

Низкопрофильная сканирующая антенная решетка с использованием механически управляемых фазовращателей

А. Д. Полигина^{1,2✉}, С. В. Поленга², Е. А. Стригова²

¹АО «НПП "Радиосвязь"», Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

✉ anastasia0711@mail.ru

Аннотация

Введение. В связи с активным развитием спутниковых систем с использованием низкоорбитальных, среднеорбитальных и высокоэллиптических космических аппаратов важной задачей является обеспечение непрерывных приема-передачи сигналов антенными системами (АС) как для мобильных, так и для стационарных наземных терминалов связи. Как правило, в наземных терминалах таких систем используются сканирующие АС. В наши дни получили развитие АС с механоэлектрическим сканированием (МЭС), ввиду того что в подобных системах достигается высокая направленность в широком секторе углов при сохранении малых габаритов антенны и ее невысокой стоимости. Одним из возможных элементов управления лучом являются волноводные фазовращатели в связи с их простой реализацией, малыми потерями и невысокой стоимостью.

Цель работы. Разработка сканирующей антенной решетки (АР) с МЭС, способной обеспечить перестройку луча в пределах $\pm 60^\circ$.

Материалы и методы. Численные исследования проведены методом конечных элементов во временной области.

Результаты. Разработан широкополосный микрополосковый излучающий элемент, работающий в диапазоне частот 10.7...14.5 ГГц, и на его основе построена сканирующая АР, элементом управления которой выступает предложенный фазовращатель на гар-волноводе, обеспечивающий фазовую регулировку более 360° . По результатам электродинамического моделирования АР продемонстрировала возможность сканирования в пределах $\pm 60^\circ$ с деградацией коэффициента направленного действия менее 3 дБ во всем рабочем частотном диапазоне.

Заключение. В статье рассмотрена разработка АС с МЭС с механическим фазовращателем в качестве элемента управления лучом. Разработанная антенная решетка позволяет обеспечить сканирование в секторе углов $\pm 60^\circ$.

Ключевые слова: механоэлектрическое сканирование, антенная решетка, фазовращатель, гар-волновод

Для цитирования: Полигина А. Д., Поленга С. В., Стригова Е. А. Низкопрофильная сканирующая антенная решетка с использованием механически управляемых фазовращателей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 36–46.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-36-46

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10205).

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; принята к публикации после рецензирования 18.12.2024; опубликована онлайн 29.09.2025

Low-Profile Scanning Antenna Array Using Mechanically Controlled Phase Shifters

Anastasia D. Poligina^{1,2✉}, Stanislav V. Polenga², Elena A. Strigova²

¹ JSC «NPP "Radiosviaz"», Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ anastasia0711@mail.ru

Abstract

Introduction. In connection with the active development of satellite systems using low-orbit, medium-orbit and highly elliptical spacecraft, an important task is to ensure continuous reception-transmission of signals by antenna systems for both mobile and stationary ground-based communication terminals. As a rule, scanning antenna systems are used in ground terminals of such systems. Nowadays, antenna systems with mechanoelectric scanning have been developed due to the fact that such systems achieve high directivity in a wide range of angles while maintaining small dimensions of the antenna and its low cost. One of the possible elements of beam control are waveguide phase shifters due to their simple realization, low losses and low cost.

Aim. Development of a mechanoelectric scanning antenna array capable of providing beam tunability within $\pm 60^\circ$.

Materials and methods. Numerical investigations have been carried out by finite element method in time domain.

Results. A broadband microstrip radiating element operating in the frequency range of 10.7...14.5 GHz has been developed and a scanning antenna array has been constructed on its basis. The control element of the array is a proposed phase shifter on a gap-waveguide, which provides phase adjustment of more than 360° . According to the results of electrodynamic modeling, the antenna array demonstrated the possibility of scanning within $\pm 60^\circ$ with a degradation of the directivity factor less than 3 dB over the entire operating frequency range.

Conclusion. This paper considers the development of a mechanoelectric scanning antenna system with a mechanical phase shifter as a beam steering element. The developed antenna array allows to provide scanning in the sector of angles $\pm 60^\circ$.

Keywords: mechanoelectrical beam steering, antenna array, phase shifter, gap-waveguide

For citation: Poligina A. D., Polenga S. V., Strigova E. A. Low-Profile Scanning Antenna Array Using Mechanically Controlled Phase Shifters. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 36–46. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-36-46

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

Source of funding. The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation (project № 23-79-10205).

Submitted 23.10.2024; accepted 18.12.2024; published online 29.09.2025

Введение. Большая часть территорий мира до сих пор относится к труднодоступным, удаленным и неосвоенным территориям, где отсутствует развитая инфраструктура и наземные сети связи. На данных территориях единственным способом доступа к телекоммуникационным услугам (Интернет, телефония, ТВ, радио и т. д.) остается спутниковая связь.

Спутниковые сети связи развиваются и совершенствуются ввиду постоянно растущих требований к скорости и объему передачи данных, увеличению полосы пропускания канала, улучшению энергетических характеристик и уменьшению массогабаритных параметров антенн, используемых на наземных терминалах.

Активно развиваются системы связи с исполь-

зованием негеостационарных спутников, поскольку такие сети связи позволяют обеспечить широкополосный доступ потребителя к информационным ресурсам с малой задержкой сигнала в любой географической точке [1–4]. Таким образом, исследование методов сканирования и создания на их основе антенных систем (АС) для работы в наземных терминалах перспективных систем спутниковой связи является актуальной задачей.

Традиционно используемые сканирующие антенны в наземных терминалах спутниковой связи имеют существенные недостатки. Системы с электронным сканированием луча становятся все более доступными, но тем не менее дороги в связи с высокой стоимостью активной эле-

Низкопрофильная сканирующая антенная решетка с использованием механически управляемых фазовращателей

Low-Profile Scanning Antenna Array Using Mechanically Controlled Phase Shifters

ментной базы [5; 6], а АС с механическим сканированием не обеспечивают необходимого быстродействия [7] и обладают высоким профилем, что ухудшает аэродинамические характеристики всего терминала в целом. Системы с механоэлектрическим сканированием (МЭС) [8–10], обладая малыми габаритами, при отклонении луча на большие углы способны сохранять свои энергетические характеристики. Преимуществом систем с МЭС является наличие механически управляемых элементов, что снижает их стоимость в сравнении с системами, где используют электронное сканирование (например, активные фазированные антенные решетки (АР) с использованием интегральных микросхем RF ASIC).

