

# Определение состояния орбитального углового момента пучка радиоволны на основе количественных характеристик радиотехнической системы

Э.Г. Ануфриев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 050000, Казахстан, г. Алматы, ул. Тулебаева, д. 123

## Аннотация

На данный момент в связи с дефицитом радиочастотного спектра возникает необходимость в развитии технологий, позволяющих использовать этот спектр эффективнее. Одна из таких технологий предполагает применение радиоволн с орбитальным угловым моментом. В данной работе предложен новый количественный метод определения числа одиночных состояний пучка несущего орбитального углового момента, основанный на анализе S21 параметра системы. Это позволяет приемному устройству быть настроенным на прием лучей с определенным состоянием орбитального углового момента. Радиоволны, несущие орбитальный угловой момент, имеют частоту 80 ГГц. В качестве передающей антенны был применен пирамидальный рупор, радиоволну от которого закручивала спиральная фазовая пластина. Приемные антенны, расположенные в матрице, представляли из себя диполи. Исследованы ограничения данного метода. Работа представляет собой эксперимент на компьютерной модели.

**Ключевые слова:** орбитальный угловой момент, завихренность, распространение радиоволн.

**Цитирование:** Ануфриев, Э.Г. Определение состояния орбитального углового момента пучка радиоволны на основе количественных характеристик радиотехнической системы / Э.Г. Ануфриев // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 22-29. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-907.

**Citation:** Anufriyev EG. Determination of the orbital angular momentum state of a radio wave beam based on quantitative characteristics of a radio communication system. Computer Optics 2022; 46(1): 22-29. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-907.

## Введение

Электромагнитная волна имеет две формы углового момента: спиновый угловой момент (СУМ), связанный с поляризацией, и орбитальный угловой момент (ОУМ), возникающий из спирального фазового фронта вокруг пучка. В результате спиральных фазовых фронтов и возникающей результирующей сингулярности в центре, электромагнитную волну часто называют «скрученной» или «вихревой». В работе [1] представлены описание ОУМ, генерация/детектирование, мультиплексирование/демультиплексирование, потенциальные области применения – радиосвязь, оптическая связь в свободном пространстве, волоконно-оптическая связь.

В последнее время внимание научного сообщества привлекли пучки, несущие ОУМ, в связи с перспективой их использования для значительной экономии радиочастотного спектра. Волны с различными состояниями ОУМ взаимно ортогональны [1], поэтому теоретически для передачи информации может существовать неограниченное количество наложенных пучков на одной частоте.

Возникает необходимость определения  $\ell$ -номера состояния пучка с ОУМ. В следующих работах приведены методы, позволяющие это сделать.

В работе [2] для разделения двух ортогональных ОУМ-каналов последние были частотно модулирова-

ны звуковыми сигналами постоянного уровня. В обычной установке приемника с одной антенной два радиосигнала были слышны одновременно. Однако если были задействованы две антенны, причем одна механически перемещалась относительно другой для выбора одного из ортогональных пучков ОУМ, то один сигнал попеременно подавлялся другим сигналом из-за различной пространственной фазовой подписи. Пространственная фазовая подпись – это характерное расположение в пространстве фазы радиоволны, указывающее на номер состояния пучка с ОУМ. Этот метод имеет ряд недостатков. Во-первых, необходимо механически перемещать антенны. Во-вторых, с помощью этого метода невозможно определить знак орбитального состояния. В-третьих, невозможно определить пучки с ОУМ с большим числом  $\ell$ .

В статье [3] для радиочастотного спектра (28 ГГц) представлен метод, основанный на графическом анализе объединения пучков ОУМ с Гауссовым пучком. В статьях [4], [5] данный метод применен для оптического спектра. Вывод о числе  $\ell$  пучка производится на основании умозрительного заключения о количестве плеч и направлении их скручивания.

В работе [6] в оптическом диапазоне используется алгоритм распознавания образов (искусственная нейронная сеть) для идентификации характерных модовых структур, отображаемых на экране приемника.

Авторы статьи смогли различить 16 различных суперпозиций режимов ОУМ и использовать их для кодирования и передачи небольших изображений в оттенках серого. Для определения  $\ell$ , как и в работах [3, 4, 5], используется анализ суперпозиции полей. Недостатком данного метода является то, что он не может быть полностью применен к радиоволнам, а также применение технологии нейронных сетей увеличивает время обработки сигналов.

