



Decoding of Visual Attention using Cross Frequency Coupling from Local Field Potential Signals

Nazari, Mohammad Reza¹ / Daliri, Mohammad Reza^{2*} / Motie Nasrabadi, Ali³

¹ - Instructor, Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

² - Professor, Department of Biomedical Engineering, School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

³ - Professor, Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

DOI: 10.22041/ijbme.2022.546968.1749

Received: 16 January 2022

Revised: 18 April 2022

Accepted: 5 May 2022

KEYWORDS

*Visual Attention Decoding
Local Field Potential
Cross-Frequency Coupling
Support Vector Machine*

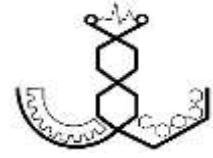
ABSTRACT

Visual attention as a cognitive factor plays a significant role in the processing of higher-order mental information that happens in the brain and affects brain activity in various areas of the visual cortex. Among the various recording systems, local field potentials, due to their stability, robustness, and frequency content have received interest in brain structure and cognitive processing research, as well as brain-computer interface (BCI) systems. Hence, the extraction and interpretation of information from local field potential (LFP) signals during visual attention has been considered to control cognitive systems. Cross-frequency coupling (CFC) as one of the information encoding strategies in the brain plays a functional role in perception, working memory, and visual attention tasks. However, the role of CFC as informative features for spatial attention decoding has not been adequately investigated. This paper aims to examine spatial attention decoding using LFP signals recorded from the monkey middle temporal area (MT). For this purpose, phase-phase and phase-amplitude coupling features and machine learning algorithms have been employed. The results show that the highest decoding performance was achieved by applying selected optimal features and the support vector machine classifier (90.36%). Moreover, among the selected features, gamma-delta, gamma-alpha, and beta-delta coupling contain the most cognitive information and the most effective features to improve the decoding performance of spatial attention in the visual system. Generally, the results suggest that cross-frequency coupling of LFP signals contains significant information in spatial attention tasks, and can be used as a suitable alternative to the time-frequency features of brain signals in cognitive BCI systems.

***Corresponding Author**

Address	Biomedical Engineering Department, School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran		
Postal Code	1684613114	Tel	+98-21-73225738
E-Mail	<i>daliri@iust.ac.ir</i>	Fax	+98-21-73225777





رمزگشایی توجه بینایی با استفاده از تزویج متقابل فرکانس سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی

نظری، محمدرضا^۱ / دلیری، محمدرضا^{۲*} / مطیع نصرآبادی، علی^۳

- ^۱ - مربی، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
- ^۲ - استاد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- ^۳ - استاد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

مشخصات مقاله

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22041/ijbme.2022.546968.1749

پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۱

بازنگری: ۲۹ فروردین ۱۴۰۱

ثبت در سامانه: ۲۶ دی ۱۴۰۰

چکیده

توجه بینایی به عنوان یک فاکتور شناختی در پردازش اطلاعات ذهنی مرتبه‌ی بالاتر که در مغز اتفاق می‌افتد، نقشی اساسی دارد و بر فعالیت مغزی نواحی مختلف قشر بینایی اثرگذار است. در میان ثبت‌های مختلف مغزی، سیگنال پتانسیل میدانی محلی به دلیل ثبات، استحکام و محتوای فرکانسی، در مطالعات ساختار مغز، فرایندهای شناختی و سیستم‌های BCI مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین استخراج و تفسیر اطلاعات سیگنال LFP در طول توجه بینایی یکی از مسائل مهم برای کنترل فعالیت‌های شناختی است. امروزه تزویج متقابل فرکانس به عنوان یکی از استراتژی‌های کدگذاری اطلاعات در مغز مطرح است که می‌تواند نقش مهمی در ادراک، حافظه و توجه داشته باشد. با این حال نقش عمل‌کردی آن به منظور رمزگشایی توجه بینایی با استفاده از LFP کم‌تر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش رمزگشایی توجه بینایی با استفاده از LFP ثبت شده از ناحیه‌ی تمپورال میانی مغز میمون مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه و الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با ویژگی‌های بهینه‌ی انتخاب شده و طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان، بهترین عمل‌کرد رمزگشایی حاصل شده است (۹۰/۳۶٪). هم‌چنین از میان ویژگی‌های انتخاب شده، تزویج گاما-دلتا، گاما-آلفا و بتا-دلتا حاوی بیش‌ترین اطلاعات شناختی و موثرترین ویژگی‌ها در بهبود عمل‌کرد رمزگشایی توجه بینایی می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تزویج بین باندهای فرکانسی سیگنال‌های LFP حاوی اطلاعات قابل توجهی در حوزه‌ی توجه بینایی است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای ویژگی‌های زمان-فرکانس سیگنال‌های مغزی در سیستم‌های BCI شناختی باشد.

واژه‌های کلیدی

رمزگشایی توجه بینایی
پتانسیل میدانی محلی
تزویج متقابل فرکانس
ماشین بردار پشتیبان

*نویسنده‌ی مسئول

نشانی گروه مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تلفن ۹۸-۲۱-۷۳۲۲۵۷۳۸

۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴

دورنگار ۹۸-۲۱-۷۳۲۲۵۷۷۷

daliri@iust.ac.ir



۱- مقدمه

یکی از موضوعات مهم در علوم شناختی، سازوکار توجه بینایی است. توجه بینایی یک مکانیسم انتخابی با هدف اولویت‌بندی اطلاعات مربوط به رفتار از میان تمام زیرمجموعه‌های تحریک حسی است. این فرایند بر موقعیت مکانی (توجه مبتنی بر مکان^۱) یا ویژگی‌های تعریف‌کننده‌ی هدف (توجه مبتنی بر ویژگی^۲) در قشر بینایی متمرکز است [۱، ۲]. در بحث مطالعه‌ی عمل‌کرد توجه، هدف پیدا کردن اثر توجه روی پاسخ سنسوری در سطوح مختلف مغز است. در مطالعات فیزیولوژیکی، تاثیر سازوکار توجه انتخابی روی فعالیت نورون‌های قشر حسی مغز پستان‌داران گزارش شده است [۳]. یکی از مهم‌ترین موضوعات برای پیشرفت بیشتر سیستم‌های واسط مغز-رایانه‌ی شناختی^۳، دسترسی به عمل‌کردهای شناختی بالاتر قشر مغز بوده که توجه انتخابی به عنوان یک پارامتر شناختی اثرگذار، پیشنهاد شده است [۴-۶]. در مطالعات متعددی سیگنال‌های مبتنی بر توجه بینایی در سیستم‌های BCI شناختی پیشنهاد شده است [۷-۹]. با توجه به پیشرفت‌های امروزی، جهت بررسی شبکه‌های عصبی مغز، ثبت‌های مختلفی از سیگنال‌های مغزی به دست آمده است. در میان روش‌های غیرتهاجمی ثبت فعالیت مغزی، الکتروانسفالوگرافی^۴ به طور گسترده‌ای در سیستم‌های BCI مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰، ۱۱]. در سطح علوم اعصاب، بیش‌تر دانش فعلی به دست آمده در مورد ساختار عصبی توجه بینایی، بر پایه‌ی پردازش فعالیت مغز ناشی از مطالعات الکتروفیزیولوژیک تهاجمی در نخستیان غیرانسانی^۵ است. از جمله منابع ثبت‌کننده‌ی تهاجمی می‌توان به واحدهای منفرد^۶ و پتانسیل‌های میدانی محلی^۷ اشاره کرد که برای استخراج ویژگی‌های کارآمد به منظور راه‌اندازی سیستم‌های BCI مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲، ۱۳].

