

Труды МАИ. 2024. № 135
Trudy MAI, 2024, no. 135

Научная статья

УДК 537.871

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179687>

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АНТЕННЫ X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛН С НЕНУЛЕВЫМ ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ

Юрий Михайлович Мелёшин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Москва, Зеленоград

kykymberr@gmail.com

Аннотация. Представлен процесс исследования, электродинамического моделирования, проектирования и испытаний широкополосных антенн X-диапазона частот, формирующих волны как с сферическим фазовым фронтом, так и волны с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ). Были исследованы антенны, изготовленные по печатной технологии и работающие в диапазоне частот от 9 до 10 ГГц. Были разработаны и изготовлены антенны с сферическим фазовым фронтом, с спиральным фазовым фронтом для вращений спирали по часовой и против часовой стрелки (соответствует ОУМ модам +1 и -1). Проведенные исследования показали возможность разделения сигналов на одной частоте и одном типе поляризации за счёт использования разработанных антенн с различными ОУМ модами с коэффициентом взаимного запираания до 14 дБ.

Ключевые слова: угловой орбитальный момент, эффективность использования спектра, антенны, печатные антенны

Для цитирования: Мелёшин Ю.М. Исследование и разработка антенны X-диапазона частот для формирования волн с ненулевым орбитальным угловым моментом // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179687>

Original article

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF X-BAND ANTENNA FOR WAVE FORMATION WITH NON-ZERO ORBITAL ANGULAR MOMENTUM

Yuri M. Meleshin

National Research University of Electronic Technology,
Zelenograd, Moscow, Russia

kykymberr@gmail.com

Abstract. The article presents the process of electro-dynamic modeling, designing and testing of the broadband X-band frequencies antennas, forming the waves with both spherical phase front and waves with non-zero orbital angular momentum (OAM). Antennas manufactured by printed technology based on an equidistant antenna array of 16 elements and operating in the frequency range from 9 to 10 GHz have were under study. The article demonstrates the process of the required phase shifts computing at the antenna elements, as well as aero-dynamic modeling of the signal separation and phase shaping circuitry. Antennas with spherical phase front, with spiral phase front for clockwise and counterclockwise spiral rotations (corresponding to the OAM modes +1 and -1) were

designed and fabricated. Experimental studies of the antenna patterns in the far zone (at a distance of 8 meters) and in the near zone (in the range from 0.1 to 2 meters) have been performed. Studies in the far zone revealed that the pattern was of a difference shape, and the wave intensity in the direction normal to the aperture plane is 30 dB less than that of a similar antenna with a spherical phase front. The difference in the transmission coefficient herewith between the case with the identical modes and different pitches is less than 4 dB for the comparison sector from -30 to $+30$ degrees, which indicates that the mode purity is insufficient for these antennas at a distance of 8 meters. The studies conducted in the near zone demonstrate the possibility of signal separation at one frequency and one type of polarization through the application of the developed antennas with different OAM modes with a coefficient of mutual locking up to 14 dB. However, with the distance increasing up to 1 meter, this coefficient falls to 3-4 dB, which already indicates a significant degradation of the modes purity at this distance. Conclusions on the relevance of the issues concerning quality improving of the modes formed by the OAM and reducing the divergence of such waves were made by the results of this work.

Keywords: Angular orbital momentum, spectrum efficiency, antennas, printed antennas

For citation: Meleshin Yu.M. Research and development of X-band antenna for wave formation with non-zero orbital angular momentum. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179687>

Постановка задачи

В настоящее время, с учетом бурного роста количества различных радиотехнических систем, а также ограниченности доступного радиочастотного

спектра частот, актуальной является задача эффективного использования заданной полосы частот множеством абонентов. Классическими способами разделения абонентов для фиксированных параметров радиосистемы работы являются способы разделения: пространственное [1], кодовое [2,3], поляризационное [4], частотное [5,6] и их возможные комбинации [7]. Однако, все представленные способы используют электромагнитные (ЭМ) волны с сферическим фазовым фронтом, тогда как известны способы формирования ЭМ волн с ненулевым ОУМ, фазовый фронт которых описывается по закону $e^{lj\varphi}$, где l – индекс моды, φ – азимутальный угол. Такой фазовый фронт является спиралевидным, при этом модуль индекса моды l показывает количество заходов спирали, а знак – направление вращения [8]. На рисунке 1 показан фазовый фронт волны для $l=0,1,2,3$.

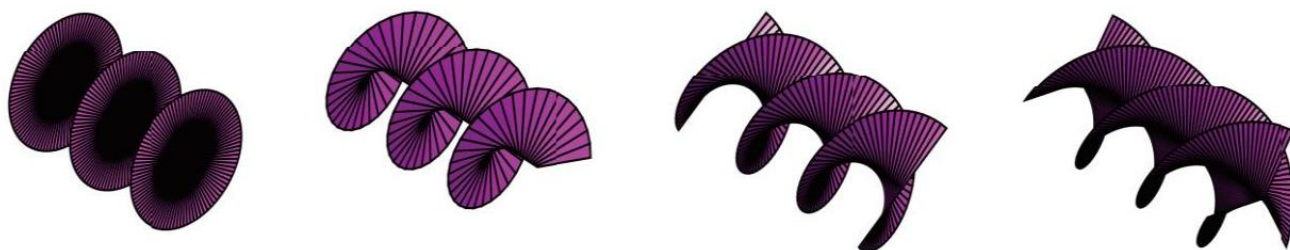


Рисунок 1 – Фазовый фронт волны для $l=0,1,2,3$ [8]

Теоретически – волны с разными индексами волн являются ортогональными, что позволяет добавить еще одну степень свободы при разделении сигналов на одних и тех же несущих частотах, что могло бы позволить увеличить количество обслуживаемых абонентов или пропускную способность системы связи при фиксированном частотном ресурсе, что крайне актуально в задачах построения радиосистем связи космического базирования и сотовых сетей новых поколений, где частотный ресурс определяется законодательными актами и его увеличение

затруднительно. Однако, ряд исследований [9-12] показывает, что существуют сложности с формированием чистых ОУМ волн, обладающих достаточными значениями ортогональности по отношению друг к другу. Особенно, данный эффект проявляется на больших дальностях. Таким образом, в рамках данного исследования необходимо создать ОУМ антенны и экспериментальным путем проверить их технические характеристики.

Исследование и создание ОУМ антенн

К основным типам антенн, формирующих ОУМ волны относят: спиральные фазовые пластины (СФП) [13-15], эквидистантные кольцевые/квадратные антенные решетки (ЭКАР) [16-18] и зеркальные параболические антенны [19-21]. При выборе типа антенны для первых итераций исследований учитывалась простота расчета и изготовления антенн, а также задел в области построения антенных систем.

В рамках данного исследования было принято решение построить ОУМ антенну на базе ЭКАР из 16 широкополосных печатных антенных элементов (4 на 4) X-диапазона частот, используемых ранее в различных исследованиях и работающих в диапазоне от 9 до 10 ГГц (структура одиночного печатного элемента представлена на рисунке 2) [22]. Межэлементный шаг выбран 25 мм. Общий вид ЭКАР из 16 элементов представлен на рисунке 3. Для проведения сравнительных экспериментов было решено спроектировать и изготовить три набора антенн: с модой $l=0$ (синфазное и равноамплитудное распределение на печатных элементах антенны, соответствующее сферическому фазовому фронту), с модой $l=+1$ (спиралевидный фазовый фронт с изменением фазы по часовой стрелке) и с модой $l=-1$ (спиралевидный фазовый фронт с изменением фазы против часовой стрелки).