Методы. Расчеты проведены посредством электродинамического моделирования. Численные исследования выполнены методом конечных элементов во временной области.

Результаты. Элемент сканирующей АР. Излучающий элемент исследуемой АР представляет собой микрополосковый резонатор, запитываемый излучающей щелью (рис. 1).

Так как щель обладает излучением в обе стороны, ее возбуждение осуществляется через симметричную полосковую линию для снижения излучения в обратном направлении (рис. 2). Подобный способ возбуждения микрополоскового резонатора позволяет обеспечить большую полосу рабочих частот по сравнению с резонатором с двумя слоями металлизации [11; 12].

Элемент выполнен на подложке из материала F4BM220 толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.2$ и тангенсом диэлектри-

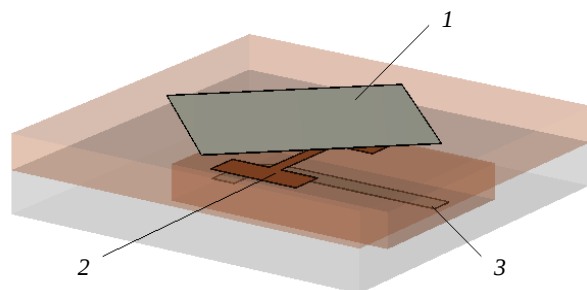


Рис. 1. Структура излучающего элемента АР:

1 – микрополосковый излучатель; 2 – излучающая щель;
3 – запитывающая полосковая линия передачи

Fig. 1. Structure of the radiating element of the antenna array:
1 – microstrip radiator; 2 – radiating slot;
3 – feeding strip transmission line

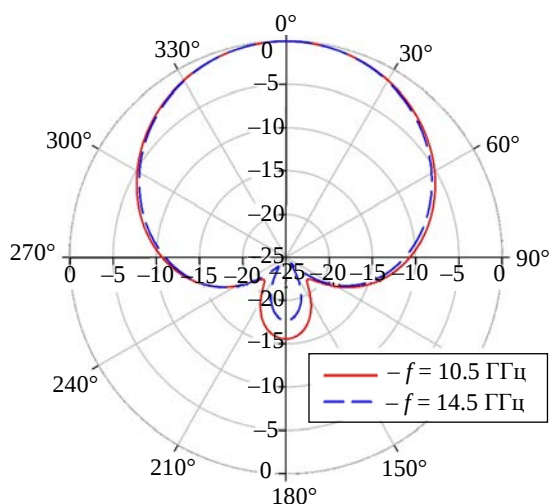


Рис. 2. Диаграмма направленности излучающего элемента в полярных координатах на крайних частотах рабочего диапазона

Fig. 2. Radiation pattern of the radiating element in polar coordinates at the extreme frequencies of the operating range

ческих потерь $\text{tg } \delta = 0.0013$. Система возбуждения выполнена из материала F4BM255 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.55$ и толщиной одного слоя 0.5 мм. Размер элемента с учетом подложки составляет 11×11 мм. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в рабочем диапазоне частот 10.7...14.5 ГГц не превышает 1.8 (рис. 3).

Коэффициент усиления излучающего элемента (G) превышает 7 дБ во всем диапазоне частот (рис. 4).

Полученный элемент имеет ширину рабочей полосы частот 45 % по уровню КСВН, равному 2, что покрывает весь связной Ку-диапазон в сравнении с элементами на основе связанных резонаторов [5], полоса которых не превышает 15 %.

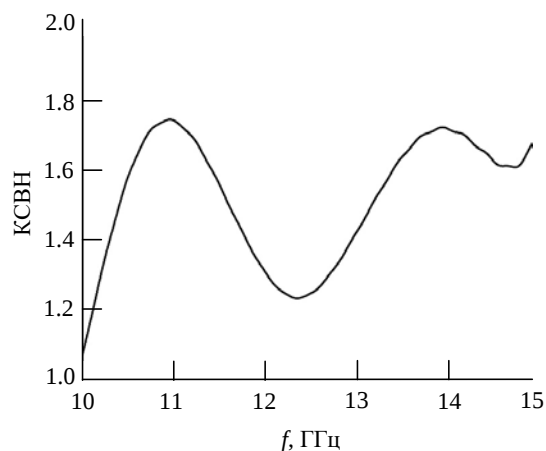


Рис. 3. Частотная зависимость КСВН излучающего элемента

Fig. 3. Frequency dependence of VSWR of the radiating element

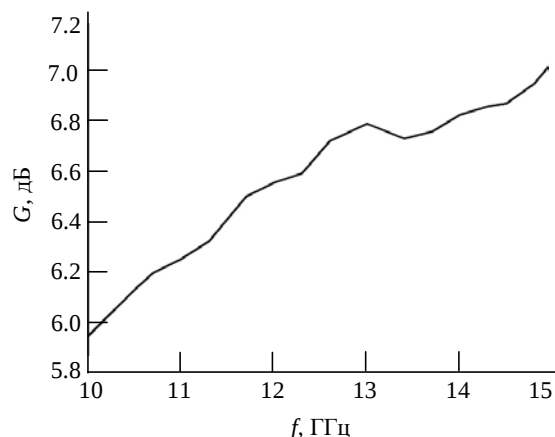


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента усиления излучающего элемента

Fig. 4. Frequency dependence of the gain of the radiating element

Разработка сканирующей АР. На основе рассмотренного элемента построена АР, состоящая из 512 элементов, объединенных в 8 подрешеток 2×32 элемента (рис. 5) с управляемой фазовой задержкой. Сканирование в плоскости элевации осуществляется за счет внесения линейной фазовой задержки по подрешеткам АР механически управляемым фазовращателем. В азимутальной плоскости сканирование осуществляется за счет механического поворота АР в целом.

АР объединена в несколько подрешеток в связи с конструкцией применяемого фазовращателя. При расположении вдоль АР его минимальная ширина составляет 36 мм. Из этого же вытекает минимально возможный шаг АР (при небольшом выходе фазовращателя за края апертуры), равный $d = 11$ мм, что несколько больше, чем 0.5λ на частоте 14.5 ГГц.