سیگنال LFP، نوسانات ولتاژ خارج سلولی با فرکانس پایین بوده که نماینده‌ای از مجموع فعالیت‌های سیناپسی^۸ نورون‌های واقع در اطراف الکتروود ثبت‌کننده‌ی سیگنال است [۱۴]. مطالعه‌ی این دسته از سیگنال‌های بیوالکتریکی در بررسی‌های علوم اعصاب در چند دهه‌ی اخیر مورد تاکید ویژه‌ای قرار گرفته است. در مطالعات متعددی تاثیر توجه بینایی روی سیگنال‌های LFP در مناطق مختلف قشر حسی میمون گزارش شده است [۵،

۱۵-۱۸]. توجه بینایی بر مدولاسیون پردازش عصبی در انواع وظایف ادراکی تاثیرگذار است [۱۹-۲۱] به طوری که توجه به محرک داخل میدان دریافتی باعث افزایش پاسخ نورون‌های حسی می‌شود [۱۵، ۲۲، ۲۳]. هم‌چنین توجه به داخل میدان دریافتی با کاهش نوسانات فرکانس پایین و نیز افزایش نوسانات فرکانس بالا در سیگنال LFP نواحی حسی بینایی همراه است [۵، ۱۵، ۱۶]. در این راستا در مطالعات متعددی به بررسی اثر توجه به ویژگی‌های تحریک (جهت، رنگ و ...) پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که توجه مبتنی بر ویژگی باعث افزایش پاسخ نورون‌های مربوط به ویژگی خاص در قشر بینایی می‌شود [۲۴، ۲۵]. هم‌چنین تاثیر توجه به مکان و ویژگی تحریک با یک‌دیگر، در بسیاری از مطالعات بررسی شده است [۲۶، ۲۷]. نتایج نشان دهنده‌ی اثر متقابل^۹ میان این دو نوع توجه در نواحی مختلف قشر بینایی است [۲۸، ۲۹].

مطالعات نشان داده است که توجه بینایی بر ویژگی‌های فرکانسی سیگنال‌های LFP ثبت شده در مناطق مختلف قشر بینایی تاثیرگذار است در نتیجه از این سیگنال مغزی می‌توان برای رمزگشایی تخصیص توجه یا محل تحریک بینایی در طول فرایندهای مختلف بینایی و شناختی استفاده کرد [۳۰، ۳۱]. یکی از این مطالعات، پیش‌بینی مرکز توجه میمون با استفاده از سیگنال‌های LFP ثبت شده از قشر پیشانی جانبی^{۱۰} در طول کارهای مختلف توجه بینایی است [۳۲]. نتایج نشان می‌دهد که باند گاما و گاما بالا^{۱۱} (فرکانس‌های بالای ۱۲۰ هرتز) دارای بیش‌ترین اطلاعات مربوط به مکان توجه می‌باشند. در نتیجه سیگنال LFP ناحیه‌ی حسی قشر مغز می‌تواند برای استخراج اطلاعات در طول توجه بینایی مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین در مطالعات متعددی با استفاده از سیگنال‌های LFP ثبت شده از نواحی موتوری قشر مغز، امکان رمزگشایی اطلاعات اهداف حرکتی مورد بررسی قرار گرفته است [۳۳، ۳۴]. به عنوان نمونه، سیگنال‌های LFP ناحیه‌ی سنسوری-موتوری^{۱۲} برای پیش‌بینی حرکت ساق پای موش مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵]. از الگوریتم‌های مختلفی برای رمزگشایی اطلاعات شناختی از فعالیت‌های نوسانی استفاده شده است. برای مثال توجه بینایی با استفاده از روش‌های تحلیل زمان-فرکانس سیگنال‌های LFP رمزگشایی شده است [۳۶].

^۷ Local Field Potentials (LFP)

^۸ Synaptic Activities

^۹ Interaction

^{۱۰} Lateral Prefrontal Cortex

^{۱۱} High Gamma

^{۱۲} Sensorimotor

^۱ Spatial Attention

^۲ Feature-Based Attention

^۳ Cognitive Brain-Computer Interface

^۴ Electroencephalography (EEG)

^۵ Non-Human Primates

^۶ Single Units

ویژگی‌های کارآمد برای رمزگشایی توجه بینایی کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این مقاله بررسی امکان رمزگشایی توجه بینایی بر پایه‌ی ویژگی‌های تزویج متقابل فرکانس سیگنال‌های LFP ثبت شده از ناحیه‌ی تمپورال میانی^۷ مغز میمون^۸ است. در این تحقیق به منظور استخراج اطلاعات از سیگنال‌های LFP، ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه‌ی متقابل فرکانس بررسی شده است. سپس با استفاده از روش انتخاب ویژگی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، میزان عمل‌کرد هر کدام از این ویژگی‌ها در رمزگشایی مکان توجه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های CFC استخراج شده از سیگنال‌های LFP در طول توجه بینایی حاوی اطلاعات شناختی ارزشمندی است که می‌تواند برای رمزگشایی توجه مکانی در سیستم بینایی مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه، این ویژگی‌ها به دلیل عمل‌کرد بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای ویژگی‌های رایج تحلیل زمان-فرکانس در شناسایی الگو و سیستم‌های BCI شناختی باشند.

در ادامه‌ی مقاله در بخش ۲ به معرفی داده‌های مورد بررسی، چگونگی ثبت سیگنال LFP، روش‌های استخراج و انتخاب ویژگی و نحوه‌ی طبقه‌بندی پرداخته شده است. در بخش ۳ نتایج بررسی‌های انجام شده از جمله ارزیابی عمل‌کرد رمزگشایی بر پایه‌ی تحلیل‌های مختلف و هم‌چنین مقایسه با مطالعات گذشته ارائه شده است. نتیجه‌گیری نیز در بخش ۴ بیان شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ثبت داده‌ها

در این مطالعه داده‌های ثبت شده در آزمایشگاه علوم اعصاب شناختی^۹ و مرکز نخستیان آلمان^{۱۰} مورد بررسی قرار گرفته است. این داده‌ها شامل سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی و اسپایک ناحیه‌ی تمپورال میانی مغز میمون بوده که با استفاده از سیستم ثبت پنج‌کاناله^{۱۱} جمع‌آوری شده است. در هر الکتروود، سیگنال‌های LFP و اسپایک هم‌زمان با هم و به ترتیب با نرخ نمونه‌برداری ۱ کیلوهرتز و ۴۰ کیلوهرتز ثبت شده است [۵۴]. پس از آموزش میمون در مورد آزمایش‌های ثبت داده، الکتروودهای بسیار نازکی در بافت مغز میمون به فاصله‌ی ۳۰۰

علاوه بر ارزیابی‌های تک‌فرکانسی فعالیت نوسانی، یک معیار اتصال عمل‌کردی^۱ با عنوان تزویج متقابل فرکانس^۲ توسعه یافته است که نگرشی را در مورد چگونگی پردازش اطلاعات توسط شبکه‌های عصبی محلی از طریق تعامل^۳ یا جفت شدن^۴ فعالیت‌های عصبی در طول فرکانس‌ها ارائه می‌دهد. در مطالعات علوم اعصاب این مفهوم به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۳۷]. از دیدگاه فیزیولوژیکی، تولید CFC در شبکه‌های عصبی در هنگام ثبت سیگنال‌های عصبی و مداخلات و نیز مدل‌های محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۸]. هم‌چنین جنبه‌ی کاربردی CFC وابسته به نقش‌های مختلف عمل‌کردی شامل مراحل کارکرد حافظه، تجزیه و تحلیل صحنه‌ی بصری و گفتاری است [۳۹، ۴۰].

تزویج متقابل فرکانس هنگامی رخ می‌دهد که مولفه‌های فرکانسی غیریکسان با یک‌دیگر سنکرون شوند. این رخداد به عنوان فعالیت‌های همبسته در سراسر باندهای فرکانسی مجزا تعریف شده است [۴۱]. این تزویج می‌تواند به عنوان تعامل متقابل بین دامنه، فاز و فرکانس سیگنال مشاهده شود. بر این اساس شش نوع تزویج متقابل فرکانس تعریف می‌شود [۴۲] که از جمله مهم‌ترین آن‌ها، جفت شدن دامنه‌ی فعالیت‌های فرکانس بالا به فاز فعالیت‌های فرکانس پایین تحت عنوان تزویج فاز-دامنه^۵ است. این پدیده در سیستم عصبی انسان [۴۱، ۴۳] و نخستیان غیرانسان [۴۴، ۴۵] به طور وسیعی در مطالعات نشان داده شده است. پدیده‌ی PAC نقش ویژه‌ای در طیف گسترده‌ای از توانایی‌های شناختی از جمله شکل‌گیری حافظه [۴۶]، کد شدن اطلاعات در حافظه‌ی کاری [۴۷، ۴۸]، تصمیم‌گیری [۴۹] و تولید پاسخ‌های حرکتی [۵۰] دارد. یکی دیگر از متداول‌ترین انواع تزویج متقابل فرکانس، تزویج فاز-فاز^۶ (یا هم‌گامی فاز n:m) بوده که مبتنی بر ارزیابی ثبات اختلاف بین سری‌های زمانی دو فاز است [۵۱]. در واقع اطلاعات رمزگذاری شده در فاز فرکانس بالاتر در چرخه‌های متعدد ریتم فرکانس پایین‌تر حفظ می‌شود. در چند مطالعه این نوع از تزویج بین باندهای فرکانسی مختلف بررسی شده است [۵۲، ۵۳].

