

## Программный комплекс для анализа данных магнитной энцефалографии методом виртуальных электродов

Рыкунова Е.Д.<sup>1,2</sup>, Рыкунов С.Д.<sup>1</sup>, Бойко А.И.<sup>1</sup>, Устинин М.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИМПБ РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (Государственный университет)

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

Создан метод виртуальных электродов для изучения электрической активности головного мозга человека с помощью неинвазивных внешних измерений магнитного поля. По данным магнитной энцефалографии строится функциональная томограмма – пространственное распределение источников поля на дискретной сетке. Функциональная томограмма отображает на пространство головы информацию, содержащуюся в многоканальных временных рядах энцефалограммы. Это достигается решением обратной задачи для всех элементарных осцилляций, выделяемых с помощью преобразования Фурье. Каждой частоте осцилляции соответствует узел трехмерной сетки, в котором располагается источник. Пользователь задает местоположение, размер и форму области мозга для детального изучения частотной структуры функциональной томограммы – виртуальный электрод. Совокупность осцилляций, попавших в заданную область, представляет собой парциальный спектр данной области. С помощью этого спектра можно восстановить временные ряды энцефалограммы, измеренной виртуальным электродом. Анализ корреляций между временными рядами, рассчитанными для разных точек мозга, позволит изучать его коннективность.

*Ключевые слова:* магнитная энцефалография, преобразование Фурье, функциональная томограмма, магнитно-резонансная томограмма, виртуальный электрод.

### Software for the analysis of magnetic encephalography data by the method of virtual electrodes

Rykunova E.D.<sup>1,2</sup>, Rykunov S.D.<sup>1</sup>, Boyko A.I.<sup>1</sup>, Ustinin M.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMPB RAS – Branch of KIAM RAS

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

The method of virtual electrodes for studying electrical activity of the human brain using non-invasive external measurements of the magnetic field was developed. Utilizing data from magnetic encephalography measurements, a functional tomogram is calculated – the spatial distribution of the field sources on a discrete grid. The functional tomogram projects information contained in multichannel time series of the encephalogram onto the head space. This is achieved by solving the inverse problem for all the elementary oscillations that are separated by the Fourier transform. For each oscillation frequency the node of a three-dimensional grid is found, where the source is located. User specifies the location, size and shape of the brain region for a detailed study of the frequency structure of the functional tomogram – a virtual electrode. Set of oscillations that fall in the given region is the partial spectrum of the given region. Using this spectrum, it is possible to reconstruct the time series of the encephalogram measured by the virtual electrode. Analysis of correlations between time series calculated for different points of the brain will make it possible to study its connectivity.

*Keywords:* magnetic encephalography, Fourier transform, functional tomogram, magnetic-resonance image, virtual electrode.

### 1. Введение

Изучение функционирования отдельных регионов и структур головного мозга человека

представляет большой интерес для исследователей и нейрофизиологов. Для этого применяются такие методы как электрокортикография [1, 2] (метод отведения потенциалов при помощи электродов, накладываемых непосредственно на кору головного

мозга), электроэнцефалография и магнитоэнцефалография с последующей обработкой сигналов, посредством таких методов как бимформеры [3], анализ независимых компонент или построения распределенных моделей источников (например, sLORETA [4] / eLORETA [5], synthetic aperture magnetometry [6]), функциональная магниторезонансная томография. В 2013 году было объявлено о проекте BRAIN [7] (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies), в рамках которого планируется разработать и внедрить сенсоры на базе наночастиц, которые позволят напрямую измерять единичные потенциалы действия, а также микроэлектродные матрицы для менее инвазивного измерения потенциалов участков коры головного мозга.

В данной работе предлагается метод виртуальных электродов, основанный на методе функциональной томографии [8, 9] по данным многоканальных магнитных измерений и методе парциальной спектроскопии головного мозга [10]. В основе метода лежит тот факт, что функциональная томография ставит в соответствие каждой элементарной осцилляции пространственное положение ее источника. Выбирая область пространства и все источники, находящиеся в ней, по их частотам и коэффициентам разложения Фурье можно восстановить многоканальный временной ряд, получая таким образом энцефалограмму выбранной области.

## 2. Программный комплекс для анализа данных энцефалографии методом виртуальных электродов

Для осуществления анализа данных многоканальных энцефалографических измерений методом виртуальных электродов был разработан программный комплекс. Этот комплекс представляет собой кроссплатформенное графическое приложение на языке Python с использованием свободно распространяемых библиотек NumPy, PyFFTW, Matplotlib. Для отрисовки интерфейса используется библиотека wxPython.

Комплекс предоставляет пользователю следующие возможности:

- 1) загрузка и совместное отображение магниторезонансной и функциональной томограммы;
- 2) фильтрация функциональной томограммы по качеству решения;
- 3) выбор местоположения и формы области интереса – виртуального электрода;
- 4) построение парциального спектра источников в выбранной области и восстановление многоканального временного ряда.