В каждой подрешетке находятся две линейки элементов. Система питания АР носит комбинированный характер с использованием различных линий передач для минимизации потерь в тракте и достижения низкого профиля

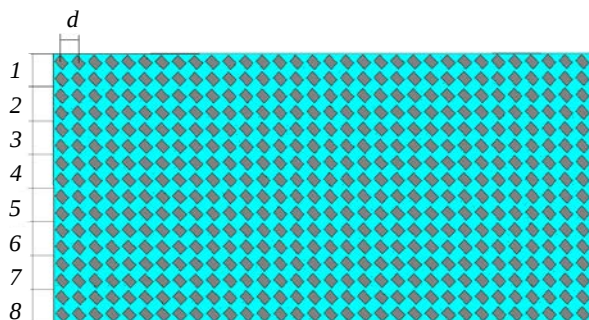


Рис. 5. Антенная решетка, разбитая на подрешетки

Fig. 5. Antenna array divided into sublattices

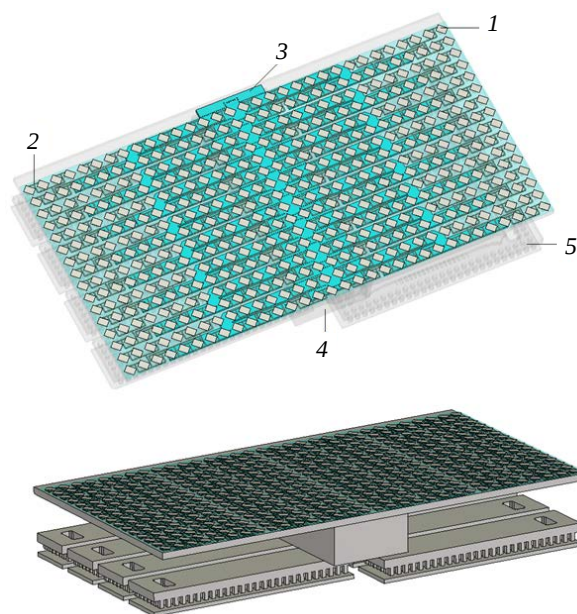


Рис. 6. Модель сканирующей антенной решетки:
1 – излучатель; 2 – полосковая система возбуждения;
3 – тракт на SIW-волноводах; 4 – волноводный переход;
5 – фазовращатель на основе gap-волновода

Fig. 6. Model of scanning antenna array: 1 – radiator;
2 – strip excitation system; 3 – path on SIW-waveguides;
4 – waveguide transition; 5 – phase shifter on the basis of gap-waveguide

антенны в целом. Сканирование обеспечивается механически управляемыми фазовращателями на основе gap-волновода [13]. Электродинамическая модель АР приведена на рис. 6. Габариты АР составляют $352 \times 185 \times 55.5$ мм. Излучающие элементы 1, как описывалось ранее, запитаны полосковой линией передачи 2 через щель. Полосковая линия, в свою очередь, для дальнейшего суммирования элементов подрешеток переходит на SIW-волновод 3, где с помощью волноводного перехода 4 подключается к фазовращателям 5. Выходной делитель мощности на схеме не представлен.

Полосковая система делителей мощности представляет собой бинарную схему, осуществляющую суммирование 16 излучающих элементов (рис. 7).

КСВН делителя продемонстрирован на рис. 8 и не превышает 1.7 в рабочем диапазоне частот.

Далее на материале F4BM300 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.0$ и толщиной 2 мм сконструирован синфазный равноамплитудный делитель мощности на SIW-волноводе, который объединяет 4 выхода полосковых сумматоров. За счет исключения из моделирования экранирующих металлизированных отверстий

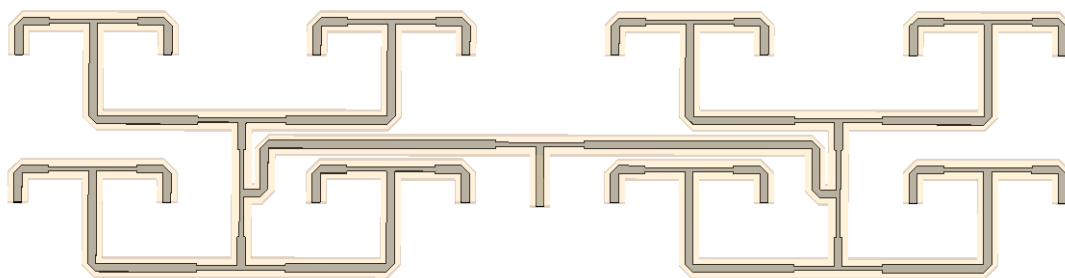


Рис. 7. Делитель мощности на бинарных полосковых делителях

Fig. 7. Power divider on binary strip dividers

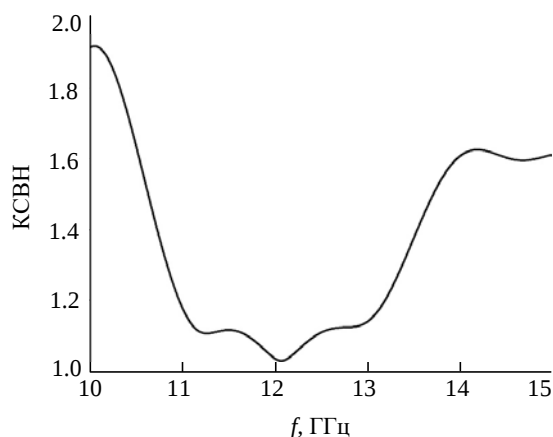


Рис. 8. Частотная зависимость КСВН полоскового делителя мощности

Fig. 8. Frequency dependence of VSWR of the strip power divider

получена упрощенная электродинамическая модель делителя (рис. 9).

Деление мощности осуществлено за счет деления в H -плоскости SIW-волновода. Металлизированные отверстия, расположенные в центре канала SIW-волновода, позволяют достичь необходимого уровня согласования. В рабочем диапазоне КСВН также не превышает 1.7 (рис. 10).