با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان پیشنهاد کرد که LFP حاوی اطلاعات ارزشمندی برای رمزگشایی توجه بینایی است. با این حال نقش عمل‌کردی تزویج متقابل فرکانس به عنوان

^۷ Middle Temporal (MT)

^۸ Macaque monkey

^۹ Cognitive Neuroscience Laboratory (CNL)

^{۱۰} German Primate Center-Leibniz Institute for Primate Research (DPZ)

^{۱۱} Five-channel recording system (MiniMatrix; Thomas Recording)

^۱ Functional connectivity

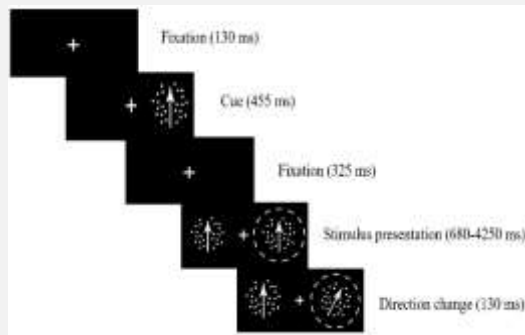
^۲ Cross frequency coupling (CFC)

^۳ Interaction

^۴ Coupling

^۵ Phase Amplitude Coupling (PAC)

^۶ Phase Phase Coupling (PPC)



شکل (۱) - الگوی رفتاری توجه بینایی در هر آزمایش ثبت داده؛ برای شروع آزمایش، میمون در حالی که به یک نقطه‌ی ثابت مرکزی نگاه می‌کند، باید یک اهرم را لمس کند. سپس نشانه‌ای به مدت ۴۵۵ میلی‌ثانیه روی صفحه ظاهر شده که موقعیت محرک هدف را مشخص می‌کند. پس از یک دوره‌ی ۳۲۵ میلی‌ثانیه‌ای، دو محرک در بازه‌ی زمانی ۶۸۰-۴۲۵۰ میلی‌ثانیه نشان داده می‌شود. در طول این بازه‌ی زمانی، یک یا هر دو محرک به طور تصادفی تحت یک تغییر جهت کوتاه به مدت ۱۳۰ میلی‌ثانیه قرار می‌گیرند. میمون باید با رها کردن اهرم برای دریافت پاداش، تغییر جهت را در محرک هدف در بازه‌ی زمانی ۱۵۰-۶۵۰ میلی‌ثانیه گزارش دهد

۲-۳-۲-۳ پردازش سیگنال

۲-۳-۱-۳ پیش پردازش سیگنال

پس از ثبت داده‌ها و انجام مراحل اولیه‌ی آماده‌سازی سیگنال‌ها شامل تقویت کردن، فیلتر کردن و تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، لازم است یک مرحله‌ی پیش‌پردازش به منظور بهینه‌سازی اطلاعات، بهبود نسبت سیگنال به نویز و همچنین حذف اطلاعات اضافی صورت گیرد. پس از انجام اقدامات اولیه، مراحل برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی به منظور رمزگشایی توجه بینایی مورد بررسی قرار گرفته است. پردازش‌ها روی داده‌های جلساتی^۶ انجام شده است که ۵ الکتروود درون ناحیه‌ی MT داشته باشند. بر این اساس در نهایت ۹ جلسه و ۴۵ سایت^۷ برای پردازش انتخاب شده است. از کل آزمایش‌های^۸ ثبت داده، فقط آزمایش‌هایی که حداقل ۱۲۰۰ میلی‌ثانیه بعد از تحریک (نمایش هر دو محرک) ثبت شده در نظر گرفته شده بنابراین در نهایت ۱۶۴۰ آزمایش انتخاب شده است (نیمی از آزمایش‌ها مربوط به توجه به داخل میدان دریافتی و نیمی دیگر مربوط به توجه به خارج میدان دریافتی می‌باشد). پردازش‌ها روی ۱۰۰۰ نمونه‌ی مربوط به بازه‌ی زمانی

میکرومتر از یک‌دیگر کاشته شده است تا فعالیت‌های خارج سلولی ثبت شود.

۲-۲-۲ تشریح آزمایش

در ابتدای هر آزمایش زمانی که میمون برای انجام آزمایش آماده است به نقطه‌ی ثابت^۱ روشن موجود در صفحه‌ی مشکی رنگ به مدت ۱۳۰ میلی‌ثانیه نگاه کرده و دستگیره^۲ را می‌کشد. این زمان به عنوان زمان شروع آزمایش در نظر گرفته می‌شود. سپس به مدت ۴۵۵ میلی‌ثانیه یک سری نقاط تصادفی ساکن^۳ به عنوان نشانه^۴ در صفحه ظاهر شده و این نقاط، مکانی که میمون پس از ظاهر شدن محرک‌ها باید به آن توجه کند را مشخص می‌کنند. به مدت ۳۲۵ میلی‌ثانیه پس از آن که نشانه ناپدید شد (در این فاصله‌ی زمانی فقط نقطه‌ی ثابت نشان داده می‌شود) هر دو محرک در فاصله‌ی زمانی ۶۸۰-۴۲۵۰ میلی‌ثانیه در صفحه ظاهر می‌شوند. یکی از محرک‌ها داخل میدان دریافتی^۵ و دیگری خارج میدان دریافتی و در سمت دیگر نقطه‌ی ثابت است. هر کدام از محرک‌ها متشکل از تعدادی نقاط تصادفی بوده که هر دو در جهت یکسان حرکت می‌کنند. در این بازه‌ی زمانی به مدت ۱۳۰ میلی‌ثانیه یک یا هر دو محرک به اندازه‌ی ۳۰ درجه تغییر جهت دارند و با تغییر جهت حرکت محرک مورد توجه، میمون باید در بازه‌ی زمانی ۱۵۰-۶۵۰ میلی‌ثانیه پس از تغییر جهت محرک دستگیره را رها کند. در حقیقت میمون باید این تغییرات را درک نموده و عکس‌العمل نشان دهد. اگر تغییر جهت مربوط به محرک مورد نظر اتفاق نیفتد، میمون نباید به آن توجه کند و آزمایش به پایان می‌رسد. در صورتی که میمون به درستی توجه نکرده باشد و پس از تغییر جهت محرک هدف دستگیره را رها نکند آن آزمایش مورد بررسی قرار نخواهد گرفت [۳۰]. در شکل (۱) الگوی رفتاری توجه بینایی در این آزمایش نشان داده شده است.

در داده‌های مورد بررسی ۸ جهت مختلف برای محرک نمایش داده شده وجود دارد (جهت‌ها به صورت زاویه‌های صفر، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰، ۲۲۵، ۲۷۰ و ۳۱۵ درجه در نظر گرفته شده است). در هر بار تکرار آزمایش، محرک با یکی از این جهت‌ها نمایش داده می‌شود. با توجه به اطلاعات داده‌های موجود می‌توان بیان کرد که این داده‌ها شامل حالت‌های توجه به داخل و خارج میدان دریافتی برای هر جهت حرکت محرک بوده که اطلاعات مربوط به توجه به مکان را نشان می‌دهد.

^۵ Receptive Field (RF)

^۶ Session

^۷ Site (Electrode)

^۸ Trials

^۱ Fixation Spot

^۲ Lever

^۳ Random Dot Patterns (RDP)

^۴ Cue

در این رابطه $n=m=1$ در نظر گرفته شده و مقدار قفل فاز برای سیگنال‌های گسسته مطابق رابطه‌ی (۲) محاسبه شده است.

$$PLV = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{j\Delta\theta(n)} \right| \quad (2)$$

محدوده‌ی مقدار قفل فاز بین صفر و یک است. هنگامی که تزویجی بین فاز دو سیگنال وجود نداشته باشد مقدار قفل فاز برابر با صفر بوده و هنگامی که تفاوت بین فاز دو سیگنال در کل نمونه‌های زمانی پنجره‌ی تجزیه و تحلیل شده ثابت باشد مقدار قفل فاز برابر با یک می‌شود و این بدان معنا است که بین فاز دو سیگنال هم‌گامی کاملی وجود دارد. در این تحقیق تزویج فاز-فاز بین باندهای فرکانسی سیگنال‌های LFP هر الکتروود هر آزمایش محاسبه شده است. با توجه به ۵ باند فرکانسی (دلتا، تتا، آلفا، بتا و گاما) برای هر الکتروود تعداد ۱۰ ویژگی و در مجموع برای هر آزمایش تعداد ۵۰ ویژگی تزویج فاز-فاز به دست آمده است.

