

УДК 537.877

Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев, М.А. Шипуля

Численное моделирование эффекта резонансного поглощения электромагнитных волн в среде со спиральной симметрией

Представлено сравнение экспериментальных данных по прохождению электромагнитных волн через среду, обладающую спиральной симметрией, с результатами, полученными при помощи расчётов на основе модели рассматриваемой среды в виде массива спиральных антенн. Показано, что данная модель позволяет адекватно описывать рассматриваемый процесс в рамках соответствующих приближений.

Ключевые слова: спиральная симметрия, массив антенн, численное моделирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-73-78

Недавние исследования [1–4] в области применения в радиолокации электромагнитных волн (ЭМВ), обладающих ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ), значительно повышают интерес к вопросу описания распространения таких волн в различных средах, способам их генерации и детектирования, возможностям применения их в различных технических приложениях.

На данный момент существует достаточно большое количество различных научных работ по вопросам, связанным как с аналитическим описанием свойств электромагнитных волн такого типа [5–10], так и с описанием их разнообразных технических приложений [11–32].

Большинство из указанных выше работ рассматривают ЭМВ в диапазоне длин волн микрометрового порядка, экспериментальное исследование которых требует достаточно точной аппаратуры и строгого соблюдения условий проводимых экспериментов. Понижение значения частоты ЭМВ позволяет увеличить рамки абсолютных погрешностей для используемого оборудования, сохранив при этом относительную ошибку на достаточно низком уровне. Это, в свою очередь, делает возможность проведения экспериментов более доступной. В частности, в диапазоне частот 1–10 ГГц допуски в рамках 14-го качества, очевидно, составляют 0,001–0,01 длины волны указанного диапазона, что позволяет надеяться на отсутствие значительных систематических ошибок эксперимента, связанных с качеством используемых в нем материалов и оборудования. Кроме того, в силу естественных причин, обусловленных нестабильностью атмосферной среды на трассе распространения рассматриваемых ЭМВ, понижение частоты таких волн дает возможность использования их на значительно больших расстояниях по сравнению с микрометровым диапазоном.

Таким образом, исследования распространения ЭМВ приведённого ранее диапазона в средах с неоднородностями в рамках погрешностей, указанных выше, позволяют оценить наличие либо отсутствие тех или иных физических эффектов, связанных как со свойствами самих ЭМВ с ненулевым ОУМ, так и со свойствами среды, в которой они распространяются.

Простейший способ создать среду, обеспечивающую наличие ненулевого ОУМ для распространяющихся в ней ЭМВ, – обеспечить в данной среде наличие спиральной симметрии. Среда, обладающая такой симметрией, очевидно, изменяет фазу распространяющихся в ней плоских ЭМВ таким образом, что при аналитическом описании электрического и магнитного полей, соответствующих прошедшим сквозь нее волнам, становится возможным выделение в явном виде фазового множителя, соответствующего ненулевому значению ОУМ [5–10]. Таким образом, становится возможным ассоциировать ЭМВ, распространяющиеся в среде со спиральной симметрией, с ЭМВ, обладающими ненулевым ОУМ.

Одной из базовых характеристик любой среды распространения ЭМВ является ω_p – её резонансная частота поглощения. С точки зрения исследований свойств матрицы рассеяния рассматриваемой среды данная частота соответствует наименьшему значению коэффициента пропускания (КП) – $s_{21}(\omega)$ в рассматриваемом диапазоне. Таким образом, измерив в эксперименте частотную зависимость КП радиотрассы, содержащей по ходу распространения ЭМВ среду со спиральной симметрией, возможно определить его экстремальное значение в соответствующем частотном диапазоне. Соответственно, частоту ω_p , при которой достигается данный экстремум, возможно ассоциировать с указанной выше характеристикой исследуемой среды – резонансной частотой поглощения.

Таким образом, целью данной работы является экспериментальное и аналитическое исследование частотных, в частности резонансных, свойств среды со спиральной симметрией, представляющей собой экспериментальную трассу распространения ЭМВ, а именно сравнительный анализ результатов измерений её КП с результатами компьютерного моделирования данной экспериментальной трассы.

