

# КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
2023

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман

УДК 159.9  
ББК 88.25  
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 21 – 22 июня 2023 г. Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. – М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа. 2023 г. – 604 стр.

© Авторы статей, 2023

ISBN 978-5-4465-3880-5

УДК 159.9  
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-3880-5

© Авторы статей, 2023

## **РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ РИТМИЧЕСКОЙ КОРТИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ: ПОДХОД НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

А. Е. Кубяк\*, Н. П. Федосов, А. Е. Осадчий

[kubyaka4@gmail.com](mailto:kubyaka4@gmail.com)

НИУ ВШЭ, Москва

**Аннотация.** В традиционных исследованиях кортикальной активности предполагалось разделение пространственной и временной составляющих, а также использовалось такое представление нейронных данных, как усреднение по испытаниям, что не всегда подходит для изучения явлений с высокой изменчивостью. Тем временем как инвазивные, так и неинвазивные методы регистрации позволили обнаружить бегущие волны нейронной активности в различных областях мозга в разных контекстах, что делает статическую модель источников неприменимой. Традиционный подход к анализу данных ЭЭГ/МЭГ не учитывает локальных движений источника и предполагает, что изменения в сигналах сенсоров отражают исключительно колебания электрической активности. Для учета динамической природы источника и разделения пространственных и электрических компонентов его активности требуются новые методы. Мы предлагаем подход, который моделирует пространственную компоненту с помощью локальной прямой модели на основе данных многоканальной ЭЭГ и электрическую ритмическую компоненту как частотно модулированный процесс. Затем мы используем сигма-точечный фильтр Калмана (UKF, Unscented Kalman filter) для решения возникающей нелинейной задачи и сравниваем наш подход с классическими методами. Предложенную методику можно использовать как в интерфейсах мозг-компьютер, так и в широком спектре нейрокогнитивных экспериментов для повышения точности при состоянии зависимой стимуляции мозга.

**Ключевые слова:** бегущие кортикальные волны, ритмы мозга, динамическое моделирование, фильтр Калмана, ЭЭГ, МЭГ

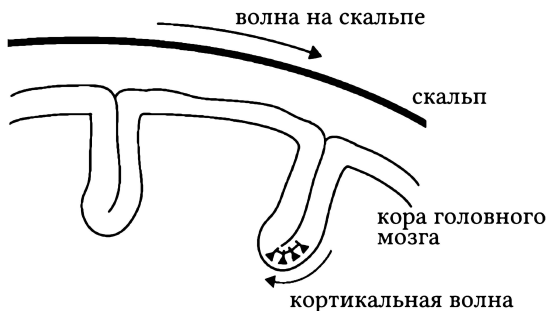
Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2023 году.

### **Введение**

Многие современные подходы к оценке нейронной активности мозга используют предположение о разделении пространственной и временной состав-

ляющих для кортикальных источников. Данное предположение означает, что электрическая активность коры может быть представлена как линейная комбинация нескольких источников. Это предположение об аддитивности было заложено и в «методе вычитания» Ф. Дондерса (Donders, 1969) для исследования времени реакции, и во многих современных методах анализа данных ЭЭГ, МЭГ и фМРТ. Эти широко распространенные в когнитивной нейронауке методы позволяют визуализировать активность и сделать вывод о когнитивных операциях, вычитая результаты измерений из базового состояния (базовой линии) или проводя усреднение измерений по испытаниям.

Однако предположения об аддитивности или о пространственно-временной делимости кортикальных источников верны только в случае статических источников, что не всегда выполняется (Alexander и др., 2015). Действительно, технологии многоканальных записей (как инвазивных, так и неинвазивных) позволили обнаружить бегущие волны нейронной активности в разных областях мозга в различных контекстах. Бегущие волны могут иметь различную природу возникновения и затухания, различные функциональные роли и могут быть разных масштабов, распространяться с разной скоростью (Muller и др., 2018; Hindriks и др., 2014).