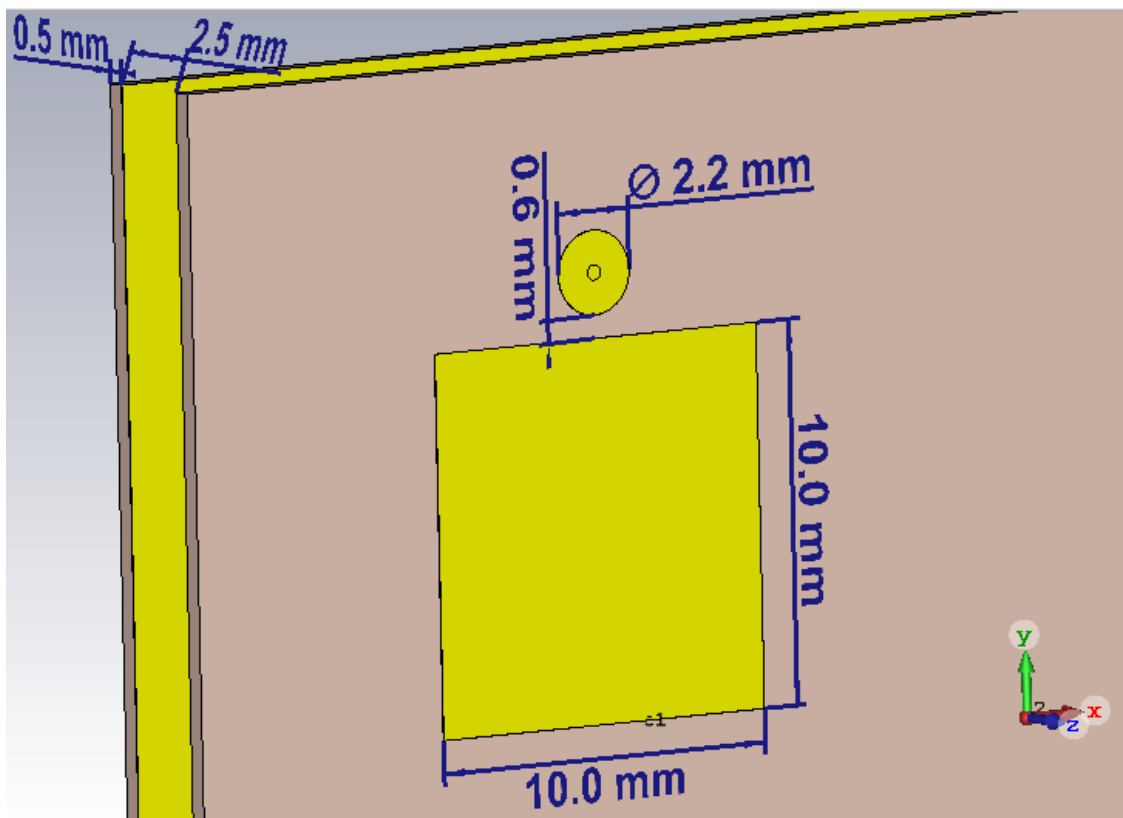


Рисунок 2 – Одиночный печатный излучатель X-диапазона частот

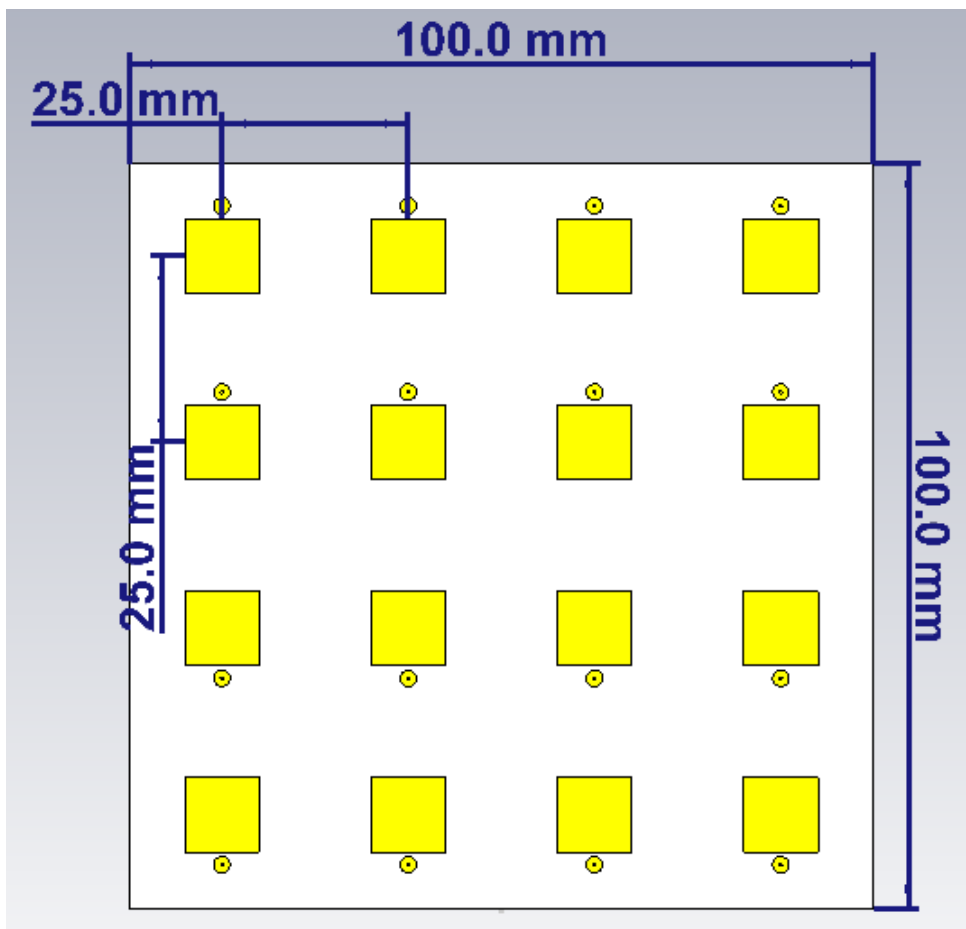


Рисунок 3 – ЭКАР из 16 элементов на базе печатного излучателя

Для формирования ОУМ волны при помощи ЭКАР необходимо сформировать фазовое распределение, которое бы соответствовало $e^{lj\varphi}$, что для индекса моды $l=+1$ дает изменение фазы от 0 до 360° , соответственно, распределение фаз на ЭКАР должно соответствовать Рисунку 4.

