

# Сегнетоэлектрическая фазовая пластина для формирования волн с ненулевым орбитальным угловым моментом миллиметрового диапазона длин волн

А.Г. Алтынников, Р.А. Платонов, А.В. Тумаркин, В.В. Медведева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Предложен новый подход формирования электромагнитных волн с ненулевым орбитальным моментом. Подход основан на преобразовании плоского волнового фронта падающей волны в спиральную с помощью электрически перестраиваемой сегнетоэлектрической пластины. Основным преимуществом сегнетоэлектрической пластины является управление модой орбитального углового момента с помощью электрического поля. Конструкция линзы основана на сегнетоэлектрических керамических пластинах, покрытых электродами из радиопрозрачного материала. Описан принцип работы предложенной фазовой пластины и приводятся результаты моделирования её характеристик. Прототип с рабочей частотой 60 ГГц был спроектирован, изготовлен и измерен.

**Ключевые слова:** орбитальный угловой момент, сегнетоэлектрики, керамика

## 1. Введение

Последние годы характеризуются повышением внимания исследователей к электромагнитным волнам с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ). Характерной особенностью волн с ненулевым ОУМ является спиральный волновой фронт (см. рисунок 1). Моды волны со спиральным фазовым фронтом различаются величиной топологического заряда  $q$ , являющимся целым числом, характеризующим количество переходов фазы волны через 0 градусов в некоторой плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Практический интерес к волнам с вихревым фазовым фронтом обусловлен взаимной ортогональностью мод с различным  $q$ . Это открывает возможность для теоретически бесконечного увеличения плотности информации в каналах связи с мультиплексированием сигналов одной несущей частоты, но с различным орбитальным угловым моментом. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн актуальность изучения волн с ненулевым ОУМ обусловлена не только увеличением пропускной способности беспроводных каналов связи [1-3], но и улучшением разрешения радиолокационных измерений [4-6].

В СВЧ диапазоне наиболее перспективным является применение круговых фазированных антенных решеток (КФАР) [4,5,7]. Данный подход позволяет формировать различные моды волн с ненулевым ОУМ с помощью классических фазосдвигающих цепей. Однако с увеличением рабочих частот до миллиметрового диапазона целесообразности применения КФАР снижается из-за сложности создания фазовращателей с приемлемыми характеристиками.

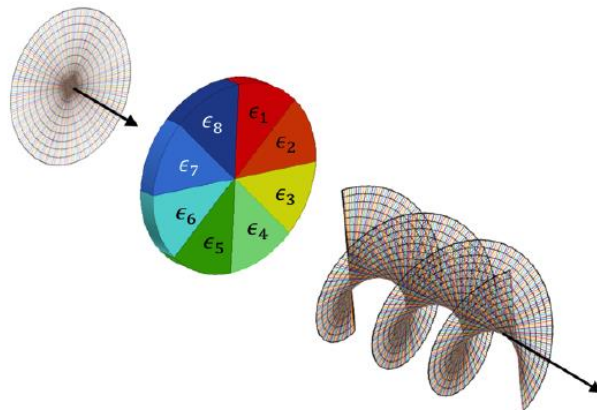
На частотах  $\sim(10\div 30)$  ГГц, как правило, целесообразней использовать квазиоптические устройства на основе частотно-селективных поверхностей и метаповерхностей [8,9]. Ввиду сложности создания электрически управляемых электродинамически сосредоточенных элементов в миллиметровом диапазоне длин волн для формирования волн с вихревым волновым фронтом, как правило, используются объемные диэлектрические пластины [10]. Главный недостаток

применения объемных диэлектрических ФП заключается в отсутствии возможности изменения моды волны с ненулевым ОУМ, что существенно снижает потенциал использования волн с вихревым волновым фронтом для систем радиолокации и телекоммуникации.

В настоящее время существует целый ряд нерешенных задач, ограничивающих широкое применение волн с ОУМ в современных системах связи. Одной из таких задач является создание антенных устройств с возможностью электрического управления величиной ОУМ формируемой электромагнитной волны. Простейшим устройством для формирования волны с ненулевым ОУМ является спиральная фазовая пластинка (ФП). Так как мода волны определяется геометрическим профилем ФП, данные устройства способны работать только на определенной моде ОУМ. В данной главе описывается новый способ формирования ЭМВ с ненулевым орбитальным моментом при помощи сегнетоэлектрической (СЭ) фазовой пластины, который потенциально способен решить эту задачу за счет возможности формирования различных профилей диэлектрической проницаемости.