Экспериментальные исследования коэффициента прохождения

Экспериментальные исследования проводились при помощи скалярного анализатора цепей P2M-04A и программного обеспечения «Graphit P2M» [33], позволяющих определять все элементы матрицы рас-

сеяния для соответствующей радиотрассы в диапазоне частот 2–4 ГГц. В частности, в рамках данной работы исследовалась частотная зависимость КП экспериментальной трассы распространения ЭМВ, состоящей из двух рупорных антенн: приемной (ПРМА) и передающей (ПРДА). ПРМА и ПРДА находятся на расстоянии $l \sim 1$ м (порядка 10 длин волн λ) в атмосферной среде с помещенным в середине трассы исследуемым образцом. Исследуемый образец обеспечивает наличие спиральной симметрии в среде (рис. 1) и состоит из диэлектрической подложки, прозрачной для ЭМВ в указанном частотном диапазоне, на которой симметрично относительно центра располагаются 9 спиралей из проводящего материала. Все проводящие спирали имеют одинаковую ориентацию и выполнены из медной проволоки диаметром 0,5 мм.

Размеры подложки составляют 200×200 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. Расстояние между центрами спиральных элементов массива варьировалось в ходе проведения эксперимента в рамках значений $d = 5-80$ мм с шагом 10 мм. Таким образом, исследуемый образец фактически представляет собой массив спиральных антенн, расстояние между которыми возможно дискретно изменять в ходе проведения экспериментов.

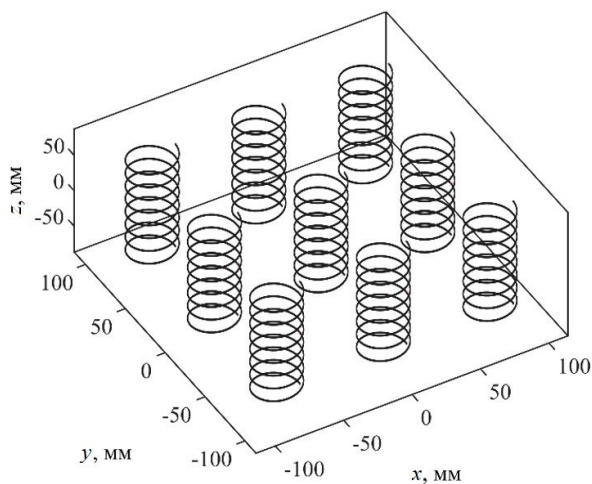


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого образца, обеспечивающего наличие спиральной симметрии в среде распространения ЭМВ

Измерения коэффициента пропускания среды проводились в диапазоне 3–4 ГГц для различных значений среднего расстояния между элементами массива. Разрешение скалярного анализатора в данном диапазоне было выбрано равным 500 точкам. Типичный вид зависимости КП от частоты представлен на рис. 2. Следует отметить, что измерение точного значения резонансной частоты для всех соответствующих расстояний между спиральными элементами массива в рамках указанных значений для проведенного эксперимента представляется достаточно проблематичным ввиду следующего обстоятельства: в целях исключения влияния факторов, связанных с возможными потерями за счет применения дополни-

тельных элементов конструкций, проводящие спирали выполнены по бескаркасному принципу, в связи с чем изменение среднего расстояния между элементами массива неизбежно связано с некоторой деформацией его элементов. Таким образом, убедившись в наличии резких резонансных пиков КП при изменении среднего расстояния между элементами массива, возможно ограничиться только одним определенным значением данного параметра и провести статистический набор данных в целях исключения систематической ошибки эксперимента.

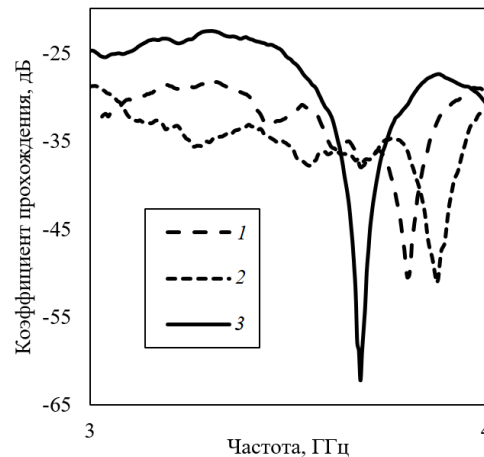


Рис. 2. Частотная зависимость КП экспериментальной трассы при различных значениях расстояния между центрами спиральных элементов массива: 1 – 0,05 м, 2 – 0,06 м, 3 – 0,07 м

