

Разработка фазированной антенной решетки с запиткой от печатной линзы Ротмана для мобильного терминала спутниковой связи

Ю.Г. Пастернак^{1,2}, В.А. Пендюрин¹, К.С. Сафонов², С.М. Федоров²

¹ АО НПП «Автоматизированные системы связи»
394062, Россия, г. Воронеж,
ул. Пеше-Стрелецкая, 108

² Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, г. Воронеж,
ул. 20-летия Октября, 84

Аннотация – Подключение к Интернету, когда и где бы вы ни путешествовали, больше не является роскошью. Все люди имеют возможность подключаться к Интернету и обмениваться данными вдали от дома. Спутниковая связь в наше время является неотъемлемой частью успешной и качественной связи. Антенны спутниковой связи обычно устанавливаются на мобильных наземных терминалах. Благодаря своему широкому охвату и универсальности спутниковая связь непрерывно улучшается и адаптируется к телекоммуникационным потребностям многих стран, несмотря на то что широкополосная связь, Интернет и оптоволоконная связь применяются почти везде. Нам известно, что больше 50 % всех спутников, которые находятся на орбитах, – это спутники связи.

Ключевые слова – мобильный терминал спутниковой связи; фазированная антенная решетка; сегментно-параболические антенны; линза Ротмана.

Введение

В последнее время спрос на мобильные спутниковые терминалы связи вырос на 22 %, а спрос на услуги спутниковой связи – на 6 % [1]. Мобильная спутниковая связь (МСС) является главным двигателем всей спутниковой индустрии [1; 2]. Из рис. 1 видно, что спутники предназначены для непрерывной и качественной связи в самолетах, кораблях, наземных транспортных средствах и т. д. [3; 4]. Пассажиры, летящие в самолетах, довольно часто в полете пользуются ноутбуками или смартфонами. С помощью спутниковой связи эти устройства могли бы подключаться в полете к Интернету и загружать любое видео. На быстро движущихся наземных транспортных средствах также необходимо обеспечивать постоянной хорошей связью [5; 6]. Экипажу судна в океане необходимо поддерживать непрерывную связь для постоянного обновления навигационных карт, для связи со штабом и другими суднами, а также для того, чтобы следить за погодными условиями на море и в океане. Переносные мобильные спутниковые терминалы для оборонной промышленности должны быть быстро развертываемыми и поддерживать связь в любых, самых критических условиях. Для выполнения этих задач спутниковая связь является хорошей альтернативой LTE-связи из-за своей надежности, экономической

эффективности, а также легкой доступности и масштабируемости [7].

В спутниковой связи неотъемлемой частью являются антенны, которые передают и принимают модулированные радиочастотные сигналы сквозь толщу атмосферы [8]. Приемные и передающие антенные системы выступают основной разрешающей полезной нагрузкой на спутниковых терминалах связи [9]. На данный момент в литературе мало работ, посвященных анализу существующих антенн нового времени. Однако большое количество антенн постоянно развиваются и улучшаются, что влечет за собой непрерывный спрос и интерес рынка. Очень важно, чтобы электрические характеристики антенн соответствовали основным требованиям спутниковой связи [8; 10; 11]. Спутниковая связь – это один из видов космической радиосвязи типа «Точка – точка» с режимом распространения по прямой видимости. Антенной решетке спутниковой связи необходимо иметь достаточно хорошую и узкую диаграмму направленности, а также высокий коэффициент усиления, минимальные боковые лепестки и низкую перекрестную поляризацию для того, чтобы был качественный и хороший сигнал, а соответственно, и связь. При ограниченной мощности излучения и заданном диапазоне частот большой коэффициент усиления означает высокую эффективную

