,训练过程可以使用、但不依赖于EEG数据与认知事件类别关联的标签。EWA中的一些具体条目也可以使用其他方法获取,但只要其是由EEG信号分析而得出的时域波形、且具有明确的认知意义,则应当视为权利要求1所述EWA的一部分。

[0034] 3.在应用过程中,EWA可以直接作为稀疏建模字典的一部分,用于EEG信号的稀疏建模和分析过程中;使用含EWA字典得到的稀疏模型,其系数具有明确的认知意义,这种认知意义与对应的EWA图谱条目的认知意义一致,相应认知过程的强度由系数绝对值表征。

[0035] 4.该图谱可以被用于特定认知过程的识别。由于EWA条目明确的认知特性,可以使用多种信号处理方法对EEG信号进行成分分析,而后将其中认知相关的部分与EWA条目进行比对,以识别任意特定认知过程。

[0036] 5.该图谱可以被用于BCI领域,实现任意脑-机接口设备的控制;具体方法为在4)所述的特定认知过程识别基础上,将识别结果转换为脑-机接口设备的控制信号;在这种应用情境下,EWA需要针对应用需求训练。

[0037] 如上所述,EWA的具体定义为:由EEG信号进行成分分析得出的事件相关成分的时域波形集合,其中每个条目都具有明确的认知意义。EWA的应用环境包括但不限于上述3)-5)所述范围,还包括任何满足上述定义的EEG成分时域波形图谱在EEG分析和识别领域的应用。图1为一个EWA图谱的示例;

[0038] 一种基于稀疏建模的EWA求解方法

[0039] 除了EWA的定义及应用范围外,本专利还包含一种可行的EWA构建方法,其具体步骤如下:

[0040] S1:基于含有ERP成分的EEG波形数据,使用任意基于稀疏分解的字典学习方法获取包含EWA和自发成分字典的EEG成分时域波形字典;

[0041] S2:对波形字典进行无监督聚类,聚类方法可以任意选择。

[0042] S3:确定聚类后的每类EEG成分时域波形的认知意义。认知意义可以直接通过对时域波形进行分析获取,也可以参考与该类别成分时域波形关联度较高的认知实验数据标签。一般来说,可以通过一类时域波形的频率分布、最大强度和波峰位置识别认知相关成分与非认知相关(自发脑电)成分。

[0043] S4:将每类认知相关脑电成分波形求平均值,即可获得具有认知意义的ERP成分波形图谱,用于后续的分析或识别。

[0044] 上述电位波形图谱的求解方法,包括以下步骤:

[0045] 步骤1:数据预处理

[0046] 在不同环境下记录的含ERP脑电信号需要经过预处理,以保证其在幅值、能量、噪声强度层面的一致性。该步骤包含以下子步骤:

[0047] 步骤101去噪:不同来源的EEG信号一般含有不同强度的白噪声,在进行分析和处理之前需要将噪声去除,任何可行的噪声去除方法如卡尔曼滤波、小波去噪、稀疏去噪等方法均可以使用。

[0048] 步骤102分帧:将EEG样本数据分解为以认知刺激时间开始,认知活动全过程为帧长的单通道数据帧。

[0049] 步骤103能量归一化:为了保证帧与帧间的能量差异不会使相关图谱条目的波形失真,每帧数据都必须进行能量归一化处理,即系数向量除以所有采样点平方和的平方根,能量差异在重构过程中可以通过系数补偿加以恢复。

[0050] 步骤2:稀疏字典学习

[0051] 预处理完成的数据即可进入稀疏字典学习阶段。K-SVD等任意字典学习算法均可以使用,一般来说,这一步骤可以分为以下几个子步骤:

[0052] 步骤201字典初始化:一般来说,可以将训练数据中相关度最低的若干个样本作为初始波形字典原子。

[0053] 步骤202稀疏建模:对所有训练样本进行稀疏建模,获取当前字典下所有样本较优的稀疏模型。

[0054] 步骤203字典学习:使用上一步骤得到的稀疏模型修正现有波形字典。

[0055] 步骤204收敛性判断:如果当前误差和稀疏程度已满足事先设定的收敛条件,则进入下一步骤,否则返回步骤202。

[0056] 步骤3波形字典聚类

[0057] 将所有波形字典原子视为聚类对象进行聚类,可以使用SOM自组织聚类算法以避免对ERP波形类别数量预先的精确估计。该步骤可以概括为以下子步骤:

[0058] 步骤301SOM规模设定:SOM的自组织节点数量需要显著多于ERP成分波形类别以及EEG自发成分类别的总量。

[0059] 步骤302SOM自组织聚类:使用SOM算法,获取波形字典原子的聚类结果。

[0060] 步骤4波形字典性质判定

[0061] 基于统计特性,将EWA图谱条目和自发成分波形字典区分开来。该步骤分为以下几个子步骤:

[0062] 步骤401基于平稳性度量的ERP波形评价:首先对每一类EEG成分波形原子取均值,而后使用基于差分平稳性度量的方法评估该均值波形的有序程度,从而发现潜在的未知认知活动所引发的ERP波形。我们依以下指标判定残差的平稳性Smoothness:

