

11.1

## Увеличение коэффициента усиления антенной решетки на основе резонаторов Фабри–Перо в области сканирования больших углов

© Е.А. Литинская, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, О.А. Чурсина

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
E-mail: elitinskaya@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2022 г.

В окончательной редакции 13 декабря 2022 г.

Принято к публикации 17 декабря 2022 г.

Описан подход для повышения коэффициента усиления антенной решетки на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием в секторе углов  $60\text{--}90^\circ$  при использовании радиопоглощающего материала на затеняющей подрешетке. Выполнены моделирование и анализ характеристик направленности антенной решетки на основе резонаторов Фабри–Перо с использованием радиопоглощающего материала. Проведено сравнение полученных характеристик с характеристиками антенной решетки без поглотителя. Сделаны выводы о применимости предлагаемой конфигурации антенной решетки на основе резонаторов Фабри–Перо в мобильных наземных терминалах спутниковой связи.

**Ключевые слова:** антенная решетка, резонатор Фабри–Перо, широкоугольное сканирование, радиопоглощающий материал.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.04.54527.19298

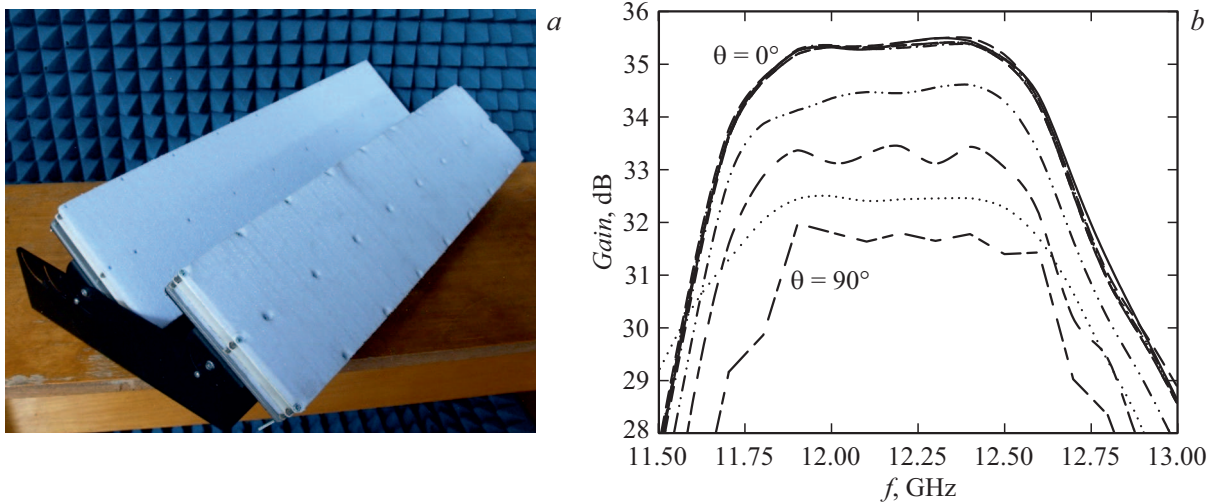
Развитие телекоммуникационных систем обуславливает необходимость обеспечения доступа потребителей к информационным услугам независимо от их географического местоположения. Для обеспечения связи в движении антенная система, установленная в мобильном терминале спутниковой связи, должна обладать малыми массогабаритными показателями, высокой эффективностью и широким сектором сканирования. Традиционно используемые зеркальные антенны с механическим сканированием и плоские фазированные антенные решетки с электронным сканированием обладают существенными недостатками, не позволяющими им осуществлять широкоугольное сканирование с высокой скоростью или функционировать на территориях с большой географической широтой [1,2]. В наши дни также активно развиваются спутниковые сети связи с использованием низкоорбитальных и среднеорбитальных космических аппаратов, где для осуществления связи со спутником необходимы низкопрофильные антенны с широкоугольным сканированием и высокой эффективностью [3,4]. В работе [5] были предложены антенный элемент и антенная решетка (АР) на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием для работы в Ku-диапазоне частот. Предложенная АР состоит из двух идентичных подрешеток, обладает сектором сканирования  $0\text{--}90^\circ$  и коэффициентом использования поверхности более 30% при отклонении луча на  $90^\circ$ . Для осуществления сканирования в угломестной плоскости подрешетки механически вращаются и между ними вносятся фазовая линейная задержка. Размеры АР на основе резонаторов Фабри–Перо составили  $740 \times 485 \times 185$  mm (рис. 1, а). В качестве фазовращающих устройств для АР были использованы микрополосковые делители мощности с фиксированным линейным фазовым набегом по под-