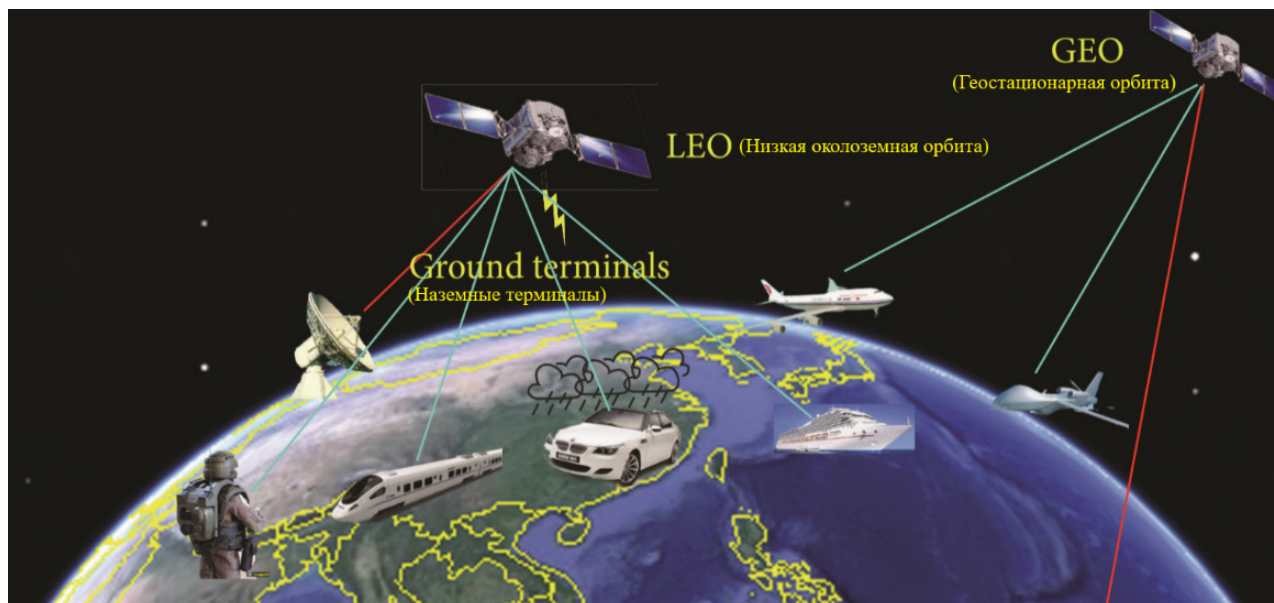


Рис. 1. Варианты современной мобильной спутниковой связи
Fig. 1. Options for modern mobile satellite communications

изотропную излучаемую мощность передающей антенны, другими словами – большую температуру усиления/шума системы (G/T) приемной антенны. Узкая ширина луча диаграммы направленности и подавленные боковые лепестки играют решающую роль для предотвращения при приеме или передачи нежелательных сигналов, которые могут привести к многолучевому замиранию или образовать помехи для соседних спутниковых систем связи. Каналами связи для спутниковых антенн являются атмосферные слои нашей планеты, поэтому есть ограничения на применяемый диапазон частот [12]. Природа предоставила нам ограниченный ресурс для приема и передачи связи, поэтому существуют различные ответственные организации по контролю и распределению частот в различных регионах. На сегодняшнее время антенны Ku -диапазона наиболее востребованы в гражданской спутниковой связи. Более 250 спутников в космосе настроены на нагрузку Ku -диапазона. Этот диапазон имеет отличие в том, что используются терминалы с достаточно малой апертурой, широкой полосой пропускания, а также у Ku -диапазона глобальный охват местности. В военных целях в основном используются группы X . Стоит отметить, что в последнее время спутники Ka диапазона все больше и больше разворачиваются по всему миру, что означает потенциально увеличение скорости передачи данных, по сравнению с перегруженным Ku -диапазоном [13]. Еще один важный параметр – это поляризация. В спутниковой связи широко используют линей-

ную (ЛП) и круговую (КП) поляризацию. Во всех случаях передатчик ЛП требует строгого выравнивания поляризации при приеме сигнала. Сигналу с КП не страшны погодные условия, такие как дождь, туман, снег – через них он проходит с незначительными потерями. Ортогональность обеих поляризаций позволяет увеличить пропускную способность канала за счет совместного использования одной и той же частоты. В настоящее время ЛП преобладает в применении в Ku -диапазоне приемных терминалов спутниковой связи, однако КР становится популярной для Ka -диапазона.

