

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.67.012.12

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-5-36-49>

## Антенная решетка на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием

Е. А. Литинская<sup>✉</sup>, С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>✉</sup> [ylitinskaya@gmail.com](mailto:ylitinskaya@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Организация сетей спутниковой связи на мобильных объектах в труднодоступных, удаленных местностях является актуальной задачей в рамках развития информационной связанности территорий РФ. Для организации спутниковой связи на транспортных средствах необходимы низкопрофильные эффективные антенные системы (АС) с сохранением характеристик направленности в широком секторе углов сканирования.

**Цель работы.** Исследование АР на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием, а также оценка коэффициента усиления и направленности решетки при различных углах сканирования.

**Материалы и методы.** Численные исследования проведены методом конечных элементов (FEM – finite element method) и методом конечных разностей во временной области (FDTD), а также методами постобработки результатов.

**Результаты.** Проведено моделирование подрешетки на основе резонатора Фабри–Перо для АР с механоэлектрическим сканированием. Установлено, что коэффициент усиления (КУ) подрешетки на основе резонатора Фабри–Перо составляет не менее 32.5 дБ в полосе частот от 11.9 до 12.5 ГГц, а апертурный коэффициент использования поверхности (КИП) – не менее 0.65. В ходе исследования разработана и изготовлена АР на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием. Характеристики АР на основе резонатора Фабри–Перо, полученные электродинамическим моделированием, совпадают с характеристиками, найденными экспериментальным путем. Деграция КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо составляет не более 2.5 дБ в секторе углов сканирования 0...70°. Отмечены преимущества использования антенных элементов на основе резонатора Фабри–Перо и построения на их основе мобильных спутниковых АС с широкоугольным сканированием.

**Заключение.** Применение в качестве излучателя резонатора Фабри–Перо и построение на его основе АР с механоэлектрическим сканированием позволяет достичь апертурного КИП антенны не менее 0.5 и деграции КУ в секторе углов 0...70° не более 2.5 дБ в полосе частот 11.9...12.5 ГГц.

**Ключевые слова:** сканирующая антенная решетка, резонатор Фабри–Перо, частотно-селективная поверхность, спутниковая связь

**Для цитирования:** Литинская Е. А., Поленга С. В., Саломатов Ю. П. Антенная решетка на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 5. С. 36–49. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-36-49

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90003.

Статья поступила в редакцию 11.06.2021; принята к публикации после рецензирования 12.10.2021; опубликована онлайн 29.11.2021

© Литинская Е. А., Поленга С. В., Саломатов Ю. П., 2021



## Antenna Array Based on Fabry–Perot Cavity with Mechanoelectrical Beam Steering

Yelena A. Litinskaya✉, Stanislav V. Polenga, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ ylitinskaya@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Introduction. Low-profile effective antenna systems (AS) with maintained directional characteristics in a wide sector of scanning angles are required for satellite communication at mobile objects. This article investigates the directional characteristics of a subarray based on a Fabry–Perot cavity and an antenna array with mechanoelectrical beam steering.

**Aim.** To investigate a Fabry–Perot based antenna array with mechanoelectrical beam steering and to estimate its gain and directivity at different scanning angles.

**Materials and methods.** Computer simulations were carried out using the finite element method (FEM), finite difference time domain (FDTD) method and template based post-processing.

**Results.** A subarray based on a Fabry–Perot cavity for an antenna array with mechanoelectrical beam steering was simulated. The efficiency of the subarray comprised at least 65 % in the 11.9...12.5 GHz frequency band. An antenna array based on a Fabry–Perot cavity with mechanoelectrical beam steering was developed and investigated. The calculated characteristics of the developed antenna array agreed well with those obtained experimentally. The gain degradation did not exceed 2.5 dB in the 0...70° scanning angle range. The advantages of using antenna elements based on a Fabry–Perot cavity and developing on their basis mobile satellite antenna systems with wide-angle scanning are noted.

**Conclusion.** The use of a radiator based on a Fabry–Perot cavity and the development on it basis an antenna array with mechanoelectrical beam steering provides an antenna efficiency of no less than 0.5 with a gain degradation of no more than 2.5 dB in the scanning angle range 0...70° from 11.9 to 12.5 GHz.

**Keywords:** scanning antenna array, Fabry–Perot cavity, selective surface, satellite communication

**For citation:** Litinskaya Y. A., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Antenna Array Based on Fabry–Perot Cavity with Mechanoelectrical Beam Steering. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 5, pp. 36–49. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-36-49

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

**Source of financing.** The reported study was funded by RFBR, project no. 19-37-90003.

Submitted 11.06.2021; accepted 12.10.2021; published online 29.11.2021

**Введение.** Развитие информационной связанности территорий страны является одним из приоритетных направлений научно-технологического развития РФ. Большая часть территории нашей страны находится в труднодоступных и удаленных местностях, где одним из доступных способов связи является спутниковая связь. Организация сетей спутниковой связи необходима не только на стационарных объектах, но и на мобильных (автомобиль, поезд, морское судно). Для непрерывных приема и передачи сигнала на космический аппарат (КА) как правило используют 2 типа антенных систем: зеркальные антенны (ЗА) с механическим типом сканирования или плоские фазированные

антенные решетки (ФАР) с электронным типом сканирования. Этим классическим сканирующим антеннам присущи недостатки, не позволяющие эффективно обеспечивать непрерывную спутниковую связь на мобильных объектах в труднодоступных, удаленных местностях, а также на северных территориях нашей страны. У ЗА – это большая ометаемая поверхность антенны и низкая скорость сканирования [1–3], у плоских ФАР с электронным сканированием – это ограниченный сектор углов сканирования (что не позволяет им функционировать на территориях с большой географической широтой) и дороговизна всей АР в целом [4–6].

Исследования механоэлектрического метода сканирования и создание на его основе АС, обладающей малыми массогабаритными показателями и осуществляющей широкоугольное перемещение луча с сохранением направленных характеристик, показало перспективность использования данного метода в мобильных спутниковых терминалах, обеспечивающих широкоугольное непрерывное сканирование. Одним из возможных подходов к реализации механоэлектрического сканирования является разбиение плоской АР на механически вращаемые подрешетки с малыми размерами, управляемые фазовращателями [7]. Сканирование в угломестной плоскости осуществляется за счет одновременного изменения фазовых задержек и поворота подрешеток. Все подрешетки АР с механоэлектрическим типом сканирования располагаются на общем вращающемся основании, и так осуществляется сканирование в азимутальной области (рис. 1).

Разработанная [8] микрополосковая АР с механоэлектрическим типом сканирования не обладает достаточным коэффициентом усиления (КУ), позволяющим осуществлять прием и передачу сигнала непосредственно со спутника.

В данной статье в качестве антенного элемента для построения на его основе низкопрофильной эффективной АР с широкоугольным механоэлектрическим сканированием предлагается рассмотреть резонатор Фабри–Перо.

Резонатор Фабри–Перо широко применяется в оптике. В классическом виде он представляет 2 соосных, параллельно расположенных и обращенных друг к другу зеркала, между которыми может формироваться резонансная оптическая стоячая волна. Одно из зеркал, как правило, делают частично прозрачным для преимущественного вывода мощности в этом направлении. В последнее

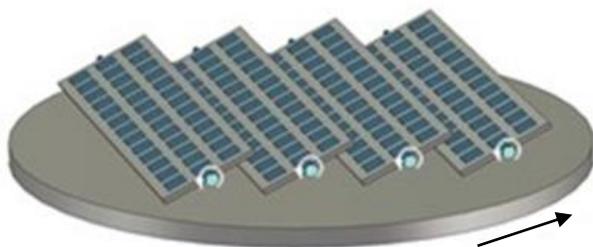


Рис. 1. Модель АР с механоэлектрическим типом сканирования

Fig. 1. An antenna array with mechano-electrical beam steering

время активно исследуется применение резонатора Фабри–Перо в радиочастотном диапазоне [9, 10].

