

Рекуррентная оценка отношения сигнал-шум для функционального МРТ реального времени

Н.С. Давыдов^{1,2}, А.Г. Храмов^{1,2}, А.В. Никоноров^{1,2}, Ю.А. Ковш³

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

³Department of Radiology and Biomedical Imaging, Yale University, 300 Cedar Street, New Haven, CT, 06519, USA

Аннотация. Задача анализа качества функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) в реальном режиме времени является актуальной в современной медицине, в особенности, когда велик риск сильного искажения данных фМРТ головного мозга в результате значительных смещений головы. Поскольку определение таких смещений затруднено визуально, необходима разработка комплексных параметров контроля качества. Открытая платформа OpenNFT предназначена для реализации проектов по нейробиологической обратной связи на базе фМРТ в реальном времени, но в ней отсутствует возможность комплексного контроля качества исходных и обработанных данных. В данной работе, описано расширение OpenNFT реализующее рекуррентный контроль отношения сигнал-шум сигналов активности головного мозга, являющееся основным параметром контроля качества фМРТ в реальном времени. Предложенные алгоритмы контроля качества значительно улучшат содержательность и эффективность получения данных фМРТ и будут способствовать принятию решения об остановке и ре-старте получения данных.

1. Введение

Задача анализа качества функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ; fMRI) в реальном режиме времени (rt-fMRI) является актуальной в современной медицине и при изучении мозговой активности. Изначально техническую возможность предоставления фМРТ данных в режиме реального времени подразумевалось использовать для контроля параметров качества изображений головного мозга, хотя наибольшего распространения получила идея использования rt-fMRI для нейробиологической обратной связи [1,2]. Нейробиологическая обратная связь подразумевает предоставление возможности участнику эксперимента или пациенту контролировать собственную мозговую активность согласно представленному (напр., визуализированному) в той или иной форме сигналу мозговой активности. Благодаря использованию нейробиологической обратной связи, была также продемонстрирована возможность реабилитации пациентов с различными психо-неврологическими заболеваниями [1]. Тем не менее, задача контроля качества становится наиболее актуальной для исследовательских и медицинских экспериментов, когда велик риск сильного искажения дорогостоящих и продолжительных данных фМРТ, например, в результате значительных движений головы. Поскольку зачастую определение таких смещений затруднено визуально

(напр., используя встроенную визуализацию вендоров), необходима разработка комплексных параметров контроля качества, позволяющих в течение эксперимента автоматически определять необходимость его прерывания и ре-старта [2,3].

Проект с открытым исходным кодом, OpenNFT, был создан для обеспечения необходимой функциональности по построению нейробротной связи на базе сигналов фМРТ в реальном режиме времени [4,5]. Графическая оболочка и архитектура OpenNFT реализована на языке Python, а вычислительная часть на языке Matlab. Для расширения функциональности этого проекта по осуществлению контроля качества данных фМРТ в реальном режиме времени, была поставлена задача по реализации эффективных методов комплексного контроля качества.

2. Оценка качества временных рядов МРТ в реальном времени

Первым этапом для анализа качества функционального МРТ в реальном режиме времени (rt-fMRI) является проверка соотношения уровня сигнала и шума для сигнала, получаемого с выбранных зон головного мозга, например, применяемых для нейробиологической обратной связи [4,5]. В различных экспериментах количество сигналов зависит от количества зон интереса за которыми ведётся наблюдение. Характерный rt-fMRI исходный сигнал для двух зон интереса продемонстрирован на Рисунке 1.

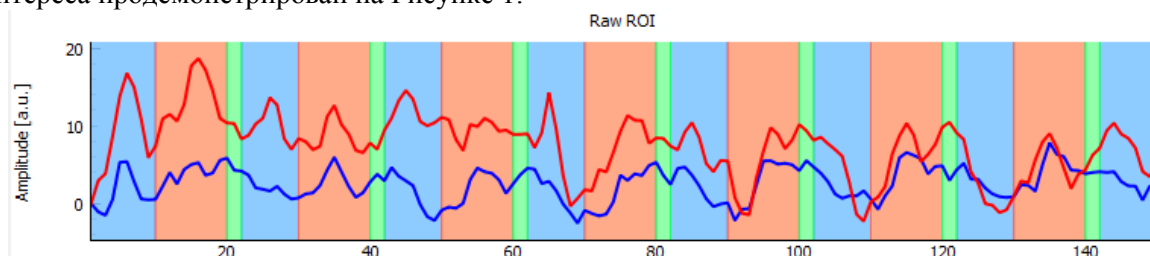


Рисунок 1. Пример необработанного сигнала временных рядов МРТ для двух регионов [1,2] за вычетом амплитуды сигнала в начальный момент времени (t_0) с целью визуализации.