Также существуют дополнительные требования к производительности антенн. Один из самых главных параметров в спутниковой связи – возможность сканирование лучом местности. Объекты спутниковой связи постоянно перемещаются, и их нужно ориентировать между собой, поэтому необходимо, чтобы антенна была быстродействующей, легко устанавливаемой и ремонтпригодной. Неклассическим примером можно назвать спутниковую связь по телефону. Для непрерывной связи, как краткосрочной, так и долгосрочной, должна быть обеспечена полная мобильность. Однако не всегда возможно поддерживать мобильность терминала из-за различных ограничений, таких как конструкторские особенности, а также ограничения, связанные с географическим местом обслуживания. Из-за этого антенны больших размеров устанавливаются на малые самолеты, что приводит к увеличению массы летательного аппарата, что, в свою очередь, нежелательный

показатель. Как для военных, так и для гражданских целей лишний вес и появление на корпусе дополнительного оборудования или дополнительного выступа – это нежелательные изменения, т. к. каждый килограмм влияет на качество полета [14]. А также установка антенного терминала на самолет негативно влияет на аэродинамические характеристики фюзеляжа.

Немаловажную роль для хорошей и качественной спутниковой связи играет скорость сканирования местности.

Антенна должна обеспечить сканирование угла места в широком диапазоне для того, чтобы была возможность перестраиваться с одного спутника на другой [15]. Так, для сканирования угла места с 1D-лучевой управляемостью используется фазированная антенная решетка [16]. Недостатками ФАР, однако, являются габариты самой антенной решетки и высокая конечная стоимость. Фазовращатели должны быть разработаны таким образом, чтобы не допускать отклонения луча, чтобы при приеме и передаче его отклонение было минимальным. ФАР также снижают эффективность на миллиметровых волнах из-за использования питающей линии передачи, на которой при высоких частотах происходят большие потери [17].

В настоящей работе рассмотрена линейная фазированная антенная решетка, состоящая из сегменто-параболических элементов, используемая в качестве антенной системы для мобильного терминала спутниковой связи, функционирующего в полосе частот от 10,9 до 14,5 ГГц. Антенная решетка используется для сканирования в угло-местной области в пределах $\pm 45^\circ$ относительно плоскости антенной решетки; сканирование в азимутальной плоскости осуществляется путем вращения антенной системы на платформе.

Выбор сегменто-параболических антенных элементов обусловлен необходимостью формирования лепестков в довольно широкой полосе частот с коэффициентом частотного перекрытия 1,33, а также стабильностью диаграмм направленности элементов и простотой их конструкции.

Из подобных соображений в качестве диаграммообразующей схемы выбрана линза Ротмана, построенная на основе симметричной микрополосковой линии.

Высота антенных элементов ограничена, с одной стороны, необходимостью минимизации боковых лепестков при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот, с другой – качеством согласования в низкочастотной области

указанного выше диапазона частот, особенно – при максимальном отклонении лепестков диаграммы направленности.

Особенно важным представляется минимизация уровня боковых лепестков в режиме приема, т. к. это позволяет существенно уменьшить уровень шумов на выходе приемной антенной системы.

1. Схема приемной аналого-цифровой антенной системы, включающей в себя физическую антенную решетку и интерполяционную виртуальную антенную решетку

В качестве способа минимизации боковых лепестков приемной антенной системы при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот в настоящей работе предлагается использовать интерполяционную виртуальную антенную решетку.

На рис. 2 показана структурная схема приемной аналого-цифровой антенной системы, включающей в себя физическую антенную решетку с сегменто-параболическими элементами и интерполяционную виртуальную антенную решетку, формируемую на основе цифровой обработки конвертированных сигналов, принятых элементами антенной решетки, с использованием стандартной процедуры сплайн-интерполяции. Сигналы, сформированные на выходах линзы Ротмана, конвертируются, оцифровываются и формируются суммарные диаграммы направленности приемной аналого-цифровой антенной системы для ряда дискретных направлений в угло-местной плоскости в 90-градусном секторе углов, от зенитного направления до горизонтального направления; при этом соседние главные лепестки перекрываются между собой по уровню не ниже –3 дБ.

