

*Платонов Р.А., Алтынников А.Г., Михайлов А.К., Козырев А.Б.*  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический*  
*университет «ЛЭТИ»*

## **Электрически управляемая диаграммообразующая линза миллиметрового диапазона на основе сегнетоэлектрических материалов**

*Представлены результаты моделирования линзовой антенны, состоящей из слабонаправленного излучателя и диаграммообразующей однослойной сегнетоэлектрической линзы с возможностью дискретного сканирования лучом в пределах  $\alpha = \pm 15$  град. на частоте 50 ГГц. Приводится сравнение ширины луча диаграммы направленности, полученной с помощью сегнетоэлектрической и обычной диэлектрической линзы.*

**Ключевые слова:** Линзовые антенны, сегнетоэлектрическая керамика, сканирование лучом

Использование техники миллиметрового диапазона длин волн является перспективным для применений в системах коммуникации и радиолокации из-за возможности обеспечения больших скоростей передачи данных и высокой степени пространственного разрешения. В подобных системах необходимо использование антенн с возможностью электрического управления диаграммой направленности (ДН). Среди антенных систем с электрическим сканированием ДН наиболее распространёнными являются фазированные антенные решетки (ФАР). Использование ФАР позволяет обеспечивать быстрое сканирование луча в широком диапазоне углов, однако недостатком ФАР, работающих в миллиметровом диапазоне, является их высокая стоимость, определяемая фазовращательной системой, и сравнительно большие потери в делителях мощности. Очевидно, что преимущества сканирующих линзовых антенн по мере увеличения рабочей частоты становятся все более существенными в сравнении с ФАР, за счет простой конструкции и дешевизны [1]. Перспективность использования не фокусирующих линз на основе сегнетоэлектрика (так называемых дефлекторов) подтверждается рядом публикаций [2-4]. Однако применение дефлектора в сканирующей антенной системе подразумевает использование либо высоконаправленного излучателя (например, пирамидальный рупор), либо слабонаправленного излучателя в сочетании с диэлектрической линзой, что усложняет конструкцию и увеличивает габариты системы [5]. Стоит отметить, что сканирование лучом может быть реализовано на основе традиционных линзовых антенн, за счет механического смещения излучающей антенны от оптической оси линзы, либо путем переключения между излучателями, расположенными в фокальной плоскости линзы, что также ведет к усложнению конструкции. Использование электрически управляемой сегнетоэлектрической линзы, позволяет осуществлять дискретное сканирование лучом ДН без механических смещений.

Как известно, для сегнетоэлектриков в параэлектрической фазе характерны: сравнительно высокая управляемость диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) под действием Е-поля, малые СВЧ потери и отсутствие дисперсии диэлектрической проницаемости вплоть до  $\sim 100$  ГГц. Перечисленные особенности позволяют считать сегнетоэлектрики, в частности, твердый раствор титаната бария-стронция ( $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ), перспективным материалом для создания управляемых линз.

В данной работе рассмотрен способ формирования и дискретной перестройки ДН с помощью однослойной сегнетоэлектрической линзы за счет изменения в ней распределения управляющего электрического поля, что позволяет существенно упростить сканирующую антенную систему.

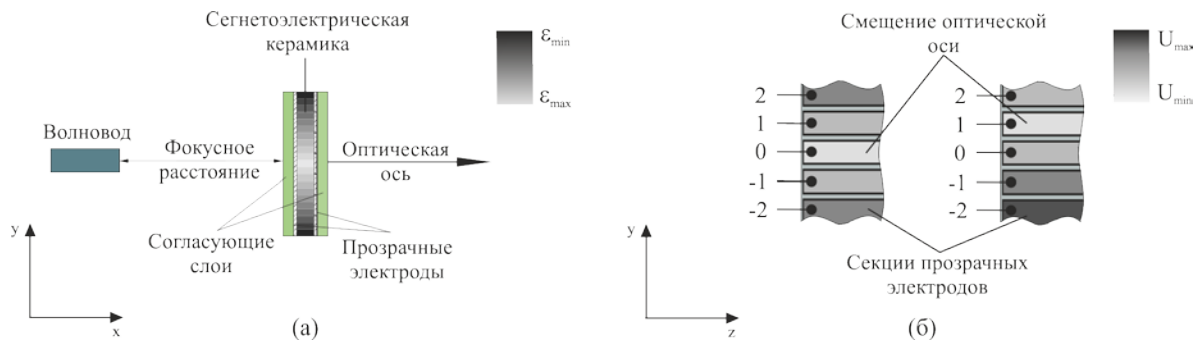


Рис. 1 – Схема линзовой антенны на основе сегнетоэлектрической линзы - а); топология управляющих электродов – б).