## 2. Принцип работы и результаты моделирования

Принцип работы СЭ ФП основан на радиальном распределении градиента диэлектрической проницаемости СЭ, сформированным под действием управляющего электрического поля. При этом мода формируемой волны с ненулевым ОУМ определяется распределением управляющих напряжений, что позволяет менять моду ОУМ электрическим способом. На рисунке 1 схематически представлена СЭ фазовая пластинка, преобразующая плоский фазовый фронт волны в спиральный.

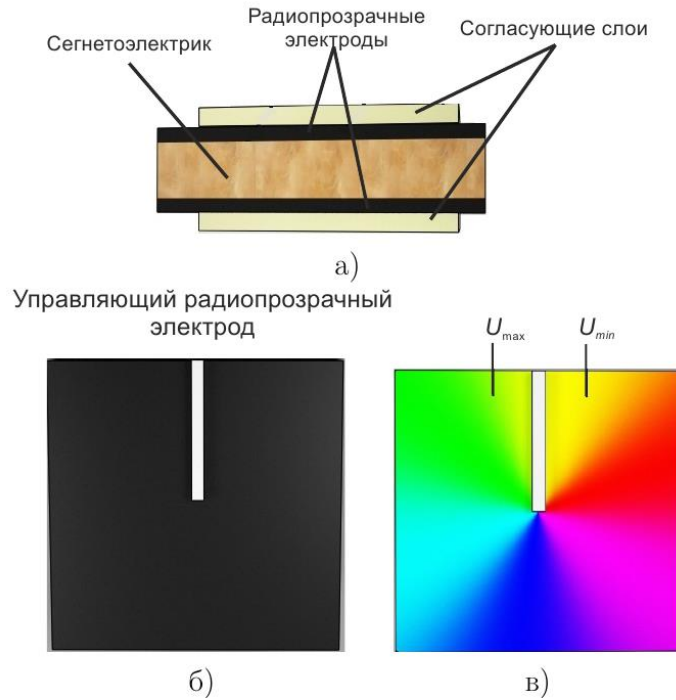


**Рисунок 1.** Сегнетоэлектрическая фазовая пластинка для формирования электромагнитной волны с ненулевым орбитальным угловым моментом.

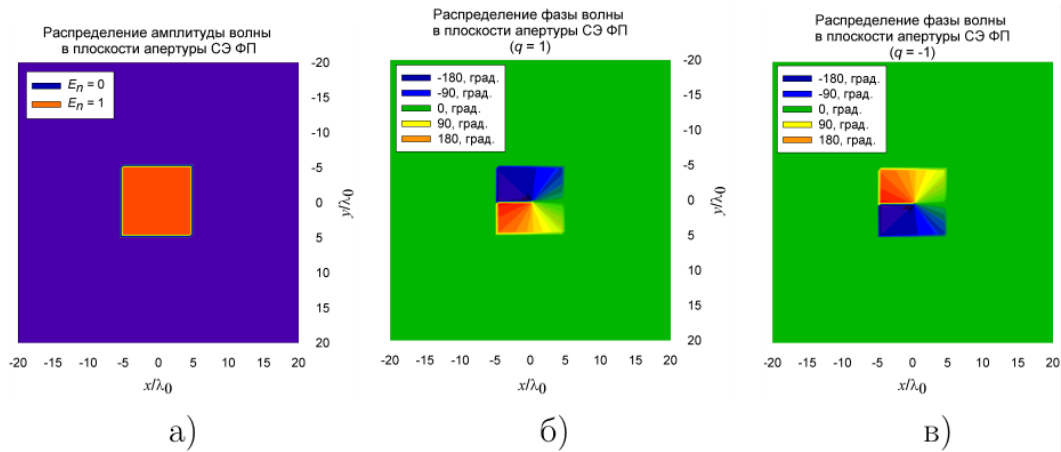
Очевидно, что для подачи управляющих напряжений необходимо использовать радиопрозрачные электроды. На один из двух радиопрозрачных электродов подается управляющее напряжение, в то время как второй заземлен (см. рисунок 2а). Простейший вариант топологии радиопрозрачных электродов для формирования ОУМ приведен на рисунке 4.2б. В случае данной топологии управляющая разность потенциалов подается на участки РПЭ, разделенные щелью (см. рисунок 2б), что приводит к распределению электрического потенциала по сплошной пленке РПЭ как показано на рисунке 2в. Подобное распределение потенциала соответствует радиальному градиенту диэлектрической проницаемости СЭ ФП, формирующему спиральный фазовый фронт ЭМВ.