Для переноса энергии с полосковой линии передачи на SIW-волновод был разработан переход, представленный на рис. 11. Мощность с полосковой линии передачи 1 к SIW-волноводу 3 передается за счет использования излучающей щели 2. Для расширения рабочей полосы частот введены согласующие неоднородности в SIW-волноводе 4 и на полосковой линии 5. Неоднородность позволяет добиться дополни-

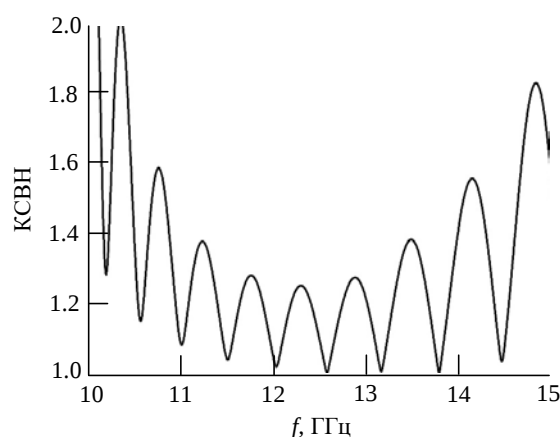


Рис. 10. Частотная зависимость КСВН делителя на SIW-волноводе

Fig. 10. Frequency dependence of VSWR of the divider on the SIW waveguide

тельного резонанса на необходимой частоте. Частотная зависимость КСВН данного перехода представлена на рис. 12.

На следующей ступени диаграммообразующей схемы антенны осуществляется переход с SIW-волновода на волноводную линию передач, так как фазовращатель имеет волноводные выходы стандартного сечения WR-75. В ходе исследования был сконструирован широкополосный делитель мощности на SIW-волноводе с выходом на прямоугольный волновод (рис. 13).

В делителе применены две диафрагмы, одна из которых имеет H -образную форму 2. Часть SIW-волновода в данном случае представляет собой две подложки из материала F4BM300 толщиной 2 мм и с диэлектрической проницаемо-

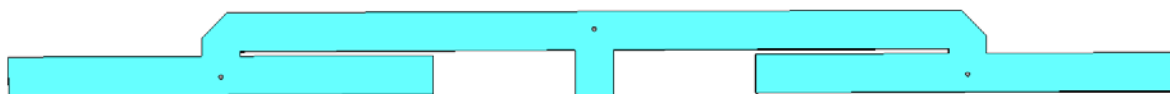


Рис. 9. Делитель мощности на SIW-волноводе

Fig. 9. Power divider on SIW waveguide

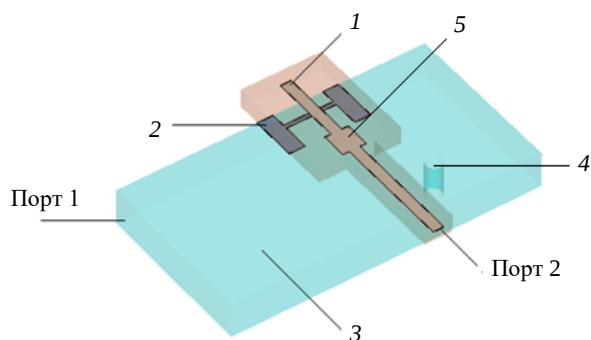


Рис. 11. Переход с полосковой линии на SIW-волновод:
1 – полосковая линия; 2 – переходная щель;
3 – SIW-волновод; 4, 5 – согласующие неоднородности

Fig. 11. Transition from strip line to SIW waveguide:
1 – strip line; 2 – transition slit; 3 – SIW waveguide;
4, 5 – matching inhomogeneities

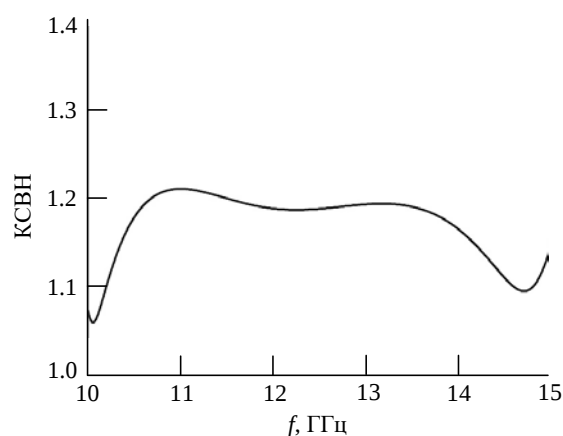


Рис. 12. Частотная зависимость КСВН перехода с полосковой линии на SIW-волновод

Fig. 12. Frequency dependence of VSWR of the transition from strip line to SIW-waveguide

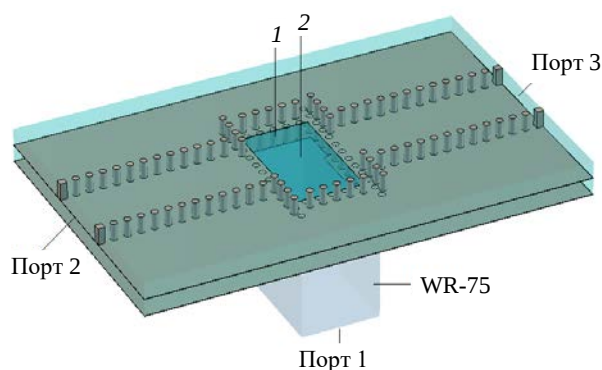


Рис. 13. Структура перехода с SIW-волновода на прямоугольный волновод WR-75:

1 – первая связующая диафрагма прямоугольной формы;
2 – вторая связующая диафрагма H-формы

Fig. 13. Structure of transition from SIW waveguide to WR-75 rectangular waveguide: 1 – first coupling aperture of rectangular shape; 2 – second coupling aperture of H-shape

стью $\varepsilon = 3.0$ каждая. Диафрагмы выступают в роли резонаторов, взаимодействие которых рас-

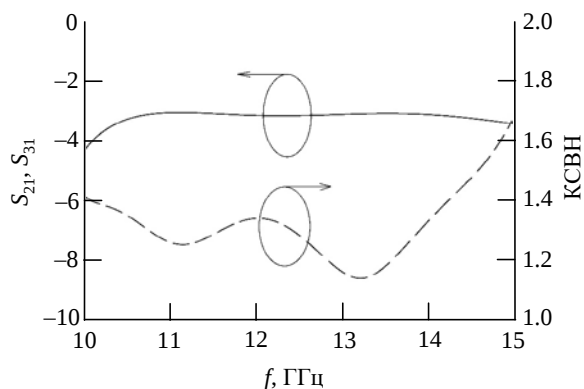


Рис. 14. Частотные зависимости КСВН и коэффициентов передачи перехода с полосковой линии на SIW-волновод

Fig. 14. Frequency dependences of VSWR and transmission coefficients of transition from strip line to SIW-waveguide