Интерфейс программного комплекса приведен на рисунке 1. Экспериментальные данные магнитной энцефалографии получены на 275-

канальном градиометре в Центре биомagnetизма Нью-Йоркского университета. Исследовалось явление альфа-ритма, измерения проводились на контрольном субъекте, в течение семи минут измерялась спонтанная активность головного мозга в состоянии субъекта с закрытыми глазами.

### 2.1. Используемые форматы и структуры данных

Магниторезонансная томограмма, функциональная томограмма и многоканальный спектр хранятся в виде .mat-файлов версии 7.3. Файл с МРТ содержит следующие данные:

- 1) массив **mrict** размерности  $X \times Y \times Z$  содержащий магниторезонансную томограмму, где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – число отсчетов по соответствующим осям;
- 2) массивы-вектора **x\_mri**, **y\_mri**, **z\_mri** содержащие значения отсчетов.

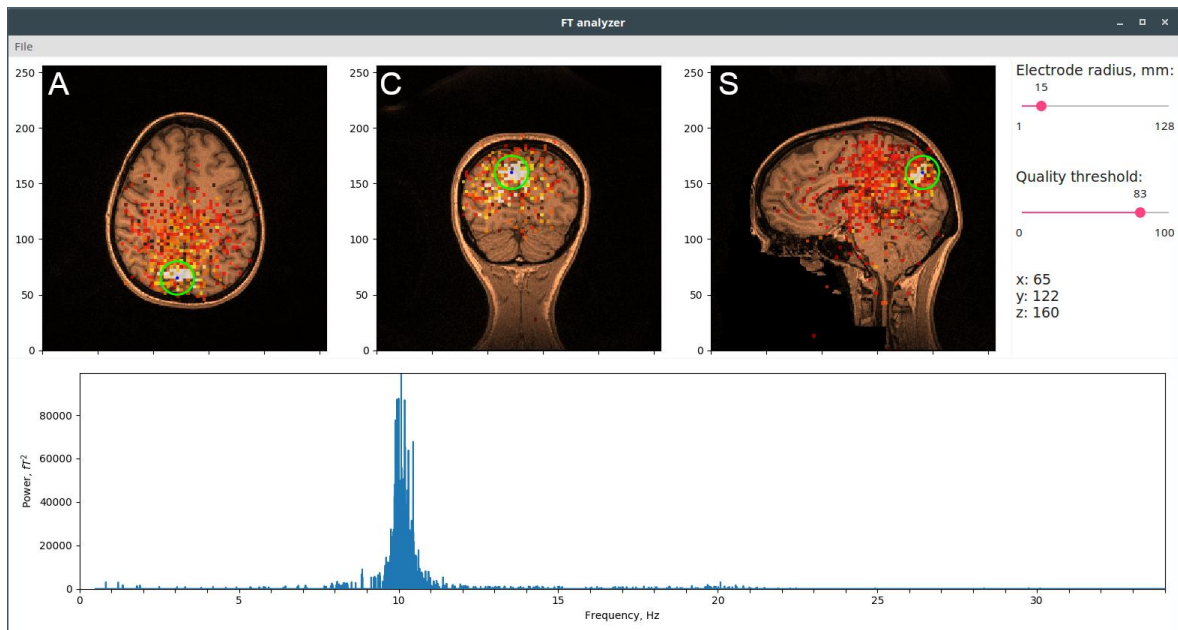
Файл с многоканальным спектром содержит следующие данные:

- 1) массивы коэффициентов разложения **ameg**, **bmeg** размерности  $N \times K$ , где  $N$  – количество частот в разложении, а  $K$  – количество каналов;
- 2) вектор-массив **a0meg** размерности  $1 \times K$  – постоянный член разложения;
- 3) вектор-массив частотных отсчетов **numeg** размерности  $N \times 1$ ;
- 4) **sfreq** – значение частоты дискретизации;
- 5) вектор-массив отсчетов по времени регистрации **time** размерности  $T \times 1$ , где  $T$  – число отсчетов.

Файл с функциональной томограммой содержит следующие поля:

- 1) структура **grad** – описание магнитного энцефалографа в формате FieldTrip;
- 2) вектор-массив **ctr** – координаты центра головы;
- 3) вектор-массив **tr** и матрица  $3 \times 3$ , **rt** – вектор переноса и матрица поворота для преобразования координат из системы координат МРТ в систему головы;
- 4) вектор-массивы **x\_precise**, **y\_precise**, **z\_precise** содержат значения отсчетов функциональной томограммы;
- 5) массив **ft\_cells** размерности  $N \times 7$ , где  $N$  – количество элементарных осцилляций.

Остановимся подробнее на устройстве массива **ft\_cells**: первая компонента – это порядковый номер осцилляции, вторая – частота, третья – координаты источника в индексном представлении, четвертая – порядковый номер направления пробного источника, пятая – спектральная мощность элементарной осцилляции, шестая – качество решения, седьмая – величина магнитного момента для решений в модели эквивалентного токового диполя. Также файл с функциональной томограммой содержит поля **ndirs**, **nxdirs** и **nzdirs**, задающие параметры числа направлений пробных источников.