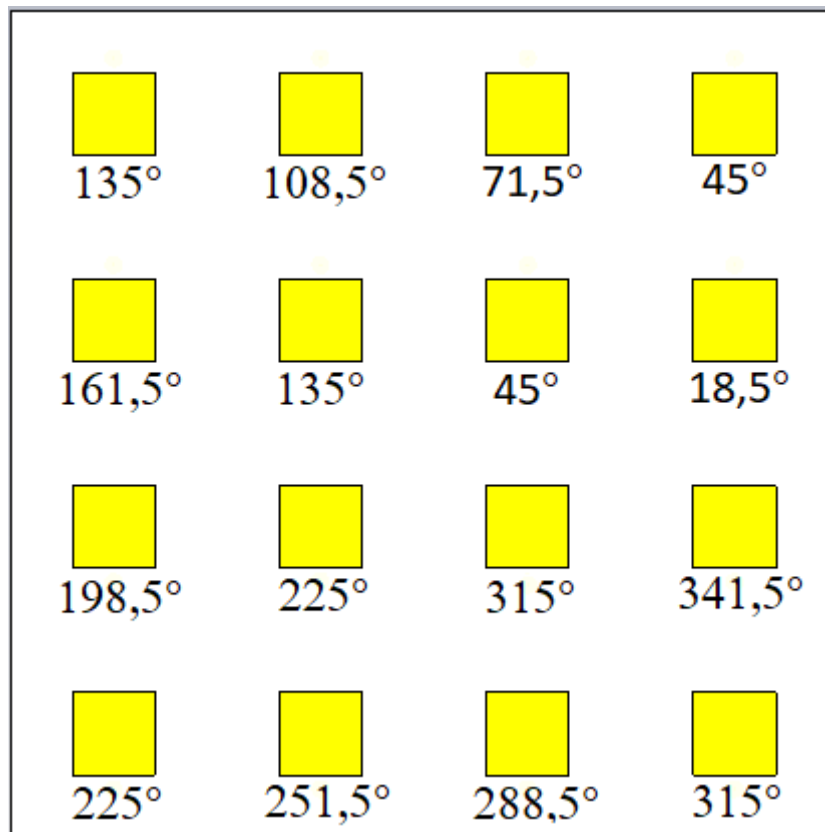


Рисунок 4 – Распределение фаз ЭКАР для моды $l=+1$

Для формирования необходимого фазового распределения в программе CST Microwave Studio был создан делитель мощности на 16, расположенный на обратной стороне антенны и разность длин дуг которого соответствовала распределению фаз, представленному на рисунке 4. При этом, с целью сокращения длин дуг, было принято решение одну половину излучателей выполнить с возбуждением печатных элементов с противоположенной стороны, тем самым добавив им разность фаз 180°

градусов с оставшейся половиной печатных элементов. Получившийся делитель мощности на 16 представлен на рисунке 5.

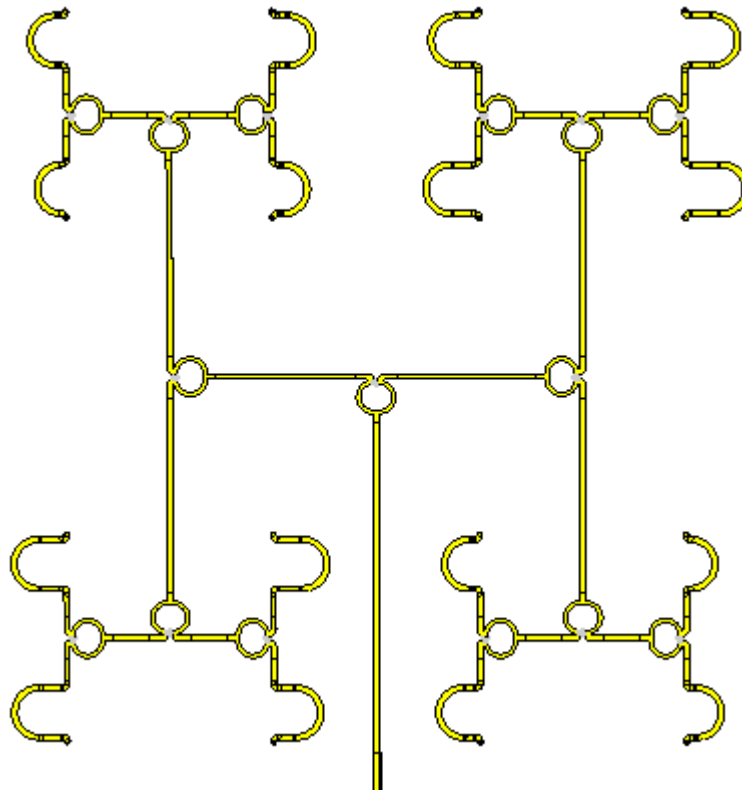


Рисунок 5 – Делитель мощности на 16 для моды $l=+1$

Создания делителя для моды $l=-1$ возможно путем зеркального отражения делителя для моды $l=+1$. В результате объединения моделей делителя и 16 печатных излучателей была получена полноценная модель ЭКАР антенны. Далее представлены результаты моделирования КСВН (Рисунок 6), диаграммы направленности (трехмерный вид – Рисунок 7, сечения ДН в перпендикулярных плоскостях – Рисунки 8 и 9) и фаза вектора напряженности электрического поля (E) в сечениях на удаление 10, 50, 100, 250 и 500 мм (Рисунок 10).

