

ПОДКЛАДКА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА МЛАДЕНЦЕВ МЕТОДОМ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Шарипова Л.В.¹, Пучнин В.М.¹

Научный руководитель – к.ф.-м.н., научный сотрудник Щелокова А.В.¹

¹Университет ИТМО

lv.sharipova@yandex.ru

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 24-45-02020 «Специализированные РЧ-устройства на основе современных физических принципов и метаматериалов для улучшения характеристик МРТ».

Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является ведущим неинвазивным методом диагностики головного мозга у новорождённых и детей раннего возраста, позволяя оценивать его развитие и выявлять патологии [1]. Однако диагностическая ценность МРТ напрямую зависит от качества получаемых изображений, которое определяется параметрами радиочастотного (РЧ) магнитного поля. Стандартные РЧ катушки, встроенные в томографы, часто не адаптированы к анатомии младенцев, что приводит к неоднородности поля при передаче сигнала к низкому отношению сигнал-шум (ОСШ) при приеме [2]. Помимо этого, использование данных РЧ катушек вызывает дискомфорт у пациентов и может затруднять мониторинг жизненно важных функций [3].

Перспективной альтернативой являются беспроводные устройства на основе субволновых резонаторов [4, 5]. Располагаясь на объекте исследования, они перераспределяют РЧ магнитное поле внешней РЧ катушки, локально повышая его амплитуду и однородность. Это позволяет улучшить качество получаемых изображений без изменения аппаратного обеспечения томографа.

В настоящей работе представлена подкладка на основе разомкнутых кольцевых резонаторов (РКР) для улучшения визуализации головного мозга новорожденных методом МРТ с индукцией постоянного магнитного поля 1,5 Тл. Устройство предназначено для локализации РЧ магнитного поля в области головы. Показано, что предложенное устройство обеспечивает эффективную локализацию РЧ магнитного поля в области интереса, благодаря чему достигается повышение эффективности передачи и отношения сигнал-шум (ОСШ) и, как следствие, улучшается диагностическая информативность МРТ новорождённых.

Основная часть

В ходе выполнения работы разработана и численно исследована подкладка на основе концентрических соосных РКР для улучшения качества МР-визуализации головного мозга новорождённых при индукции постоянного магнитного поля 1,5 Тл. Предложенная структура состоит из пяти металлических РКР, в каждом из которых равномерно распределено по четыре конденсатора. Посредством подбора значений емкостей конденсаторов проведена частотная настройка основного резонансного состояния на Ларморову частоту 1,5 Тл МРТ - 63,68 МГц, а также выполнена частотная отстройка отдельных РКР относительно друг друга. Значения емкостей конденсаторов подбирались таким образом, чтобы каждый внутренний РКР имел собственное резонансное состояние в более высоком диапазоне частот относительно внешнего, при сохранении неизменной частоты основного состояния всей структуры. Исследованы конфигурации подкладки с различной разницей частот (Δf) между внутренним и внешним кольцевым РКР.

На первом этапе численного моделирования подкладка размещалась на поверхности однородного фантома, геометрические размеры и электрические свойства которого соответствовали тканям головы младенца. Возбуждение осуществлялось посредством модели стандартной объёмной РЧ катушки. Получено, что при $\Delta f = 0$ РЧ магнитное поле локализуется вблизи подкладки так, что вблизи центрального кольцевого резонатора находится максимум амплитуды, который спадает к области на периферии. При увеличении Δf наблюдается перераспределение поля: амплитуда в центральной части структуры уменьшается при одновременном её возрастании на периферии. Данный эффект сопровождается незначительным снижением средней амплитуды магнитного поля в области интереса, однако приводит к существенному повышению однородности его пространственного распределения.

На следующем этапе проведены численные исследования эффективности подкладки применительно к задаче улучшения визуализации головного мозга с использованием реалистичной модели младенца, включающей все основные типы тканей с соответствующими электрическими параметрами. Результаты моделирования показали, что применение подкладки обеспечивает увеличение амплитуды передающего поля B_1^+ в области интереса в 2,25 раза по сравнению с контрольным случаем без подкладки (с 1,2 до 2,7 мкТл при нормировке на 1 Вт принятой системой мощности).

Дополнительно проведено численное исследование подкладки с использованием однородного фантома головы и стандартной локальной 12-ти канальной приёмной катушки. Установлено, что применение подкладки обеспечивает увеличение среднего значения ОСШ в области интереса в 2,21 раз по сравнению со случаем без подкладки.

Выводы

В работе показано, что предложенная подкладка на основе разомкнутых кольцевых резонаторов обеспечивает перераспределение РЧ магнитного поля приемопередающей катушки, позволяя управлять его пространственным распределением посредством частотной отстройки РКР. Применение устройства обеспечивает увеличение амплитуды поля B_1^+ в 2,25 раза и рост ОСШ в 2,21 раза в области интереса. Полученные результаты подтверждают высокий потенциал разработанной подкладки для повышения диагностического качества МР-визуализации головного мозга у новорождённых.

Литература

1. George J.M., Pannek K., Rose S.E., Ware R.S., Colditz P.B., Boyd R.N. Diagnostic accuracy of early magnetic resonance imaging to determine motor outcomes in infants born preterm: a systematic review and meta-analysis // *Developmental Medicine and Child Neurology*. 2018. Vol. 60, no. 2. P. 134–146. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13611>.
2. Jones R.A., Palasis S., Grattan-Smith J.D. MRI of the Neonatal Brain: Optimization of Spin-Echo Parameters // *American Journal of Roentgenology*. 2004. Vol. 182, no. 2. P. 367–372. <https://doi.org/10.2214/ajr.182.2.1820367>.
3. Winkler S.A., Corea J., Lechêne B., O'Brien K., Bonanni J.R., Chaudhari A., Alley M., Taviani V., Grafendorfer T., Robb F., Scott G., Pauly J., Lustig M., Arias A.C., Vasanaawala S. Evaluation of a flexible 12-channel screen-printed pediatric MRI coil // *Radiology*. 2019. Vol. 291, no. 1. P. 180–85. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019181883>.
4. Koloskov V., Zubkov M., Solomakha G., Puchnin V., Levchuk A., Efimtcev A., Melchakova I., Shchelokova A. Improving detection of fMRI activation at 1.5 T using high permittivity ceramics // *Journal of Magnetic Resonance*. 2023. Vol. 348. P. 107390. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107390>.
5. Koloskov V., Brink W., Webb A., Shchelokova A.V. Flexible metasurface for improving brain imaging at 7T // *Magnetic Resonance in Medicine*. 2024. Vol. 92, no. 2. P. 869–880. <https://doi.org/10.1002/mrm.30088>.