Для существования резонанса в резонаторе Фабри–Перо необходимо, чтобы расстояние между двумя плоскими параллельными зеркалами соответствовало  $\lambda/2 + n\lambda$ , где  $n$  – натуральное число, включая 0;  $\lambda$  – длина волны. Однако в этом случае резонанс будет существовать только на одной частоте, т. е. вся система будет узкополосной. Для достижения условий резонанса в широкой полосе частот необходимо, чтобы один из отражателей (частично прозрачный) имел положительный наклон фазы отраженной волны. Подобное поведение фазовой характеристики позволяет компенсировать изменение резонансной длины волны и установить постоянную электрическую длину, соответствующую  $\lambda/2$  между двумя рефлекторами. Один из методов создания частично отражающей поверхности (ЧОП) заключается в использовании частотно-селективной поверхности (ЧСП). Элемент ЧОП состоит из двух слоев полуволновых микрополосковых излучателей и слоя из диэлектрика ( $\epsilon = 1.05$ ) между излучателями. Параметры элемента:  $h_1 = 12.7$  мм,  $w_2 = 9.5$  мм,  $w_1$  – переменный параметр (рис. 2, а). Электродинамическое моделирование исследуемого элемента ЧОП проводилось в составе ячейке Флоке, что позволяет в дальнейшем уменьшить время полного волнового моделирования ЧОП и АР на ее основе.

Фаза отраженной волны данного элемента (рис. 2, в) имеет изгиб на резонансной частоте, таким образом обеспечивая положительный наклон в ограниченной полосе частот (12.8...13.2 ГГц), что позволяет достичь резонанса в некоторой полосе частот (рис. 2, б). На рисунке продемонстрированы кривые для трех значений  $w_1$  излучателя, находящегося в первом слое.

Таким образом можно исследовать возможность создания излучающего элемента на основе двухслойной ЧСП, функционирующего в некоторой полосе частот при определенных геометрических размерах элемента.

Для сохранения минимального профиля антенной системы необходимо выбрать минимальное расстояние между зеркалами (ЧСП), соответствующее  $\lambda/2$ . Максимально достижимый КИП – также один из главных критериев при разработке

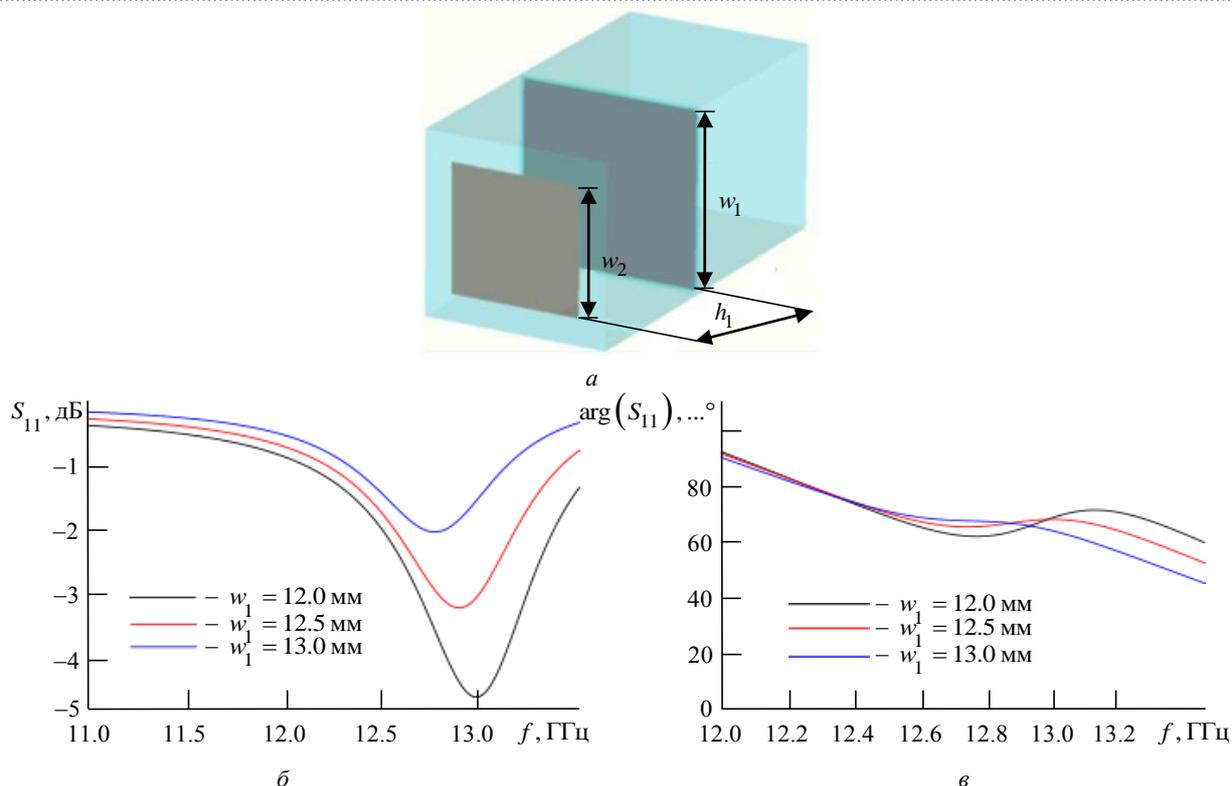


Рис. 2. Элемент частотно-селективной поверхности: *a* – единственный элемент; *б* – зависимость фазы отраженной волны единичного элемента от частоты; *в* – зависимость коэффициента отражения единичного элемента от частоты

Fig. 2. An element of the frequency-selective surface: *a* – single element; *б* – reflection wave phase of a single element versus frequency; *в* – reflection coefficient of a single element versus frequency

элемента, на основе которого будет исследована подрешетка АР с механоэлектрическим типом сканирования.

На первом этапе работы исследовался антенный элемент, модель которого показана на рис. 3, *a*. Размеры элемента на основе резонатора

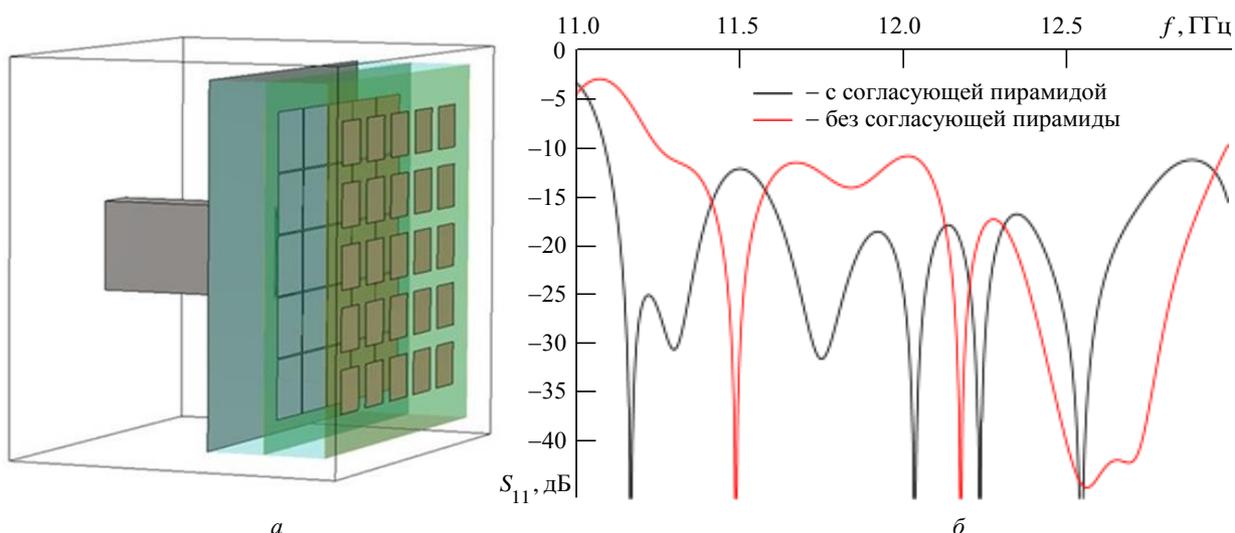


Рис. 3. Антенный элемент на основе резонатора Фабри–Перо: *a* – САПР-модель антенного элемента на основе резонатора Фабри–Перо; *б* – зависимость коэффициента отражения антенного элемента на основе резонатора Фабри–Перо от частоты