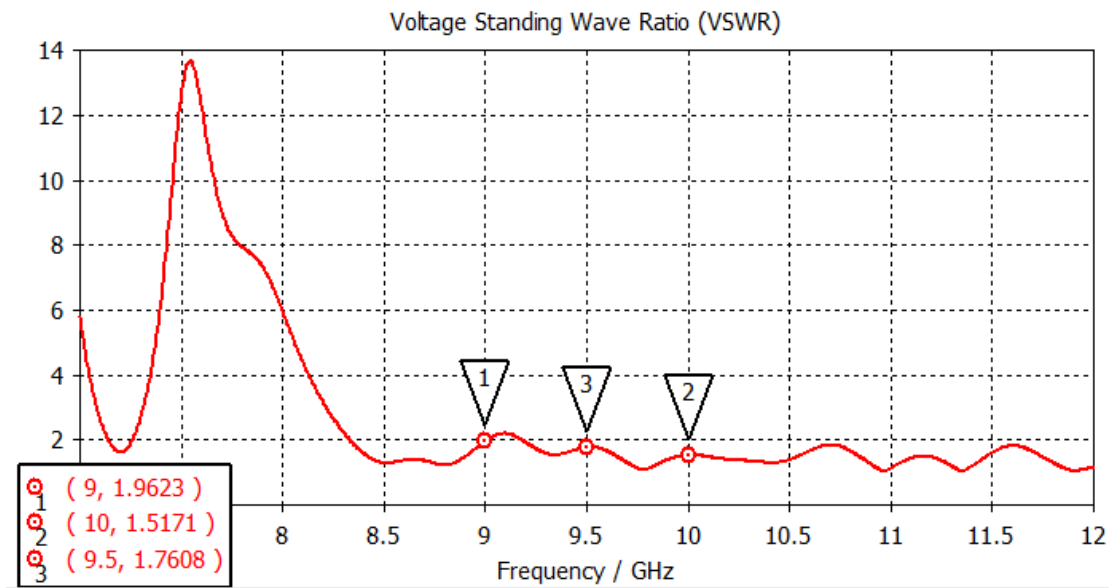


Рисунок 6 – КСВН

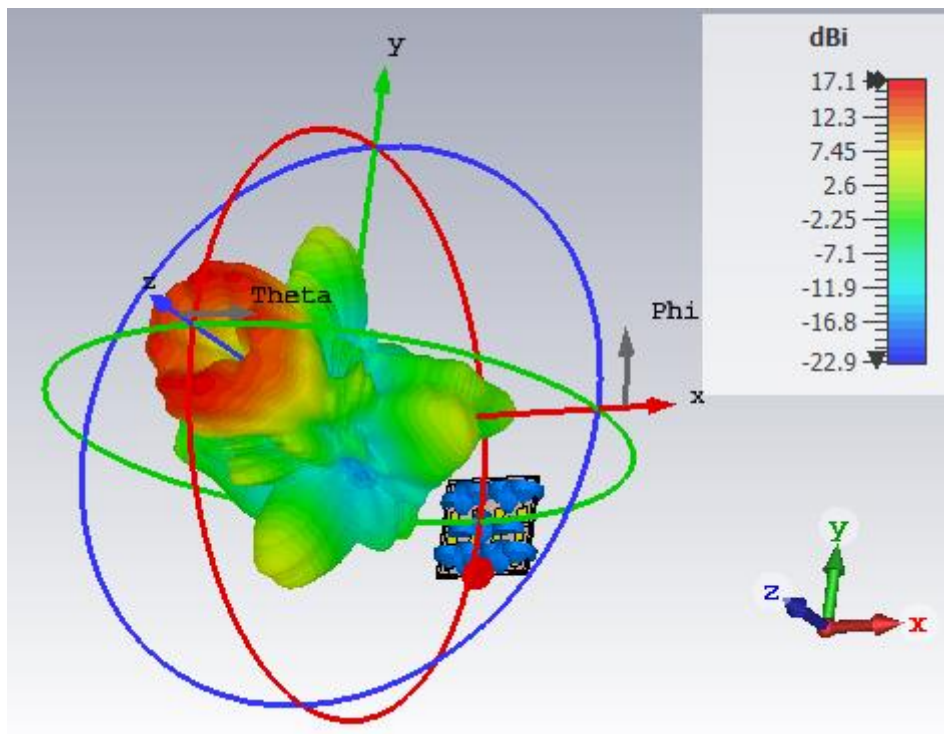


Рисунок 7 – Трёхмерный вид диаграммы направленности

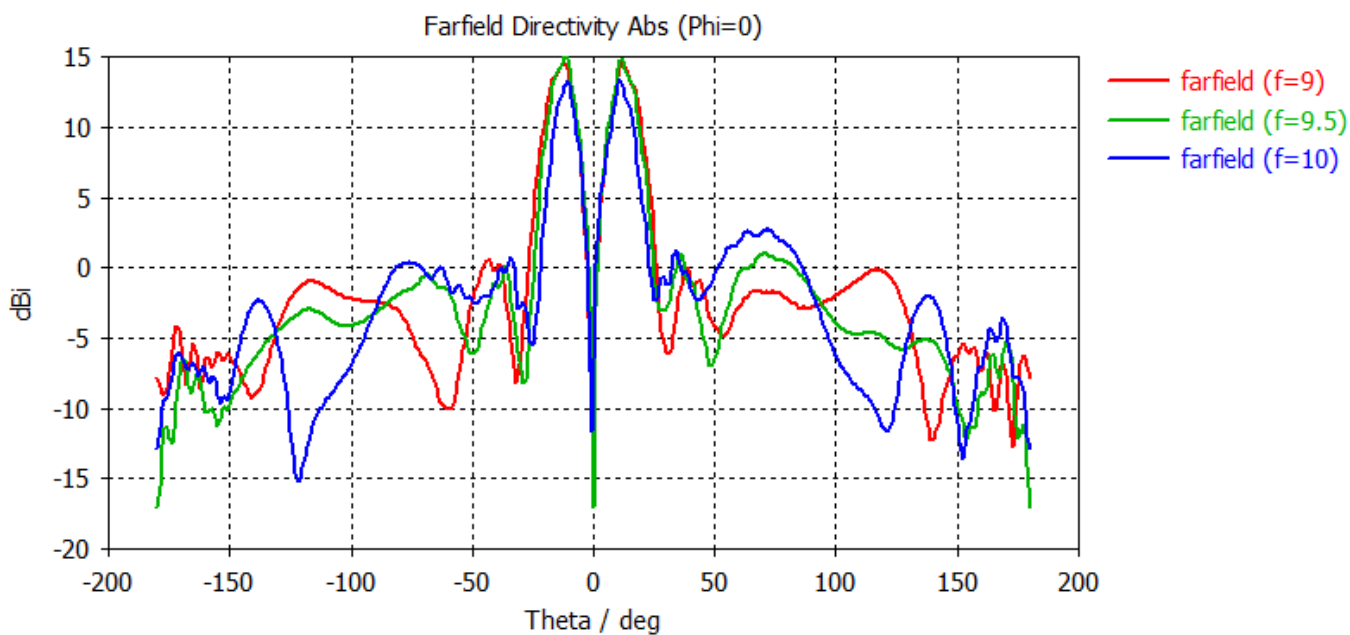


Рисунок 8 – Сечение ДН в плоскости $\Phi = 0$

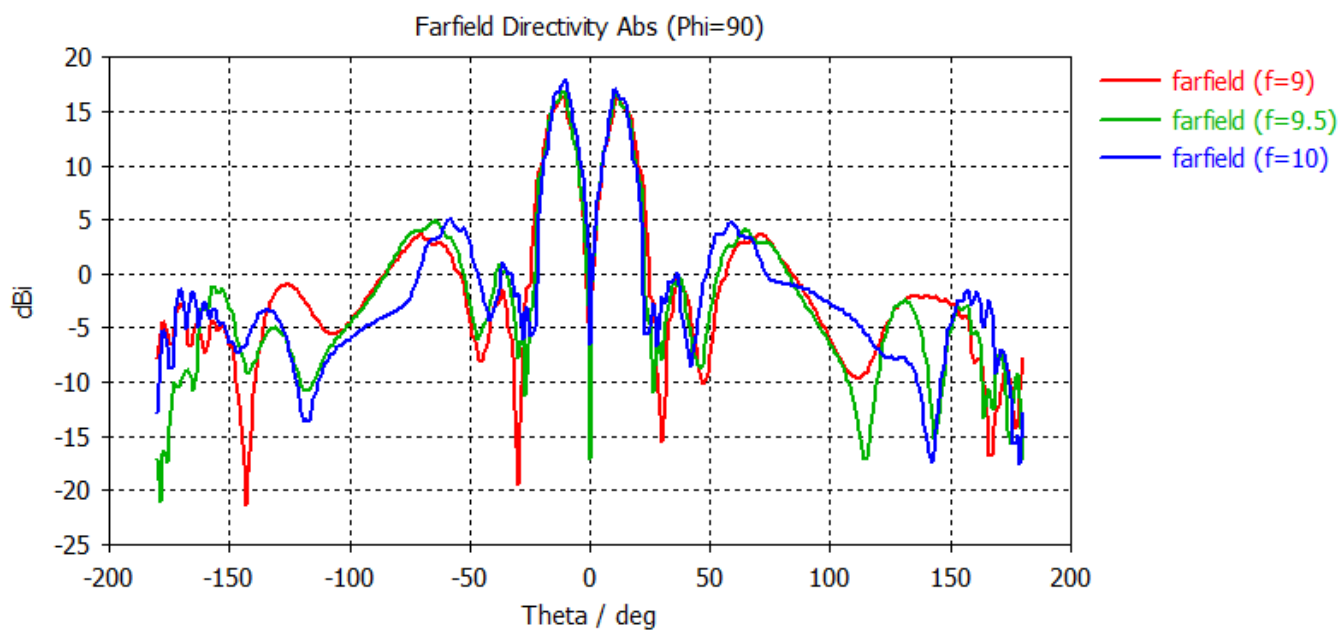


Рисунок 9 – Сечение ДН в плоскости $\Phi = 90$

По представленным графикам видно, что в дальней зоне ДН проявляет разностный характер с глубоким провалом по оси нормали к апертуре антенны, что соотносится с характером поведения ОУМ волн и результатами, получаемые для ОУМ антенн других типов [13-21].

