

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

## **Электрически управляемая линза на основе сегнетоэлектрических материалов миллиметрового диапазона длин волн**

*Представлены результаты моделирования однослойной сегнетоэлектрической линзы с возможностью плавного сканирования в пределах  $\sim \pm 15$  град., дискретного сканирования с шагом  $\sim 15$  град. и возможностью формирования двулучевой диаграммы направленности, и её дискретной перестройкой с шагом  $\sim 15$  град. на частоте 80 ГГц.*

**Ключевые слова:** антенны, линза, дефлектор, сегнетоэлектрическая керамика

Системы с электрическим способом формирования и управления диаграммой направленности (ДН) находят широкое применение в системах спутниковой и наземной связи. В основе принципа электрического формирования ДН лежит связь между фазовым и амплитудным распределением электромагнитного поля по апертуре антенны (решетке излучателей) и направлением наибольшего коэффициента усиления (КУ) антенны в дальней зоне. Возможность управлять амплитудным и/или фазовым распределением по апертуре позволяет изменять направление максимального КУ без механического перемещения антенны, что существенно увеличивает скорость сканирования пространства. Классическим примером таких систем является фазированная антенная решетка (ФАР), в которых изменение распределения полей осуществляется с помощью фазовращателей и управляемых линий задержки, входящих в питающий тракт каждого излучателя решетки. Среди общих недостатков ФАР, особенно в КВЧ диапазоне можно отметить дороговизну и сравнительно большие потери в делителях мощности и фазовращателях.

В системах излучатель – управляемая линза, формирование необходимого распределения фаз осуществляется линзой, что позволяет существенно упростить конструкцию системы за счет отсутствия специфических элементов (фазовращатели, аттенюаторы) в питающих трактах излучателя. Управляемые линзы можно разделить на два класса: 1) линзовые решетки, выполненные на основе сосредоточенных элементов; 2) линзовые антенны на распределенных элементах из нелинейных материалов. В линзовых решетках в качестве сосредоточенных элементов могут быть использованы: PIN –диоды [1], полупроводниковые и сегнетоэлектрические варакторы [2, 3, 4, 5], микроэлектромеханические элементы [6]. Однако использование сосредоточенных элементов ограничивает рабочий диапазон частот, как правило, частотами К-диапазона. Поэтому на более высоких частотах целесообразнее использование линз на распределенных элементах. Настоящая работа посвящена теоретическим оценкам эффективности работы электрически управляемых линз распределенные элементы которой выполнены из сегнетоэлектрического материала.

Как известно, для сегнетоэлектриков в параэлектрической фазе характерна сравнительно высокая управляемость диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) под действием E-

поля, малые СВЧ потери и отсутствие дисперсии диэлектрической проницаемости вплоть до 100 ГГц. Перечисленные особенности позволяют считать сегнетоэлектрики, в частности, твердый раствор титаната бария-стронция ( $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ), перспективным материалом для создания управляемых линз на его основе.

В данной работе рассмотрены способы формирования и перестройки ДН с помощью однослойной сегнетоэлектрической линзы за счет изменения профиля градиента управляющего напряжения. Данные способы позволят качественно расширить функционал применений сегнетоэлектрической линзы без увеличения толщины сегнетоэлектрика и величины управляющих напряжений в сравнении с классической конструкцией [7].

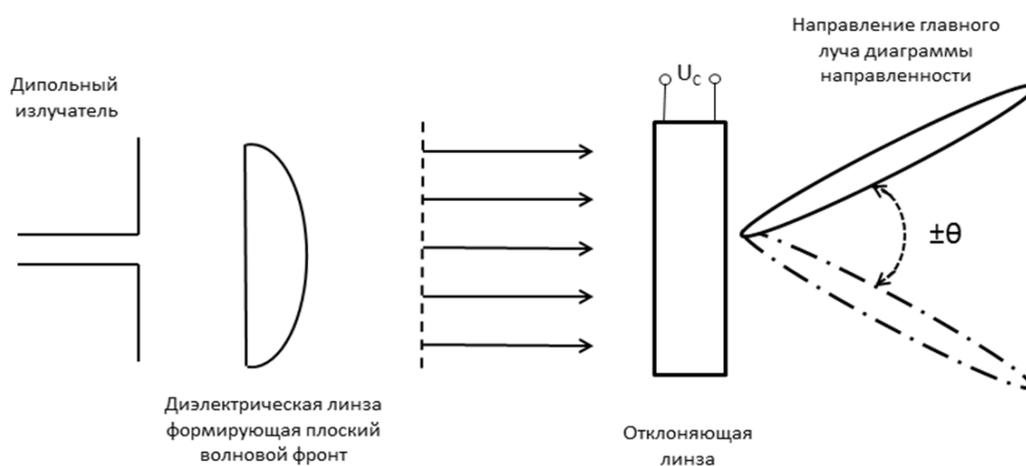


Рисунок 1.