۲-۲-۳-۲- تزویج فاز-دامنه

تزویج فاز-دامنه‌ی متقابل فرکانس در جایی که فاز سیگنال فرکانس پایین، دامنه‌ی سیگنال فرکانس بالا را مدوله می‌کند، در علوم اعصاب بسیار مورد توجه قرار گرفته است و به همگام‌سازی دامنه‌ی نوسانات با فاز نوسانات آهسته‌تر بر می‌گردد [۴۲]. تکنیک‌های مختلفی برای محاسبه‌ی تزویج فاز-دامنه‌ی متقابل فرکانس وجود دارد که در این تحقیق از روش طول بردار میانگین^۶ استفاده شده است. در این روش سری‌های زمانی به صورت شکل قطبی $(A_{FA} e^{j\phi_{FA}})$ برای استخراج تزویج فاز-دامنه در نظر گرفته می‌شود [۴۱]. در این روش دامنه‌ی لحظه‌ای به عنوان طول بردار قطبی (فاصله از مرکز $(0,0)$) و فاز به عنوان زاویه‌ی بردار قطبی بیان می‌شود. هر بردار مربوط به یک نقطه‌ی زمانی بوده و از طول بردار میانگین برای محاسبه‌ی تزویج استفاده می‌شود. مقدار کمیت PAC عددی بین صفر و یک است که از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$PAC = \left| \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n A_t e^{j\phi_t} \right| \quad (2)$$

در این رابطه n تعداد نقاط زمانی، A_t دامنه‌ی فرکانس مدوله شده و ϕ_t فاز فرکانس مدوله کننده در نقطه‌ی زمانی t است. بر

۲۰۰-۱۲۰۰ میلی‌ثانیه بعد از تحریک (نمایش هر دو محرک) انجام شده است. سیگنال‌های LFP هر آزمایش در هر الکتروود توسط فیلتر میان‌گذر (۴۸-۵۲ هرتز) باترورث مرتبه‌ی سه فیلتر شده و نویز ۵۰ هرتز حذف شده است. سپس این سیگنال‌ها با فیلتر میان‌گذر باترورث مرتبه‌ی سه به باندهای فرکانسی (دلتا ۴-۸، تتا ۸-۱۲، آلفا ۱۲-۳۰، بتا ۳۰-۱۲ و گاما ۱۲۰-۳۰ هرتز) تجزیه شده است. از آنجا که حفظ اطلاعات فاز سیگنال ضروری است، برای جلوگیری از هر گونه اعوجاج فاز، فیلترهای فاز صفر روی سیگنال در جهت جلو و سپس جهت معکوس طبق دستور filtfilt^۱ مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳-۲- استخراج ویژگی

استخراج ویژگی به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل پردازش سیگنال بوده به طوری که از طریق آن، ویژگی‌های مهم سیگنال که حاوی اطلاعات است، حاصل می‌شود. به منظور پردازش سیگنال‌های حیاتی و به ویژه سیگنال‌های مغزی می‌توان از اطلاعات حوزه‌ی زمان، فرکانس و زمان-فرکانس استفاده نمود. هم‌چنین تزویج متقابل فرکانس نیز به عنوان یکی از استراتژی‌های رمزگذاری اطلاعات در مغز ارائه شده است. در این تحقیق به منظور استخراج اطلاعات از سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی، ویژگی‌های تزویج متقابل فرکانس بررسی شده و میزان عمل‌کرد هر کدام از این ویژگی‌ها در رمزگشایی توجه بینایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای مورد نیاز (دامنه و فاز لحظه‌ای^۲) برای محاسبه‌ی تزویج بین باندهای فرکانسی با استفاده از سیگنال تحلیلی^۳ بر پایه‌ی تبدیل هیلبرت^۴ به دست آمده است [۵۵].

۲-۳-۱- تزویج فاز-فاز

در این مطالعه از مقدار قفل فاز^۵ برای محاسبه‌ی تزویج فاز-فاز بین دو باند فرکانسی مجزا استفاده شده است [۵۶]. در واقع این معیار، هم‌گامی بین فازهای دو سیگنال نوسانی را می‌سنجد. پس از محاسبه‌ی فاز لحظه‌ای توسط سیگنال تحلیلی برای دو سیگنال $x(n)$ و $y(n)$ که هر کدام از آن‌ها در یک باند فرکانسی خاص نوسان می‌کنند، معیار قفل فاز برای بیان مقدار تزویج فاز-فاز محاسبه شده است. هم‌گامی فاز $n:m$ بین دو سیگنال هنگامی اتفاق می‌افتد که تفاوت بین فاز لحظه‌ای آن‌ها مطابق رابطه‌ی (۱) برای تمام نمونه‌های (n) ثابت بماند.

$$\Delta\theta(n) = n\theta_x(n) - n\theta_y(n), \quad \text{for } \{n, m\} \in Z \quad (1)$$

^۱ Hilbert Transform

^۲ Phase Locking Value (PLV)

^۳ Mean Vector Length

^۱ Matlab

^۲ Instantaneous Phase

^۳ Analytic Signal

عمل کرد رمزگشایی توجه بینایی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای بررسی و مقایسه‌ی نتایج از آزمون ویلکاکسون دوطرفه برای مقایسه‌ی دو کمیت و آزمون نرخ جذب کاذب^۸ برای مقایسه‌های متعدد استفاده شده است.

۳- یافته‌ها و بحث

در این مقاله امکان رمزگشایی توجه مکانی بر اساس سیگنال‌های LFP ثبت شده از ناحیه‌ی MT میمون بررسی شده است. در طول آزمایش، میمون باید مختصر تغییر جهت حرکت را در یکی از دو مجموعه‌ی نقاط تصادفی روشن (محرک هدف^۹) تشخیص داده و دیگری (یک عامل حواس‌پرتی^{۱۰}) را نادیده می‌گرفت. در نیمی از آزمایش‌ها توجه میمون به محرک هدف قرار گرفته در داخل میدان دریافتی و در نیمه‌ی دیگر آزمایش‌ها توجه به خارج میدان دریافتی است. برای رمزگشایی اطلاعات توجه مکانی، سیگنال‌های LFP هر آزمایش در بازه‌ی زمانی ۲۰۰-۱۲۰۰ میلی‌ثانیه بعد از تحریک (نمایش هر دو محرک) تجزیه و تحلیل شده است. به منظور پردازش سیگنال، پس از انجام مراحل اولیه‌ی آماده‌سازی سیگنال‌های مغزی، ویژگی‌های مناسب با روش‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه بین باندهای فرکانسی سیگنال‌های LFP استخراج شده است. سپس روش اسکالر رتبه‌بندی ویژگی‌ها جهت انتخاب ویژگی‌های موثر استفاده شده و ویژگی‌های حاوی بیش‌ترین اطلاعات مشخص شده است. در مرحله‌ی آخر، رمزگشایی توجه بینایی توسط طبقه‌بندی کننده انجام شده و در نهایت نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها و بهترین ویژگی‌ها با بیش‌ترین تکرار ارائه شده است.