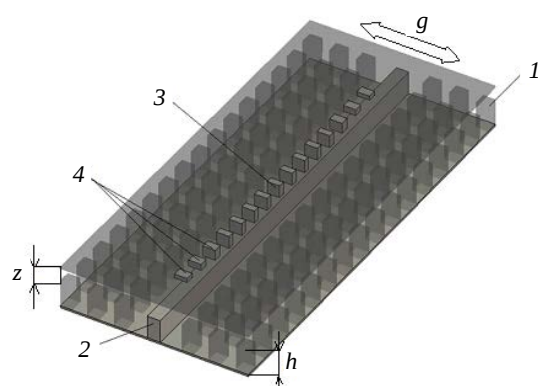


Рис. 15. Модель фазовращателя на гар-волновое:
1 – периодическая заграждающая структура;
2 – П-сечение гар-волновода; 3 – замедляющая
меандровая линия; 4 – элемент согласования

Fig. 15. Model of a phase shifter on a gap-waveguide:
1 – periodic barrier structure;
2 – Π -section of the gap-waveguide;
3 – retarding meander line; 4 – matching element

ширяет полосу рабочих частот. На рис. 14 представлены характеристики полученного перехода.

Коэффициент передачи составляет не менее -3.1 дБ в рабочем диапазоне частот, а КСВН не превышает 1.6.

Механически управляемый фазовращатель построен на основе гар-волновода Π -сечения (рис. 15) [14].

Особенность гар-волновода как линии передачи по сравнению с классическим полым волноводом в том, что для него не требуется прямого электрического контакта стенок волновода, что делает данную линию передачи перспективной для разработки подвижных СВЧ-узлов.

Периодическая структура в виде штырей 1 служит препятствием к распространению волн в

нежелательных направлениях за счет того, что ведет себя как поверхность с высоким импедансом [15]. Нижняя рабочая частота определяется высотой h штырей в периодической структуре, которая равна приблизительно $\lambda/4$. Верхняя частота зависит также от высоты зазора z до крышки и определяется соотношением $h + z = \lambda/2$, где λ – длина волны в свободном пространстве.

Так как гар-волновод в данном фазовращателе имеет П-сечение, то поперечное электрическое поле концентрируется в узком зазоре между крышкой и П-гребнем (рис. 15, 2), а структура поля приближена к ТЕМ-волне.

На верхней крышке фазовращателя расположена меандровая замедляющая линия (рис. 15, 3). Принцип действия фазовращателя заключается в следующем. Когда $g = 0$ (замедляющая меандровая линия над П-гребнем), концентрация поля между гребнем и замедляющей линией максимальна, фазовая задержка имеет наибольшее значение. Когда замедляющая линия сдвигается в сторону на величину $g \neq 0$, связь ослабляется, и вносимая фазовая задержка уменьшается. Предложенный фазовращатель обеспечивает 360-градусную фазовую перестройку. Высота гребней в меандровой замедляющей линии меняется плавно (рис. 15, 4), что обеспечивает КСВН во всем рабочем диапазоне не более 1.5 (рис. 16).

Исходя из характеристик, представленных на рис. 17, вносимая временная задержка при сдвиге замедляющей линии в рабочем диапазоне частот носит практически линейный ха-

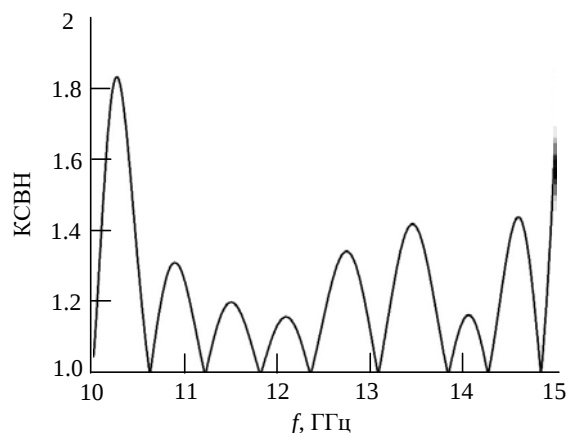


Рис. 16. Частотная зависимость КСВН фазовращателя при $g = 0$

Fig. 16. Frequency dependence of VSWR of the phase shifter at $g = 0$

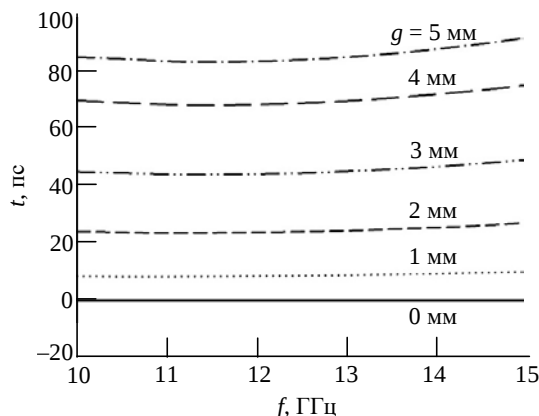


Рис. 17. Частотные зависимости временной задержки при различных сдвигах замедляющей линии

Fig. 17. Frequency dependences of time delay at different shifts of the decelerating line

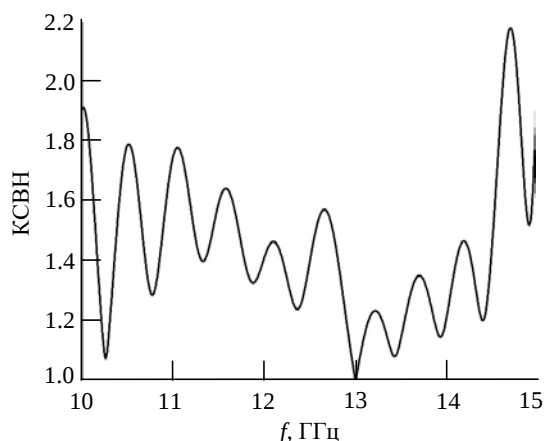


Рис. 18. Частотная зависимость КСВН антенной решетки

Fig. 18. Frequency dependence of VSWR of the antenna array

актер, что говорит о возможности построения АР с минимальным частотным сканированием.

Электродинамическое моделирование полной АР. Частотная зависимость КСВН полной АР представлена на рис. 18.