Fig. 3. An antenna element based on a Fabry–Perot cavity: *a* – modelled antenna element based on a Fabry–Perot cavity; *б* – reflection coefficient of the antenna element based on a Fabry–Perot cavity versus frequency

Фабри–Перо составляют  $80 \times 80 \times 66$  мм. Открытый конец волновода использовался как возбудитель для резонатора. Поскольку согласование является одним из важных критериев при проектировании резонатора Фабри–Перо, для этой цели и была использована диэлектрическая пирамида, выполненная из фторопласта ( $\varepsilon = 2.1$ ), согласующая резонатор в широкой полосе частот. Зависимость коэффициента отражения резонатора Фабри–Перо от частоты в двух различных конфигурациях приведена на рис. 3, б [11].

Рабочий диапазон частот резонатора определялся по уровню КУ не менее 19.5 дБ и составил 12...12.5 ГГц (5 %). КИП исследуемого антенного элемента на основе резонатора Фабри–Перо в рабочем диапазоне частот составил не менее 68 %. По результатам исследования эффективности элемента данный тип излучателя обладает высокой эффективностью и является перспективным для дальнейшего построения и исследования на его основе подрешетки АР с механоэлектрическим типом сканирования. Одна из главных причин высокой эффективности резонатора Фабри–Перо – отсутствие потерь в цепях питания в отличие от микрополосковых АР, у которых значительная часть потерь приходится на потери в делителях мощности. Однако существенным недостатком резонатора Фабри–Перо является узкая рабочая полоса частот.

**Методы исследования.** Численное моделирование проведено методом конечных элементов (FEM – finite element method) и методом конечных разностей во временной области (FDTD), а также методами постобработки результатов моделирования (Template based Post-processing).

**Антенный элемент с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо.** Исследован антенный элемент с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо. В качестве возбуждающей схемы данного антенного элемента была разработана схема, состоящая из двух ортогональных щелей в металлическом экране (рис. 4). Конфигурация ЧСП антенного элемента с круговой поляризацией аналогична элементу с линейной поляризацией (см. рис. 3, а).

У разработанного антенного элемента с круговой поляризацией уровень отражения составил не более –10 дБ в полосе частот от 11.75 до 12.9 ГГц. ДН антенного элемента с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо показаны на

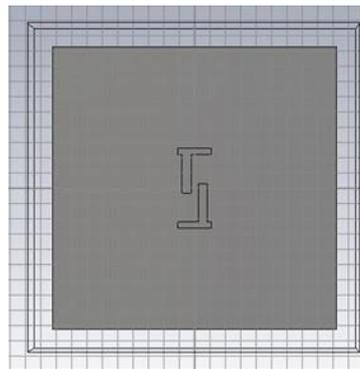


Рис. 4. Схема возбуждения антенного элемента на основе резонатора Фабри–Перо с круговой поляризацией

Fig. 4. Feed scheme of the antenna element based on a Fabry–Perot cavity with circular polarization

рис. 5, а и б на частотах 11.9 и 12.5 ГГц соответственно.

На частотах выше 12.5 ГГц наблюдается снижение КУ элемента с круговой поляризацией ввиду возрастания первого бокового лепестка ДН (рис. 5, в). Расчетный коэффициент эллиптичности исследуемого элемента с круговой поляризацией составляет не менее 0.7 в рабочем диапазоне частот, в максимуме достигая 0.85 (рис. 5, з). Смещение рабочего диапазона частот антенного элемента в низкочастотную область (11.9...12.5 ГГц) относительно полосы положительного наклона фазы отраженной волны единичного элемента ЧСП (см. рис. 2, в) связано с тем, что размеры антенного элемента конечны, в то время как электродинамическое моделирование единичного элемента проводилось методом ячейки Флоке, имитирующего расчет бесконечной периодической структуры, состоящей из идентичных элементов.

**Подрешетка на основе резонатора Фабри–Перо для АР с механоэлектрическим сканированием.** Диаграммообразующая схема (ДОС) для АР на основе разработанного антенного элемента с круговой поляризацией была выполнена на основе пустотелых волноводов малой толщины ( $20 \times 2$  мм), что позволяет сохранить небольшие потери в линиях передачи и увеличить эффективность всей антенной системы в целом при сохранении малого профиля ДОС (менее 10 мм) (рис. 6). ДОС реализована методом лазерной резки из листового алюминия и состоит из пяти слоев. В первом выполнен переход с волновода WR-75 в бинарный делитель мощности в  $E$ -плоскости. Во втором слое располагаются две ступени бинарного деления мощности в  $H$ -плоскости. Третий слой содер-