۳-۱- طبقه‌بندی مکان توجه در سیستم بینایی

در این مقاله تزویج درون الکترودی^{۱۱} بین باندهای فرکانسی مختلف سیگنال‌های LFP به عنوان ویژگی در نظر گرفته شده است. از آن‌جا که داده‌های هر آزمایش با ۵ الکتروود ثبت شده و با توجه به ۵ باند فرکانسی (دلتا، تتا، آلفا، بتا و گاما)، برای هر الکتروود ۱۰ ویژگی تزویج محاسبه شده و بنابراین برای هر آزمایش تعداد ۵۰ ویژگی تزویج درون الکتروودی به دست آمده است. این ویژگی‌ها در دو حالت مختلف شامل ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه به صورت جداگانه (هر کدام ۵۰ ویژگی) و

اساس فرضیه‌ی صفر^۱، در صورت عدم وجود تزویج فاز-دامنه، طول بردار میانگین (مقدار PAC) برابر با صفر است. این امر در منحنی قطبی باعث ایجاد تراکم دایره‌ای تقریباً یکسان برای نقاط بردار و به صورت متقارن در اطراف نقطه‌ی صفر می‌شود. در واقع مقادیر A_i برای تمام فازها φ_i یکسان است. در این پژوهش تزویج فاز-دامنه بین باندهای فرکانسی (فاز باند فرکانس پایین با دامنه‌ی باند فرکانس بالا) سیگنال‌های LFP هر الکتروود در هر آزمایش محاسبه شده است. با توجه به ۵ باند فرکانسی، برای هر الکتروود تعداد ۱۰ ویژگی و در مجموع برای هر آزمایش تعداد ۵۰ ویژگی تزویج فاز-دامنه‌ی متقابل فرکانس به دست آمده است.

۳-۳-۲- کاهش و انتخاب ویژگی

هدف اصلی از انتخاب ویژگی، کاهش تعداد ویژگی‌های به کار برده شده برای طبقه‌بندی است به طوری که دقت در حد مطلوب باشد. بنابراین بهترین حالت این است که ویژگی با قدرت تفکیک کم‌تر حذف گردد. در میان الگوریتم‌های ارائه شده جهت انتخاب ویژگی، روش اسکالر رتبه‌بندی ویژگی‌ها^۲ از روش‌های موثر در این زمینه است. مزیت روش اسکالر عمل‌کرد بسیار سریع آن است. در این روش ویژگی‌ها بر حسب اهمیت و بر حسب معیارهای متفاوتی اولویت‌بندی می‌شوند. در این پژوهش برای انتخاب ویژگی‌های مطلوب از معیار ناپارامتریک ویلکاکسون^۳ استفاده شده است زیرا در این روش نرمال بودن توزیع بردار ویژگی‌ها مد نظر نیست.

۳-۳-۴- طبقه‌بندی

طبقه‌بندی کننده‌ی مناسب، نقش مهمی در رمزگشایی توجه بینایی در سیستم بینایی دارد. در این تحقیق برای طبقه‌بندی تمام آزمایش‌های مربوط به دو حالت توجه بینایی (توجه به داخل میدان دریافتی و توجه به خارج میدان دریافتی)، ماشین بردار پشتیبان^۴، k-نزدیک‌ترین همسایه^۵ و آنالیز تفکیک کننده‌ی درجه‌ی دوم^۶ مورد بررسی قرار گرفته است [۵۷، ۵۸]. به منظور اطمینان از صحت نتایج برای نمونه‌های آموزش و تست، از روش اعتبار سنجی متقابل ده‌لایه^۷ استفاده شده است. این روش ده بار تکرار شده و در نهایت میانگین نتایج به عنوان

^۷ 10-Fold Cross-Validation

^۸ False Discovery Rate (FDR)

^۹ Target Stimulus

^{۱۰} Distracter

^{۱۱} Within-Electrode Coupling

^۱ Null Hypothesis

^۲ Scalar Feature-Ranking

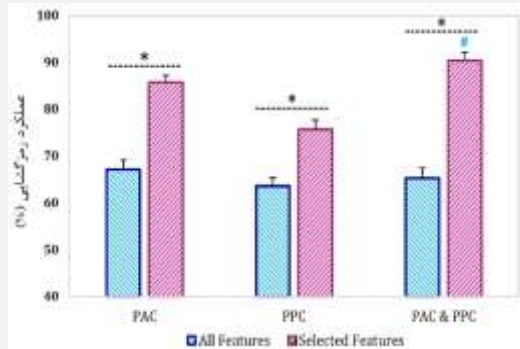
^۳ Wilcoxon Criterion

^۴ Support Vector Machine (SVM)

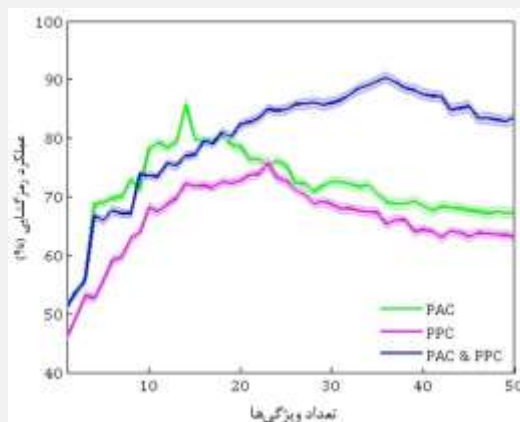
^۵ K Nearest Neighbor (KNN)

^۶ Quadratic Discriminant Analysis (QDA)

ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم^۱ (۱۰۰ ویژگی) به عنوان ورودی طبقه‌بندی کننده در نظر گرفته شده است. تمام آزمایش‌های مربوط به دو حالت توجه بینایی (توجه به داخل میدان دریافتی و توجه به خارج میدان دریافتی) توسط طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان با کرنل تابع پایه‌ی شعاعی^۲ و روش بهینه‌سازی متوالی کمینه^۳، طبقه‌بند k-نزدیک‌ترین همسایه با فاصله‌ی اندازه‌گیری اقلیدسی و قانون نزدیک‌ترین و طبقه‌بند آنالیز تفکیک کننده‌ی درجه‌ی دوم طبقه‌بندی شده است. نتایج کلاس‌بندی مکان توجه با طبقه‌بندی کننده‌های مختلف برای انتخاب بهترین طبقه‌بندی کننده به همراه انحراف معیار استاندارد حول میانگین برای هر ویژگی در شکل (۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در تمام ویژگی‌ها، ضعیف‌ترین عمل کرد با طبقه‌بند QDA به دست آمده و طبقه‌بند SVM عمل کرد بالاتری را در مقایسه با سایر طبقه‌بندی کننده‌ها در تمام ویژگی‌ها ارائه کرده است. از این رو تحلیل‌های قسمت‌های بعدی با استفاده از طبقه‌بندی کننده‌ی SVM که بیش‌ترین عمل کرد را در رمزگشایی توجه بینایی دارد انجام شده است.



شکل (۳) - عمل کرد رمزگشایی توجه بینایی با استفاده از ویژگی‌های تزویج متقابل فرکانس، ستاره تفاوت معناداری در عمل کرد رمزگشایی بین حالت با انتخاب ویژگی و بدون انتخاب ویژگی را نشان می‌دهد (* نشان دهنده $p < 0.01$ با آزمون ویلکاکسون دو طرفه، # نشان دهنده $p < 0.05$ با آزمون ویلکاکسون، FDR برای مقایسه‌های متعدد)، نمودار خطا انحراف معیار استاندارد حول میانگین را نشان می‌دهد

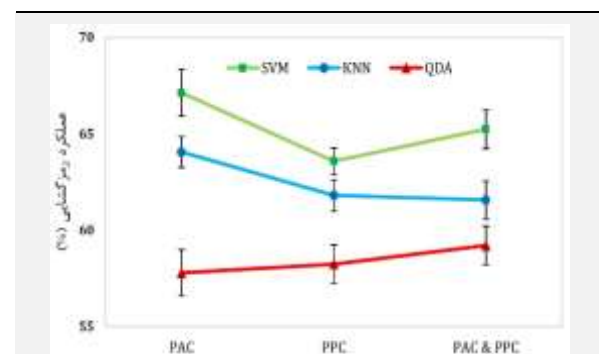


شکل (۴) - شاخص عمل کرد رمزگشایی توجه بینایی مبتنی بر تجزیه و تحلیل رتبه‌بندی ویژگی‌ها، منحنی‌ها دقت رمزگشایی را به عنوان تابعی از ویژگی‌های انتخاب شده با افزایش تعداد ویژگی‌ها به ازای هر کدام از ویژگی‌های تزویج متقابل فرکانس نشان می‌دهند

۳-۲- ویژگی‌های موثر در رمزگشایی مکان توجه

در این بخش به بررسی ویژگی‌های بهینه‌ی انتخاب شده پرداخته شده است تا مشخص شود کدام ویژگی‌ها اطلاعات بیش‌تر و نقش موثرتری در بهبود بازده طبقه‌بندی کننده دارند.

