

УДК 621.396.965

Р. А. Платонов, А. Г. Алтынников, А. В. Ястребов, А. К. Михайлов, А. Б. Козырев  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Электрически управляемая структура с периодическим изменением волнового сопротивления для отклонения основного луча высоконаправленного излучателя миллиметрового диапазона длин волн<sup>1</sup>

*Предложена новая конструкция электрически перестраиваемой многослойной структуры (дефлектора) миллиметрового диапазона длин волн на основе периодической структуры сегнетоэлектрик/линейный диэлектрик. Результаты численного моделирования параметров дефлектора демонстрируют повышение эффективности управления углом отклонения основного луча диаграммы направленности за счет дисперсионных свойств структуры по сравнению с существующими аналогами.*

**Сегнетоэлектрическая керамика, дефлектор, антенны, управление диаграммой направленности, миллиметровые волны**

Использование техники миллиметрового диапазона длин волн перспективно для применений в системах коммуникации и радиолокации из-за возможности обеспечения больших скоростей передачи данных и высокой степени пространственного разрешения [1]. Одним из примеров радиолокационных систем, активно разрабатываемых в настоящее время, являются автомобильные антистолкновительные радары с частотой около 78 ГГц [2]. В указанных системах применяются антенны с возможностью электрического управления диаграммой направленности (ДН) и изменением ее формы. Среди антенных систем с электрическим сканированием ДН наиболее распространенными являются фазированные антенные решетки (ФАР), позволяющие реализовать быстрое сканирование луча в широком диапазоне углов.

Общими недостатками ФАР, особенно работающих в миллиметровом диапазоне, являются их высокая стоимость, определяемая фазовращательной системой, и сравнительно большие потери в делителях мощности. Одним из альтернативных решений, свободным от указанных недостатков, является создание электрически управляемых линз (дефлекторов), обеспечивающих пространственное сканирование ДН [3], [4].

Использование сегнетоэлектрического (СЭ) материала в конструкции электрически управляемого дефлектора позволяет создать антенную систему, сочетающую в себе быстроедействие и

точность ФАР, а также дешевизну и простоту конструкций линзовых систем. В [5]–[8] приведены описания конструкции и принципов работы ряда таких антенных систем на основе СЭ-материалов. Электрическое управление в СЭ-дефлекторах реализуется за счет зависимости диэлектрической проницаемости материала  $\varepsilon$  от приложенного к нему электрического поля  $E$ . Наиболее перспективным СЭ-материалом является твердый раствор титаната бария-стронция ( $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ) в параэлектрической фазе. Прежде всего это обусловлено его высокой управляемостью  $K = \varepsilon(E=0)/\varepsilon(E \neq 0)$  и малыми СВЧ-потерями вплоть до частот порядка 100 ГГц. Изменение стехиометрического состава ( $x = 0 \dots 0.5$ ) позволяет по сравнительно простой керамической технологии получать материал с необходимой диэлектрической проницаемостью в диапазоне  $\varepsilon = 100 \dots 1000$  [9]–[11].

На рис. 1, а показан простейший сегнетоэлектрический дефлектор, состоящий из одного сегнетоэлектрического слоя 1 с нанесенными высококорезистивными электродами 2, прозрачными для СВЧ-излучения [12]. Подача управляющего напряжения ( $U = 0$  и  $U_{\text{max}}$ ) между концами одного из электродов формирует градиент электрического потенциала вдоль его поверхности, что ведет к градиенту диэлектрической проницаемости в СЭ-слое (на рис. 1 показано градациями серого цвета). Вызванное изменением этого градиента из-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