В статье [7] для радиочастотного спектра, в статье [8] для оптического спектра предложен метод измерения ОУМ-спектра сверхширокополосных радио и оптических вихревых импульсов по вилкообразным интерферограммам между вихревыми импульсами и опорным плоским волновым импульсом. Этот метод экспериментально продемонстрирован получением спектров ОУМ для различных спектральных составляющих вихревых импульсов, что позволяет охарактеризовать частотную дисперсию топологического заряда спектра ОУМ простой экспериментальной установкой. В этих статьях также используется интерферограмма одного из состояний  $\ell$  с Гауссовым волновым фронтом.

Количественные измерения ОУМ с одной стационарной линзой [9] и с кольцевыми решетками [10] производятся в оптическом диапазоне. Оба этих метода имеют те же режимы интенсивности в фокусе, что и характерные следы для обнаружения ОУМ. Измеренные дифракционные картины вихревых пучков не оцифровываются. Эти методы требуют введения дополнительных элементов – линзовых или кольцевых решеток. Требуется точная калибровка расстояния между камерой и линзой / кольцевыми решетками. Объектив может также пострадать от вызванного

абберацией ухудшения производительности для обнаружения ОУМ. Описанная здесь экспериментальная установка подходит для работы с лазером. Радиоволна не может пройти через отверстие в экспериментальной установке.

Целью данной статьи является создание однозначного, точного, надежного и простого метода, позволяющего определять состояние  $\ell$  ОУМ пучков по количественным характеристикам. Распознается  $\ell$  единичных пучков по уровню распределения S21 параметров приемных антенн, расположенных в матрице  $13 \times 13$  (всего 169). Для генерации вихрей с ОУМ используются пирамидальная рупорная антенна и спиральная фазовая пластина (СФП), как в работе [11]. Предполагается, что этот метод будет применен к радиосистеме ММО (множественный вход и множественный выход), где необходимо распознавать пучки с различными состояниями  $\ell$ . Приемник пучка с ОУМ должен определить  $\ell$  принятых радиоволн и выбрать необходимый пучок.

### 1. Моделирование режима ОУМ

Пирамидальная рупорная антенна, возбуждаемая Гауссовым импульсом на частоте  $f_{min} = 70$  ГГц  $f_{max} = 90$  ГГц, имеет размеры, показанные на рис. 1, и изготовлена из чистой меди. СФП, которая изменяет гауссовский волновой фронт, закручивая его в вихрь, изготовлена из тефлона и рассчитана по методу, представленному в [12], чтобы генерировать вихри для десяти вариантов:  $\ell = -5, -4, -3, -2, -1, +1, +2, +3, +4, +5$  для частоты 80 ГГц. Высота шага СФП составляет 8,35 мм для  $\ell = -1, +1$ , как показано на рис. 1; 16,7 мм для  $\ell = -2, +2$ ; 25,05 мм для  $\ell = -3, +3$  и т.д. СФП не используется для  $\ell = 0$ .

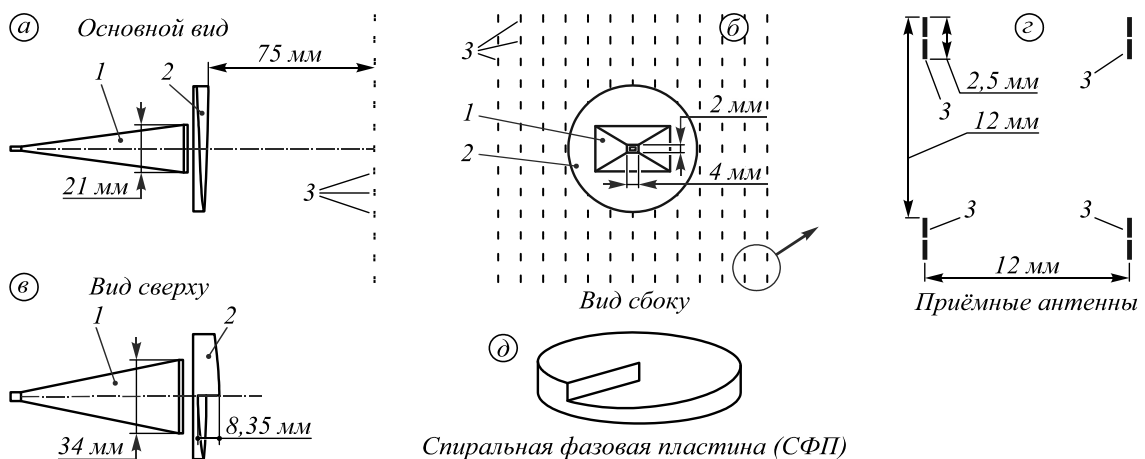


Рис. 1. Моделирование S21 параметров, где 1 – рупорная передающая антенна, 2 – спиральная фазовая пластина, 3 – приёмные антенны в количестве 169

