

СУБВОЛНОВЫЕ ОБЪЁМНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КОЛЕННОГО СУСТАВА МЕТОДОМ МРТ

Фатишева К. Е.

Научный руководитель – к. ф-м. н. Пучнин В. М.¹

¹Университет ИТМО

viktor.puchnin@metalab.ifmo.ru

Работа выполнена при поддержке государственного задания № FSER-2025-0018 в рамках национального проекта «Наука и университеты».

Введение

Согласно обзору [1] патологические изменения коленного сустава являются причиной ранней инвалидности людей в связи с возникающими ограничениями движения. Своевременное выявление патологий коленного сустава является ключевым фактором, определяющим благоприятный прогноз лечения. Одним из лучших неинвазивных методов клинической диагностики является магнитно-резонансная томография (МРТ). Развитие МРТ является актуальной задачей для улучшения диагностики коленного сустава [2].

Одной из важнейших компонент систем аппарата МРТ для возбуждения и приёма сигнала ядерного магнитного резонанса от тканей тела человека являются радиочастотные (РЧ) катушки. Стандартным подходом улучшения визуализации в МРТ является использование передающей РЧ катушки, встроенной в аппарат МРТ, для передачи сигнала и локальных РЧ катушек для приема. Недавно было предложено применение беспроводных субволновых резонаторов [3], повышающих эффективность передачи и чувствительность приема стандартных РЧ катушек. Такой подход обеспечивает сравнимое качество получаемых изображений, а катушки обладают преимуществами в компактности и повышении безопасности проведения диагностики.

Данная работа посвящена развитию подхода использования беспроводных катушек в МРТ. Были исследованы три типа беспроводных субволновых объёмных резонаторов для улучшения визуализации коленного сустава: на основе периодических параллельных проводников, на основе периодических крестообразных проводников, а также на основе разомкнутых кольцевых резонаторов.

Основная часть

Исследования проводились с использованием численного моделирования в программном пакете CST Studio Suite 2024. Модели объёмных резонаторов были настроены на частоту 63,68 МГц, что соответствует частоте Лармора 1,5 Тл МРТ.

Все рассматриваемые резонаторы имели форму цилиндра. Радиус в каждом случае составлял 95 мм, высота – 170 мм. Такие размеры позволяют свободно размещать в своём объёме колено человека. Резонатор на основе параллельных проводников представлял собой периодически расположенные по цилиндрической поверхности прямые проводники шириной 2 мм, на торцах цилиндра соединённые конденсаторами. Резонатор на основе крестообразных проводников - периодически расположенные проводники шириной 3 мм из меди, образующие форму крестов размерами 20 × 20 мм, соединённые конденсаторами. Резонатор на основе разомкнутых кольцевых резонаторов - две пары металлических рамок прямоугольной формы, расположенные по окружности с перекрытием около 15% по площади для электромагнитной развязки. Моделирование включало в себя возбуждение каждого резонатора стандартной приёмо-передающей РЧ катушкой при нагрузке реалистичной

моделью человека. Были рассчитаны распределения амплитуды РЧ магнитного поля и равномерность ее распределения в тканях ноги при нормировке на 1 Вт принятой мощности, был рассчитан удельный коэффициент поглощения электромагнитной энергии (SAR).

Получено, что среднеквадратичная амплитуда РЧ магнитного поля при использовании стандартной приемно-передающей катушки составила 0,57 мкТл при нормировке на 1 Вт принятой мощности, а величина SAR составила 0,05 Вт/кг. При размещении вокруг коленного сустава резонатора на основе параллельных проводников амплитуда РЧ магнитного поля составила 3,67 мкТл, резонатора на основе крестообразных проводников – 3,5 мкТл, резонатора на основе разомкнутых кольцевых резонаторов – 2,5 мкТл. Однородности амплитуды РЧ магнитного поля в тканях колена для этих случаев составили 82,6%, 71,4% и 74,8% соответственно. Величина SAR составила: 0,08 Вт/кг, 0,08 Вт/кг и 0,4 Вт/кг.

Выводы

В ходе исследования был проведён сравнительный анализ объёмных субволновых резонаторов с точки зрения передающих характеристик. Из результатов численного моделирования получено, что устройство на основе параллельных проводников является оптимальным по совокупности характеристик: амплитуда РЧ магнитного поля стандартной РЧ катушки повысилась в 6 раз, равномерность распределения амплитуды составила 82,6%, SAR повысился в 1,6 раз. Отметим, что при проведении сканирования на аппарате МРТ проводится калибровка подаваемого напряжения для получения конкретной величины РЧ магнитного поля в тканях, таким образом полученное в моделировании повышение амплитуды поля в 6 раз приводит к возможности понижения подаваемого напряжения в 6 раз. В результате SAR уменьшится в 36 раз и будет равен 0,002 Вт/кг. Так при использовании беспроводной катушки повышается эффективность передачи и безопасность. Полученные данные могут быть использованы при разработке прототипов беспроводных объёмных катушек для повышения качества визуализации коленного сустава методом МРТ.

Литература

1. GBD 2017 DALYs and HALE Collaborators. Global, regional, and national disability-adjusted life-years (DALYs) for 359 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE) for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 // *The Lancet*. 2018. Vol. 392, no. 10159. P. 1859–1922. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32335-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32335-3).
2. Sultan K., Abbosh A. Advancing Wearable Electromagnetic Knee Imaging: A Comprehensive Review of Systems, Frameworks, Key Challenges, and Future Directions // *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 468–490. <https://doi.org/10.1109/JERM.2023.3324478>.
3. Webb A. G., Collins C. M., Versluis M. J. Novel materials in magnetic resonance imaging: high permittivity ceramics, metamaterials, metasurfaces and artificial dielectrics // *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*. 2022. Vol. 35, no. 6. P. 879–894. <https://doi.org/10.1007/s10334-022-01007-5>.

Фатишева К.Е. _____

Пучнин В.М. _____