

11.1

Антенная решетка Ки-диапазона частот на основе резонатора Фабри–Перо

© С.В. Поленга, Е.А. Литинская, А.В. Станковский, Р.О. Рязанцев, А.М. Александрин,
Е.Р. Гафаров, А.А. Ерохин, Ю.П. Саломатов

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

Поступило в Редакцию 7 марта 2023 г.

В окончательной редакции 24 апреля 2023 г.

Принято к публикации 2 мая 2023 г.

Разработана и исследована антенная решетка на основе резонаторов Фабри–Перо в радиодиапазоне. Предложен элемент антенной решетки в виде резонатора Фабри–Перо с круговой поляризацией, полупрозрачное зеркало которого реализовано в виде двухслойной частотно-селективной поверхности. Разработан делитель мощности на основе тонких волноводов для питания антенной решетки размерностью 2×8 . Изготовлен макет антенной решетки, делитель мощности выполнен методом лазерной резки из листового алюминия, полупрозрачный слой резонатора изготовлен методом фотолитографии. Коэффициент использования поверхности антенной решетки составил около 50% в полосе частот 5% при коэффициенте стоячей волны по напряжению не более 1.5.

Ключевые слова: резонатор Фабри–Перо, антенная решетка, спутниковая связь.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55727.19550

Активное развитие спутниковой связи и введение в эксплуатацию новых спутниковых группировок в последние годы предъявляют дополнительные требования к наземным терминалам спутниковой связи. Новые спутниковые группировки „Экспресс-РВ“, „Скиф“ не являются геостационарными и требуют постоянного слежения за спутником даже для стационарных терминалов. Спутниковые терминалы на основе параболических зеркал с механическим сканированием зачастую не удовлетворяют предъявляемым требованиям к профилю антенной системы и обладают ограниченной скоростью перемещения луча.

Хотя антенны на основе иностранных специализированных микросхем (Beamformer) и имеют высокое быстродействие и относительно малый профиль, но высокая стоимость компонентов на данный момент делает такие устройства недоступными для массового потребителя.

Настоящая работа посвящена созданию низкопрофильной антенной системы с невысокой стоимостью производства для использования в терминалах спутниковой связи с механическим сканированием.

Резонатор Фабри–Перо является основным видом оптического резонатора и представляет собой два соосных, параллельно расположенных и обращенных друг к другу зеркала, между которыми может формироваться резонансная стоячая оптическая волна. В лазерной технике одно из зеркал обычно делается полупрозрачным для вывода излучения в этом направлении. В последнее десятилетие началось активное исследование резонаторов Фабри–Перо для применения в радиочастотном диапазоне. При достаточно простой конструкции излучатель на основе резонатора Фабри–Перо позволяет

обеспечить высокий коэффициент использования поверхности (КИП). У одиночных резонаторов коэффициент усиления (КУ) достигает 17–20 dBi при КИП 60–80% [1–4]. Хотя увеличение размеров резонатора и ведет к увеличению КУ, но при этом снижается КИП такого излучателя в первую очередь за счет снижения эффективности работы периферийной части резонатора. Основным недостатком резонатора Фабри–Перо является узкая полоса рабочих частот, так как условие резонанса достигается лишь на одной частоте. За счет использования в качестве полупрозрачного зеркала специальной частотно-селективной поверхности (ЧСП), которая имеет положительный наклон фазы отраженной волны [4,5], условие резонанса может удовлетворяться в довольно широком частотном диапазоне, достаточном для функционирования в некоторых системах связи. Известны случаи достижения полосы рабочих частот 30% и более [6,7], однако КИП таких резонаторов находится на уровне 20–40%. В открытых источниках не представлены образцы резонаторов с полосой более 10% и КИП более 50%. В настоящей работе за основу был взят ранее разработанный резонатор Фабри–Перо, работающий с линейной поляризацией [4], обладающий КИП около 60% в диапазоне частот от 12 до 12.7 GHz. Такой элемент обладает малыми фазовыми и амплитудными искажениями в раскрыве. Для возбуждения разработанного ранее резонатора с круговой поляризацией было предложено использование короткозамкнутого отрезка плоского прямоугольного волновода с двумя Г-образными щелями в широкой стенке (рис. 1, а). Такой способ организации питания позволил достичь коэффициента эллиптичности более 0.8 и коэффициента

