

Рекуррентный контроль качества функционального МРТ при помощи OpenNFT

Н.С. Давыдов^{1,2}, Е. Прилепин³, Т. Auer⁴, N. Gninenko^{5,6}, А.Г. Храмов^{1,2},
D. Van De Ville^{5,6}, А.В. Никонов^{1,2}, Ю.А. Ковш⁷

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

³Aligned Research Group, St. Petersburg, Russia

⁴Royal Holloway University of London, Egham Hill, Egham TW20 0EX, UK

⁵Institute of Bioengineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Route Cantonale, 1015 Lausanne, Switzerland

⁶University of Geneva, 1205 Geneva, Switzerland

⁷Yale University, 300 Cedar Street, New Haven, CT, 06519, USA

Аннотация. Контроль качества функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) в реальном времени важен в ходе экспериментальных исследований и диагностики пациентов. Снижение чувствительности BOLD-сигнала (зависимость уровня кислорода в крови) из-за потери T2* сигнала, вызванной магнитной восприимчивостью, движением головы в процессе эксперимента и взаимодействием движения и восприимчивости, является главным источником артефактов в фМРТ-сигнале. Более того, сохранение параметров движения головы в предварительно обработанных фМРТ данных может предсказать антропоморфные, поведенческие и клинические факторы. Поскольку визуальное определение искажений на изображении является сложной задачей, необходим автоматический комплексный подход к анализу качества в реальном времени. Наша оценка отношения сигнал-шум и контраст-шум основывается на рекуррентной оценке среднего и дисперсии сигнала. Кроме того, мы оценили покадровое смещение на основе шести параметров движения головы в режиме реального времени. Расчёт отношения сигнал-шум, контраст-шум и покадровое смещение были реализованы в виде модуля контроля качества в реальном времени для проекта с открытым исходным кодом, созданным для разработок и исследований нейробиологической обратной связи на основе фМРТ-данных, OpenNFT (<http://opennft.org/>). Одновременная численная оценка и визуализация отношения сигнал-шум и контраст-шум для объёмов и временных рядов вместе с отслеживанием исследуемых параметров движения головы увеличит информативность и эффективность сбора фМРТ данных, позволит осуществлять контроль качества в реальном времени и поможет принять решение о необходимости прерывания или перезапуска эксперимента.

1. Введение

Контроль качества функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) крайне важен в клинических исследованиях и при проведении диагностики пациентов. Искажение сигнала,

отражающего уровень насыщенности участков головного мозга кровью, может быть вызвано несколькими факторами, основные из которых: движение головы человека и шум, возникающий в процессе прохождения диагностики или эксперимента [1]. Кроме того, по данным движения головы также можно предсказать антропоморфные, поведенческие и клинические факторы [2]. В силу того, что визуальное определение подобных искажений является трудоёмким процессом – возникла необходимость в создании программного продукта, предоставляющего функционал по контролю качества фМРТ диагностики. Отношение сигнал-шум является фундаментальным параметром для комплексной оценки качества фМРТ-сигнала. Вдобавок к этому отношение контраст-шум пользуется предпочтением при проверке качества сигнала в экспериментах связанных с построением карты активации. [1]. Движение головы человека в процессе эксперимента могут быть оценены с использованием общепринятых шести параметров движения головы: три параметра продольно-поперечные и три вращательные. На основе всех шести параметров можно рассчитать покадровое смещение головы человека, а на основе первых трёх – микросмещения [3,4,5]. Также, для контроля качества фМРТ-сигнала используется определение спайков сигнала на основе адаптивного фильтра Калмана и расчёт t-статистики с применением инкрементной обобщённой линейной модели (incremental GLM, iGLM) [8,9].

