

11.1

## Низкопрофильная сканирующая антенная решетка на основе излучающего элемента с апертурной связью

© О.А. Чурсина, Е.А. Литинская, К.В. Плыкин, С.В. Поленга, А.А. Баскова, Р.О. Рязанцев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
E-mail: ylitinskaya@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 марта 2023 г.

В окончательной редакции 24 мая 2023 г.

Принято к публикации 24 мая 2023 г.

Рассмотрена низкопрофильная антенная решетка на основе элемента с апертурной связью с широкоугольным механоэлектрическим сканированием. Сектор сканирования разработанной антенной решетки составляет  $0-60^\circ$  по критерию деградации коэффициента усиления не более чем на 3 dB при профиле всей антенны, равном 48 mm. Разработанный антенный элемент с апертурной связью и двумя линейными ортогональными поляризациями имеет многослойную структуру и коэффициент усиления более 7 dB в диапазоне частот от 10.7–12.75 GHz. Представленная антенная решетка состоит из восьми идентичных подрешеток, каждая из которых состоит из 16 излучателей с апертурной связью. Выполнены моделирование и анализ характеристик направленности антенной решетки на основе элемента с апертурной связью. Сделаны выводы о применимости предлагаемой антенной решетки на основе элемента с апертурной связью в наземных терминалах спутниковой связи, в том числе для низкоорбитальных и среднеорбитальных спутниковых систем связи.

**Ключевые слова:** антенная решетка, микрополосковый излучатель с апертурной связью, широкоугольное сканирование, спутниковая связь.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55857.19563

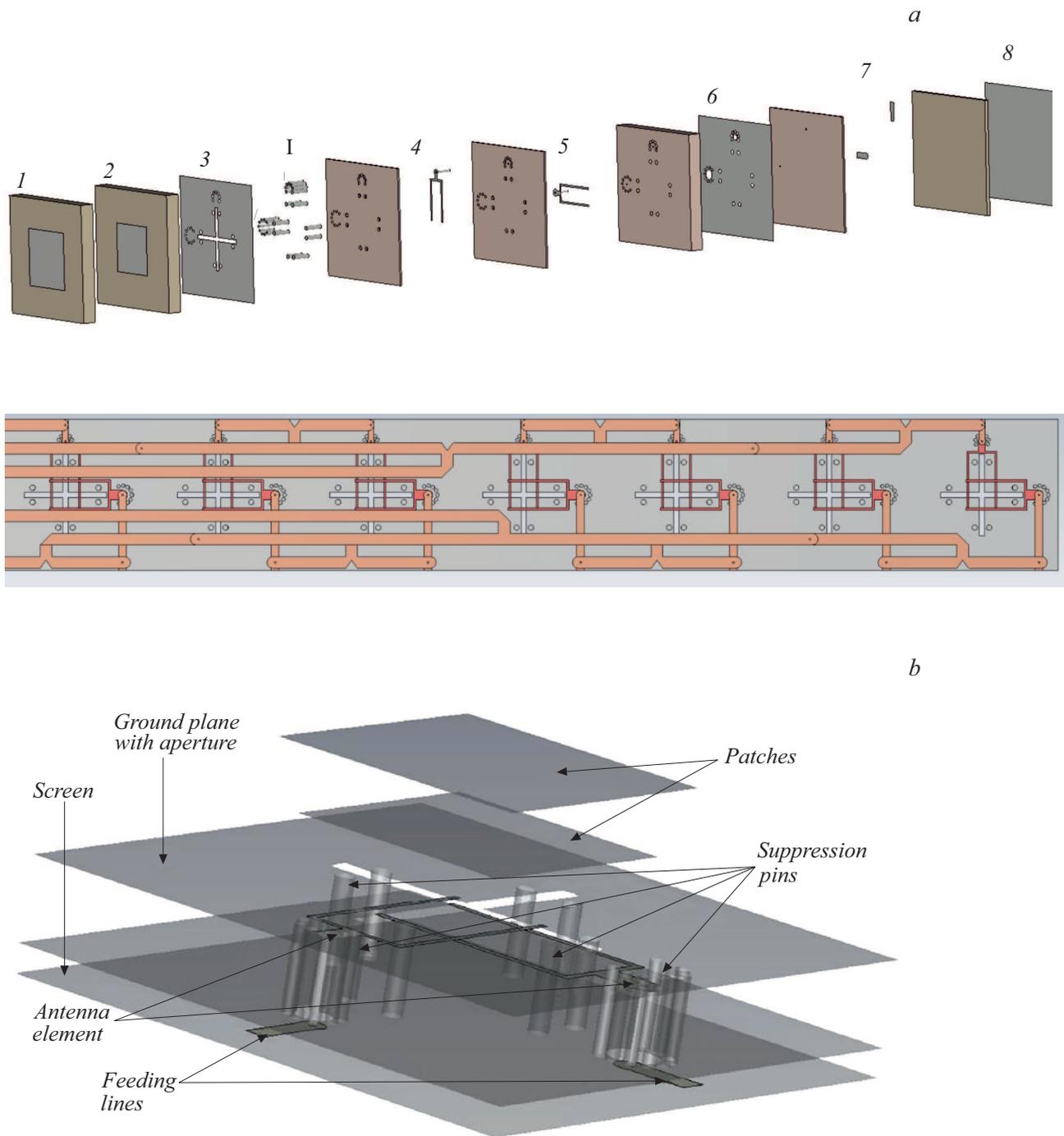
