

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА:

**«МАГНИТНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ  
В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ»**

Выполнил студент  
419 группы:  
Иванов П.А.

---

Научный руководитель:  
доцент Радковская А.А.

---

Допущен к защите  
Зав. кафедрой магнетизма  
профессор Перов Н.С. \_\_\_\_\_

Москва  
2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. МАГНИТНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ И РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕТА-АТОМАХ	6
1.1 Взаимодействие мета-атомов	6
1.2 Влияние взаимодействия мета-атомов на дисперсионные характеристики метаматериалов	9
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ	11
2.1 Собственные векторы и собственные значения	11
2.2 Метод обратных матриц импеданса	12
2.3 Моделирование резонансного отклика мета-атомов при возбуждении локальным или однородным магнитным полем	14
2.4 Параметры моделирования	15
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАЗЦЫ	16
3.1 Экспериментальная установка и методики измерения	16
3.1.1 Экспериментальная установка для 2D сканирования ЭМ поля	16
3.1.2 Магнитное поле антенны для однородного возбуждения	17
3.1.3 Магнитное поле антенны для локального возбуждения	19
3.1.4 Влияние положения приемной антенны на измеряемый сигнал	20
3.2 Мета-атомы в МГц диапазоне и их параметры	21
3.3 Использование нормировки для унификации данных	22
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТА-АТОМОВ МАГНИТНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ	23
4.1 Пара взаимодействующих мета-атомов в планарной конфигурации при локальном возбуждении и возбуждении в однородном поле	24
4.2 Пара взаимодействующих мета-атомов в аксиальной конфигурации при локальном возбуждении и возбуждении в однородном поле	26
4.3 Локализация положения с нулевым взаимодействием	28

4.4 Система из трех взаимодействующих мета-атомов при возбуждении в локальном или однородном поле	31
4.4.1 Три планарных взаимодействующих мета-атома при центральном возбуждении локальным полем	31
4.4.2 Три планарных взаимодействующих мета-атома в однородном поле	33
4.4.3 Три мета-атома в планарно-аксиальной конфигурации, расположенные «углом»	35
4.5 Система из четырех мета-атомов в однородном поле	35
<b>ГЛАВА 5. 1D И 2D ДИСКРЕТНЫЕ МАГНИТНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ</b>	<b>37</b>
5.1 Планарная линия из семи мета-атомов при локальном центральном и однородном возбуждении	37
5.2. Две планарных линии из 7 мета-атомов, расположенных аксиально друг относительно друга, при локальном центральном и однородном возбуждении	38
5.3. Поверхность мета-атомов 7x7 при локальном центральном и однородном возбуждении	39
5.4. Двухслойная метаповерхность 7x7 при однородном возбуждении	41
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>42</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>43</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b>	<b>45</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</b>	<b>49</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3</b>	<b>51</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4</b>	<b>52</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5</b>	<b>54</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Метаматериалами называют искусственно созданные периодические структуры, отличающиеся аномальными по сравнению с природными материалами электромагнитными характеристиками [1]. Ярким примером таких характеристик, предсказанным и описанным В.Г. Веселаго в 60-ые годы прошлого века, является отрицательный показатель преломления [2]. Однако впервые экспериментально получить материал с отрицательным показателем преломления удалось только в 2000 году группой Д. Смита, что привлекло интерес к исследованиям в этой области [3]. Примеров применения метаматериалов на сегодняшний день немало: усилители сигнала МРТ [4], приборы, осуществляющие беспроводную передачу энергии [5], суперлинза, способная преодолевать дифракционный предел [6], и многие другие.

Метаматериалы, как правило, состоят из резонансных элементов (мета-атомов), размер которых много меньше длины волны падающего электромагнитного излучения. Свойства такой структуры в целом определяются не только характеристиками индивидуальных элементов, но и взаимодействием между ними [7]. Коэффициент взаимодействия элементов может существенно отличаться в зависимости от типа мета-атомов и способа их упорядочения.

В магнитных метаматериалах, реагирующих на магнитную составляющую электромагнитной волны, в качестве мета-атомов обычно используют расщепленные кольцевые резонаторы с впаянной емкостью или без нее в зависимости от частотного диапазона. В результате взаимодействия мета-атомов по магнитному метаматериалу могут распространяться медленные волны токов – так называемые магнитоиндуктивные волны (МИ волны). Если метаматериал не бесконечный, то на краях структуры происходит отражение, и МИ волны образуют стоячие волны на дискретном наборе частот – собственными модами колебаний. Выбирая способ возбуждения метаматериала, мы определяем, какие моды будут возбуждаться, а какие – нет.

К настоящему времени поведение метаматериала при возбуждении локальным полем было исследовано очень подробно. Однако поведение при возбуждении однородным полем исследовано не достаточно хорошо.

Целью данной работы была поставлена задача исследовать особенности отклика метаматериала, возбуждаемого однородным полем. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- Изготовить подложки для крепления элементов, а также провести предварительную подстройку резонансной частоты образцов целевого значения с необходимой точностью.
- Провести исследование анизотропии взаимодействия элементов и найти такое положение элементов, при котором они не взаимодействуют.
- Исследовать влияние положения приемной антенны на величину измеряемого сигнала и с учетом полученных результатов определить наилучшую методику измерения.
- Провести экспериментальное и теоретическое исследование структур разного уровня сложности: от двух отдельных мета-атомов до двухслойной метаповерхности.
- Исследовать влияние неоднородности поля возбуждающей антенны на отклик метаматериала.
- Сравнить отклик структур при разных типах возбуждения и определить особенности поведения метаматериала при возбуждении однородным полем в отличие от отклика при локальном возбуждении.

# ГЛАВА 1. МАГНИТНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ И РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕТА-АТОМАХ

## 1.1 Взаимодействие мета-атомов

Как уже было сказано ранее, свойства метаматериала определяются не только индивидуальными характеристиками мета-атома, но и их взаимодействием. В общем случае, это взаимодействие может быть как магнитным, так и электрическим, в зависимости от частоты внешнего электромагнитного излучения, от размера и формы элементов, а также расстояния между ними [8].

В качестве магнитных мета-атомов используют расщепленные кольцевые резонаторы – медные кольца с впаянным в щель конденсатором. Если длина падающей электромагнитной волны много больше размера мета-атомов ( $\lambda \gg d$ ), то их можно рассматривать как эквивалентные  $RLC$ -контуры с резонансной частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

и добротностью:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где  $L$  – индуктивность,  $R$  – сопротивление,  $C$  – емкость контура.

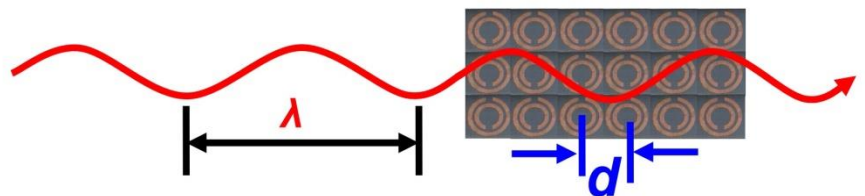


Рисунок 1 – Слева - пример мета-атома в МГц диапазоне в виде расщепленного кольцевого резонатора с впаянной емкостью. Внешний диаметр кольца – 23 мм, размер щели – 2 мм, резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, добротность  $Q=150$ . Справа - схематичное изображение падающей ЭМ волны и метаматериала,  $\lambda$  – длина ЭМ волны,  $d$  – характерный размер мета-атомов [9].

В МГц диапазоне размер используемых мета-атомов обычно составляет несколько сантиметров, что обеспечивает выполнение условия  $\lambda \gg d$  и позволяет рассматривать их взаимодействие как преимущественно магнитное. Коэффициент взаимодействия можно определить из выражения:

$$\kappa_H = \frac{2M}{L}, \quad (3)$$

где  $M$  – взаимоиндукция мета-атомов.  $M$  зависит от их взаимного положения.

При взаимодействии двух метаатомов резонансная кривая расщепляется на два пика. Определяя экспериментально значения этих резонансных частот, можно определить значение коэффициента взаимодействия (в случае только магнитного взаимодействия) по формуле:

$$\kappa = 2 \left( \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right). \quad (4)$$

Для планарной конфигурации мета-атомов коэффициент взаимодействия отрицателен (т.к. отрицателен коэффициент взаимной индукции), а для аксиальной конфигурации он положителен. При переходе от одной конфигурации к другой коэффициент взаимодействия меняет свой знак, следовательно, существует такое взаимное расположение элементов, когда он равен нулю, то есть когда элементы не взаимодействуют.

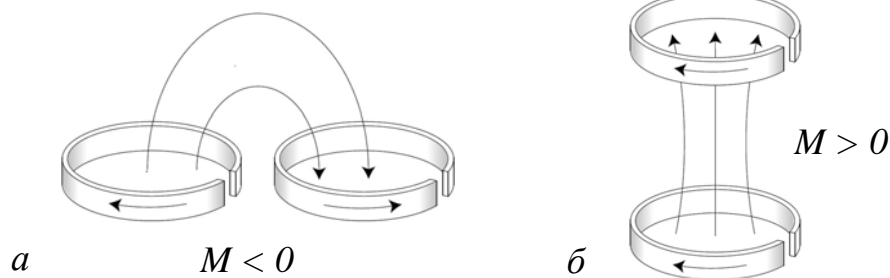


Рисунок 2 – Изображение планарной и аксиальной структур с отрицательной и положительной взаимоиндукцией  $M$ , определяющей знак коэффициента взаимодействия  $\kappa$  [10].

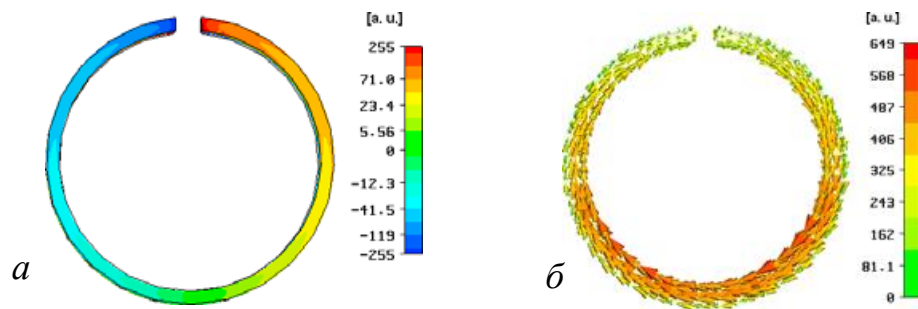


Рисунок 3 – Численное моделирование распределения (а) - зарядов и (б) - токов в расщепленных кольцевых резонаторах в ГГц диапазоне [11].

В ГГц диапазоне длина возбуждающей волны уже сравнима с размером элементов, поэтому к магнитному взаимодействию элементов добавляется электрическое, вследствие неоднородного распределения зарядов и токов в мета-атомах [11]. Заряды будут сконцентрированы у щели, там же будет находиться результирующий электрический диполь. Ток, напротив, максимален в противоположной части кольца, где будет локализован результирующий магнитный диполь. Соответственно, в зависимости от взаимной ориентации элементов, может преобладать электрическое или магнитное взаимодействие.

Меняя относительное расположение элементов, можно менять их коэффициент взаимодействия. Так, расположив элементы щелями друг к другу, мы получим максимально возможный коэффициент взаимодействия при фиксированном расстоянии между центрами элементов. Напротив, разместив элементы так, что их щели наиболее удалены друг от друга, мы получим минимально возможный коэффициент взаимодействия при фиксированном расстоянии между центрами элементов.

Таким образом, электрическая составляющая взаимодействия вносит свой существенный вклад только на малых расстояниях, в то время как магнитное взаимодействие спадает с расстоянием значительно слабее.



## 1.2 Влияние взаимодействия мета-атомов на дисперсионные характеристики метаматериалов

Дисперсионное соотношение для магнитоиндуктивных волн можно получить, записывая закон Кирхгофа (с учетом закона электромагнитной индукции Фарадея) для цепочки магнитно-связанных контуров, предполагая связь только между ближайшими соседями [9]. Тогда, пренебрегая потерями, получившееся соотношение будет иметь вид:

$$Z_0 I_n + i\omega M(I_{n-1} + I_{n+1}) = 0, \quad (5)$$

где  $I_n$  - ток в  $n$ -том элементе,  $Z_0$  – собственный импеданс элемента.

Предполагая решение уравнения (5) в виде плоской волны:

$$I_n = I_0 \exp(ikna), \quad (6)$$

где  $k$  – волновой вектор, характеризующий МИ волну,  $a$  – расстояние между центрами элементов, можно получить дисперсионное уравнение:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2M}{L} \cos(ka)}}, \quad (7)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота элемента.

Из формулы (7) следует, что МИ волна распространяется в полосе частот, определяемой соотношением:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + |\kappa|}} \leq \omega \leq \frac{1}{\sqrt{1 - |\kappa|}} \quad (8)$$

Следовательно, ширина полосы пропускания зависит от величины коэффициента взаимодействия [12]. Теоретическая дисперсионная зависимость  $\omega(k)$  изображена на Рисунке 4(б).

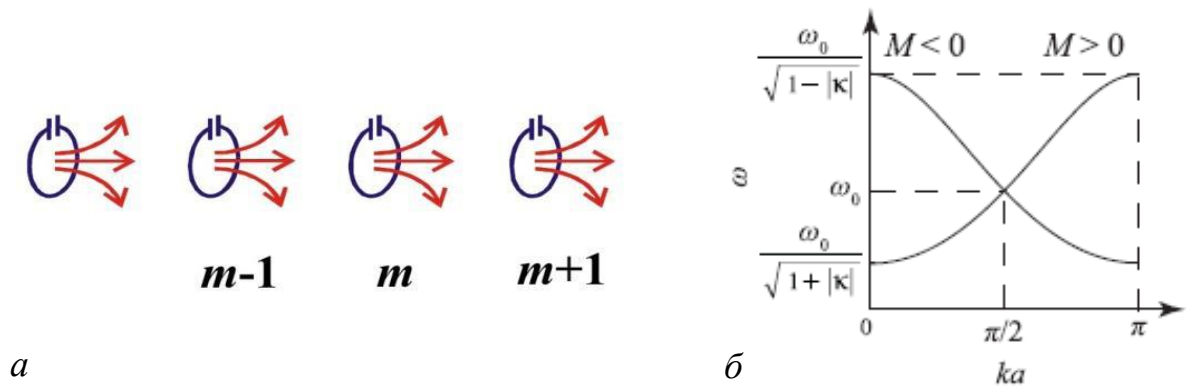


Рисунок 4 - Схема одномерного метаматериала из расщепленных резонансных колец (а) и (б) - теоретические дисперсионные зависимости для МИ-волн для аксиальной (прямая волна) и планарной (обратная волна) линии [12].

В аксиальной конфигурации мета-атомов, когда коэффициент взаимодействия положителен, магнитоиндуктивная волна является прямой волной, поскольку  $\frac{\partial \omega}{\partial k} > 0$  и фазовая и групповая скорости сонаправлены. В планарной конфигурации коэффициент взаимодействия отрицателен и  $\frac{\partial \omega}{\partial k} < 0$ , и фазовая и групповая скорости имеют противоположное направление, а, следовательно, магнитоиндуктивная волна будет обратной волной.

В большинстве случаев, при небольших значениях коэффициента взаимодействия, полоса пропускания МИ волн достаточно узкая, что может быть нежелательным для возможных практических применений. Подобная проблема может быть решена с помощью создания двух полос пропускания вместо одной. Для этого, используя аналогию между магнитоиндуктивными волнами и фононами в твердом теле, можно создать биатомный метаматериал [13].

Таким образом, изменяя параметры резонансных элементов (мета-атомов) или взаимодействие между ними, можно создавать структуры с заранее заданными свойствами и управлять дисперсией МИ волн.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

### 2.1 Собственные векторы и собственные значения

Если структура из мета-атомов не бесконечна, то на ее краях будет отражение магнитоиндуктивных волн, что приведет к образованию стоячих волн на дискретном наборе частот – собственным модам системы. Чтобы найти их нужно определить собственные векторы и собственные значения токов в структуре. В случае 1D материала из  $N$  элементов для его математического описания на нулевое и  $N + 1$  места добавляются «виртуальные» невозбужденные элементы, где значение токов полагается равным нулю. Тогда выражение для  $l$ -го собственного вектора имеет вид:

$$I_n^{(l)} = I(N) \sin\left(\frac{nl\pi}{N+1}\right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N, N+1). \quad (9)$$

Значение  $I(N)$  может быть найдено из условия ортонормированности:

$$\mathbf{I}^{(l)} * \mathbf{I}^{(m)} = \begin{cases} 1, & m = l \\ 0, & m \neq l \end{cases}. \quad (10)$$

Откуда получаем:

$$I(N) = \frac{2}{N+1} I_0. \quad (11)$$

Соответствующие собственные значения могут быть получены из определения:

$$Z\mathbf{I}^{(l)} = \lambda_l \mathbf{I}^{(l)}, \quad (12)$$

как:

$$\lambda_l = Z_0 + 2j\omega M \cos\left(\frac{l\pi}{N+1}\right). \quad (13)$$

Имея выражения для собственных векторов и собственных значений, мы можем найти отклик на общее возбуждение. Вектор напряжений  $\mathbf{V}$  размерности  $N$  может быть выражен через собственные вектора, как:

$$\mathbf{V} = \sum_{l=1}^N \mu_l \mathbf{I}^{(l)}. \quad (14)$$

Неизвестный коэффициент  $\mu_l$  может быть определен из условия ортонормированности:

$$\mu_l = V * I^{(l)}, \quad (15)$$

Теперь, представляя матрицу через ее собственные векторы и собственные значения, получаем для вектора токов:

$$I = \sum_{l=1}^N \frac{\mu_l}{\lambda_l} I^{(l)}. \quad (16)$$

Из приведенного выше уравнения видно, что в общем случае все собственные векторы возбуждаются. Для возбуждения одиночной моды соответствующее собственное значение должно быть близко к нулю. Из уравнения (13)  $l$ -ое собственное значение равно нулю, когда:

$$Z_0 + 2j\omega M \cos\left(\frac{l\pi}{N+1}\right) = 0. \quad (17)$$

Это не что иное, как наше дисперсионное уравнение. Единичная мода, т.е. единичное значение  $ka$ , может быть возбуждено для дискретного набора частот. В общем случае могут возбуждаться все моды колебаний, но выбирая способ возбуждения структуры можно управлять тем, какие моды будут возбуждаться, а какие - нет. При симметричном возбуждении не могут быть возбуждены антисимметричные моды и наоборот [7].

