

Разработка резонатора, работающего на топологически защищенной краевой моде, для МРТ молочных желез

О.В. Матвиевская

Университет ИТМО

Аннотация: в настоящей работе была разработана численная модель концепции управления распределением электромагнитного поля внутри клинического МР томографа при помощи мета-структур, поддерживающих топологически защищенные краевые состояния.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография (МРТ), топологический резонатор, метасолоноид, топологически защищенная краевая мода, карты распределения магнитного поля, отношение сигнал-шум.

1. Введение

На сегодняшний день рак молочной железы является наиболее распространенным злокачественным образованием среди женщин. Ранняя диагностика рака способствует большому шансу на успешное лечение. В настоящее время самыми используемыми методами диагностики являются маммография и ультразвуковая диагностика, но эти инструменты обладают низкой чувствительностью и специфичностью. Магнитно-резонансная томография (МРТ) является наиболее информативным и безопасным методом диагностики рака молочных желез. Однако из-за необходимости использования дополнительного дорогостоящего оборудования процедура сканирования имеет высокую стоимость и недоступна для широкого круга людей.

Ранее было предложено использовать объемный резонатор на основе метаматериалов для улучшения визуализации молочных желез в поле 1.5 Тл [1], [2]. Однако несмотря на эффективную фокусировку электромагнитного поля в области интереса (молочной железы) и повышение радиочастотной безопасности, существенным ограничением использования данного радиочастотного устройства является относительно низкая амплитуда магнитного поля в области грудной стенки и подмышечных областях, что приводит к низкому качеству их визуализации. Данный факт уменьшает диагностическую ценность предложенного метода для заболеваний молочных желез. Таким образом, перед исследователями возникает задача разработать такое радиочастотное устройство, которое позволило бы получить качественные МР-изображения во всей области интереса (молочные железы, грудная стенка и подмышечные области).

2. Основная часть

В качестве решения вышеуказанной проблемы было предложено разработать резонатор на основе метаматериалов, поддерживающий топологически защищенную резонансную моду. За основу объемного резонатора использовалась геометрия массива разомкнутых кольцевых резонаторов. Основная идея заключается в оптимизации расположения разомкнутых колец путем создания цепочки Су-Шриффера-Хигера. Такая модель демонстрирует необычное распределение электромагнитного поля: магнитное поле концентрируется вблизи крайнего элемента системы [3]. Таким образом, ожидается, что магнитное поле радиочастотной катушки

для тела типа “птичья клетка” будет концентрироваться в области грудной стенки пациента, увеличивая качество визуализации данной области интереса.

Численное моделирование структуры, поддерживающей топологически защищенное краевое состояние, проводилось в программном пакете CST Microwave Studio 2020 с использованием конечно-разностного метода в частотной области и метода расчета собственных мод. Так как исследуемая мета-структура предназначена для повышения качества МР-изображений в области груди, ее необходимо разместить рядом с телом человека. Следовательно, ограничением по размерам структуры является поперечный размер груди человека. Исходя из этого критерия были выбраны следующие геометрические размеры структуры: длина – 16 см, ширина – 15,1 см, высота – 11,4 см.

Были рассмотрены две численные модели: (1) мета-структура, поддерживающая топологически защищенное краевое состояние (расстояние между ближайшими разомкнутыми кольцевыми резонаторами в массиве – 1 см, расстояние между парами разомкнутых кольцевых резонаторов – 2,7 см), (2) метасолоноид – массив из разомкнутых кольцевых резонаторов, равноудаленных на расстояние 1,85 см. В каждой элементарной ячейке - разомкнутом кольцевом резонаторе - находилось по два сосредоточенных конденсатора. Емкости конденсаторов подбирались так, чтобы топологически защищенная мода первого резонатора и фундаментальная мода второго резонатора соответствовали рабочей частоте 1.5 Тл МРТ – 63,8 МГц.

Далее обе системы нагружались однородным фантомом, имитирующим свойства и размеры молочной железы и тела со следующими свойствами: размер участка тела под молочной железой – 16×16×8 см³, диэлектрическая проницаемость тела $\epsilon = 78$, проводимость $\sigma = 0,45$ См/м; размер молочной железы: радиус – 4,7 см, высота – 10,34 см, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 70$, проводимость $\sigma = 0,2$ См/м.

В большинстве клинических томографов для возбуждения МР-сигнала используется РЧ-катушка для тела типа “птичья клетка”, которая создает вращающееся поперечное радиочастотное магнитное поле в своем объеме. В рамках численного моделирования мы использовали эмулятор, позволяющий создать аналогичное поведение магнитного поля. Он представлял собой четыре попарно ортогональных соприкасающихся краями волноводных порта. Каждому порту была задана фазовая задержка в 90 градусов относительно предыдущего для создания вращающегося поперечного РЧ магнитного поля. В данную систему поочередно помещались две исследуемые модели мета-структур, нагруженные на однородный фантом.

3. Заключение

Результаты показали, что с помощью мета-структур, поддерживающих топологически защищенные краевые состояния, можно не только управлять распределением электромагнитного поля внутри клинического МР-томографа, но и увеличить отношение сигнал-шум в области грудной стенки (улучшить качество МР-изображения) по сравнению с ранее исследованными беспроводными РЧ-катушками на основе метаматериалов. Далее планируется провести дополнительное численное исследование взаимодействия предложенной мета-структуры с реалистичной моделью человека и моделью РЧ-приемо-передающей катушки для тела типа “птичья клетка”, а также создать экспериментальный образец мета-устройства и провести экспериментальные исследования.

Список литературы

1. A. V. Shchelokova et al., Nature Communications 11, 3840 (2020)
2. V.M. Puchnin et al., J. Magn. Reson. 322, 106877 (2021)
3. D. A. Dobrykh, et al., Phys. Rev. Lett. 121, 163901 (2018)