**Рисунок 1.** Схематическая иллюстрация внутрикортикальной гипотезы распространения альфа-колебаний коры головного мозга (Hindriks et al., 2014)

Получается, что электрическая активность мозга, регистрируемая с помощью удаленно расположенных датчиков (ЭЭГ/МЭГ), зависит как от электрической активности источника, так и от его геометрических свойств. Традиционный подход не учитывает локальных движений источника и предполагает, что изменения в сигналах датчиков отражают исключительно колебания электрической активности. Таким образом, необходимы новые методы, которые будут учитывать динамическую природу источника и смогут разделить пространственные и электрические компоненты его активности.

### Методика

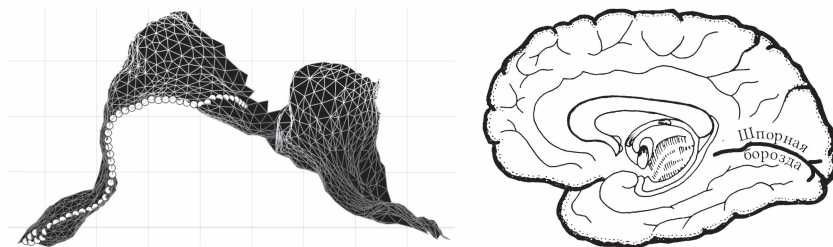
Симуляция кортикальной волны выполнялась в два этапа. Сначала на кортикальной сетке (полученной в программе Brainstorm по данным МРТ) был сре-

нерирован путь (см. рис. 2). Путь пролегал вдоль шпорной борозды, которая считается одним из основных мест генерации альфа-ритма в головном мозге. Затем был сгенерирован временной ряд альфа-колебаний источника как частотно-модулированный процесс (Matsuda, Komaki, 2017). Распределение электрической активности по сгенерированному пути определялось как функция Гаусса с плавно меняющимся во времени аргументом.

Для оценки сигнала мы применяли фильтр Калмана (Faragher, 2012). В качестве наблюдений мы использовали данные МЭГ, а в качестве математической модели наблюдений следующее уравнение:

$$(1) \mathbf{y}(t) = s(t) \sum_{i=1}^3 a_i(t) \mathbf{u}_i + \mathbf{v}(t)$$

где  $\mathbf{y}(t)$  – вектор наблюдений;  $s(t)$  – временной ряд альфа-колебаний источника;  $\mathbf{u}_i$  – три первых левых сингулярных вектора, полученных с помощью сингулярного разложения данных измерений (то есть они составляют подпространство сигнала);  $\mathbf{v}(t)$  – вектор шума наблюдений;  $a_i(t)$  – динамические коэффициенты, которые отвечают за скорость изменения топографий источника при перемещении в пространстве. Таким образом, линейная комбинация сингулярных векторов в каждый момент времени моделирует топографию источника.

