

Антенные системы с широкоугольным механоэлектрическим сканированием

А. В. Станковский[✉], С. В. Поленга, Е. А. Стригова, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[✉] stankovskiy_a@mail.ru

Аннотация

Введение. В связи с активным развитием спутниковых сетей связи возникает потребность и в новых антеннах для наземных терминалов. Федеральная программа "Сфера" предполагает введение в эксплуатацию новых спутниковых группировок для связи и дистанционного зондирования Земли. Спутниковые группировки "Скиф" (предоставление широкополосного доступа в Интернет) и "Экспресс-РВ" (обеспечение Арктики интернетом и связью) не относятся к геостационарным и требуют постоянного слежения за спутником даже для стационарных терминалов. Отклоняющие структуры, работающие по принципу квазиоптического управления диаграммой направленности (ДН), позволяют разрабатывать сканирующие антенные системы (АС) для организации непрерывной спутниковой связи.

Цель работы. Исследование различных типов диэлектрических структур для отклонения ДН и сканирующих АС на их основе, а также выявление конфигурации с лучшими характеристиками по сравнению с идеальной структурой в виде диэлектрического клина.

Материалы и методы. Математическое моделирование, электродинамическое моделирование при помощи САПР методом конечных элементов и методом конечного интегрирования, а также экспериментальное исследование макета АС в безэховой камере методами измерения в дальней и ближней зонах антенны.

Результаты. Проведено электродинамическое моделирование трех типов отклоняющих диэлектрических структур – аналогов диэлектрического клина: структуры, набранной из диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями; структуры из диэлектрических пластин треугольной формы; структуры из перфорированного диэлектрика, а также сканирующих АС на основе представленных конфигураций. Получены их расчетные ДН. Выявлена структура с лучшими характеристиками, на основе которой изготовлен макет для экспериментального подтверждения результатов электродинамического моделирования. Максимальный угол наклона ДН составил порядка 60°, снижение коэффициента направленного действия (КНД) относительно максимального значения составило 6 дБ, а для углов наклона до 55° деградация КНД не превысила 4 дБ, уровень боковых лепестков не превысил значения –12 дБ (расчетный) и –14 дБ (измеренный).

Заключение. Результаты исследований различных типов структур квазиоптического управления лучом ДН показывают возможность использования данных конфигураций при создании низкопрофильных АС с широкоугольным механоэлектрическим сканированием для организации спутниковой связи как для мобильных потребителей, так и для стационарных, с использованием средне- и низкоорбитальных космических аппаратов.

Ключевые слова: антенная система, механоэлектрическое сканирование, квазиоптическое управление

Для цитирования: Антенные системы с широкоугольным механоэлектрическим сканированием / А. В. Станковский, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 50–62. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-50-62

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет" (номер FSRZ-2023-0008).

Статья поступила в редакцию 11.07.2023; принята к публикации после рецензирования 12.09.2023; опубликована онлайн 29.11.2023

Antenna Systems with Wide-Angle Mechanoelectrical Beam Steering

Andrey V. Stankovsky✉, Stanislav V. Polenga, Yelena A. Strigova, Yury P. Salomatov

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia

✉ stankovskiy_a@mail.ru

Abstract

Introduction. The active development of satellite communication networks determines the need for new antenna systems for ground terminals. The Sphere Federal program implies the commissioning of new satellite constellations for communication and remote sensing of the Earth. The Skif (providing broadband Internet access) and Express-RV (providing the Internet and communications for Arctic) satellite constellations are not geostationary, thus requiring constant satellite tracking even for stationary terminals. Deflecting structures operating on the principle of quasi-optical beam control make it possible to develop scanning antenna systems for organizing continuous satellite communications.

Aim. Investigation of various types of dielectric structures for radiation pattern deflection and scanning antenna systems on their basis, as well as identification of a configuration with improved characteristics compared to the ideal structure in the shape of a dielectric wedge.

Materials and methods. Mathematical modeling, electrodynamic modeling using CAD by the finite element method and the finite integration method, as well as an experimental study of an antenna system prototype in an anechoic chamber by measuring methods in the far-field and near-field of the antenna.

Results. Electrodynamic simulation was carried out for three types of dielectric structures, analogues of a dielectric wedge, including a structure assembled from various dielectrics of fixed sizes with different dielectric constants; a structure of triangular dielectric plates; and a perforated dielectric structure. In addition, scanning antenna systems based on the presented configurations were analyzed. Radiation patterns were obtained for all structural types for various rotation angles of the deflecting systems. The structure assembled from various dielectrics of fixed sizes with different dielectric constants was found to possess the most optimal characteristics. This structure was used to develop a model for experimental confirmation of the conducted electrodynamic simulation. The maximum tilt angle of the radiation pattern was about 60°, the decrease in the directivity relative to the maximum value was 6 dB; for tilt angles up to 55°, the directivity degradation did not exceed 4 dB, the level of the side lobes did not exceed –12 dB (calculated) and –14 dB (measured).

Conclusion. The results of studies into various types of structures for quasi-optical beam control of the radiation pattern show the possibility of using these configurations when creating low-profile antenna systems with wide-angle mechanoelectric scanning for organizing satellite communications for both mobile and stationary consumers using medium earth orbit spacecrafts.

Keywords: antenna system, mechanoelectrical beam steering, quasi-optical beam control

For citation: Stankovsky A. V., Polenga S. V., Strigova Ye. A., Salomatov Yu. P. Antenna Systems with Wide-Angle Mechanoelectrical Beam Steering. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 50–62. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-50-62

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The study was carried out as part of the state task of the Siberian Federal University (number FSRZ-2023-0008).

Submitted 11.07.2023; accepted 12.09.2023; published online 29.11.2023

Введение. Активное развитие спутниковой связи, особенно с использованием средне- и низ-коорбитальных космических аппаратов, приводит к тому, что возникает потребность в специальных антенных системах (АС), которые помогут обеспечить непрерывную работу систем спутниковой связи и передачу данных как для мобильных по-

требителей, когда радиоустройства установлены на подвижном носителе (автомобиль, поезд, судно), так и для стационарных потребителей, с использованием сканирующих АС [1, 2]. Сканирование предполагает перемещение максимума диаграммы направленности (ДН) и может проводиться несколькими способами:

- механическим (перемещение всей антенны по угловым координатам);
- электрическим (изменение токов или напряжений в управляющих устройствах, приводящее к изменению амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве антенны);
- механоэлектрическим (механическое перемещение частей антенны с изменением АФР).

АС с механическим сканированием зачастую не отвечают требованиям к габаритам и скорости перемещения луча ДН. В то же время АС с электрическим типом сканирования, имеющие, как правило, малый профиль и высокое быстродействие, изготавливаются на основе специализированных микросхем зарубежного производства. Высокая стоимость таких компонентов приводит к невозможности создания на их основе антенн, доступных для массового потребителя. АС с механоэлектрическим типом сканирования – это альтернативные решения для создания низкопрофильных сканирующих антенн, представляющие наибольший интерес.