## 2.2 Метод обратных матриц импеданса

Уравнение (5) не учитывает приложенное к структуре возбуждение. Его можно учесть, вводя в закон Кирхгофа соответствующее напряжение. Для одноатомной линии, состоящей из  $N$  резонансных элементов, соотношение между приложенным к элементам напряжением и результирующими токами в них, описывается также законом Кирхгофа, но теперь в форме:

$$\vec{V} = Z\vec{I} \quad (18)$$

Это уравнение может рассматриваться как обобщенный закон Ома в векторном виде, где  $\vec{V}$  и  $\vec{I}$  –  $N$ -мерные векторы напряжений и токов в элементах,  $Z$  – матрица взаимных импедансов размерности  $N \times N$ . Ее главная диагональ

состоит из импедансов отдельных элементов  $Z_0$ , а все остальные элементы матрицы  $z_{ij}$  характеризуют взаимный импеданс и равны  $i\omega M_{ij}$ , где  $M_{ij}$  – взаимоиндукция мета-атомов  $i$  и  $j$ , и фактически описывает взаимодействие мета-атомов. Вид матрицы импедансов (3) показан для случая, когда мы учитываем взаимодействие только соседних мета-атомов в однородном линейном метаматериале из идентичных мета-атомов:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_0 & i\omega M & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ i\omega M & Z_0 & i\omega M & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & i\omega M & Z_0 & i\omega M \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & i\omega M & Z_0 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Если известны напряжения, действующие на элементы структуры - вектор  $\vec{V}$ , то распределение токов для каждого элемента можно найти как:

$$\vec{I} = Z^{-1}\vec{V}. \quad (20)$$

где  $Z^{-1}$  - обратная матрица импедансов.

Выражение (20) полностью описывает распределение токов в структуре, состоящей из  $N$  связанных контуров, при наличии внешнего возбуждения.

Для описания не одномерной структуры матрица импедансов будет несколько сложнее. В зависимости от способа нумерации элементов в матрицу необходимо добавить дополнительные элементы, характеризующие взаимный импеданс всех взаимодействующих элементов. Так, даже в приближении ближайших соседей в однослойной мета-поверхности каждый элемент взаимодействует уже с четырьмя соседями, следовательно, каждая строка и столбец, кроме крайних, будут содержать по четыре элемента, характеризующих взаимный импеданс. Для двухслойной метаповерхности число таких элементов возрастет до 5, для многослойной – до 6 (только в приближении ближайших соседей). Если учитывать не только взаимодействие ближайших соседей, но и соседей по диагонали и через одного, то количество элементов матрицы соответственно еще возрастет.

### 2.3 Моделирование резонансного отклика мета-атомов при возбуждении локальным или однородным магнитным полем

Рассмотрим теперь собственный импеданс  $Z_0(\omega)$  мета-атомов. Для случая с потерями он выглядит так:

$$Z_0(\omega) = i\omega L + \frac{1}{i\omega C} + R, \quad (21)$$

где  $L$  – индуктивность,  $C$  – емкость и  $R$  – сопротивление элемента, а  $\omega$  – частота внешнего источника возбуждения.

Подставляя выражение собственной резонансной частоты мета-атома в виде  $\omega_0 = 2\pi(LC)^{-1/2}$  в (21) получаем:

$$Z_0(\omega) = \left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right) \frac{i}{2\pi i \omega C} + R. \quad (22)$$

Такой вид импеданса позволяет исключить из численного решения уравнения для распределения токов самоиндукцию элементов  $L$ . В таком случае необходимо знать значения сопротивления  $R$  мета-атома и емкость  $C$  впаянного в него конденсатора (собственной емкостью кольца можно пренебречь).

Так же, для точного численного решения требуется значение коэффициента взаимной индукции  $M$ , которое можно определить, зная коэффициент взаимодействия  $k$ , по формуле:

$$M = \frac{k}{2\pi C \omega_0}. \quad (23)$$

В свою очередь, коэффициент взаимодействия  $k$  можно определить из экспериментальных данных о расщеплении резонансной кривой двух мета-атомов, расположенных рядом.

## 2.4 Параметры моделирования

При моделировании отклика метаматериала мы ограничились вторым порядком взаимодействия элементов, т.е. не далее диагональных, так как взаимодействие более высоких порядков вносит несущественный вклад в результирующий отклик. Взаимодействие мета-атомов, которое учитывалось при моделировании, изображено на Рисунке 5. Численные значения параметров приведены в Таблице 1. Моделирование проводилось в плоскости, проходящей через центры элементов (в области максимального отклика).

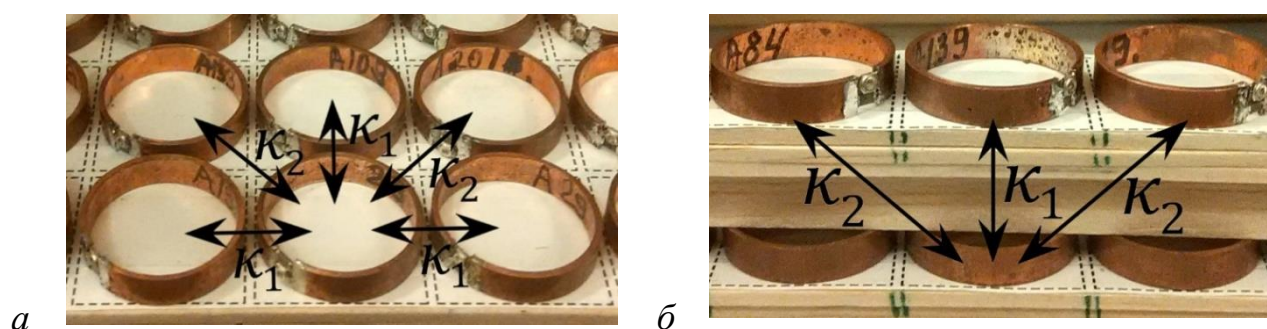


Рисунок 5 - Схематическое обозначение коэффициентов взаимодействия разного порядка для планарного (а) и аксиального (б) расположения элементов.

Таблица 1. Параметры мета-атомов и метаповерхностей.

Параметр	Значение
Емкость, $C$ , пФ	340
Сопротивление, $R$ , Ом	0.065
Добротность, $Q$	150
Резонансная частота, $\omega_0$ , МГц	50.74
Диаметр мета-атомов, мм	23
Коэффициент взаимодействия, $\kappa_1^{planar}$	-0.115
Коэффициент взаимодействия, $\kappa_2^{planar}$	-0.032
Коэффициент взаимодействия, $\kappa_1^{axial}$	0.115
Коэффициент взаимодействия, $\kappa_2^{axial}$	0.025

Так же был проведен экспериментальный анализ неоднородности поля большой антенны. В результате было решено не учитывать ее при моделировании. Анализ приводится в Приложении 2. Код программы для расчета отклика приведен в Приложении 1.

## ГЛАВА 3. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 3.1 Экспериментальная установка и методики измерения

Одним из приборов для экспериментального исследования отклика метаматериалов на воздействие электромагнитного излучения в МГц и ГГц диапазонах является векторный анализатор цепей. Этот прибор позволяет в заданном частотном диапазоне генерировать широкополосный сигнал, излучаемый специальной антенной, для возбуждения метаматериала. Одновременно при помощи приемной антенны можно получать тот же сигнал, прошедший через исследуемый образец. Обработка сигнала позволяет получить амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики исследуемого образца. В данной работе использовался анализатор цепей Agilent Technologies FieldFox N9923A.

#### 3.1.1 Экспериментальная установка для 2D сканирования ЭМ поля

Для ускорения процесса измерения сигнала от каждого элемента метаматериала используется двумерный координатный стол, сопряженный с компьютером, и позволяет в автоматическом режиме перемещать приемную антенну в плоскости над изучаемым образцом, обеспечивая необходимую точность позиционирования приемной антенны в заранее заданных точках.

Координатный стол и векторный анализатор цепей вместе с компьютером (который также использовался для обработки и хранения данных) образуют автоматизированный стенд для 1D и 2D топографирования электромагнитных полей (Рис.6), конструированный в лаборатории кафедры магнетизма [14]. Стенд имеет единый интерфейс для ввода параметров необходимых для эксперимента.





Рисунок 6 – Блок-схема автоматизированного стенда для топографирования электромагнитных полей метаповерхностей в МГц и ГГц диапазонах. Слева направо: векторный анализатор цепей, персональный компьютер, координатный стол [14].

Весь процесс перемещения антенны и измерения сигналов от изучаемой структуры управляется с компьютера по предварительно заданному алгоритму специально разработанным программным обеспечением.

### 3.1.2 Магнитное поле антенны для однородного возбуждения

В процессе экспериментального исследования метаповерхностей разных размеров было использовано два способа возбуждения: 1) локальное возбуждение одного элемента метаповерхности антенной, изготовленной из жесткой части коаксиального кабеля с диаметром петли 5 мм (Рис.7а); 2) однородное возбуждение всей поверхности рамочной антенной (Transmit loop antenna), предоставленной кафедрой фотоники и физики микроволн. Поле, создаваемое во внутренней области такой антенны, должно быть однородным. Внешний вид антенны показан на Рисунке 7(б,в). Размеры антенны ограничивают размеры метаповерхности, поэтому из имеющихся элементов радиусом 23мм, можно было сконструировать метаповерхность не больше, чем 7\*7 элементов при расположении их в квадратной сетке с шагом 24мм (Рис.7е).



Рисунок 7 – Внешний вид антенн, использованных в работе. Антенна для локального возбуждения метаповерхности (а). Рамочная антенна для однородного возбуждения. Внешний диаметр 305мм, внутренний 245мм. Антенна вместе с резонансным элементом в центре (б) и вместе с подложкой для метаповерхности 7\*7 мета-атомов (размеры ячейки 24\*24мм) (в).

Для исследования однородности поля большой антенны использовалась зависимость величины сигнала резонансного отклика одного мета-атома. Поскольку при изменении величины поля при помощи нерезонансной приемной антенны соотношение полезного к шуму было очень низким. В этом случае один мета-атом можно рассматривать как «усилитель» сигнала, пропорционального амплитуде поля. Для этого на подвижной части координатного стола рядом с приемной антенной закреплялся один мета-атом. Расстояние по вертикали между мета-атомами и приемной антенной равнялось 5 мм. Измерения проводились в центральной плоскости большой антенны вдоль двух горизонтальных осей ( $Ox$  и  $Oy$ ) с шагом 12 мм; вдоль вертикальной оси, перпендикулярной плоскости антенны, ( $Oz$ ) с шагом 9 мм, в интервале частот 40-72 МГц, с шагом 0.02 МГц. Соответствующие сигналы вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  показаны на Рисунке 8.

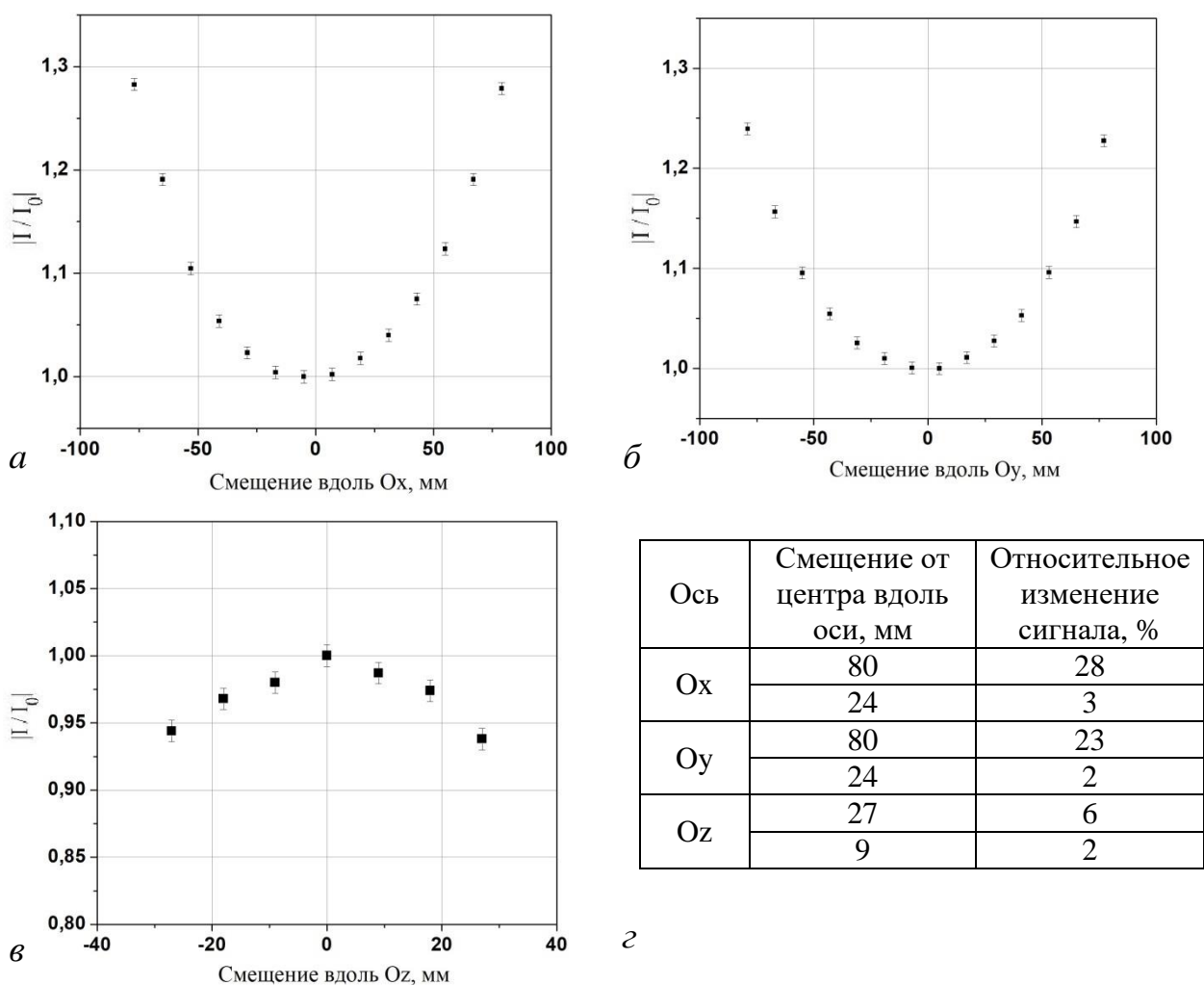


Рисунок 8 – Относительная амплитуда сигнала от одного элемента в зависимости от смещения вдоль оси X (а), Y (б) и Z (в). Относительное изменение сигнала при смещении от центра на различные расстояния (г).

Как и ожидалось, в плоскости антенны сигнал от краев к центру уменьшается. Разница в значениях сигнала и, соответственно, в величине поля в горизонтальной плоскости составляет 20-30% в зависимости от близости к краю антенны, и будет в дальнейшем учтена при моделировании. В вертикальном направлении поле в пределах смещения более однородно.

### 3.1.3 Магнитное поле антенны для локального возбуждения

Распределение магнитного поля антенны для локального возбуждения было подробно исследовано в работе [14] как Рисунок 9. Видно, что при всех частотах поле действительно в основном локализовано в пределах одного мета-атома (границы мета-атома показаны белыми пунктирными линиями).

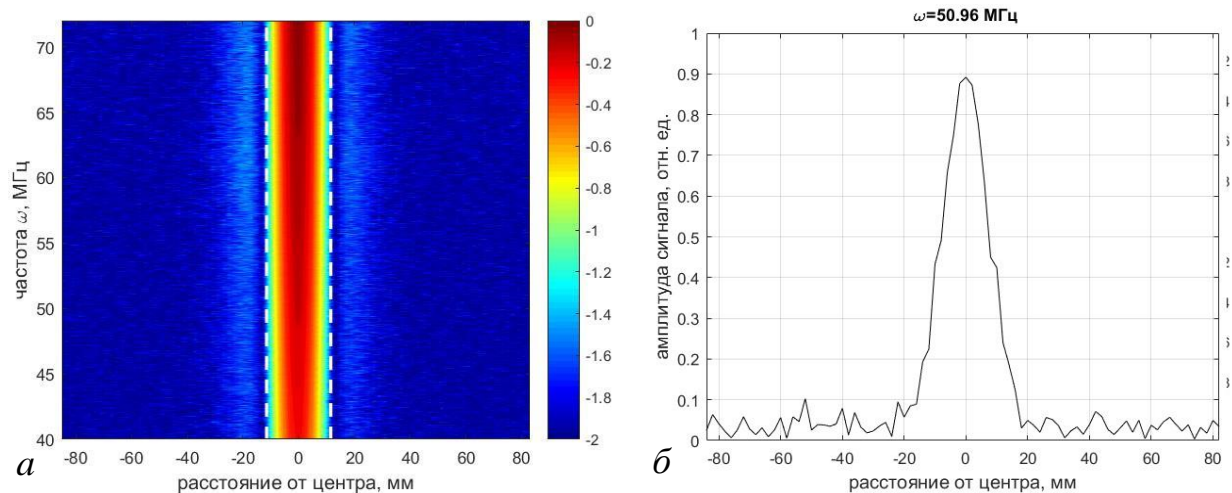


Рисунок 9 – Магнитное поле антенны для локального возбуждения. Зависимость нормированной амплитуды магнитного поля от частоты и смещения вдоль оси X над центром возбуждающей антенны (а). Белые пунктирные линии обозначают область, занимаемую мета-атомом над антенной при локальном возбуждении. Профиль поля для частоты 51 МГц (б) [14].

### 3.1.4. Влияние положения приемной антенны на измеряемый сигнал

В моей работе были использованы два способа расположения приемной антенны (Рис.10). Положение «над центром» позволяет получить высокий уровень принимаемого сигнала, но его можно использовать только для измерения плоских структур. Для измерения сигналов в структурах, где элементы расположены друг над другом, использовалось положение приемной антенны «рядом», однако получаемый сигнал в этом случае был ощутимо меньше. Независимо от способа возбуждения происходило уменьшение сигнала почти в 2,5 раза. Поэтому этот способ был применен только при возбуждении локальным полем, когда сигнал сильнее сам по себе.

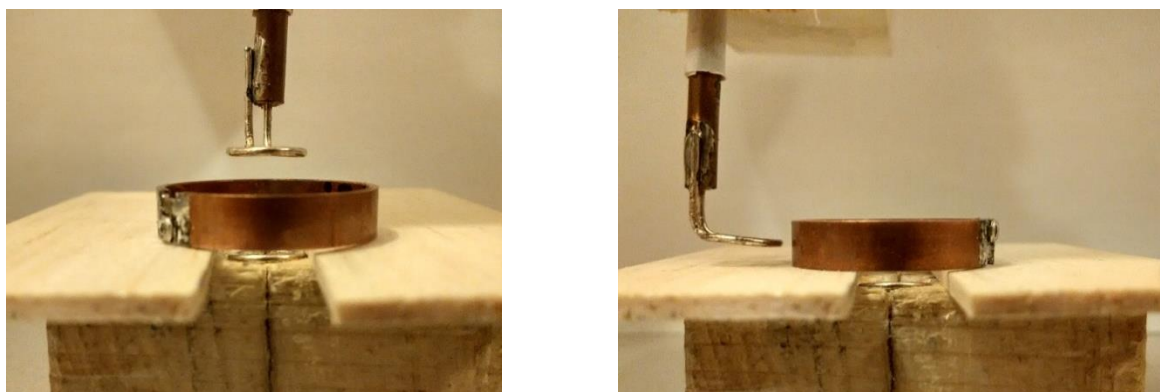


Рисунок 10 – Внешний вид расположения приемной антенны: слева – расположение «над центром», справа – расположение «рядом».