Система сканирования (рис. 1) состоит из источника излучения, диэлектрической линзы, роль которой заключается в преобразовании фазовой поверхности излучения в плоский волновой фронт и отклоняющей линзы (дефлектора) на основе сегнетоэлектрического материала. Отклонение луча на угол  $\theta$  определяется величиной управляющего напряжения  $U_c$ . В работах [7, 8, 9] приводится описание конструкции и принципов работы ряда таких линз на основе сегнетоэлектрических материалов.

На рис. 2 – схематически изображена простейшая однослойная конструкция сегнетоэлектрической линзы, состоящей из сегнетоэлектрической пластины, покрытой с двух сторон прозрачными для СВЧ волны электродами. Фазовый набег, проходящей сквозь линзу волны, может быть изменен путем варьирования диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя, за счет управляющего Е-поля между электродами дефлектора. Таким образом, отклонение фазового фронта волны может быть достигнуто за счет формирования градиента диэлектрической проницаемости в сегнетоэлектрическом слое в направлении перпендикулярном направлению распространения волны (см. рис. 2).

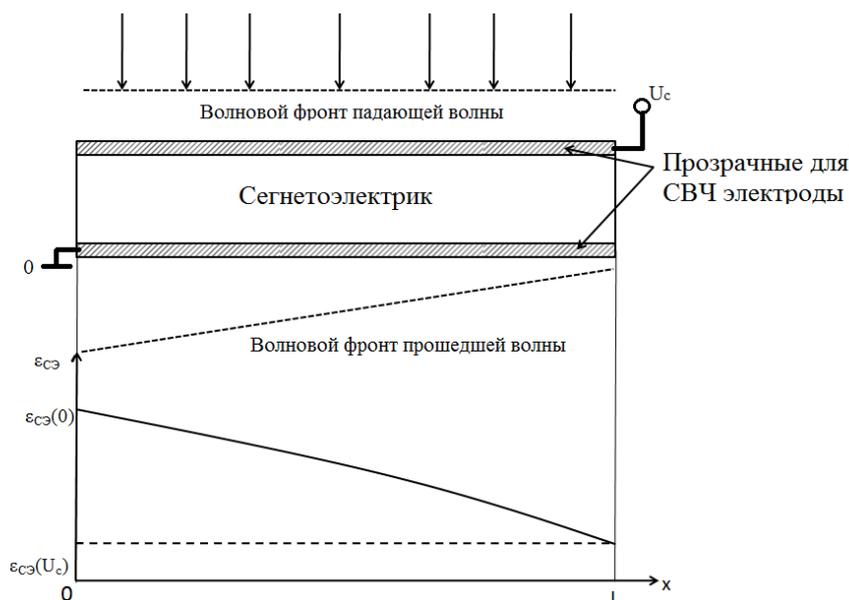


Рисунок 2.

Угол отклонения СВЧ луча (1Д – сканирование) определяется разностью фазового набега волны на противоположных краях апертуры сегнетоэлектрической линзы ( $\Delta\varphi$ ) и может быть рассчитан с помощью следующего соотношения:

$$\tan \theta = \frac{\lambda \Delta\varphi}{D 2\pi}, \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол отклонения;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $D$  – размер апертуры сегнетоэлектрической линзы;  $\Delta\varphi$  – разность фаз сигнала.

Величина  $\Delta\varphi$  может быть определена из соотношения:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d (\sqrt{\varepsilon(E=0)} - \sqrt{\varepsilon(E_{max})}), \quad (2)$$

где  $\varepsilon(E)$  – диэлектрическая проницаемость в зависимости от величины приложенного управляющего электрического поля  $E$ ;  $d$  – толщина сегнетоэлектрического слоя.