Одним из вариантов таких систем является антенна с механоэлектрическим сканированием на основе квазиоптического принципа управления лучом ДН [3–6]. Возможность изменения направления фазового фронта волны и осуществления управления ДН на основе структур, вносящих линейный фазовый набег, реализованных в виде диэлектрических клиньев, перешла в радиочастотный диапазон из оптики. Такие структуры были исследованы и описаны в [7, 8], и их основными недостатками были определены большие размеры и малые углы наклона ДН. Аналогом клина могут выступать несколько структур, выполненных также из диэлектрических материалов:

- структура, набранная из диэлектриков фиксированных размеров с различными диэлектрическими проницаемостями;
- структура из диэлектрических пластин треугольной формы (многослойная структура с плавным изменением эффективной диэлектрической проницаемости);
- структура из перфорированного диэлектрика (эффективная диэлектрическая проницаемость зависит от коэффициента заполнения пространства материалом и изменяется в зависимости от диаметра отверстий).

Сканирующая система на основе таких структур состоит из двух идентичных "плоских" отклоняющих устройств (дисков), каждое из которых обеспечивает наклон фазового фронта на определенный угол [9]. Взаимный синхронный поворот таких структур вокруг общей оси в противоположные стороны обеспечивает перемещение максимума ДН в угломестной плоскости. Сканирование по азимуту при этом осуществляется совместным поворотом дисков в одном направлении. В качестве диаграммообразующей схемы (ДОС) может быть использована любая антенна с синфазным распределением.

Результаты исследований.

Принцип действия. В предположении, что антенна состоит из двух идентичных систем (дисков) АС1 и АС2, каждая из которых отклоняет фазовый фронт волны на определенный заданный угол θ_0 , могут быть получены зависимости угла отклонения результирующей системы θ_Σ от взаимного положения дисков. Направление максимума ДН регулируется взаимным угловым положением слоев от нулевого до максимального значения, которое определяется углом наклона ДН одной отклоняющей системы. Схематично отклонение фазового фронта волны с помощью диэлектрических клиньев показано на рис. 1, а. Если системы расположены сонаправленно друг другу (рис. 1, а, слева), то результирующее отклонение будет максимальным – $\theta_{\Sigma \max}$. В случае противонаправленного расположения (рис. 1, а, справа) угол отклонения будет равен 0° за счет компенсации [10].

Поворот дисков в азимутальной плоскости в противоположных направлениях на одинаковый угол φ_0 позволяет осуществить сканирование ДН всей АС в угломестной плоскости (рис. 1, б). При этом в азимутальной плоскости максимум ДН будет направлен под углом $\varphi_\Sigma = 0^\circ$. Поскольку две системы вращаются вокруг одной оси, для формирования ДН важно только их взаимное положение, которое определяется одним углом $\varphi_\Delta = 2\varphi_0$. Математически это может быть описано следующим выражением:

$$\theta_\Sigma(\varphi_\Delta) = \arcsin \left[2 \sin \theta_0 \cos \left(\frac{\varphi_\Delta}{2} \right) \right].$$

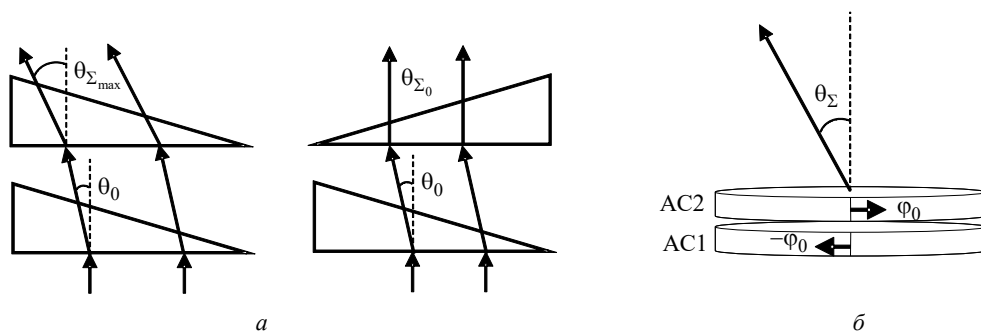


Рис. 1. Принцип работы: *a* – на примере системы из двух диэлектрических клиньев;
б – на примере идентичных отклоняющих систем (дисков)

Fig. 1. Operating principle: *a* – using the example of two dielectric wedges system;
б – using the example of identical deflecting systems

Из этого выражения видно, что, изменяя φ_{Δ} от 0 до 180° , можно изменять θ_{Σ} от нуля до максимального значения, равного $\arcsin(2 \sin \theta_0)$. Данное соотношение выражается из амплитудно-фазового распределения при прохождении плоской волны через каждый из двух слоев.

Таким образом, взаимный синхронный поворот дисков вокруг общей оси в противоположные стороны обеспечит перемещение максимума ДН в угломестной плоскости. Сканирование по азимуту при этом может осуществляться совместным поворотом дисков в одном направлении.

Для теоретических исследований были приняты следующие предположения и упрощения:

- диэлектрик является изотропным материалом;
- для диэлектрика справедлив закон Снеллиуса;

- диэлектрические потери не учитываются;
- влиянием дифракции на краях пренебрегается;
- отраженные волны не рассматриваются.

Структура, набранная из диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями. Проанализирована АС, состоящая из ДОС в виде источника плоской волны и двух отклоняющих структур, набранных из различных диэлектриков фиксированных размеров с различными диэлектрическими проницаемостями (рис. 2, *a*). Толщина отклоняющей структуры в виде диэлектрического клина для управления ДН может изменяться не непрерывно, а дискретно, образуя ступенчатую конфигурацию [11]. При этом также дискретно изменяется и эффективная диэлектрическая проницаемость (ϵ_{ef}). Следовательно, каждую ступень такой системы можно