Для оценки работы АР с механически управляемым фазовращателем на гар-волноводе были рассчитаны диаграммы направленности (ДН) при различной фазовой задержке ϕ на фазовращателях на крайних частотах рабочего диапазона (рис. 19).

Деградация коэффициента направленного действия (КНД) при отклонении луча на 40° составляет около 4 дБ на частоте 10.7 ГГц и около 6 дБ на 14.5 ГГц согласно графику, представленному на рис. 20.

На верхней частоте рабочего диапазона при фазовой задержке 210° наблюдается сильное

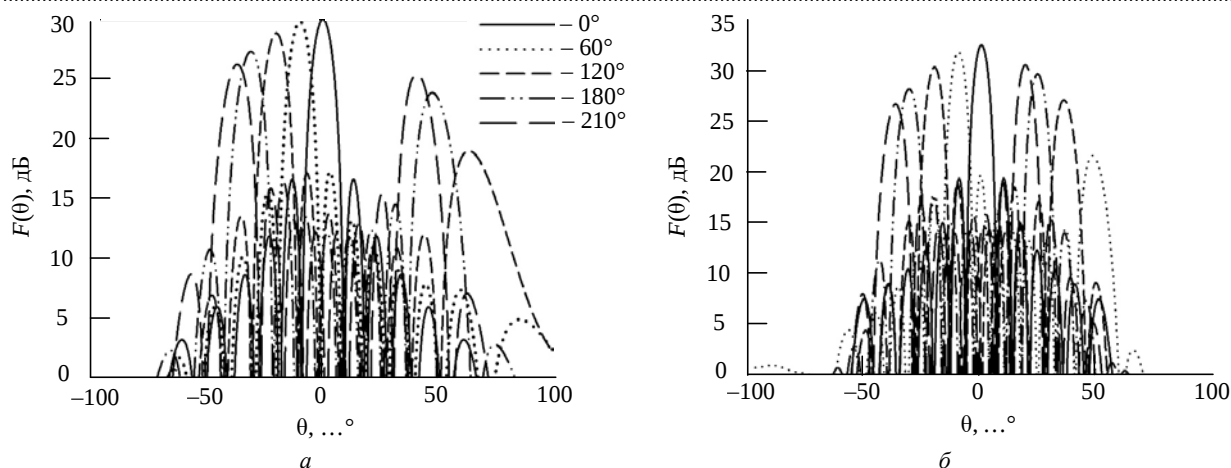


Рис. 19. Диаграммы направленности антенной решетки при различных значениях фазовой задержки:
а – частота 10.7 ГГц; б – частота 14.5 ГГц

Fig. 19. Radiation patterns of the antenna array at different values of the phase delay:
а – frequency 10.7 GHz; б – frequency 14.5 GHz

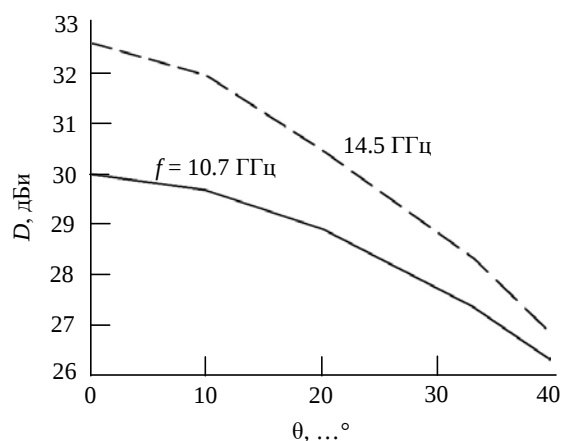


Рис. 20. Зависимость КНД от угла отклонения диаграммы направленности

Fig. 20. Dependence of directivity on the angle of deflection of the radiation pattern

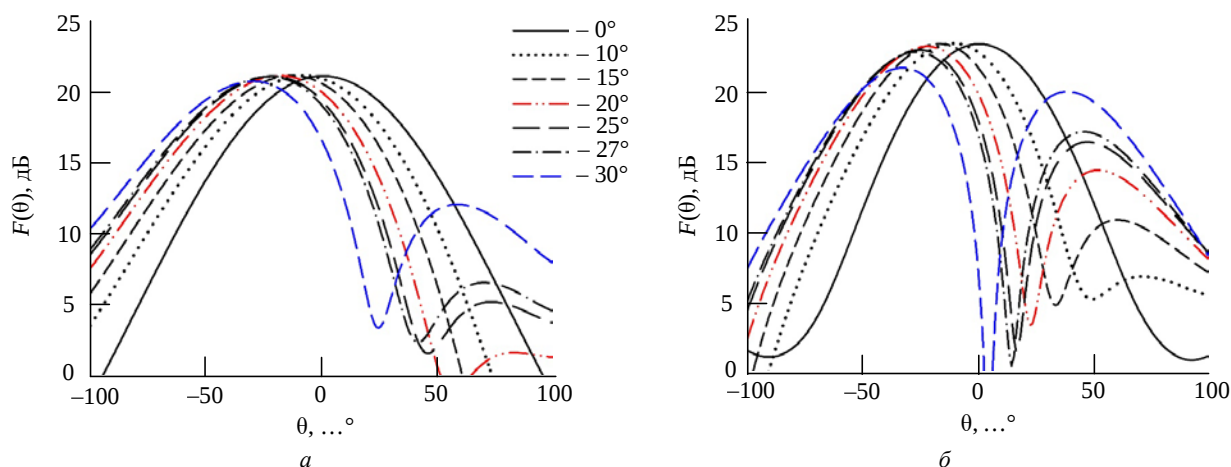


Рис. 21. Диаграммы направленности подрешетки при различной фазовой задержке на линиях:
а – частота 10.7 ГГц; б – частота 14.5 ГГц

Fig. 21. Radiation patterns of the subarray at different phase delays on the lines:
а – frequency 10.7 GHz; б – frequency 14.5 GHz

возрастание бокового лепестка, связанное с ДН подрешетки.

Диапазон сканирования не достигает более широких углов из-за узкой ДН подрешетки. Для расширения диапазона сканирования АР и увеличения КНД ДН подрешетки следует наклонить. На рис. 21 представлены ДН подрешетки при различных вносимых линейных фазовых задержках на линиях.

Исследование показало, что наиболее оптимальным будет отклонение ДН подрешетки на угол 25° , при котором достигается минимальное падение КНД АР во всем рабочем диапазоне частот. На рис. 22 представлены ДН АР при соответствующей подрешетке и различных фазовых задержках φ фазовращателя на гар-волноводах.