На Рисунке 11 приведены амплитудно-частотные зависимости сигналов от одного мета-атома при использовании различных возбуждающих антенн при различных положениях приемной.

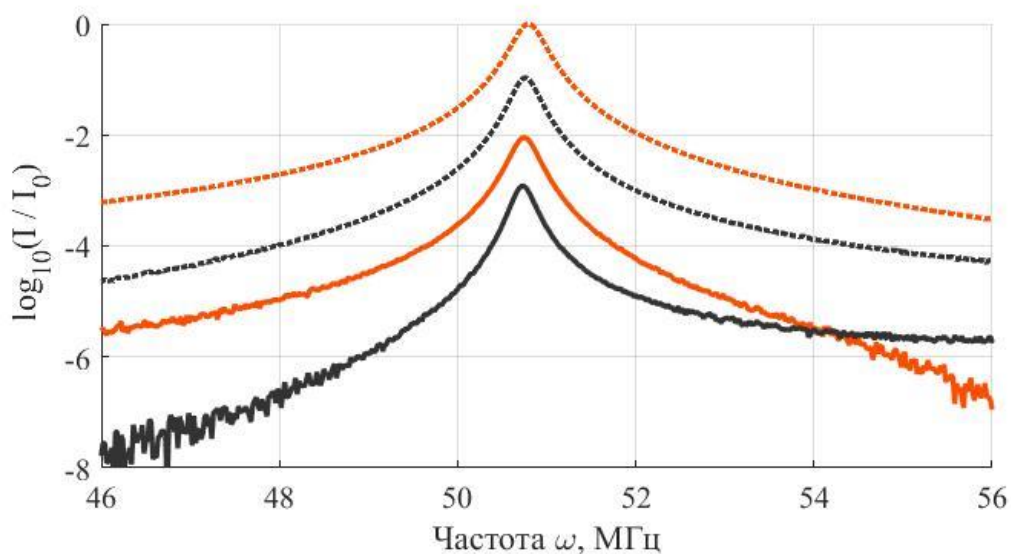


Рисунок 11 – Нормированный сигнал, получаемый приемной антенной от одного элемента в положении «над центром» (красная линия) и в положении «рядом» (черная линия). Пунктирные линии относятся к локальному возбуждению, сплошные - к однородному возбуждению.

Стоит упомянуть, что в данной работе при измерении сигнала приемная антенна располагалась на расстоянии, которое было определено в работе [15] как наиболее оптимальное по соотношению сигнал – шум. Таковым является: при положении приемной антенны «над центром» - 5мм от центра элемента, при положении «рядом» - 1 мм от края антенны.

### 3.2. Мета-атомы в МГц диапазоне и их индивидуальные характеристики

В качестве мета-атомов использовались расщепленные кольцевые резонаторы – медные кольца (Рис.12). Собственная резонансная частота элементов, определяемая их размерами, составляла около 1.8 ГГц. Для уменьшения резонансной частоты в зазор щели были впаяны конденсаторы с постоянной номинальной ёмкостью 330 пФ и подстроечные конденсаторы емкостью 5-20пФ. Параметры мета-атомов приведены в Таблице 2. Использование подстроечных конденсаторов позволило уменьшить разброс резонансных частот элементов до целевого значения. После процедуры

подстройки итоговая частота всех используемых элементов составляла  $50.74 \pm 0.02$  МГц, то есть разброс по частотам не превышал 0.04%.

Таблица 2. Параметры изолированного мета-атома

Внешний диаметр	23мм
Толщина	1 мм
Высота	5 мм
Ширина щели	1 мм
Собственная резонансная частота колец	1.8 ГГц
Частота с впаянной емкостью	$50.74 \pm 0.02$ МГц
Добротность Q	149.2

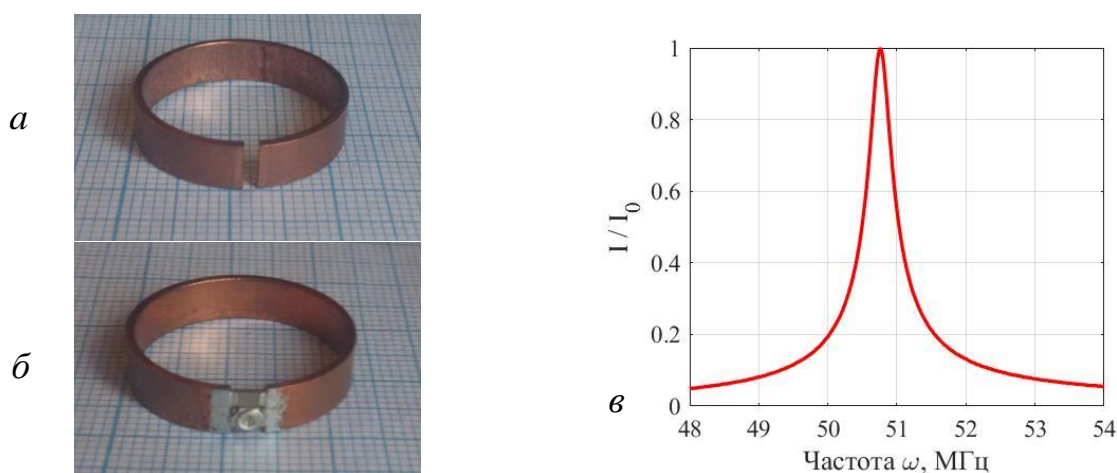


Рисунок 12 – Внешний вид расщепленных кольцевых резонаторов с резонансной частотой в ГГц диапазоне (а) и в МГц диапазоне за счет впаянных конденсаторов (б). Внешний диаметр элементов - 23мм, толщина - 1мм, высота - 5мм, ширина щели - 1 мм. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, добротность  $Q=149.2$ . АЧХ мета-атома (в).

### 3.3. Использование нормировки для унификации данных

Для анализа экспериментальных частотных зависимостей сигнала использовалась нормировка, которая позволяет сравнивать сигналы структур, возбуждаемых различными по величине локальным и однородным полями. Нормировка осуществлялась на максимальный уровень сигнала одного элемента, возбуждаемого в тех же условиях, что и исследуемая структура. При этом были одинаковыми: тип возбуждающей антенны, расстояние от центра элемента до центра приемной антенны и до центра возбуждающей антенны.

## ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТА-АТОМОВ МАГНИТНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В данной главе приводится исследование систем, состоящих из различного количества взаимодействующих мета-атомов при возбуждении локальным или однородным полем. Как уже упоминалось выше, для удобства сравнения производится нормировка сигнала на максимальную величину сигнала при соответствующем возбуждении. Эта резонансная кривая одного элемента, обозначенная серым пунктиром, приводится далее для сравнения уровней сигналов и оценки сдвига резонансных пиков. Для каждого отдельного эксперимента далее для удобства на каждом графике схематично показано взаимное расположение мета-атомов, их нумерация и возбуждающая антенна. Элементы, возбуждаемые антенной, закрашены красным цветом; локальная антенна обозначена в виде петли; сечение большой антенны для однородного возбуждения обозначено вертикальными заштрихованными прямоугольниками. Сама схема показывает вид «сбоку» на эксперимент. Если на графике представлены результаты для локального возбуждения, то сигнал возбуждаемого элемента изображен красным цветом. На Рисунке 13 показаны возможные моды колебаний для основных структур, которые будут описаны в этой главе.

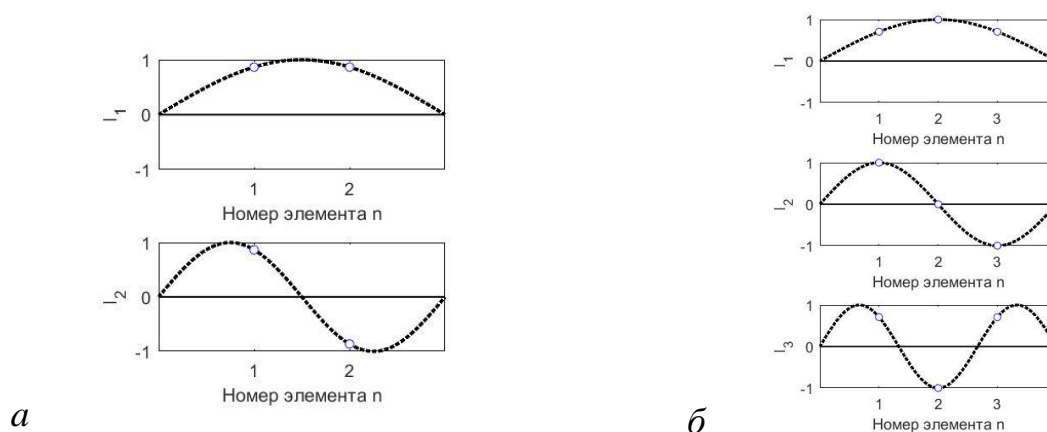


Рисунок 13 – Возможные моды колебаний для структуры из двух элементов (а) и структуры из трех элементов (б).

#### 4.1 Пара взаимодействующих метаатомов в планарной конфигурации при локальном возбуждении и возбуждении в однородном поле

Рассмотрим сначала классический случай, когда два мета-атома расположены планарно и возбуждение приложено к первому элементу (Рис. 14). Их коэффициент взаимодействия отрицателен,  $\kappa < 0$ , поэтому на нижнем резонансе элементы возбуждаются в противофазе, реализуя антисимметричную моду, а на верхнем – в фазе, реализуя симметричную моду. Поскольку реализуются обе возможные моды, то амплитуда токов на обоих резонансах в расщепленной кривой равна половине амплитуды тока при резонансе одного элемента.

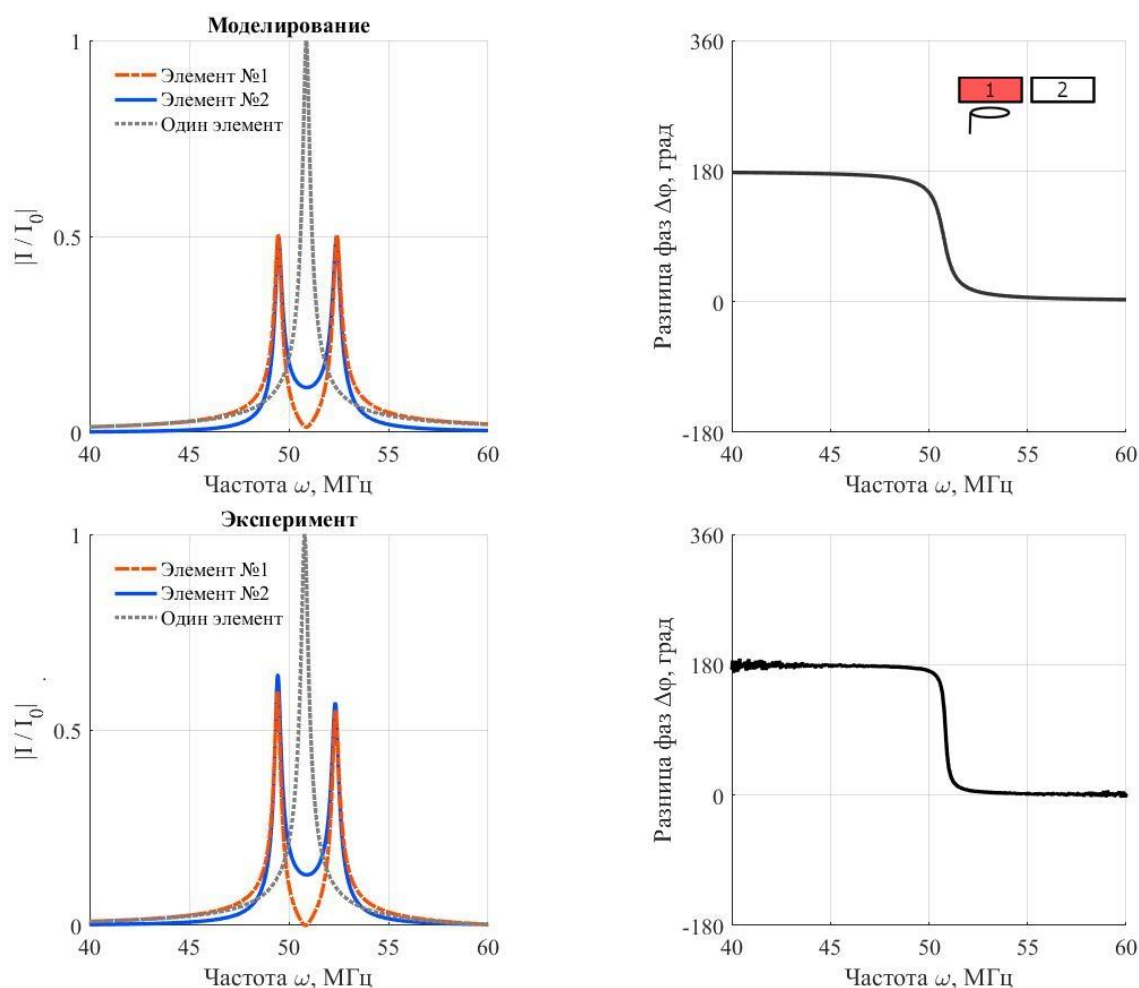


Рисунок 14 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в двух взаимодействующих мета-атомах при возбуждении первого мета-атома локальным полем, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0 = 50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|\kappa| = 0.115$ .



Теперь посмотрим, что будет, когда эти же два элемента, расположенных планарно, возбуждаются однородным полем (Рис.15).

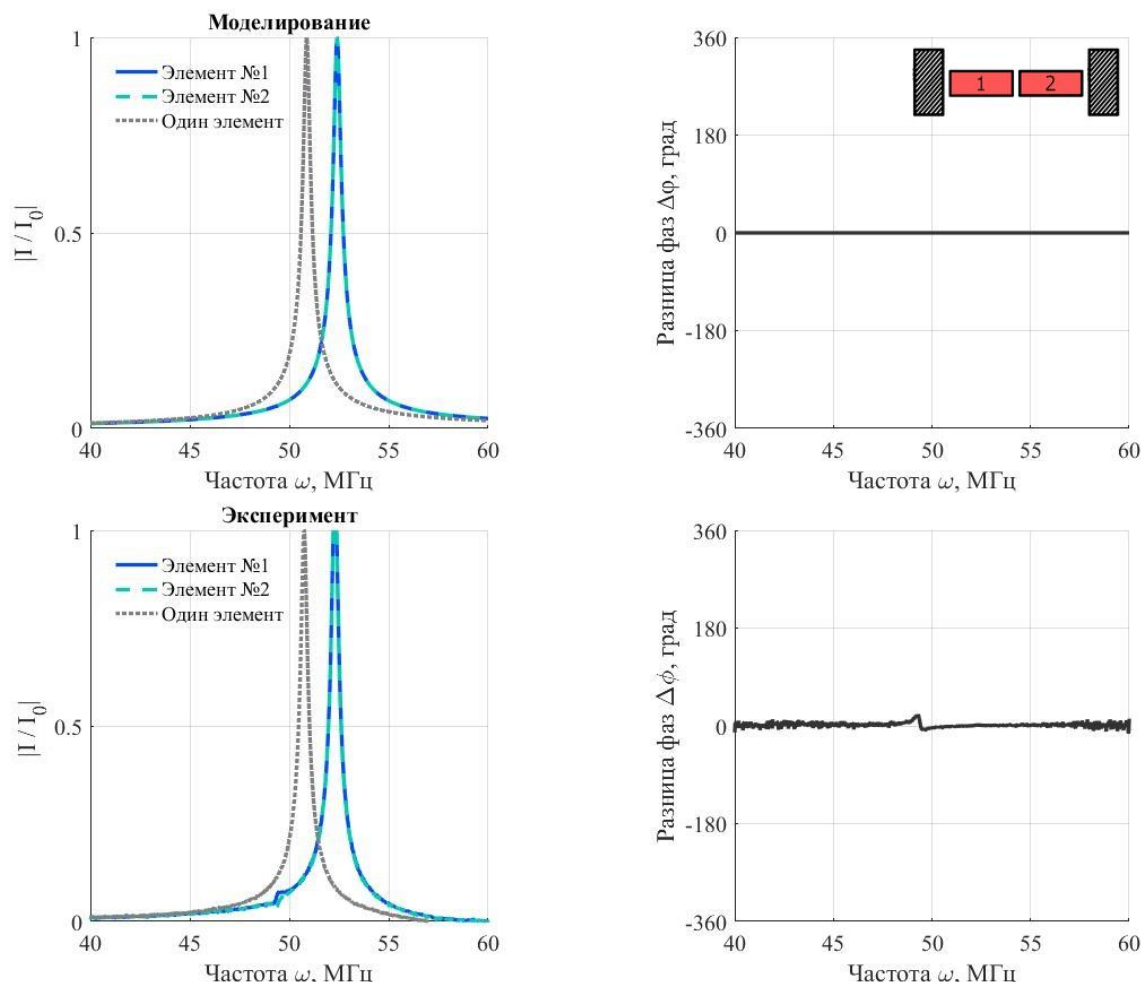


Рисунок 15 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в двух взаимодействующих мета-атомах при возбуждении однородным полем, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

В случае возбуждения однородным полем могут возбуждаться только симметричные моды, поэтому нижний резонанс с антисимметричным возбуждением «запрещен». Действительно, мы видим только верхний резонанс, когда элементы возбуждаются в фазе. При этом с той же амплитудой, которая равна величине амплитуды тока при резонансе одного элемента. На Рисунке 15 в эксперименте можно наблюдать небольшой скачок тока ниже резонансной частоты. Это можно объяснить погрешностью однородности поля, вследствие чего, в элементах расположенных в большой антенне возбуждаются токи несколько отличные друг от друга.

## 4.2 Пара взаимодействующих мета-атомов в аксиальной конфигурации при локальном возбуждении и возбуждении в однородном поле

Рассмотрим теперь два элемента расположенных аксиально, которые возбуждаются локальным полем, приложенным к первому элементу (Рис.16).