Основной научной задачей статьи является исследование возможности существенного уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности приемной аналого-цифровой антенной системы за счет формирования интерполяционной антенной решетки.

Основной инженерной задачей данной работы является проработка антенной системы, пригодной в дальнейшем для серийного производства терминалов подвижной связи Ku-диапазона.

Важным моментом является выбор таких технических решений, которые обеспечат приемлемую стоимость серийного изделия, обеспечивающую конкурентоспособную цену на российском

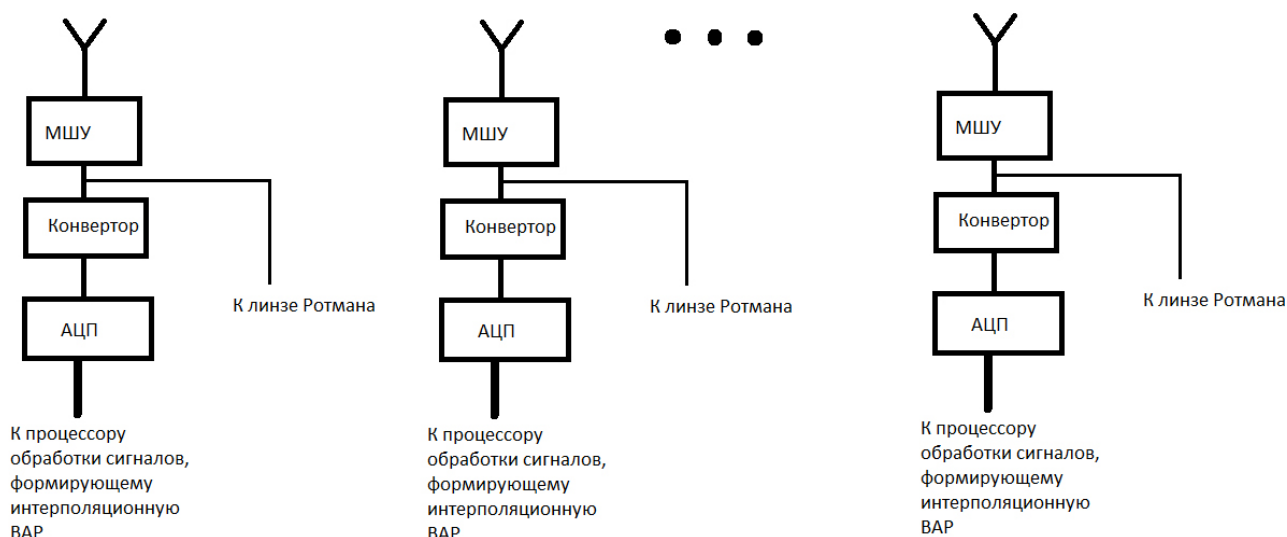


Рис. 2. Структурная схема приемной аналого-цифровой антенной системы, включающей в себя физическую антенную решетку и интерполяционную виртуальную антенную решетку

Fig. 2. Block diagram of the receiving analog-digital antenna system, which includes a physical antenna array and an interpolating virtual antenna array

рынке мобильных терминалов спутниковой связи. Антенная система для терминалов подвижной связи должна удовлетворять требованиям различных групп потребителей, например:

- для бытового сектора – должна иметь низкую стоимость и малый вес (для установки на легковой автомобиль);
- для железнодорожного и ведомственного транспорта – удовлетворять жестким условиям эксплуатации.

Для обеспечения работы с существующей спутниковой группировкой, расположенной на геостационарной орбите, требуются антенные системы, имеющие коэффициент усиления не менее 32–35 дБ. Для обеспечения этих требований антенная система на основе фазированной антенной решетки (ФАР) должна содержать 800–1600 антенных элементов, а антенна на основе параболического отражателя должна иметь диаметр не менее 90 см.

Учитывая то, что антенные системы будут устанавливаться на подвижном транспорте, они должны обладать возможностью оперативного управления лучом (диаграммой направленности).