На рис. 3 представлена частотная зависимость КП трассы для случая $d = 80$ мм. Усреднение значений КП проводилось по серии из 8 экспериментов. При построении данных зависимостей КП из экспериментальных данных исключен соответствующий фон, измеренный в отсутствие исследуемого образца на трассе.

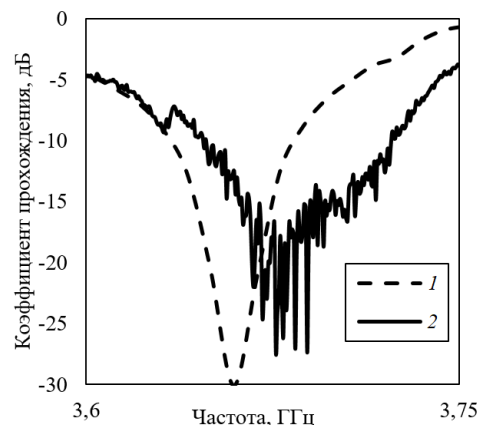


Рис. 3. Зависимость КП при значении расстояния между центрами спиральных элементов массива $d = 0,08$ м: 1 – усредненное значение; 2 – типичная экспериментальная кривая

Численная модель эксперимента и результаты моделирования

Численная модель эксперимента позволяет качественно оценить достоверность полученных экспериментальных данных. Для построения модели исполь-

зовались стандартные, хорошо известные методы среды разработки MATLAB [34–36]. В частности, для массива спиральных антенн, обладающего параметрами, указанными выше, была проведена серия из 256 численных экспериментов, в рамках которой случайным образом менялись параметры исследуемого массива. Допуски на изменение расстояний между центрами элементов массива, изменение диаметра проводящих спиралей, а также допуск на межвитковое расстояние данных спиралей составлял ± 2 мм. Все проведенные численные эксперименты были построены по одинаковой схеме: для каждого из значений частоты в исследуемом диапазоне вначале вычисляется импеданс элементов указанного массива, а затем – значения элементов матрицы рассеяния при вычисленном значении импеданса. При этом экспериментально зафиксированная частотная зависимость КП, очевидно, соответствует среднему значению элементов матрицы рассеяния описанного выше численного эксперимента.

На рис. 4 приведено среднее значение вещественной $\text{Re}[Z(\omega)]$ и мнимой $\text{Im}[Z(\omega)]$ частей импеданса, вычисленных в ходе проведения числовых экспериментов. Хорошо заметно наличие изгиба данных кривых вблизи резонансной частоты поглощения исследуемого массива.

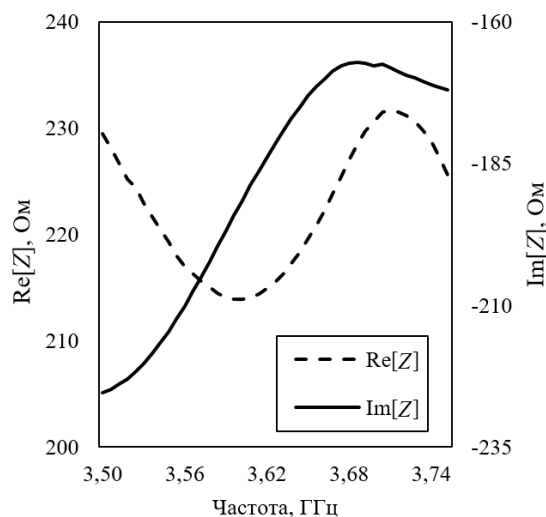


Рис. 4. Зависимость вещественной $\text{Re}[Z]$ и мнимой $\text{Im}[Z]$ частей импеданса по серии из 256 числовых экспериментов

Следует отметить, что поскольку численная модель не учитывает многих факторов реального эксперимента (например, характеристики ПРМА и ПРДА), полученные абсолютные значения данных величин носят лишь оценочный характер. В связи с этим сравнивать КП, полученный в результате численного моделирования, с тем, который получен в ходе проведения реального эксперимента, корректно только с точки зрения относительных величин.