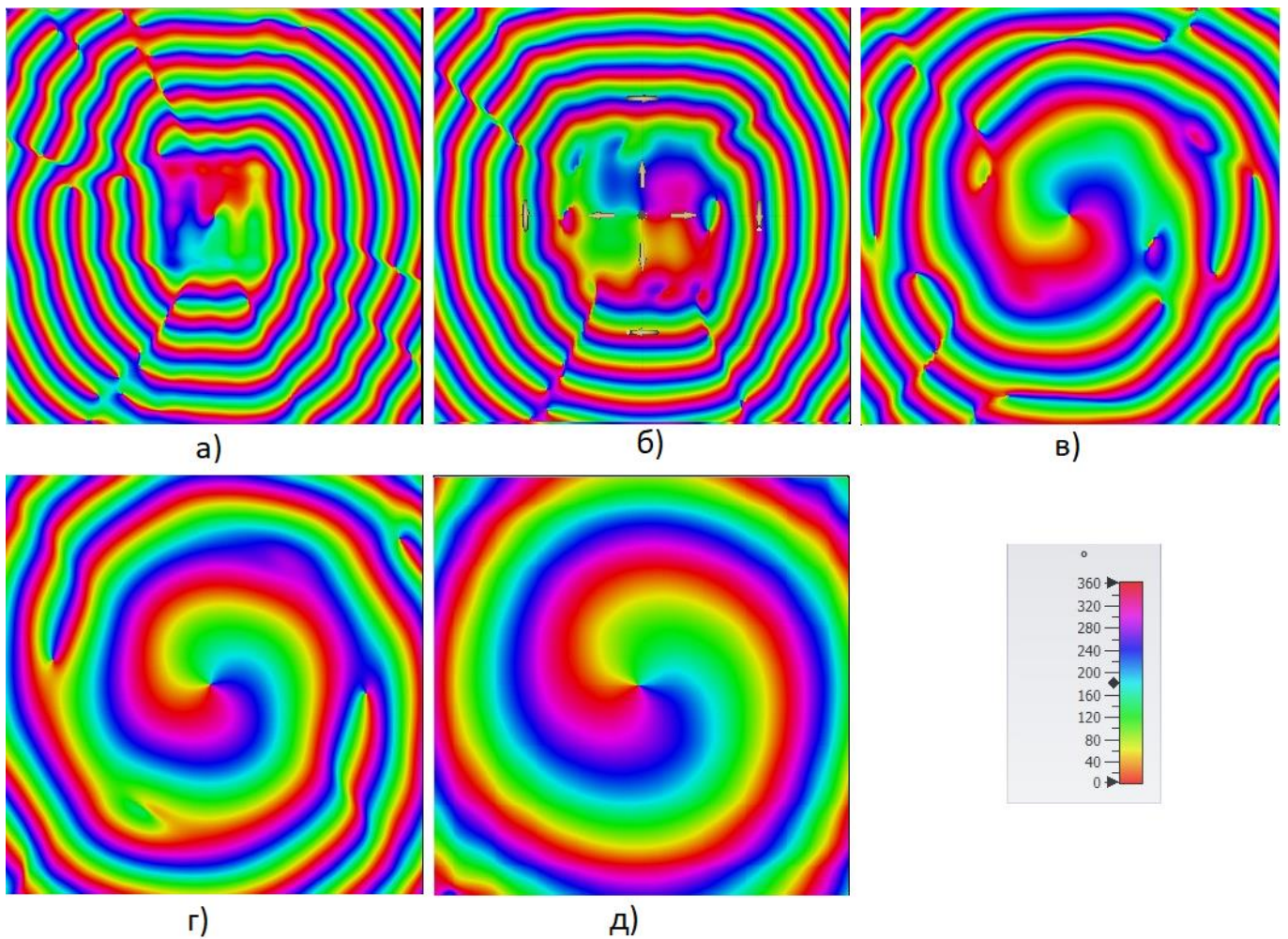


Рисунок 10 – Фаза вектора E (а – 10 мм, б – 50 мм, в – 100 мм, г – 250 мм и д – 500 мм)

Как видно из представленных графиков – спиралевидное изменение фазы вектора E вокруг оси распространения волны начинается от антенны и при движении от антенны сохраняет форму с точностью до масштабирования.

На основании представленных данных моделирования можно сделать вывод о работоспособности разработанной антенны в части формирования ОУМ волн. Однако, из-за ограничений по моделируемому объему пространства, по представленным моделям затруднительно оценить предельную дальность, на которой ОУМ волны будут обладать достаточной чистотой. Чистота ОУМ волн зависит от качества формы фазового фронта и количественно определяет коэффициент

взаимного записания между различными модами (ортогональность). Данная оценка будет проведена в ходе экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования

Для подтверждения результатов моделирования и определения зависимости чистоты мод от дальности были изготовлены 3 комплекта антенн (по 2 шт. для $l=0, +1, -1$). Внешний вид антенн представлен на рисунке 11.

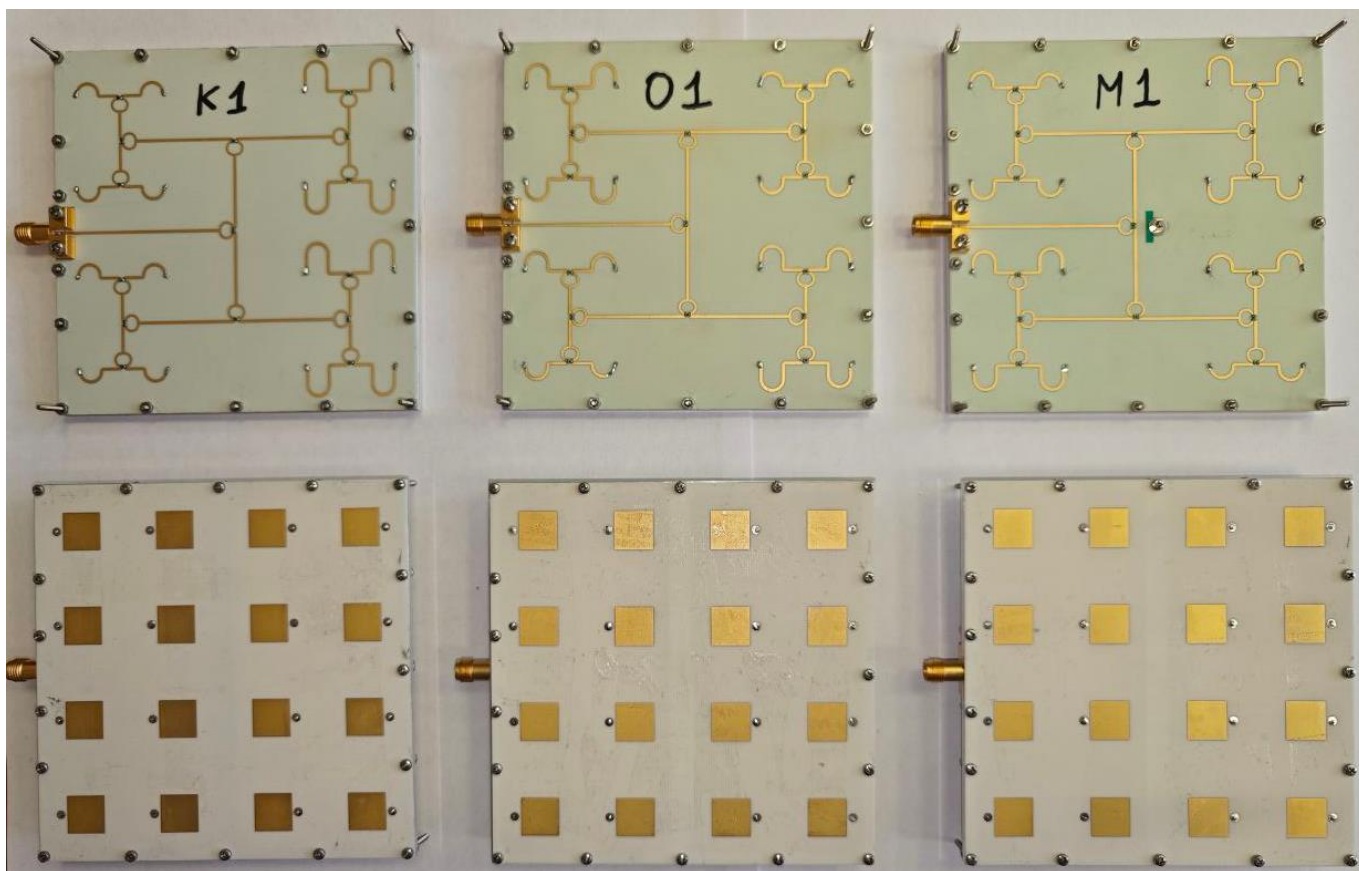


Рисунок 11 – Изготовленные ОУМ антенны

Для измерений ДН в дальней зоне была собрана измерительная установка в безэховой камере (Рисунок 12), расстояние между антенными постами – 8 метров.