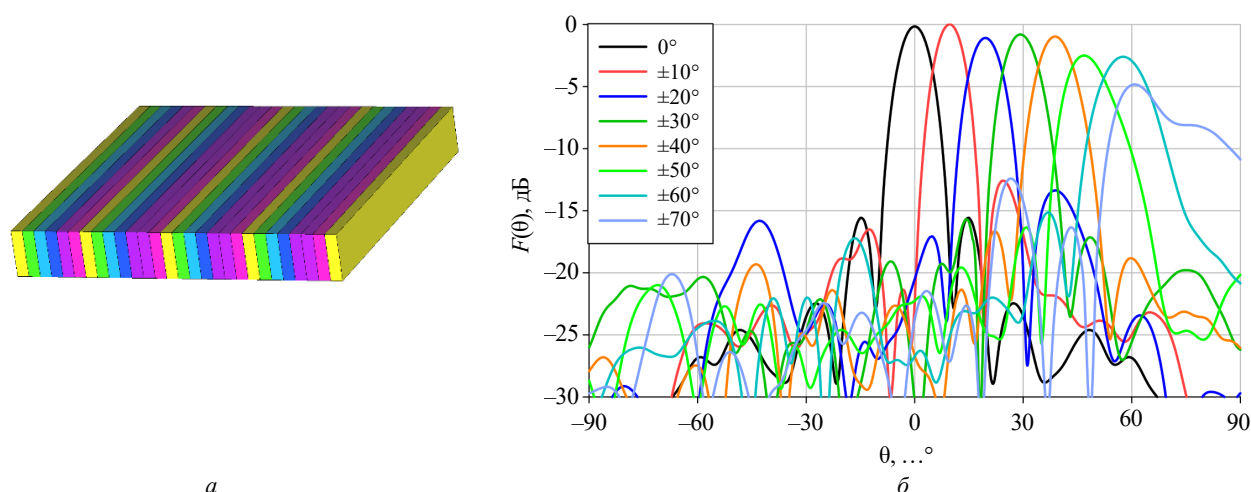


Рис. 2. Структура из диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями (*a*);
ДН при различных углах поворота слоев (*б*)

Fig. 2. A structure from various dielectrics with different dielectric constants (*a*);
radiation patterns at different angles of the layers rotation (*б*)

заменить материалом, диэлектрическая проницаемость которого равна эффективной диэлектрической проницаемости соответствующей ступени структуры.

На рис. 2, б приведены рассчитанные ДН для различных взаимных смещений слоев, значению $\varphi_0 = 0^\circ$ соответствует противоположное расположение отклоняющих структур и, соответственно, $\theta_\Sigma = 0^\circ$. Максимальный угол наклона ДН составил 60° (диапазон сканирования 120°), при этом снижение коэффициента направленного действия (КНД) относительно максимального значения составило не более 5 дБ, а уровень боковых лепестков (УБЛ) не превысил значения -12 дБ.

Структура из диэлектрических пластин треугольной формы. Отклоняющая структура представляет собой набор диэлектрических пластин треугольной формы (рис. 3, а), которые располагаются в несколько слоев со смещением каждого слоя вдоль основания треугольника на величину половины основания. Это позволяет получить более равномерную ε_{ef} , уменьшить области, где волна проходит через воздушное пространство. Толщина одной треугольной пластины выбирается, исходя из [12], учитывая размеры фактически доступных диэлектрических материалов. Ширина ее основания должна быть близкой к $\lambda/2$, а длина рассчитывается в соответствии с заданным углом наклона фазового фронта, необходимостью зонирования [13, 14], а также исходя из размеров апертуры ДОС.

Как видно из графиков (рис. 3, б), угол отклонения ДН составляет порядка 55° при снижении КНД на 4 дБ от максимального значения, а УБЛ не превышает значения -11 дБ.

В отличие от структуры, набранной из материалов с различными диэлектрическими проницаемостями, в конфигурации на основе пластин треугольной формы имеются области, где коэффициент заполнения пространства материалом близок к нулю. Одним из способов уменьшения таких областей является упомянутое ранее смещение слоев, а для уменьшения их влияния на амплитудное распределение в данной структуре дополнительно было рассмотрено действие согласующего (просветляющего) слоя в составе такой АС [15]. Он представляет собой слой диэлектрика фиксированной толщины со средним (относительно минимального и максимального значений ε_{ef}) значением диэлектрической проницаемости ε_r и располагается между ДОС и отклоняющей структурой (рис. 4, а). Электродинамическое моделирование АС с различной толщиной согласующего слоя (от $\lambda/8$ до $\lambda/2$) показало, что наиболее удачным является значение $2\lambda/5$. ДН такой системы представлены на рис. 4, б.

Максимальный угол наклона ДН в данном случае составляет 70° , КНД уменьшается не более чем на 6 дБ от максимального значения, а УБЛ не превышает значения -11 дБ. Для отклонения ДН, равного 60° , снижение КНД составляет 4 дБ. Однако в данном случае увеличивается высота профиля всей АС на близкую к $\lambda/2$ величину.

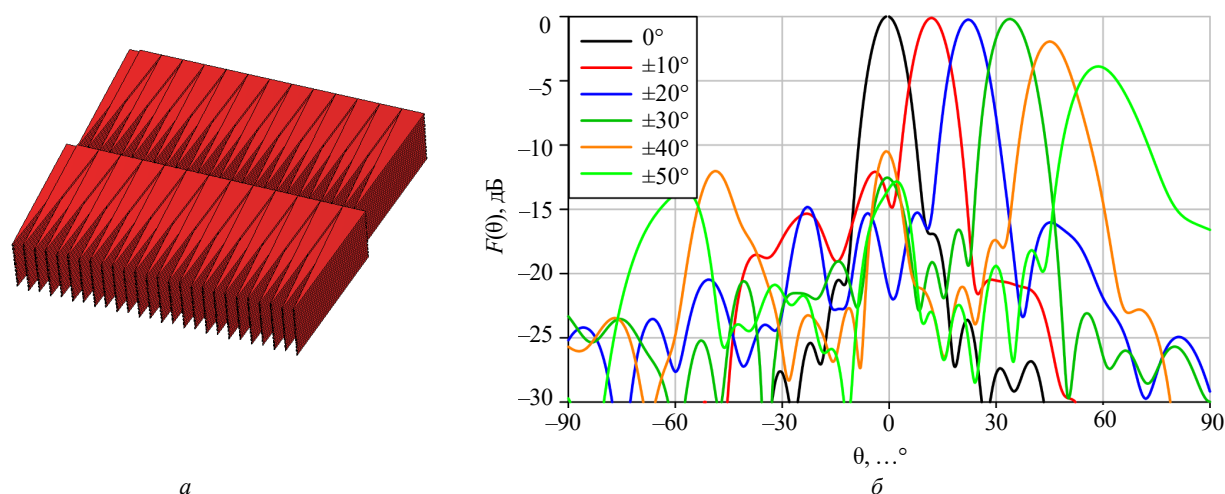


Рис. 3. Структура из диэлектрических пластин треугольной формы (а); ДН при различных углах поворота слоев (б)

Fig. 3. Structure of triangular dielectric plates (a); radiation patterns at different angles of the layers rotation (b)

