

## Параметрическое моделирование оптимальных омега-элементов, обеспечивающих преобразование поляризации СВЧ волны метаповерхностью

Цянь Сонгсонг<sup>1</sup>, М.А. Подалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов<sup>2</sup>

В СВЧ диапазоне от 2,5 до 4 ГГц с помощью параметрического компьютерного моделирования исследованы металлические элементы омега-образной формы. При условии полуволнового резонанса определены параметры оптимальных омега-элементов, которые могут иметь преимущества при создании метаматериалов. Рассмотрены двумерные массивы омега-элементов или метаповерхности, находящиеся в поле наклонно падающей электромагнитной волны с линейной поляризацией. Показана возможность отражения циркулярно поляризованной СВЧ волны от метаповерхности, образованной омега-элементами оптимальной формы, и определена напряжённость электрического поля электромагнитной волны. Проведено сравнение с теоретически рассчитанными параметрами омега-элементов при различных моделях распределения токов. Найдено соответствие оптимальных параметров, полученных в результате теоретического расчёта и моделирования.

**Ключевые слова:** параметрическое моделирование, омега-элемент, циркулярная поляризация, коэффициент эллиптичности, метаматериалы, метаповерхности.

The omega-shaped metal elements have been investigated using parametric computer simulation in the microwave range of 2.5 to 4 GHz. Parameters of optimal omega-elements under the condition of the half-wave resonance have been determined that may have advantages at creating of metamaterials. The two-dimensional arrays of omega-elements, or metasurface located in the obliquely incident electromagnetic wave with linear polarization have been considered. The possibility of reflection of the circularly polarized microwave from metasurface formed of optimal shaped omega-elements has been shown, and the strength of the electric field of electromagnetic wave has been determined. The comparison with the theoretically calculated parameters of omega-elements for different models of the current distribution has been carried out. A match of the optimal parameters derived from theoretical calculations and simulations has been found.

**Keywords:** parametric modeling, omega-element, circular polarization, axial ratio, metamaterials, metasurface.

**Введение.** В настоящее время в мире проводятся многочисленные исследования метаматериалов [1]–[8]. Метаматериалы можно характеризовать как искусственные структуры, обладающие экзотическими свойствами, не встречающимися у обычных материалов. Метаматериалы могут быть образованы структурными элементами различной геометрической формы. В качестве элементов могут использоваться право- и левовинтовые металлические спирали, сферические частицы со спиральной проводимостью, разомкнутые кольца с выступающими концами, полосковые элементы в виде буквы S и ее зеркального эквивалента и другие. Планарные элементы в виде разомкнутых колец с выступающими концами получили название омега-элементы, исследование такого рода элементов вызывает в настоящее время рост интереса со стороны исследователей [9]–[11].

Задачей нашей работы является получение оптимальных параметров омега-элементов с помощью средств компьютерного моделирования электродинамических процессов и сравнение полученных результатов с теоретически рассчитанными параметрами.

Объектом нашего исследования являются омега-элементы. Омега-элемент не является киральным в силу своей симметрии, однако обладает магнитоэлектрическими свойствами, что создаёт возможность преобразования поляризации электромагнитной волны. Основными предметами исследования являются коэффициент эллиптичности и напряжённость электрического поля отраженной волны при её взаимодействии с двумерным массивом омега-элементов. Оптимальные параметры омега-элемента были рассчитаны ранее в рамках моделей квазистационарного тока [12], [13] и гармоничного тока [14]. В настоящей работе показано соответствие оптимальных параметров омега-элементов, полученных с помощью параметрического моделирования, с ранее теоретически рассчитанными параметрами омега-элементов.

**1. Исследование частотной зависимости напряженности электрического поля отражённой электромагнитной волны для двумерного массива омега-элементов.** Форми-

рование циркулярно-поляризованной волны, отражённой от массива, происходит благодаря излучению связанных между собой дипольного момента  $\vec{p}$  и магнитного момента  $\vec{m}$  каждого омега-элемента. Эти моменты дают равные по абсолютной величине вклады в отражённую волну [13]. Преимущество использования метаповерхности на основе омега-элементов для получения циркулярно-поляризованной волны заключается в простоте изготовления и масштабирования. Омега-структура является плоской, следовательно, производить её можно, например, методом травления на печатной плате, практически в любом доступном масштабе.