Соотношение сигнал-шум может быть рассчитано на основе статистических параметров сигнала, таких как его среднее значение и дисперсия. Однако так как работа программы для нейробиологической обратной связи (OpenNFT) подразумевает поступление данных в реальном времени, как и расчет и визуализация параметров качества сигнала, то расчёт средних значений, дисперсии и SNR (recurrent SNR; rSNR) проводился с применением рекуррентных формул по алгоритму Вэлфорда [6, 9]:

$$\bar{x}_t = \bar{x}_{t-1} + \frac{x_t - \bar{x}_{t-1}}{t},$$

$$M_{2,t} = M_{2,t-1} + (x_t - \bar{x}_{t-1}) \cdot (x_t - \bar{x}_t),$$

$$\bar{\sigma}_t^2 = \frac{M_{2,t}}{t-1},$$

$$rSNR_t = \frac{\bar{x}_t}{\sqrt{\bar{\sigma}_t^2}},$$

где \bar{x}_t – выборочное среднее в момент времени t , x_t – значение сигнала в момент времени t , $M_{2,t}$ – вспомогательное рекуррентное соотношение [6, 9] в момент времени t , $\bar{\sigma}_t^2$ – выборочное среднее в момент времени t , $rSNR_t$ – значение SNR в момент времени t .

Расчет кумулятивного SNR (cumulative SNR; cSNR) был произведён по следующей формуле:

$$cSNR_t = \frac{\bar{x}_{1..t}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{1..t}^2}},$$

где $\bar{x}_{1..t}$ – оценка среднего, полученная нарастающим итогом за время t , $\bar{\sigma}_{1..t}^2$ – оценка дисперсии, полученная нарастающим итогом за время t , $cSNR_t$ – значение кумулятивного SNR за время t .

Соотношения rSNR and cSNR были рассчитаны для необработанного сигнала двух зон интереса (Рисунок 2). Из рисунка видно, что рекуррентный расчет SNR полностью совпадает с кумулятивным. В период недостаточной точности среднеквадратичная ошибка составляет $213.6 \pm 45.7 \cdot 10^{-24}$, а на остальном промежутке – $1.47 \pm 0.15 \cdot 10^{-24}$.