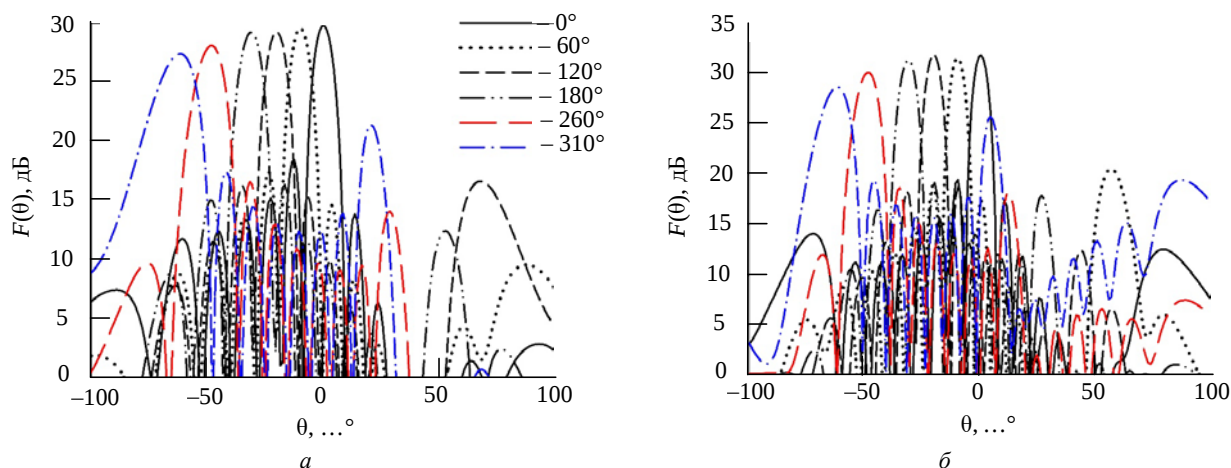


Рис. 22. Диаграммы направленности антенной решетки при сканировании: а – частота 10.7 ГГц; б – частота 14.5 ГГц

Fig. 22. Radiation patterns of the antenna array during scanning: а – frequency 10.7 GHz; б – frequency 14.5 GHz

Падение КНД составляет 2.5 дБ на частоте 10.7 ГГц и 2.96 дБ на частоте 14.5 ГГц, а угол сканирования превышает 60°. Использование отклоненной ДН подрешетки снизило КНД в 0° на 0.2 дБ на частоте 10.7 ГГц и на 0.38 дБ на частоте 14.5 ГГц.

Заключение. По результатам электродинамического моделирования можно сделать вывод о возможности использования механически управляемого фазовращателя на гар-волноводе для построения АС с механоэлектрическим типом сканирования. КНД разработанной АР в секторе углов сканирования $\pm 60^\circ$ в диапазоне частот 10.7...14.5 ГГц снижается на 2.96 дБ. Использование предложенного фазовращателя дает возможность построения систем управления лучом, а использование механоэлектриче-

ского типа сканирования позволяет сделать АС более доступной потребителю. Использование подрешетки с отклоненной ДН позволяет скорректировать ДН подрешетки таким образом, чтобы максимально расширить сектор сканирования при разреженном количестве управляемых элементов.

Таким образом, полученная модель АР с фазовращателем на гар-волноводе в качестве управляемого элемента обеспечивает широкоугольное МЭС, что необходимо при построении терминалов спутниковой связи.

Также стоит отметить, что разработанный фазовращатель обладает высокой технологической воспроизводимостью и простотой изготовления, что может существенно снизить стоимость сканирующей антенны.

Список литературы

1. A fast and accurate LEO satellite-based direct position determination assisted by TDOA measurements / S. Li, Q. Zhang, B. Deng, B. Wu, Y. Gao // China Communications. 2022. Vol. 19, № 1. P. 92–103. doi: 10.23919/JCC.2022.01.008
2. Architectures and Key Technical Challenges for 5G Systems Incorporating Satellites / A. Guidotti, A. Vanelli-Coralli, M. Conti, S. Andrenacci, S. Chatzinotas, N. Maturo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, № 3. P. 2624–2639. doi: 10.1109/TVT.2019.2895263
3. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges / O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, Sh. K. Sharma, B. Shankar, J. F. M. Montoya // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, № 1. P. 70–109. doi: 10.1109/COMST.2020.3028247
4. Laniewski D., Lanfer E., Aschenbruck N. Measuring Mobile Starlink Performance: A Comprehensive

Look // IEEE Open J. of the Communications Society. 2025. Vol. 6. P. 1266–1283.

doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3539836

5. 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 // Proc. of the 4th European Conf. on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 12–16 Apr. 2010. IEEE, 2010. P. 1–5.

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. Wang Z. X., Dou W. B. Dielectric Lens Antennas Designed for Millimeter Wave Application // 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

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

9. Lin H. S., Mou L. W., Cheng Y. J. High-Efficiency Wide-Angle Scanning Mechano-electrical Hybrid Phased Array Antenna with Mechanically Reconfigurable Element Pattern // IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2023. Vol. 22, № 7. P. 1567–1571.

doi: 10.1109/LAWP.2023.3251439

10. Разработка и исследование планарной антенны с широкоугольным механическим сканированием / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, Н. Б. Смольянов // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXX Междунар. науч.-техн. конф.: в 5 т., Воронеж, 16–18 апр. 2024. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. С. 225–230.