Для подтверждения теоретических расчетов, проведенных в работах [12]–[14], проведено параметрическое моделирование путём использования метода конечных элементов, по следующим основным параметрам омега-частицы:  $a$  – длина плеча,  $l$  – расстояние между плечами и  $R$  – радиус витка (рисунок 1 а). Данная частица исследуется вблизи частоты 3 ГГц. Вектор напряженности электрического поля  $E$  падающей волны направлен по оси  $X$  (рисунок 1 б). Волновой вектор  $k$  направлен под углом 65 градусов относительно оси  $Z$ , то есть относительно нормали к плоскости, в которой расположены омега-элементы. Исследуемая модель рассматривается в вакууме, омега-элемент изготовлен из меди.

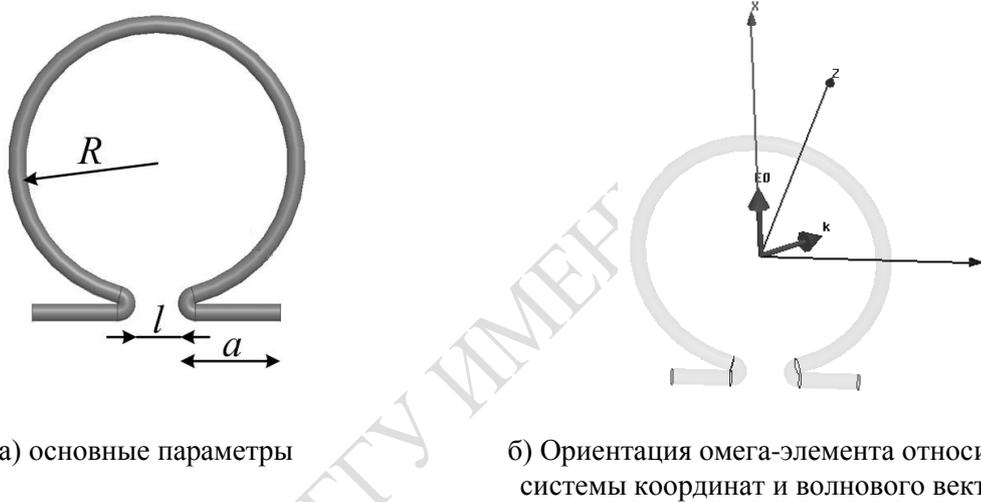


Рисунок 1 – Омега-элемент

Исследуемая омега-структура представляет собой бесконечную плоскую поверхность. Расстояние между центрами витков элементов в двумерном массиве равно двум сантиметрам, то есть элементарная ячейка имеет форму квадрата с длиной стороны 2 см.

Варьируемыми параметрами являются: радиус витка, расстояние между плечами и длина плеча. Диапазон изменений: длина плеча 1–5 мм с шагом 1 мм; радиус витка 4–8 мм с шагом 1 мм; расстояние между плечами 1–5 мм с шагом 1 мм.

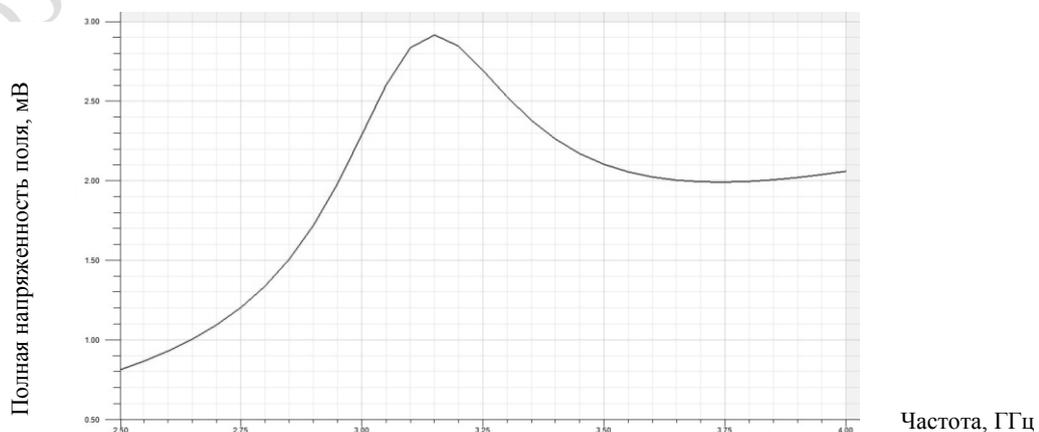


Рисунок 2 – График частотной зависимости полной напряженности электрического поля  $rE_{total}$  отражённой электромагнитной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами  $a = 3$  мм,  $l = 1$  мм,  $R = 7$  мм