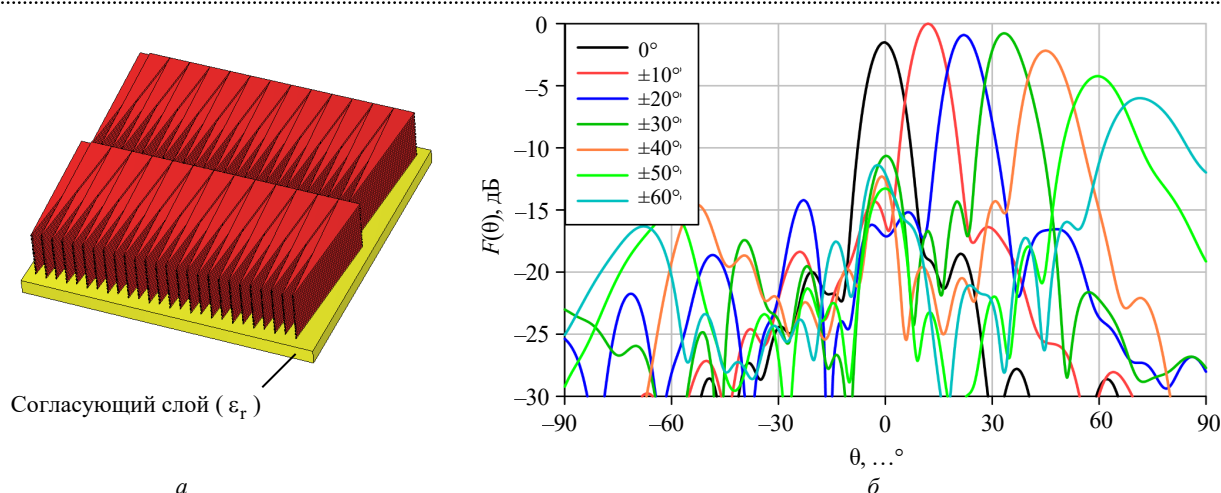


Рис. 4. Структура из диэлектрических пластин треугольной формы с использованием согласующего слоя (а); ДН при различных углах поворота слоев (б)

Fig. 4. Structure of triangular dielectric plates using a matching layer (a); radiation patterns at different angles of the layers rotation (b)

Структура из перфорированного диэлектрика. Еще одним из способов изменения ϵ_{ef} в одном материале является его перфорация [16]. Эффективная диэлектрическая проницаемость также зависит от коэффициента заполнения определенной области пространства (ячейки) диэлектрическим материалом:

$$\epsilon_{\text{ef}} = [k(n-1) + 1]^2,$$

где k – коэффициент заполнения ячейки материалом; n – показатель преломления материала.

При этом с точки зрения реализации наиболее удачным типом перфорации являются круглые отверстия, а ϵ_{ef} будет изменяться в зависимости

от диаметра этих отверстий. Сами отверстия могут располагаться по прямоугольной или гексагональной сетке. Последний вариант является наиболее удачным, так как в этом случае ниже минимально достижимое значение ϵ_{ef} , что, в свою очередь, уменьшает толщину одного слоя и, следовательно, высоту профиля всей системы [17]. Данная структура представлена на рис. 5, а.

Максимальный угол наклона ДН (рис. 5, б) при снижении КНД на 5 дБ составил 58° (диапазон сканирования 115°), а УБЛ не превысил значения -15 дБ. Для наклона, составляющего 64° , наблюдается значительное снижение КНД на 7.8 дБ.

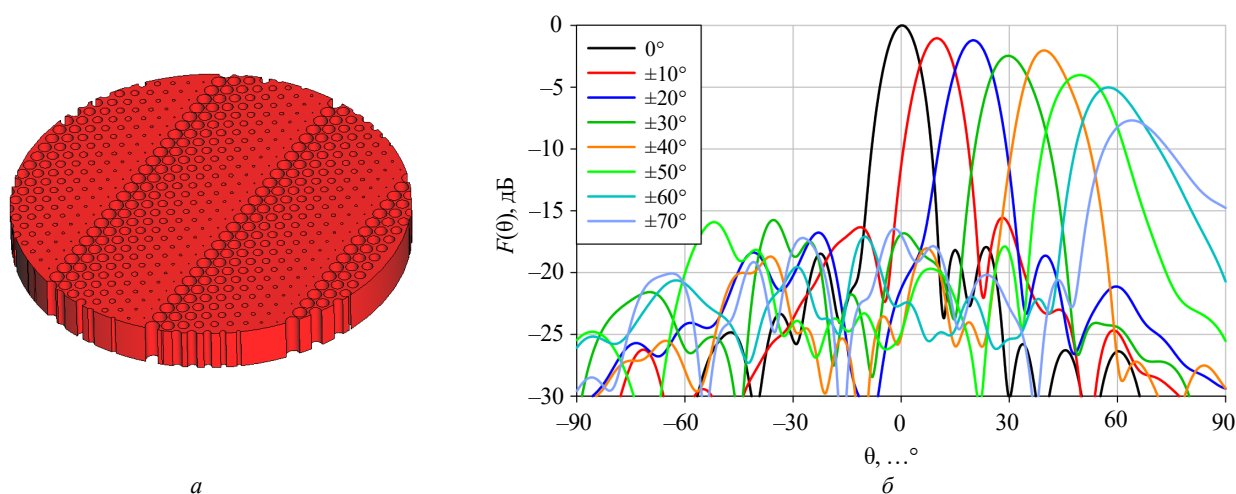


Рис. 5. Структура из перфорированного диэлектрика (а); ДН при различных углах поворота слоев (б)

Fig. 5. Perforated dielectric structure (a); radiation patterns at different angles of the layers rotation (b)

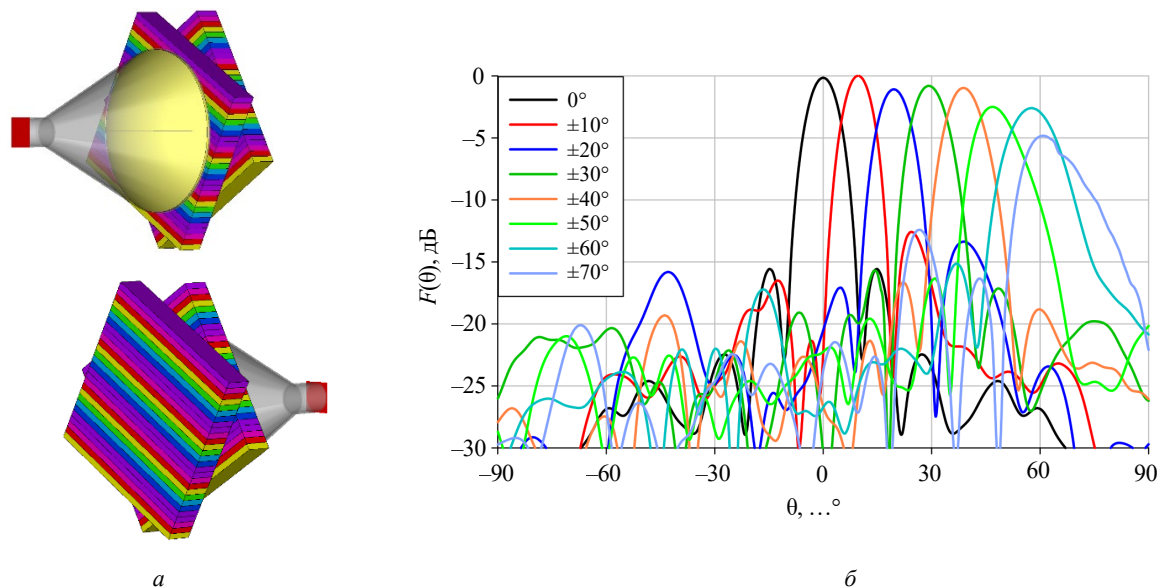


Рис. 6. Модель АС, приближенная к реальной (а); ДН при различных углах поворота слоев (б)
Fig. 6. Realistic antenna system model (a); Radiation patterns at different angles of the layers rotation (b)

Эксперимент. На основе полученных результатов моделирования разработана приближенная к реальной модель сканирующей АС с использованием структуры, набранной из диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями (рис. 6, а). В роли ДОС выступает конический рупор с диэлектрической линзой в виде гиперболоида вращения. Такой рупор в раскрытие обладает равномерным фазовым распределением и спадающим амплитудным.