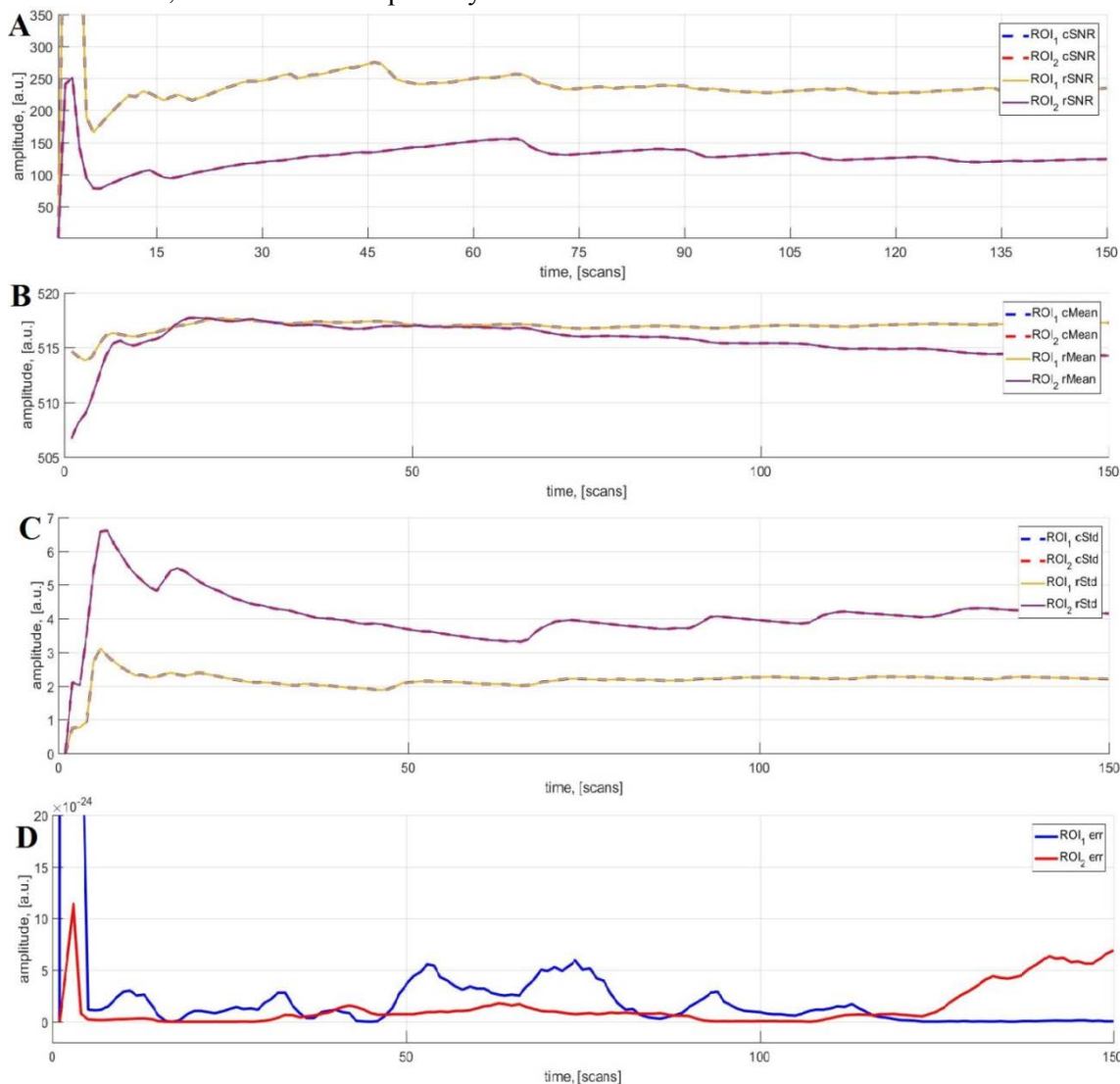


Рисунок 2. (A) SNR, (B) среднее, (C) дисперсия и (D) среднеквадратичная ошибка для необработанных сигналов двух регионов. Пунктирная линия – график кумулятивного SNR, сплошная линия – график рекуррентного SNR.

Расчет rSNR был интегрирован в OpenNFT (Рисунок 3), прошел первичное тестирование и был выложен в открытый доступ [7]. Первые 7 точек rSNR были обнулены с целью улучшения визуализации, поскольку их среднее и дисперсия не обладают достаточной точностью [8]. Определение периода недостаточной точности этих параметров является предметом дальнейшего исследования.

3. Заключение

В настоящей работе реализован первый этап анализа качества функционального МРТ в реальном режиме времени в рамках платформы OpenNFT. Разработано расширение, реализующее расчет и визуализацию SNR для сигналов по регионам интереса. Модуль расширения прошёл функциональное тестирование в рамках пакета OpenNFT и был выложен в открытый доступ [7]. В дальнейшем планируется расширить разработанный модуль, добавив

расчёт различных параметров оценки качества для rt-fMRI головного мозга, таких как SNR рассчитанный для вокселей изображения, и отношения контраста-шум для активности головного мозга (CNR, [8]).

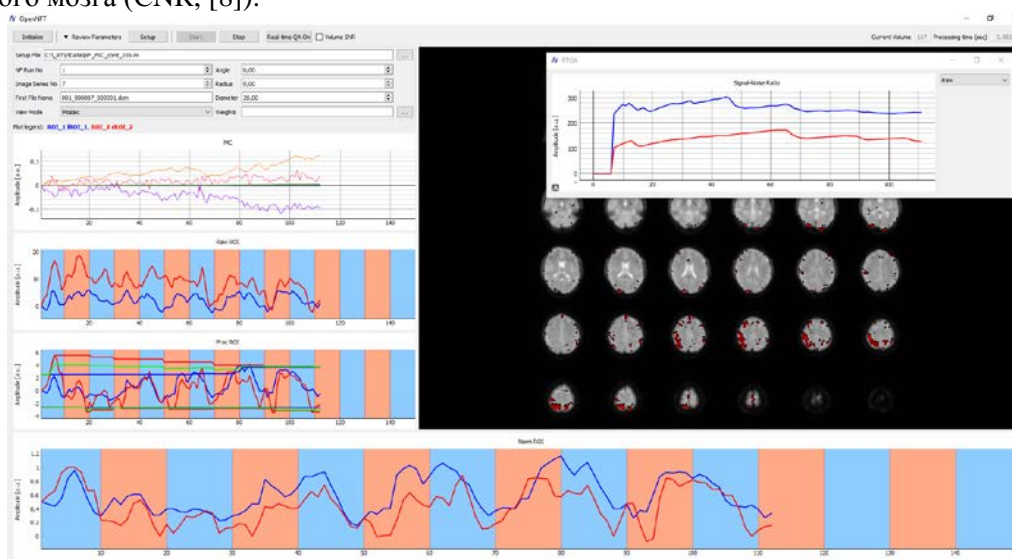


Рисунок 3. Интеграция расчета SNR в OpenNFT.

