

ИНВЕРСИЯ МОД КОЛЕБАНИЙ В ЯЧЕЙКАХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Ильченко М.Е., Живков А.П.

Институт телекоммуникационных систем НТУУ «КПИ», Украина

E-mail: zhivkovalex@gmail.com

Inversion oscillation modes in metamaterials cells

Metamaterials are considered separate cell. Their representation in the form of various types of microwave resonators allowed the authors to obtain results that allow to explore and simulate such a cell on the basis of oscillatory systems - oscillators and rotators.

С момента появления в 1999 году статьи [1], которую принято считать основополагающей в части практической реализации метаматериалов, число публикаций на эту тему стремительно возрастает. Появились и работы, обобщающие проведенные исследования, такие, например, как [2]. Однако по-прежнему актуальной остается проблема выработки более-менее общей терминологии для описания и изучения подобного рода структур, особенно в связи с тем, что метаматериалы активно завоевывают свои позиции и в акустике, и в процессах (возможно целесообразно использовать здесь термин - метапроцессы). Это и эффекты Вавилова-Черенкова и Доплера, и такое широко известное явление, как мираж. Едва ли можно при изучении акустических свойств метаматериалов пользоваться понятиями магнитного и электрического диполей, хотя зачастую процессы, происходящие в электродинамических и акустических метаматериалах, описываются одинаковыми или похожими математическими уравнениями и моделями. В начале своего монументального труда «Лекции по теории колебаний» [3] академик Л.И. Мандельштам, который по праву считается одним из «родоначальников» изучения сред с отрицательным коэффициентом преломления, отметил, цитируя Планка: «правильная классификация – это уже высокий вид познания».

С проблемой правильной классификации и общей терминологии пришлось столкнуться и авторам [4], которые в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века активно исследовали (и публиковали результаты исследований) структуры, подобные ячейкам метаматериалов, такие как как режекторные и полосовые фильтры с двумя или несколькими резонаторами, не связанными между собой и расстроенными в общем случае по частоте.

Не претендуя на всеобщность и единственность подхода, мы бы хотели обратить внимание на те элементарные структуры (ячейки) метаматериалов, в которых в явном виде реализованы или «угадываются» резонаторы или колебательные системы, то есть по возможности перейти к использованию понятий «синфазных» и «противофазных» колебаний [5], «осцилляторов» и «ротаторов» [6]. Это, как нам кажется, позволит выявить некоторые принципиально важные свойства метаматериалов и метапроцессов.

Понятие синфазных и противофазных колебаний возникло при изучении связанных колебаний. Система связанных резонаторов характеризуется

парциальными и нормальными частотами [5]. Парциальные частоты – это резонансные частоты независимых колебательных систем (отдельных резонаторов, вырожденных колебаний резонаторов сложной формы...), которые не связаны между собой. Нормальные частоты (моды) - характерны для системы связанных резонаторов, они составляют колебательный спектр системы. Колебание физической системы является суперпозицией нормальных колебаний.

Нормальные колебания могут быть рассмотрены как синфазные и противофазные колебания, модель которых в виде связанных маятников представлена на рис. 1:

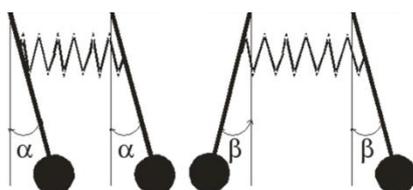


Рис. 1 Модель синфазных а) и противофазных б) колебаний.

Из [7] следует, что частота синфазных колебаний $f_{сф}$ всегда ниже частоты противофазных колебаний $f_{пф}$. Это является принципиально важным для всякого рода «натуральных материалов», «строящихся» на базе связанных колебаний.

Вернемся к «электрическим» и «магнитным» типам колебаний, при рассмотрении метаматериалов такой подход использован, например, в [8]. Рассмотрим элементарную ячейку метаматериала, как это сделано в [4]. На рис. 2 представлены два варианта ячеек метаматериалов - традиционная в виде двух разомкнутых колец резонаторов и ее аналог в виде полосковых резонаторов с длинами, близкими к $\lambda/2$ и λ соответственно (здесь λ –длина волны, соответствующая резонансной частоте ячейки метаматериала, которая лежит между парциальными частотами резонаторов (колебаний), образующих ячейку и примерно равна $(f_э + f_м)/2$ (здесь $f_э$ и $f_м$ - резонансные частоты электрического и магнитного типов колебаний соответственно).

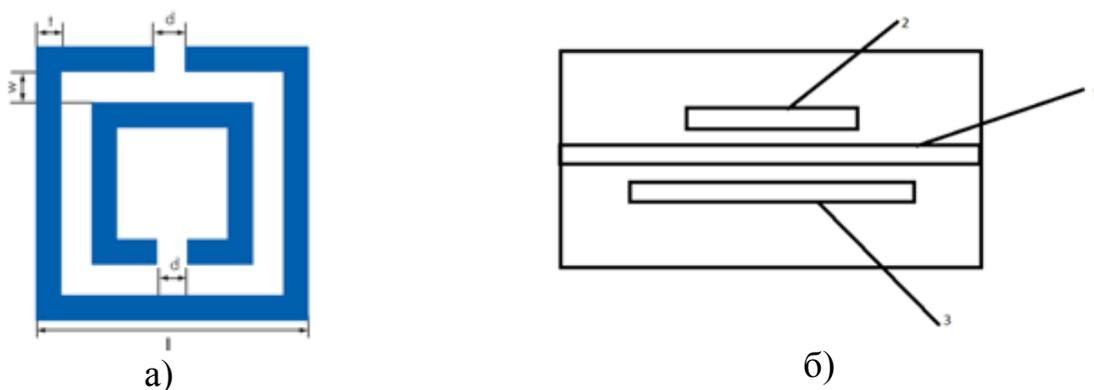


Рис. 2 Ячейки метаматериалов в виде а) двух разомкнутых колец, лежащих в одной плоскости и б) «полуволнового» (2) и «волнового» (3) резонаторов.