Типичная зависимость среднего значения коэффициента пропускания, рассчитанная на основе вычисленных в ходе эксперимента значений матрицы рассеяния, представлена на рис. 5. Хорошо видно, что

численная модель достаточно точно описывает имеющуюся экспериментальную зависимость. Заметное расхождение в полуширине резонансных кривых числовой модели и экспериментальных данных вызвано, в первую очередь, наличием гораздо большего количества вариантов расположения элементов массива спиральных элементов, предусмотренное большим количеством проведенных числовых экспериментов. Влиянием этого же фактора возможно объяснить небольшое (порядка 3 МГц) расхождение в значениях резонансных частот рассматриваемых кривых.

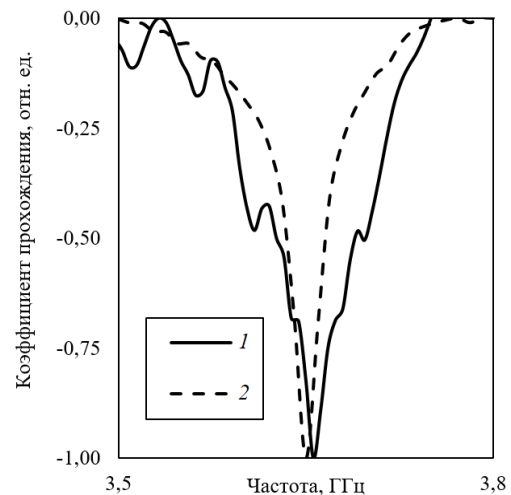


Рис. 5. Сравнение частотных зависимостей КП, полученных в ходе численного моделирования – 1 и в результате проведения эксперимента – 2

Таким образом, возможно утверждать, что рассматриваемая в работе простейшая численная модель эксперимента при условии набора необходимого объема статистических данных позволяет достаточно точно описывать поведение реальной физической системы.

Возможная доработка численной модели посредством включения в рассмотрение свойств рупорных антенн (ПРМА и ПРДА), свойств среды распространения (зависимость коэффициента преломления атмосферы от физических характеристик) и свойств измерительной аппаратуры, очевидно, позволит более точно рассчитывать результаты проводимых экспериментов. Это, в свою очередь, позволяет считать рассмотренную модель достаточно полезной с точки зрения сокращения временных и ресурсных затрат на проведение реальных экспериментов по изучению коэффициента прохождения различных радиотрасс.

Заключение

Таким образом, в данной работе представлены экспериментальные данные частотной зависимости коэффициента прохождения среды, обладающей спиральной симметрией, а также результаты, полученные при помощи численного моделирования процесса распространения ЭМВ в той же среде, представляющей собой массив спиральных антенн. В результате сравнительного анализа этих данных показано, что рассматриваемая численная модель адекватно описывает данные эксперимента.

Впоследствии полученные результаты будут использоваться для натурной и компьютерной имитации сред со спиральной симметрией, для исследования зависимости резонансных свойств данных сред от их геометрических параметров. В аспекте технической применимости полученные результаты позволят в дальнейшем разработать способы генерации радиоволн СВЧ-диапазона с ненулевым ОУМ для проведения дальнейших исследований особенностей их распространения в средах гидрометеоров и закономерностей отражения от радиолокационных объектов разного типа.