**Рис. 1.** Интерфейс программного комплекса. В верхней части показаны три стандартных томографических сечения: аксиальное (А), корональное (С) и сагиттальное (S). Зеленым кругом показан виртуальный электрод, сечения проходят через его центр. В правой части окна программы расположены элементы управления размером электрода и фильтрации функциональной томограммы по качеству решения. Также показаны координаты центра электрода. В нижней части окна программы показан спектр мощности источников, расположенных в выбранной электродом области.

## 2.2. Порядок работы программного комплекса

1. Пользователь, используя диалоговое окно, выбирает и загружает функциональную и магниторезонансную томограммы и многоканальный спектр. По величинам  $x_{mri}$ ,  $y_{mri}$ ,  $z_{mri}$  и  $x_{precise}$ ,  $y_{precise}$ ,  $z_{precise}$  устанавливается соотношение между масштабами магниторезонансной и функциональной томограмм.
2. По данным из массива `ft_cells` строится трёхмерный массив и отображается совместно с массивом `mricut` на трех стандартных томографических сечениях с учетом масштаба.
3. Для каждого элемента из `ft_cell` восстанавливается его трехмерная координата.
4. Используя слайдер, пользователь задает отсечку качества решения, исключая из рассмотрения все элементы, чье качество ниже заданного. Под качеством понимается величина, характеризующая степень совпадения модельного и экспериментального источников, изменяющаяся в пределах от 0 до 100, где 100 это полное совпадение.
5. Используя слайдер, пользователь выбирает радиус электрода. Кликая на соответствующие томографические проекции, пользователь выбирает положение электрода.
6. Среди элементов `ft_cells` производится поиск тех, чьи координаты находятся в выбранной электродом области, по их частотам и спектральным мощностям строится парциальный спектр.

7. Из соответствующих массивов выбираются значения коэффициентов разложения Фурье и производится восстановление многоканального временного ряда.

## 3. Заключение

Виртуальные электроды, предложенные и реализованные в данной работе, позволят детально изучать пространственное распределение частот источников электрической активности мозга. Эта методика также позволит в интерактивном режиме находить пространственное расположение шумовых компонент сигнала и оптимизировать фильтры для их подавления. Размещение электродов в разных областях мозга позволит оценивать их коннективность по данным энцефалографии.

## 4. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-11-00178).

## 5. Список литературы

1. Su D.K., Ojemann J.G. Electrocorticographic Sensorimotor Mapping. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*. 2013. V. 124. № 6. P. 1044–1048. doi: [10.1016/j.clinph.2013.02.114](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.02.114).
2. Richner T.J., Thongpang S., Brodnick S.K., et al. Optogenetic micro-electrocorticography for modulating and localizing cerebral cortex

- activity. *Journal of neural engineering*. 2014. V. 11. № 1. P. 016010. doi: [10.1088/1741-2560/11/1/016010](https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/1/016010).
3. Litvak V., Eusebio A., Jha A., et al. Optimized beamforming for simultaneous MEG and intracranial local field potential recordings in deep brain stimulation patients. *Neuroimage*. 2010. V. 50. № 4–3. P. 1578–1588. doi: [10.1016/j.neuroimage.2009.12.115](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.115).
  4. Pascual-Marqui R.D. Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods. Find. Exp. Clin. Pharmacol.* 2002. V. 24. Suppl. D. P. 5–12.
  5. Pascual-Marqui R.D., Lehmann D., Koukkou M., Kochi K., Anderer P., Saletu B., Tanaka H., Hirata K., John E.R., Prichep L., Biscay-Lirio R., Kinoshita T. Assessing interactions in the brain with exact low-resolution electromagnetic tomography. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2011. V. 369. № 1952. P. 3768–3784. doi: [10.1098/rsta.2011.0081](https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0081).
  6. Robinson S.E., Vrba J. Functional neuroimaging by synthetic aperture magnetometry (SAM). In: *Recent Advances in Biomagnetism*. Eds. Yoshimoto T., Kotani M., Kuriki S., Karibe H., Nakasato N. Sendai: Tohoku University Press, 1998. P. 302–305.
  7. Alivisatos A.P., Chun M., Church G.M., Greenspan R.J., Roukes M.L., Yuste R. The Brain Activity Map Project and the Challenge of Functional Connectomics. *Neuron*. 2012. V. 74. № 6. P. 970–974. doi: [10.1016/j.neuron.2012.06.006](https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.06.006).
  8. Llinás R.R., Ustinin M.N. Frequency-pattern functional tomography of magnetoencephalography data allows new approach to the study of human brain organization. *Frontiers in Neural Circuits*. 2014. V. 8. Article No. 43. doi: [10.3389/fncir.2014.00043](https://doi.org/10.3389/fncir.2014.00043).
  9. Llinás R.R., Ustinin M.N., Rykunov S.D., et al. Reconstruction of human brain spontaneous activity based on frequency-pattern analysis of magnetoencephalography data. *Frontiers in Neuroscience*. 2015. V. 9. Article No. 373. doi: [10.3389/fnins.2015.00373](https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00373).
  10. Рыкунов С.Д., Устинин М.Н., Полянин А.Г., Сычев В.В., Линас Р.Р. Комплекс программ для расчёта парциальных спектров головного мозга человека. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016. Т. 11. № 1. С. 127–140.