

УДК: 537.877

**Исследование резонансного поглощения электромагнитных волн  
СВЧ диапазона в среде со спиральной симметрией**

Д.Е. Пономарев

Научный руководитель: к.т.н. Н.Н. Кривин

Научный консультант: к.ф.-м.н. М.А. Шипуля

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: shipulya@tpu.ru, dmitri4ponamarev@gmail.com

**Investigation of resonant absorption of microwave  
electromagnetic waves in a helical wired media**

D.E. Ponamarev

Scientific Supervisor: Ph.D. N.N. Krivin

Scientific Consultant: Ph.D. M.A. Shipulya

Tomsk University of Control Systems and Radio Electronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

Email: shipulya@tpu.ru, dmitri4ponamarev@gmail.com

***Abstract.** The phenomenon of resonant absorption of electromagnetic waves in a environment with spiral symmetry has been experimentally investigated. The detected resonant absorption is in good agreement with the theoretical model.*

***Key words:** helical wired media, twisted electromagnetic wave, transmission coefficient, horn antennas.*

**Введение**

В настоящее время проводятся активные исследования возможностей применения так называемых «закрученных» электромагнитных волн (ЭМВ) [1] в технических приложениях. Подавляющее большинство данных приложений использует лишь достаточно узкий частотный диапазон, близкий к видимому спектру [2, 3], в то время как применения «закрученных» ЭМВ (ЗЭМВ) в классических приложениях радиочастотного диапазона, таких как радиолокация, радионавигация и радиосвязь, остаются все еще слабо изученными и пока не имеют широкого распространения [4, 5].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния симметрии среды распространения на способность данной среды к поглощению сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона 3–4 ГГц, что соответствует длинам волн порядка 7,5–10 см. В частности, исследуется резонансное поглощение ЭМВ в среде, обладающей спиральной симметрией. Спиральная симметрия среды, согласно [1], обуславливает изменение характеристик ЭМВ, отраженных ею в пространство, так, что распределение волнового фронта таких волн приходит в соответствие с определением ЗЭМВ.

**Экспериментальная часть**

Экспериментальное исследование резонансного поглощения ЭМВ в среде, обладающей спиральной симметрией, проводилось при помощи скалярного анализатора цепей P2M-04A и программного обеспечения “Graphit P2M” [6]. Экспериментальная трасса распространения ЭМВ состоит из двух рупорных антенн: приемной (ПРМА) и передающей (ПРДА). ПРМА и ПРДА находится на расстоянии  $l \sim 1$  м (порядка 10-и длин волн  $\lambda$ ) в атмосферной среде с помещенным в середине экспериментальной трассы исследуемым образцом. Параметры

применяемых рупорных антенн позволяют считать излучаемые ими ЭМВ, распространяющиеся на участке исследуемой среды, плоскими. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 1.

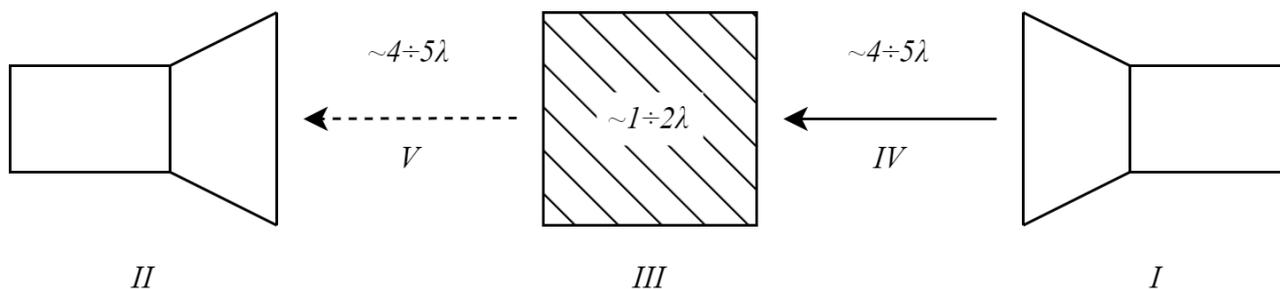


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: I – ПРДА, II – ПРМА, III – исследуемая среда, IV – излучение до распространения в исследуемой среде, V – излучение после прохождения через указанную среду

Исследуемый образец обеспечивает наличие спиральной симметрии в среде. Образец состоит из диэлектрической подложки, прозрачной для ЭМВ в указанном частотном диапазоне. На данной подложке симметрично относительно центра располагаются 9 спиралей из проводящего материала. Размеры подложки составляют приблизительно 200x200 мм. Расстояние между их центрами  $d = 80 \pm 2$  мм. Диаметр каждой из проводящих спиралей составляет  $D = 35 \pm 3$  мм, их высота –  $h = 160 \pm 2$  мм, а шаг между витками  $s = 20 \pm 2$  мм. Таким образом, исследуемый образец, фактически, представляет собой массив спиральных антенн, рассчитанных на излучение ЭМВ с пиковой частотой в указанном выше диапазоне. Поглощение ЭМВ данным массивом, очевидно, соответствует наличию резкого ослабления коэффициента прохождения (КП) ЭМВ в экспериментальной трассе.