Литература

1. Integrated terahertz vortex beam emitter for rotating target detection / J. Xie, J. Qian, T. Wang, L. Zhou, X. Zang, L. Chen, Y. Zhu, S. Zhuang // *Advanced Photonics*. – 2023. – No. 6. – P. 066002.
2. Joint OAM Radar-Communication Systems: Target Recognition and Beam Optimization / W.-X. Long, R. Chen, M. Moretti, W. Zhang, J. Li // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2023. – Vol. 22, No. 7. – P. 4327–4341.
3. Super-resolution Orbital Angular Momentum based Radar Targets Detection / M. Lin, Y. Gao, P. Liu, J. Liu // *Electronics Letters*. – 2016. – Vol. 52, No. 13. – P. 1168–1170.
4. Target scattering characteristics for OAM based radar / K. Liu, Y. Gao, X. Li, Y. Cheng. // *AIP Advances*. – 2018. – Vol. 8, No. 2. – P. 025002.
5. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45, No. 11. – P. 8185–8189.
6. Bogdanov O.V. The Probability of Radiation of Twisted Photons in Dispersing Media / O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, G.Yu. Lazarenko // *Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-19): book of abstracts XIII International Symposium, September 15–20, 2019, Belgorod, Russian Federation*. – Tomsk: TPU Publishing House, 2019. – 51 p.
7. Bogdanov O.V. Probability of radiation of twisted photons in an inhomogeneous isotropic dispersive medium / O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, G.Yu. Lazarenko // *Physical Review A*. – 2019. – Vol. 100, No. 4. – P. 043836-1–043836-21.
8. Kazinski P.O. Scattering of plane-wave and twisted photons by helical media / P.O. Kazinski, P.S. Korolev // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. – 2022. – Vol. 55, No. 39. – P. 395301.
9. Barnett S.M. Optical orbital angular momentum / S.M. Barnett, M. Babiker, M.J. Padgett // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2017. – Vol. 375. – P. 2087.
10. Orbital Angular Momentum Waves: Generation, Detection and Emerging Applications / R. Chen, H. Zhou, M. Moretti, X. Wang, J. Li // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2020. – Vol. 22, No. 2. – P. 840–868.
11. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test / F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thide, A. Bianchini, F. Romanato // *New Journal of Physics*. – 2012. – Vol. 14. – P. 033001.
12. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing / Y. Yan, G. Xie, M.P.J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A.F. Molisch, M. Tur, M.J. Padgett, A.E. Willner // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – P. 4876.
13. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain / B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T.D. Carozzi, Ya.N. Istomin, H.N. Ibragimov, R. Khamitova // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol. 99, No. 8. – P. 087701.
14. Stability tests in time of OAM multiplexing schemes in highly disturbed environments / F. Tamburini, B. Thidé, P. Weibel, V. Boaga, F. Carraro, M. Pup. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/350992393_Stability_tests_in_time_of_OAM_multiplexing_schemes_in_highly_disturbed_environments, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
15. Highly-twisted states of light from a high quality factor photonic crystal ring / X. Lu, M. Wang, F. Zhou, M. Heuck, W. Zhu, V.A. Aksyuk, D.R. Englund, K. Srinivasan // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 1119.
16. He C. Towards higher-dimensional structured light / C. He, Y. Shen, A. Forbes // *Light: science & applications*. – 2022. – Vol. 11. – P. 205.
17. OAM multiple transmission using uniform circular arrays: numerical modelling and experimental verification with two digital television signal / R. Gaffoglio, A. Cagliero, A. De Vita, B. Sacco // *Radio Science*. – 2016. – Vol. 51, No. 6. – P. 645–658.
18. Robust quantum sensors with twisted-light fields induced optical transitions / T. Zanon-Willette, F. Impens, E. Ari-mondo, D. Wilkowski, A. Taichenachev, V. Yudin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/371989112_Robust_quantum_sensors_with_twisted-light_fields_induced_optical_transitions, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
19. L00L and p00p entanglement / D. Danese, S. Wollmann, S. Leedumrongwatthanakun, W. McCutcheon, M. Erhard, W. Plick, M. Malik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/371855308_L00L_and_p00p_entanglement, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
20. 1.58 Tbps OAM Multiplexing Wireless Transmission with Wideband Butler Matrix for Sub-THz Band / H. Sasaki, Y. Yagi, R. Kudo, D. Lee // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2024. – Vol. 42, No. 6. – P. 1613–1625.
21. Jiang Z.H. Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Engineering Applications / Z.H. Jiang, D.H. Werner. – Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2022. – 499 p.
22. Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics / Y. Horst, B.I. Bitachon, L. Kulmer, J. Brun, T. Blatter, J.-M. Conan, A. Montmerle-Bonnefois, J. Montri, B. Sorrente, C.B. Lim, N. Védrenne, D. Matter, L. Pommarel, B. Baeuerle, J. Leuthold // *Light: Science & Applications*. – 2023. – Vol. 12, No. 1. – P. 153.
23. Generation of rotational orbital angular momentum beams in the radio frequency based on an optical-controlled circular antenna array / X. Song, Z. Su, J. Ma, Y. Yao, Y. Bai, Z. Zheng, X. Gao, S. Huang // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29, No. 15. – P. 23717–23728.
24. Generation of coupled radio frequency orbital angular momentum beam with an optical-controlled circular antenna array / M. Zhao, X. Gao, M. Xie, J. Qian, C. Song, S. Huang // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 426. – P. 126–129.
25. Generation of terahertz vortex pulses without any need of manipulation in the terahertz region / Q. Lin, S. Zheng, Q. Song, X. Zeng, Y. Cai, Y. Li, Z. Chen, L. Zha, X. Pan, S. Xu // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44. – P. 887–890.
26. Orbital Angular Momentum in Radio – A System Study / S.M. Mohammadi, L.K.S. Daldorff, J.E.S. Bergman, R.L. Karlsson, B. Thide, K. Forozesh, T.D. Carozzi, B. Isham // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2010. – Vol. 58, No. 2. – P. 565–572.
27. Measurement of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam / M. Zhao, X. Gao, M. Xie, W. Zhai, W. Xu, S. Huang, W. Gu // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, No. 11. – P. 2549–2552.