به منظور بررسی تاثیر انتخاب ویژگی، نتایج به ازای هر نوع ویژگی یک مرتبه بدون انتخاب ویژگی و یک مرتبه با انتخاب ویژگی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم انتخاب ویژگی برای تمام حالت‌های در نظر گرفته شده، عمل کرد رمزگشایی توجه بینایی را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده به طوری که به ازای ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم، با و بدون انتخاب ویژگی دقت رمزگشایی با آزمون ویلکاکسون دو طرفه به ترتیب $90.36 \pm 1.8\%$ و $65.24 \pm 2.2\%$



شکل (۲) - عمل کرد رمزگشایی توجه بینایی با طبقه‌بندی کننده‌های مختلف با استفاده از ویژگی‌های تزویج درون الکترودی، طبقه‌بند SVM دقت بالاتری را در مقایسه با سایر طبقه‌بندی کننده‌ها در تمام ویژگی‌ها ارائه کرده است، نمودار خطا، انحراف معیار استاندارد حول میانگین را نشان می‌دهد

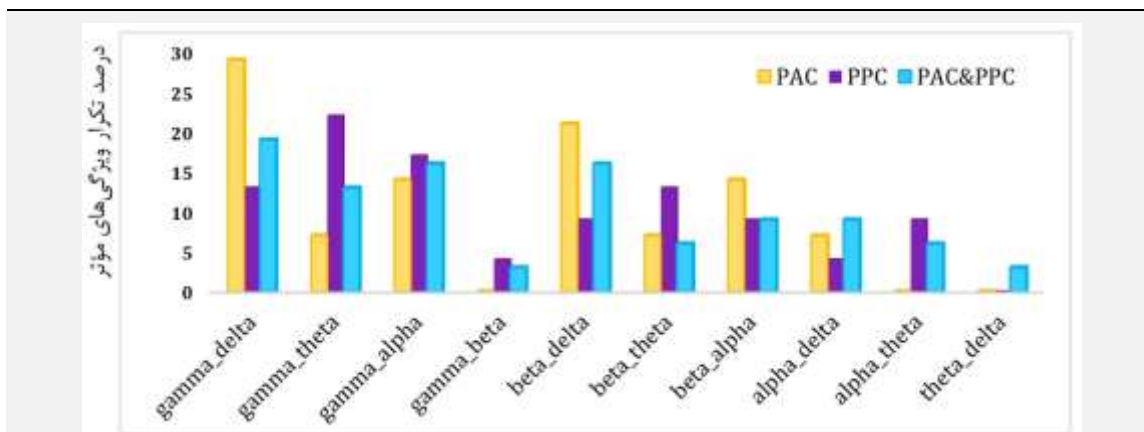
^۱ Sequential Minimal Optimization (SMO)

^۱ PAC & PPC

^۲ Radian Base Function (RBF)

بینایی می‌باشند. بر اساس بسیاری از مطالعات مربوط به تزویج بین باندهای فرکانسی طی فعالیت‌های شناختی، اغلب بین یک باند فرکانسی بالا با یک باند فرکانسی پایین تزویج معناداری گزارش شده است [۵۲، ۵۹]. برای مثال بین باندهای گاما و تتا، مانند آن چه در نتایج مقاله‌ی حاضر به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که استراتژی رمزگذاری اطلاعات با تزویج متقابل فرکانس زمانی کارآمدتر است که تزویج بین فعالیت‌های نوسانی فرکانس‌های بالا و فرکانس‌های پایین رخ دهد.

درصد تکرار ویژگی‌های تزویج انتخاب شده برای رسیدن به حداکثر مقدار عمل‌کرد رمزگشایی توجه بینایی در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تزویج فاز-فاز ویژگی‌های گاما-گاما-تتا و گاما-آلفا، در تزویج فاز-دامنه ویژگی‌های گاما-دلتا و بتا-دلتا و در تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم ویژگی‌های گاما-دلتا، گاما-آلفا و بتا-دلتا پرتکرارترین ویژگی‌ها در بین سایر ویژگی‌ها هستند. بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد که این ویژگی‌ها حاوی بیش‌ترین اطلاعات رمزگشایی توجه



شکل (۵) - درصد تکرار ویژگی‌های موثر تزویج متقابل فرکانس، از میان ویژگی‌های بهینه‌ی انتخاب شده برای سه حالت مختلف در نظر گرفته شده، درصد تکرار هر کدام از ده ویژگی تزویج بین باندهای فرکانسی نشان داده شده است

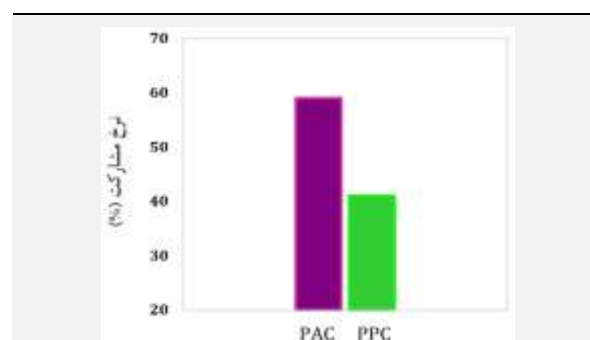
۳-۴ - مقایسه با مطالعات گذشته

در مطالعات گذشته نقش عمل‌کردی تزویج متقابل فرکانس به عنوان ویژگی‌های کارآمد حاصل از سیگنال‌های LFP، جهت رمزگشایی توجه بینایی مورد بررسی قرار نگرفته است. در برخی مطالعات استفاده از روش‌های تزویج به منظور تجزیه و تحلیل سیگنال‌های EEG بررسی شده است. در مقاله‌ی [۶۰] از تزویج بین باندهای فرکانسی سیگنال‌های EEG جهت شناسایی اشیا استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ویژگی‌های تزویج به مراتب عمل‌کرد بهتری نسبت به ضرایب موجک دارد. هم‌چنین در مطالعه‌ی [۶۱] با استفاده از ویژگی‌های تزویج متقابل فرکانس سیگنال‌های EEG، رمزگشایی رنگ و جهت در طول توجه بینایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که تزویج متقابل فرکانسی می‌تواند در رمزگشایی حالات مختلف توجه بینایی به کار گرفته شود [۶۱]. با این وجود رمزگشایی توجه بینایی با استفاده از تزویج بین باندهای فرکانسی سیگنال‌های LFP تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این بخش عمل‌کرد الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش با روش انجام شده در مطالعه‌ی [۳۶] که از ویژگی‌های مختلف

۳-۳ - نرخ مشارکت ویژگی‌های انتخاب شده

نسبت مشارکت ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه‌ی انتخاب شده در حالتی که تمام ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم به عنوان ورودی طبقه‌بندی کننده در نظر گرفته شده، در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ویژگی‌های تزویج فاز-دامنه با نرخ مشارکت ۵۹٪ بیش‌ترین سهم را در بین ویژگی‌های انتخاب شده دارند. این درصد مشارکت بالاتر ویژگی‌های تزویج فاز-دامنه، نتایج به دست آمده در شکل (۳) که این ویژگی‌ها عمل‌کرد بهتری در رمزگشایی توجه بینایی نسبت به ویژگی‌های تزویج فاز-فاز دارند را تایید می‌نماید.



شکل (۶) - نرخ مشارکت ویژگی‌های انتخاب شده‌ی تزویج متقابل فرکانس

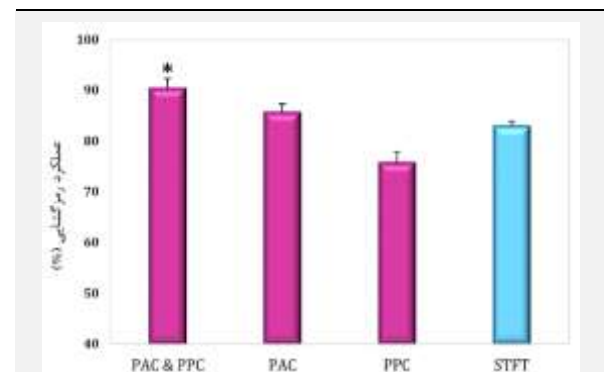


فرکانسی سیگنال‌های LFP شامل باندهای دلتا، تتا، آلفا، بتا و گاما مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش نشان داده شده است که استفاده از روش اسکالر رتبه‌بندی ویژگی‌ها به طور قابل توجهی منجر به بهبود عمل‌کرد رمزگشایی توجه بینایی می‌شود. از میان ویژگی‌های بهینه‌ی انتخاب شده، ویژگی‌های گاما-دلتا، گاما-آلفا و بتا-دلتا دارای بالاترین درصد تکرار می‌باشند بنابراین می‌توان بیان نمود که این ویژگی‌ها موثرترین ویژگی‌ها در بهبود عمل‌کرد بوده و حاوی بیش‌ترین اطلاعات رمزگشایی توجه مکانی در سیستم بینایی هستند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ویژگی‌های تزویج متقابل فرکانس در مقایسه با ویژگی‌های زمان-فرکانس می‌تواند منجر به عمل‌کرد بهتری در طبقه‌بندی توجه بینایی شود. این حاکی از آن است که تزویج بین فعالیت‌های نوسانی در باندهای فرکانسی مختلف حاوی اطلاعات بیش‌تری در مورد توجه بینایی بوده و این روش ممکن است نقش مهم‌تری در رمزگشایی توجه مکانی در سیستم بینایی مغز داشته باشد.