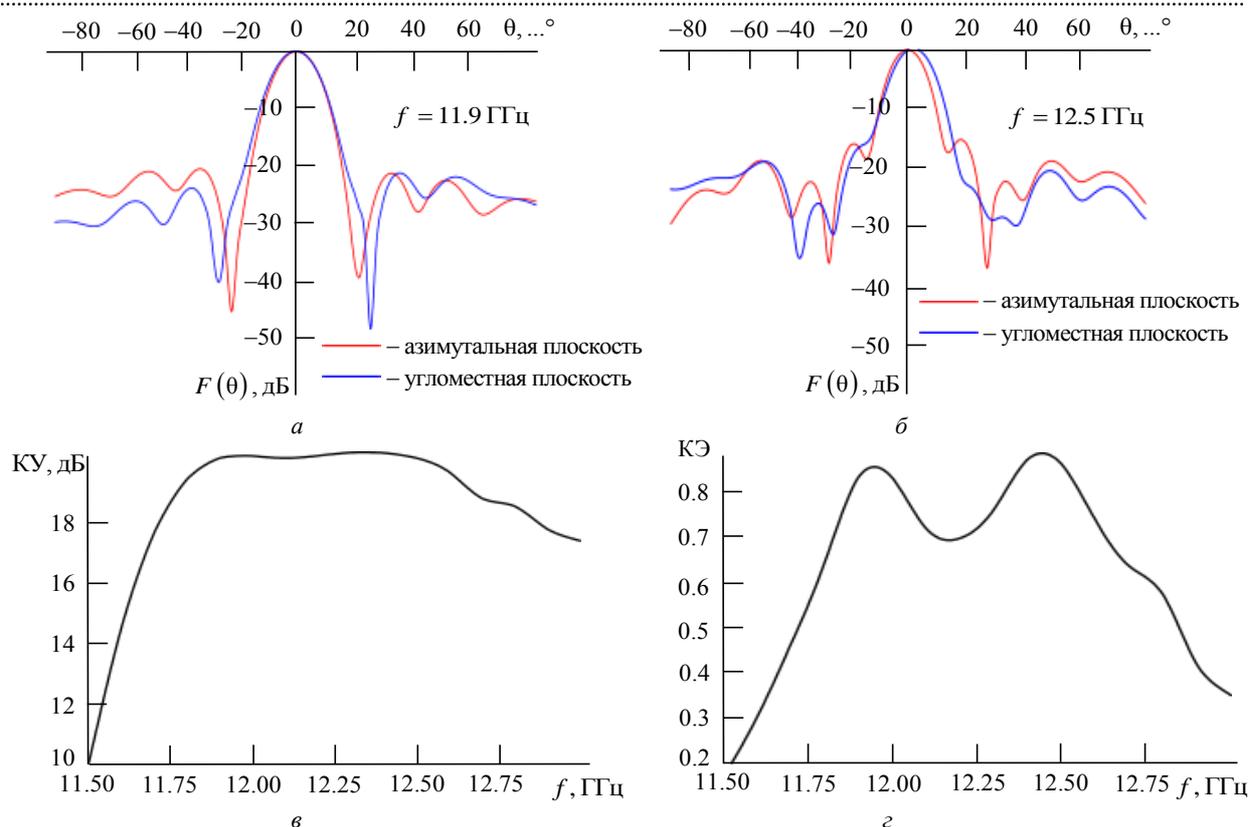


Рис. 5. Характеристики антенного элемента с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо: *a* – ДН на частоте 11.9 ГГц; *б* – ДН на частоте 12.5 ГГц; *в* – зависимость КУ антенного элемента с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо от частоты; *г* – зависимость расчетного коэффициента эллиптичности элемента с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо от частоты

Fig. 5. Characteristics of the antenna element based on a Fabry–Perot cavity with circular polarization: *a* – radiation pattern at 11.9 GHz; *б* – radiation pattern at 12.5 GHz; *в* – gain of the antenna element based on a Fabry–Perot cavity with circular polarization versus frequency; *г* – axio ratio of the antenna element based on a Fabry–Perot cavity with circular polarization versus frequency

жит переходные щели с одного слоя волноводов на другой, а также выполняет роль широких стенок волноводов. В четвертом слое располагаются еще две ступени бинарных делителей мощности в *H*-плоскости. В пятом слое располагаются излучающие щели, запитывающие резонатор Фабри–Перо с круговой поляризацией.

Расчетный коэффициент отражения исследуемой подрешетки показан на рис. 7. Сужение полосы рабочих частот по критерию коэффициента отражения по сравнению с единичным элементом (см. рис. 3, б) связано с узкополосной настройкой ДОС.

Расчетные ДН исследуемой подрешетки в плоскости сканирования и азимутальной плоскости представлены на рис. 8.

Повышенный уровень боковых лепестков (УБЛ) связан с неравномерностью амплитудно-фазового распределения, что частично обусловлено взаимным влиянием антенных элементов друг на друга.

КУ подрешетки составляет не менее 32.5 дБ в полосе частот от 11.9 до 12.5 ГГц. В низкочастотной области рабочего диапазона длин волн подрешетки коэффициент эллиптичности (КЭ) достигает 0.9, в ВЧ-области снижается до 0.6. Эффективность исследуемой подрешетки на основе элемента с круговой поляризацией составляет не менее 65 % (по оценке апертурного КИП подрешетки).

**Антенная решетка на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием.** На основе ранее рассмотренной подрешетки с круговой поляризацией исследовалась возможность реализации АР с механоэлектрическим управлением лучом. Исследуемая АР состоит из двух идентичных подрешеток размерностью  $8 \times 2$  элементов, зазор между подрешетками равен 115 мм (рис. 9). Расстояние между подрешетками выбрано из соображений уменьшения затенения подрешетками друг друга и деградации направленных характеристик АР при углах

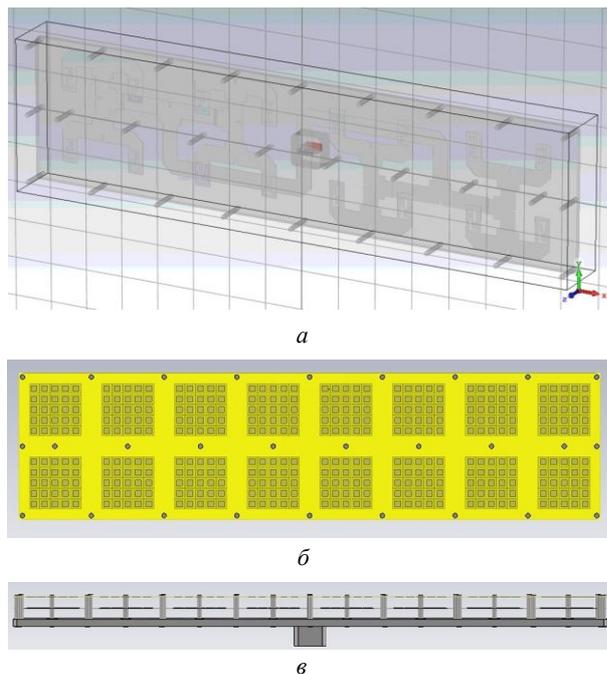


Рис. 6. Подрешетка на основе резонаторов Фабри–Перо круговой поляризации: *a* – делитель мощности подрешетки; *b* – вид сверху; *c* – вид сбоку

Fig. 6. A subarray based on a Fabry–Perot cavity with circular polarization: *a* – power divider of the subarray; *b* – top view; *c* – side view

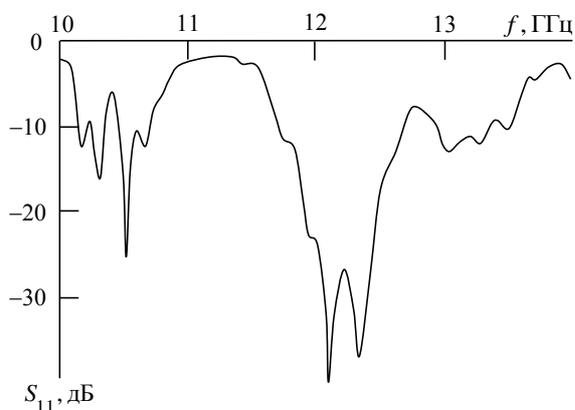


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения подрешетки на основе антенных элементов с круговой поляризацией от частоты

Fig. 7. Reflection coefficient of the subarray based on antenna elements with circular polarization versus frequency

сканирования более  $40^\circ$ . Сканирование в угломестной плоскости осуществляется поворотом подрешеток вокруг своей оси на одинаковый угол.

Расчетные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией в угломестной плоскости при различных направлениях луча на частотах 11.9 и 12.5 ГГц представлены на рис. 10 и 11.

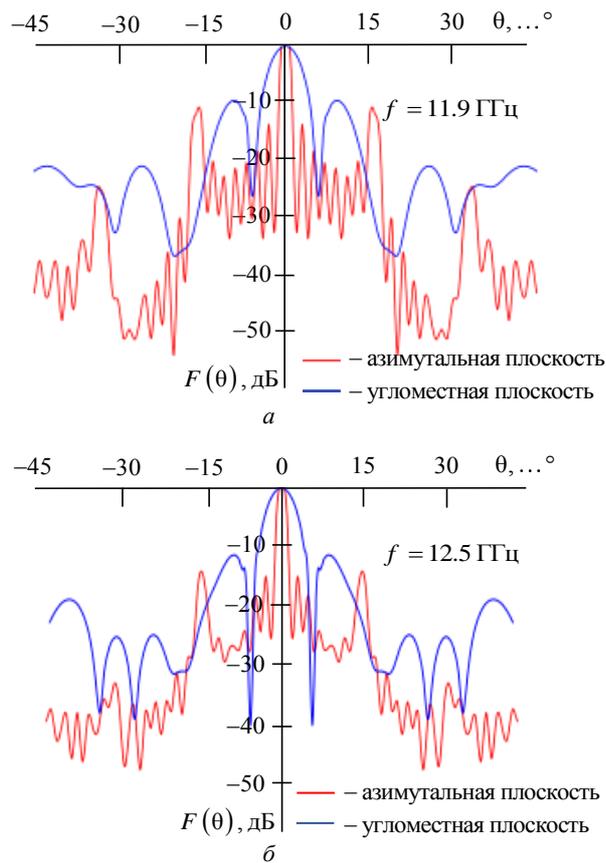


Рис. 8. ДН подрешетки на основе элемента с круговой поляризацией в двух плоскостях на частоте: *a* – 11.9 ГГц; *b* – 12.5 ГГц

