

ВЫРОЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЯЧЕЙКАХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Ильченко М.Е., Живков А.П.

Институт телекоммуникационных систем КПИ им. Игоря Сикорского

E-mail: lileya15@gmail.com

Degenerate Oscillations in the Metamaterial Unit Cells

In the paper we present the results of theoretical and experimental studies on the elementary metamaterial unit cells. We consider two degenerate oscillations in the widespread Split Ring Resonator (SRR) model of metamaterial unit cells. It allows us to easily explain their seemingly anomalous properties and improve the properties of these structures, that are often used in microwave engineering

Статья ведущего специалиста компании Raytheon Co. Эли Брукнера (Eli Brookner), открывающая ноябрьский номер журнала Microwave Journal за 2016 год [1], свидетельствует о том важном месте, которое метаматериалы заняли в современной микроволновой технике. Однако для специалистов, занимающихся подобными устройствами (микроволновыми фильтрами, фазированными антенными решетками и т.п.) становится все более очевидным, что традиционные подходы, заложенные уже в пионерских работах по метаматериалам [2], как к 3D структурам с отрицательными μ и ϵ , не всегда удобны при проектировании микроволновой техники.

В опубликованных ранее работах [3,4] отмечалась топологическая эквивалентность SRR (Split Ring Resonator) и режекторных фильтров, предложенных в [5]. Микрополосковая структура, образованная линией передачи и двумя не связанными между собой, параллельно включенными резонаторами, представлена на рис. 1:

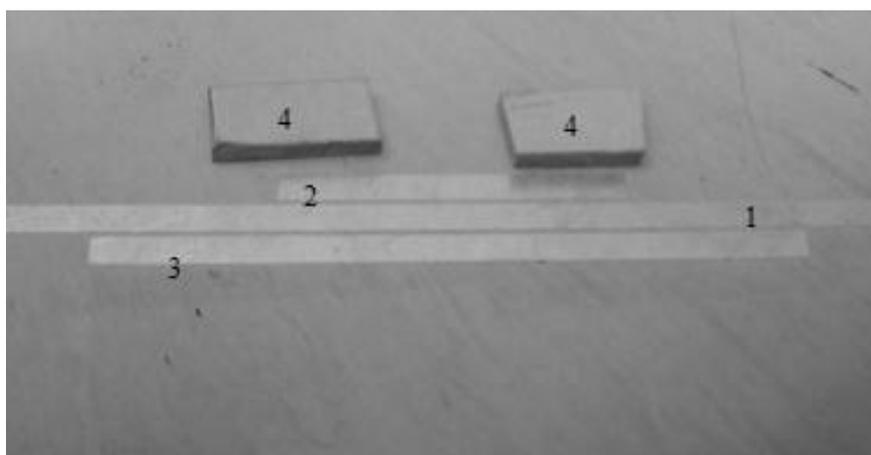


Рис. 1. «Ячейка» метаматериала.

1 – микрополосковая линия. 2 - резонатор длиной 21 мм,
3 – резонатор длиной 42 мм, 4 – кусочки диэлектрика, аналогичного
диэлектрику подложки ($\epsilon = 10$, толщина подложки – 2 мм)

Характеристики исследуемого режекторного фильтра в диапазоне 1250 – 5000 МГц представлены на рис. 2 а). Явно просматриваются три спектральных составляющих. Первая из них на частоте порядка 1500 МГц соответствует «полуволновому» колебанию резонатора 3 (рис. 1) (первая «гармоника»). Вторая спектральная составляющая на частоте порядка 2900 соответствует «полуволновому» колебанию резонатора 2 (его первая «гармоника») и «волновому» колебанию резонатора 3 (вторая «гармоника»). Наконец третья спектральная составляющая – третья «гармоника» резонатора 3. Не совсем стопроцентная кратность «гармоник» резонатора 3 обусловлена как влиянием его связи с линией передачи (разная на разных частотах), так и со смещением частоты второй гармоники под влиянием колебания резонатора 2. Частота «суммарного» колебания зависит от взаимной расстройки между частотами колебаний этих резонаторов [6].