Доступность телекоммуникационных услуг ограничена географическим положением потребителя. На территориях с развитой инфраструктурой потребителям предоставляется широкополосный доступ к информационным услугам (телефония, телевидение, радио, сеть Интернет) посредством наземных сетей связи. Однако в труднодоступных и удаленных районах одним из доступных способов связи с внешним миром остается спутниковая связь. Системы спутниковой связи нового поколения с использованием низколетящих, высокоэллиптических и геостационарных космических аппаратов позволяют обеспечить доступ к телекоммуникационным услугам независимо от местоположения потребителя [1–3]. Важнейшим функциональным узлом данных систем является антенная система наземного терминала, которая должна обладать широким сектором углов сканирования, высокой эффективностью, малыми габаритами, высоким быстродействием и небольшой стоимостью. В работах [4,5] была предложена микрополосковая антенная решетка (АР) типа „Жалюзи“ с механоэлектрическим сканированием. АР состоит из восьми механически вращающихся в угломестной плоскости вдоль собственной оси подрешеток. Пространственное перемещение луча АР в плоскости сканирования осуществляется за счет поворота подрешеток и введения линейной фазовой задержки по подрешеткам. Профиль АР составил не более 50 mm при сохранении характеристик направленности в секторе сканирования  $0-60^\circ$  по критерию ухудшения на-