Fig. 8. Radiation patterns of the subarray based on antenna elements with circular polarization at: *a* – 11.9 GHz; *b* – 12.5 GHz

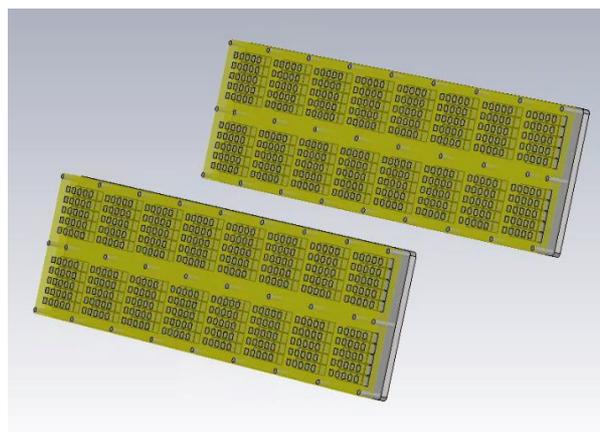


Рис. 9. САПР-модель АР с механоэлектрическим типом сканирования при отклонении луча на  $40^\circ$

Fig. 9. Modelled antenna array with mechano-electrical beam steering at  $40^\circ$  tilt angle

На рис. 12 показаны ДН исследуемой АР с механоэлектрическим типом сканирования в азимутальной плоскости на частотах 11.9 и 12.5 ГГц.

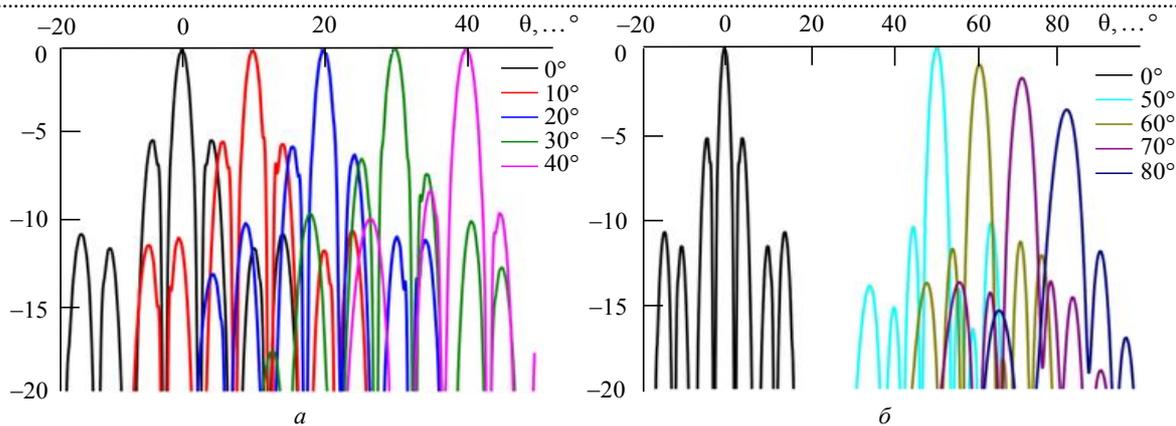


Рис. 10. Расчетные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте 11.9 ГГц в угломерной плоскости:  
 а – углы сканирования 0...40°; б – углы сканирования 50...80°

Fig. 10. Calculated radiation patterns of the antenna array based on a circular polarization element with mechoelectrical beam steering at different beam directions at 11.9 GHz in the elevation plane:  
 а – scan angles 0...40°; б – scan angles 50...80°

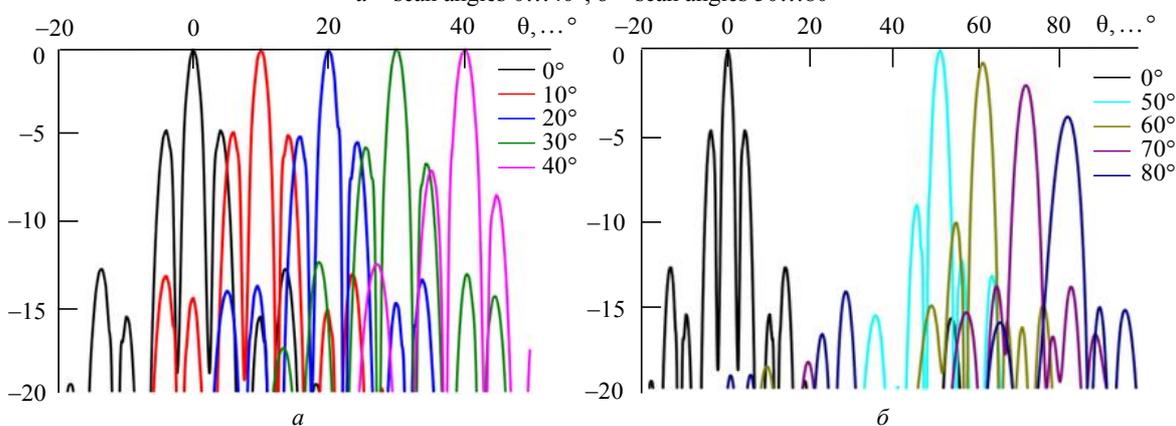


Рис. 11. Расчетные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте 12.5 ГГц в угломерной плоскости:  
 а – углы сканирования 0...40°; б – углы сканирования 50...80°

Fig. 11. Calculated radiation patterns of the antenna array based on a circular polarization element with mechoelectrical beam steering at different beam directions at 12.5 GHz in the elevation plane:  
 а – scan angles 0...40°; б – scan angles 50...80°

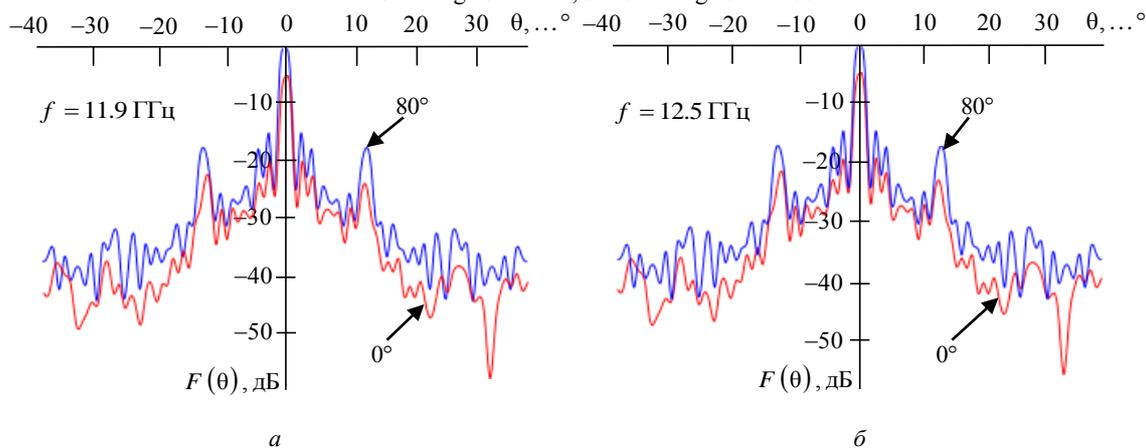


Рис. 12. Расчетные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте: а – 11.9 ГГц; б – 12.5 ГГц

Fig. 12. Calculated radiation patterns of the antenna array based on a circular polarization element with mechoelectrical beam steering at different beam directions in the azimuth plane at: а – 11.9 GHz; б – 12.5 GHz

УБЛ исследуемой АР в азимутальной плоскости не превышает  $-13$  дБ в полосе частот  $11.9 \dots 12.5$  ГГц. Повышенный УБЛ АР в угломестной плоскости в секторе сканирования  $0 \dots 30^\circ$  связан с тем, что шаг решетки (расстояние между центрами подрешеток) превышает  $\lambda$ . Данная конфигурация решетки была выбрана для уменьшения эффекта затенения одной подрешеткой другой и для увеличения сектора сканирования. Однако повышенный уровень бокового излучения АР не приводит к деградации направленных характеристик решетки в секторе углов  $0 \dots 30^\circ$  (рис. 13, а).