28. Multiplexed Cassegrain Reflector antenna for simultaneous generation of three orbital angular momentum (OAM) modes / W.J. Byun, K.S. Kim, B.S. Kim, Y.S. Lee, M.S. Song, H.D. Choi, Y.H. Cho // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 27339.
29. Generation of plane spiral orbital angular momentum waves by microstrip yagi antenna array / X.Y. Liu, Y. Zhu, W. Xie, G.H. Peng, W. Wang // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 175688–175696.
30. Yagi Y. Prototyping of 40 GHz Band Orbital Angular Momentum Multiplexing System and Evaluation of Field Wireless Transmission Experiments / Y. Yagi, H. Sasaki, D. Lee // NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation, Kanagawa 239-0847. – Japan, 2022. – Vol. 10. – P. 130040–130047.
31. Leyser T.B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 102. – P. 065004.
32. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission / J. Liu, Z. Li, Z. Lin, J. Zhang, C. Huang, S. Mo, L. Shen, S. Lin, Y. Chen, R. Gao, L. Zhang, X. Lan, X. Cai, S. Yu // *Light: Science & Applications*. – 2022. – Vol. 11. – P. 202.
33. Scalar network analyzer R2M series – Micran. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://micran.com/productions/test-measurement/test-measurement-equipment/scalar-network-analyzers/scalar-network-analyzers-r2m-series/>, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
34. Antenna Toolbox Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mathworks.com/help/antenna/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
35. Create regular or AI-based helical dipole antenna - MatLab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/dipolehelix.html>, свободный (дата обращения: 14.07.2024).
36. Create rectangular antenna array – MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/rectangulararray.html>, свободный (дата обращения: 14.07.2024).

Кривин Николай Николаевич

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
 ORCID: 0000-0001-8194-4764
 Тел.: +7 (382-2) 90-71-51
 Эл. почта: nikolai.n.krivin@tusur.ru

Пonomarev Дмитрий Евгеньевич

Аспирант, преп. каф. КИПР ТУСУР Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
 Тел.: +7 (382-2) 53-21-84
 Эл. почта: ponomarev.d.051214-@e.tusur.ru

Шипуля Михаил Алексеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) ТУСУР Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
 Тел.: +7 (382-2) 51-23-27
 Эл. почта: sma@main.tusur.ru

Kravin N.N., Ponomarev D.E., Shipulia M.A.

Numerical simulation of the electromagnetic waves resonant absorption effect in a medium with spiral symmetry

A comparison of experimental data on the passage of electromagnetic waves through a medium with spiral symmetry with the results obtained using a model of the medium in the form of a lattice of spiral antennas is presented. It is shown that this model allows us to adequately describe the process under consideration within the framework of appropriate approximations.