Линзовая антенна (рис. 1а) состоит из слабонаправленного источника излучения (волновод) и линзы на основе слоя сегнетоэлектрика, с нанесенными прозрачными для СВЧ поля электродами управления и двух четвертьволновых согласующих слоев линейного диэлектрика. Принцип действия линзы основан на изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика под действием электрического поля (рис. 1б). Один из наиболее перспективных материалов для прозрачных электродов является оксид индия-олова (ИТО) [6]. Прозрачные электроды представляют собой тонкопленочное покрытие, одно из которых заземлено и является непрерывной пленкой, другое представляет собой разделенные полосковые секции (рис. 1б). Такая топология управляющих электродов позволяет реализовать необходимое дискретное распределение поля в плоскости апертуры линзы. Для формирования луча ДН требуется обеспечить необходимое распределение фазы проходящей волны по площади апертуры линзы. Требуемый профиль электрической длины ( $\Delta\phi$ ) сегнетоэлектрической линзы может быть рассчитан в приближении геометрической оптики с помощью гиперболического уравнения [6], а соответствующее этому профилю распределение управляющего поля по апертуре линзы определяется уравнением:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{\varepsilon(E=0)} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{k}} \right) \quad (1)$$

Где  $\Delta\phi$  – относительная разница фаз, зависящая от величины управляющего поля;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $d$  – толщина сегнетоэлектрика;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика;  $E$  – величина управляющего электрического поля;  $k = \varepsilon(E=0)/\varepsilon(E \neq 0)$  – коэффициент управляемости сегнетоэлектрика под действием электрического поля.

Полученный профиль электрической длины линзы, может быть зоннирован, т.е. сведен в каждой зоне к диапазону значений  $\Delta\phi$  от 0 до  $2\pi$ . При этом из условия  $\Delta\phi=2\pi$ , с помощью (1) рассчитывается максимальное значение коэффициента управляемости  $k2\pi$  (и соответственно максимальная величина управляющего электрического поля). На рисунке 1б показано изменение распределения управляющего напряжения относительно центральной секции управляющего электрода (на рисунке обозначена как 0), что соответствует электрическому смещению оптической оси линзы и приводит к отклонению луча ДН.

На рисунке 2 приведено распределение электрического поля в дальней зоне для облучателя (открытого конца волновода) и линзовых антенн на основе, не перестраиваемой диэлектрической (ДЛ) и сегнетоэлектрической линзы (СЛ). Линейный размер апертуры

волновода (широкая стенка)  $\approx 0,9\lambda$  на частоте 50 ГГц, линейный размер апертуры и фокусное расстояние одинаковы для обеих линз и равны - 60 мм и 17,3 мм, соответственно. Толщина слоя сегнетоэлектрика - 1 мм, диэлектрическая проницаемость - 440, диэлектрическая проницаемость материала диэлектрической линзы - 4,4. Результаты, полученные с помощью электродинамического моделирования методом конечных элементов, демонстрируют небольшую разницу в ширине луча ДН (7,6 град. для ДЛ и 11,4 град. для СЛ) и в уровне боковых лепестков (-19 дБ для ДЛ и -14 дБ для СЛ).

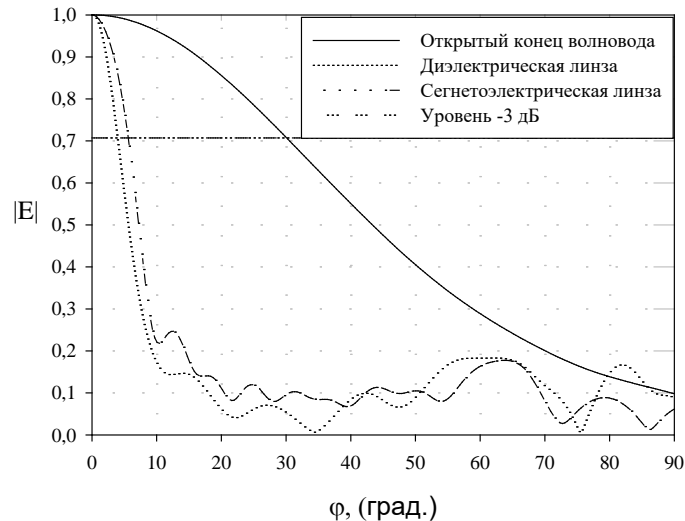


Рис. 2 – Результаты электродинамического моделирования распределение поля в дальней зоне.