В качестве приемных антенн используются симметричные вибраторы, размеры которых и их относительное положение показаны на рис. 1з. Приемные антенны выполнены из идеально проводящего материала, чтобы сократить время расчета. Матрица  $13 \times 13$  от приемных антенн расположена на расстоя-

нии 20 длин волн, что составляет 75 мм, от СФП, когда она присутствует, или от передающего рупора, когда  $\ell = 0$ . Расстояние выбирается от вершины СФП, а не от ее плоского основания. Каждая антенна находится в середине ячейки этой матрицы. Расстояние между каждой антенной и соседней составляет 12 мм

по вертикали и горизонтали. Таким образом, вся площадь  $24\,336\text{ мм}^2$  делится на 169 ячеек. Одна ячейка этой площади занимает  $12 \times 12 = 144\text{ мм}^2$ .

Было проведено одиннадцать численных экспериментов с  $\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$ , где для каждой из приемных антенн были рассчитаны параметры S21 на частоте 80 ГГц. Таким образом, были получены одиннадцать матриц  $13 \times 13$ , ячейки которых содержали S21 параметры антенн.

S21 в данном случае – это коэффициент передачи, характеризующийся отношением мощности сигнала,

снятого с приемного диполя, к мощности, подводимой к рупорной антенне.

## 2. Результаты. Визуализация пучков с различными состояниями ОУМ

В этом случае системный параметр S21 является распределенным параметром, сформированным из S-параметров 169 приемных антенн. Для визуализации полученных результатов они были интерполированы кубическими сплайнами, как показано на рис. 2, 3, 4.

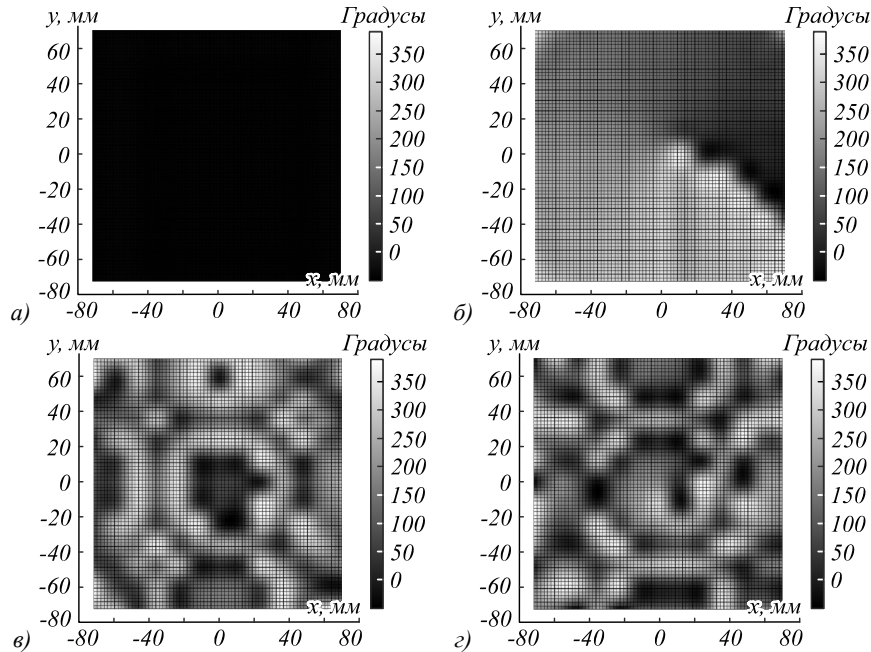


Рис. 2. Распределение фаз: без СФП (а, в), с СФП  $\ell = -1$  (б, з), плоская волна (а, б), рупорная антенна генерирует волну (в, з). На оси x и на оси y находятся расстояния, которые измеряются в миллиметрах