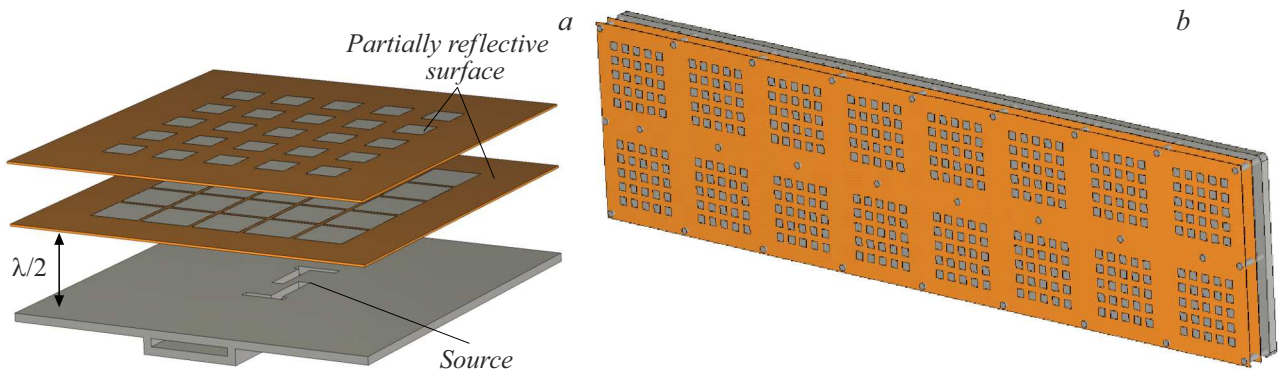


Рис. 1. *a* — структура резонатора Фабри–Перо; *b* — модель антенной решетки на основе резонаторов Фабри–Перо.

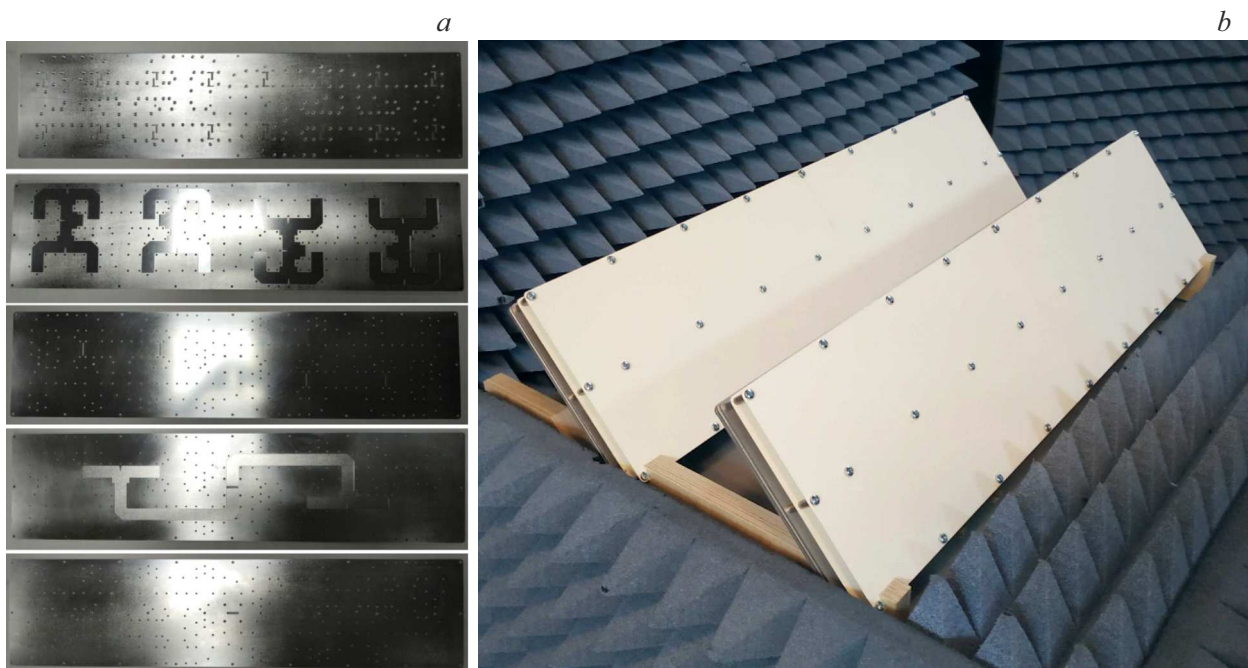


Рис. 2. *a* — слои делителя мощности антенной решетки; *b* — макеты антенных решеток на основе резонаторов Фабри–Перо.