Keywords: spiral symmetry, array of antennas, numerical simulation.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-73-78

References

1. Xie J., Qian J., Wang T., Zhou L., Zang X., Chen L., Zhu Y., Zhuang S. Integrated terahertz vortex beam emitter for rotating target detection. *Advanced Photonics*, 2023, no 6, 066002 p.
2. Long W.-X., Chen R., Moretti M., Zhang W., Li J. Joint OAM Radar-Communication Systems: Target Recognition and Beam Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, vol. 22, no. 7, pp. 4327–4341.
3. Lin M., Gao Y., Liu P., Liu J. Super-resolution Orbital Angular Momentum based Radar Targets Detection. *Electronics Letters*, 2016, vol. 52, no. 13, pp. 1168–1170.
4. Liu K., Gao Y., Li X., Cheng Y. Target scattering characteristics for OAM based radar. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 2, 025002 p.
5. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Physical Review A*, 1992, vol. 45, no 11, pp. 8185–8189.
6. Bogdanov O.V., Kazinski P.O., Lazarenko G.Yu. The Probability of Radiation of Twisted Photons in Dispersing Media. *Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-19)*: book of abstracts XIII International Symposium, September 15-20, 2019, Belgorod, Russian Federation. Tomsk: TPU Publishing House, 2019, 51 p.
7. Bogdanov O.V., Kazinski P.O., Lazarenko G.Yu. Probability of radiation of twisted photons in an inhomogeneous isotropic dispersive medium. *Physical Review A*, 2019, vol. 100, no. 4, pp. 043836-1–043836-21.
8. Kazinski P.O., Korolev P.S. Scattering of plane-wave and twisted photons by helical media. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2022, vol. 55, no. 39, 395301 p.
9. Barnett S.M., Babiker M., Padgett M.J. Optical orbital angular momentum. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2017, vol. 375, 2087 p.
10. Chen R., Zhou H., Moretti M., Wang X., Li J. Orbital Angular Momentum Waves: Generation, Detection and Emerging Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 840–868.
11. Tamburini F., Mari E., Sponselli A., Thide B., Bianchini A., Romanato F. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *New Journal of Physics*, 2012, vol. 14, 033001 p.
12. Yan Y., Xie G., Lavery M.P.J., Huang H., Ahmed N., Bao C., Ren Y., Cao Y., Li L., Zhao Z., Molisch A.F., Tur M., Padgett M.J., Willner A.E. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, 4876 p.
13. Thide B., Then H., Sjöholm J., Palmer K., Bergman J., Carozzi T.D., Istomin Ya.N., Ibragimov H.N., Khamitova R. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 99, no. 8, 087701 p.
14. Tamburini F., Thide B., Weibel P., Boaga V., Carraro F., Pup M. Stability tests in time of OAM multiplexing schemes