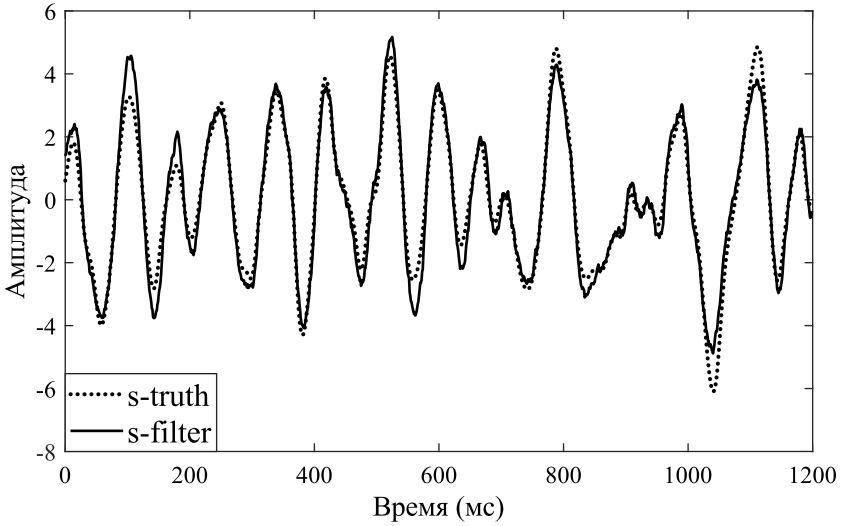


**Рисунок 2.** Путь бегущей волны по кортикальной сетке. Участок сетки соответствует шпорной борозде

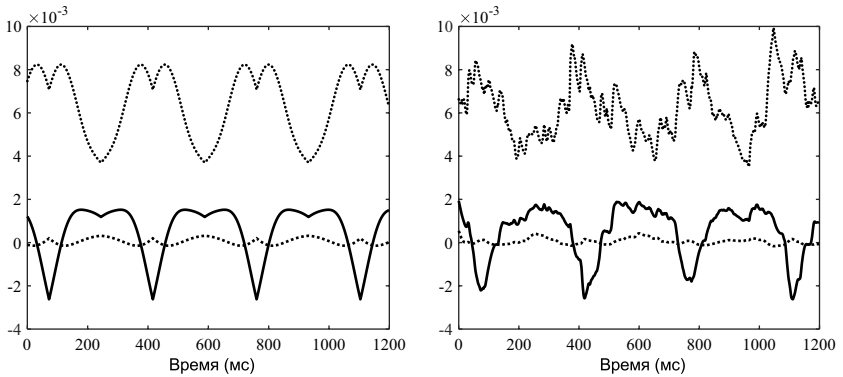
Вектор состояний в момент времени  $t$  включает в себя амплитуду электрических колебаний источника  $s(t)$  и динамические коэффициенты  $a_i(t)$ . Таким образом, математическая модель наблюдений (1) является нелинейной относительно вектора состояний динамической системы, в связи с чем был использован сигматочечный фильтр Калмана (UKF, Unscented Kalman filter; Wan, Merwe, 2001).

## Результаты

Сигматочечный фильтр Калмана позволил оценить не только колебания электрической активности, но и динамические коэффициенты  $a_i(t)$ , которые дают возможность отследить пространственные изменения источника. Результаты фильтрации показаны на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3.** Результат фильтрации: s-truth – истинные альфа-колебания источника, s-filter – оценка, полученная сигматочечным фильтром Калмана



**Рисунок 4.** Иллюстрация динамических коэффициентов  $a_i(t)$ . Слева: значения коэффициентов, полученные из проекции наблюдений на подпространство сигнала. Справа: оценки коэффициентов, полученные при использовании сигматочечного фильтра Калмана. Коэффициенты  $a_i(t)$  являются безразмерной величиной

Коэффициент корреляции между истинным сигналом электрической активности источника и его оценкой, полученной с помощью сигматочечного фильтра Калмана, составляет .97. При оценке динамических коэффициентов  $a_i(t)$  корреляция между истинными значениями и оценками составила .02, .92, .89 соответственно для каждого из трех коэффициентов  $a_i(t)$ .

*Ограничения:* на данный момент предложенный метод опробован только на смоделированных данных. Следующий этап проверки работоспособности на реальных данных МЭГ планируется в ближайшее время.

## Обсуждение и выводы

Для того чтобы оценить эффективность полученного метода и повышение точности слежения за электрической компонентой активности нейронального источника, для сравнительного анализа был выбран классический фильтр Калмана, который не учитывал локальные движения источника, а рассматривал исключительно его электрическую динамику. В результате фильтрации была получена оценка электрической активности источника, и коэффициент корреляции с истинным сигналом составил .799.

Таким образом, разработанный подход позволяет оценивать смоделированную активность кортикальных источников с более высокой точностью, а также способен выделить как электрическую составляющую динамики источника, так и пространственную.