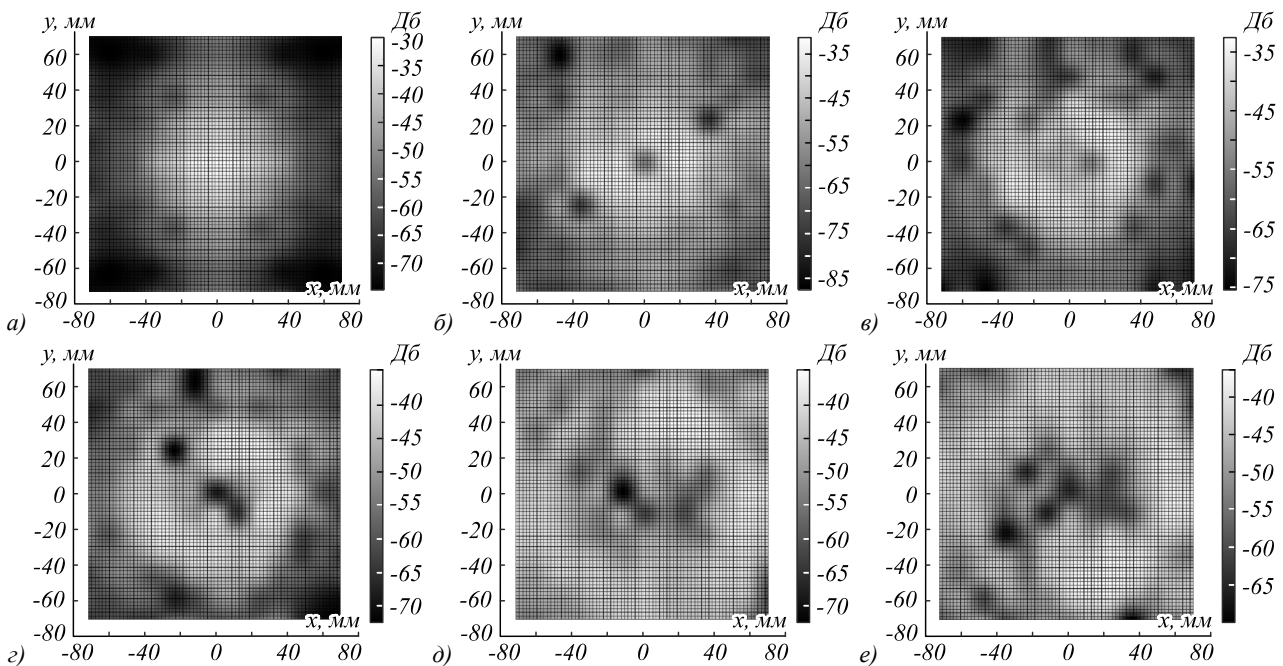


Рис. 3. Амплитуда S21 определяется параметрами приёмных антенн:  $\ell = 0$  (а),  $\ell = +1$  (б),  $\ell = +2$  (в),  $\ell = +3$  (г),  $\ell = +4$  (д),  $\ell = -4$  (е). Волна генерируется рупорной антенной без СФП 3а. Волна генерируется рупорной антенной и проходит через СФП для различных  $\ell$