На рисунке 2 показан график частотной зависимости полной напряженности электрического поля  $rE_{total}$  отражённой электромагнитной волны для метаповерхности, образованной омега-элементами с параметрами  $a = 3$  мм,  $l = 1$  мм,  $R = 7$  мм. Полная напряженность поля электромагнитной волны, индуцируемой омега-элементами, достигает своего максимального значения 2.92 мВ на частоте 3.15 ГГц и после прохождения максимума плавно опускается до значения 2 мВ в диапазоне частот 3.65–3.82 ГГц. Увеличение полной напряженности электрического поля с 0.81 до 2.92 мВ в диапазоне частот 2.5–3.15 является следствием приближения частоты волны к условию главного резонанса  $L = \frac{\lambda}{2}$ , где  $L$  – длина омега-элемента в выпрямленном состоянии.

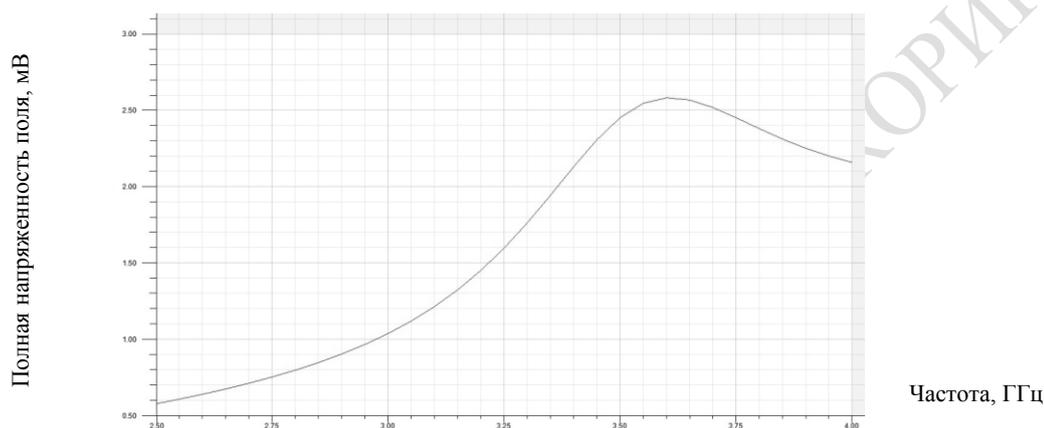


Рисунок 3 – График частотной зависимости полной напряженности электрического поля  $rE_{total}$  отражённой электромагнитной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами  $a = 6$  мм,  $l = 3$  мм,  $R = 6$  мм

На рисунке 3 показан график частотной зависимости полной напряженности электрического поля  $rE_{total}$  отражённой электромагнитной волны для метаповерхности, образованной омега-элементами с параметрами  $a = 6$  мм,  $l = 3$  мм,  $R = 6$  мм. Полная напряженность поля электромагнитной волны, индуцируемой омега-элементами, достигает максимума 2.58 мВ на частоте 3.60 ГГц, затем плавно снижается до значения 2.17 мВ на частоте 4 ГГц. В диапазоне частот 2.5–3.6 ГГц наблюдается рост напряженности от 0.58 до 2.58 мВ.

Из сравнения графиков следует, что омега-элементы с параметрами, соответствующими рисунку 2, создают немного более интенсивную отражённую волну. В то же время для омега-элементов, параметры которых соответствуют рисунку 3, резонанс наблюдается в более широкой полосе частот.