Выражения (1) и (2) могут быть преобразованы в соотношение:

$$\tan \theta = \frac{d}{D} (\sqrt{\varepsilon(E=0)} - \sqrt{\varepsilon(E_{max})}), \quad (3)$$

Очевидно, что увеличение угла отклонения фазового фронта прошедшей волны связано с увеличением управляемости  $k = \frac{\varepsilon(E=0)}{\varepsilon(E_{max})}$  и/или толщины сегнетоэлектрика, что приводит к необходимости увеличения напряженности управляющего  $E$ -поля.

Эффективным способом увеличения угла отклонения является формирование пилообразного профиля фазового набега по апертуре линзы (фазовый «сброс»), данный подход широко применяется при проектировании ФАР. Для реализации такого профиля необходимо определить величину управляемости ( $k_{2\pi}$ ), при которой разница фазового набега волны на границах апертуры линзы составит  $2\pi$ . Таким образом, при заданной толщине сегнетоэлектрической линзы можно осуществлять плавное качание луча за счет изменения высоты градиента в пределах от  $k=1$  до  $k=k_{2\pi}$ , при этом максимальный угол отклонения составит  $\theta_{2\pi}$ . Дальнейшее увеличение угла отклонения за счет использования пилообразного профиля фазового набега будет дискретным, с шагом приблизительно равным  $\theta_{2\pi}$ . На рис. 3 качественно изображены сформированные волновые фронты, реализующие плавное качание луча; дискретное качание луча и плавное и дискретное изменение двулучевой диаграммы

направленности. На рис. 4 приведены поля в дальней зоне для однослойной сегнетоэлектрической линзы на частоте 80 ГГц полученные из моделирования методом конечных элементов. Линза облучалась плоским волновым фронтом, основные параметры линзы приведены в таблице 1.

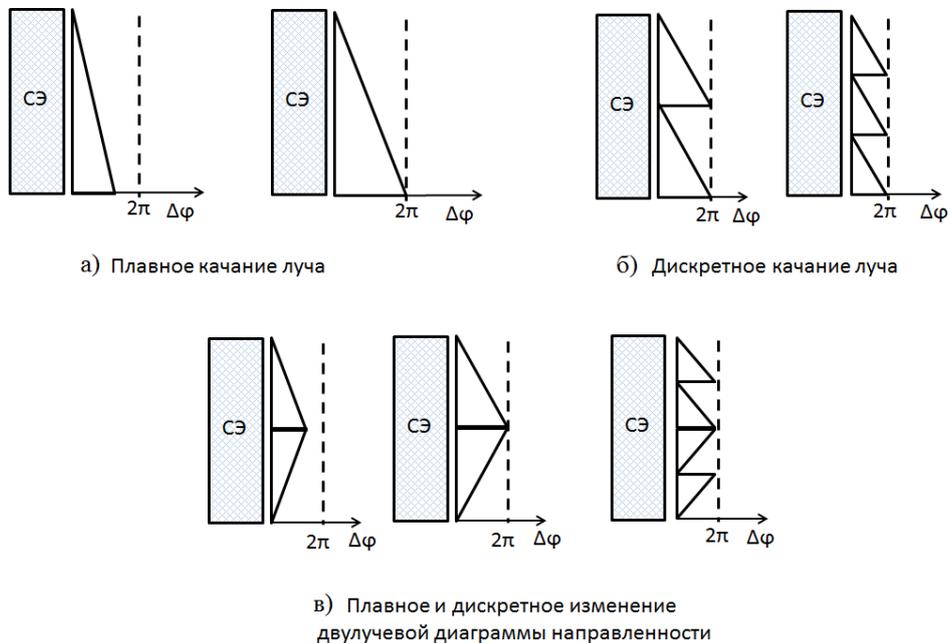


Рисунок 3.