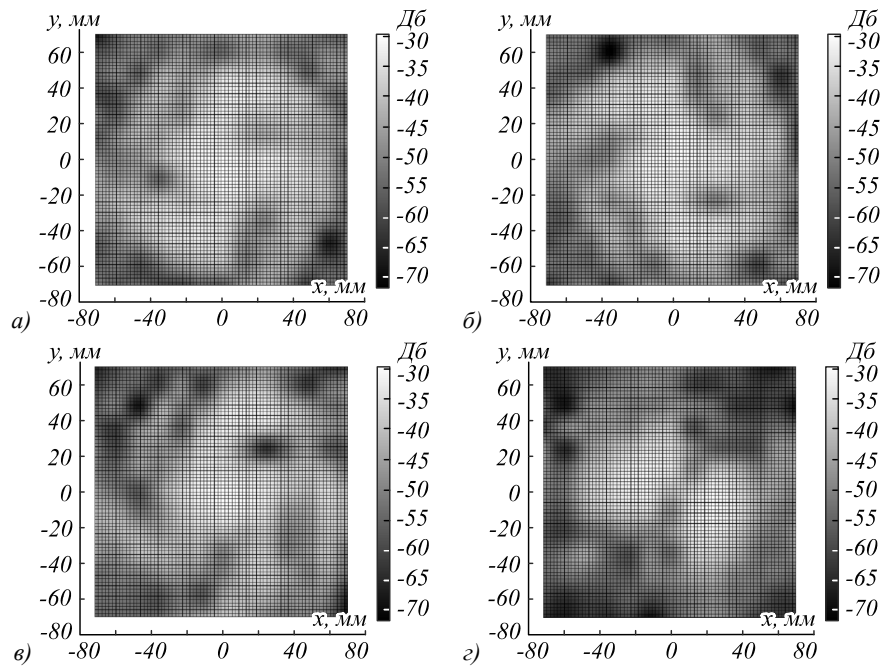


Рис. 4. Интерферограммы Гауссова пучка и ОУМ-пучков: Гауссова пучка и пучка с  $\ell = +3$  (а), Гауссова пучка и пучка с  $\ell = -3$  (б), Гауссова пучка и пучка с  $\ell = +4$  (в), пучка с  $\ell = +1$  и пучка с  $\ell = -1$  (г)

Существует два способа определения числа состояний  $\ell$ . Его можно найти по амплитуде или по фазе пучка ОУМ. Метод, использующий фазовое распределение, четко показывает номера состояний  $\ell$  в определенном случае.

СФП закручивает радиоволну в вихрь в соответствии с [12]. Доказано, что пирамидальная рупорная антенна (такой же тип рупорной антенны используется в нашей статье) совместно с СФП генерирует радиоволну с ОУМ путем изменения фазы в плоскости, перпендикулярной оси распространения [13].

Решение уравнений Максвелла численным методом позволяет определять амплитуду и фазу параметров сигнала S21 на приемных антеннах. Каждая антенна принимает сигнал, характеризующийся параметром S21 по амплитуде и фазе. Интерполяция используется, чтобы представить картину распределения фаз или амплитуд в плоскости, перпендикулярной распространению пучка.

На рис. 2а–г показано распределение фаз на приемных антеннах в плоскости, перпендикулярной оси распространения. Фазы сигнала плоской радиоволны, находящейся в точках на плоскости, перпендикулярной оси распространения, имеют одинаковую величину, что показано на рис. 2а. Если плоская волна проходит через СФП, то по фазовому распределению можно сделать вывод о номере состояний  $\ell$ . На рис. 2б фаза закручивается против часовой стрелки с центром сингулярности, что является характерным рисунком для  $\ell = -1$ , представленным в [1]. Фаза волны, которая излучалась от рупорной антенны, показана на рис. 2в.

Фронт волны заметно отличается от фронта плоской волны, поэтому определить номера состояний  $\ell$

по фазовому распределению волны, генерируемой рупорной антенной и прошедшей через СФП (рис. 2г), не представляется возможным. Фаза начинает вращаться по спирали из точки с координатами (0, 0) против часовой стрелки.

В данной статье оцениваются амплитуды S21 параметров сигнала для определения  $\ell$  ОУМ.

Качественно определить номера состояний  $\ell$  из рис. 3а–е невозможно, т. к. светлая область, которая является максимальной, занимает значительную площадь, а на рис. 3б есть две светлые области. Можно лишь констатировать, что светлая область расширяется и удаляется от центра с увеличением номинала  $\ell$ .

Число  $\ell$  можно определить по числу вращающихся плеч в их интерферограммах (рис. 4), как это было доказано в работе [3]. Представленные на рис. 4 интерферограммы получены в результате сложения Гауссова пучка и пучка с ОУМ при помощи сплиттера, как показано в работе [3]. Гауссов пучок распространяется посредством одной рупорной антенны, которая возбуждается соответствующим сигналом. Пучок с ОУМ получается в результате возбуждения другой рупорной антенны и прохождения радиоволны через СФП. Интерферограммы с положительным  $\ell$  и отрицательным  $\ell$  вращаются в разных направлениях. На рис. 4а, 4б изображены 3 больших плеча и одно меньшее. На основе больших плеч оценивается число  $\ell$ . Интерферограмма на рис. 4в состоит из 4 больших плеч и 1 меньшего плеча. Рис. 4г показывает интерферограмму с  $\ell = +1$  и  $\ell = -1$ . Следует обратить внимание, что эти плечи вращаются в пространстве и зависят от расстояния до передатчиков и начальной фазы сигнала.

В предложенном в этой статье методе используется матрицы для анализа табличных данных.

Прецизионная точность определения максимума пучка составляет  $\pm 6$  мм. То есть если максимум находится на расстоянии  $\pm 6$  мм от антенны, то программа присваивает этой ячейке значение «1», а остальным 168 ячейкам присваивает «0». Из расположения этого блока выводится значение  $\ell$ .