Из графиков (рис. 6, б) видно, что данная ДОС практически не повлияла на углы наклона ДН. Максимальный угол также составил 60° (диапазон сканирования 120°), при этом снижение КНД относительно максимального значения составило не более 5 дБ, а для углов наклона до 55° деградация КНД составила порядка 3 дБ. УБЛ не превысил значения -12 дБ.

По данной модели был построен макет АС. Слои реализованы из доступных диэлектриков с подходящими характеристиками (таблица): ПВХ – поливинилхлорид; ПС – полистирол; ПЭТ – полиэтилентерефталат; НПВХ – непластифицированный поливинилхлорид.

Слои с $\varepsilon=1.3$ и 2.1 реализованы путем перфорации ближайших по характеристикам материалов, для снижения эффективной диэлектрической проницаемости. Для уменьшения влияния анизотропии значения диаметров отверстий выбраны близкими к значению толщины слоя. Фотографии элементов отклоняющей структуры и отклоняющей структуры в собранном виде представлены на рис. 7.

Несущие элементы АС изготовлены из фанеры. Конструкция позволяет осуществлять угловое смещение каждой отклоняющей структуры на произвольный угол с шагом 5° .

Характеристики определялись в безэховой камере методом измерения в дальней и ближней зонах антенны [18]. Коэффициент отражения в полосе рабочих частот не превысил значения -10 дБ для всех вариантов расположения отклоняющих структур. Измеренные ДН АС на частоте $f_0 = 11.7$ ГГц представлены на рис. 8.

Максимальный угол наклона ДН составил 62° , снижение КНД относительно максимального значения составило 6 дБ, а для угла наклона 55° и меньше деградация КНД не превысила 4 дБ,

Материалы и их параметры
Materials and their parameters

Параметр	Материал							
	Воздух	Перф. вспен. ПВХ	Вспен. ПВХ	Перф. ПС	ПС	ПЭТ	НПВХ 1	НПВХ 2
ε	1	1.3	1.6	2.1	2.4	3	3.4	4
$\text{tg } \delta$ (20 ГГц)	0	–	$2.6 \cdot 10^{-3}$	–	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$9.7 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$

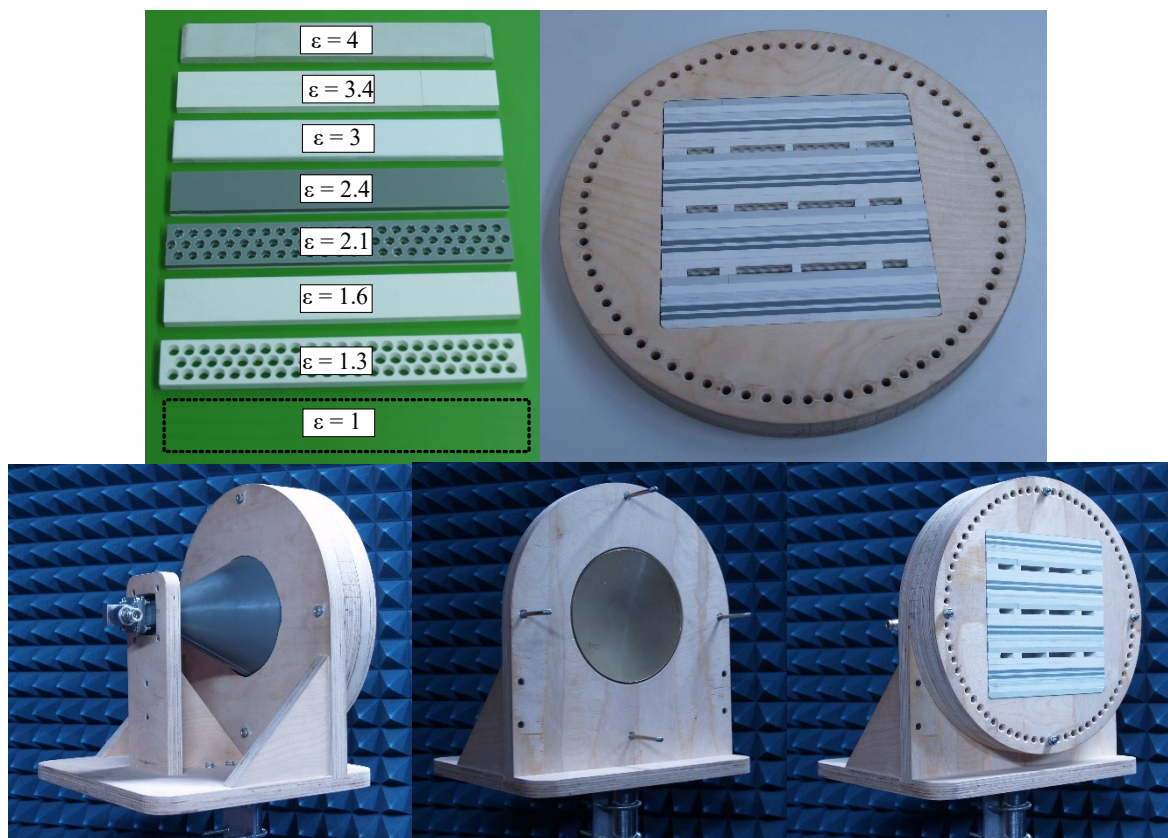


Рис. 7. Элементы отклоняющей структуры и макет сканирующей АС

Fig. 7. Elements of the deflecting structure and the model of the scanning antenna system