решеткам, соответствующим определенному углу поворота подрешеток ( $\theta$ ), для реализации отклонения луча антенны на угол  $\theta$ . Разработанная АР на основе резонаторов Фабри–Перо обеспечивает коэффициент усиления 35.5 dB в секторе углов сканирования  $0\text{--}50^\circ$  в диапазоне частот 11.9–12.5 GHz, при отклонении луча АР на  $60^\circ$  коэффициент усиления (КУ) снижается на 1.2 dB, при отклонении луча на  $70^\circ$  — на 2.2 dB, при отклонении на  $80^\circ$  — более чем на 3 dB (рис. 1, б).

Поскольку АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием разрабатывалась для функционирования в географических широтах  $50\text{--}80^\circ$ , для осуществления связи с такими космическими аппаратами, как Express-AM5 и Express-AMU7, необходимо сохранить направленные свойства АР и минимизировать потери в области больших углов сканирования. Основными причинами снижения направленных свойств АР на основе резонаторов Фабри–Перо являются затенение подрешетками друг друга, наличие переотражений между подрешетками и поступление излученной энергии от задней подрешетки в объем резонаторов передней подрешетки, что нарушает работу резонаторов и снижает их эффективность.

Целью настоящей работы является поиск решения для увеличения коэффициента усиления АР на основе резонаторов Фабри–Перо, конструкция которой описана выше, в области сканирования более  $70^\circ$  в угломестной плоскости.

Радиопоглощающие материалы широко используются в антенной технике [6], в том числе и в фазированных антенных решетках, в качестве сегмента обтекателя, для снижения взаимосвязи между приемным и передающим трактами [7], уменьшения поляризационных искажений [8], устранения паразитных полей в многослойных



**Рис. 1.** *a* — макет АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием; *b* — зависимость КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо от частоты при углах сканирования  $\theta$  от 0 до  $90^\circ$  (с шагом  $10^\circ$ ).

микрополосковых АР [9] и других приложений. Новизна предложенного решения для повышения КУ в области больших углов сканирования заключается в применении радиопоглощающего материала в АР с механически вращающимися подрешетками и на основе излучателя в виде резонатора Фабри–Перо.