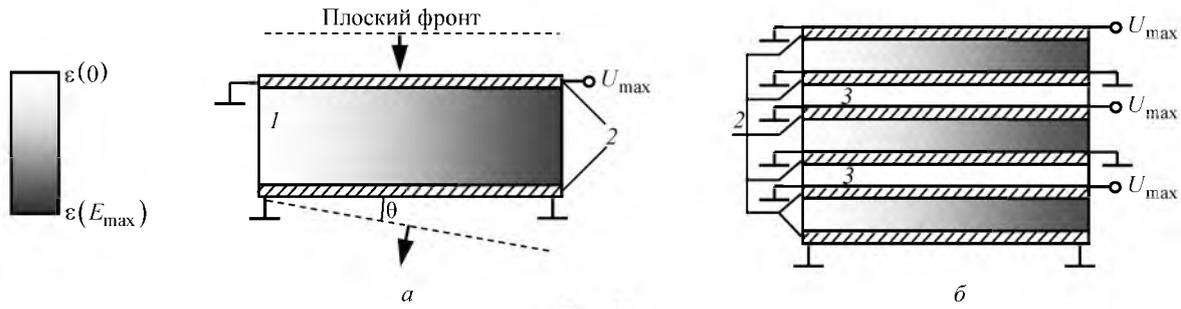


Рис. 1

менение фазового набега СВЧ-сигнала, проходящего через различные участки СЭ-слоя, приводит к наклону фазового фронта волны на угол  $\theta$  по отношению к плоскости апертуры дефлектора.

Максимальный угол сканирования такого дефлектора определяется соотношением

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

где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $\Delta\varphi$  – разность фаз электромагнитного излучения на краях апертуры;  $D$  – размер апертуры дефлектора.

В приближении линейной зависимости  $\varepsilon(E)$  в СЭ-слое толщиной  $d$  величина  $\Delta\varphi$  определяется как

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)d\sqrt{\varepsilon(0)}(1 - 1/\sqrt{K}), \quad (2)$$

где  $d$  – толщина сегнетоэлектрика;  $\varepsilon(0)$  – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика в отсутствие управляющего электрического поля.

Стандартная керамическая технология обеспечивает для  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$  значения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(E) = 100 \dots 500$  с управляемостью  $K \sim (1.5 \dots 2)$  при значениях напряженности электрического поля  $E_{\max} \sim 10 \dots 20$  В/мкм. С учетом параметров СЭ результаты оценок на основе (1) и (2) показывают необходимость использования управляющего напряжения порядка 10 кВ для достижения углов сканирования  $\theta \sim 10^\circ$  при размерах апертуры 15 мм на частоте 78 ГГц. Очевидно, что практическая применимость дефлекторов при таких высоких значениях управляющих напряжений, особенно в импульсных режимах, является большой проблемой.

В настоящей статье предложена конструкция СЭ-дефлектора, которая позволяет существенно повысить эффективность сканирования луча по сравнению с существующими аналогами за счет дисперсионных свойств структур с периодическим изменением волнового сопротивления. Используя теоретические основы построения по-

лосно-пропускающих СВЧ-фильтров [13] проанализируем преимущества применения периодических структур для построения дефлекторов миллиметрового диапазона. Одним из подходов, обеспечивающих эффективный фазовый сдвиг, является построение структур на основе последовательности связанных между собой резонаторов. В рассматриваемой конструкции (рис. 1, б) периодическое изменение волнового сопротивления осуществляется чередованием слоев СЭ диэлектрика 2 и линейного диэлектрика (ЛД) 3. причем толщины СЭ- и ЛД-слоев соответствуют половине и четверти длины волны в материале соответственно. В результате СЭ-слои могут рассматриваться как последовательность полуволновых резонаторов с четвертьволновой связью. Приложение электрического поля к СЭ-слоям приводит к изменению их электрической длины и сдвигу полюсы пропускания всей структуры, т. е. к эффективному изменению фазового набега сигнала, проходящего сквозь структуру дефлектора. Таким образом, формирование градиента диэлектрической проницаемости СЭ-слоев в направлении, перпендикулярном направлению распространения сигнала, будет приводить к отклонению его фазового фронта.