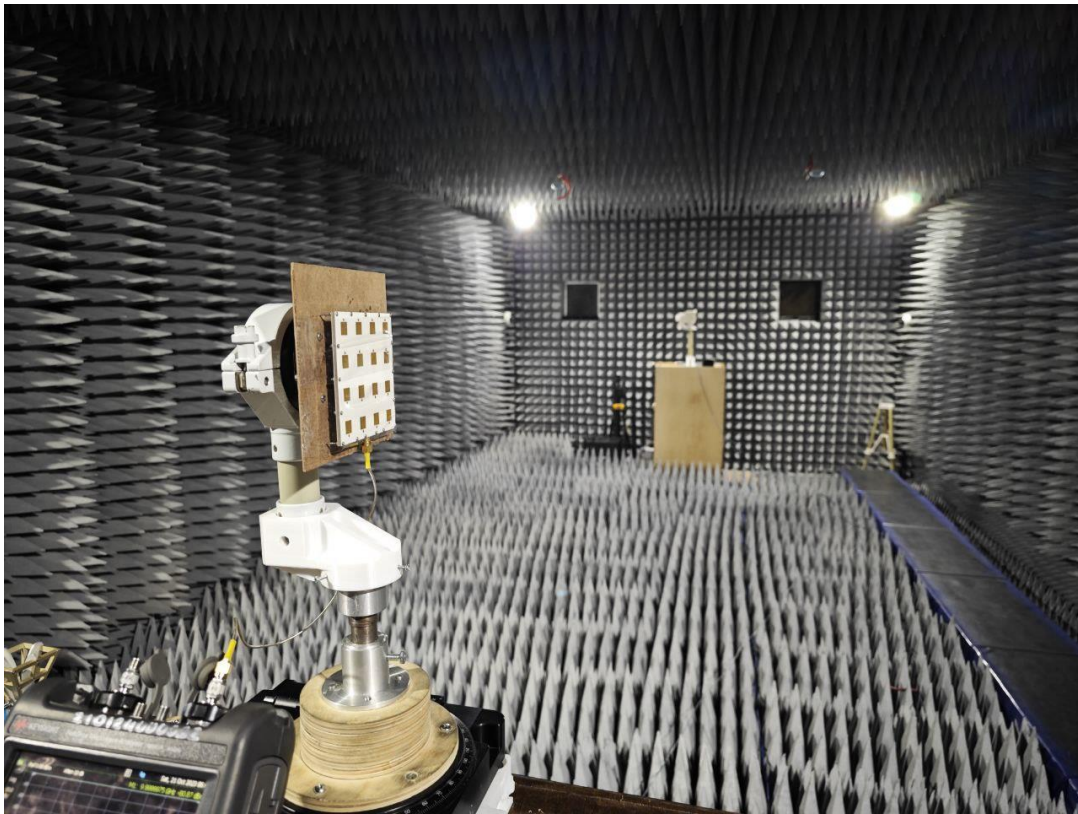


Рисунок 12 – Установка измерения ДН

Для различных комбинаций антенн и плоскостей сечения были проведены измерения ДН при фиксированных значениях выходной мощности генератора для 3 частот: 9, 9,5 и 10 ГГц. Наиболее показательными являются данных для 3 случаев: классические антенны ($l=0$) на обоих антенных постах (графики с обозначением «(1)»), обе антенны ОУМ с одинаковым индексом моды $l=1$ (2) и антенны ОУМ с различными модами ($l=1$ и $l=-1$) (3). Результаты измерения представлены на Рисунке 13.

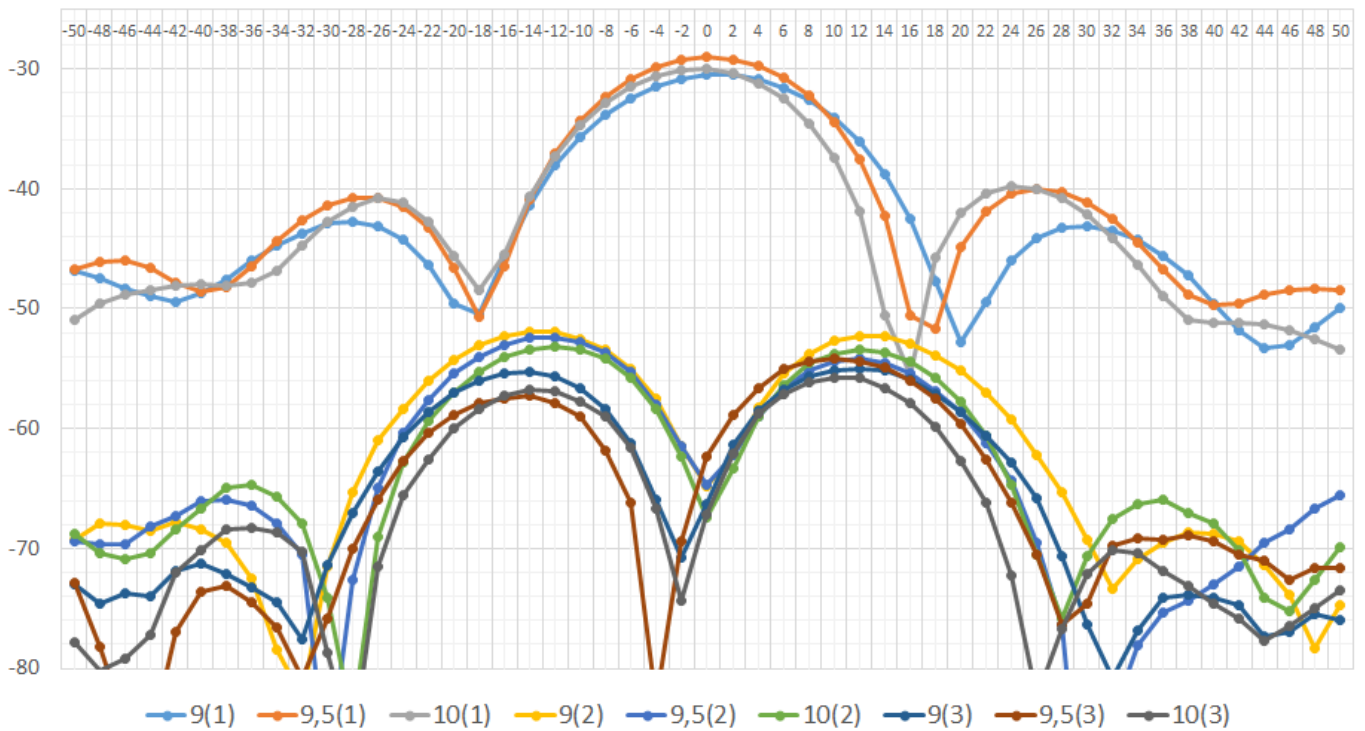


Рисунок 13 – Измеренные ДН для разных комбинаций антенн

По представленным данным видно, можно сделать 2 вывода:

- 1) Коэффициент передачи между ОУМ антеннами по оси нормали на 30 дБ менее, чем при использовании классических антенн той же площади и конфигурации.
- 2) Разница в коэффициенте передачи между случаем с одинаковыми модами и различными модами составляет менее 4 дБ для сектора сравнения от -30 до +30 градусов, что говорит о недостаточной чистоте мод для данных антенн на расстояние 8 метров.

Для определения зависимости чистоты мод от дальности была собрана установка (Рисунок 14), включающая в себя 2 крепления под антенны, установленные на деревянный брус с возможностью продольного перемещения одной из них. Обе антенны при этом подключены к векторному анализатору цепей.