Зависимости КУ исследуемой АР с механоэлектрическим типом сканирования при различных направлениях луча от частоты показаны на рис. 13. В секторе углов сканирования  $0 \dots 50^\circ$  в рабочем диапазоне частот КУ решетки остается почти неизменным, при отклонении луча на  $60^\circ$  деградация КУ составляет не более  $1.5$  дБ, при отклонении луча на  $70^\circ$  – не более  $2.2$  дБ, при отклонении луча на  $80^\circ$  – не более  $4$  дБ. Ухудшение направленности при отклонении максимума ДН на  $80^\circ$  более чем на  $3$  дБ связано с наличием переотражений от затененной подрешетки.

Зависимости КЭ исследуемой АР с механоэлектрическим типом сканирования при различных направлениях луча от частоты показаны на рис. 14.

КЭ решетки в НЧ-области рабочего диапазона длин волн составляет не менее  $0.7$ , в ВЧ-области – не менее  $0.45$ .

**Экспериментальное исследование АР на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования.** Для проверки полученных результатов электродинамического моделирования было проведено экспериментальное исследование АР на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием (рис. 15). Топологии ЧСП для подрешетки на основе резонатора Фабри–Перо были выполнены методом фотолитографии на материале толщиной  $0.5$  мм. Нижний и верхний слой ЧСП находятся на расстоянии  $25$  мм друг от друга на подвешенной подложке. ДОС подрешетки сконструирована на основе пустотелых бинарных волноводных делителей мощности методом лазерной резки (рис. 15). Метод лазерной резки относится к доступным и недорогим методам изготовления излучающих поверхностей и линий передачи, что снижает стоимость производства всей антенной системы в целом [12, 13].

Измерения проводились сканированием ближнего поля антенны с дальнейшим перерасчетом в характеристики антенны в дальней зоне. Измеренные ДН АР с круговой поляризацией на основе резонатора Фабри–Перо при различных направлениях луча на частотах  $11.9$  и  $12.5$  ГГц показаны на рис. 16 и 17.

Измеренные ДН АР на основе резонаторов Фабри–Перо при различных направлениях луча имеют сходимость с ДН, полученными электродинамическим моделированием.

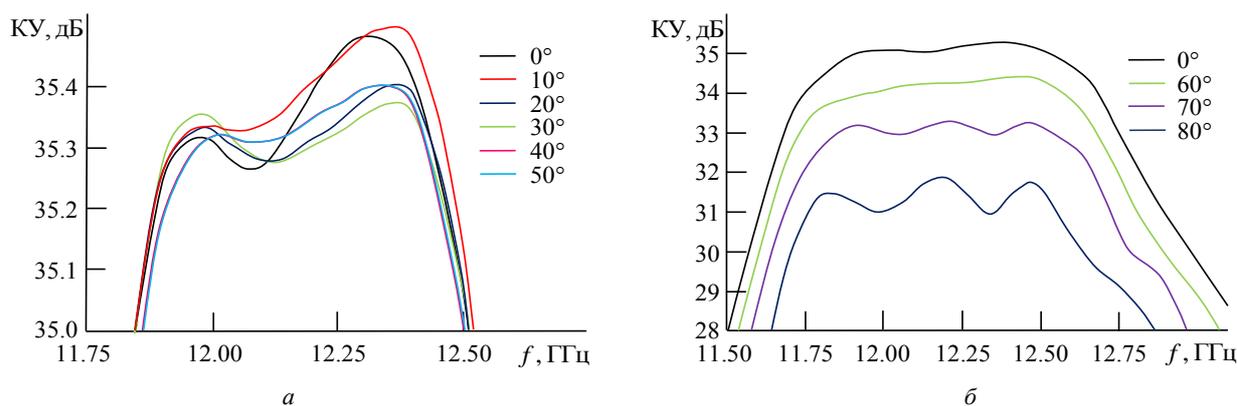


Рис. 13. Зависимость расчетного КУ ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча от частоты: а – углы сканирования  $0 \dots 50^\circ$ ; б – углы сканирования  $60 \dots 80^\circ$

Fig. 13. Gain of the antenna array based on a circular polarization element with mechano-electrical beam steering at different beam directions versus frequency: а – scan angles  $0 \dots 50^\circ$ ; б – scan angles  $60 \dots 80^\circ$

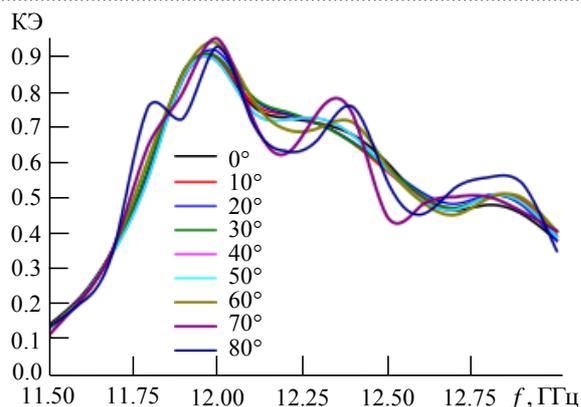


Рис. 14. Зависимость КЭ ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча от частоты

Fig. 14. Axio ratio of the antenna array based on a circular polarization element with mechano-electrical beam steering at different beam directions versus frequency

Экспериментальные частотные зависимости КУ исследуемой АР с механоэлектрическим типом сканирования при различных направлениях луча от частоты показаны на рис. 18. В секторе углов сканирования  $0...50^\circ$  КУ решетки остается почти неизменным, при отклонении луча на  $60^\circ$  деградация КУ составляет не более 1.7 дБ, при отклонении луча на  $70^\circ$  – не более 2.5 дБ, при отклонении луча на  $80^\circ$  – не более 4 дБ. Ухудшение направленности при отклонении максимума ДН на  $80^\circ$  более чем на 3 дБ связано с наличием переотражений от затененной подрешетки, однако еще большее разнесение подрешеток и увеличения зазора между ними приводит к возрастанию дифракционных лепестков ДН в секторе углов  $0...40^\circ$ .