11. A New Design of K/Ka Dual-Band Aperture Coupled Antenna / Z. Lai, J. Jiang, F. Zhu, Y. Chen // 12th Int. Conf. on communication software and networks (ICCSN), Chongqing, China, 12–15 June 2020. IEEE, 2020. P. 182–185.

doi: 10.1109/ICCSN49894.2020.9139121

12. Wideband Aperture Coupled Line Feeding Microstrip Patch Antenna Design Using Different Shaped Patches / M. Abdullah-Al-Mamun, M. S. Anower, M. R. Billah, S. Datto // Int. Conf. on computer communication and informatics, Coimbatore, India, 27–29 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 1–6.

doi: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402296

13. Механически управляемый фазовращатель Ku-диапазона / А. Д. Полигина, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, Р. О. Рязанцев // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50, вып. 13. С. 47–50.

doi: 10.61011/PJTF.2024.13.58169.19881

14. Полигина А. Д., Поленга С. В., Стригова Е. А. Механически управляемый фазовращатель на основе gap-волновода // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50, вып. 3. С. 44–46.

doi: 10.61011/PJTF.2024.03.57044.19748

15. Gap waveguide PMC packaging for improved isolation of circuit components in high-frequency microwave modules / A. U Zaman, M. Alexanderson, T. Vukusic, P. S. Kildal // IEEE Trans. Components, Packaging and Manufacturing Technol. 2014. Vol. 4, iss. 1. P. 16–25.

doi: 10.1109/TCPMT.2013.2271651

Информация об авторах

Полигина Анастасия Дмитриевна – магистр по направлению "Радиотехника" (2021, Сибирский федеральный университет), аспирантка по направлению "Антенны, устройства СВЧ и их технологии", инженер-исследователь кафедры радиотехники Сибирского федерального университета, инженер-конструктор АО «НПП "Радиосвязь"». Автор 22 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; спутниковая связь.

Адрес: АО «НПП "Радиосвязь"», ул. Декабристов, д. 19, Красноярск, 660021, Россия

E-mail: anastasia0711@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5810-7626>

Поленга Станислав Владимирович – преподаватель-исследователь по направлению "Радиотехника" (2009, Сибирский федеральный университет), 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>

References

1. Li S., Zhang Q., Deng B., Wu B., Gao Y. A Fast and Accurate LEO Satellite-Based Direct Position Determination Assisted by TDOA Measurements. China Communications. 2022, vol. 19, no. 1, pp. 92–103.

doi: 10.23919/JCC.2022.01.008

2. Guidotti A., Vanelli-Coralli A., Conti M., Andrenacci S., Chatzinotas S., Maturo N. Architectures and Key Technical Challenges for 5G Systems Incorporating Satellites. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019, vol. 68, no. 3, pp. 2624–2639.

doi: 10.1109/TVT.2019.2895263

3. Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma Sh. K., Shankar B., Montoya J. F. M. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021, vol. 23, no. 1, pp. 70–109.

doi: 10.1109/COMST.2020.3028247

4. Laniewski D., Lanfer E., Aschenbruck N. Measuring Mobile Starlink Performance: A Comprehensive Look. IEEE Open J. of the Communications Society. 2025, vol. 6, pp. 1266–1283.

doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3539836

Низкопрофильная сканирующая антенная решетка

с использованием механически управляемых фазовращателей

Low-Profile Scanning Antenna Array Using Mechanically Controlled Phase Shifters

5. Manrique R., Torres R., Domínguez C., Tiezzi F., Mosig J. R. Design and Prototyping of a Microstrip Transmitreceive Array Antenna for Mobile Ku-band Satellite Terminals. Proc. of the 4th European Conf. on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 12–16 April 2010. IEEE, 2010, pp. 1–5.

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. Wang Z. X., Dou W. B. Dielectric Lens Antennas Designed for Millimeter Wave Application. 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

8. Litinskaya E. A., Panko V. S., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Phased Array Antenna with Mechanical and Electronic Beam Steering. J. Achievements of Modern Radioelectronics. 2015, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.)

9. Lin H. S., Mou L. W., Cheng Y. J. High-Efficiency Wide-Angle Scanning Mechano-electrical Hybrid Phased Array Antenna with Mechanically Reconfigurable Element Pattern. IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2023, vol. 22, no. 7, pp. 1567–1571. doi: 10.1109/LAWP.2023.3251439

10. Pasternak Yu. G., Pendyurin V. A., Proskurin D. K., Smolyanov N. B. Development and Study of the Planar Antenna with Wide-Angle Mechanical Scanning. Radiolocation, navigation, communication : Proc. of the XXX Intern. Scientific and Technical

Conf. Voronezh, 16–18 April 2024. Voronezh, Publishing House VSU, 2024, pp. 225–230. (In Russ.)

11. Lai Z., Jiang J., Zhu F., Chen Y. A New Design of K/Ka Dual-Band Aperture Coupled Antenna. 12th Int. Conf. on communication software and networks (ICCSN), Chongqing, China, 12–15 June 2020. IEEE, 2020, pp. 182–185.

doi: 10.1109/ICCSN49894.2020.9139121

12. Abdullah-Al-Mamun M., Anower M. S., Bilal M. R., Datto S. Wideband Aperture Coupled Line Feeding Microstrip Patch Antenna Design Using Different Shaped Patches. Int. Conf. on computer communication and informatics, Coimbatore, India, 27–29 Jan. 2021. IEEE, 2021, pp. 1–6.

doi: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402296

13. Poligina A. D., Polenga S. V., Strigova E. A., Ryazantsev R. O. Mechanically Controlled Ku-Band Phase Shifter. Technical Physics Let. 2024, vol. 50, iss. 13, pp. 47–50. (In Russ.)

doi: 10.61011/PJTF.2024.13.58169.19881

14. Poligina A. D., Polenga S. V., Strigova E. A. Mechanically Controlled Phase Shifter Based on a Gap-Waveguide. Technical Physics Let. 2024, vol. 50, iss. 3, pp. 44–46. (In Russ.)

doi: 10.61011/PJTF.2024.03.57044.19748

15. Zaman A. U., Alexanderson M., Vukusic T., Kildal P. S. Gap Waveguide PMC Packaging for Improved Isolation of Circuit Components in High-Frequency Microwave Modules. IEEE Trans. Components, Packaging and Manufacturing Technol. 2014, vol. 4, iss. 1, pp. 16–25.

doi:10.1109/TCPMT.2013.2271651

Information about the authors

Anastasia D. Poligina, Master's degree in Radio engineering (2021, Siberian Federal University), Postgraduate student in Antennas, microwave devices and their technologies, Research engineer of the Department of Radio Engineering of Siberian Federal University, Design engineer of JSC «NPP "Radiosvaz"». The author of 22 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite communications.

Address: JSC «NPP "Radiosvaz"», 19, Dekabristov St., Krasnoyarsk 660021, Russia

E-mail: anastasia0711@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5810-7626>

Stanislav V. Polenga, Teacher-Researcher in Radio engineering (2009, Siberian Federal University), Senior Lecturer of the Department of Radio Engineering of Siberian Federal University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; reflective antenna arrays; 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 the Department of Radio Engineering of Siberian Federal University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite communications; scanning antennas.

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

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

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