Антенная система терминала подвижной связи должна обрабатывать динамику движения транспортного средства, на котором она размещена:

- обеспечивать поддержание точности наведения антенной системы на спутник по азимуту не менее 0,5 градуса (RMS),
- обеспечивать скорость вращения по азимуту – не менее 60 град/сек;
- крен - диапазон изменений $\pm 30^\circ$, скорость изменения – не более 100° в секунду;

- обеспечивать отработку параметров крен, тангаж – диапазон изменений $\pm 30^\circ$, скорость изменения – не более 100° в секунду;
- обрабатывать изменения.

2. Фазированная антенная решетка из 24 сегменто-параболических антенн с запиткой от печатной линзы Ротмана

Антенная решетка состоит из 24 параболических секторных антенн с емкостными короткозамкнутыми карманами, рис. 3. Емкостные короткозамкнутые карманы используются для уменьшения интенсивности поверхностных волн, бегущих вдоль решетки, интерферирующих с объемными волнами и ухудшающих согласование элементов с фидерным трактом и диаграмму направленности ФАР, особенно при максимальном отклонении луча от нормали.

Номограмма Смита ФАР при отклонении луча на угол 45 град. от нормали при запитке 24 портов от разработанной печатной линзы Ротмана приведена на рис. 4. Диаграммы направленности ФАР при отклонении луча на угол 45 град. от нормали отражены на рис. 5–7.

3. Разработка печатной линзы Ротмана, используемой в качестве диаграммообразующей схемы фазированной антенной решетки

Топология разработанной линзы Ротмана показана на рис. 8. Линза спроектирована для ее реализации в виде симметричной печатной