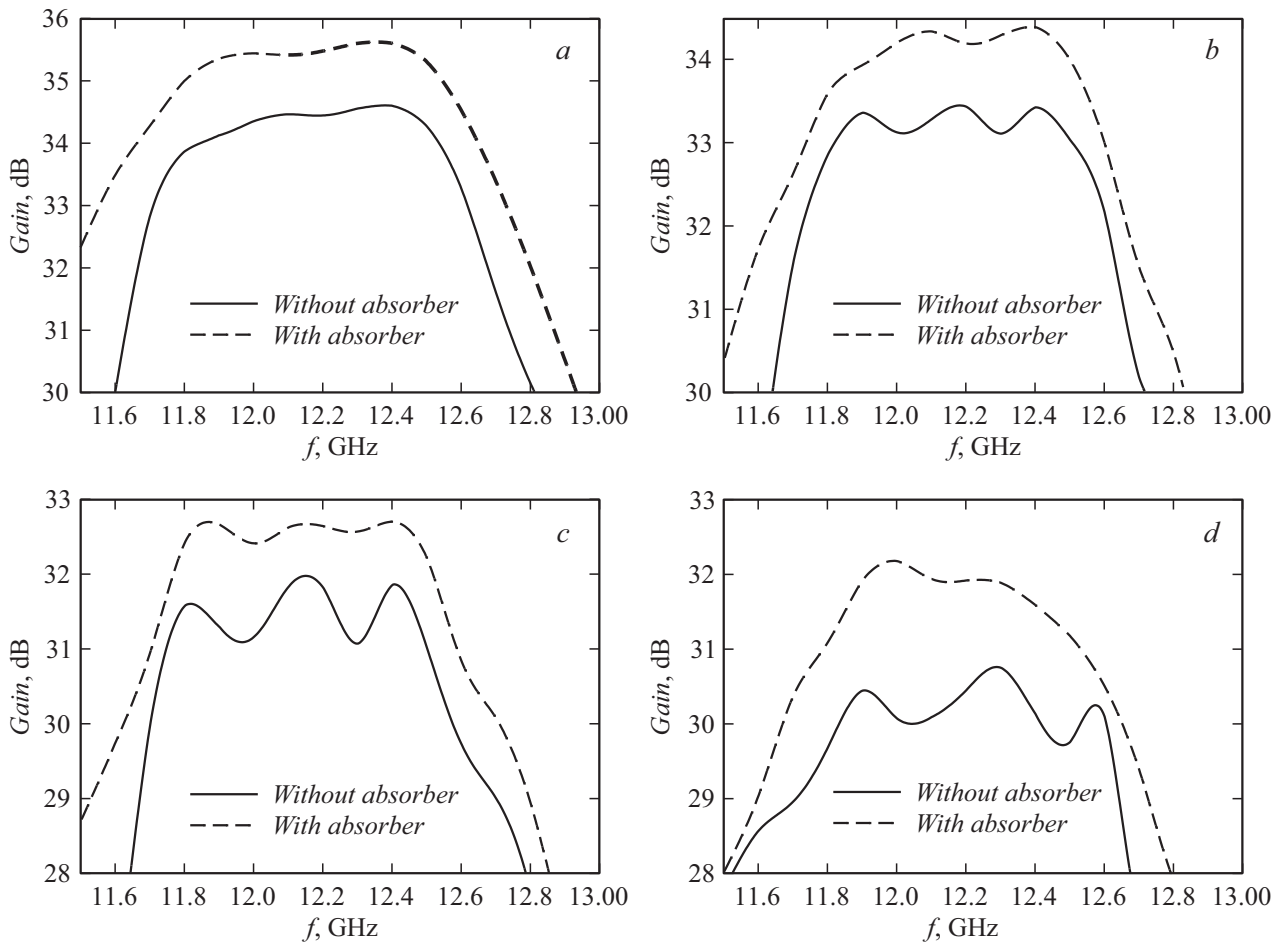
Для уменьшения уровня отражений в АР на основе резонаторов Фабри–Перо было предложено использовать радиопоглощающий материал на задней поверхности затеняющей подрешетки. Был исследован ряд радиопоглощающих материалов с различными электрофизическими свойствами (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \Delta$ ) с целью повышения КУ АР в секторе больших углов сканирования [10]. Для использования на задней поверхности затеняющей подрешетки АР был выбран материал со следующими характеристиками:  $\epsilon = 1.1$ ,  $\text{tg} \Delta \approx 10^{-2}$ , толщина 10 mm, поглотитель размещался непосредственно на задней поверхности затеняющей подрешетки и имел форму, идентичную подрешетке. Параметры и размеры поглотителя выбирались из соображений достижения минимального коэффициента отражения во всем секторе углов сканирования и сохранения малых габаритов антенны. Исследование направленных характеристик АР на основе резонаторов Фабри–Перо с использованием поглотителя показало, что в секторе больших углов  $60\text{--}90^\circ$  КУ АР с поглотителем превышает КУ аналогичной решетки без поглотителя. При повороте подрешеток на углы  $0\text{--}50^\circ$  КУ АР с использованием поглотителя и без него различаются незначительно. При отклонении луча на  $60^\circ$  КУ АР с поглотителем превышает КУ АР без поглотителя более чем на 1 dB в полосе частот 11.9–12.5 GHz (рис. 2, *a*), при отклонении на  $70^\circ$  — более чем на 1.2 dB (рис. 2, *b*).