## 2. Моделирование частотной зависимости коэффициента эллиптичности отражённой волны для массива омега-элементов.

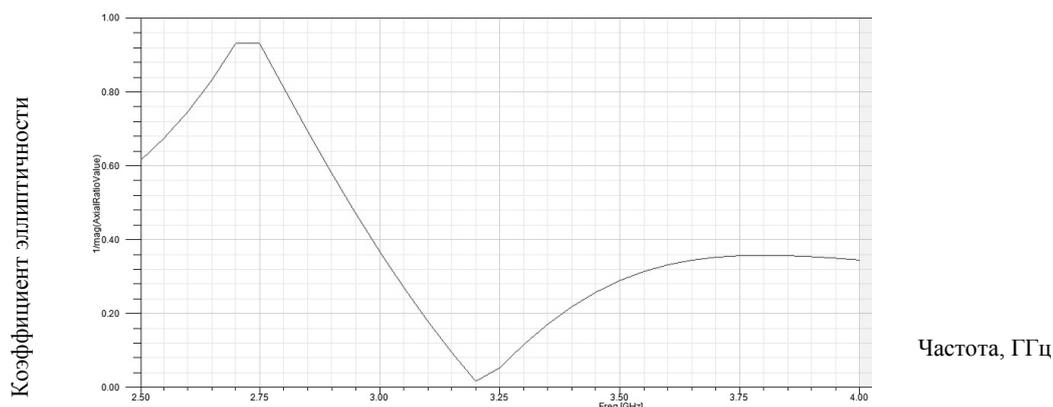


Рисунок 4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами  $a = 3$  мм,  $l = 1$  мм,  $R = 7$  мм

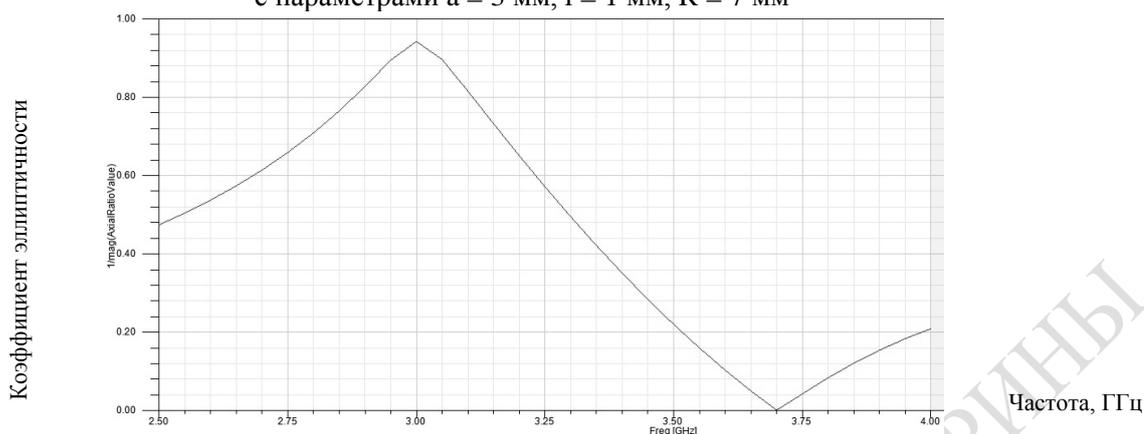


Рисунок 5 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами  $a = 6$  мм,  $l = 3$  мм,  $R = 6$  мм

На рисунке 4 представлен график частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для метаповерхности, образованной омега-элементами с параметрами: длина плеча 3 мм, радиус витка 7 мм, расстояние между плечами 1 мм. Коэффициент эллиптичности достигает максимума на частотном интервале 2.7–2.75 ГГц, пик имеет форму «столика», и для этих частот поляризация волны близка к циркулярной. Затем имеется минимум  $K = 0.01$  на частоте 3.2 ГГц, то есть для этой частоты отражённая волна имеет линейную поляризацию. На расчетной резонансной частоте 3 ГГц значение  $K = 0.36$ , то есть волна поляризована эллиптически.

Как следует из рисунка 5, коэффициент эллиптичности близок к максимальному значению  $K = 0.94$  на расчетной резонансной частоте 3 ГГц для омега-элементов с параметрами: длина плеча 6 мм, радиус витка 6 мм, расстояние между плечами 3 мм. Следовательно, для этой частоты отражённая волна имеет приблизительно циркулярную поляризацию. На частоте 3,7 ГГц отражённая волна является линейно поляризованной.

Обе частотных зависимости, представленные на рисунках 4 и 5, были получены с помощью параметрического моделирования 75 различных комбинаций омега-элементов.