правленности не более чем на 2.5 dB. Однако рабочая полоса разработанной АР не превышает 5% ввиду диаграммообразующей схемы подрешеток, реализованной в виде последовательно-параллельного делителя мощности, и узкополосности самого микрополоскового элемента.

Целью настоящей работы является создание малогабаритной, низкопрофильной и технологичной в изготовлении антенной системы с механоэлектрическим широкоугольным сканированием типа „Жалюзи“ с широкой полосой рабочих частот и двумя ортогональными поляризациями.

Для достижения широкого рабочего диапазона длин волн наиболее перспективны многослойные антенны с апертурной связью, обеспечивающие при минимальных габаритах более широкую полосу частот по сравнению с антеннами с двумя слоями металлизации [6–8].

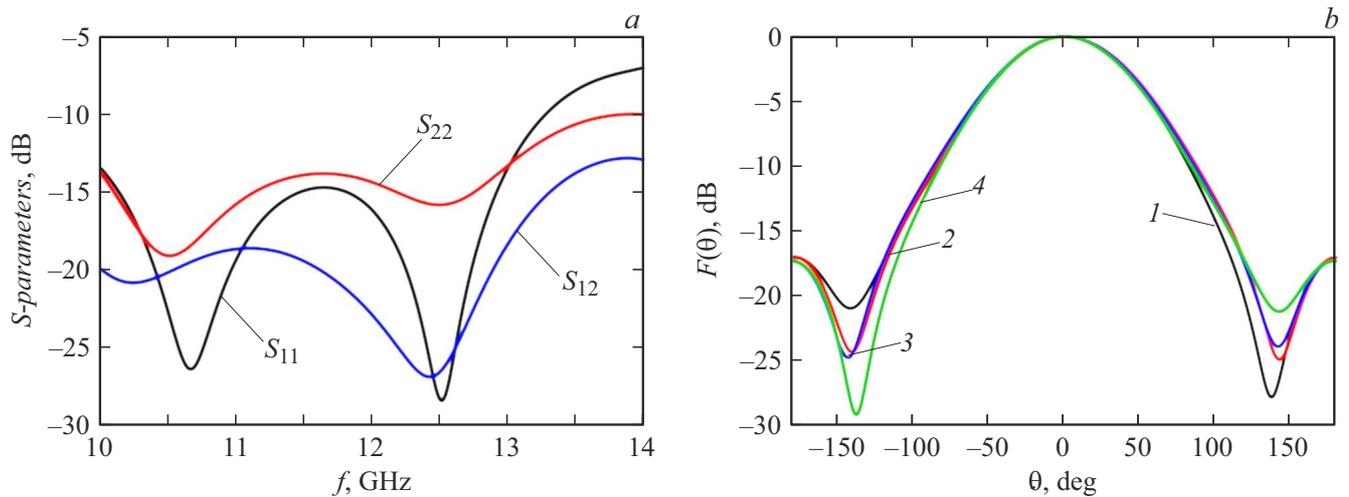
В настоящей работе предложено использование многослойного микрополоскового антенного элемента с апертурной связью в АР с механоэлектрическим сканированием типа „Жалюзи“. Разработанный антенный элемент имеет две ортогональные линейные поляризации и состоит из восьми слоев (верхний фрагмент на рис. 1, а). В диэлектрических слоях 1 и 2 расположены пассивные микрополосковые излучатели для расширения рабочей полосы частот. В металлическом слое 3 находится крестообразная излучающая щель, возбуждаемая микрополосковыми линиями с вертикальной и горизонтальной поляризацией, которые расположены в



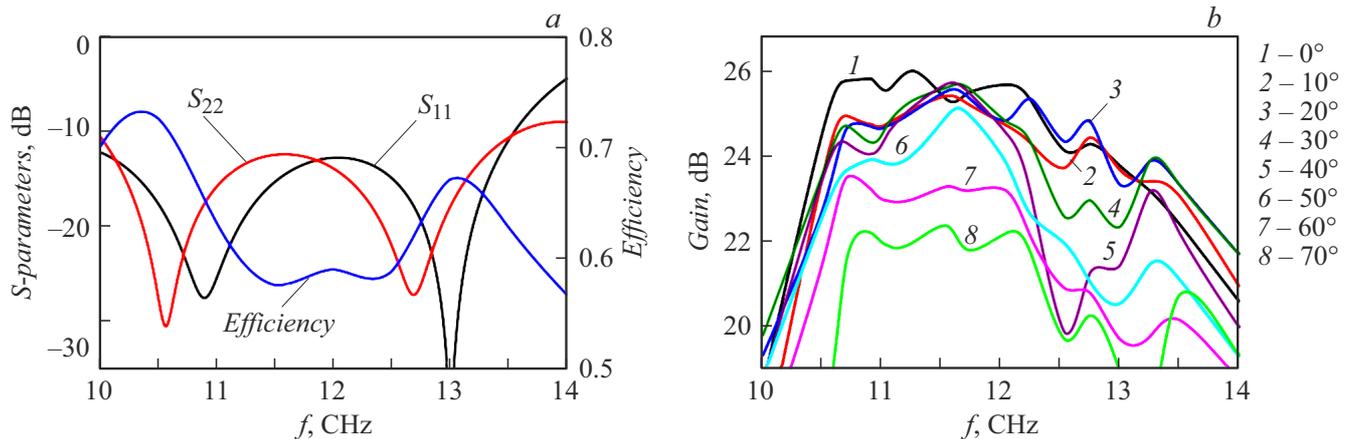
**Рис. 1.** *a* — послойная модель разработанного излучающего элемента с апертурной связью и двумя ортогональными линейными поляризациями (вверху) и сегмент модели делителя мощности подрешетки (внизу). *b* — основные элементы излучателя.