Для расчета характеристик ДН предлагаемой сегнетоэлектрической ФП использовался метод разложения излучаемых полей по плоским волнам [11,12]. Размер апертуры СЭ ФП соответствует  $(10 \times 10)\lambda_0$  на частоте 60 ГГц, при размере

расчетной области в плоскости апертуры  $(200 \times 200)\lambda_0$ . На рисунке 3 представлено распределение фазы и амплитуды поля в области апертуры СЭ ФП, соответствующее формированию ОУМ со значениями  $q$ :  $-1; 0; 1$ .



**Рисунок 2.** Конструкция СЭ ФП – а); топология управляющего электрода – б); распределение управляющего напряжения по электроду – в).



**Рисунок 3.** Распределение амплитуды волны – а) и фазы в плоскости апертуры СЭ ФП при  $q = 1$  – б) и  $q = -1$  – в).

Результаты расчета ДН, представленные на рисунке 4, демонстрируют формирование луча с локальным минимумом в направлении распространения волны при нулевом топологическом заряде  $q$ . Такая форма луча ДН обусловлена неопределенностью фазы в центральной точке апертуры СЭ ФП.

Для подтверждения корректности разработанного метода формирования электромагнитных волн с ненулевым ОУМ был изготовлен прототип СЭ ФП (рис. 5а), и проведены экспериментальные исследования его ДН (рис. 5б). Следует отметить, что целью прототипирования являлось успешное формирование волн с ненулевым ОУМ, поэтому технические параметры устройства (вносимые потери, ширина луча и т. д.) являлись вторичными. Для создания прототипа СЭ ФП были использованы две

сегнетокерамические пластины BSTO с величиной диэлектрической проницаемости  $\sim 400$  и толщиной 0,5 мм. Поперечные размеры СЭ пластин  $(48 \times 60) \text{ мм}^2$ . Результаты измерения характеристик сегнетокерамики приведены в работе [13]. В качестве материала для формирования РПЭ был выбран графит [13].

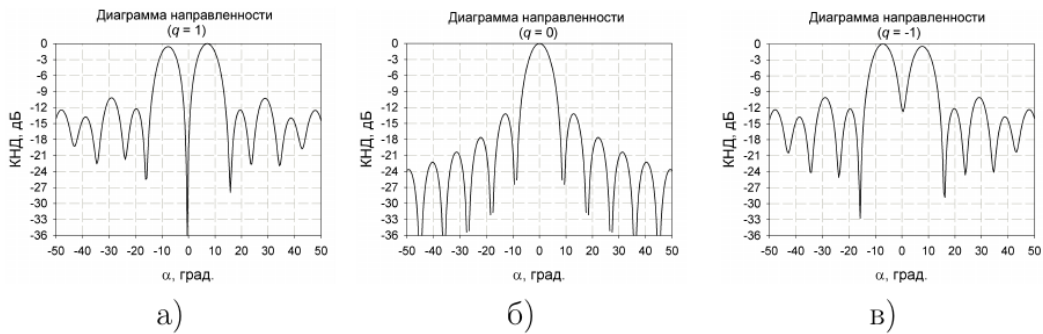


Рисунок 4. Диаграммы направленности для мод:  $q = -1$  – а);  $q = 0$  – б);  $q = 1$  – в).