«Внутренний» резонатор на рис. 2 а) и «полуволновый» резонатор на рис. 2 б) соответствуют «магнитному» (магнитный диполь) типу колебаний, а «внешний» резонатор на рис. 2 а) и «волновой» резонатор на рис. 2 б) соответствуют «электрическому» типу колебаний (электрический диполь). Структуры, подобные приведенным на рис 2 б, обладают свойствами метаматериала («неминимальнофазовость», которую можно трактовать как направленность фазовой и групповой скоростей навстречу друг другу...) в том случае, если $f_э > f_м$. В терминологии синфазных и противофазных колебаний [4] это означает, что $f_c > f_{пф}$, что *принципиально* невозможно для структур, построенных на связанных колебаниях, но вполне реализуемо в искусственно создаваемых ячейках метаматериалов. Это их фундаментальное свойство и фундаментальное отличие от «натуральных» материалов.

В таблице 1 сделана попытка классификации типов колебаний по их фазовым портретам [6]. Разумеется, она довольно условна, но в дальнейшем позволит проводить некоторые аналогии между метаматериалами в электродинамике, акустике, и «метапроцессами».

Таблица 1.

Колебательная система	Тип	Синфазность	Аналог диполя
1. Электрон	Ротатор	+	Электрический
2. Колесо (строб-эффект)	Ротатор	+	Электрический
3. «Полуволновой резонатор»	Ротатор	+	Электрический
4. Колебания ДР E01 ^δ типа	Ротатор	+	Электрический
5. Моргающий фонарь (для демонстрации строб-эффекта)	Осциллятор	-	Магнитный
6. Маятник, качели	Осциллятор	-	Магнитный
7. «Волновой» резонатор	Осциллятор	-	Магнитный
8. Колебания ДР H01 ^δ типа	Осциллятор	-	Магнитный

Поскольку, как отмечалось, в ячейках метаматериалов отсутствуют связанные между собой колебания, естественно полагать, электромагнитной волны в них также определяется не связанными между собой колебаниями, как, например, в нормальных диэлектрических средах, а происходит подобно распространению волны в волноведущих структурах (волновод, оптоволокно...). Об этом свидетельствует и модель магнитоиндукционных волн (МИ-волны), детально описанная в [2], и волны в так называемых омега-структурах [9].

Подводя итоги доклада, можем сделать следующие выводы относительно специфических свойств метаматериалов:

1. Присущие базовым ячейкам метаматериалов колебания не связаны между собой и принципиально относятся к разным типам (синфазные и противофазные, электрические и магнитные, ротатор и осциллятор).
2. Для достижения «неминимальнофазовости», обеспечивающей встречное направление групповой и фазовой скоростей, необходимо выполнение соотношения между частотами колебаний $f_c > f_{пф}$ ($f_c > f_{пф}$), что принципиально недостижимо в материалах, в которых волна распространяется благодаря связанным колебаниям одинаковых структур.
3. Электромагнитная волна в магнитоматериальной среде распространяется как в среде волноведущей, без «помощи» связанных колебаний.
4. В хорошо известном строб-эффекте (кажущееся вращение колеса в обратную сторону в фильмах или при подсветке его мигающим источником света) частота ротатора (вращения колеса) больше частоты осциллятора (источника света). Этому вопросу, как и акустическим метаматериалам (в терминах колебательных систем) посвящен отдельный доклад.

В качестве гипотезы следует отметить, что при существовании неких материалов, в которых могут существовать близко (в сравнении с длиной электромагнитной волны в структуре) расположенные «источники» колебаний, аналогичные по своим свойствам электрическому и магнитному диполям, такие среды могут проявлять свойства метаматериалов. Наиболее вероятная «среда» их обитания – кристаллы в пока еще мало освоенном террагерцевом диапазоне.

Литература

1. 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
2. Metamaterials Handbook: Vol. I. Phenomena and Theory of Metamaterials. 926 p. Vol. II. Applications of Metamaterials. 724 p. / Ed. by F. Capolino CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.
3. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. М. - Наука. - 1972 г.
4. 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.
5. М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. – М.- "Наука," Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1984. - 431 стр.
6. А. Зоммерфельд. Строение атома и спектры. Том. 1. Государственное издательство технической литературы. - М.- 1956 г.
7. Пиппард А. Физика колебаний.- М.- Высшая школа,-1985.-456 с.
8. I.B. Vendik, O.G. Vendik and M.A. Odit: Physics of the Solid State Vol. 51 (2009), p. 1590.
9. «Bianisotropic route to the realization and matching of backward-wave metamaterial slabs» S. A. Tretyakov, C. R. Simovski, and M. Hudlíčka Phys. Rev. B 75, 153104 – Published 24 April 2007.