слоях 4 и 5 соответственно [9,10]. Микрополосковые возбуждающие линии имеют вилкообразную форму, что позволяет улучшить уровень коэффициента отражения в элементе до  $-14$  dB в полосе от 10.7 до 12.75 GHz (рис. 2, *a*) [11]. Микрополосковые линии, возбуждающие щели, запитываются от микрополосковых питающих линий, которые находятся в слое 7. Слой 6 необходим для уменьшения взаимного влияния микро-

полосковых линий, находящихся в слоях 4, 5 и 7, и улучшения согласования. Слой 8 экранирующий. Переходы со слоя на слой осуществляются через металлизированные отверстия. Следует отметить предложенные металлические штыри I, соединяющие слои 3–6, необходимые для компенсации индуктивности металлизированных отверстий (рис. 1, *b*). Используемые в исследуемом антенном элементе с апертурной связью



**Рис. 2.** *a* — частотные зависимости  $S$ -параметров исследуемого антенного элемента с апертурной связью. *b* — диаграммы направленности антенного элемента с апертурной связью на частоте 11.75 GHz для двух ортогональных поляризаций (линии 1 и 2 — в  $E$ - и  $H$ -плоскостях для вертикальной поляризации соответственно, линии 3 и 4 — в  $E$ - и  $H$ -плоскостях для горизонтальной поляризации соответственно).



**Рис. 3.** *a* — частотные зависимости  $S$ -параметров и КИП исследуемой подрешетки на основе излучающего элемента с апертурной связью. *b* — частотные зависимости КУ антенной решетки на основе излучающего элемента с апертурной связью при различных углах сканирования  $\theta$ .

диэлектрические материалы Rogers RT5880 (между слоями 1 и 2, слоями 2 и 3, слоями 7 и 8 толщиной 1.575 mm) и Rogers RO4003C (между слоями 3 и 4, слоями 4 и 5, слоями 6 и 7 толщиной 0.203 mm и между слоями 5 и 6 толщиной 1.524 mm) имеют диэлектрические проницаемости  $\epsilon = 2.2$  и 3.55 соответственно.

Уровни коэффициентов отражения для каждого входа исследуемого антенного элемента с апертурной связью не превышают  $-14$  dB в полосе частот от 10.7–12.75 GHz (рис. 2, *a*), для двух ортогональных поляризаций развязка между входами составила менее  $-19$  dB. Расчетные диаграммы направленности элемента с апертурной связью для двух ортогональных поляризаций приведены на рис. 2, *b*. Коэффициент уси-

ления (КУ) исследуемого элемента с апертурной связью превышает 7 dB в полосе частот 10.7–12.75 GHz.

На основе антенного элемента с апертурной связью и двумя ортогональными поляризациями была разработана подрешетка, состоящая из  $16 \times 1$  элементов. Для возбуждения 16 излучателей в подрешетке использовались бинарные микрополосковые делители с параллельной схемой деления мощности (нижний фрагмент на рис. 1, *a*). Для уменьшения размера подрешетки в плоскости сканирования делители мощности в подрешетке расположены на слоях печатной платы, находящихся под излучателями. Переход от микрополосковых линий, возбуждающих излучатели, к микрополосковым делителям осуществляется также через металлизированные отверстия. Размер подрешетки для

АР составил  $208 \times 14 \times 9$  mm. Уровень коэффициента отражения разработанной подрешетки на основе элемента с апертурной связью не превышает  $-10$  dB для двух ортогональных поляризаций. Апертурный коэффициент использования поверхности (КИП) подрешетки составил более 60% в полосе частот от 10.7 до 12.75 GHz (рис. 3, а), при этом КИП микрополосковой подрешетки в ранее разработанной АР с механоэлектрическим сканированием [4,5] не превышает 30% в полосе частот 11–11.6 GHz ввиду увеличения размеров подрешетки для размещения делителя мощности. Потери на рассогласование в подрешетке и материалах не превышают 2 dB в рабочей полосе частот.