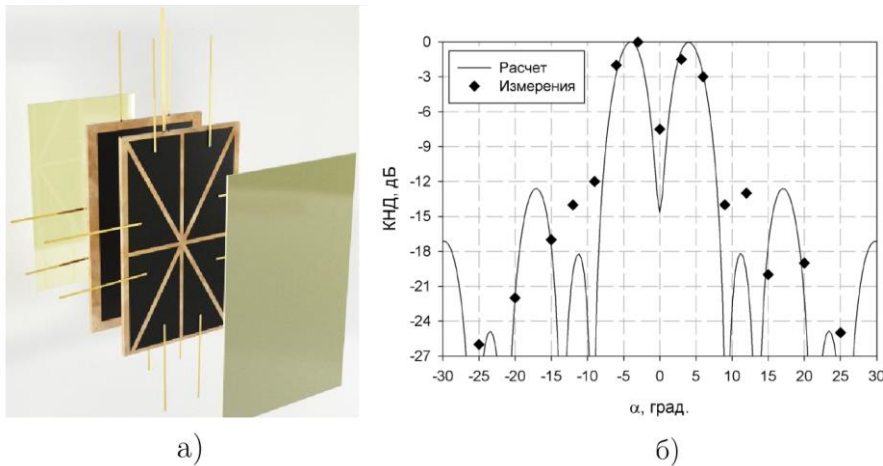


Рисунок 5. Конструкция прототипа электрически управляемой ФП на основе двух сегнетоэлектрических пластин – а); сравнение результатов моделирования и измерений луча ДН сформированного СЭ ФП при  $q = 1$  – б).

### 3. Заключение

Использование двух пластин СЭ обусловлено необходимостью снижения уровня управляющих напряжений. На рисунке 5а схематически представлена конструкция двухэлементной СЭ ФП. Для согласования СЭ ФП с окружающим пространством применялись пластины ситала с диэлектрической проницаемостью  $\sim 10$ , толщина которых соответствовала четверти длины волны в материале на частоте  $\sim 60$  ГГц. Конические рупорные антенны использовались как первичный излучатель и приемник излучения. Для формирования распределения напряжений был применен резистивный делитель.

Полученные экспериментальные результаты измерения луча ДН демонстрируют локальный минимум, характерный для волны с ненулевым ОУМ, что говорит о корректности предложенного метода формирования электромагнитных волн с ненулевым ОУМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10156).

#### Список литературы

1. Simulation of orbital angular momentum radio communication systems based on partial aperture sampling receiving scheme / Y. Hu [et al.] // IET Microwaves, Antennas Propagation. — 2016. — Vol. 10, no. 10. — P. 1043–1047

2. Demonstration of tunable steering and multiplexing of two 28 ghz data carrying orbital angular momentum beams using antenna array / G. Xie [et al.] // Scientific reports. — 2016. — Vol. 6. — P. 37078.
3. 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. — P. 744–747.
4. Study on the theory and method of vortex-electromagnetic-wave-based radar imaging / K. Liu [et al.] // IET Microwaves, Antennas Propagation. — 2016. — Vol. 10, no. 9. — P. 961–968.
5. Electromagnetic Vortex Imaging Using Uniform Concentric Circular Arrays / T. Yuan [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2016. — Vol. 15. — P. 1024–1027.
6. Orbital-Angular-Momentum-Based Electromagnetic Vortex Imaging / K. Liu [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2015. — Vol. 14. — P. 711–714.
7. Klemes M., Boutayeb H., Hyjazie F. Orbital angular momentum (OAM) modes for 2-D beam-steering of circular arrays // 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). — 05/2016. — P. 1–5.
8. A Flat-Lensed Spiral Phase Plate Based on Phase-Shifting Surface for Generation of Millimeter-Wave OAM Beam / Y. Chen [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2016. — Vol. 15. — P. 1156–1158.
9. Zelenchuk D., Fusco V. Split-Ring FSS Spiral Phase Plate // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2013. — Vol. 12. — P. 284–287.
10. Zhang C., Ma L. Millimetre Wave with Rotational Orbital Angular Momentum // Scientific Reports. — 2016. — No. 6. — P. 31921.
11. Booker H. G., Clemmow P. C. The concept of an angular spectrum of plane waves and its relation to that of polar diagram and aperture distribution // Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering. — 1950. — Jan. — Vol. 97, no. 45. — P. 11–17.
12. Li J., Zhu S., Lu B. The rigorous electromagnetic theory of the diffraction of vector beams by a circular aperture // Optics Communications. — 2009. — Vol. 282, no. 23. — P. 4475–4480.
13. Электрически перестраиваемая линза СВЧ диапазона на основе сегнетоэлектрических материалов / П. А. Платонов [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ, Санкт-Петербург. — 2014.