- in highly disturbed environments. Available at: https://www.researchgate.net/publication/350992393_Stability_tests_in_time_of_OAM_multiplexing_schemes_in_highly_disturbed_environments, free. (Accessed: July 14, 2024).
15. Lu X., Wang M., Zhou F., Heuck M., Zhu W., Aksyuk V.A., Englund D.R., Srinivasan K. Highly-twisted states of light from a high quality factor photonic crystal ring. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 1, 1119 p.
 16. He C., Shen Y., Forbes A. Towards higher-dimensional structured light. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, no. 1, 205 p.
 17. Gaffoglio R., Cagliero A., De Vita A., Sacco B. OAM multiple transmission using uniform circular arrays: numerical modelling and experimental verification with two digital television signal. *Radio Science*, 2016, vol. 51, no. 6, pp. 645–658.
 18. Zanon-Willette T., Impens F., Arimondo E., Wilkowski D., Taichenachev A., Yudin V. Robust quantum sensors with twisted-light fields induced optical transitions. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371989112_Robust_quantum_sensors_with_twisted-light_fields_induced_optical_transitions, free (Accessed: July 14, 2024).
 19. Danese D., Wollmann S., Leedumrongwatthanakun S., McCutcheon W., Erhard M., Plick W., Malik M. L00L and p00p entanglement. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371855308_L00L_and_p00p_entanglement, free (Accessed: July 14, 2024).
 20. Sasaki H., Yagi Y., Kudo R., Lee D. 1.58 Tbps OAM Multiplexing Wireless Transmission with Wideband Butler Matrix for Sub-THz Band. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, vol. 42, no. 6, pp. 1613–1625.
 21. Jiang Z.H., Werner D.H. *Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Engineering Applications*, Hoboken, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2022, 499 p.
 22. Horst Y., Bitachon B.I., Kulmer L., Brun J., Blatter T., Conan J.-M., Montmerle-Bonnefois A., Montri J., Sorrente B., Lim C.B., Védrenne N., Matter D., Pommarel L., Baeuerle B., Leuthold J. Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive. *Light: Science & Applications*, 2023, vol. 12, no. 1, 153 p.
 23. Song X., Su Z., Ma J., Yao Y., Bai Y., Zheng Z., Gao X., Huang S. Generation of rotational orbital angular momentum beams in the radio frequency based on an optical-controlled circular antenna array. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 15, pp. 23717–23728.
 24. M. Zhao, X. Gao, M. Xie, J. Qian, C. Song, S. Huang. Generation of coupled radio frequency orbital angular momentum beam with an optical-controlled circular antenna array. *Optics Communications*, 2018, vol. 426, pp. 126–129.
 25. Lin Q., Zheng S., Song Q., Zeng X., Cai Y., Li Y., Chen Z., Zha L., Pan X., Xu S. Generation of terahertz vortex pulses without any need of manipulation in the terahertz region. *Optics Letters*, 2019, vol. 44, pp. 887–890.
 26. Mohammadi S.M., Daldorff L.K.S., Bergman J.E.S., Karlsson R.L., Thide B., Forozesh K., Carozzi T.D., Isham B. Orbital Angular Momentum in Radio – A System Study. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 2, pp. 565–572.
 27. Zhao M., Gao X., Xie M., Zhai W., Xu W., Huang S., Gu W. Measurement of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 11, pp. 2549–2552.
 28. Byun W.J., Kim K.S., Kim B.S., Lee Y.S., Song M.S., Choi H.D., Cho Y.H. Multiplexed Cassegrain Reflector antenna for simultaneous generation of three orbital angular momentum (OAM) modes. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1, 27339 p.
 29. Liu X.Y., Zhu Y., Xie W., Peng G.H., Wang W. Generation of plane spiral orbital angular momentum waves by microstrip yagi antenna array. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 175688–175696.
 30. Yagi Y., Sasaki H., Lee D. Prototyping of 40 GHz Band Orbital Angular Momentum Multiplexing System and Evaluation of Field Wireless Transmission Experiments. *NTT Network Innovation Laboratories*, NTT Corporation, Kanagawa 239-0847, Japan, 2022, vol. 10, pp. 130040–130047.
 31. Leyser T.B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 102, 065004 p.
 32. Liu J., Li Z., Lin Z., Zhang J., Huang C., Mo S., Shen L., Lin S., Chen Y., Gao R., Zhang L., Lan X., Cai X., Yu S. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, 202 p.
 33. Scalar network analyzer R2M series – Micran. Available at: <https://micran.com/productions/test-measurement/test-measurement-equipment/scalar-network-analyzers/scalar-network-analyzers-r2m-series/>, free (Accessed: July 14, 2024).
 34. Antenna Toolbox Documentation. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, free (Accessed: July 14, 2024).
 35. Create regular or AI-based helical dipole antenna – MATLAB. Available at: https://www.mathworks.com/help/antenna/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, free (Accessed: July 14, 2024).
 36. Create rectangular antenna array. Available at: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/rectangulararray.html>, free (Accessed: July 14, 2024).

Nikolai N. Krivin

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Equipment, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-8194-4764
Phone: +7 (382-2) 90-71-51
Email: nikolai.n.krivin@tusur.ru

Dmitry E. Ponamarev

Postgraduate student, Department of Design and Production of Radioelectronic Equipment, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 53-21-84
Email: ponamarev.d.051214-@e.tusur.ru

Michail A. Shipulia

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems, (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 51-23-27
Email: sma@main.tusur.ru