При  $\ell=0$  рис. 3а соответствует матрице 1 из табл. 1. Максимум S21, отмеченный белым цветом, находится в центре рис. 3а и занимает значительную площадь – около 400 мм<sup>2</sup>. Программа делит эту область и определяет ячейку (7, 7) как ячейку с максимальным значением амплитуды S21 (матрица 1 в табл. 1).

Из табл. 1 видно, что при положительном значении  $\ell$  максимум имеет тенденцию смещаться в верхнюю правую четверть матрицы, а при отрицательном значении  $\ell$  максимум имеет тенденцию смещаться в нижнюю правую четверть матрицы в нашем случае. Если  $\ell=-1$ , то максимум сдвигает одну ячейку вправо и одну ячейку вниз, занимая 8-ю строку и 8-й столбец в матрице №2. Если  $\ell=+1$ , то максимум сдвигает одну ячейку вправо и одну ячейку вверх, занимая 6-ю строку и 8-й столбец матрицы №7. При  $\ell=-5$  максимум S21 параметров занимает 12-ю строку и 8-ю колонку. Для каждого  $\ell$  максимум занимает определенную позицию, характеризующуюся номером строки и столбца.

Для данного конкретного случая можно сократить число датчиков с  $13 \times 13$  до  $13 \times 7$ , так как в левой половине матриц табл. 1 максимумы отсутствуют.

Используется формула (10) из литературы [14], которая следует под номером (1) в этой статье, чтобы определить соответствие экспериментальных результатов теории. Расстояние оценивается между центральной антенной и антенной, имеющей максимальный S21 параметр.

$$s(z) = \omega(z) \sqrt{\frac{N+1}{2} + |\ell_{\min}|} \approx \frac{2z}{k\omega_0} \sqrt{\frac{N+2|\ell_{\min}|+1}{2}}, \quad (1)$$

где  $k$  – это волновое число;

$$N = |\ell_{\max}| - |\ell_{\min}| + 1,$$

$N$  – количество мод, от  $\ell_{\min}$  до  $\ell_{\max}$  все с одним и тем же знаком;

$\omega_0$  – радиус сужения пучка;

$Z$  – это расстояние от СФ до приемных антенн.

Если имеется только один пучок  $\ell_{\min} = \ell_{\max} = 1$ , тогда выражение под корнем в (1) равно 2.

Согласно формуле по мере увеличения  $\ell$  расстояние между максимумом S21 и центром должно увеличиваться в табл. 1. Таким образом, по расстоянию между центральной ячейкой и максимальным параметром сигнала S21 приемных антенн матрицы можно экспериментально определить номера состояний  $\ell$ .

Следует уточнить, что формула (1) определяет только тенденции смещения, однако сама формула не даёт однозначной связи: она приближённая и определяет только расстояние максимума от центра, а не позицию в целом.

Так как явное аналитическое выражение, указывающее на позицию максимума в матрице, на данный момент отсутствует, то имеющаяся таблица соответствий (табл. 1) получена в результате статистической обработки ряда численных экспериментов. Максимум пучка определяется с прецизионной точностью  $\pm 6$  мм, что достаточно для описываемых случаев, т.к. состояние ОУМ выявляется однозначно – для каждого единица находится на определенном месте в матрице.

Так как диаграмма направленности антенны со спиральной фазовой пластиной, полученная с помощью моделирования, не меняется с изменением расстояния, то максимум в матрице приемных антенн на определенном расстоянии можно будет предсказать в соответствии с направлением главного лепестка. На рис. 5а представлена диаграмма направленности антенны в полярных системах координат для  $\ell=+1$ . На рис. 5б представлена эта же диаграмма в пространстве (вид с торца на главный лепесток). За счет дифракции радиоволны на спиральной фазовой пластине направление главного лепестка составляет  $7^\circ$ . Данное значение получено в результате компьютерного моделирования. Существует практически симметричный лепесток с направлением минус  $7^\circ$ , однако максимум излучения приходится на первый лепесток с разницей 0,2 дБ. Найдем направление главного лепестка при помощи тригонометрии из рис. 1, учитывая матрицу #7 табл. 1. Так как расстояние между СФП и матрицей приемных антенн составляет 75 мм, а расстояние между антеннами 12 мм, то, рассчитывая арктангенс, получаем угол  $9^\circ$ . Рассчитанный угол и угол при моделировании отличается, потому что расстояние между приемными антеннами фиксировано. Предполагается, что при увеличении в два раза (до 150 мм) расстояния между СФП и приемными антеннами максимум излучения переместится во столько же крат от центра на позицию 5 строки и 9 столбца. Это предположение было подтверждено результатами моделирования, представленными в матрице #12 табл. 1 и рис. 6. Данный подход верен при увеличении дистанции между передающей и приемными антеннами, а также изменении  $\ell$  от  $-5$  до  $+5$ , что подтверждено результатами моделирования.