زمان-فرکانس برای رمزگشایی توجه بینایی استفاده کرده، مقایسه شده است. در مطالعه‌ی [۳۶] پس از تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مختلف، بهترین عمل‌کرد با ویژگی‌های تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه^۱ و طبقه‌بند SVM به دست آمده است. با مقایسه‌ی نتایج همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، استفاده از ویژگی‌های تزویج فاز-دامنه و ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم منجر به دقت طبقه‌بندی بهتری نسبت به ویژگی‌های STFT شده، اما تزویج فاز-فاز نتوانسته است عمل‌کرد را بهبود بخشد. بنابراین می‌توان بیان کرد که استفاده از روش‌های مختلف استخراج ویژگی ممکن است بر نتایج تاثیرگذار باشد. با این وجود تفاوت معناداری بین توانایی ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم (با تعداد ۳۶ ویژگی) و ویژگی‌های STFT (با تعداد ۲۰۰ ویژگی) برای رمزگشایی اطلاعات مربوط به توجه مکانی مشاهده می‌شود. در نتیجه تزویج متقابل فرکانس حاوی اطلاعات بیش‌تری نسبت به ویژگی‌های زمان-فرکانس برای طبقه‌بندی توجه مکانی در سیستم بینایی است.

۶- مراجع

- [1] M. Carrasco, "Visual attention: The past 25 years," *Vision Res.*, vol. 51, no. 13, pp. 1484–1525, 2011.
- [2] M. R. Cohen and J. H. R. Maunsell, "Using neuronal populations to study the mechanisms underlying spatial and feature attention," *Neuron*, vol. 70, no. 6, pp. 1192–1204, 2011.
- [3] P. S. Khayat, R. Niebergall, and J. C. Martinez-Trujillo, "Frequency-dependent attentional modulation of local field potential signals in macaque area MT," *J. Neurosci.*, vol. 30, no. 20, pp. 7037–7048, 2010.
- [4] J. Ekanayake, C. Hutton, G. Ridgway, F. Scharnowski, N. Weiskopf, and G. Rees, "Real-time decoding of covert attention in higher-order visual areas," *Neuroimage*, vol. 169, pp. 462–472, 2018.
- [5] A. Ahmadi, S. Davoudi, M. Behroozi, and M. R. Daliri, "Decoding covert visual attention based on phase transfer entropy," *Physiol. Behav.*, vol. 222, p. 112932, 2020.
- [6] A. Gaume, G. Dreyfus, and F.-B. Vialatte, "A cognitive brain-computer interface monitoring sustained attentional variations during a continuous task," *Cogn. Neurodyn.*, vol. 13, no. 3, pp. 257–269, 2019.
- [7] M. R. Daliri, "A hybrid method for the decoding of spatial attention using the MEG brain signals," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 10, pp. 308–312, 2014.
- [8] D. Zhang, A. Maye, X. Gao, B. Hong, A. K. Engel, and S. Gao, "An independent brain--



شکل (۷) - مقایسه‌ی عمل‌کرد رمزگشایی توجه بینایی با استفاده از ویژگی‌های تزویج پیشنهادی در این مقاله و مقاله‌ی [۳۶]. با ویژگی‌های تزویج فاز-فاز و فاز-دامنه با هم بهترین عمل‌کرد رمزگشایی توجه بینایی حاصل شده است (* نشان دهنده‌ی $p < 0.05$ با آزمون ویلکاکسون، FDR برای مقایسه‌های متعدد). نمودار خطا انحراف معیار استاندارد حول میانگین را نشان می‌دهد

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه توانایی رمزگشایی توجه مکانی در سیستم بینایی با استفاده از سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی ناحیه‌ی تمپورال میانی مغز میمون نشان داده شده است. به منظور استخراج اطلاعات، ویژگی‌های تزویج بین باندهای مختلف

^۱ Short Time Fourier Transform (STFT)



- surround interactions in macaque visual area v4,” *Neuron*, vol. 61, no. 6, pp. 952–963, 2009.
- [24] J. C. Martinez-Trujillo and S. Treue, “Feature-based attention increases the selectivity of population responses in primate visual cortex,” *Curr. Biol.*, vol. 14, no. 9, pp. 744–751, 2004.
- [25] T. Liu and I. Mance, “Constant spread of feature-based attention across the visual field,” *Vision Res.*, vol. 51, no. 1, pp. 26–33, 2011.
- [26] C. J. McAdams and J. H. R. Maunsell, “Attention to both space and feature modulates neuronal responses in macaque area V4,” *J. Neurophysiol.*, vol. 83, no. 3, pp. 1751–1755, 2000.
- [27] S. Katzner, L. Busse, and S. Treue, “Attention to the color of a moving stimulus modulates motion-signal processing in macaque area MT: evidence for a unified attentional system,” *Front. Syst. Neurosci.*, vol. 3, p. 12, 2009.
- [28] G. Ibos and D. J. Freedman, “Interaction between spatial and feature attention in posterior parietal cortex,” *Neuron*, vol. 91, no. 4, pp. 931–943, 2016.
- [29] D. R. Patzwahl and S. Treue, “Combining spatial and feature-based attention within the receptive field of MT neurons,” *Vision Res.*, vol. 49, no. 10, pp. 1188–1193, 2009.
- [30] M. R. Nazari, A. M. Nasrabadi, and M. R. Daliri, “Single-Trial Decoding of Motion Direction During Visual Attention From Local Field Potential Signals,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 66450–66461, 2021.
- [31] D. A. Kaliukhovich and R. Vogels, “Decoding of repeated objects from local field potentials in macaque inferior temporal cortex,” *PLoS One*, vol. 8, no. 9, p. e74665, 2013.
- [32] S. Tremblay, G. Doucet, F. Pieper, A. Sachs, and J. Martinez-Trujillo, “Single-trial decoding of visual attention from local field potentials in the primate lateral prefrontal cortex is frequency-dependent,” *J. Neurosci.*, vol. 35, no. 24, pp. 9038–9049, 2015.
- [33] D. Wang et al., “Long-term decoding stability of local field potentials from silicon arrays in primate motor cortex during a 2D center out task,” *J. Neural Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 36009, 2014.
- [34] R. D. Flint, E. W. Lindberg, L. R. Jordan, L. E. Miller, and M. W. Sutzky, “Accurate decoding of reaching movements from field potentials in the absence of spikes,” *J. Neural Eng.*, vol. 9, no. 4, p. 46006, 2012.
- [35] M. W. Sutzky, L. R. Jordan, E. W. Lindberg, K. E. Lindsay, and L. E. Miller, “Decoding the rat forelimb movement direction from epidural and intracortical field potentials,” *J. Neural Eng.*, vol. 8, no. 3, p. 36013, 2011.
- [36] Z. Seif and M. R. Daliri, “Evaluation of local field potential signals in decoding of visual attention,” *Cogn. Neurodyn.*, vol. 9, no. 5, pp. 509–522, 2015.
- computer interface using covert non-spatial visual selective attention,” *J. Neural Eng.*, vol. 7, no. 1, p. 16010, 2010.
- [9] L. Tonin, R. Leeb, A. Sobolewski, and J. Del R Millán, “An online EEG BCI based on covert visuospatial attention in absence of exogenous stimulation,” *J. Neural Eng.*, vol. 10, no. 5, p. 56007, 2013.
- [10] Z. Oralhan, “A new paradigm for region-based P300 speller in brain computer interface,” *Ieee Access*, vol. 7, pp. 106618–106627, 2019.
- [11] C. J. Ortiz-Echeverri et al., “A new approach for motor imagery classification based on sorted blind source separation, continuous wavelet transform, and convolutional neural network,” *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4541, 2019.
- [12] T. Milekovic et al., “Stable long-term BCI-enabled communication in ALS and locked-in syndrome using LFP signals,” *J. Neurophysiol.*, vol. 120, no. 7, pp. 343–360, 2018.
- [13] J. A. Perge et al., “Reliability of directional information in unsorted spikes and local field potentials recorded in human motor cortex,” *J. Neural Eng.*, vol. 11, no. 4, p. 46007, 2014.
- [14] G. Buzsáki, C. A. Anastassiou, and C. Koch, “The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 13, no. 6, pp. 407–420, 2012.
- [15] J. W. Bisley, “The neural basis of visual attention,” *J. Physiol.*, vol. 589, no. 1, pp. 49–57, 2011.
- [16] P. Fries, J. H. Reynolds, A. E. Rorie, and R. Desimone, “Modulation of oscillatory neuronal synchronization by selective visual attention,” *Science (80-.)*, vol. 291, no. 5508, pp. 1560–1563, 2001.
- [17] P. Fries, T. Womelsdorf, R. Oostenveld, and R. Desimone, “The effects of visual stimulation and selective visual attention on rhythmic neuronal synchronization in macaque area V4,” *J. Neurosci.*, vol. 28, no. 18, pp. 4823–4835, 2008.
- [18] M. Vinck et al., “Attentional modulation of cell-class-specific gamma-band synchronization in awake monkey area v4,” *Neuron*, vol. 80, no. 4, pp. 1077–1089, 2013.
- [19] B. Schledde et al., “Task-specific, dimension-based attentional shaping of motion processing in monkey area MT,” *J. Neurophysiol.*, vol. 118, no. 3, pp. 1542–1555, 2017.
- [20] V. Kozyrev, M. R. Daliri, P. Schwedhelm, and S. Treue, “Strategic deployment of feature-based attentional gain in primate visual cortex,” *PLoS Biol.*, vol. 17, no. 8, p. e3000387, 2019.
- [21] J. R. Hembrook-Short, V. L. Mock, and F. Briggs, “Attentional modulation of neuronal activity depends on neuronal feature selectivity,” *Curr. Biol.*, vol. 27, no. 13, pp. 1878–1887, 2017.
- [22] J. H. Reynolds and D. J. Heeger, “The normalization model of attention,” *Neuron*, vol. 61, no. 2, pp. 168–185, 2009.
- [23] K. A. Sundberg, J. F. Mitchell, and J. H. Reynolds, “Spatial attention modulates center-