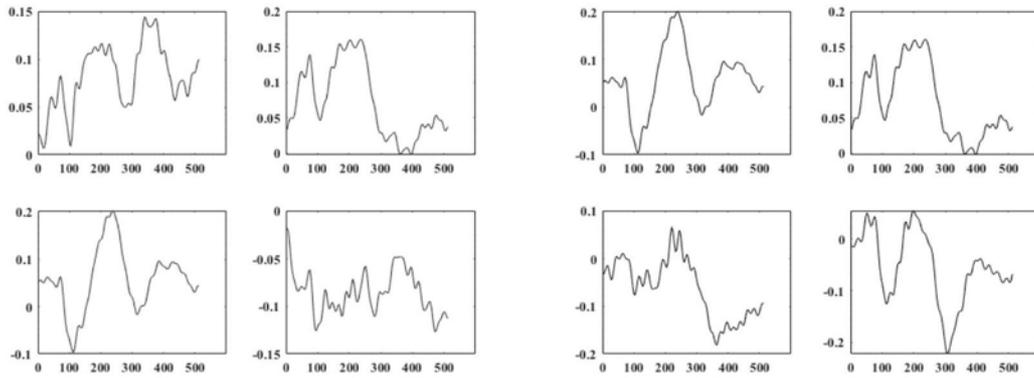
$$[0063] \quad \text{Smoothness}(e'(t)) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |e'(i) - e'(i+1)|}{\max(e') - \min(e')}$$

[0064] 其中 $e(t)$ ($t=1 \cdots N$)为残差, t 为时间点,为残差中值滤波结果, $\max(e'(t))$ 为残差中值滤波结果的最大值, $\min(e'(t))$ 为中值滤波结果的最小值, i 是求和运算的索引。该指标使用差分的方式度量时间序列的平稳性,可以有效地使用阈值区分一般的自发EEG成分与ERP波形成分。该值较高的可以认为其是自发成分,而较低的则为认知相关成分。将所有认知相关成分波形类别取均值,并汇总,即得到一个可靠的EWA条目。

[0065] 步骤402认知事件相关的EWA图谱条目认知意义解析:如果训练数据中有认知事件类别相关的信息,则可以通过认知事件类别与EWA图谱条目类别的相关性解析EWA条目的认知意义。具体的,可以使用标签向量与条目类别向量的皮尔逊相关系数进行判断,若二者显著相关,即可认为该类EWA条目指示着对应的认知事件类型。

[0066] 步骤403基于新数据的EWA扩展:使用训练获取的EWA和自发成分波形字典对新的训练数据进行稀疏建模,若误差超过一定水准则首先对残差进行30HZ低通滤波,而后使用步骤401中的平稳性指标度量其平稳性,若平稳性指标低于7则认为存在新的ERP成分波形,将残差作为一个备选EWA图谱条目纳入EWA中。在出现多个新样本数据与该备选EWA条目对应后,则认为该认知相关电位波形确实存在,将其作为一个正式条目纳入EWA中。

[0067] 本领域的普通技术人员将会意识到,这里所述的实施例是为了帮助读者理解本发明的实施方法,应被理解为本发明的保护范围并不局限于这样的特别陈述和实施例。本领域的普通技术人员可以根据本发明公开的这些技术启示做出各种不脱离本发明实质的其它各种具体变形和组合,这些变形和组合仍然在本发明的保护范围内。



(a)目标刺激EWA示例

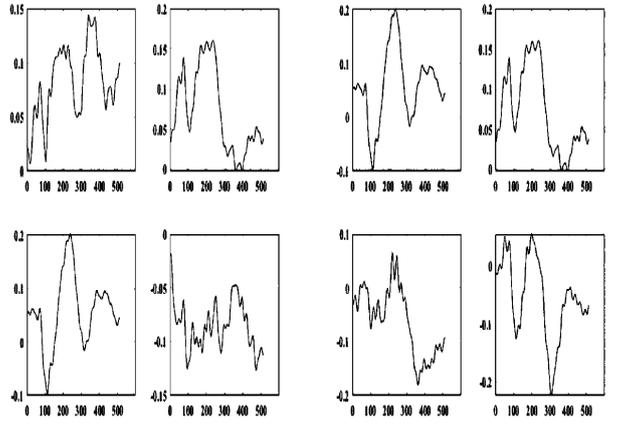
(b)非目标刺激EWA示例

图1

专利名称(译)	一种基于稀疏建模的事件相关电位波形图谱求解方法		
公开(公告)号	CN110327043A	公开(公告)日	2019-10-15
申请号	CN201910715578.8	申请日	2019-08-05
[标]申请(专利权)人(译)	哈尔滨工业大学		
申请(专利权)人(译)	哈尔滨工业大学		
当前申请(专利权)人(译)	哈尔滨工业大学		
[标]发明人	李海峰 丰上 徐忠亮 马琳 薄洪健 徐聪 李洪伟 陈婧 孙聪珊 王子豪 房春英		
发明人	李海峰 丰上 徐忠亮 马琳 薄洪健 徐聪 李洪伟 陈婧 孙聪珊 王子豪 房春英 丁施航		
IPC分类号	A61B5/0476 A61B5/00		
CPC分类号	A61B5/0476 A61B5/4088 A61B5/7203 A61B5/7264 A61B5/7267		
代理人(译)	李鹏		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明给出了一种基于稀疏建模的事件相关电位波形图谱求解方法。包括：数据预处理，去燥、分帧和能量归一化；稀疏字典学习，字典初始化，稀疏建模，字典学习和收敛性判断；波形字典聚类；波形字典性质判定。本发明的优点在于：针对数据中固有的事件相关电位活动模式、而非依据认知实验赋予的标签获取ERP波形，不仅可以处理实验环境下的EEG数据，也可以处理没有标签的真实环境下获取的EEG数据，具有更好的普适性和实用性。此外，使用了面向单次、单帧数据处理的信号处理方法，能够有效提升EEG分析处理的灵活性，在脑机接口领域也具有显著的应用前景。



(a)目标刺激EWA示例

(b)非目标刺激EWA示例