Метод может быть использован, когда источники волн с ОУМ находятся на любом расстоянии от наблюдателя. Ожидается, что этот метод будет использоваться в ММО. Алгоритм заключается в следующем: сигналы с разными номерами состояний  $\ell$  передаются поочередно  $\ell=-5, -4, -3, -2, -1, +1, +2, +3, +4, +5$  и  $\ell$  оценивается для каждого сигнала ОУМ с помощью программы для настройки десяти приемников. Далее если луч попадает на приемник,

настроенный на фиксированное  $\ell$ , то последний его принимает и, наоборот, луч, падающий на приемник, не настроенный на фиксированное  $\ell$ , не принимается.

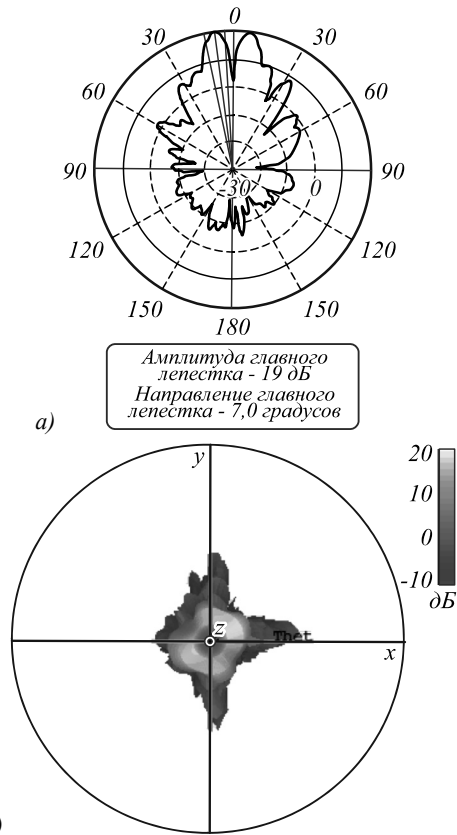


Рис. 5. Диаграмма направленности рупорной антенны со СФП при  $\ell = +1$  в полярной системе координат (а) и в трёхмерном пространстве (б)

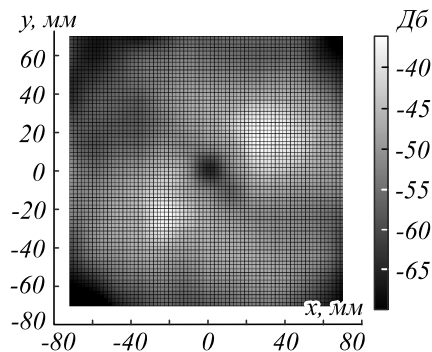


Рис. 6. Амплитуда S21 параметров приёмных антенн при  $\ell = +1$  и дистанции 150 мм до СФП

По сравнению с методом, описанным в [2], применяемый метод позволяет определить более двух состояний ОУМ, а также их знак. Наш метод не требует использования сложной нейронной сети в отличие от метода, описанного в работе [6], где нейронная сеть распознает характерный рисунок интерферограмм. Невозможно применить метод, описанный в работах [9] и [10], который также рассматривает количественные измерения амплитуд орбитального углового момента света с использованием одной неподвижной

линзы [9] или кольцевой решетки [10] для радиоволны на частоте 80 ГГц.

Для детектирования пучков радиоволн с  $\ell$  по модулю больше 5 требуется увеличение строк матрицы, что является ограничением данного метода.

### Выводы

Разработан точный и простой метод, основанный на качественной характеристике максимума распределения S21 параметров для определения  $\ell$ , и выявлено его ограничение. Количественная оценка состояний пучков орбитального углового момента основана на амплитудах распределенного S21 параметра системы. С помощью матрицы  $13 \times 13$  S21-параметров приемных антенн определяется одиннадцать одиночных состояний:  $\ell = -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5$ . Повторяемость эксперимента дает одни и те же данные для определенной рупорной антенны, определенных размеров Гауссова пучка, а с изменением расстояния максимум излучения перемещается по определённому закону, что говорит о надежности данного метода.