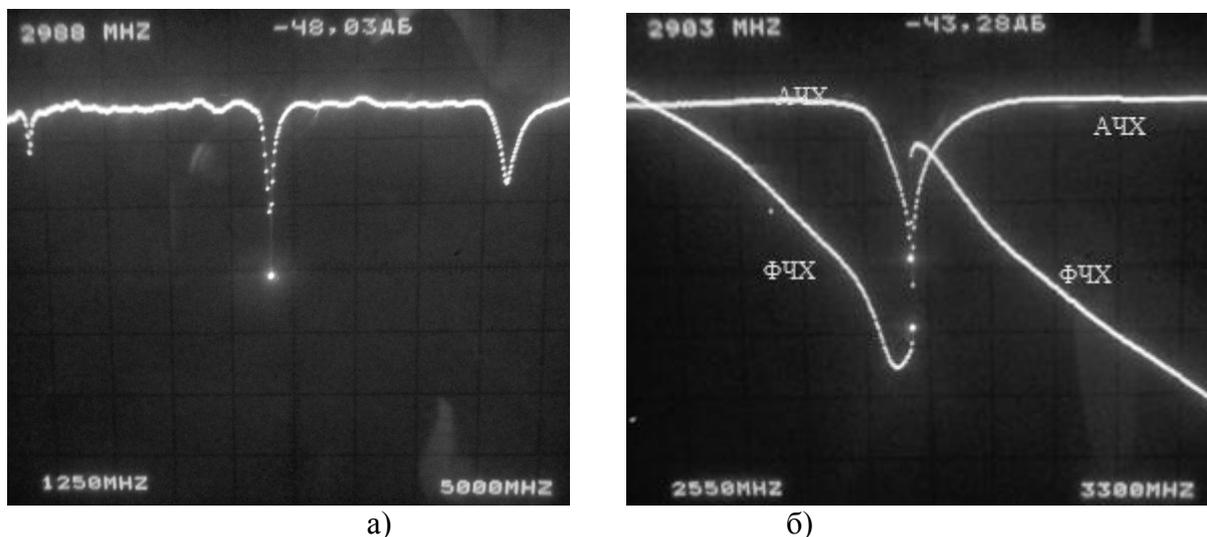


Рис. 2. Спектры колебаний ячейки метаматериала
 а) диапазон частот – 1250 – 5000 МГц, б) амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики фильтра в диапазоне частот 2550 – 3300 МГц

Диапазон частот, в котором проявляются метаматериальные свойства ячейки, исследован более детально и результаты измерений коэффициента передачи фильтра (S_{21}) представлены на рис. 2 б). Форма фазочастотной характеристики (на рис. ФЧХ) свидетельствует о том, что исследуемая структура является неминимальнофазовой, что на языке, принятом для 3D метаматериалов, эквивалентно встречной направленности групповой и фазовых скоростей распространения электромагнитной волны. Это свидетельствует также и о правильности выбора мостовых схем в качестве прототипов ячеек метаматериалов [3].

Аномально высокое затухание АЧХ (амплитудно-частотной характеристики, на представленной характеристике – 43 дБ, с помощью двух кусочков диэлектриков, приближение которых к концам того или иного резонаторов изменяет их «электрическую» длину, а, следовательно, и частоту,

удавалось достигать затухания на центральной частоте более 60 дБ), связано вовсе не с чрезвычайно высокой добротностью резонаторов типа SRR, как это принято было считать до сих пор (см., например [7]). При достаточно точной настройке плеч мостовой схемы она обеспечивает практически нулевой сигнал на выходе фильтра, то есть в традиционном представлении добротность, близкую к бесконечной. Это свидетельствует, во-первых, о том, что спектр резонаторов типа SRR содержит вырожденные колебания (снятие вырождения, достигаемое теми же кусочками диэлектрика, продемонстрировано в [4]), а во-вторых – о некорректности расчета добротности SRR как добротности одного резонатора (колебания).

Следует прокомментировать также общепринятое для метаматериальных структур мнение о малости ячеек по сравнению с длинами волн. Действительно, из-за влияния меньшего («полуволнового» внутреннего кольца SRR) резонансная частота внешнего («волнового» кольца) заметно снижается [8]. Кроме того, в рассмотренной нами микрополосковой структуре резонаторы вытянуты в линию, а в SRR реализованы в виде колец (соответственно расстояние между центрами SRR уменьшается примерно в 3 раза). Если добавить к этому еще и влияние диэлектрической подложки, становится понятным почему представление о малости типовых ячеек метаматериалов 3D структур по сравнению с длиной волны вполне справедливо. Это, однако, не исключает их топологической эквивалентности вытянутым линейным структурам типа представленных на рис. 1.

Литература

1. E. Brookner “Metamaterial Advances for Radar and Communications” *Microwave Journal*, Nov2016, Vol. 59 Issue 11, p22-42. 11p.
2. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. “Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, No. 11, November 1999.
3. Ильченко М.Е., Живков А.П., Орлов А.Т. Фильтры на базе резонаторов с близкими по частоте модами как ячейки метаматериалов.// *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2016. – № 1 (104). – С. 7–14.
4. Ильченко М.Е. Инверсия мод колебаний в ячейках метаматериалов / М.Е. Ильченко, А.П. Живков // Tenth International Scientific Conference “Modern Challenges in Telecommunications” (Київ, 19-22 квітня 2016 р.). м. Київ, 2016. Стр.20 – 23.
5. Режекторный СВЧ фильтр: А. с. 1529321 СССР, МКИ Н 01 Р1/20 /М.Е. Ильченко, А.П. Живков, А.Г. Витюк. – Опубл. 15.12.89, Бюл. № 46.
6. Ильченко М.Е. СВЧ устройства с использованием нескольких типов колебаний диэлектрических резонаторов / М.Е. Ильченко, А.П. Живков // *Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника*. – 1989. – Т. 32, № 5. – С. 56–59. (есть англ. версия: М. Е. P'chenko and A.P. Zhivkov ”UHF devices based on several dielectric-cavity mode types”, *Izvestiya VUZ, Radioelektronika*, vol. 32, No. 5, pp. 56-59, 1989).
7. U. L. Rohde and A. K. Poddar, “Möbius Metamaterial Inspired Next Generation Circuits and Systems” *Microwave Journal*, Vol. 59, No. 5, May 2016.
8. Radkovskaya, A. Shamonin M., Stevens C. J., G. Faulkner G., Edwards D. J., Shamonina E. and Solymar L. Resonant frequencies of a combination of split rings: experimental, analytical and numerical study. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 46, 473–476.