2. Рекуррентные алгоритмы расчёта параметров качества фМРТ-сигнала

Рекуррентный алгоритм расчёта отношения сигнал-шум (signal-to-noise ratio, SNR) и отношения контраст-шум (contrast-to-noise ratio, CNR) основаны на алгоритме Вэлфорда [6], который предлагает рассчитывать среднее значение, второй момент и дисперсию следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{x}_t &= \bar{x}_{t-1} + \frac{x_t - \bar{x}_{t-1}}{t}, \\ M_{2,t} &= M_{2,t-1} + (x_t - \bar{x}_{t-1}) \cdot (x_t - \bar{x}_t), \\ \bar{v}_t &= \bar{\sigma}_t^2 = \frac{M_{2,t}}{t-1},\end{aligned}$$

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

На основе этих характеристик сигнала были рассчитаны значения SNR и CNR в определённый момент времени. В отличие от расчёта SNR, для CNR требуется разделять средние значения и дисперсии промежутков деактивации и активации (интервалы baseline и condition):

$$\begin{aligned}rSNR_t &= \frac{\bar{x}_t}{\sqrt{\bar{v}_t}}, \\ rCNR_t &= \frac{\bar{x}_t(cond) - \bar{x}_t(bas)}{\sqrt{\bar{v}_t(cond) + \bar{v}_t(bas)}},\end{aligned}$$

где $rSNR_t$ – рекуррентное значение SNR в момент времени t , $rCNR_t$ – рекуррентное значение CNR в момент времени t , cond и bas – индексы периодов активации и деактивации соответственно.

Сравнение рекуррентных методов и общепринятых кумулятивных методов было проведено в ранее представленной работе [7]. Результаты расчёта характеристик представлены на рисунке 1.

Расчёт параметров качества, основанных на параметрах движения головы человека также выполнен рекуррентно. Оценка покадрового (FD) и микро (MD) смещения основана на шести параметрах движения головы – трёх продольно-поперечных и трёх вращательных, предоставляемых процедурой корректировки сигнала в реальном времени пакета SPM (statistical parametric mapping).

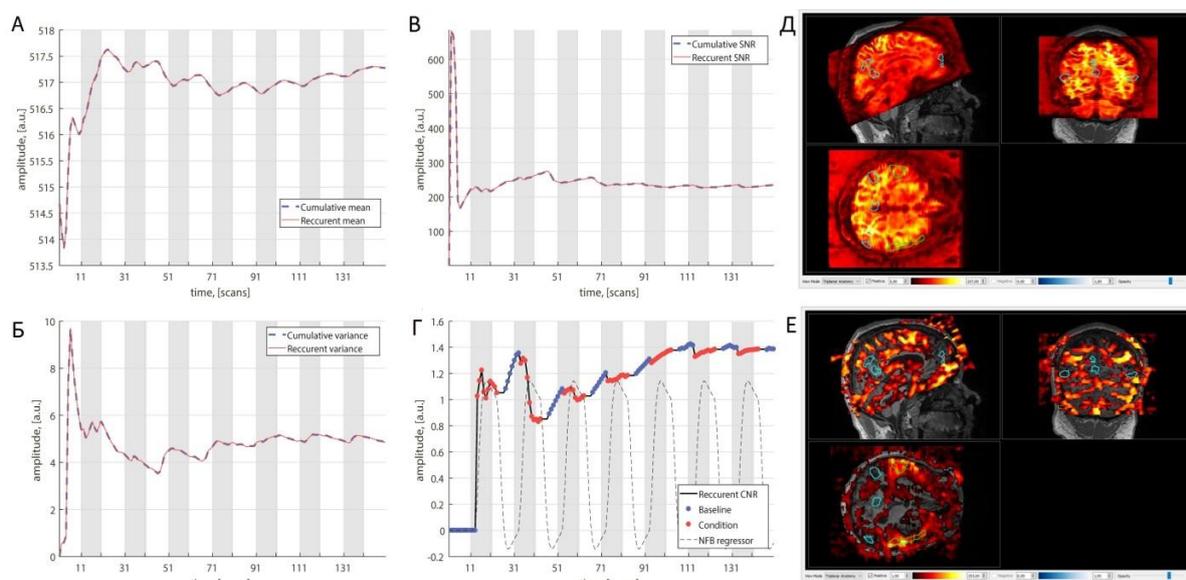


Рисунок 1. Сравнение кумулятивного и рекуррентного (А) среднего и (Б) дисперсии. (В) Сравнение кумулятивного и рекуррентного отношения сигнал-шум. (Г) Рекуррентное отношение контраст-шум с отмеченными интервалами деактивации и активации. Трипланарная реализация (Д) отношения сигнал-шум и (Е) контраст-шум в OpenNFT.

$$FD_t = \sum_{i=1}^3 |Tr_{t,i} - Tr_{t-1,i}| + r \cdot \sum_{i=1}^3 |Rt_{t,i} - Rt_{t-1,i}|,$$

$$MD_t = MD_{t-1} - \sqrt{\sum_{i=1}^3 Tr_{t,i}^2},$$

где $Tr_{t,i}$ – продольно-поперечные движения головы, $Rt_{t,i}$ – вращательные движения головы, r – радиус в 50 мм, являющийся средним радиусом головы человека [3,4,5].