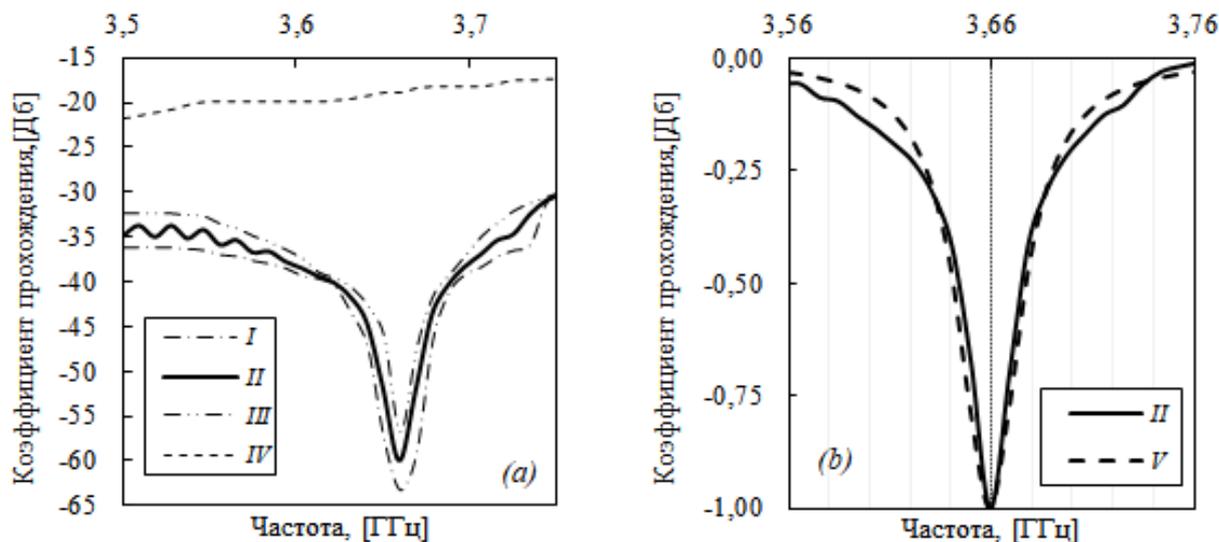


Рис. 2. КП экспериментальной трассы, (a) экспериментальные данные, (b) обработка результатов. Кривая I – минимальное значение, II – среднее значение, III – максимальное значение., IV – фон, V – аппроксимирующая кривая: резонанс на частоте 3,66 ГГц, ширина резонанса 36 МГц

## Результаты

На рисунке 2 представлены зависимости  $KП(\omega)$ , полученные в ходе проведения экспериментальных исследований. Хорошо виден резкий пик  $KП(\omega)$  коэффициента прохождения на частоте  $\omega_0$ , равной 3,66 ГГц. Указанный пик после обработки данных,

закрывающейся в фильтрации, свертки с аппаратной функцией и нормировки на максимальное значение, удается достаточно точно аппроксимировать лоренцевской кривой при выборе соответствующего параметра  $\Delta\omega = 36$  МГц. В итоге, нормированный  $KП(\omega)$  с близкой к единице достоверностью описывается соотношением

$$\frac{KП(\omega)}{\max[|KП(\omega)|]} = \frac{(\Delta\omega/2)^2}{(\Delta\omega/2)^2 + (\omega - \omega_0)^2}.$$

Следует отметить, что соотношение  $\Delta\omega/\omega_0 \approx 0,01$  определяет достаточно узкую полосу частот для указанного резонанса, что, в свою очередь, свидетельствует о приемлемости разброса значения допусков для геометрических размеров в рамках проводимого эксперимента.

Таким образом, в исследуемом СВЧ диапазоне частот, коэффициент прохождения ЭМВ в случае распространения в среде, обладающей спиральной симметрией, проявил совершенно аналогичные свойства, как и в случае распространения ЭМВ оптического диапазона, подробное исследование которого было описано, например, в работе [7].

### Заключение

Анализ результатов эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

1. Наличие на трассе распространения ЭМВ участка проводящей среды, обладающей спиральной симметрией, приводит к резонансному поглощению падающей ЭМВ.
2. Характеристики резонансного поглощения обусловлены характеристиками спиральных антенн, составляющих участок среды со спиральной симметрией.
3. Зафиксированные характеристики резонанса удается с большой точностью аппроксимировать теоретическими значениями при соответствующем выборе параметров.

### Список литературы

1. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45, № 11. – P. 8185–8189.
2. Barnett S.M., Babiker M. and Padgett M.J. Optical orbital angular momentum // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2017. – Vol. 375. – P. 1–9.
3. Liu J. et al. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission // *Light: Science & Applications*. – 2022. – Vol. 11. – P. 202.
4. Woo B. et al. Multiplexed Cassegrain Reflector antenna for simultaneous generation of three orbital angular momentum (OAM) modes // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 1–8.
5. Liu X. Y. et al. Generation of plane spiral orbital angular momentum waves by microstrip yagi antenna array // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P.175690
6. «Анализаторы цепей скалярные – Микран» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/sna/r2m/>
7. Hodgkinson I., Qi hog Wu. Inorganic chiral optical Materials // *Adv. Materials* – 2001. – № 12–13. – P. 889–897.