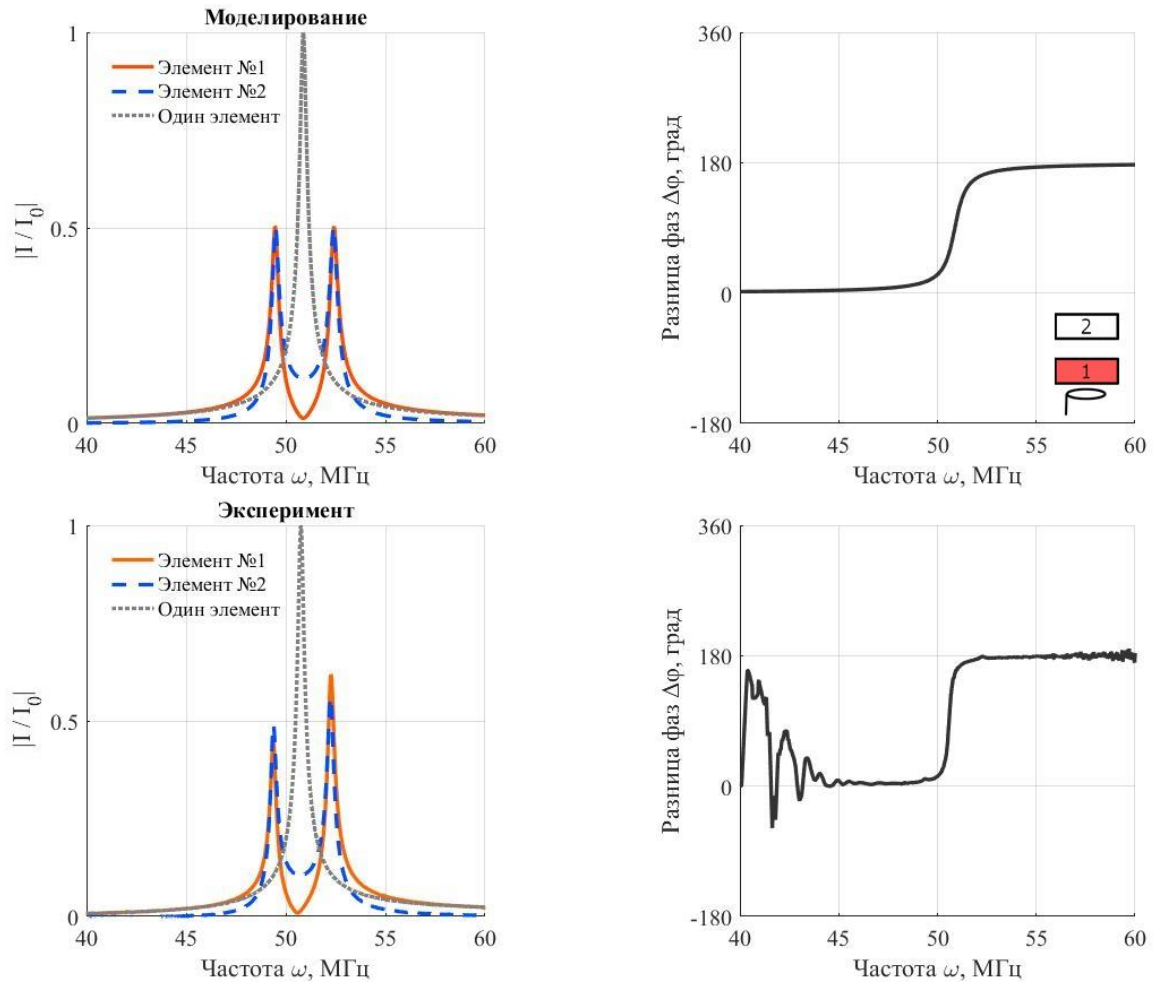


Рисунок 16 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в двух взаимодействующих мета-атомах при возбуждении локальным полем, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

Коэффициент взаимодействия теперь положителен,  $k>0$ , поэтому теперь на нижнем резонансе элементы возбуждаются в фазе, а на верхнем в противофазе. Амплитуда токов при обоих резонансах в расщепленной кривой равна половине амплитуды тока резонанса одного элемента.

Когда два элемента расположены в однородном поле, в них возбуждаются токи равные как по абсолютной величине, так и по фазе. Это справедливо для

любых двухслойных структур – при однородном возбуждении в парных атомах (ближайших между слоями) будут возбуждаться равные токи. На Рисунке 17 показаны графики для верхнего элемента структуры. Экспериментальные зависимости для нижнего элемента не приводятся по причине сложности получения от него хорошего сигнала.

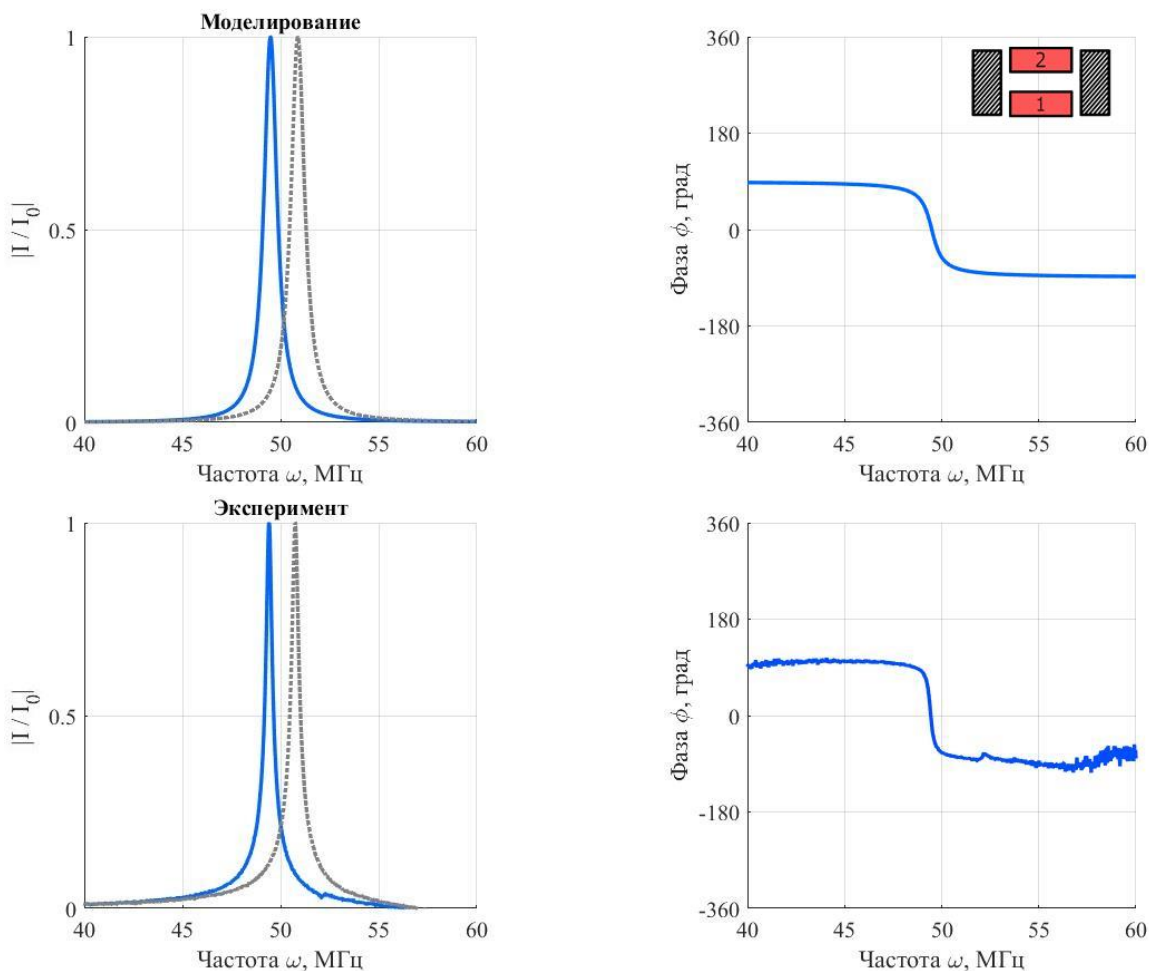


Рисунок 17 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных во втором элементе структуры из двух взаимодействующих мета-атомов при возбуждении однородным полем, и его фаза (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|κ|=0.115$ .

Важно отметить, что резонансные частоты сигналов при локальном и однородном возбуждении не меняются, меняется только распределение энергии по этим частотам. В однородном поле несимметричные моды «запрещаются» и резонанс возникает только на частоте, когда элементы находятся в фазе: ниже  $\omega_0$  – в аксиальной конфигурации при положительном коэффициенте

взаимодействия, и выше  $\omega_0$  – в планарной конфигурации при отрицательном коэффициенте взаимодействия.

Можно заметить, что величины сигналов двух резонансов в эксперименте не равны. Для аксиальной ориентации элементов – выше сигнал верхнего резонанса, для планарной ориентации - выше сигнал нижнего резонанса. В обоих случаях сигнал выше на том резонансе, где элементы возбуждаются в противофазе. Это можно объяснить перекрытием сигналов нескольких элементов в месте расположения приемной антенны. Это явление уже было исследовано в работе [16]. Сигнал в приемной антенне наводится не только тем элементом, над которым она расположена, но и соседним элементом, хотя и в существенно меньшей степени. В эксперименте с планарным расположением мета-атомов, приемная антенна была расположена в положении «над центром». Магнитные потоки от измеряемого и соседнего элемента, в месте расположения приемной антенны, имеют противоположное направление, если элементы возбуждены в фазе и одно направление, если элементы возбуждены в противофазе. Соответственно, элементы, возбужденные в противофазе, будут наводить больший сигнал в приемной антенне. При планарной конфигурации мета-атомов, приемная антенна расположена в положении «рядом». Здесь также больший сигнал в приемной антенне наводится, когда элементы возбуждаются в противофазе, что и видно в эксперименте.

#### 4.3 Локализация положения с нулевым взаимодействием

В предыдущих пунктах были рассмотрены случаи взаимодействия мета-атомов с положительным (аксиальное расположение) и отрицательным (планарное расположение) коэффициентом взаимодействия. Значит можно найти такое взаимное положение элементов, когда они не взаимодействуют, то есть их коэффициент взаимодействия равен нулю.

Более подробное экспериментальное исследование этого вопроса можно найти в работе [17]. Ниже приведена теоретическая модель из работы [12] (Рис.18).

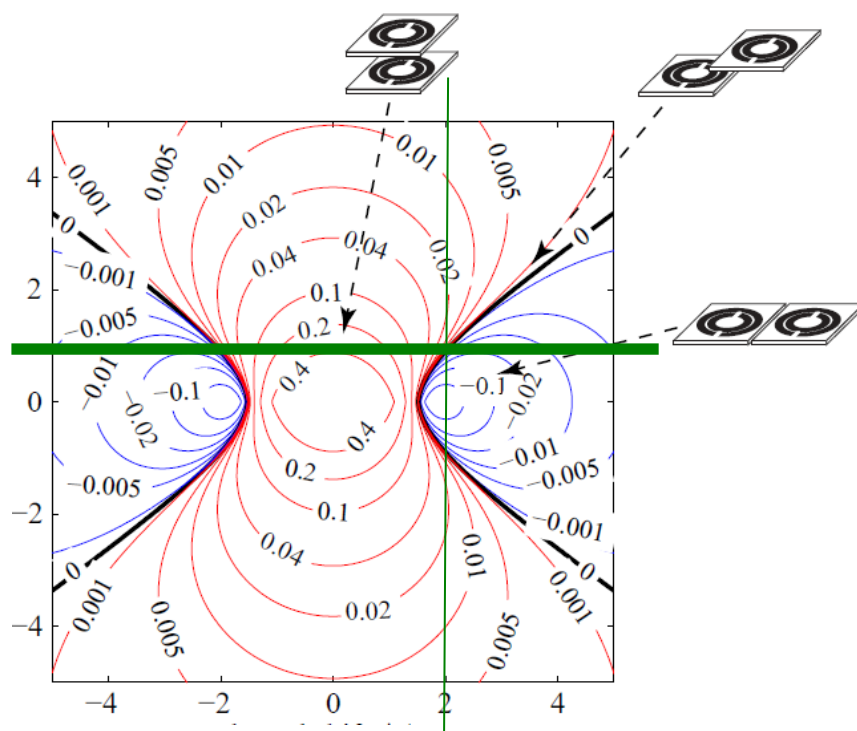


Рисунок 18 – Теоретическая модель расчета значений коэффициента взаимодействия в зависимости от расположения элементов. По оси  $Y$  - относительный сдвиг элементов по вертикали, вдоль оси  $X$  - относительный сдвиг по горизонтали в радиусах. Цветом отображен знак коэффициента взаимодействия  $k$ . Толстая горизонтальная линия показывает положения элементов при горизонтальном смещении при  $Y = r_0$ .

Нами была проведена проверка этой теоретической модели для наших элементов. Возбуждающая антенна была расположена под нижним неподвижным элементом на расстоянии 5 мм от его края, приемная антенна сбоку от него, т.е. в положении «рядом» на расстоянии 1 мм от края элемента. Меняя расстояние между центрами аксиально расположенных элементов по вертикали (оси  $Oz$ ) и, перемещая верхний элемент по оси  $Ox$  с шагом 1мм в автоматическом режиме, были получены частотные зависимости амплитуд токов на неподвижном (возбуждаемом) элементе (Рис 19). Вид эксперимента показан на Рисунке 20 (а). В отличие от амплитуды сигналов, разница частот резонансов не зависит от номера элемента, а определяется только коэффициентом взаимодействия между элементами, а он, в свою очередь, зависит от расстояния, взаимной ориентации и параметров самих элементов, которые идентичны.

Особое внимание было уделено положению элементов, обозначенному пересечением зеленых линий на Рисунке 18, при котором мета-атомы не

взаимодействуют. Поскольку в этой точке горизонтальное смещение элементов кратно их диаметру, а вертикальное их радиусу, то с допустимой долей погрешности, мы можем собрать двухслойную структуру, в которой взаимодействие любых диагональных элементов (взаимодействие второго порядка) между слоями можно принять равным нулю.

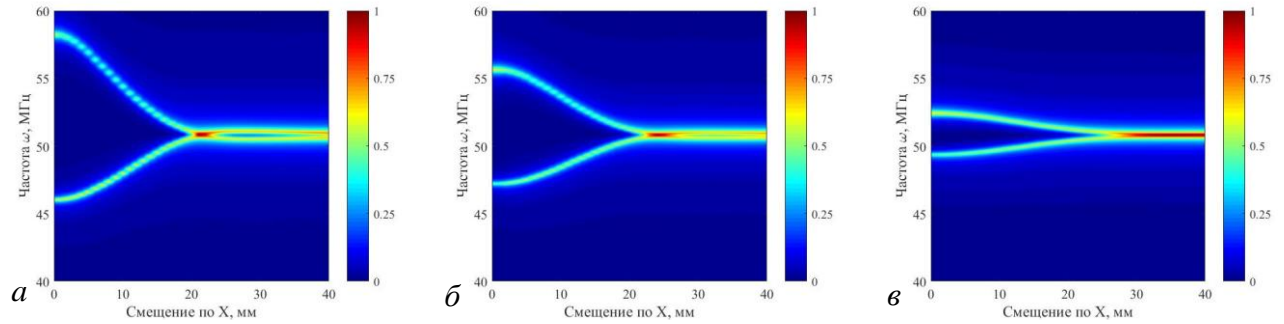


Рисунок 19 – Амплитудно-частотные характеристики тока в одном из двух взаимодействующих мета-атомов в зависимости от смещения по оси  $Ox$ . При различных фиксированных смещениях по оси  $Oz$ :  $Z=10\text{mm}$  (а),  $Z=12\text{mm}$  (б),  $Z=20\text{mm}$  (в).

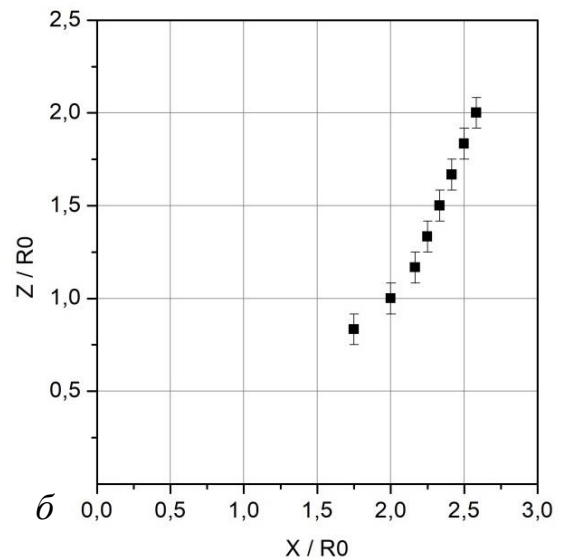
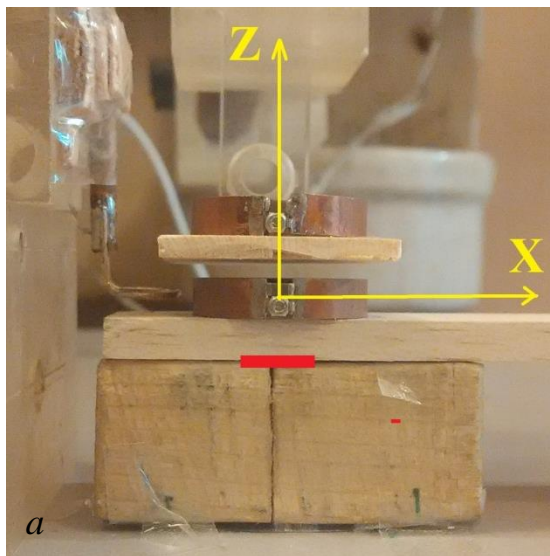


Рисунок 20 – Вид эксперимента (а) и зависимость относительного смещения элементов по оси  $Z$  и  $X$ , нормированного на  $R_0=12\text{mm}$ , где их коэффициент взаимодействия равен нулю (б). Возбуждающая антенна находится под нижним элементом в подложке из бальсы на уровне красной линии, слева расположена приемная антенна в положении «рядом».

Полученные данные подтверждают общий вид теоретической зависимости и будут полезны при проектировании и моделировании свойств систем мета-атомов в МГц диапазоне.

## 4.4 Система из трех взаимодействующих мета-атомов при возбуждении в локальном или однородном поле

### 4.4.1 Три планарных взаимодействующих мета-атома при центральном возбуждении локальным полем

При центральном локальном возбуждении структуры из трех планарных элементов возбуждаются только две симметричные моды (Рис.13б). Поскольку первый и третий элементы расположены симметрично относительно возбуждаемого локальным полем второго элемента, то абсолютные величины и фазы, наведенных в них токов, будут равны, как видно из Рисунка 21.