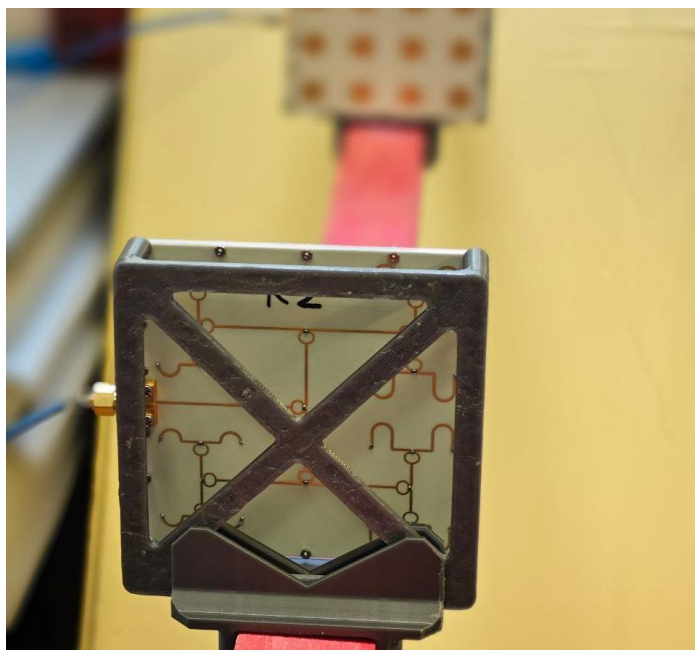


Рисунок 14 – Установка для измерения чистоты мод в зависимости от дальности

Аналогично предыдущим измерениям, сравнивались 4 комбинации антенн: одинаковые классические антенны ($l=0$), ОУМ антенны с совпадающими модами ($l=1$ и $l=-1$ соответственно) и ОУМ антенны с различными модами ($l=1$ с $l=-1$). Полученные результаты зависимости коэффициента передачи от дальности (в см.) показаны на рисунке 15.

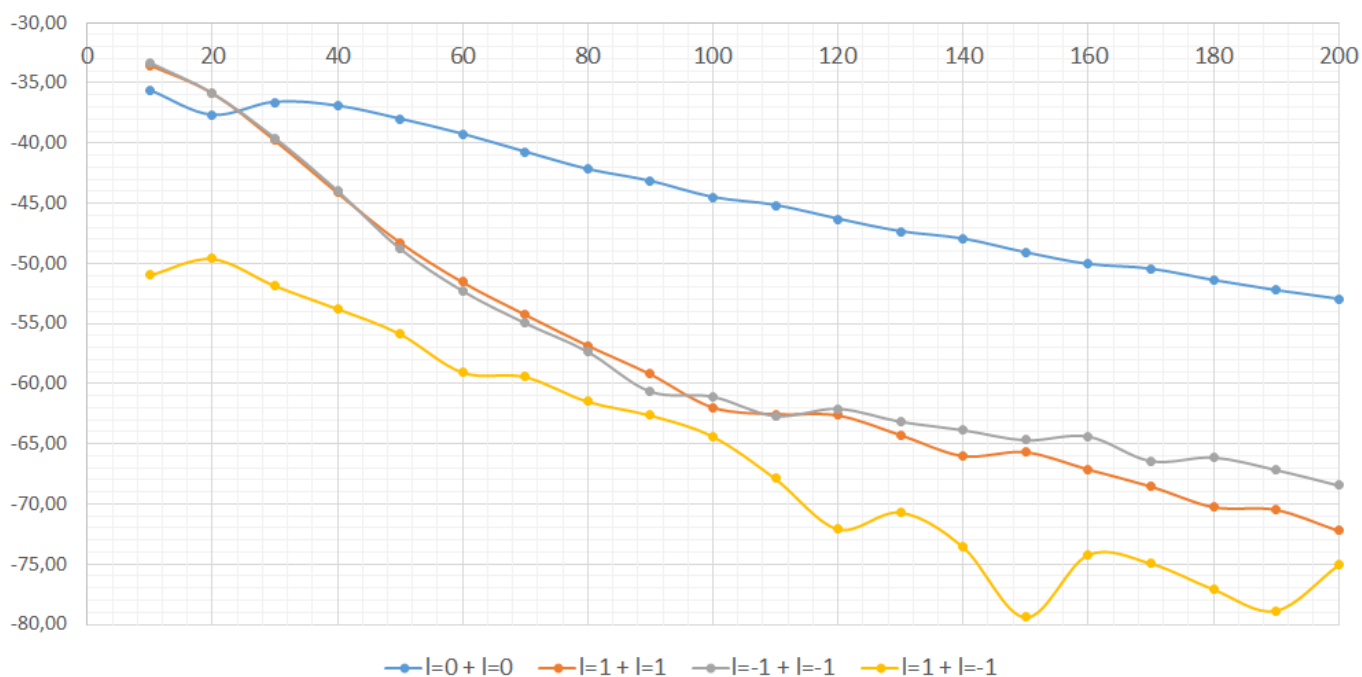


Рисунок 15 – Измеренные чистоты мод в зависимости от дальности

По представленным данным видно, что на расстоянии 20 см наблюдается коэффициент записания между различными модами 14 дБ (разница между случаями с одинаковыми модами и случаем с различными модами), что достаточно, для однозначного разделения сигналов. Однако, при увеличении расстояния до 1 метра данный коэффициент падает до 3-4 дБ, что уже свидетельствует о существенном ухудшении чистоты мод на данном расстоянии.

Заключение

В данной работе показаны все этапы создания ОУМ антенн на базе ЭКАР: от расчета фаз и электродинамического моделирования до экспериментальных подтверждений возможности формирования ОУМ волн при помощи эквидистантной квадратной антенной решетки.

Измерения диаграмм направленности изготовленных антенн подтвердили описанный ранее недостаток ОУМ антенн в части существенного уменьшения интенсивности распространения волн по нормали от апертуры антенны, для предложенной структуры ОУМ антенн интенсивность упала на 30 дБ по сравнению с аналогичными антеннами с сферическим фазовым фронтом ($l=0$).

Представленные антенны обладают коэффициентом развязки между различными модами 14 дБ на расстоянии 20 см, что подтверждает факт возможности разделения одинаковых сигналов за счет использования различных ОУМ мод, однако, актуальной является задача увеличения расстояния работы при сохранении чистоты мод, а также общее увеличение чистоты формируемых мод для достижения лучших показателей коэффициента развязки.

Список источников

1. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Крупноапертурный излучатель для многолучевой антенны спутниковой связи // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=29552>
2. Кузнецов В.С., Шевченко И.В., Волков А.С., Солодков А.В. Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=85813>
3. Волков А.С., Солодков А.В., Сулова К.О., Стрельников А.П. Прототипирование помехоустойчивых кодов в системах связи с кодовым разделением каналов // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=159789>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-11)
4. Корчемкин Ю.Б., Кочетков О.С. Поляризатор для систем спутниковой связи с поляризационным уплотнением // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=35841>
5. Буренко Е.А. Обоснование эффективности использования сигналов с ортогональным частотным разделением каналов в авиационных радиосистемах передачи информации // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)
6. Булыгин М.Л. Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических РСА на базе АФАР // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=93428>
7. Генов А.А., Осипов В.В., Савилкин С.Б. Принципы реализации сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным

- разделением ресурса на основе многолучевых АФАР X-диапазона // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=69734>
8. Cheng W., Zhang W., Jing H., Gao S., Zhang H. Orbital Angular Momentum for Wireless Communications // IEEE Wireless Communications, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 100-107. DOI: [10.1109/MWC.2017.1700370](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700370)
 9. Zhou C., Liao X., Wang Y., Liao S., Zhou J., Zhang J. Capacity and Security Analysis of Multi-Mode Orbital Angular Momentum Communications // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 150955-150963. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3010957](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010957)
 10. Zhang K., Wang Y., Yuan Y., Burokur S.N. A Review of Orbital Angular Momentum Vortex Beams Generation: From Traditional Methods to Metasurfaces // Applied Sciences, 2020, vol. 10, pp. 1015. DOI: [10.3390/app10031015](https://doi.org/10.3390/app10031015)
 11. Noor S.K. et al. A Review of Orbital Angular Momentum Vortex Waves for the Next Generation Wireless Communications // IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 89465-89484. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3197653](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3197653)
 12. Zhang H., Cao Z., Xie H., Jin H. Orbital Angular Momentum (OAM) in Wireless Communication: Applications and Challenges Towards 6G // 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2023, pp. 842-847. DOI: [10.1109/ICTC58733.2023.10393327](https://doi.org/10.1109/ICTC58733.2023.10393327)
 13. Алтынников А.Г., Платонов Р.А., Тумаркин А.В., Медведева В.В. Сегнетоэлектрическая фазовая пластина для формирования волн с ненулевым орбитальным угловым моментом миллиметрового диапазона длин волн // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1. С. 479-483.