Последующие исследования будут направлены на определение закона распределения максимума излучения пучка с ОУМ при изменениях размера или типа излучающей антенны.

### Благодарности

Благодарю за помощь О.З. Рутгайзера и Т.М. Иделфонсо.

### References

- [1] Willner E, Huang H, Yan Y, Ren Y, Ahmed N, Xie G, Bao C, Li L, Cao Y, Zhao Z, Wang J, Lavery MPJ, Tur M, Ramachandran S, Molisch AF, Ashrafi N, Ashrafi S. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Adv Opt Photon* 2015; 7: 66-106.
- [2] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, Romanato F, Thidé B, Bianchini A, Palmieri L, Smeda CG. Encoding many channels in the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *New J Phys* 2012; 14: 033001.
- [3] Yan Y, Xie G, Lavery MPJ, Huang H, Ahmed N, Bao C, Ren Y, Cao Y, Li L, Zhao Z, Molisch AF, Tur M, Padgett MJ, Willner AE. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing. *Nat Commun* 2014; 5: 4876.
- [4] Bouchard F, De Leon I, Schulz SA, Upham J, Karimi E, Boyd RW. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in ultra-thin metasurfaces with arbitrary topological charges. *Appl Phys Lett* 2014; 105: 101905.
- [5] Wang J, Yang J-Y, Fazal IM, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner AE. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nat Photon* 2012; 6: 488-496.
- [6] Krenn M, Fickler R, Fink M, Handsteiner J, Malik M, Scheidl T, Ursin R, Zeilinger A. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienn. *New J Phys* 2014; 16: 113028.
- [7] Xi R, Liu H, Li L. Generation and analysis of high-gain orbital angular momentum vortex wave using circular ar-



---

**Сведения об авторах**

**Ануфриев Эльдар Григорьевич** в 2006 году получил квалификацию инженера по специальности «Радиотехника» и академическую степень магистра радиотехники, электроники и связи в 2008 году в Алматинском университете энергетики и связи (Казахстан). С 2013 года работает инженером в проектной компании Казахский институт нефти и газа. Эльдар Ануфриев – независимый исследователь. Его основные исследовательские интересы – орбитальный угловой момент радиоволн, завихренность, беспроводные сети, распространение радиоволн. E-mail: [eanufriyev@gmail.com](mailto:eanufriyev@gmail.com).

---

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 12 апреля 2021 г. Окончательный вариант – 25 августа 2021 г.

---



---

# Determination of the orbital angular momentum state of a radio wave beam based on quantitative characteristics of a radio communication system

*E.G. Anufriyev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> 050000, Almaty, Kazakhstan, Tulebaeva 123

## *Abstract*

Nowadays, due to the lack of available radio frequency spectrum, there is a need for the development of technologies that would make it possible to use this spectrum more efficiently. One such technology involves the use of radio waves with orbital angular momentum (OAM). This paper proposes a new quantitative method for determining the number of single states of a beam carrying OAM based on an analysis of the S21 system parameters. This allows the receiver to be tuned to receive beams with a specific OAM state. The radio waves carrying OAM have a frequency of 80 GHz. In this work, a pyramidal horn was used as a transmitting antenna, with a spiral phase plate used to twist the emitted radio wave. An array of receiving antennas was in the form of dipoles. Limitations of this method were investigated. This work is a computer experiment.

*Keywords:* orbital angular momentum, vorticity, radio wave propagation.

*Citation:* Anufriyev EG. Determination of the orbital angular momentum state of a radio wave beam based on quantitative characteristics of a radio communication system. *Computer Optics* 2022; 46(1): 22-29. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-907.

*Acknowledgements:* I would like to thank O. Z. Rutgaizer and T. M. Idelfonso for their help.

---

## *Author's information*

**Eldar Grigor'evich Anufriyev** received his Radio Engineer degree in 2006 and Master of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications degree in 2008 from Almaty University of Power Engineering and Telecommunication (Kazakhstan). Now he is an engineer at engineering company Kazakh Institute of Oil and Gas since 2013. Eldar Anufriyev is an independent researcher. His main research interest is orbital angular momentum of radio waves, vorticity, wireless networks, radio waves distribution. E-mail: [eanufriyev@gmail.com](mailto:eanufriyev@gmail.com).

---

*Received April 12, 2021. The final version – August 25, 2021.*

---