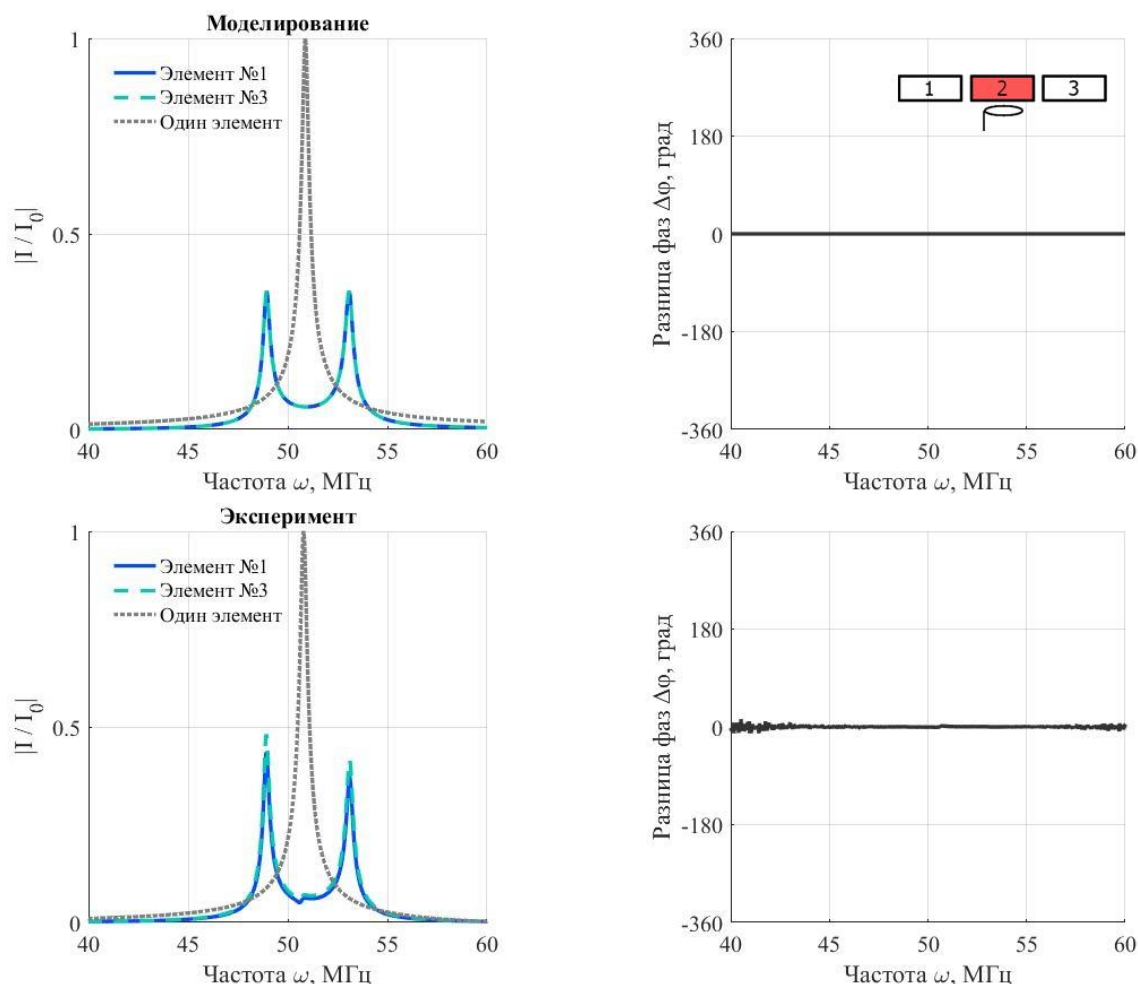


Рисунок 21 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в первом и третьем элементах структуры из трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении локальным полем в центре, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

Амплитуда сигнала, полученного от второго элемента (Рис.22), несколько выше, чем на остальных элементах структуры, что также видно по величине тока на каждой из возбуждаемых мод, обозначенной белыми точками на Рисунке 13(б). По фазо-частотной зависимости видно, что в силу симметричности расположения, первый и третий элементы при нижнем резонансе возбуждаются в противофазе с центральным, а при верхнем резонансе – в фазе, что аналогично случаю локального возбуждения крайнего элемента планарной структуры из двух взаимодействующих мета-атомов.

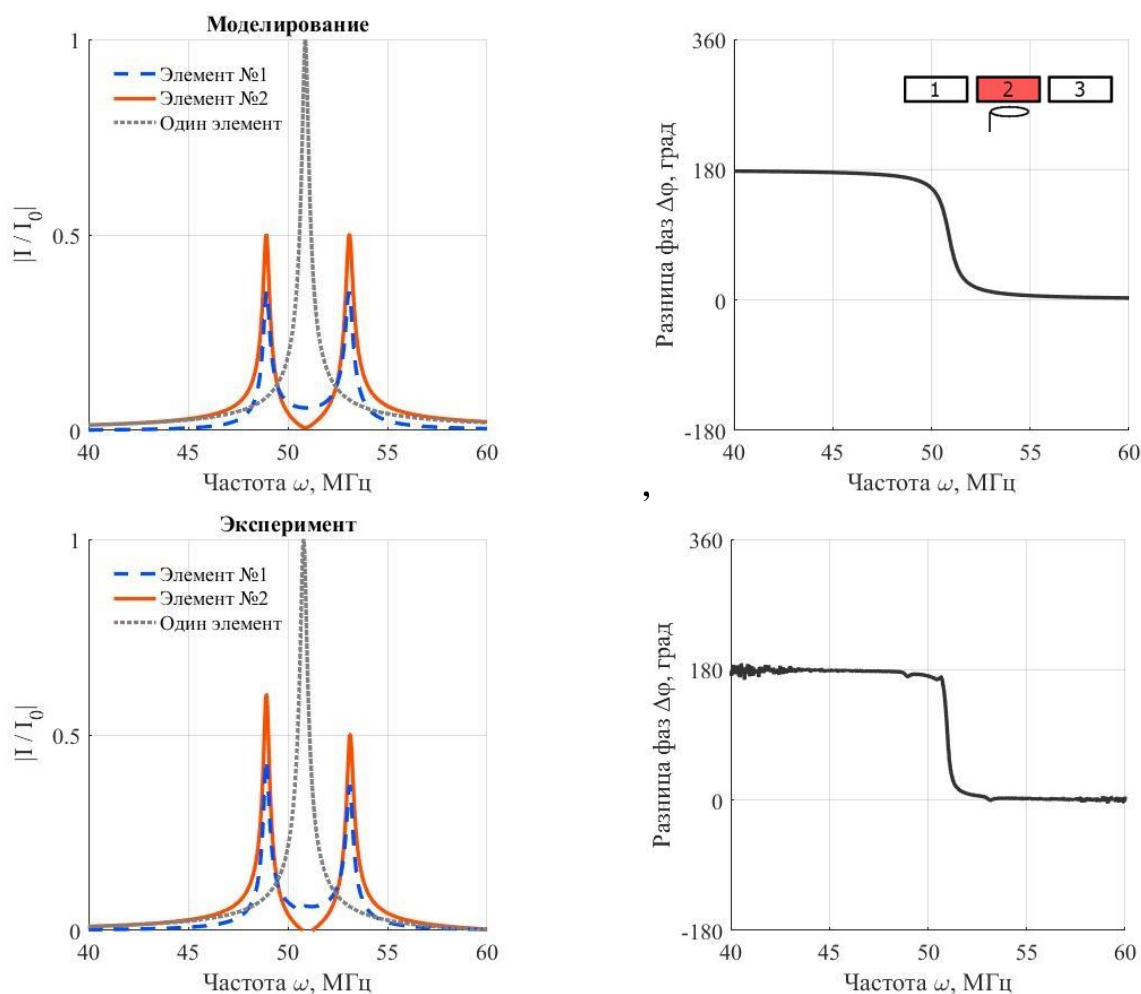


Рисунок 22 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в первом и втором элементах структуры из трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении локальным полем в центре, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|\kappa|=0.115$ .



Рассмотрим теперь случай возбуждения локальным полем крайнего элемента в линии из трех элементов, расположенных планарно (Рис.23).

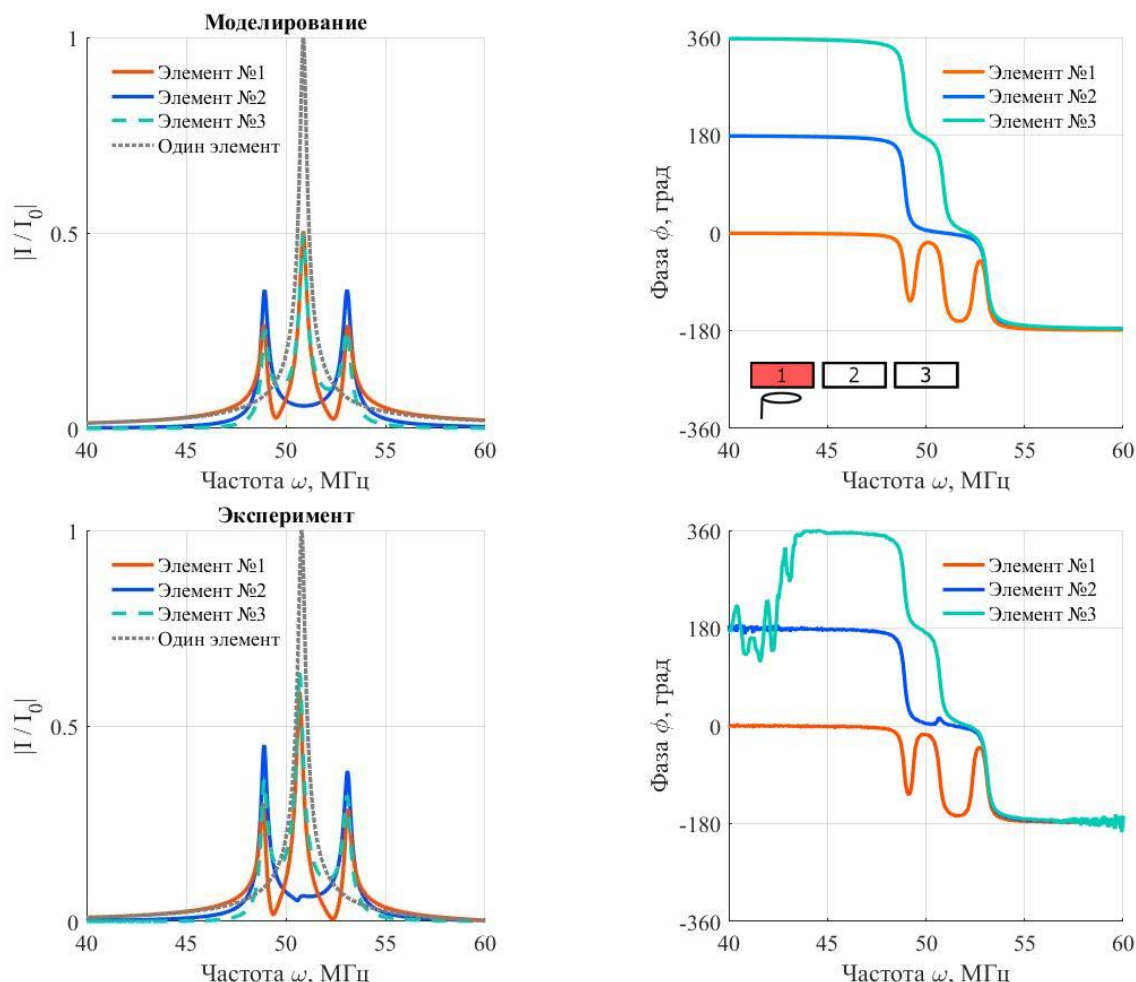


Рисунок 23 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении локальным полем крайнего элемента, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|κ|=0.115$ .

При возбуждении крайнего элемента локальным полем, возбуждаются все три моды, и мы наблюдаем три резонанса. В Приложении 3 представлены частотные зависимости амплитуд токов отдельно для каждого элемента по сравнению с резонансной кривой одного изолированного элемента.

#### 4.4.2 Три планарных взаимодействующих мета-атома в однородном поле

Посмотрим, как будет вести себя такая система при возбуждении в однородном поле, где мы ожидаем отсутствие антисимметричных мод (Рис.24).

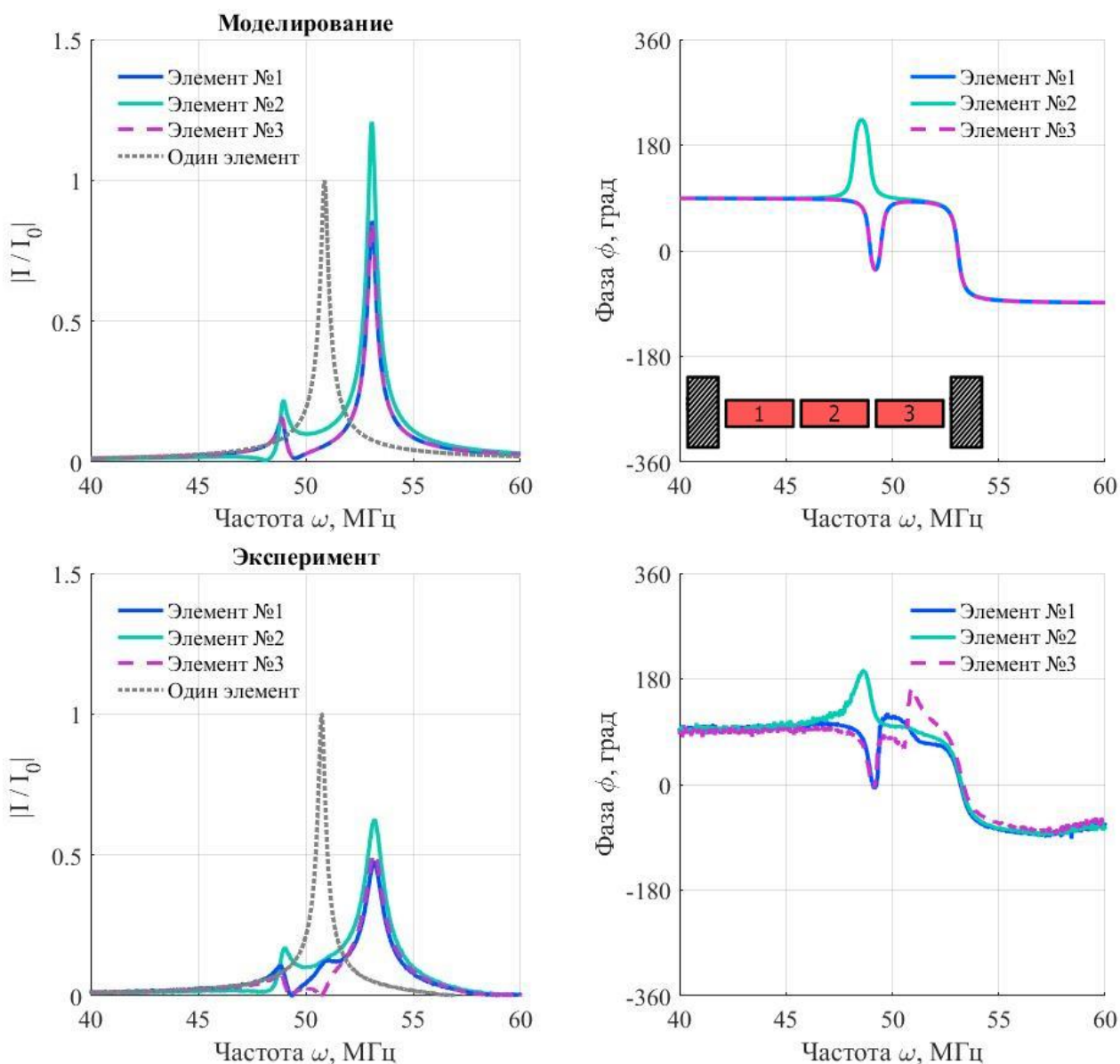


Рисунок 24 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении однородным полем, и их фазы (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

На частоте верхнего резонанса наблюдается «высокий» резонанс, соответствующий длинноволновой симметричной моде (Рис.13б). Амплитуда сигнала на нем может превосходить амплитуду сигнала на резонансе одного изолированного мета-атома, поскольку внешнее поле прикладывается ко всем элементам и все они возбуждаются в фазе, а, следовательно, в этом случае возбуждаемая магнитоиндуктивная волна будет иметь наибольшую амплитуду.

Как и ожидалось, на средней частоте антисимметричная мода не возбуждается. На нижней частоте видим невысокий резонанс,

соответствующий коротковолновой симметричной моде. В Приложении 4 приведены графики для двух разных пар элементов данной структуры.

Можно заметить, что в эксперименте величина сигнала получилась меньше, чем в моделировании. Это может быть следствием множества факторов, вносящих определенную долю ошибки в измерение. К ним можно отнести: погрешность в определении нормировочного сигнала от одного изолированного мета-атома, погрешность в уровне приемной и возбуждающих антенн относительно исследуемой структуры, погрешность от перекрытия сигналов на приемной антенне от близлежащих элементов, погрешность вносимая неоднородностью поля большой антенны, а также неточность в сборке самой структуры.

#### 4.4.3 Три мета-атома в планарно-аксиальной конфигурации, расположенные «углом»

Также было проведено исследование трех элементов в планарно-аксиальной конфигурации, расположенных «углом», но поскольку полученные результаты при локальном возбуждении получились почти идентичными с уже рассмотренными структурами, а при однородном возбуждении описание получаемого результата представляет некоторую сложность, а также влечет за собой неизбежное увеличение объема данной работы, то было решено вынести результаты этого раздела в Приложение 5.

#### 4.5 Система из четырех мета-атомов в планарно-аксиальной конфигурации, возбуждаемых однородным полем

Рассмотрим теперь систему из четырех элементов. В силу симметричности расположения, приводятся данные только для верхних элементов структуры (Рис.25).

Учитывая результаты, полученные для двух элементов в планарной и аксиальной конфигурации, возбуждаемых однородным полем, можно сделать вывод, что при добавлении второго слоя элементов к однослойной структуре,

ее резонансная кривая сдвигается на определенную величину, которая зависит от коэффициента взаимодействия между слоями. Если коэффициент взаимодействия между ближайшими мета-атомами двух слоев положительный, то резонансная кривая сдвигается вниз по частоте, если ли же он отрицательный, то наблюдается сдвиг вверх по частоте.