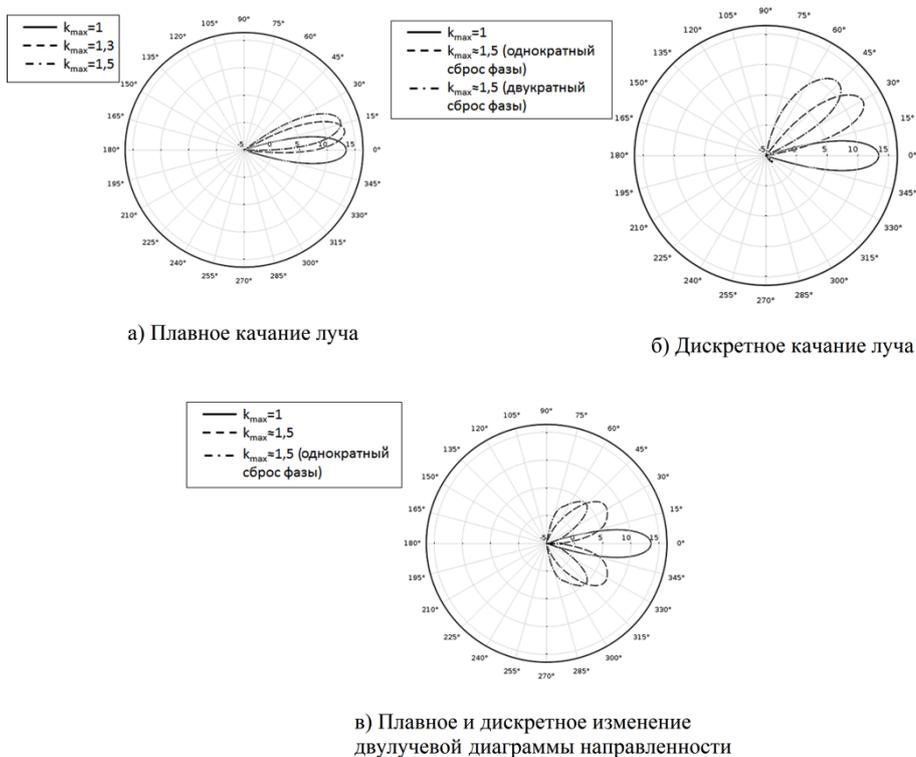


Рисунок 4.

Таблица 1.

$\epsilon$	400
$K_{2\pi}$	$\sim 1.5$
Толщина линзы	1 мм
Апертура линзы	15 мм

Из рисунков видно, что за счет изменения профилей градиента диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрическая линза позволяет реализовать плавное качание луча в пределах  $\pm 15^\circ$  и дискретную перестройку в пределах  $\pm 45^\circ$  с шагом  $15^\circ$  для однолучевого режима; и плавное качание в пределах  $\pm 30^\circ$  дискретную перестройку в пределах  $\pm 45^\circ$  с шагом  $15^\circ$  для двухлучевого режима без изменения конструкции линзы.

#### Библиографический список

1. Wideband 400-element Electronically Reconfigurable Transmitarray in X Band / A. Clemente, L. Dussopt, R. Saileau, P. Porier et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, -2013. - V.61 (10). - p. 5017-5027.
2. Yun Lau J., Hum S.V. A Planar Reconfigurable Aperture With Lens and Reflectarray Modes of Operation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, - 2010. - V.58 (12). - p. 3547-3555.
3. Multilayer Antenna-Filter Antenna for Beam-Steering Transmit-Array Applications/ L. Boccia, I. Russo, G. Amendola, G. Massa // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, - 2012. - V.60 (7). - p. 2287-2300.
4. Beam Steering Transmitarray Using Tunable Frequency Selective Surface With Integrated Ferroelectric Varactors / M. Sazegar, Y. Zheng, C. Kohler, H. Maune et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, - 2012. - V.60 (12). - p. 5690-5699.
5. Electronically Reconfigurable Transmitarray at Ku Band for Microwave Applications / P. Padilla, A. Mucoz-Acevedo, M. Sierra-Castacer M. Sierra-Pérez // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, - 2010. - V.58 (8). - p. 2571-2579.
6. Cheng C.C., Lakshminarayanan B., Abbaspour-Tamijani A. A Programmable Lens-Array Antenna With Monolithically Integrated MEMS Switches // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, - 2009. - V.57 (8). - p. 1874-1884.
7. Monolithic, voltage controlled, phased array: Patent 4323901 US: H01Q 19/06, H01Q 3/46 / Wames R.E. , Hall W.F., Ho W.W. Lim T.C., Rockwell International Corporation (6 April 1982).
8. Ferroelectric Lens: Patent 0237322 US: H01Q 3/44, H01Q 15/24 / Cherman V., Fihol P., Gevorgian S. et al., Ericsson Inc. (24 September 2009).
9. Voltage Controlled Ferroelectric Lens Phased Array: Patent 22158 WO: H01Q 19/06, H01Q 15/02 / Jaganmohan B. L., The Government of the United States of America. (19 June 1997).