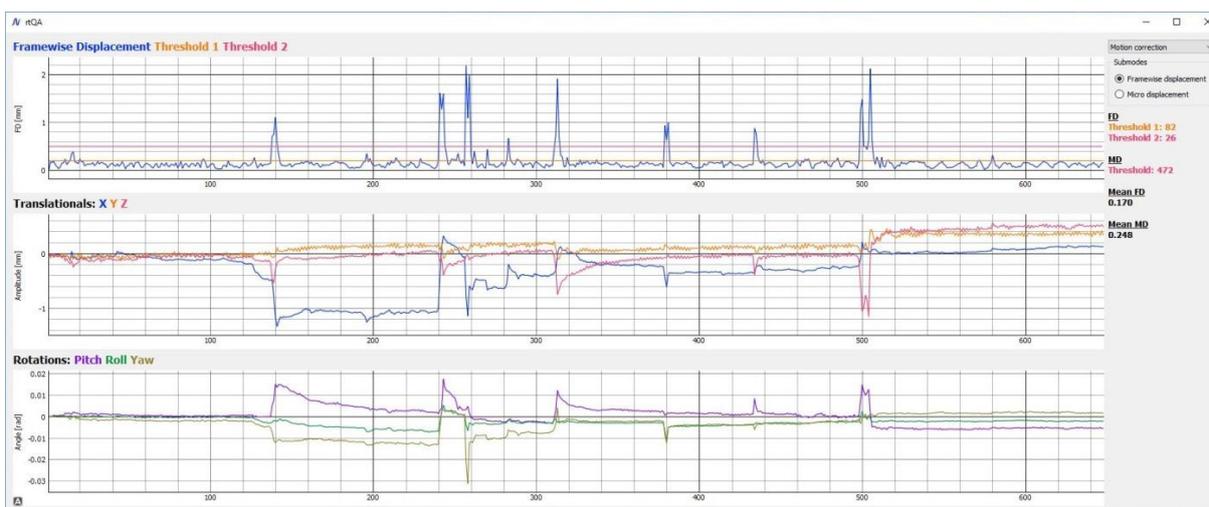


Рисунок 2. Покадровое смещение головы человека.

Для обнаружения спайков и низкочастотной фильтрации сигнала в реальном времени были использованы адаптивный фильтр Калмана и инкрементная обобщённая линейная модель (iGLM), ранее реализованные в проекте OpenNFT. Результаты продемонстрированы на рисунке 4.