Для оценки эффективности работы предлагаемой конструкции дефлектора был применен матричный аппарат расчета S-параметров электрических цепей на распределенных элементах. Слои СЭ и ЛД рассматривались как отрезки линий передач с соответствующей электрической длиной и волновым сопротивлением. На рис. 2 приведен относительный фазовый набег для плоской волны, проходящей через периодический 1 и однослойный 2 дефлекторы в зависимости от управляемости СЭ при условии равенства суммарной толщины СЭ в обеих конструкциях. Более резкая зависимость для периодической структуры позволяет достичь больших углов сканирования при меньшей управляемости СЭ-материала и, следовательно, при меньшем управляющем напряжении.

Использование периодической структуры неизбежно ведет к снижению рабочей полосы де-

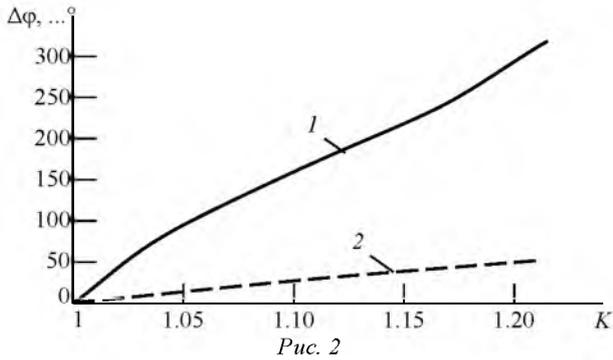


Рис. 2

флектора до значений  $\Delta f/f_{\text{раб}} \sim 1-2\%$ , однако для ряда применений в миллиметровом диапазоне это не является существенным недостатком (например, для антистолкновительного автомобильного радара).

Высокая диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрических материалов предполагает использование согласующих слоев (четвертьволновых трансформаторов). Однако в периодической структуре согласование со свободным пространством выполняется при выборе воздушных зазоров в качестве слоев линейного диэлектрика.

Для расчета угла отклонения главного луча ДН использовалось моделирование методом конечных элементов. Рассматривалось облучениефлектора плоской волной, сформированной внешним источником излучения. Ширина луча диаграммы направленности (по уровню 3 дБ) задавалась размером апертурыфлектора. Основные параметры конструкций периодической и однослойной структурыфлектора, использованные при моделировании, приведены в таблице.

На рис. 3 представлены нормированные диаграммы направленности для источника излучения (1 – при отсутствиифлектора, 2 – однослойныйфлектор, 3 – периодическийфлектор) на частоте 78 ГГц при апертурефлектора около 15 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results / W. Roh, J. Y. Seol, J. Park, B. Lee et al. // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52, iss. 2. P. 106–113.
2. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band / J. Hasch, E. Topak, R. Schnabel, T. Zwick et al. // IEEE Trans. on Microw. Theory Tech. 2012. Vol. MTT-60, iss. 3. P. 845–860.
3. Multilayer Antenna-Filter Antenna for Beam-Steering Transmit-Array Applications / L. Boccia, I. Russo, G. Amendola, G. Massa // IEEE Trans. on Microw. Theory Tech. 2012. Vol. MT-60, iss. 7. P. 2287–2300.

Параметр	Слой	Дефлектор	
		периодический	однослойный
$\epsilon$	СЭ	100	100
	ЛД	1	–
	Согласующий слой ЛД*	–	10
$d$ , мм	СЭ	$\sim 0.2$	$\sim 0.6$
	ЛД	$\sim 1$	–
	Согласующий слой ЛД	–	$\sim 0.3$

\* В однослойной конструкции СЭ-дефлектора необходимо использование согласующих слоев с обеих сторон дефлектора (на рис. 1, а не показаны).

Суммарная толщина СЭ одинакова в обеих структурах, коэффициент управляемости  $K_{\text{max}} = 1.16$ , что соответствует управляющему напряжению в случае периодического дефлектора порядка 1 кВ.

Использование более резкой зависимости относительного фазового набега от управляемости СЭ в периодической структуре дефлектора (рис. 2, 1) приводит к существенному увеличению угла отклонения луча диаграммы направленности (примерно  $10^\circ$ ) по сравнению с однослойной структурой дефлектора (около  $1^\circ$ ).