Для реализации режима сканирования ДН электрический профиль линзы ( $\Delta\phi$ ) рассчитан для линейного размера апертуры  $12\lambda$ . На рисунке 3 показано отклонение луча нормированной ДН при различном смещении оптической оси СЛ с шагом смещения 1,5 мм ( $0,25\lambda$ ). Максимальное смещение оптической оси (6 мм) соответствует отклонению луча ДН на 15 градусов.

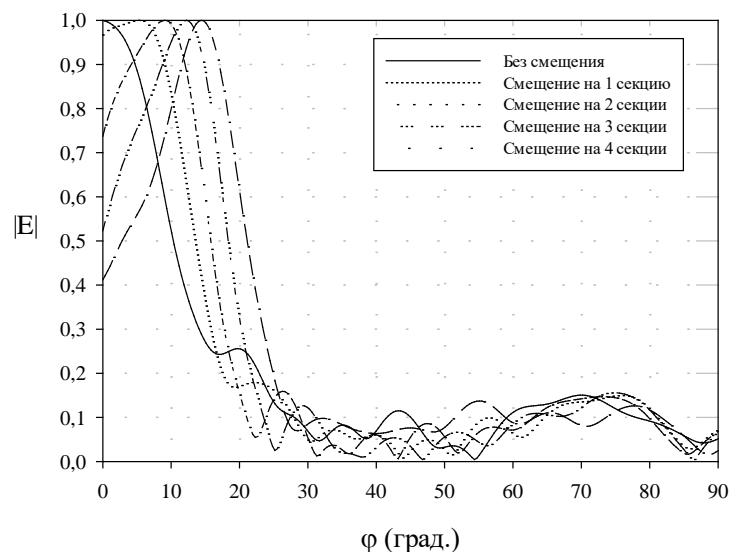


Рис. 3 – Дискретное сканирование лучом линзовой антенны на основе сегнетоэлектрической линзы.

По результатам электродинамического моделирования направленность излучения сегнетоэлектрической линзы сравнима с направленностью обычной диэлектрической линзы (~ 22 дБи), при этом за счет управления электрическим полем СЛ реализует режим сканирования ДН в диапазоне углов  $\pm 15$  градусов. Сегнетоэлектрическая линза компактна (толщина ~1 мм), имеет плоский профиль. Таким образом, использование сегнетоэлектрической линзы позволяет создать антенную систему, сочетающую в себе быстродействие и точность ФАР, а также дешевизну и простоту конструкций линзовых антенн.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 15-19-10049.

#### Библиографический список

1. Проблемы антенной техники / под ред. Л. Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.
2. Patent 2009/237322 US, H01Q15/24, H01Q3/44 Ferroelectric Lens / V. Cherman, P. Fihol, S. Gevorgian et al.; заявитель и патентообладатель Ericsson Telefon AB LM. - № 11/721,271; заявл. 8.12.04; опубл. 24.09.09.
3. Пат. 2571582 Российская Федерация, МПК H01Q3/46, H01Q3/24, H01Q19/06. Отклоняющая система для управления плоской электромагнитной волной / А. Г. Алтынников, В. Н. Осадчий, И. В. Котельников, Р. А. Платонов и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)" и Корпорация "САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС Ко., Лтд.". - № 2013137776/08; заявл. 13.08.2013; опубл. 20.12.2015.
4. Tunable Periodic Deflector Structure Based on Ferroelectric Materials / R.A. Platonov, A.G. Altynnikov, I.V. Kotelnikov, A.B. Kozyrev et al. // PIERS 2015 Prague Proceedings, P. 908-912 (2015)
5. Antennas / J. D. Kraus, R. J. Marhefka. - 3d edition. - New York: McGraw-Hill, 2002. – 920 p.
6. Minami, T. Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes / T. Minami // Thin Solid Films. - 2008. - V. 516, N 17. - P. 5822-5828.