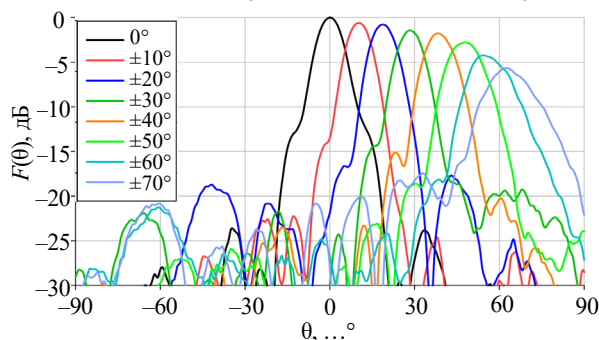


Рис. 8. Экспериментальные ДН при различных углах поворота слоев

Fig. 8. Measured radiation patterns at different angles of the layers rotation

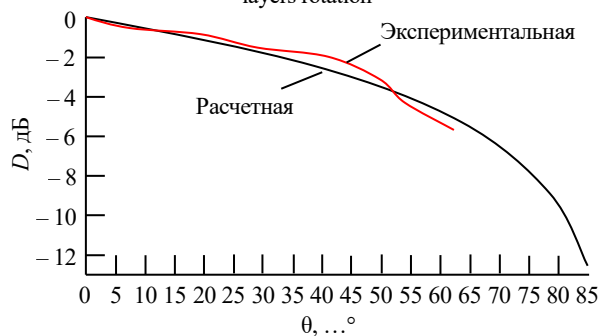


Рис. 9. Зависимость КНД от угла наклона ДН

Fig. 9. Directivity dependence on the inclination angle of the radiation pattern

что несколько хуже, чем в расчетах. При этом УБЛ оказался лучше расчетных и не превысил -14 дБ. В целом снижение КНД за счет уменьшения эффективной апертуры соответствует аналитическому расчету (рис. 9).

На рис. 10 приведены графики для сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Наблюдается хорошая сходимость результатов в области главных лепестков ДН, углах наклона и УБЛ.

Обсуждение. Рассмотренные структуры позволяют произвести наклон фазового фронта волны и отклонение ДН, а также осуществлять сканирование при использовании двух идентичных слоев. Сравнение приведенных ДН для различных типов отклоняющих структур показывает, что при одинаковом расчетном значении наклона ДН в одном слое (30°) результирующие углы наклона ДН АС несколько отличаются. Лучшие результаты по углу наклона ДН и с меньшими значениями деградации КНД и УБЛ были достигнуты на структуре, набранной из диэлектриков с различными диэлектри-

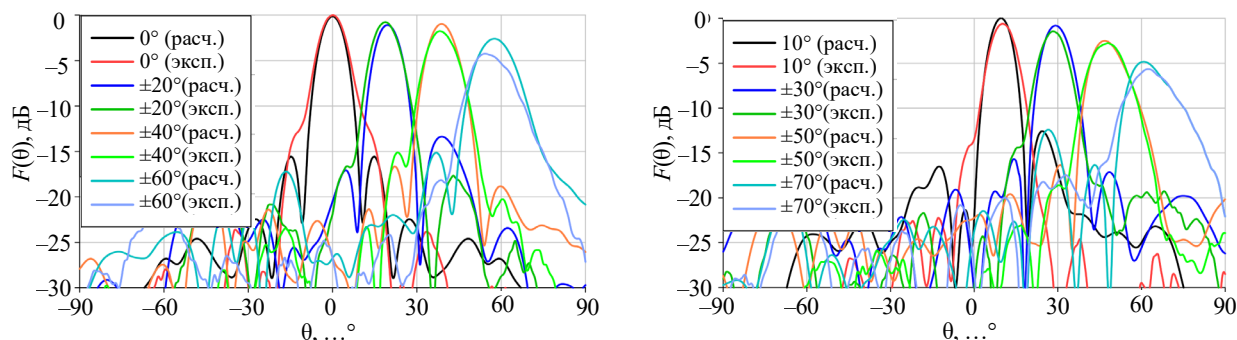


Рис. 10. Совмещенные рассчитанные и измеренные ДН

Fig. 10. Combined calculated and measured radiation patterns

ческими проницаемостями. Исходя из полученных характеристик, габаритных показателей и по причине простоты конструкции, на основе данной структуры был изготовлен макет АС с широкоугольным механоэлектрическим сканированием. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошее совпадение не только по углам наклона ДН, но и по форме ДН в области главного максимума, а также по УБЛ. В рамках проведенных исследований был сделан акцент на возможность управления положением ДН с помощью различных типов отклоняющих структур на основе квазиоптического управления лучом ДН. Поэтому потери, связанные с прохождением волны через диэлектрические структуры, не учитывались. Ко всем рассматриваемым структурам был применен принцип зонирования, который позволил уменьшить массу и толщину отклоняющей структуры при сохранении угла наклона. Зонирование предполагает, что при определенной толщине волны из двух видов диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ($\epsilon_{\text{ef}}^{\text{max}}$ и $\epsilon_{\text{ef}}^{\text{min}}$) выйдут синфазно за счет укладывания целого числа длин волн. Эта толщина зависит от соотношения максимального и минимального значений ϵ_{ef} и может быть рассчитана по формуле

$$T_{\min} = \frac{c \cdot 10^3}{f_0 \left(\sqrt{\epsilon_{\text{ef}}^{\text{max}}} - \sqrt{\epsilon_{\text{ef}}^{\text{min}}} \right)},$$

где $T_{\min}$ – минимальная толщина структуры с зонированием; c – скорость света; f_0 – центральная частота.

Однако в области зонирования отклоняющей структуры имеет место резкий переход в изменении диэлектрической проницаемости, что влияет на амплитудное распределение. Наибольшее влияние заметно на структуре из диэлектрических пластин треугольной формы, в связи с чем и было проведено дополнительное исследование о влиянии согласующего слоя в составе такой АС. Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии такого слоя на ДН, однако в этом случае увеличивается профиль сканирующей АС. Потери в диэлектрике также не учитывались.

В результате предварительных исследований был выбран наиболее подходящий угол отклонения в одном слое структуры, равный 30° . При использовании этого значения получается максимально достижимый расчетный наклон ДН АС, равный 90° . Для $\theta_0 > 30^\circ$ уменьшается продольный размер отклоняющей конфигурации, а, следовательно, при неизменном значении апертуры АС увеличится количество зонирований, что приведет к дополнительным искажениям в амплитудном распределении. Полученный в результате проведенных исследований угол $\theta_\Sigma = 60^\circ$ достигается при $\theta_0 > 25^\circ$, однако в этом случае увеличивается сектор углов взаимного смещения слоев ϕ_Δ для получения тех же значений наклона ДН. Таким образом, угол θ_0 выбирается, исходя из требований к максимальному углу отклонения ДН $\theta_{\Sigma \text{max}}$, а также требований к высоте профиля сканирующей АС.

Одним из возможных направлений исследований является использование в качестве отклоняющей структуры частотно-селективной

поверхности (ЧСП) вместо структур на диэлектрических материалах [19–22].