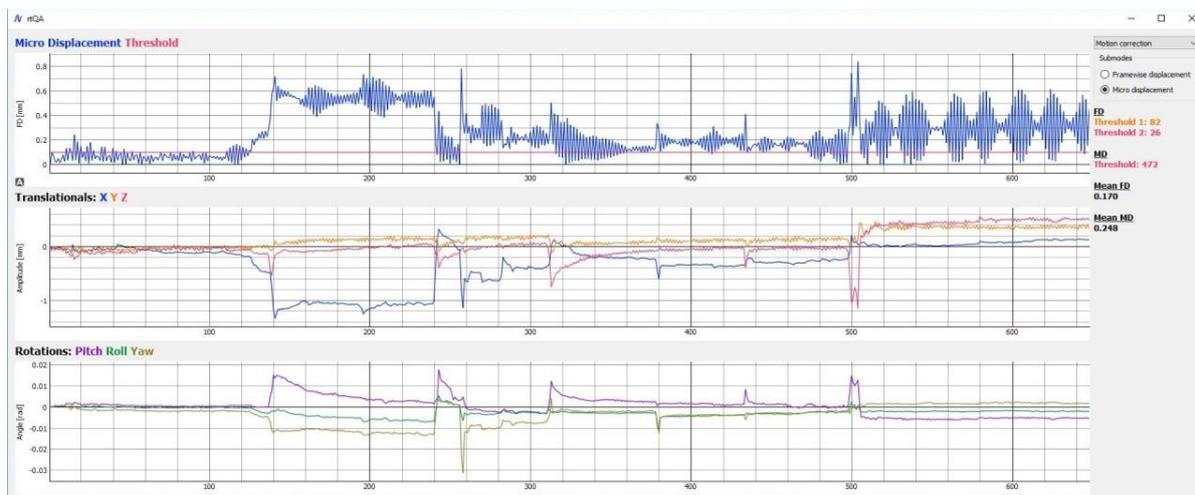


Рисунок 3. Микросмещения головы человека.

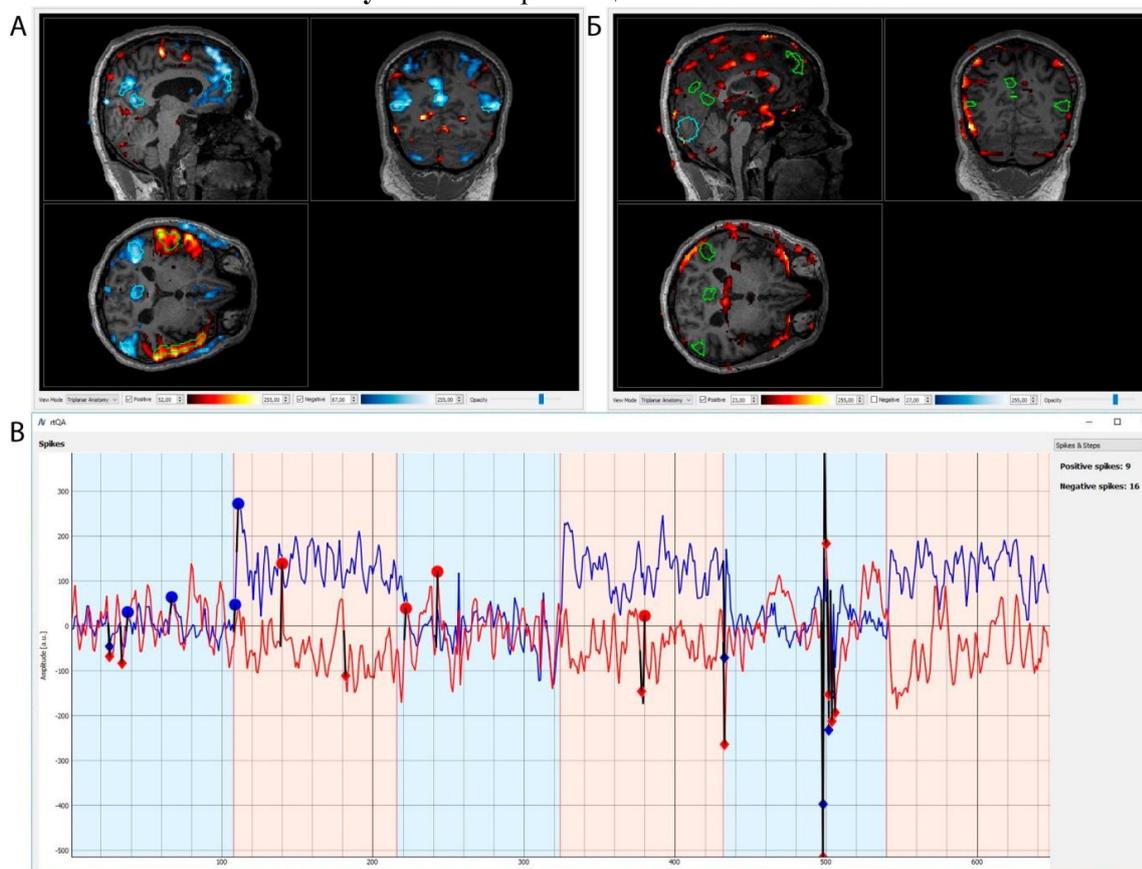


Рисунок 4. Трипланарный вид статистической карты iGLM для (А) данных эксперимента с заданием и (Б) без задания. (В) Обнаружение спайков в сигнале и их подсчёт, где положительные спайки отмечены кругом, а негативные ромбом.