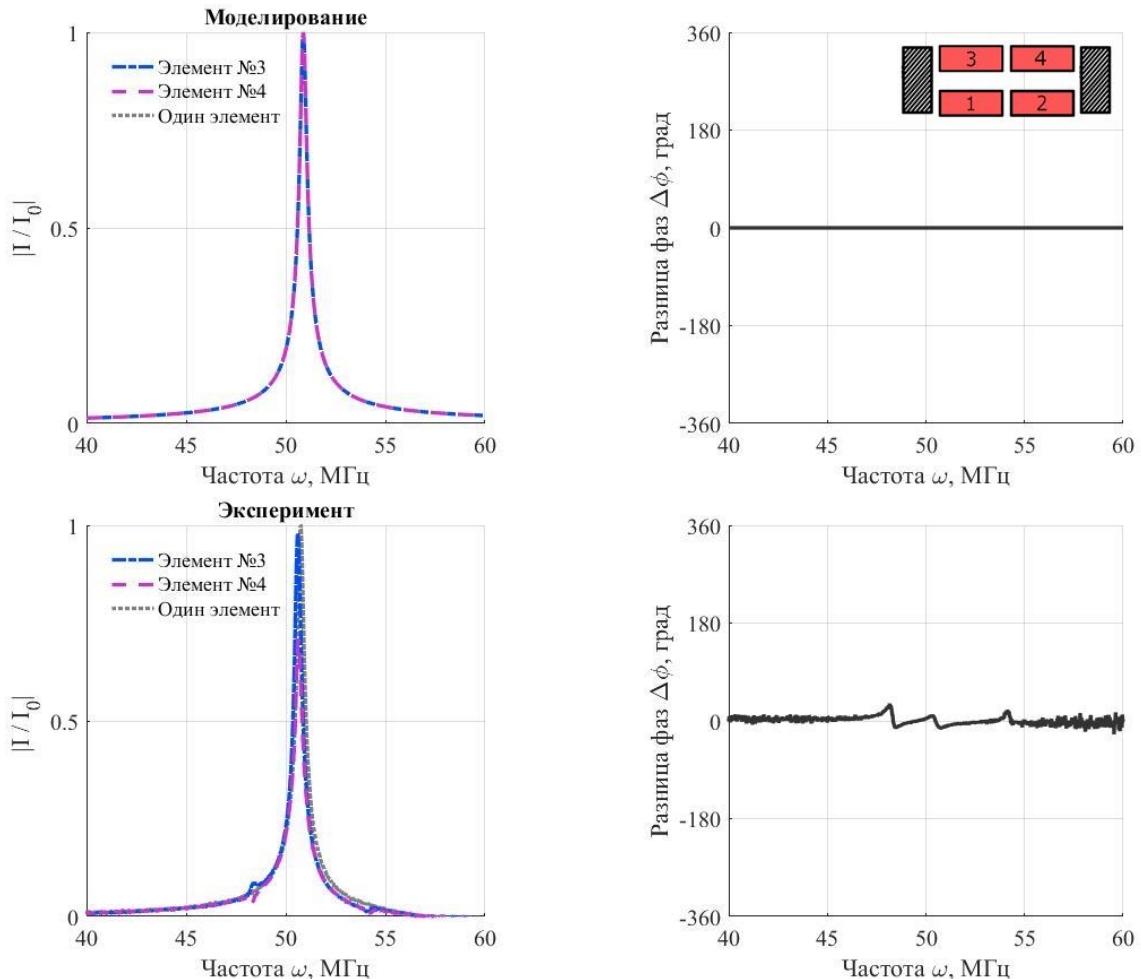


Рисунок 25 – Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в третьем и четвертом элементах структуры из двух взаимодействующих мета-атомах при возбуждении однородным полем, и разница их фаз (справа). Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

При равенстве планарного и аксиального коэффициентов взаимодействия наблюдается сигнал, совпадающий и по форме и по величине с сигналом одного изолированного мета-атома. Это можно интерпретировать как сдвиг резонансного пика к собственной резонансной частоте мета-атома влево, если мы рассматриваем два слоя планарной структуры (Рис.15), или вправо, если мы рассматриваем два слоя аксиальной структуры (Рис. 17).

## ГЛАВА 5. 1D И 2D ДИСКРЕТНЫЕ МАГНИТНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

### 5.1. Планарная линия из семи мета-атомов при локальном центральном и однородном возбуждении

Ранее было сказано, что внутри большой антенны для однородного возбуждения можно разместить метаповерхность не больше, чем  $7 \times 7$  элементов. По этой причине для исследования в качестве максимальной длины цепочки мета-атомов было выбрано семь элементов. Выбор элемента, к которому прикладывалось локальное поле, был ограничен центральным элементом, поскольку только в этом случае возбуждение структуры симметрично, а, следовательно, возбуждаются те же моды, что и в однородном поле.

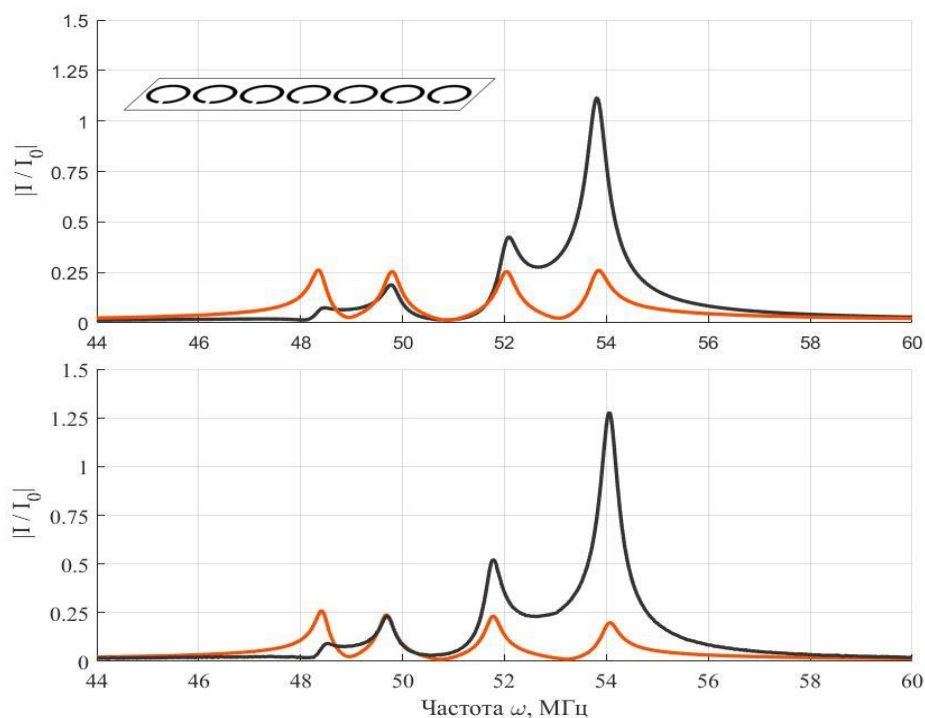


Рисунок 26 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов, полученных от среднего элемента планарной линии из семи мета-атомов, схема которой приведена на вставке. Черная линия соответствует возбуждению всей структуры однородным полем, красная линия соответствует возбуждению центрального элемента локальным полем. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

Для линии из семи элементов имеем семь возможных мод колебаний, все они представлены в Приложении 4. Поскольку в обоих рассматриваемых случаях возбуждение симметрично, то в структуре возбуждаются только симметричные моды, количество которых равно четырём. В планарной линии коэффициент взаимодействия элементов отрицательный, поэтому с увеличением частоты внешнего поля возбуждения длина волны каждой последующей моды уменьшается. Следовательно, при однородном возбуждении на верхней частоте наблюдается «высокий» резонанс, соответствующий моде с наименьшей длиной волны, где все элементы возбуждаются в фазе.

## 5.2 Две планарных линии из семи мета-атомов, расположенных аксиально друг относительно друга, при локальном центральном и однородном возбуждении

Рассмотрим, как поведет себя система из двух планарных линий, расположенных друг над другом аксиально (Рис.27).

Для удобства эта и другие структуры собирались так, чтобы коэффициенты взаимодействия между ближайшими планарными и аксиальными соседями были равны. Это достигалось на расстоянии 21 мм между центрами элементов двух линий (слоев), а расстояние между ближайшими планарными соседями не менялось в течение всей работы, и равнялось 24 мм между центрами элементов (1 мм между краями).

При исследовании поведения двухслойных структур в однородном поле сигнал измерялся только от верхнего слоя, поскольку, во-первых, наше оборудование не дает возможности получить сигнал от нижнего слоя, а во-вторых, как было показано ранее, в обоих слоях двухслойных структур в однородном поле возбуждаются токи равные как по амплитуде, так и по фазе.

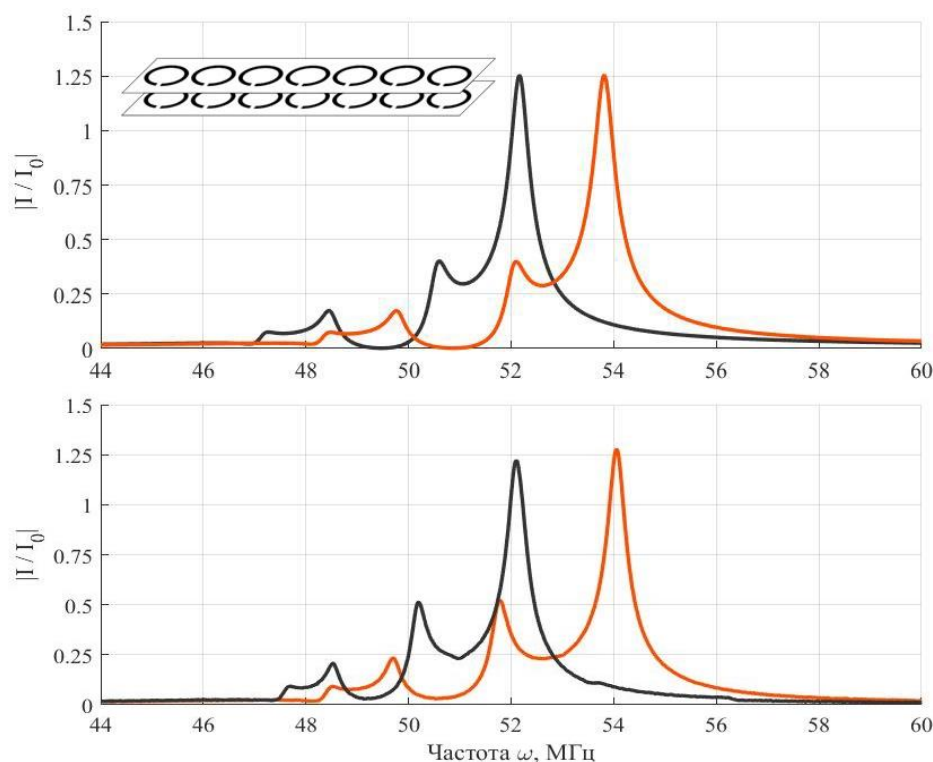


Рисунок 27 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов, полученные от верхнего среднего элемента элемента системы из двух планарных линий из семи мета-атомов, схема которой приведена на вставке. Черная линия соответствует сигналу от структуры из двух линий, красная линия соответствует сигналу от структуры из одной линии. Резонансная частота  $\omega_0=50.74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

По результатам, которые представлены на Рисунке 27, видно, что вся резонансная кривая сдвинулась в область низких частот, что и ожидалось, так как между ближайшими мета-атомами двух линий возникает сильное положительное взаимодействие. Причем форма спектра остается практически без изменений. На нее влияет только взаимодействие диагональных элементов, которое, как было показано ранее, очень мало. Сама величина сдвига линейно зависит от величины коэффициента взаимодействия между ближайшими аксиальными соседями двухслойной структуры.

### 5.3 Поверхность мета-атомов $7 \times 7$ при локальном центральном и однородном возбуждении

Перейдем от рассмотрения 1D структур, состоящих из линейных метаматериалов, к двумерным структурам метаповерхностям. Поверхность

мета-атомов ведет себя аналогичным образом. При возбуждении однородным полем, наибольшую высоту имеют резонансы, где большинство элементов возбуждается в фазе. Поскольку коэффициент взаимодействия элементов отрицательный, то они соответствуют модам с наибольшей длиной волны на верхних частотах.

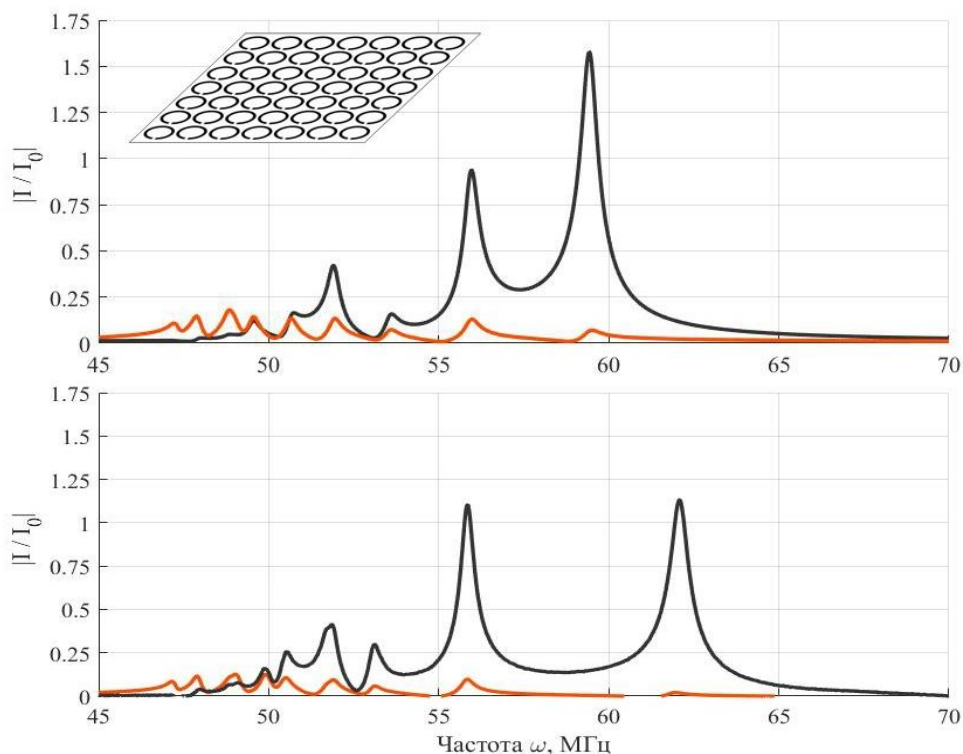


Рисунок 28 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов, полученные со среднего элемента (4;4) поверхности 7x7 мета-атомов, схема которой приведена на вставке. Черная линия соответствует возбуждению всей структуры однородным полем, красная линия соответствует возбуждению центрального элемента локальным полем. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

Общий вид резонансной кривой, полученной при моделировании, подтверждается экспериментом, но можно заметить ряд отличий. В эксперименте полоса пропускания несколько шире и некоторые резонансы видны не так отчетливо. Наиболее вероятной причиной этого является погрешность, вносимая в средний коэффициент взаимодействия, от формы элементов и способа их упорядочения. В процессе расщепления колец и последующего впаивания конденсаторов в щель возникала деформация мета-атомов, поэтому их диаметр в различных направлениях мог отличаться



примерно на 0.5 мм. Что не позволяло создать метаповерхность с симметричным взаимодействием элементов во всех направлениях.

#### 5.4 Двухслойная метаповерхность 7x7 при однородном возбуждении

Завершающим шагом данной работы является рассмотрение структуры из двух метаповерхностей 7x7 элементов, расположенных друг над другом аксиально (Рис.29).

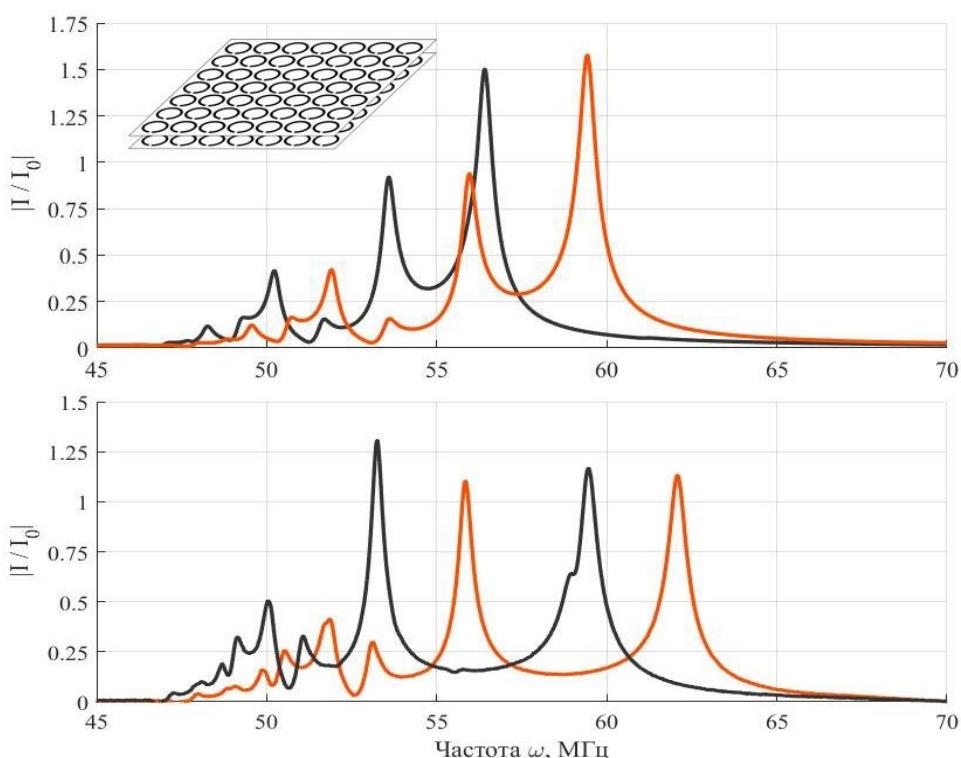


Рисунок 29 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов, полученные с верхнего среднего элемента (4;4) системы из двух поверхностей 7x7 мета-атомов, расположенных друг над другом, схема структуры приведена на вставке. Черная линия соответствует сигналу от структуры из двух метаповерхностей, красная линия соответствует сигналу от структуры из одной метаповерхности. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|\kappa|=0.115$ .