а



б

Рис. 15. АР на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования: а – макет АР; б – диаграммообразующая схема АР на основе резонатора Фабри–Перо

Fig. 15. Antenna array based on a Fabry–Perot cavity with mechano-electrical beam steering: а – prototype of the antenna array; б – beam-forming network of the antenna array based on a Fabry–Perot cavity

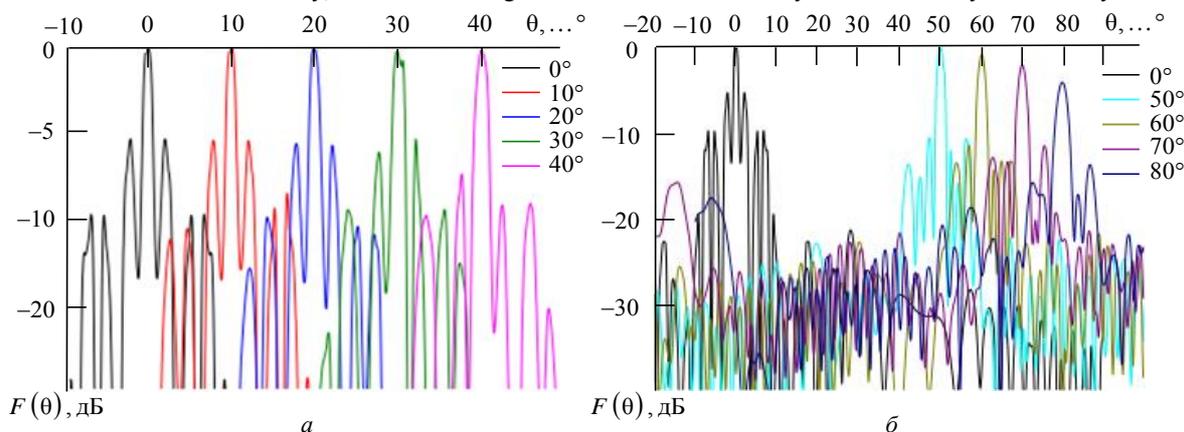


Рис. 16. Измеренные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте 11.9 ГГц: а – углы сканирования  $0...40^\circ$ ; б – углы сканирования  $50...80^\circ$

Fig. 16. Measured radiation patterns of the antenna array based on a circular polarization element with mechano-electrical beam steering at different beam directions at 11.9 GHz: а – scan angles  $0...40^\circ$ ; б – scan angles  $50...80^\circ$

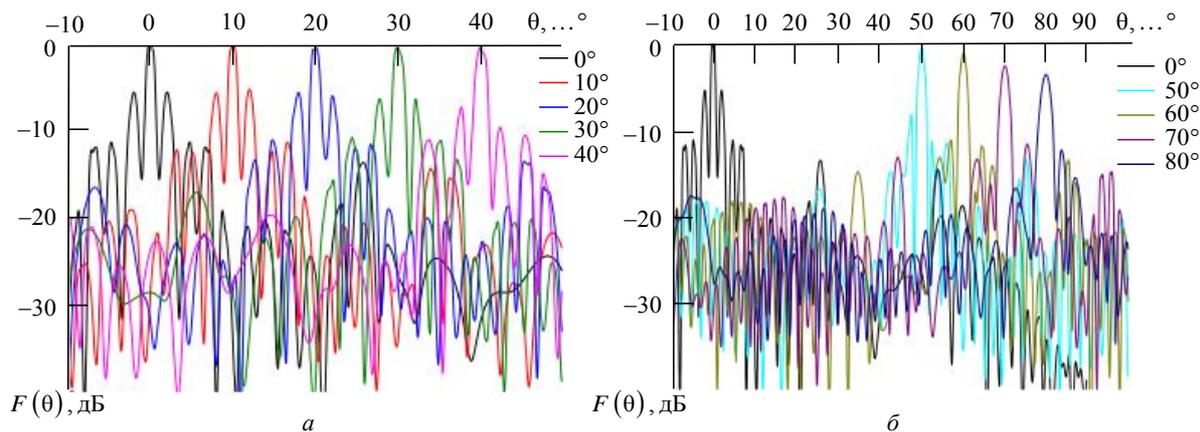


Рис. 17. Измеренные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте 12.5 ГГц: *a* – углы сканирования 0...40°; *б* – углы сканирования 50...80°

Fig. 17. Measured radiation patterns of the antenna array based on a circular polarization element with mechoelectrical beam steering at different beam directions at 12.5 GHz: *a* – scan angles 0...40°; *b* – scan angles 50...80°

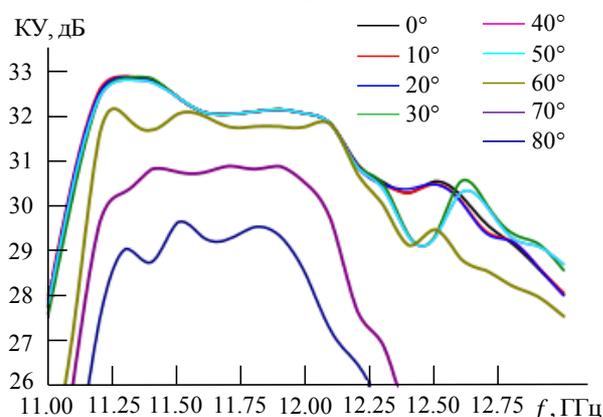


Рис. 18. Зависимость измеренного КУ ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе элемента с круговой поляризацией при различных направлениях луча от частоты

Fig. 18. Measured gain of the antenna array based on a circular polarization element with mechoelectrical beam steering at different beam directions versus frequency

Расхождение между расчетными и экспериментальными частотными характеристиками КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием (рис. 13 и 17) обусловлено погрешностями при производстве.

Результаты экспериментальных исследований АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механо-

электрическим сканированием подтвердили возможность реализации низкопрофильной АР, сохраняющей высокий КУ и направленность в широком секторе углов сканирования 0...70°.

**Заключение.** Результаты электродинамических и экспериментальных исследований показали возможность использования резонатора Фабри–Перо и построения на его основе АР с механоэлектрическим типом сканирования, обладающей КИП не менее 0.5 в секторе углов сканирования 0...70° в полосе частот 11.9...12.5 ГГц. Исследованная ДОС подрешетки для АР на основе резонатора Фабри–Перо позволяет минимизировать профиль всей антенной системы, а также уменьшить потери в цепях питания подрешетки. Управление лучом механоэлектрическим способом позволяет существенно снизить стоимость антенны по сравнению с аналогами [14, 15].

Таким образом, антенные системы на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием могут использоваться в мобильных терминалах спутниковой связи, обеспечивая непрерывные прием и передачу сигнала в секторе углов сканирования 0...70°.

## Список литературы

1. Letavin D. A., Konovalov A. L. Antenna for mobile communication of the 5<sup>th</sup> generation // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), M., 13–15 Mar. 2018 / Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. M., 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337280

2. Jung Y., Shishlov A. V., Park S. Cassegrain Antenna With Hybrid Beam Steering Scheme for Mobile Satellite Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, № 5. P. 1367–1372. doi: 10.1109/TAP.2009.2016706

3. Dual-band Parabolic Antenna for High Capacity Backhubs and Fronthubs / H. R. D. Filgueiras, M. C. Melo, T. H. Brandão, S. Arismar Cerqueira // SBMO/IEEE MTT-S Intern. Microwave and Optoelectronics Conf. (IMOC), Aveiro, 10–14 Nov. 2019. Aveiro: IEEE, 2019. P. 1–3. doi: 10.1109/IMOC43827.2019.9317627

4. Design and prototyping of a microstrip transmit-receive array antenna for mobile Ku-band satellite terminals / R. Manrique, R. Torres, C. Domínguez, F. Tiezzi, J. R. Mosig // Proceedings of the Fourth European Conf. on Antennas and Propagation, Barcelona, 12–16 April 2010. Barcelona: IEEE, 2010. P. 1–5.

5. Jung Y.-B., Jeon S.-I., Kim Ch.-J. A APAA system for Ku-band mobile multimedia service via satellite // IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Albuquerque, NM, 9–14 July 2006. Albuquerque: IEEE, 2006. P. 3123–3126. doi: 10.1109/APS.2006.1711271

6. Yang G., Zhang Y., Zhan S. Wide-Band and Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna for Mobile Communication System // IEEE Open J. of Antennas and Propagation. 2021. Vol. 2. P. 203–212. doi: 10.1109/OJAP.2021.3057062

7. ФАР с механоэлектрическим сканированием / Е. А. Литинская, В. С. Панько, С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 24–27.