**3. Сравнение результатов параметрического моделирования с теоретически рассчитанными параметрами оптимальных омега-элементов.** Ранее нами были получены параметры омега-элемента, рассчитанные в рамках модели квазистационарного тока [12], [13] и гармонического тока в элементе [14]. Сравнение основных параметров, полученных путём расчёта и параметрического моделирования, представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение параметров омега-элемента, полученных с помощью теоретического расчёта и параметрического моделирования методом конечных элементов

	$R$ , mm	$2\pi R$ , mm	$a$ , mm	$l$ , mm	$L=2\pi r+2a$ , mm	$\lambda=2L$ , mm
Модель квазистационарного тока	6.6	41.46	4.26	1	50	100
Модель гармонического тока	5.0	31.41	9.29	1	50	100
Образец 1 ( $a=3$ , $l=1$ , $R=7$ )	7.0	43.96	3	1	50	100
Образец 2 ( $a=6$ , $l=3$ , $R=6$ )	6.0	37.69	6	3	49.7	99.4

Как видно из таблицы 1, резонансная длина волны для всех омега-элементов практически совпадает с расчетной. Образец 2 имеет радиус витка и длину плеч, более близкие для обеих моделей тока, использованных при теоретических расчётах. Более точный результат может быть получен при уменьшении шага параметрического моделирования.

**Заключение.** На основании проведенного моделирования подтверждена возможность преобразования падающей линейно поляризованной электромагнитной волны в циркулярно

поляризованную, отраженную от метаповерхности, образованной омега-элементами, в области частот, близких к резонансной.

Определена частотная зависимость полной напряжённости электрического поля СВЧ волны, отражённой от двумерной решётки, которая образована омега-элементами. Показано, что эта зависимость имеет резонансный характер и достигает максимума вблизи частоты, удовлетворяющей условию полуволнового резонанса.

Найден коэффициент эллиптичности отражённой волны и показано, что её поляризация может изменяться от циркулярной до линейной в зависимости от частоты вблизи резонанса.

Оптимальные параметры омега-элементов, полученные путём моделирования, близки к значениям, рассчитанным ранее в рамках теоретических моделей.

Авторы выражают благодарность А.П. Балмакову и И.А. Грудько за помощь в построении модели и консультации.

### Литература

1. *Advances in Complex Electromagnetic Materials* / A. Priou [at al.] // Kluwer Academic Publishers. – 1997. – Vol. 28. – P. 32–37.
2. Serdyukov, A.N. *Electromagnetics of bi-anisotropic materials : Theory and applications* / A.N. Serdyukov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A. Sihvola. – Amsterdam : Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – P. 308–321.
3. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И.В. Семченко [и др.] // *Кристаллография*. – 2011. – Т. 56, № 3. – С. 398–405.
4. Tretyakov, S.A. *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics* / S.A. Tretyakov. – Artech House. – Norwood, MA, 2003. – 260 p.
5. Reply to comment on reflection and transmission by a uniaxial bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves / S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Journal of Physics D : Applied Physics*. – 1999. – Vol. 32, № 20. – P. 2705–2706.
6. *Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola // *Electromagnetics*. – 2001. – Vol. 21, № 5. – P. 401–414.
7. Semchenko, I.V. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2007. – Vol. 52, № 8. – P. 850–855.
8. Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной киральностью / И.В. Семченко [и др.] // *Кристаллография*. – 2014. – Т. 59, № 4. – С. 544.
9. Abaga Abessolo, M.A. Dual-band monopole antenna with omega particles for wireless applications / M.A. Abaga Abessolo, A.El Moussaoui, N. Aknin // *Progress In Electromagnetics Research Letters*. – 2011. – Vol. 24. – P. 27–34.
10. Dincer, F. Dual-band polarization independent metamaterial absorber based on omega resonator octa-starstrip configuration / F. Dincer, M. Karaaslan, E. Unal, C. Sabah // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2013. – Vol. 141. – P. 219–231.
11. Karaaslan, M. Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications / M. Karaaslan, M. Bakir // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2014. – Vol. 149. – P. 55–67.
12. Семченко, И.В. Получение циркулярно-поляризованной отраженной СВЧ волны с помощью плоской периодической структуры на основе омега-элементов / И.В. Семченко, М.А. Подалов // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2006. – № 6. – С. 40–43.
13. Излучение циркулярно поляризованных волн сверхвысокочастотного диапазона плоской периодической структурой из  $\Omega$ -элементов / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М.А. Подалов, С.А. Третьяков // *Радиотехника и электроника*. – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1084–1088.
14. Подалов, М.А. Оптимальная форма омега-включений для метаматериалов / М.А. Подалов, И.В. Семченко // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2009. – № 4. – С. 172–176.

<sup>1</sup>Нанкинский университет  
науки и технологии, Китай

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