- [50] T. Yanagisawa et al., "Regulation of motor representation by phase--amplitude coupling in the sensorimotor cortex," *J. Neurosci.*, vol. 32, no. 44, pp. 15467–15475, 2012.
- [51] P. Tass et al., "Detection of n:m Phase Locking from Noisy Data: Application to Magnetoencephalography," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, no. 15, pp. 3291–3294, Oct. 1998, doi: 10.1103/PhysRevLett.81.3291.
- [52] R. Scheffer-Teixeira and A. B. L. Tort, "On cross-frequency phase-phase coupling between theta and gamma oscillations in the hippocampus," *Elife*, vol. 5, p. e20515, 2016.
- [53] C. Zheng, K. W. Bieri, Y.-T. Hsiao, and L. L. Colgin, "Spatial sequence coding differs during slow and fast gamma rhythms in the hippocampus," *Neuron*, vol. 89, no. 2, pp. 398–408, 2016.
- [54] M. J. Soltanzadeh and M. R. Daliri, "Evaluation of phase locking and cross correlation methods for estimating the time lag between brain sites: A simulation approach," *Basic Clin. Neurosci.*, vol. 5, no. 3, p. 205, 2014.
- [55] W. D. Penny, E. Duzel, K. J. Miller, and J. G. Ojemann, "Testing for nested oscillation," *J. Neurosci. Methods*, vol. 174, no. 1, pp. 50–61, 2008.
- [56] J.-P. Lachaux, E. Rodriguez, J. Martinerie, and F. J. Varela, "Measuring phase synchrony in brain signals," *Hum. Brain Mapp.*, vol. 8, no. 4, pp. 194–208, 1999.
- [57] S. B. Kotsiantis et al., "Supervised machine learning: A review of classification techniques," *Emerg. Artif. Intell. Appl. Comput. Eng.*, vol. 160, no. 1, pp. 3–24, 2007.
- [58] S. Srivastava, M. R. Gupta, and B. A. Frigyik, "Bayesian quadratic discriminant analysis," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 8, no. 6, 2007.
- [59] J. W. Kim, J. Lee, H.-J. Kim, Y. S. Lee, and K. J. Min, "Relationship between theta-phase gamma-amplitude coupling and attention-deficit/hyperactivity behavior in children," *Neurosci. Lett.*, vol. 590, pp. 12–17, 2015.
- [60] S. Jafakesh, F. Z. Jahromy, and M. R. Daliri, "Decoding of object categories from brain signals using cross frequency coupling methods," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 27, pp. 60–67, 2016.
- [61] S. Davoudi, A. Ahmadi, and M. R. Daliri, "Frequency--amplitude coupling: a new approach for decoding of attended features in covert visual attention task," *Neural Comput. Appl.*, pp. 1–16, 2020.
- [37] V. Jirsa and V. Müller, "Cross-frequency coupling in real and virtual brain networks," *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 7, p. 78, 2013.
- [38] R. Kaplan et al., "Medial prefrontal theta phase coupling during spatial memory retrieval," *Hippocampus*, vol. 24, no. 6, pp. 656–665, 2014.
- [39] O. Jensen, B. Gips, T. O. Bergmann, and M. Bonnefond, "Temporal coding organized by coupled alpha and gamma oscillations prioritize visual processing," *Trends Neurosci.*, vol. 37, no. 7, pp. 357–369, 2014.
- [40] A. Hyafil, A.-L. Giraud, L. Fontolan, and B. Gutkin, "Neural cross-frequency coupling: connecting architectures, mechanisms, and functions," *Trends Neurosci.*, vol. 38, no. 11, pp. 725–740, 2015.
- [41] R. T. Canolty et al., "High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex," *Science (80-)*, vol. 313, no. 5793, pp. 1626–1628, 2006.
- [42] R. T. Canolty and R. T. Knight, "The functional role of cross-frequency coupling," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 14, no. 11, pp. 506–515, 2010.
- [43] N. Axmacher, M. M. Henseler, O. Jensen, I. Weinreich, C. E. Elger, and J. Fell, "Cross-frequency coupling supports multi-item working memory in the human hippocampus," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 107, no. 7, pp. 3228–3233, 2010.
- [44] K. Whittingstall and N. K. Logothetis, "Frequency-band coupling in surface EEG reflects spiking activity in monkey visual cortex," *Neuron*, vol. 64, no. 2, pp. 281–289, 2009.
- [45] E. Spaak, M. Bonnefond, A. Maier, D. A. Leopold, and O. Jensen, "Layer-specific entrainment of gamma-band neural activity by the alpha rhythm in monkey visual cortex," *Curr. Biol.*, vol. 22, no. 24, pp. 2313–2318, 2012.
- [46] A. B. L. Tort, R. W. Komorowski, J. R. Manns, N. J. Kopell, and H. Eichenbaum, "Theta--gamma coupling increases during the learning of item--context associations," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 106, no. 49, pp. 20942–20947, 2009.
- [47] J. E. Lisman and O. Jensen, "The theta-gamma neural code," *Neuron*, vol. 77, no. 6, pp. 1002–1016, 2013.
- [48] S. Raghavachari et al., "Gating of human theta oscillations by a working memory task," *J. Neurosci.*, vol. 21, no. 9, pp. 3175–3183, 2001.
- [49] M. X. Cohen, C. E. Elger, and J. Fell, "Oscillatory activity and phase--amplitude coupling in the human medial frontal cortex during decision making," *J. Cogn. Neurosci.*, vol. 21, no. 2, pp. 390–402, 2008.