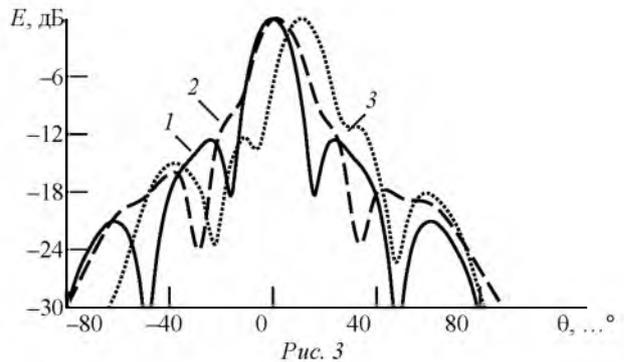


Рис. 3

На основе полученных результатов моделирования можно заключить, что периодическая структура дефлектора имеет существенные преимущества по сравнению с классической однослойной конструкцией.

4. Beam Steering Transmitarray Using Tunable Frequency Selective Surface With Integrated Ferroelectric Varactors / M. Sazegar, Y. Zheng, C. Kohler, H. Maune et al. // IEEE Trans. on Antennas Propag. 2012. Vol. AP-60, iss. 12. P. 5690–5699.
5. Пат. US 4323901 А. ICI H01Q19/06. Monolithic, Voltage Controlled, Phased Array / R. E. Wames, W. F. Hall, W. W. Hall, T. C. Lim. Publ. 06.04.1982.
6. Пат. US 5729239 А, ICI H01Q15/00. Voltage Controlled Ferroelectric Lens Phased Array / B. L. Jaganmohan. Publ. 17.03.1998.

7. Пат. US 0237322, ICI H01Q3/44, H01Q15/24. Ferroelectric Lens / V. Cherman, P. Fihol, S. Gevorgian et al. Publ. 24.09.2009.

8. Пат. US 0343009 A1, ICI H05K9/00. Deflecting Device for Electromagnetic Radiation / A. B. Kozyrev, A. G. Chernokalov, V. N. Osadchiy et al. Publ. 26.12.2013.

9. Smolensky G. A. Ferroelectrics and Related Materials. New York: Academic Press, 1981. 763 p.

10. Ferroelectric Materials for Microwave Tunable Applications / A. K. Tagantsev, V. O. Sherman, K. F. Astafiev, J. Venkatesh et al. // J. Electroceramics. 2003. Vol. 11, iss. 1. P. 5–66.

11. Observation Of An Anomalous Correlation Between Permittivity and Tunability of a Doped (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>(Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> Ferroelectric Ceramic Developed for Microwave Applications / A. B. Kozyrev, A. D. Kanareykin, E. A. Nenasheva, V. N. Osadchy et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95, iss. 1. P. 012908.

12. Minami T. Present Status of Transparent Conducting Oxide Thin-Film Development for Indium-Tin-Oxide (ITO) Substitutes // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516, iss 17. P. 5822–5828.

13. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: в 2 т. Т. 1 / Г. Л. Матей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс; пер. под ред. Л. В. Алексеева, Ф. В. Кушнира. М.: Связь, 1971. 439 с.

R. A. Platonov, A. G. Altynnikov, A. V. Yastrebov, A. K. Mikhailov, A. B. Kozyrev

*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"*

### **Electrically tunable structure with periodic change of wave impedance to deflection of the main beam highly directional emitter in millimeter**

*A new design of electrically tunable multilayer structure (deflector) millimeter wavelength range based on the periodic structure of the ferroelectric/linear dielectric is proposed. Numerical simulation results show the parameters of the deflector increase efficiency of the deflection angle of the main beam of the radiation pattern due to the dispersive properties of the structure in comparison with existing analogues.*

Ferroelectric ceramics, deflector, antenna radiation pattern control, millimeter waves

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.