14. Mahmoudi F.E., Walker S.D. 4-Gbps Uncompressed Video Transmission over a 60-GHz Orbital Angular Momentum Wireless Channel // IEEE Wireless Communications Letters, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 223-226. DOI: [10.1109/WCL.2013.012513.120686](https://doi.org/10.1109/WCL.2013.012513.120686)
15. Allen B., Pelham T., Wu Y., Drysdale T. et al. Experimental evaluation of 3D printed spiral phase plates for enabling an orbital angular momentum multiplexed radio system // Royal Society Open Science, 2019, vol. 6(12), pp. 191419. DOI: [10.1098/rsos.191419](https://doi.org/10.1098/rsos.191419)
16. Liu B., Cui Y., Li R. A Broadband Dual-Polarized Dual-OAM-Mode Antenna Array for OAM Communication // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, vol. 16, pp. 744-747. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2601615](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2601615)
17. Kang L., Li H., Zhou J., Zheng S., Gao S. A Mode-Reconfigurable Orbital Angular Momentum Antenna With Simplified Feeding Scheme // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, vol. 67, no. 7, pp. 4866-4871. DOI: [10.1109/TAP.2019.2916595](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2916595)
18. Fang L., Yao H., Henderson R.M. OAM antenna arrays at E-band // IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 658-661. DOI: [10.1109/MWSYM.2017.8058655](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058655)
19. Byun W., Kim K., Kim B. et al. Multiplexed Cassegrain Reflector Antenna for Simultaneous Generation of Three Orbital Angular Momentum (OAM) Modes // Scientific Reports, 2016, vol. 6, pp. 27339. DOI: [10.1038/srep27339](https://doi.org/10.1038/srep27339)
20. Zhang W. et al. Four-OAM-Mode Antenna With Traveling-Wave Ring-Slot Structure // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, vol. 16, pp. 194-197. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2569540](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2569540)

21. Qin F., J Yi., Cheng W., Liu Y., Zhang H., Gao S. A high-gain shared-aperture dual-band OAM antenna with parabolic reflector // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, UK, 2018, pp. 1-4. DOI: [10.1049/cp.2018.0685](https://doi.org/10.1049/cp.2018.0685)
22. Kuzmin I.A., Prihodko D.V., Efremov I.V., Oreshkin V.I., Maksimovskaya A.I. Multiple Bands Dual Polarization Antenna System for Ground Surface State Estimation // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 2014-2017. DOI: [10.1109/EIconRus.2019.8657274](https://doi.org/10.1109/EIconRus.2019.8657274)

References

1. Ponomarev L.I., Vechtomov V.A., Miloserdov A.S. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=29552>
2. Kuznetsov V.S., Shevchenko I.V., Volkov A.S., Solodkov A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=85813>
3. Volkov A.S., Solodkov A.V., Suslova K.O., Strel'nikov A.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=159789>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-11)
4. Korchemkin Yu.B., Kochetkov O.S. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=35841>
5. Burenko E.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)
6. Bulygin M.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=93428>

7. Genov A.A., Osipov V.V., Savilkin S.B. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=69734>
8. Cheng W., Zhang W., Jing H., Gao S., Zhang H. Orbital Angular Momentum for Wireless Communications, *IEEE Wireless Communications*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 100-107. DOI: [10.1109/MWC.2017.1700370](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700370)
9. Zhou C., Liao X., Wang Y., Liao S., Zhou J., Zhang J. Capacity and Security Analysis of Multi-Mode Orbital Angular Momentum Communications, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 150955-150963. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3010957](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010957)
10. Zhang K., Wang Y., Yuan Y., Burokur S.N. A Review of Orbital Angular Momentum Vortex Beams Generation: From Traditional Methods to Metasurfaces, *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, pp. 1015. DOI: [10.3390/app10031015](https://doi.org/10.3390/app10031015)
11. Noor S.K. et al. A Review of Orbital Angular Momentum Vortex Waves for the Next Generation Wireless Communications, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 89465-89484. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3197653](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3197653)
12. Zhang H., Cao Z., Xie H., Jin H. Orbital Angular Momentum (OAM) in Wireless Communication: Applications and Challenges Towards 6G, *14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju Island, Korea, Republic of, 2023, pp. 842-847. DOI: [10.1109/ICTC58733.2023.10393327](https://doi.org/10.1109/ICTC58733.2023.10393327)
13. Altyunnikov A.G., Platonov R.A., Tumarkin A.V., Medvedeva V.V. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2019, vol. 1, pp. 479-483.
14. Mahmoudi F.E., Walker S.D. 4-Gbps Uncompressed Video Transmission over a 60-GHz Orbital Angular Momentum Wireless Channel, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 223-226. DOI: [10.1109/WCL.2013.012513.120686](https://doi.org/10.1109/WCL.2013.012513.120686)

15. Allen B., Pelham T., Wu Y., Drysdale T. et al. Experimental evaluation of 3D printed spiral phase plates for enabling an orbital angular momentum multiplexed radio system, *Royal Society Open Science*, 2019, vol. 6(12), pp. 191419. DOI: [10.1098/rsos.191419](https://doi.org/10.1098/rsos.191419)
16. Liu B., Cui Y., Li R. A Broadband Dual-Polarized Dual-OAM-Mode Antenna Array for OAM Communication, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 744-747. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2601615](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2601615)
17. Kang L., Li H., Zhou J., Zheng S., Gao S. A Mode-Reconfigurable Orbital Angular Momentum Antenna With Simplified Feeding Scheme, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no. 7, pp. 4866-4871. DOI: [10.1109/TAP.2019.2916595](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2916595)
18. Fang L., Yao H., Henderson R.M. OAM antenna arrays at E-band, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 658-661. DOI: [10.1109/MWSYM.2017.8058655](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058655)
19. Byun W., Kim K., Kim B. et al. Multiplexed Cassegrain Reflector Antenna for Simultaneous Generation of Three Orbital Angular Momentum (OAM) Modes, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 27339. DOI: [10.1038/srep27339](https://doi.org/10.1038/srep27339)
20. Zhang W. et al. Four-OAM-Mode Antenna With Traveling-Wave Ring-Slot Structure, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 194-197. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2569540](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2569540)
21. Qin F., J Yi., Cheng W., Liu Y., Zhang H., Gao S. A high-gain shared-aperture dual-band OAM antenna with parabolic reflector, *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, London, UK, 2018, pp. 1-4. DOI: [10.1049/cp.2018.0685](https://doi.org/10.1049/cp.2018.0685)
22. Kuzmin I.A., Prihodko D.V., Efremov I.V., Oreshkin V.I., Maksimovskaya A.I. Multiple Bands Dual Polarization Antenna System for Ground Surface State Estimation,

2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 2014-2017. DOI: [10.1109/EIConRus.2019.8657274](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657274)

Статья поступила в редакцию 05.02.2024

Одобрена после рецензирования 08.02.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 05.02.2024; approved after reviewing on 08.02.2024; accepted for publication on 26.04.2024