4. Литература

- [1] Sitaram, R. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback / R. Sitaram, T. Ros, L. Stoeckel, S. Haller, F. Scharnowski, J. Lewis-Peacock, N. Weiskopf, M. Blefari, M. Rana, E. Oblak, N. Birbaumer, J. Sulzer // Nature reviews Neuroscience. – 2016. – Vol. 18(2). – 15 p.
- [2] Dosenbach, N. Real-time motion analytics during brain MRI improve data quality and reduce costs / N. Dosenbach, J. Koller, E. Earl, O. Miranda-Dominguez, R. Klein, A. Van, A. Snyder, B. Nagel, J. Nigg, A. Nguyen, V. Wesevich, D. Greene, D. Fair // NeuroImage. – 2017. – Vol. 161(1). – P. 80-93.
- [3] Weiskopf, N. Real-time functional magnetic resonance imaging: methods and applications / N. Weiskopf, R. Sitaram, O. Josephs, R. Veit, F. Scharnowski, R. Goebel, N. Birbaumer, R. Deichmann, K. Mathiak // Magnetic Resonance Imaging. – 2007. – Vol. 25(6). – P. 989-1003.
- [4] Koush, Y. OpenNFT: An open-source Python/Matlab framework for real-time fMRI neurofeedback training based on activity, connectivity and multivariate pattern analysis / Y. Koush, J. Ashburner, E. Prilepin, R. Sladky, P. Zeidman, S. Bibikov, F. Scharnowski, A. Nikonorov, D. Van De Ville // NeuroImage. – 2017. – Vol. 156(1). – P. 489-503.
- [5] Koush, Y. Real-time fMRI data for testing OpenNFT functionality / Y. Koush, J. Ashburner, E. Prilepin, R. Sladky, P. Zeidman, S. Bibikov, F. Scharnowski, A. Nikonorov, D. Van De Ville // Data in Brief. – 2017. – Vol. 14. – P. 344-347.
- [6] Welford, B. Note on a method for calculating corrected sums of squares and products / B.P. Welford // Technometrics. – 1962. – Vol. 4(3). – P. 419-420.
- [7] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/TheAmid/OpenNFT>.
- [8] Koush, Y. Signal quality and Bayesian signal processing in neurofeedback based on real-time fMRI / Y. Koush, M. Zvyagintsev, M. Dyck, K.A. Mathiak, K. Mathiak // NeuroImage. – 2012. – Vol. 59(1). – P. 478-479.
- [9] Chan, T.F. Algorithms for Computing the Sample Variance: Analysis and Recommendations / T.F. Chan, G.H. Golub, R.J. Le Veque // The American Statistician. – 1983. – Vol. 37. – P. 242-247.

Благодарности

Моделирование и разработка алгоритмов выполнено при поддержке грантов РФФИ (проекты 16-29-11744-офи-м, № 16-29-09528-офи-м, № 17-29-03112-офи-м, № 18-07-01390-А, № 16-07-00729-А, № 18-37-00457-мол_а), экспериментальные исследования - в рамках госзадания

ИСОИ РАН - филиал ФНИЦ "Кристаллография и Фотоника" РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗЗ63/26).

Recurrent SNR estimation for real-time fMRI

N. Davydov^{1,2}, A. Khramov¹, A. Nikonov^{1,2}, Y. Koush³

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

³Department of Radiology and Biomedical Imaging, Yale University, 300 Cedar Street, New Haven, CT, 06519, USA

Abstract. The real-time quality assessment of functional MRI (fMRI) data is important in clinical applications and research, especially when there is a risk of data distortion due to head movement. Because visual definition of such distortion is complicated, an automatic comprehensive real-time quality assessment approach is needed. The open-source framework OpenNFT is designed for real-time fMRI neurofeedback, however, it lacks such a comprehensive quality assessment. We used the recurrent signal-to-noise ratio (rSNR), a fundamental parameter for the multi-faceted quality assessment of fMRI, for real-time quality assessment of the fMRI time-series and integrated it into OpenNFT. Advanced and fast quality assessment algorithms will considerably increase the information content and effectiveness of fMRI data acquisitions, and aid in decisions about the need to interrupt and re-start acquisitions.