Заключение. Результаты исследований различных типов структур квазиоптического управления лучом ДН показывают возможность использования данных конфигураций при создании низкопрофильных АС с широкоугольным механоэлектрическим сканированием для организации спутниковой связи как для мобильных потребителей, так и для стационарных потребителей с использованием средне- и низкоорбитальных космических аппаратов. Было рассмотрено и исследовано несколько вариантов отклоняющих структур, проведено сравнение и анализ полученных характеристик. Структура, показавшая лучшие результаты в процессе моделирования, была реализована и измерена. Полученные результаты экспериментального исследования имеют хорошее совпадение с теоретическими. Максимальный угол наклона ДН составил 62° , при этом снижение КНД относительно максимального значения

составило 6 дБ, а для углов наклона менее 55° деградация КНД составила меньше 4 дБ, УБЛ не превысил значения -14 дБ.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о целесообразности разработки низкопрофильной АС с механоэлектрическим сканированием. Толщина одного диска на центральной частоте ($f_0 = 11.7$ ГГц) составляет около 25 мм (для структуры, набранной из диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями, при $\epsilon_{\text{ef}}^{\text{max}} = 4$), толщина двух дисков, соответственно, 50 мм. Следовательно, для создания АС с низким профилем ДОС должна иметь не только синфазное распределение, но и малый профиль (например, низкопрофильная антенная решетка). В результате, полученная АС позволит обеспечить широкоугольное механоэлектрическое сканирование, а следовательно, и осуществлять связь со спутником во время движения как наземного терминала, так и самого спутника.

Авторский вклад

Станковский Андрей Вадимович – математическое моделирование; разработка диэлектрических структур; электродинамическое моделирование сканирующих АС; изготовление макета; экспериментальные исследования АС.

Поленга Станислав Владимирович – разработка и изготовление конструкции макета сканирующей АС; экспериментальные исследования АС.

Стригова Елена Алексеевна – синтез топологий; обработка расчетных и экспериментальных данных.

Саломатов Юрий Петрович – общее руководство проектом.

Author's contribution

Andrey V. Stankovsky, mathematical modeling; development of dielectric structures; electrodynamic modeling of scanning antenna systems; making a model; experimental researches of the antenna system.

Stanislav V. Polenga, development and production of a scanning antenna system layout design; experimental researches of the antenna system.

Yelena A. Strigova, topology synthesis; processing of calculated and experimental data.

Yury P. Salomatov, general scientific project management.

Список литературы

1. Low cost Ku-band electronic steerable array antenna for mobile satellite communications / S. Vaccaro, D. Llorens del Río, J. Padilla, R. Baggen // Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP). Rome, Italy. 11–15 Apr. 2011. IEEE, 2011. P. 471–478.

2. Low-profile scalable phased array antenna at Ku-band for mobile satellite communications / K. Y. Kapusuz, Y. Şen, M. Bulut, İ. Karadede, U. Oğuz // 2016 IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST). Waltham, USA. 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832648

3. Panzner B., Joestingmeier A., Omar A. Ka-band dielectric lens antenna for resolution enhancement of a GPR // 2008 8th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming, China. 02–05 Nov. 2008. IEEE, 2008. P. 31–34. doi: 10.1109/ISAPE.2008.4735132

4. Ravishankar S. Analysis of shaped beam dielectric lens antennas for mobile broadband applications // IWAT 2005. IEEE Intern. Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials. Singapore. 07–09 March 2005. IEEE, 2005. P. 539–542. doi: 10.1109/IWAT.2005.1461135

5. Wang Z. X., Dou W. B. Dielectric lens antennas designed for millimeter wave application // 2006 Joint 31st Intern. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Shanghai, China. 18–22 Sept. 2006. IEEE, 2006. P. 376. doi: 10.1109/ICIMW.2006.368584
6. Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P., Sugak M. I. Concave spherical feed array for Luneberg lens // 2013 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Krasnoyarsk, Russia. 12–13 Sept. 2013. IEEE, 2013. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693605
7. Griffiths H. D., Khan M. R. Antenna beam steering technique using dielectric wedges // IEE Proc. H. Microwaves, Antennas and Propagation. 1989. Vol. 136, iss. 2. P. 126–131.
8. Ghate P., Bredow J. Quasi-Optical Beamforming using Horizontal Dielectric Wedges // 2021 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). IEEE, 2021. P. 505–506. doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704172
9. Дисконная антенна с широкоугольным механоэлектрическим сканированием / А. В. Станковский, А. Д. Немшон, С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов // Электронные средства и системы управления: материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. Томск, 2014. № 1. С. 149–153.
10. Gagnon N., Petosa A. Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam // IEEE transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61, iss. 6. P. 3086–3092. doi: 10.1109/TAP.2013.2253298
11. Beam-Scanning Antenna Based on Near-Electric Field Phase Transformation and Refraction of Electromagnetic Wave Through Dielectric Structures / M. U. Afzal, L. Matekovits, K. P. Esselle, A. Lalbakhsh // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 199242–199253. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033284
12. Alexandrin A. M., Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P. Numerical optimization of the discrete Mikaelian lens // 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491859
13. Gagnon N., Petosa A., McNamara D. A. Thin microwave quasi-transparent phase-shifting surface (PSS) // IEEE transactions on antennas and propagation. 2010. Vol. 58, iss. 4. P. 1193–1201. doi: 10.1109/TAP.2010.2041150
14. Array of hexagonal Fresnel zone plate lens antennas / A. Petosa, S. Thirakoune, I. V. Minin, O. V. Minin // Electron. Lett. 2006. Vol. 42, № 15. P. 834–836. doi: 10.1049/el:20061258
15. Khalaj-Amirhosseini M. Microwave Filters using Waveguides Filled by Multi-Layer Dielectric // 2006 7th Intern. Symp. on Antennas, Propagation & EM Theory. Guilin, China. 26–29 Oct. 2006. IEEE, 2006. P. 1–3. doi: 10.1109/ISAPE.2006.353299
16. AlAjmi A. R., Saed M. A. Perforated dielectric surface wave antenna with directive radiation pattern // 2016 IEEE Conf. on Antenna Measurements & Applications (CAMA). Syracuse, USA. 23–27 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/CAMA.2016.7815763
17. Mrnka M., Raida Z. An Effective Permittivity Tensor of Cylindrically Perforated Dielectrics // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17, iss. 1. P. 66–69. doi: 10.1109/LAWP.2017.2774448
18. Implementation of antenna near-field scanning without using probe position sensors / A. S. Ivanov, K. V. Lemberg, S. V. Polenga, R. M. Krylov, Yu. P. Salomatov // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Omsk, Russia. 21–23 May 2015. IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147334
19. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley-Interscience, 2000. 440 p.
20. Al-Joumayly M. A., Behdad N. A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements // IEEE transactions on antennas and propagation. 2010. Vol. 58, iss. 12. P. 4033–4041. doi: 10.1109/TAP.2010.2078474
21. White C. R., Ebling J. P., Rebeiz G. A wide-scan printed planar K-band microwave lens // 2005 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 2005. Washington, USA, 03–08 July 2005. IEEE, 2005. Vol. 4. P. 313–316. doi: 10.1109/APS.2005.1552652
22. Singh N., Choure K. K., Kumari M. A Survey on Free-Standing Phase Correcting gain enhancement Devices // Intern. J. of Scientific & Engineering Research. 2013. Vol. 4, iss. 7. P. 109–115.

