

Управление распределением электромагнитного поля в объемных резонаторах на основе метаматериалов и материалов с высокой диэлектрической проницаемостью

А. Джандалиева, В.М. Пучнин, А.В. Щелокова

Университет ИТМО

Аннотация: в данной работе предлагается способ управления распределением ближнего электромагнитного поля внутри объемных резонаторов на основе набора разомкнутых кольцевых резонаторов и диэлектрических колец с высокой диэлектрической проницаемостью. Метод заключается в изменении количества резонансных элементов при сохранении общих геометрических размеров структуры. Путем численных и экспериментальных исследований продемонстрирована возможность повысить однородность магнитного поля более, чем на 8% внутри объемных резонаторов.

Ключевые слова: Объемные резонаторы, Метаматериалы, Керамические резонаторы, Управление ближнем электромагнитным полем, Магнитно-резонансная томография.

1. Введение

Всемирная технологическая тенденция требует разработки более миниатюрных устройств при сохранении или повышении эффективности. Метаматериалы [1] и метаповерхности [2], которые теоретически и экспериментально исследуются в последние несколько десятилетий, все чаще предлагается использовать в различных практических областях [3], включая беспроводную передачу энергии (БПЭ) [4] и передовые методы медицинской диагностики [5], например, в магнитно-резонансной томографии (МРТ). Такие устройства позволяют перераспределять и оптимизировать распространение электромагнитного поля желаемым образом.

Не так давно был предложен резонатор на основе метаматериала, состоящий из набора керамических колец с высоким значением диэлектрической проницаемости для улучшения МРТ визуализации молочных желез [6]. Материальные параметры и размеры резонатора были оптимизированы для настройки собственной ($TE_{01\delta}$) моды резонатора на рабочую частоту 3 Тл МРТ (т. е. 123 МГц). Для данной собственной моды характерна локализация магнитного поля в центральной части структуры (внутри объема полого цилиндра), при этом электрическое поле практически полностью ограничено стенками резонатора и равно нулю в центре. Такая структура может эффективно фокусировать радиочастотное (РЧ) магнитное поле катушки МР томографа в относительно небольшой области интереса – в груди. Таким образом, можно улучшить качество МР изображений, без увеличения времени сканирования и повысить РЧ безопасность исследования. Однако для данной конструкции характерна неоднородность распределения РЧ магнитного поля для собственной моды (амплитуда магнитного поля имеет максимум в центральной части структуры и уменьшается при приближении к краям) в области интереса, что ограничивает ее диагностическую ценность.

2. Основная часть

Концепция работы заключается в управлении распределением электромагнитного поля внутри объемных резонаторов на основе метаматериалов. С этой целью были

рассмотрены две конструкции объемных резонаторов: (1) массив разомкнутых кольцевых резонаторов и (2) набор керамических колец с высоким значением диэлектрической проницаемости.

Для обеих структур были рассмотрены разные конфигурации количества резонансных элементов. Так, для конструкции на основе разомкнутых кольцевых резонаторов поочередно удалялись конденсаторы из пар внутренних колец. Емкость других колец была изменена, чтобы настроить основную собственную моду резонаторов на 64 МГц (частота Лармора для МРТ 1,5 Тл). Это позволило изменять взаимную электромагнитную связь между элементами конструкции, манипулируя распределением тока и магнитного поля. Каждая конфигурация структурных элементов резонатора с помощью численного моделирования возбуждалась плоской волной с волновым вектором, ортогональным оси симметрии структуры, а магнитное поле было сонаправлено с осью симметрии. Таким образом, за счет пошагового увеличения емкости разомкнутых кольцевых резонаторов и одновременной отстройки от резонанса центральных колец позволило добиться повышения однородности радиочастотного магнитного поля во внутреннем объеме структуры на 8%.

Аналогичный метод был применен для структуры на основе керамических колец с высокой диэлектрической проницаемостью, в которых поэтапно заменяли керамические кольца, расположенные в середине конструкции, на пластмассовые того же размера, чтобы сохранить высоту всей конструкции резонатора. Конструкция работала на частоте, близкой к 123 МГц (ларморовская частота для МРТ 3 Тл). В результате удалось получить повышение однородности поперечного радиочастотного магнитного поля на 12%.

Полученные численные результаты подтвердились в экспериментальном исследовании. Для этого использовался метод сканирования ближнего поля в безэховой камере с использованием векторного анализатора цепей. Кроме того, концепция была подтверждена исследованиями в клиническом МРТ с индукцией поля 1,5 Тл. Для этого проводилось сканирование фрукта с разными конфигурациями набора разомкнутых кольцевых резонаторов. В результате было получено, что предложенный метод позволяет оптимизировать диагностическую ценность описываемой структуры для клинических применений.

3. Выводы

Предлагаемая идея управления ближним магнитным полем в объемных резонаторах на основе метаматериалов была тщательно изучена в этой работе как численно, так и экспериментально. Рассмотрены объемные структуры на основе массива из коаксиальных диэлектрических колец и разомкнутых кольцевых резонаторов. Для обеих структур была показана возможность повышения однородности магнитного поля более, чем на 8% внутри исследуемых объектов.

В качестве подтверждения концепции идея была продемонстрирована в экспериментальном исследовании массива разомкнутых кольцевых резонаторов в 1,5 Тл МР-томографе. Результаты показали, что оптимальная геометрия улучшает визуализацию ананаса с точки зрения однородности и поля обзора по сравнению с исходной конфигурацией. Кроме того, эта геометрия, используемая в сочетании с катушкой для всего тела, обеспечивает более высокую эффективность передачи и производительность приема по сравнению с имеющейся в продаже специализированной катушкой. В этой работе был предложен практический подход к управлению картинками ближнего электромагнитного поля в резонаторах, созданных на основе метаматериалов. Его можно использовать в различных областях, включая беспроводную передачу энергии [7] и азотно-вакансионные магнитометры [8], где необходимо однородное распределение ближнего магнитного поля.

Исследование выполнено за счет гранта НИРМА Физического факультета Университета ИТМО.

Список литературы

1. Engheta N, Ziolkowski R. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Wiley-IEEE Press New York (2006).
2. Chen H, Taylor A, Yu N. A review of metasurfaces: Physics and applications, *Rep. Prog. Phys.* 79 (2016) 076401.
3. Zheludev N, Kivshar Y. From metamaterials to metadevices, *Nature Materials*. 11(11) (2012) 917–924.
4. Song M, Jayathurathnage P, Zanganeh E, et al. Wireless power transfer based on novel physical concepts, *Nat. Electron.* 4 (2021) 707–716.
5. Li Z, Tian X, Qiu CW, et al. Metasurfaces for bioelectronics and healthcare, *Nat. Electron.* 4 (2021) 382–391.
6. Shchelokova A, Ivanov V, Mikhailovskaya A, et al. Ceramic resonators for targeted clinical magnetic resonance imaging of the breast, *Nat. Commun.* 11 (2020) 1-7.
7. Song, M., Jayathurathnage, P., Zanganeh, E. et al. Wireless power transfer based on novel physical concepts. *Nat Electron* 4 (2021), 707–716.
8. K. Bayat, J. Choy, M. Farrokh Baroughi, S. Meesala, and M. Loncar, *Nano Lett.* 14 (2014), 1208.