При отклонении максимума диаграммы направленности АР с поглотителем более чем на  $80^\circ$  КУ превышает

КУ аналогичной решетки без использования поглотителя более чем на 1 dB (рис. 2, *c, d*).

Частично увеличение направленности представленной АР происходит за счет снижения коэффициента отражения (КО) подрешетки ввиду использования поглотителя на задней поверхности затеняющей подрешетки. Сравнение расчетных КО АР на основе резонаторов Фабри–Перо с использованием радиопоглощающего материала и без него показало, что в полосе частот 11.8–12.5 GHz КО АР без поглотителя более чем на 2 dB превышает КО АР с поглотителем, однако уровень отражения остался на низком уровне и не превысил  $-12$  dB в рабочей полосе частот. Исследование амплитудных и фазовых распределений АР без поглотителя в угломерной плоскости показало, что при повороте подрешеток более чем на  $60^\circ$  между подрешетками возникает стоячая резонансная волна, энергия которой попадает в объем резонаторов затеняющей подрешетки, тем самым ухудшая ее эффективность. При использовании поглотителя на задней поверхности затеняющей подрешетки стоячая резонансная волна между подрешетками практически отсутствует и не влияет на характеристики направленности решетки. В ходе исследования применялось электродинамическое моделирование излучающих структур различными методами (метод конечных элементов и метод конечного интегрирования). Частотные характеристики КУ исследуемой АР, полученные двумя методами, показали хорошее согласие во всей рабочей полосе частот разработанной АР и в секторе сканирования  $0\text{--}90^\circ$ .

Таким образом, в работе предложен способ улучшения КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо в области больших углов сканирования при помощи радиопоглощающего материала. Исследованы различные радиопоглощающие материалы для использования в АР на основе резонаторов Фабри–Перо. Показана возможность



**Рис. 2.** Сравнение КУ АР на основе резонатора Фабри–Перо в двух конфигурациях при повороте подрешеток на 60 (а), 70 (b), 80 (c), 90° (d).

увеличения КУ более чем на 1 dB в секторе сканирования 60–90°. Полученные результаты исследования могут быть использованы при создании низкопрофильных АР с рассмотренным механоэлектрическим типом сканирования для сохранения направленности антенн в области больших углов.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 2022102008915 („Антенны перспективных сетей связи для использования на территориях Крайнего Севера“), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-243003.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] K.K. Wei Low, S. Zehir, T. Kanar, G.M. Rebeiz, in *2020 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS)* (IEEE, 2020), p. 821. DOI: 10.1109/IMS30576.2020.9223891
- [2] G. Gültepe, T. Kanar, S. Zehir, G.M. Rebeiz, *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, **69** (7), 3484 (2021). DOI: 10.1109/TMTT.2021.3073321
- [3] <https://oneweb.net/>
- [4] <https://www.starlink.com/>
- [5] 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
- [6] А.Ф. Латыпова, *Сверхширокополосные радиопоглощающие структуры с сосредоточенными и распределенными диссипативными элементами*, автореф. канд. дис. (Воронеж. гос. техн. ун-т, Воронеж, 2015).
- [7] A. Hirata, J. Hirokawa, in *2018 Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC)* (IEEE, 2018), p. 434. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617127
- [8] Z. Zhang, M. Huang, Y. Chen, S.-W. Qu, J. Hu, S. Yang, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **68** (12), 7927 (2020). DOI: 10.1109/TAP.2020.3001446

- [9] M.T. Ali, T.A. Rahman, M.R. Kamarudin, R. Sauleau, M.N.M. Tan, M.F. Jamlos, in *2010 Int. Workshop on antenna technology (iWAT)* (IEEE, 2010), p. 1.  
DOI: 10.1109/IWAT.2010.5464784
- [10] Е.А. Литинская, *Низкопрофильные антенные решетки с механоэлектрическим типом сканирования*, канд. дис. (Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2022).