Информация об авторах

Станковский Андрей Вадимович – аспирант по направлению "Антенны, устройства СВЧ и их технологии" (2018), инженер-исследователь, старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; сканирующие антенные системы; квазиоптические антенны.
Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: stankovskiy_a@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6059-5638>

Поленга Станислав Владимирович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; отражательные антенные решетки; квазиоптические антенны, метаматериалы.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: twinlive@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

Стригова Елена Алексеевна – кандидат технических наук (2022), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; спутниковая связь; сканирующие антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

References

1. Vaccaro S., Llorens del Río D., Padilla J., Baggen R. Low Cost Ku-band Electronic Steerable Array Antenna for Mobile Satellite Communications. Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP). Rome, Italy. 11–15 April 2011. IEEE, 2011, pp. 471–478.

2. Kapusuz K. Y., Şen Y., Bulut M., Karadede İ., Oğuz U. Low-profile Scalable Phased Array Antenna at Ku-Band for Mobile Satellite Communications. 2016 IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST). Waltham, USA. 18–21 October 2016. IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832648

3. Panzner B., Joestingmeier A., Omar A. Ka-Band Dielectric Lens Antenna for Resolution Enhancement of a GPR. 2008 8th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming, China. 02–05 November 2008. IEEE, 2008, pp. 31–34. doi: 10.1109/ISAPE.2008.4735132

4. Ravishankar S. Analysis of Shaped Beam Dielectric Lens Antennas for Mobile Broadband Applications. IWAT 2005. IEEE Intern. Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials. Singapore, 07–09 March 2005. IEEE, 2005, pp. 539–542. doi: 10.1109/IWAT.2005.1461135

5. Wang Z. X., Dou W. B. Dielectric Lens Antennas Designed for Millimeter Wave Application. 2006 Joint 31st Intern. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Shanghai, China. 18–22 September 2006. IEEE, 2006, p. 376. doi: 10.1109/ICIMW.2006.368584

6. Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P., Sugak M. I. Concave Spherical Feed Array for Luneberg Lens. 2013 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Krasnoyarsk, Russia. 12–13 September 2013. IEEE, 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693605

7. Griffiths H. D., Khan M. R. Antenna Beam Steering Technique Using Dielectric Wedges. IEE Proc.

H. Microwaves, Antennas and Propagation. 1989, vol. 136, iss. 2, pp. 126–131.

8. Ghatte P., Bredow J. Quasi-Optical Beamforming using Horizontal Dielectric Wedges. 2021 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). IEEE, 2021, pp. 505–506. doi: 0.1109/APS/URSI47566.2021.9704172

9. Stankovsky A. V., Nemshon A. D., Polenga S. V. Salomatov Yu. P. Disk Antenna with a Wide-Angle Mechanoelectrical Beam Steering. Intern. Scientific Conf. on Electronic Devices and Control Systems (EDCS 2014). Tomsk, 2014, no. 1, pp. 149–153. (In Russ.)

10. Gagnon N., Petosa A. Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, iss. 6, pp. 3086–3092. doi: 10.1109/TAP.2013.2253298

11. Afzal M. U., Matekovits L., Esselle K. P., Lalbakhsh A. Beam-Scanning Antenna Based on Near-Electric Field Phase Transformation and Refraction of Electromagnetic Wave Through Dielectric Structures. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 199242–199253. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033284

12. Alexandrin A. M., Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P. Numerical Optimization of the Discrete Mikaelian Lens. 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491859

13. Gagnon N., Petosa A., McNamara D. A. Thin Microwave Quasi-Transparent Phase-Shifting Surface (PSS). IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010, vol. 58, iss. 4, pp. 1193–1201. doi: 10.1109/TAP.2010.2041150

14. Petosa A., Thirakoune S., Minin I. V., Minin O. V. Array of Hexagonal Fresnel Zone Plate Lens Antennas. Electron. Lett. 2006, vol. 42, no. 15, pp. 834–836. doi: 10.1049/el:20061258

15. Khalaj-Amirhosseini M. Microwave Filters using Waveguides Filled by Multi-Layer Dielectric. 2006 7th Intern. Symp. on Antennas, Propagation & EM Theory. Guilin, China. 26–29 October 2006. IEEE, 2006, pp. 1–3. doi: 10.1109/ISAPE.2006.353299

16. AlAjmi A. R., Saed M. A. Perforated Dielectric Surface Wave Antenna with Directive Radiation Pattern. 2016 IEEE Conf. on Antenna Measurements & Applications (CAMA). Syracuse, USA. 23–27 October 2016. IEEE, 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/CAMA.2016.7815763

17. Mrnka M., Raida Z. An Effective Permittivity Tensor of Cylindrically Perforated Dielectrics. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018, vol. 17, iss. 1, pp. 66–69. doi: 10.1109/LAWP.2017.2774448

18. Ivanov A. S., Lemberg K. V., Polenga S. V., Krylov R. M., Salomatov Yu. P. Implementation of Antenna Near-Field Scanning without Using Probe Position Sensors. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Omsk, Russia, 21–23 May 2015. IEEE, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147334

19. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York, Wiley-Interscience, 2000, 440 p.

20. AL-Joumayly M. A., Behdad N. A Generalized Method for Synthesizing Low-Profile, Band-Pass Frequency Selective Surfaces with Non-Resonant Constituting Elements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010, vol. 58, iss. 12, pp. 4033–4041. doi: 10.1109/TAP.2010.2078474

21. White C. R., Ebling J. P., Rebeiz G. A Wide-Scan Printed Planar K-Band Microwave Lens. 2005 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 2005. Washington, USA, 03–08 July 2005. IEEE, 2005, vol. 4, pp. 313–316. doi: 10.1109/APS.2005.1552652

22. Singh N., Choure K. K., Kumari M. A Survey on Free-Standing Phase Correcting gain enhancement Devices. Intern. J. of Scientific & Engineering Research. 2013, vol. 4, iss. 7, pp. 109–115.

Information about the authors

Andrey V. Stankovsky, Postgraduate student in "Antennas, microwave devices and their technologies" (2018), Research Engineer, Senior Lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 30 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; scanning antenna systems; quasi-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: stankovskiy_a@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6059-5638>

Stanislav V. Polenga, Master's degree in Radio Engineering (2009), Senior Lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 50 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; reflectarrays; quasi-optical antennas; metamaterials.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: twinlive@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

Yelena A. Strigova, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Senior Lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 35 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite communication; scanning antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quasi-optical antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>