стоячей волны по напряжению не более 1.5 в рабочей полосе частот. Полупрозрачное зеркало реализовано в виде двухслойной ЧСП с положительным наклоном фазы отраженной волны.

На основе полученного излучателя была разработана антенная решетка размерностью 2×8 (рис. 1, *b*). Шаг решетки составил около 3.8λ , так как именно такой размер излучателя оказался оптимальным с точки зрения КИП. Для возбуждения резонаторов в составе решетки была создана схема деления мощности на основе тонких волноводов. Основным требованием к разрабатываемому делителю мощности была минимизация потерь, габаритов и стоимости изготовления. Разработанная схема питания состоит из пяти плоских алюминиевых слоев с топологией, реализованной методом лазерной резки. В первом слое (рис. 2, *a*) расположены излучатели, второй слой содержит две ступени бинарных делителей

мощности, третий слой содержит переходные щели с четвертого на второй слой, в четвертом слое располагаются две ступени бинарных делителей мощности, в пятом слое располагается входной порт. Трансформатор для согласования входа антенны со стандартным волноводом WR75 выполнен в виде семи плоских слоев алюминиевых пластин разной толщины, реализованных методом лазерной резки. Соединение слоев делителя мощности между собой производилось при помощи винтов М3. Общая толщина делителя мощности составила 9 mm, всей антенной решетки — 38 mm. На расстоянии от делителя мощности расположена двухслойная ЧСП, топология которой была реализована методом фотолитографии на материале Карра 438, являющемся аналогом материала FR4 со сниженными потерями ($\text{tg } \delta = 0.005$). Слои ЧСП закреплены на проставках, выполненных из алюминиевой трубки с внешним диаметром 6 mm,

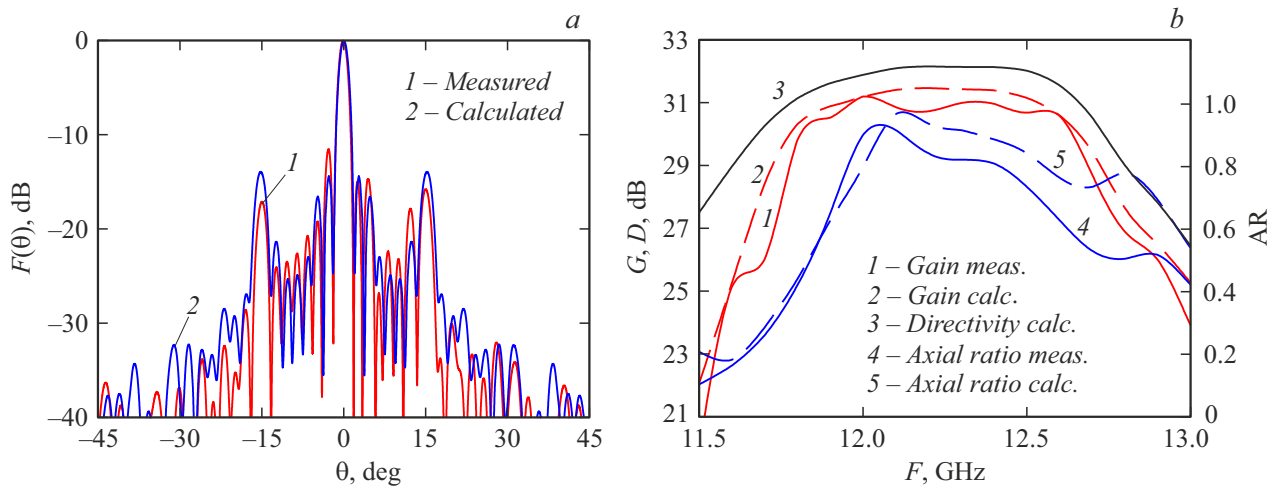


Рис. 3. *a* — рассчитанная и измеренная диаграммы направленности антенной решетки в горизонтальной плоскости; *b* — зависимости коэффициентов усиления и эллиптичности от частоты.

погрешность изготовления проставок не превышает $\pm 25 \mu\text{m}$. Одновременно было изготовлено два макета антенны (рис. 2, *b*) для возможного их применения в составе антенной решетки типа „Жалюзи“ [8] или в составе одной увеличенной антенной решетки, для этого был изготовлен бинарный делитель мощности при помощи тех же технологий.

