

УДК 537.87

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВОЙСТВА «ЗАКРУЧЕННОСТИ»
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В РАДИОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Д.Е. Понамарев¹

Научный руководитель: к.т.н. Н.Н. Кривин¹

Научный консультант: к.ф.-м.н. М.А. Шипуля²

¹Томский университет систем управления и радиоэлектроники,

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

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: dmitri4ponamarev@gmail.com

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING “TWISTED” ELECTROMAGNETIC
WAVES IN THE RADIO FREQUENCY RANGE**

D.E. Ponamarev¹

Scientific supervisor: Ph.D. N.N. Krivin¹

Scientific consultant: Ph.D. M.A. Shipulya²

¹Tomsk University of Control Systems and Radio Electronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050

²Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: dmitri4ponamarev@gmail.com

Abstract. *The analysis of the possibility of using "twisted" electromagnetic waves in the radio frequency range is presented. Promising areas for research have been identified.*

Введение. Принято считать, что явление переноса орбитального углового момента при помощи электромагнитных волн (ЭМВ) впервые было представлено в работе [1]. Более подробное теоретическое обоснование данного явления было предложено в работе [2]. На сегодняшний день исследования физических процессов с участием ЭМВ, обладающих ненулевым угловым моментом, или, так называемых, «закрученных» электромагнитных волн (ЗЭМВ) представляют передовой край науки. Множество различных технических приложений разработано и уже успешно используется с применением данного явления. Однако необходимо отметить, что подавляющее большинство данных приложений использует лишь достаточно узкий частотный диапазон, близкий к видимому спектру. Это, в первую очередь, связано с особенностью профиля распределения напряженностей электрического и магнитного полей в направлении распространения ЗЭМВ. Вектор Пойнтинга такой волны с течением времени описывает спираль, направленную по ходу её распространения. Радиус данной спирали пропорционален частоте волны. Это приводит к трансформации профиля излучения из точечной в кольцеобразную форму, что, в свою очередь, очевидно, накладывает жесткие ограничения на возможность применения ЗЭМВ в таких классических приложениях радиочастотного диапазона как радиолокация или передача информации при помощи антенн с узкой диаграммой направленности. Вместе с тем, существенное уплотнение информационного канала при помощи использования

дополнительного квантового числа, характеризующего значение углового момента ЗЭМВ, вместо повышения её частотного диапазона представляет с технической точки зрения значительный интерес. В данной работе рассмотрены основные возможности для применения ЗЭМВ в классических приложениях радиочастотного диапазона.

Результаты. В работе [3] представлены результаты эксперимента по передаче информации с применением ЗЭМВ по оптоволоконному каналу. Указано значительное превосходство данного подхода в сравнении с классическими способами уплотнения канала. Следует отметить, что в указанной выше работе применяется метод увеличения пропускной способности канала связи в условиях, соответствующих распространению ЗЭМВ в однородной среде, которая не вносит существенного искажения в профиль распределения интенсивности. В работе [4] представлена идея применения «алфавита», основанного на профиле интенсивности ЗЭМВ, в целях увеличения помехозащищенности канала связи. В зависимости от значения углового момента l , профиль распределения интенсивности ЗЭМВ имеет различные расположения минимумов и максимумов. Указано, что при помощи комбинаций ЗЭМВ с различными l , возможно добиться существенного увеличения соотношения «сигнал/шум». В работе [5] с той же целью дополнительно используется также и частотное разделение ЗЭМВ при помощи введения в систему соответствующих фильтров.

Известны работы [6-9], описывающие попытки передавать информацию при помощи ЗЭМВ для случая радиочастотного диапазона. В работе [6] описан простейший конструктив приемо-передающей антенны для ЗЭМВ. Достаточно очевидно, что для таких антенн характерна заметная чувствительность добротности к точности изготовления их излучающей поверхности. Кроме того, необходимо отметить, что подобный жесткий конструктив не позволяет существенно варьировать значение углового момента l , и, соответственно, не позволяет существенно уплотнять канал связи. В работе [7] описаны принципы конструирования антенн для передачи ЗЭМВ, обеспечивающих возможность изменения значения углового момента l . В работе [8] представлена концепция приемо-передающей антенны и описаны результаты опыта по передаче сигнала с частотой ~ 40 ГГц при помощи ЗЭМВ. Известны также работы (например, [9, 10]), посвященные разработке концепции применения ЗЭМВ в радиолокационной технике. Однако, о существовании каких-либо реальных технических приложений, разработанных при помощи указанных выше концепций, на сегодняшний день пока еще не известно.

Заключение. В результате анализа указанных выше работ, естественно прийти к следующим простым выводам:

1. Применение ЗЭМВ, распространяющихся в однородной среде, не искажающей профиль распределения интенсивности вдоль направления движения, позволяет существенным образом уплотнить канал передачи информации за счет использования дополнительной степени свободы, характеризующейся значением проекции углового момента l ;
2. Применение ЗЭМВ, распространяющихся в условиях естественной турбулентности атмосферы, в следствии сильного искажения профиля распределения интенсивности вдоль направления распространения, является нецелесообразным для уплотнения канала передачи информации за счет изменения значения проекции углового момента.

Исходя из указанных положений, легко определить наиболее перспективные направления для исследований, в целях использования ЗЭМВ в радиочастотной области:

1. Поскольку существенных результатов по части уплотнения информационного канала удастся достичь только в случае однородных сред, представляется целесообразным провести исследование поведения ЗЭМВ на границе раздела сред, обладающих существенно различающейся диэлектрической проницаемостью;
2. Поскольку вид профиля интенсивности ЗЭМВ существенно зависит как от значения l , так и от значения частоты, представляется целесообразным провести исследования по возможности использования данного свойства в приложениях метеорадиолокации для детектирования объемных скоплений аэрозолей в атмосфере.

Проведение указанных исследований, в зависимости от поведения ЗЭМВ в данных условиях, позволит сделать вывод относительно возможности применения данного типа ЭМВ в зондирующей радиолокации. Областью практического использования ЗЭМВ могут стать, например, приложения метеорадиолокации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // Physical Review A. – 1992. – V. 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. – V. 375. – P. 1-9.
3. Liu J. et al. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission // Light: Science & Applications. – 2022. – V. 11. – P. 202.
4. Klug A., Peters C., and Forbes A. Robust structured light in atmospheric turbulence // Advanced Photonics. – 2023. – V. 5., №. 1. – P. 016006222.
5. Forbes A., Perumal L. Twisted light gets a splash of colour // Nature Nanotechnology. – 2023. – V. 18, – P. 221-222.
6. Woo B. et al. Multiplexed Cassegrain Reflector antenna for simultaneous generation of three orbital angular momentum (OAM) modes // Scientific Reports. – 2016. – V. 6. – №. 27339.
7. Liu X. Y. et al. Generation of plane spiral orbital angular momentum waves by microstrip yagi antenna array // IEEE Access. – 2020. – V. 8, – P.175690
8. Yagi Ya., Sasaki H. and Lee D. Prototyping of 40 ghz band orbital angular momentum multiplexing system and evaluation of field wireless transmission experiments // IEE Access. – 2022. – V. 10. – P. 130040.
9. Yuan T., Wang H., Qin Y. and Cheng Y. Electromagnetic vortex imaging using uniform concentric circular arrays // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2016. – V. 15. – P. 1024-1027.
10. Wang Zh., Zheng Sh., Zheng J. Characterization parameters for antennas generating orbital angular momentum waves // J. Appl. Phys. – 2022. – V. 132. – P. 074905.