Как и ожидалось, мы наблюдаем сдвиг кривой в область низких частот, поскольку появляется положительное взаимодействие между слоями. Форма кривых, опять же, остается почти неизменной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в процессе выполнения работы:

- проведена подстройка резонансной частоты магнитных мета-атомов с резонансной частотой 50.74 МГц с точностью до 0.04%;
- проведено исследование анизотропии взаимодействия двух мета-атомов в зависимости от их взаимного положения при горизонтальной ориентации, найдено положение элементов, при котором мета-атомы не взаимодействуют, при смещении по вертикали и горизонтали на один и два радиуса элемента, соответственно;
- проведено исследование влияния положения приемной антенны на величину измеряемого сигнала. Показано, что в зависимости от положения - «над центром» или «рядом» - величина измеряемого сигнала может различаться почти в 2.5 раза;
- исследовано влияние неоднородности поля рамочной антенны с внутренним диаметром 24.5 см на отклик метаматериала. Обнаружено, что разница в величине поля в плоскости антенны составляет 20-30% в зависимости от близости к краю антенны. Показано, что учет неоднородности существенно влияет только на амплитуду крайней длинноволновой моды, в остальном, неоднородностью можно пренебречь;
- проведено экспериментальное и теоретическое исследование магнитных мета-материалов разного уровня сложности при различных способах возмущения. Сравнение отклика структур на разные типы возбуждения показало, что при симметричном возбуждении (в однородном поле) возбуждаются только симметричные моды. Амплитуда одиночной моды зависит от соотношения элементов, возбуждаемых в фазе и противофазе. В двухслойных структурах, возбуждаемых однородным полем, наблюдается сдвиг резонансной кривой, величина сдвига зависит от коэффициента взаимодействия элементов между слоями.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bilotti F., Sevgi L. Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, v.22, №4, p.422–438. 2012.
2. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . *УФН*, т.92, с.512–517. 1968
3. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys.Rev.Lett.*,v.84, p.4184–4187. 2000.
4. Syms R. R. A., Floume T., Young I. R., Solymar L., Rea M. Flexible magnetoinductive ring MRI detector: Design for invariant nearest-neighbour coupling. *Metamaterials*, v. 4, p. 1–14. 2010.
5. Stevens C.J. Magnetoinductive waves and wireless power transfer. *IEEE Trans. Power Electron*, v.30, pp.6182–6190. 2014.
6. Sydoruk O, Shamonin M., Radkovskaya A., Zhuromskyy O, Shamonina E., Trautner R., Stevens C.J., Faulkner G., Edwards D.J., Solymar L. A mechanism of subwaves imaging with bi-layered magnetic metamaterials: theory and experiment. *J.Appl.Phys.*, v.101, pp.073903-1–8. 2007.
7. Solymar L., Shamonina E. *Waves in Metamaterials*. Oxford Univ.Press., Oxford. 385 p. 2009.
8. Петров П.С. «Взаимодействие в плотноупакованных магнитных метаматериалах». Магистерская диссертация. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 2017.
9. Радковская А.А., Прудников В.Н. Захаров П.Н., Бабушкин А.К., Королев А.Ф., Сухоруков А.П. Волны в магнитных метаматериалах с сильным взаимодействием между элементами. Суперлинза. Специальный физический практикум. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 2009.
10. Радковская А. А., Пальванова Г. С., Лебедева Е. И., Прудников В. Н., Котельникова О. А., Захаров П. Н., Королев А. Ф., Сухоруков. А. П.

- «Экспериментальное исследование ориентационной анизотропии взаимодействия метаатомов в дискретных магнитных метаматериалах в ГГц диапазоне». Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 2013.
11. Radkovskaya A., Tatartschuk E., Hesmer F., Hao T., Stevens C., Faulkner G., Edwards D., Shamonina E. Zhuromskyy O. «Coupling mechanisms for split ring resonators: Theory and experiment». 2007.
  12. Sydoruk O. Tailoring the properties off metamaterial for linear and nonlinear applications. PhD Thesis. Osnabrueck. 2007.
  13. Пальванова Г.С. «Фононоподобная дисперсия в дискретных магнитных метаматериалах в МГц диапазоне». Дипломная работа, Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. 2013.
  14. Вакуленко А.Ю. «Локальная магнитная проницаемость метаповерхностей». Магистерская диссертация. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 2018.
  15. Сацкий А.В. «Учет конечных размеров метаатомов при расчете локальной магнитной проницаемости метаповерхности». Магистерская диссертация. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 2019.
  16. Петров П.С. «Особенности механизмов взаимодействия между элементами на малых расстояниях при различных конфигурациях их влияние на дисперсию магнитоиндуктивных волн метаматериалах мега- и гигагерцовом диапазоне». Дипломная работа, Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. 2015.
  17. Прокопьева В.В. «Анизотропия взаимодействия между элементами в дискретных магнитных метаматериалах в МГц диапазоне». Дипломная работа, Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. 2012.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

В приложении приводится код программы, написанной в пакете MatLab, для аналитического расчета отклика одной метаповерхности и двух метаповерхностей, расположенных друг над другом (двухслойный метаматериал) для локального возбуждения или возбуждения однородным полем при учете взаимодействия между мета-атомами вплоть до третьего порядка.

```
%%
Q=150;
k1=-0.115;      %каппа ближайших планарных соседей
k2=-0.032;      %каппа планарных элементов второго порядка близости
k3=0;           %каппа планарных элементов третьего порядка близости
k4=0.115;       %каппа ближайших аксиальных соседей
k5=0.025;       %каппа аксиальных элементов второго порядка близости
k6=0;           %каппа аксиальных элементов третьего порядка близости

y_len = 7; % число строк
x_len = 7; % число столбцов
z_len = 1;
Nsum = y_len*x_len;

%V_hom=ones(1,Nsum*z_len);
V_loc=zeros(1,Nsum*z_len);
V_loc(25)=1;

freq0 = 50.88*10^6;
freq = 40*10^6;
start_freq = freq;
delta_freq = 0.02*10^6;
omega0=2*pi*freq0;

C=(340*10^(-12));
R=1/(omega0*C*Q);
M1=k1/(2*C*omega0^2);
M2=k2/(2*C*omega0^2);
M3=k3/(2*C*omega0^2);
M4=k4/(2*C*omega0^2);
M5=k5/(2*C*omega0^2);
M6=k6/(2*C*omega0^2);

signal_model_hom=zeros(y_len,x_len,z_len,1601);
signal_model_loc=zeros(y_len,x_len,z_len,1601);
signal_model_loc_one_el = [];
signal_model_hom_one_el = [];

for kk=1:1:1601
    freq = start_freq + delta_freq*(kk-1);
    omega= 2*pi*freq;

    Z0=sqrt(-1)*((omega/omega0)^2-1)/(omega*C)+R;
    D1=omega*M1*sqrt(-1);
    D2=omega*M2*sqrt(-1);
    D3=omega*M3*sqrt(-1);
    D4=omega*M4*sqrt(-1);
```

```

D5=omega*M5*sqrt(-1);
D6=omega*M6*sqrt(-1);

Z=zeros(Nsum*z_len,Nsum*z_len);

for n=1:Nsum

    Z(n,n)=Z0;
    if (rem(n,x_len)~=0) && (n+1<=Nsum)
        Z(n+1,n)=D1; %взаимный импеданс с ближайшим справа элементом
        Z(n,n+1)=D1;
    end
    if ((n+x_len)<=Nsum)
        Z(n+x_len,n)=D1; %взаимный импеданс с ближайшим снизу элементом
        Z(n,n+x_len)=D1;
    end
    % (вторая координационная сфера)
    if ((rem(n,x_len)~=0) && (n <= (Nsum-x_len)))
        Z(n+x_len+1,n)=D2;
        Z(n,n+x_len+1)=D2;
    end
    if ((rem(n,x_len)~=1) && (n <= (Nsum-x_len)))
        Z(n+x_len-1,n)=D2;
        Z(n,n+x_len-1)=D2;
    end
    % (третья координационная сфера)
    if ((rem(n,x_len)~=(x_len-1)) && (rem(n,x_len)~=0))
        Z(n+2, n)=D3;
        Z(n, n+2)=D3;
    end
    if( n <= (Nsum-x_len*2))
        Z(n+x_len*2, n) = D3;
        Z(n, n+x_len*2) = D3;
    end
end

if (z_len>1)

    for n=(Nsum+1):(Nsum*2)
        Z(n,n)=Z0;
        if (rem(n,x_len)~=0) && (n+1<=Nsum*2)
            Z(n+1,n)=D1; %взаимный импеданс с ближайшим справа элементом
            Z(n,n+1)=D1;
        end
        if ((n+x_len)<=Nsum*2)
            %взаимный импеданс с ближайшим снизу элементом
            Z(n+x_len,n)=D1;
            Z(n,n+x_len)=D1;
        end
        % (вторая координационная сфера)
        if ((rem(n,x_len)~=0) && (n <= (Nsum*2-x_len)))
            Z(n+x_len+1,n)=D2;
            Z(n,n+x_len+1)=D2;
        end
        if ((rem(n,x_len)~=1) && (n <= (Nsum*2-x_len)))
            Z(n+x_len-1,n)=D2;
            Z(n,n+x_len-1)=D2;
        end
        % (третья координационная сфера)
        if ((rem(n,x_len)~=(x_len-1)) && (rem(n,x_len)~=0))
            Z(n+2, n)=D3;
            Z(n, n+2)=D3;
        end
        if( n <= (Nsum*2-x_len*2))
    
```

```

        Z(n+x_len*2, n) = D3;
        Z(n, n+x_len*2) = D3;
    end
end

%аксиальное взаимодействие
for n=1:(Nsum)

    if ((n+Nsum)<=(Nsum*2))
        %взаимный импеданс элементов, расположенных друг над другом
        Z(n,n+Nsum)=D4;
        Z(n+Nsum,n)=D4;
    end

    if (rem(n,x_len)~=0) && (n+Nsum+1<=Nsum*2)
        %взаимный импеданс с ближайшим справа элементом
        Z(n+Nsum+1,n)=D5;
        Z(n,n+Nsum+1)=D5;
    end

    if ((n+x_len+Nsum)<=Nsum*2)
        %взаимный импеданс с ближайшим снизу элементом
        Z(n+x_len+Nsum,n)=D5;
        Z(n,n+x_len+Nsum)=D5;
    end

    % (вторая координационная сфера)
    %if ((rem(n,x_len)~=0) && (n <= (Nsum-x_len)))
    %    Z(n+x_len+Nsum+1,n)=D6;
    %    Z(n,n+x_len+Nsum+1)=D6;
    %end
    %if ((rem(n,x_len)~=1) && (n <= (Nsum-x_len)))
    %    Z(n+x_len+Nsum-1,n)=D6;
    %    Z(n,n+x_len+Nsum-1)=D6;
    %end

end

end

V=V_hom;
I2=V*Z^(-1);
for z=1:z_len
    for y=1:y_len
        for x=1:x_len
            if ((x_len*(y-1)+x+Nsum*(z-1))<=Nsum*(z))

                signal_model_hom(y,x,z,kk)=I2(1,x+(y-1)*x_len+Nsum*(z-1));
            end
        end
    end
end

V=V_loc;
I2=V*(Z^(-1));
for z=1:z_len
    for y=1:y_len
        for x=1:x_len
            if ((x_len*(y-1)+x+Nsum*(z-1))<=Nsum*(z))
                signal_model_loc(y,x,z,kk)=I2(1,x+(y-1)*x_len+Nsum*(z-1));
            end
        end
    end
end

end

signal_model_loc_one_el(kk) = 1/Z0;

```

```

    signal_model_hom_one_el(kk) = 1/Z0;

    frequencies(kk)=freq;
    omega=omega+2*pi*delta_freq;
end
% Несколько графиков

myfreq=frequencies/10^6;
freq_interval = [min(myfreq) max(myfreq)];

phase_signal_hom = zeros(y_len,x_len,1601);
phase_signal_loc = zeros(y_len,x_len,1601);
%phase_signal_hom(:,:,) = angle(signal_model_hom(:,:,));
%phase_signal_loc(:,:,) = angle(signal_model_loc(:,:,));

%% Учет неоднородности большой антенны

A=0.99;
B=-1.93*10^(-5);
C=4.62*10^(-6);

mass_of_V=ones(7,7,1601);
z_len=1;
Nsum=49;
V_hom=ones(1,Nsum*z_len);

for y=1:7
    for x=1:7
        x2=(sqrt((x-4)^2+(y-4)^2))*24;
        y2=A+B*x2+C*x2^2;
        V_hom(x+(y-1)*7)=(V_hom(x+(y-1)*7)*y2)/A;
        for kk=1:1601
            mass_of_V(x,y,kk)=mass_of_V(x,y,kk)*A/y2;
        end
    end
end

if (z_len>1)
    for i=1:49
        V_hom(i+49)=V_hom(i);
    end
end

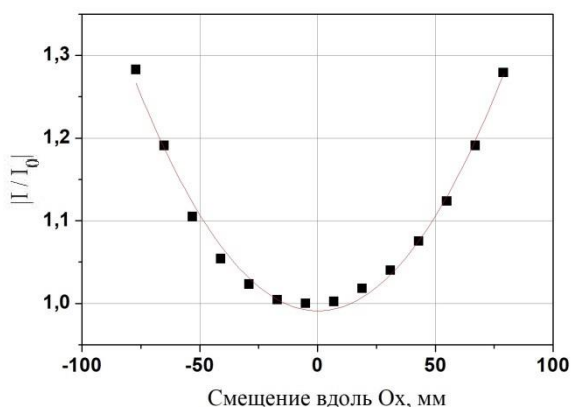
V_hom=V_hom/(max(V_hom));

```



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Для учета неоднородности поля большой антенны была произведена интерполяция зависимости амплитуды сигнала одного элемента от его смещения вдоль оси X плоскости антенны, показанной на Рисунке 8.



Equation	y = A + B*x + C*x^2		
Adj. R-Square	0,98889		
		Value	Standard Error
Y	A	0,99108	0,00425
Y	B	-1,93163E-5	5,83248E-5
Y	C	4,617E-5	1,35705E-6

Рисунок П2\_1 – Слева – график интерполяции амплитуды сигнала одного элемента от его смещения вдоль оси X, справа – параметры интерполяции.

С учетом полученного уравнения кривой в программе для моделирования был сделан пересчет напряжений на элементах для случая возбуждения однородным полем. Полученные результаты для линии из семи элементов и метаповерхности  $7 \times 7$  элементов изображены на Рисунке П2\_2. Можно заметить, что основное влияние, которое вносит учет неоднородности в моделирование, выражается в амплитуде последнего резонанса. Как было показано в основной работе, этому резонансу соответствует мода колебаний с наименьшей длиной волны, где все элементы возбуждены в фазе. Ожидаемо, что именно на этой моде наибольшую роль играет величина напряжений на каждом отдельном элементе. На остальных же резонансах элементы, возбуждаемые в противофазе, компенсируют вклад друг друга, поэтому на них влияние неоднородности не так выражено.

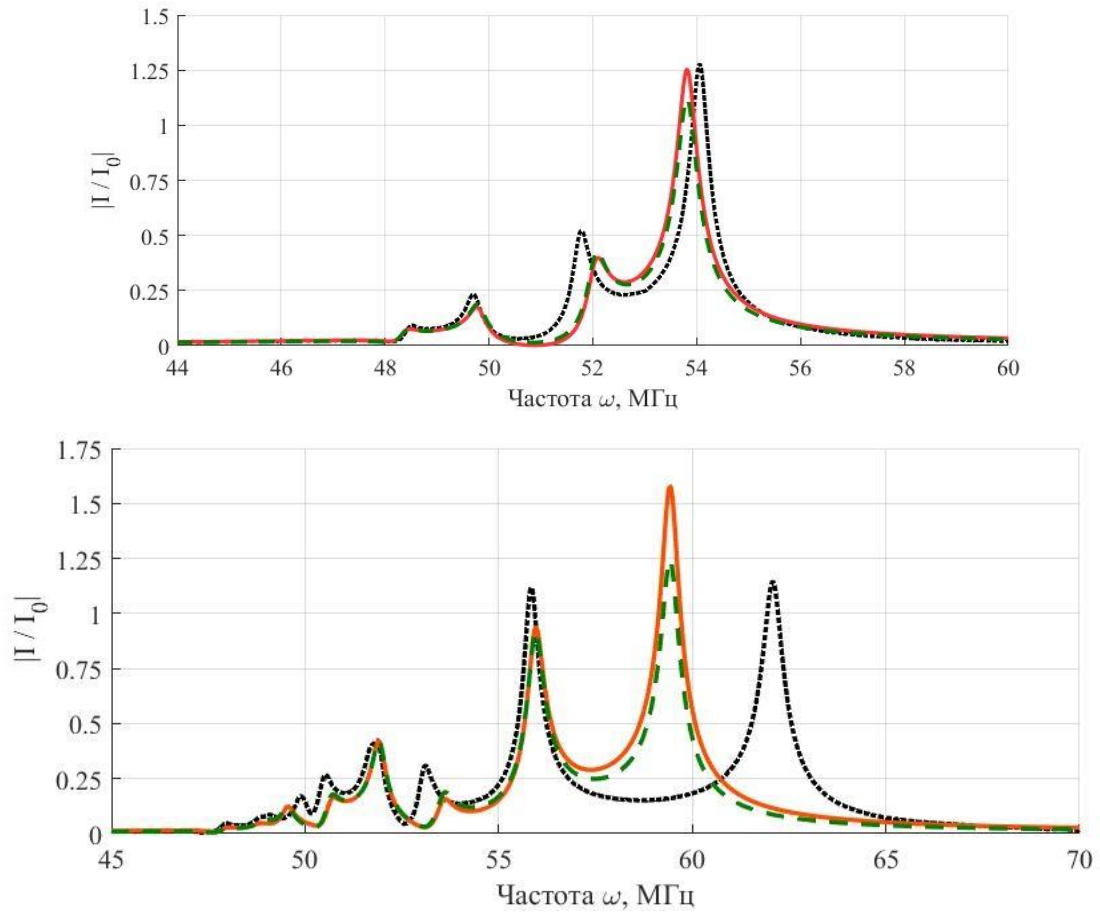


Рисунок П2\_2 – Сигнал, полученный от центрального элемента планарной линии из 7 мета-атомов (сверху) и центрального элемента метаповерхности  $7 \times 7$  мета-атомов, возбуждаемых однородным полем (снизу). Черная линия – эксперимент, зеленая – моделирование без учета неоднородности, красная – моделирование с учетом неоднородности.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Частотные зависимости амплитуд токов отдельно для каждого элемента планарной структуры из трех элементов, при локальном возбуждении крайнего элемента, по сравнению с резонансной кривой одного элемента

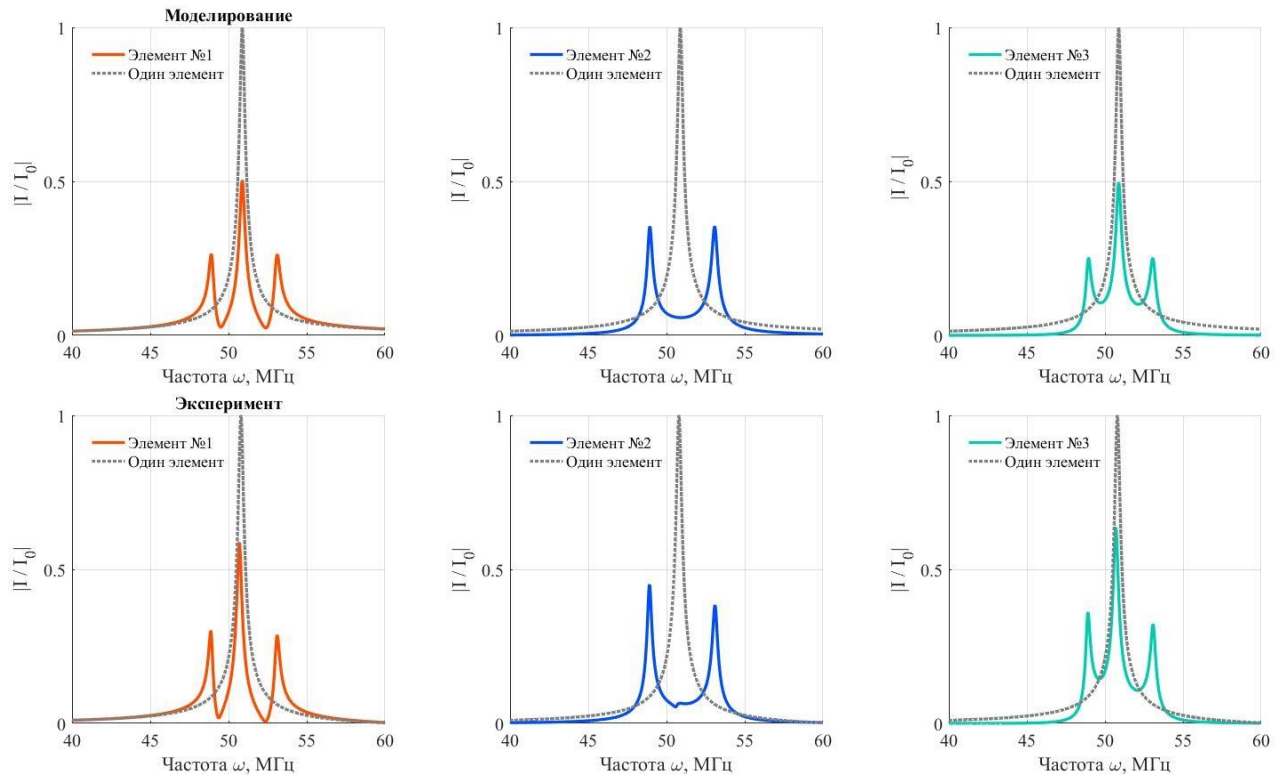


Рисунок ПЗ\_1 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении локальным полем крайнего элемента. Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Частотные зависимости амплитуд токов для двух разных пар элементов структуры из трех метаатомов в планарной конфигурации, возбуждаемых однородным полем.