На основе представленной подрешетки была создана АР с механоэлектрическим сканированием типа „Жалюзи“. АР состоит из восьми идентичных подрешеток, общие размеры составляют  $208 \times 152 \times 9$  mm. КИП рассматриваемой решетки составил более 50% в полосе частот 10.75–12.5 GHz при нулевом отклонении луча. Сканирование в угломестной плоскости достигается за счет поворота вокруг собственной оси подрешеток и введения линейной фазовой задержки по подрешеткам. Зависимость КУ исследуемой АР от частоты при различных углах поворота подрешеток показана на рис. 3, б. Деградация КУ антенной решетки на основе элемента с апертурной связью составила не более 1 dB в секторе углов сканирования  $0-40^\circ$  в полосе частот 10.75–12 GHz, при повороте подрешеток на  $50^\circ$  КУ снижается на 2.2 dB, при  $60^\circ$  — на 3 dB. При повороте подрешеток на угол более  $70^\circ$  усиление антенны снижается на 4 dB и более. Снижение КУ исследуемой АР на основе элемента с апертурной связью при углах сканирования больше  $40^\circ$  главным образом обусловлено затенением подрешетками друг друга. Сужение рабочей полосы АР по сравнению с полосой предложенного элемента с апертурной связью происходит ввиду увеличения уровня дифракционных лепестков на верхних частотах рабочего диапазона, поскольку шаг решетки (расстояние между центрами соседних подрешеток) превышает  $0.9\lambda$ . Отметим, что сектор сканирования у ранее разработанной микрополосковой АР типа „Жалюзи“ составляет  $0-70^\circ$  по критерию ухудшения направленности не более чем на 3 dB, уменьшение сектора сканирования у предложенной АР связано с особенностями расположения в подрешетке излучателей и делителя мощности, обеспечивающего возбуждение двух ортогональных линейно поляризованных сигналов. Однако разработанную АР на основе излучателя с апертурной связью предполагается использовать в наземных терминалах низкоорбитальных и среднеорбитальных спутниковых систем, для которых достаточно обеспечить сектор сканирования лучом  $0-60^\circ$ .

Все представленные результаты исследования были получены путем численного моделирования методом

конечного интегрирования во временной области и методом конечных элементов в частотной области.

Таким образом, в представленной работе предложена АР на основе излучающего элемента с апертурной связью, исследованы ее характеристики направленности. Показана возможность использования микрополосковых излучателей с апертурной связью в антеннах с механоэлектрическим сканированием (типа „Жалюзи“) для расширения рабочей полосы частот и уменьшения габаритов антенны. Полученные результаты исследования могут быть использованы в создании низкопрофильных АР для функционирования в наземных терминалах низкоорбитальных и среднеорбитальных спутниковых систем связи.

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *OneWeb* [Электронный ресурс]. URL: <https://oneweb.net/> (дата обращения: 21.03.2023).
- [2] *Starlink* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.starlink.com/> (дата обращения: 21.03.2023).
- [3] *Гонец* [Электронный ресурс]. URL: <https://gonets.ru/> (дата обращения 21.03.2023).
- [4] Е.А. Литинская, В.С. Панько, С.В. Поленга, Ю.П.Саломатов, Успехи современной радиоэлектроники, № 1, 24 (2015).
- [5] Y.A. Litinskaya, S.V. Polenga, A.V. Stankovsky, Yu.P. Salomatov, in *2018 XIV Int. Scientific-Technical Conf. on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)* (Novosibirsk, Russia, 2018), vol. 1, pt 3, p. 238–242. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546218
- [6] П.П. Мальцев, О.С. Матвеев, Д.Л. Гнатюк, А.П. Лисицкий, Ю.В. Фёдоров, Д.В. Крапухин, С.Л. Бунегина, Нано- и микросистемная техника, № 10 (147), 45 (2012).
- [7] Z. Lai, J. Jiang, F. Zhu, Y. Chen, in *2020 12th Int. Conf. on communication software and networks (ICCSN)* (Chongqing, China, 2020), p. 182–185. DOI: 10.1109/ICCSN49894.2020.9139121
- [8] M. Abdullah-Al-Mamun, M.S. Anower, M.R. Billah, S. Datto, in *2021 Int. Conf. on computer communication and informatics (ICCCI)* (Coimbatore, India, 2021), p. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402296
- [9] J. Liang, H. Zhang, Z. Yuan, in *2022 IEEE 10th Asia-Pacific Conf. on antennas and propagation (APCAP)* (Xiamen, China, 2022), p. 1–2. DOI: 10.1109/APCAP56600.2022.10069174

- [10] Z. Siddiqui, M. Sonkki, K. Rasilainen, J. Chen, M. Berg, M.E. Leinonen, A. Pärssinen, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **71** (4), 2908 (2023). DOI: 10.1109/TAP.2023.3240032
- [11] K.Y. Kapusuz, Y. Sen, M. Bulut, I. Karadede, U. Oguz, in *2016 IEEE Int. Symp. on phased array systems and technology (PAST)* (Waltham, MA, USA, 2016), p. 1–4. DOI: 10.1109/ARRAY.2016.7832648