8. A Ku-Band Low-Profile Wide-Angle Scanning Antenna Array with Combined Beam Steering / Y. A. Litinskaya, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, Yu. P. Salomatov // XIV Intern. Sci.-Tech. Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2018. Novosibirsk: IEEE, 2018. P. 238–242. doi: 10.1109/APEIE.2018.8546218

9. Konstantinidis K., Feresidis A. P., Hall P. S. Multi-layer Partially Reflective Surfaces for Broadband Fabry-Perot Cavity Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014. Vol. 62, № 7. P. 3474–3481. doi: 10.1109/TAP.2014.2320755

10. Ge Y., Esselle K. P., Bird T. S. The Use of Simple Thin Partially Reflective Surfaces with Positive Reflection Phase Gradients to Design Wideband, Low-Profile EBG Resonator Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, № 2. P. 743–750. doi: 10.1109/TAP.2011.2173113

11. Ku-band antenna array element based on Fabry-Perot cavity / A. M. Alexandrin, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, A. D. Nemshon, Y. A. Litinskaya, A. D. Hudonogova, Yu. P. Salomatov // Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), New Delhi, 5–9 Dec. 2016. New Delhi: IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/APMC.2016.7931338

12. Carluccio G., Mazzinghi A., Freni A. Design and Manufacture of Cosecant-Squared Complementary Reflectarrays for Low-Cost Application // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, № 10. P. 5220–5227. doi: 10.1109/TAP.2017.2743743

13. True-Time-Delay Mechanical Phase Shifter in Gap Waveguide Technology for Slotted Waveguide Arrays in Ka-Band / D. Sánchez-Escuderos, J. I. Herranz-Herruzo, M. Ferrando-Rocher, A. Valero-Nogueira // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. Vol. 69, № 5. P. 2727–2740. doi: 10.1109/TAP.2020.3030993

14. On-the-move antenna systems for broad-band satellite communications / M. Gachev, V. Boyanov, S. Kamenevsky, V. Peshlov, B. Marinov, P. Dankov // The 8<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), Hague, 6–11 April 2014. The Hague: IEEE, 2014. P. 2445–2449. doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902312

15. High-Throughput Satellite Connectivity for the Constant Contact Vehicle / R. A. Stevenson, D. Fotheringham, T. Freeman, T. Noel, T. Mason, S. Shafie // 48<sup>th</sup> European Microwave Conf. (EuMC), Madrid, 23–27 Sept. 2018. Madrid: IEEE, 2018. P. 316–319. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541456

## Информация об авторах

**Литинская Елена Алексеевна** – магистр по направлению «Радиотехника» (2011), аспирантка, старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 29 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: ylitinskaya@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

**Поленга Станислав Владимирович** – магистр по направлению «Радиотехника» (2009), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – прием и обработка сигналов, аналоговая схемотехника, СВЧ-устройства на базе волноводных структур.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия  
E-mail: twinlive@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

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

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. Letavin D. A., Konovalov A. L. Antenna for mobile communication of the 5<sup>th</sup> generation. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). M., RUS, 13–15 Mar. 2018. M., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337280
2. Jung Y., Shishlov A. V., Park S. Cassegrain Antenna With Hybrid Beam Steering Scheme for Mobile Satellite Communications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009, vol. 57, no. 5, pp. 1367–1372. doi: 10.1109/TAP.2009.2016706
3. Filgueiras H. R. D., Melo M. C., Brandão T. H., Arismar Cerqueira S. Dual-band Parabolic Antenna for High Capacity Backhauls and Fronthauls. 2019 SBMO/IEEE MTT-S Intern. Microwave and Optoelectronics Conf. (IMOC). Aveiro, Spain, 10–14 Nov. 2019. Aveiro, IEEE, 2019, pp. 1–3. doi: 10.1109/IMOC43827.2019.9317627
4. Manrique R., Torres R., Domínguez C., Tiezzi F., Mosig J. R. Design and prototyping of a microstrip transmit-receive array antenna for mobile Ku-band satellite terminals. Proceedings of the Fourth European Conf. on Antennas and Propagation. Barcelona, Spain, 12–16 April 2010. Barcelona, IEEE, 2010, pp. 1–5.
5. Jung Y.-B., Jeon S.-I., Kim Ch.-J. A APAA system for Ku-band mobile multimedia service via satellite. IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. Albuquerque, NM, USA, 9–14 July 2006. Albuquerque, IEEE, 2006, pp. 3123–3126. doi: 10.1109/APS.2006.1711271
6. Yang G., Zhang Y., Zhan S. Wide-Band and Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna for Mobile Communication System. IEEE Open J. of Antennas and Propagation. 2021, vol. 2, pp. 203–212. doi: 10.1109/OJAP.2021.3057062
7. Litinskaya Y. A., Panko V. S., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Phased antenna array with mechanical and electrical beam steering. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki* [Advances in modern radio electronics]. 2015, no. 1, pp. 24–27.
8. Litinskaya Y. A., Polenga S. V., Stankovsky A. V., Salomatov Yu. P. A Ku-Band Low-Profile Wide-Angle Scanning Antenna Array with Combined Beam Steering. XIV Intern. Sci.-Tech. Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, RUS, 2–6 Oct. 2018. Novosibirsk, IEEE, 2018, pp. 238–242. doi: 10.1109/APEIE.2018.8546218
9. Konstantinidis K., Feresidis A. P., Hall P. S. Multi-layer Partially Reflective Surfaces for Broadband Fabry-Perot Cavity Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014, vol. 62, no. 7, pp. 3474–3481. doi: 10.1109/TAP.2014.2320755
10. Ge Y., Esselle K. P., Bird T. S. The Use of Simple Thin Partially Reflective Surfaces with Positive Reflection Phase Gradients to Design Wideband, Low-Profile EBG Resonator Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012, vol. 60, no. 2, pp. 743–750. doi: 10.1109/TAP.2011.2173113
11. Alexandrin A. M., Polenga S. V., Stankovsky A. V., Nemshon A. D., Litinskaya Y. A., Hudonogova A. D., Salomatov Yu. P. Ku-band antenna array element based on Fabry-Perot cavity. 2016 Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC). New Delhi, India, 5–9 Dec. 2016. New Delhi, IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/APMC.2016.7931338
12. Carluccio G., Mazzinghi A., Freni A. Design and Manufacture of Coscant-Squared Complementary Reflectarrays for Low-Cost Application. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017, vol. 65, no. 10, pp. 5220–5227. doi: 10.1109/TAP.2017.2743743
13. Sánchez-Escuderos D., Herranz-Herruzo J. I., Ferrando-Rocher M., Valero-Nogueira A. True-Time-Delay Mechanical Phase Shifter in Gap Waveguide Technology for Slotted Waveguide Arrays in Ka-Band. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021, vol. 69, no. 5, pp. 2727–2740. doi: 10.1109/TAP.2020.3030993
14. Gachev M., Boyanov V., Kamenopolsky S., Peshlov V., Marinov B. and Dankov P. On-the-move antenna systems for broad-band satellite communications. The 8<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). The Hague, Netherlands, 6–11 April 2014. The Hague, IEEE, 2014, pp. 2445–2449. doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902312
15. Stevenson R. A., Fotheringham D., Freeman T., Noel T., Mason T. and Shafie S. High-Throughput Satellite Connectivity for the Constant Contact Vehicle. 48<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), 2018, pp. 316–319. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541456

### Information about the authors

**Yelena A. Litinskaya**, Master's degree in Radio Engineering (2011), postgraduate student, senior lecturer at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The author of 29 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>

**Stanislav V. Polenga**, Master's degree in Radio Engineering (2009), senior lecturer at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. 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>

**Yury P. Salomatov**, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2002), Associate Professor at the 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.

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

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

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

---