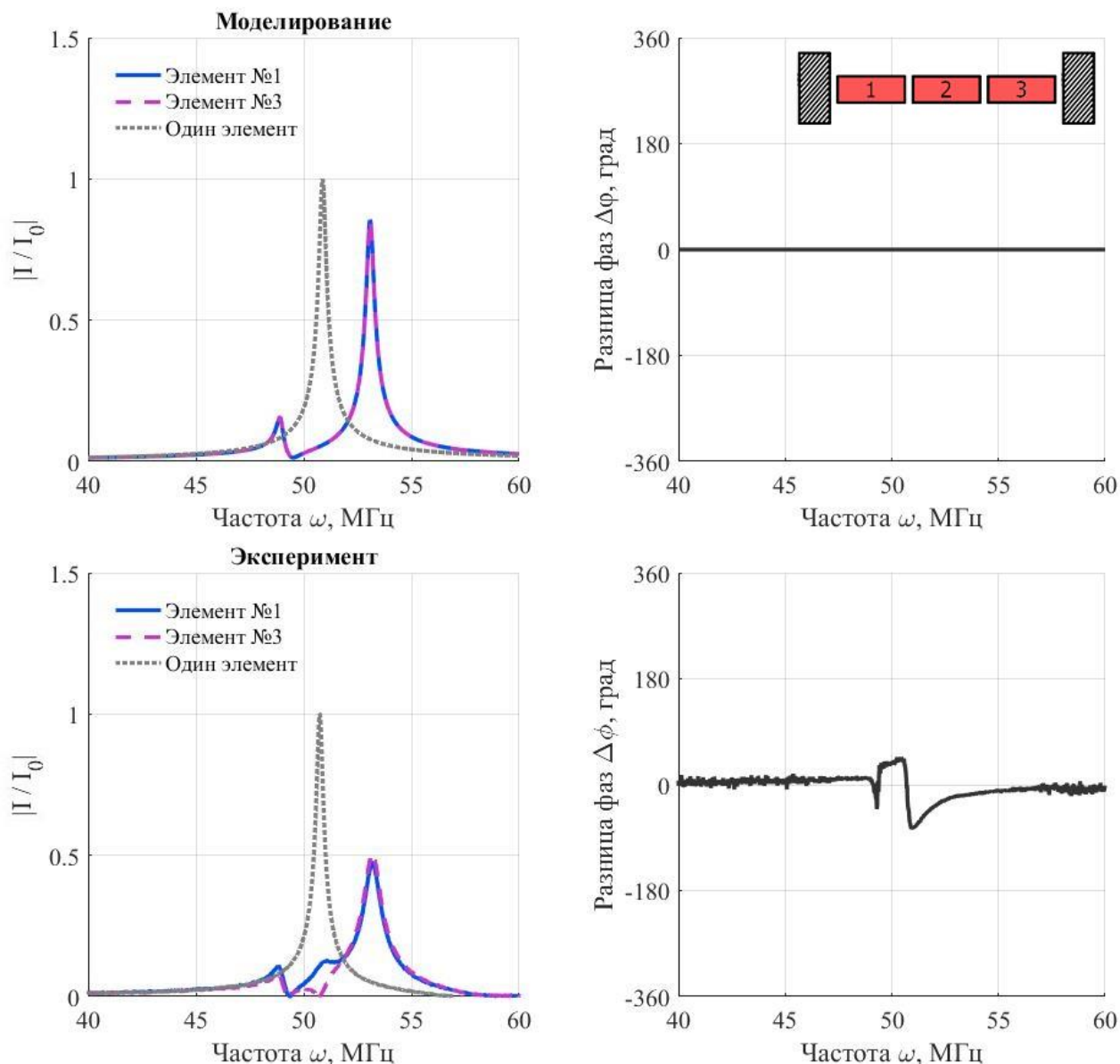


Рисунок П4\_1 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в первом и третьем элементах структуры из двух взаимодействующих мета-атомов при возбуждении однородным полем, и разница их фаз (справа). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Схема эксперимента показана на вставке – сечение катушки для создания однородного поля обозначено заштрихованными вертикальными прямоугольниками. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

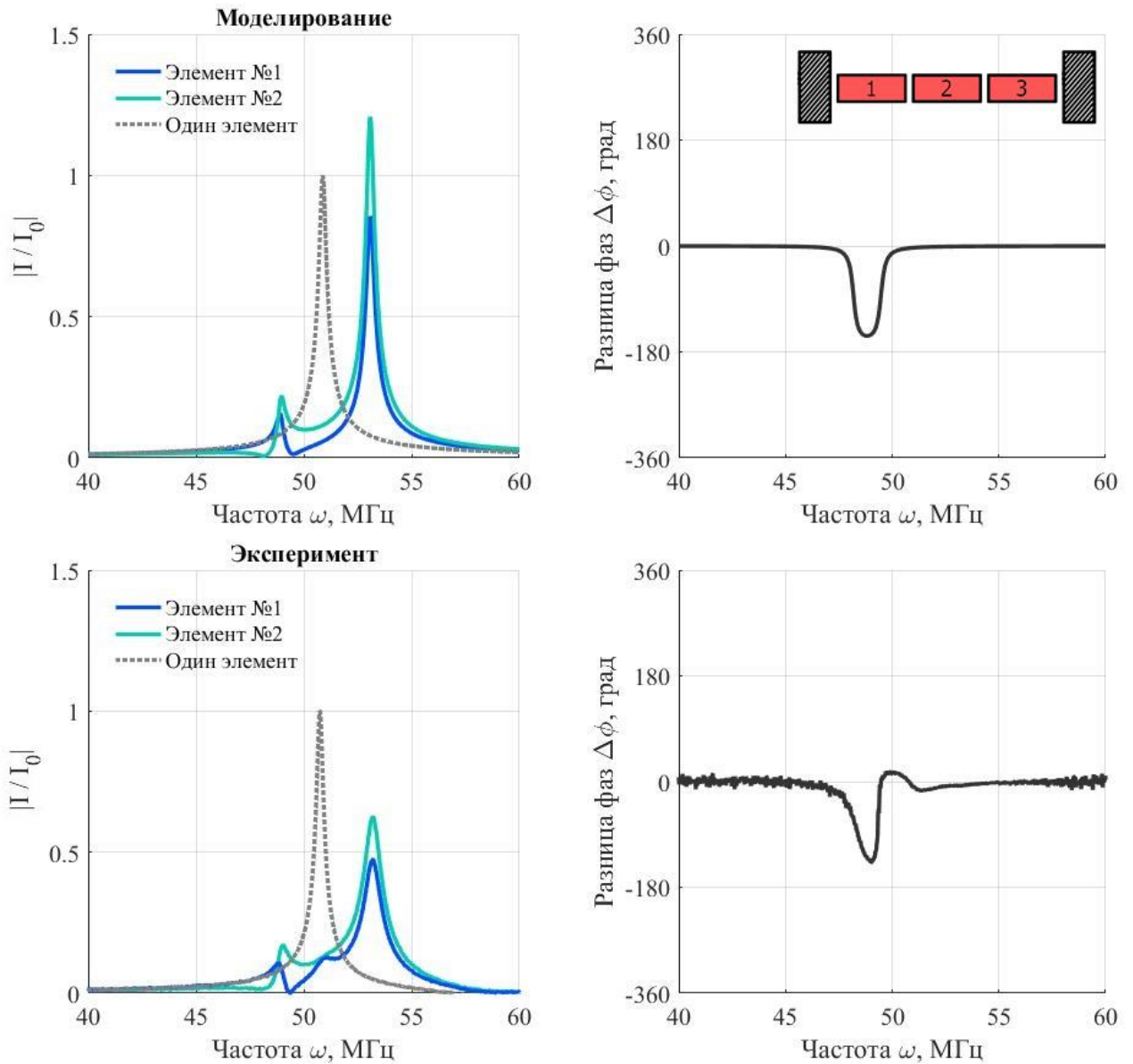


Рисунок П4\_2 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в первом и втором элементах структуры из двух взаимодействующих мета-атомах при возбуждении однородным полем, и разница их фаз (справа). Пунктиром показана резонансная кривая для одного элемента. Схема эксперимента показана на вставке – сечение катушки для создания однородного поля обозначено заштрихованными вертикальными прямоугольниками. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Ниже приведены частотные зависимости амплитуд токов и фаз в структуре из трех взаимодействующих мета-атомов в планарно-аксиальной конфигурации, расположенных «углом». Расстояния между элементами выбраны так, что коэффициент взаимодействия между ближайшими аксиальными и планарными соседями равны. В случае локального возбуждения (Рис.П5\_1), наблюдаемая картина почти идентична случаю, когда локальное поле прикладывается к центральному элементу структуры из трех планарных мета-атомов. Единственным отличием является то, что при расположении «углом» крайние элементы возбуждаются несимметрично, поскольку знак их коэффициентов взаимодействия с элементом, возбуждаемым локальным полем, различен. При однородном возбуждении всей структуры резонансные кривые имеют более сложный характер (Рис.П5\_2).

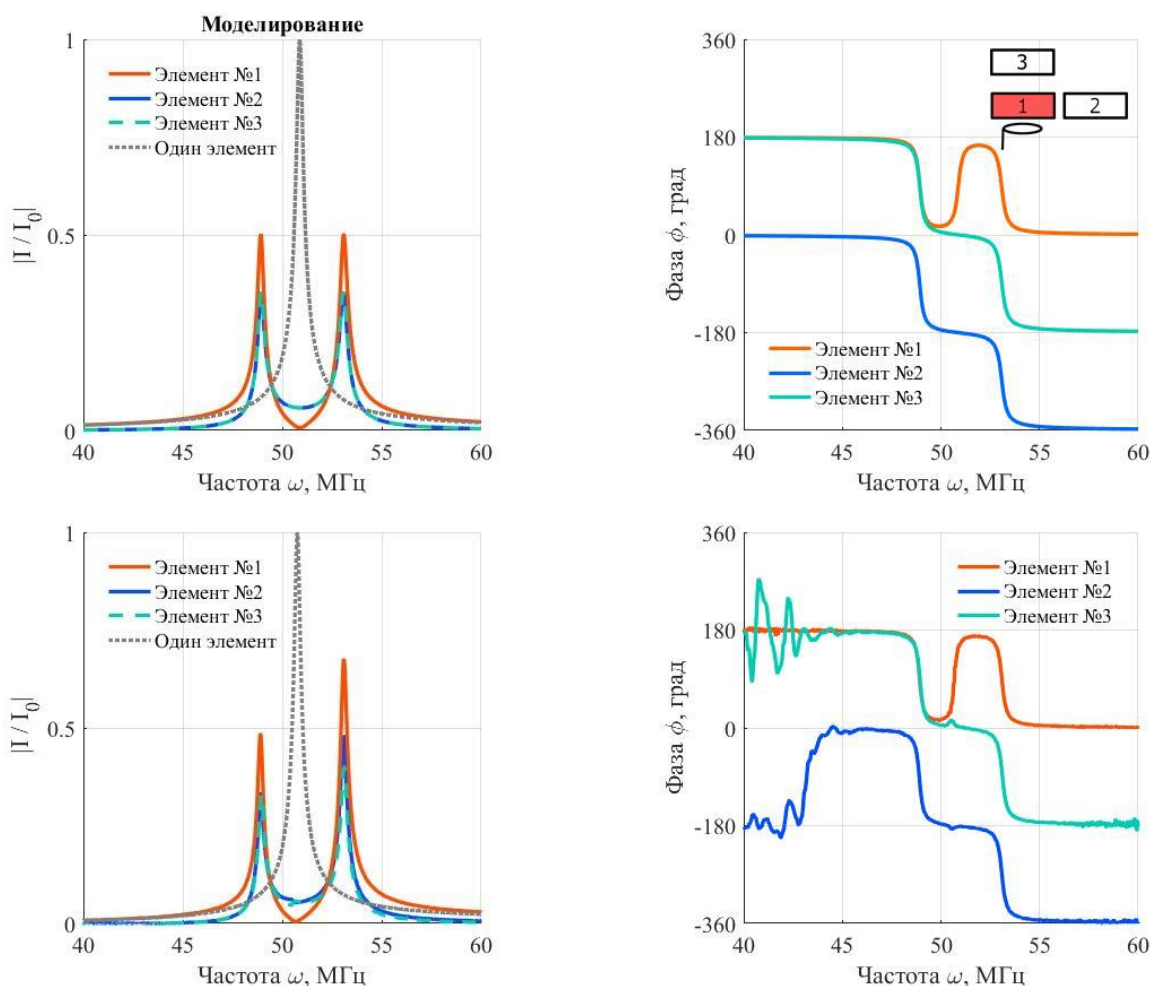


Рисунок П5\_1 - Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) частотные зависимости модулей амплитуд токов (слева), наведенных в трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении локальным полем, и их фазы (справа). Схема эксперимента показана на вставке. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|\kappa|=0.115$ .

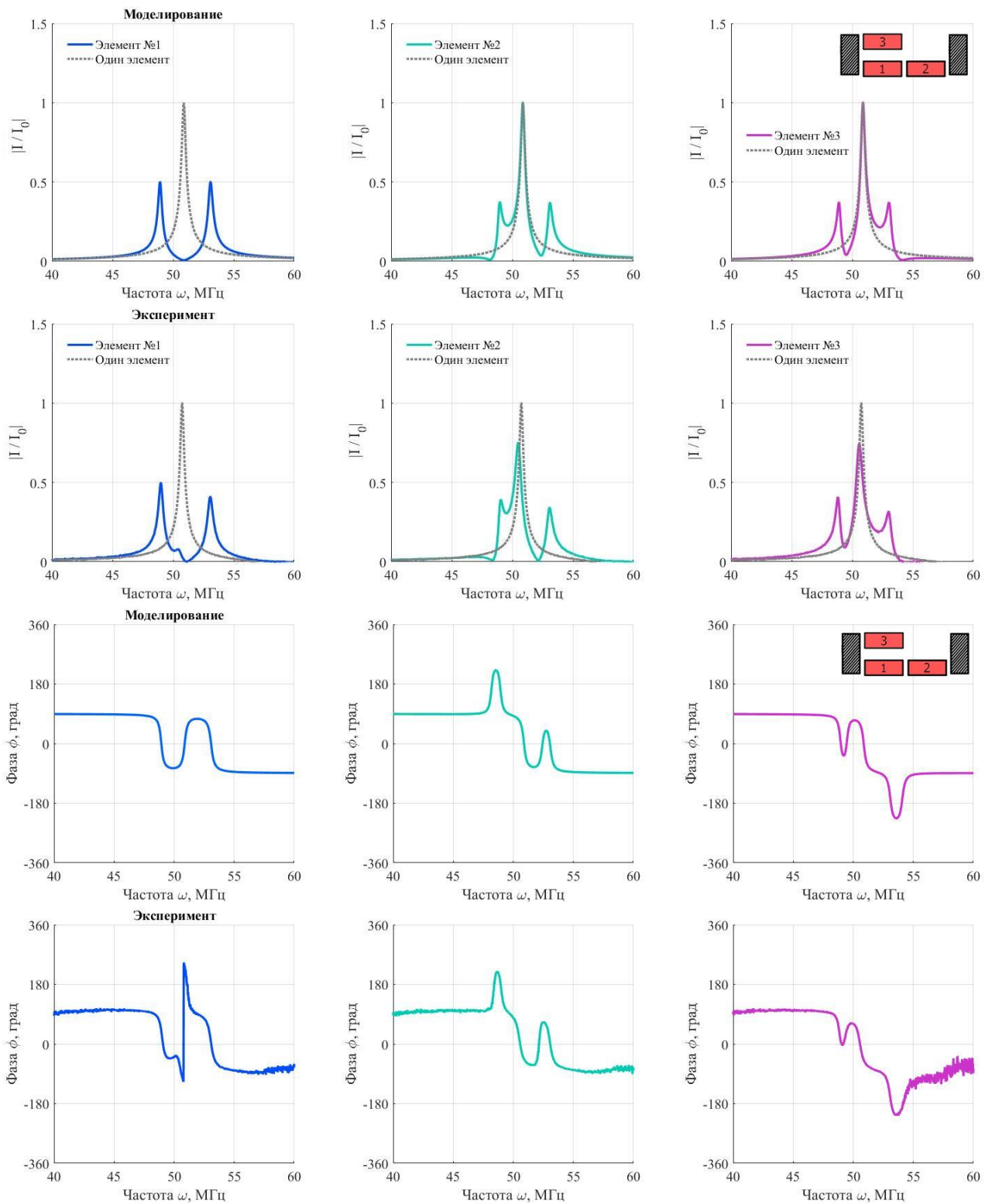


Рисунок П5\_2 - Теоретические и экспериментальные частотные зависимости модулей амплитуд токов (верхние два ряда графиков), наведенных в трех взаимодействующих мета-атомах при возбуждении однородным полем, из их фазы (нижние два ряда графиков). Пунктиром серого цвета показана резонансная кривая для одного элемента. Схема эксперимента показана на вставке – сечение катушки для создания однородного поля обозначено заштрихованными вертикальными прямоугольниками. Резонансная частота  $\omega_0=50,74$  МГц, коэффициент взаимодействия  $|k|=0.115$ .