3. Заключение

В настоящей работе представлена реализация рекуррентных методов контроля качества функциональном МРТ-диагностики на основе проекта OpenNFT. Каждый параметр был проверен на наборе тестовых данных, представленных в репозитории проекта и описанных в соответствующей статье [10]. Данная визуализация в виде временных рядов и трёхмерных изображений позволяет отслеживать искажения в сигнале в реальном времени, что значительно сократит вероятность повторных сканирований и прерываний эксперимента. Модуль

полностью поддерживает работу в онлайн-режиме и получение данных в реальном времени, что делает его подходящим решением для клинических исследований.

4. Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ (проекты 16-29-1-1744-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), а также в рамках госзадания ИСОИ РАН - филиал ФНИЦ "Кристаллография и Фотоника" РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

5. Литература

- [1] 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.
- [2] Bolton, T. Agito ergo sum: correlates of spatiotemporal motion characteristics during fMRI / T.A.W. Bolton, V. Kebets, E. Glerean, D. Zöllner, J. Li, B.T. Thomas Yeo, C. Caballero-Gaudes, D. Van De Ville // *NeuroImage*. – 2020. – Vol. 209(1). – P. 15.
- [3] Power, J.D. Spurious but systematic correlations in functional connectivity MRI networks arise from subject motion / J.D. Power, K.A. Barnes, A.Z. Snyder, B.L. Schlaggar, S.E. Petersen // *NeuroImage*. – 2012. – Vol. 59. – P. 2142-2154.
- [4] 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.
- [5] Van Dijk, K. The Influence of Head Motion on Intrinsic Functional Connectivity MRI / K.R Van Dijk, M.R. Sabuncu, R.L. Buckner // *NeuroImage*. – 2012. – Vol. 59(1). – P. 431-438.
- [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] Давыдов, Н.С. Рекуррентная оценка отношения сигнал-шум для функционального МРТ реального времени / Н.С. Давыдов, А.Г. Храмов, А.В. Никоноров, Ю.А. Ковш // V Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ). – 2019. – Т. 4. – С. 699-703.
- [8] 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.
- [9] Bagarinao, E. Estimation of general linear model coefficients for real-time application / E. Bagarinao, K. Matsuo, T. Nakai, S. Sato // *NeuroImage*. – 2003. – Vol. 19. – P. 422-429.
- [10] 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.

Functional MRI recurrent quality assessment using OpenNFT

N. Davydov^{1,2}, E. Prilepin³, T. Auer⁴, N. Gninenko^{5,6}, A. Khramov^{1,2}, D. Van De Ville^{5,6},
A. Nikonorov^{1,2}, Y. Koush⁷

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

³Aligned Research Group, St. Petersburg, Russia

⁴Royal Holloway University of London, Egham Hill, Egham TW20 0EX, UK

⁵Institute of Bioengineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Route Cantonale, 1015 Lausanne, Switzerland

⁶University of Geneva, 1205 Geneva, Switzerland

⁷Yale University, 300 Cedar Street, New Haven, CT, 06519, USA

Abstract. The quality assessment of functional magnetic resonance imaging (fMRI) in real-time is important in clinical applications and research. The loss of blood oxygen level-dependent (BOLD) sensitivity due to the susceptibility-induced T2* signal dropouts, head movement, and motion-by-susceptibility interaction during head movement remain the major sources of fMRI artifacts. Furthermore, retained head motion in the pre-processed fMRI data could also predict anthropomorphic, behavioral and clinical factors. Since visual definition of image distortions is complicated, an automatic comprehensive real-time quality assessment approach is needed. We estimated the recurrent signal and contrast to noise ratio (rSNR and rCNR) based on recurrent mean and variance estimates. In addition, we estimated framewise displacement (FD) based on six head motion parameters as defined by real-time realignment. The rSNR, rCNR and FD were implemented within rtQA module of the open-source software designed for real-time fMRI research and applications, OpenNFT (<http://opennft.org/>). Concurrent quantification and visualization of volumetric and target time-series SNR/CNR together with explorative head motion monitoring increases the information content and effectiveness of the fMRI data acquisition, allows for the real-time data quality assessment and helps to make the decision about the necessity of experiment interruption and re-start.