Предложенную методику можно использовать как в интерфейсах мозг-компьютер для более надежного обнаружения десинхронизации ритма, так и в широком спектре нейрокогнитивных экспериментов для определения состояния мозга и облегчения контекстно зависимого взаимодействия с мозгом.

## Литература

Alexander D.M., Trengove C., van Leeuwen C. Donders is dead: Cortical traveling waves and the limits of mental chronometry in cognitive neuroscience // *Cognitive Processing*. 2015. Vol. 16. No. 4. P. 365 – 375. <https://doi.org/10.1007/s10339-015-0662-4>

Donders F.C. On the speed of mental processes // *Acta Psychologica*. 1969. Vol. 30. P. 412 – 431. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90065-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90065-1)

Faragher R. Understanding the basis of the Kalman filter via a simple and intuitive derivation [Lecture notes] // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2012. Vol. 29. No. 5. P. 128 – 132. <https://doi.org/10.1109/msp.2012.2203621>

Hindriks R., van Putten M.J.A.M., Deco G. Intra-cortical propagation of EEG alpha oscillations // *NeuroImage*. 2014. Vol. 103. P. 444 – 453. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.08.027>

Matsuda T., Komaki F. Time series decomposition into oscillation components and phase estimation // *Neural Computation*. 2017. Vol. 29. No. 2. P. 332 – 367. [https://doi.org/10.1162/NECO\\_a\\_00916](https://doi.org/10.1162/NECO_a_00916)

Muller L., Chavane F., Reynolds J., Sejnowski T. Cortical travelling waves: Mechanisms and computational principles // *Nature Reviews Neuroscience*. 2018. Vol. 19. No. 5. P. 255 – 268. <https://doi.org/10.1038/nrn.2018.20>

Wan E.A., van der Merwe R. The unscented Kalman filter // *Kalman Filtering and Neural Networks* / S. Haykin (Ed.). N.Y.: Wiley, 2001. P. 221 – 280. <https://doi.org/10.1002/0471221546.ch7>

## SEPARATING SPATIAL AND ELECTRICAL COMPONENTS OF NEOCORTICAL RHYTHMIC ACTIVITY: A DYNAMIC MODELING APPROACH

A. E. Kubyak\*, N. P. Fedosov, A. E. Ossadtchi  
[kubyaka4@gmail.com](mailto:kubyaka4@gmail.com)

National Research University Higher School of Economics, Moscow

**Abstract.** Traditional studies on cortical activity relied on the assumption of space-time separability and neural data representation as across-trial averages. However, both invasive and noninvasive recording techniques detected traveling waves of neural activity in different brain areas in various contexts, invalidating the space-time separability assumption and making the static sources phenomenon inapplicable. The classical approach to analyzing non-invasive EEG/MEG data does not account for local movements of the source and assumes that the changes in the sensor signals exclusively reflect the fluctuation of electrical activity. Meanwhile, a significant amount of EEG and MEG signal variance may come from the spatial alterations of geometric properties of active neuronal populations. New methods are needed that consider the dynamic nature of the source and separate the spatial and electrical components of its activity. We propose an approach that models the spatial component using a local forward model from multichannel MEG data and the rhythmic electrical component as a frequency-modulated process. We employ the Unscented Kalman Filter to solve the resulting non-linear estimation problem aimed at recovering the electrical and spatial components of the neuronal dynamics underlying the measured MEG data and compare our technique with classical methods. The proposed methodology can be used for more reliable detection of rhythm desynchronization, which may become useful in brain-computer interfaces and in neurocognitive experiments for detecting brain states and facilitating context-dependent interactions with the brain.

**Keywords:** cortical traveling waves, brain rhythm, dynamic modeling, Kalman Filter, EEG, MEG

The study was implemented in the framework of the Basic Research Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE University) in 2023.