Измерение проводилось методом сканирования в ближнем поле антенны планарным сканером [9]. Для достижения характеристик, близких к расчетным, номинальные размеры высот ЧСП были скорректированы на величину не более 0.2 mm. Необходимость в коррекции размеров макета может быть связана с погрешностями, допущенными при производстве печатных плат ЧСП. Измеренный коэффициент стоячей волны по напряжению в полосе частот 11.8–12.5 GHz не превысил 1.5, что соответствует расчетным значениям.

Измеренная и рассчитанная диаграммы направленности на частоте 12.5 GHz приведены на рис. 3, *a*. Наблюдается довольно высокий уровень дифракционных лепестков в направлении $\pm 15^\circ$, что связано с большим шагом решетки и неравномерным итоговым амплитудным распределением в раскрыве антенны. Снижение дифракционных лепестков возможно за счет выравнивания амплитудного распределения, что может быть осуществлено путем уменьшения размеров резонаторов. Однако в данном случае наблюдается снижение КИП решетки за счет взаимодействия соседних резонаторов. Кроме того, для сохранения КУ потребуются большее количество излучателей, что приведет к усложнению схемы питания и увеличению потерь в ней. В вертикальной плоскости уровень бокового излучения не превышает -11 dB, ширина диаграммы направленности составляет около 7° . Тем не менее апертурный КИП антенной решетки составил более 60% в полосе частот около 5%. На рис. 3, *b* представлены измеренные и расчетные зависимости коэффициентов усиления и эл-

липтичности от частоты. Суммарные потери в делителе мощности и резонаторе, оценка которых проведена по разнице коэффициента направленного действия и КУ (рис. 3, *b*), находятся на уровне 1.1 dB. Итоговый КИП составил около 50% в полосе частот 5%. Измеренный коэффициент эллиптичности в направлении максимума диаграммы направленности оказался незначительно выше расчетного и составил не менее 0.8 в рабочей полосе частот.

Таким образом, в результате работы получена антенная решетка, которая может быть реализована с применением отечественных материалов и технологий и обладает малой массой и толщиной.

При помощи разработанной антенны был осуществлен прием спутника Express AT1 на территории города Красноярск. К волноводному выходу антенны напрямую подключался спутниковый конвертор. По уровню принимаемого сигнала разработанная антенная решетка соответствует офсетной зеркальной антенне диаметром 350 mm, с которой проводилось сравнение в рамках натуральных испытаний.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке „Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности“ в рамках реализации научного проекта № 2022102008915 „Антенны перспективных сетей связи для использования на территориях Крайнего Севера“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Z.-H. Wu, W.-X. Zhang, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **9**, 187 (2010). DOI: 10.1109/LAWP.2010.2045470
- [2] Z.-H. Wu, W.-X. Zhang, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **13**, 662 (2014). DOI: 10.1109/LAWP.2014.2314306
- [3] A.M. Alexandrin, S.V. Polenga, A.V. Stankovsky, A.D. Nemshon, Y.A. Litinskaya, A.D. Hudonogova, Y.P. Salomatov, in *2016 Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC)* (New Delhi, India, 2016), p. 1–4. DOI: 10.1109/APMC.2016.7931338
- [4] М.И. Сугак, А.Г. Журавлёв, В сб. *XI Всерос. науч.-техн. конф. „Электроника и микроэлектроника СВЧ“* (СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, СПб., 2022), с. 484–488.
- [5] Y. Ge, K.P. Esselle, T.S. Bird, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **60**, 743 (2012). DOI: 10.1109/TAP.2011.2173113
- [6] Y. Guan, Y.-C. Jiao, J. Tian, X. Liu, Z. Cao, in *2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conf. (CSRSWTC)* (Fuzhou, China, 2020), p. 1-3. DOI: 10.1109/CSRSWTC50769.2020.9372475
- [7] S. Fang, L. Zhang, Y. Guan, Z. Weng, X. Wen, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **22**, 412 (2023). DOI: 10.1109/LAWP.2022.3214230
- [8] Е.А. Литинская, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, **24** (5), 36 (2021). DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-36-49
- [9] A.S. Ivanov, K.V. Lemberg, S.V. Polenga, R.M. Krylov, Y.P. Salomatov, in *2015 Int. Siberian Conf. on control and communications (SIBCON)* (Omsk, Russia, 2015), p. 1–3. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147334