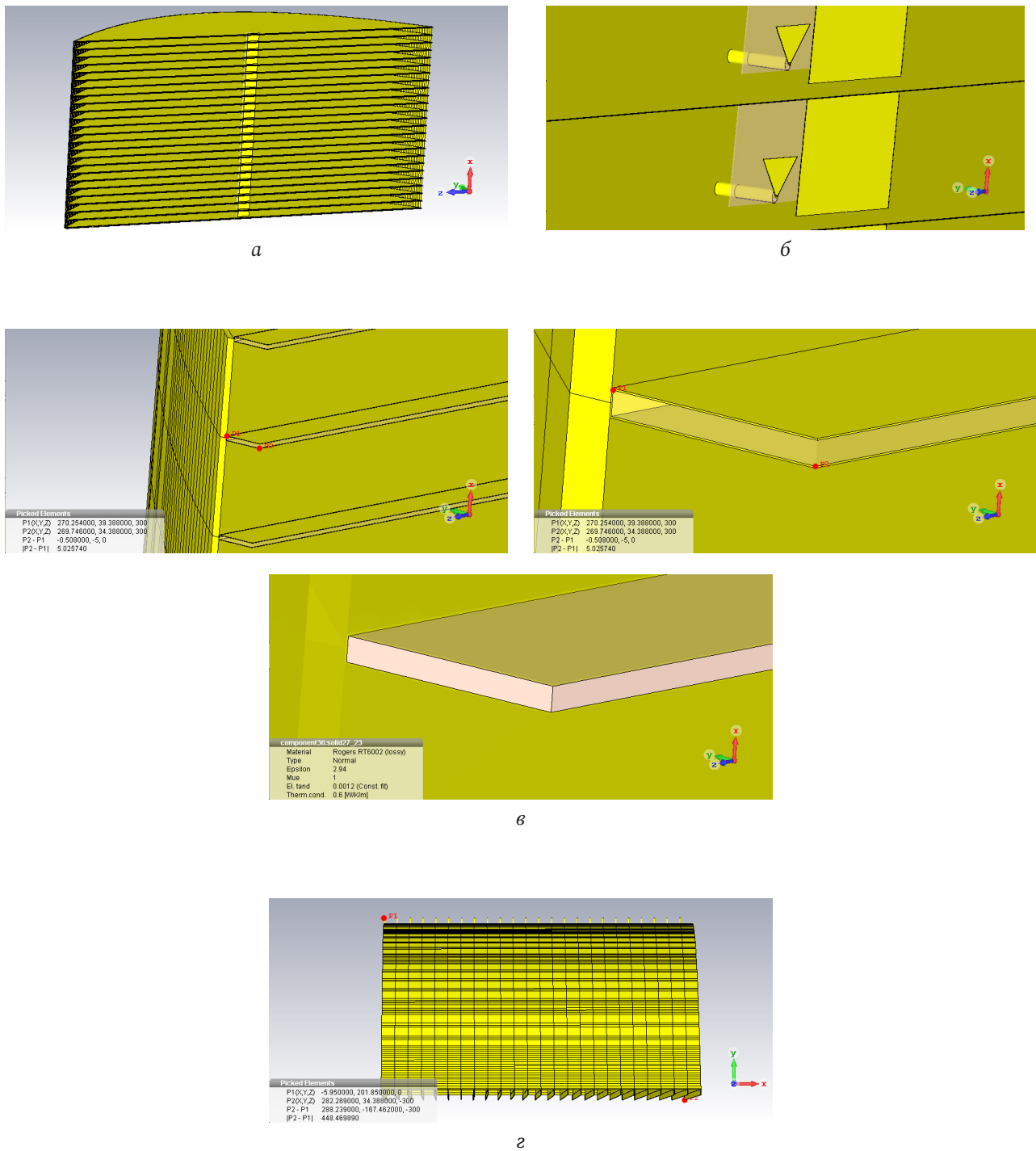


Рис. 3. Конструкция ФАР из 24 сегменто-параболических антенн: *a* – общий вид антенной решетки из 24 сегменто-параболических антенн; *б* – запитка элементов осуществляется с помощью коаксиальных кабелей марки EZ_47_A1_TP_M17 с внешним диаметром 1,2 мм, питающих печатные монополи с рефлекторами; *в* – конструкция и материал короткозамкнутых карманов с емкостным характером входного сопротивления; *г* – вид ФАР сбоку. Глубина – 167,5 мм, высота – 288,2 мм, ширина – 600 мм
Fig. 3. Design of a phased antenna array of 24 segment-parabolic antennas: *a* – general view of the antenna array of 24 segment-parabolic antennas; *b* – the elements are powered using coaxial cables of the EZ_47_A1_TP_M17 brand with an outer diameter of 1.2 mm, feeding printed monopoles with reflectors; *c* – design and material of short-circuited pockets with a capacitive nature of the input resistance; *d* – side view of the virtual antenna array. Depth – 167.5 mm, height – 288.2 mm, width – 600 mm

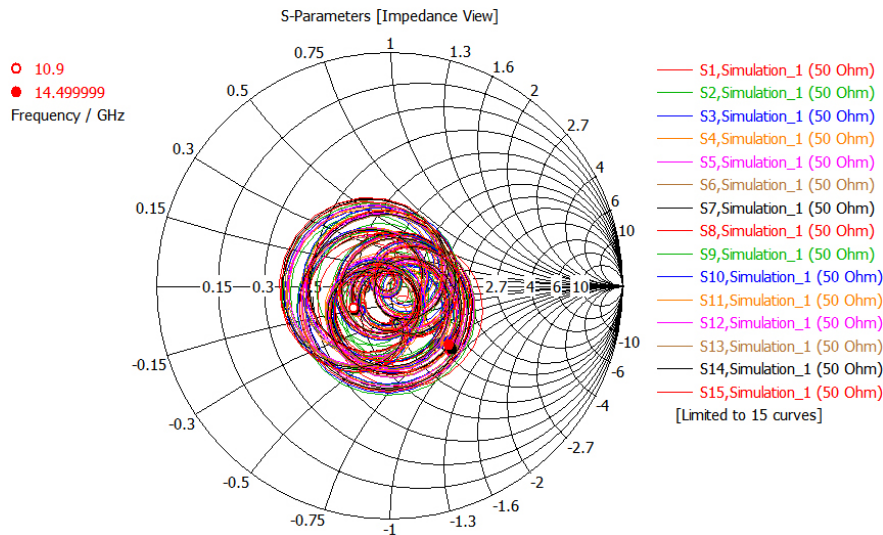


Рис. 4. Номограмма Смита ФАР при отклонении луча на угол 45 град. от нормали
 Fig. 4. Smith's nomogram of phased antenna array when the beam is deflected at an angle of 45 degrees from the normal

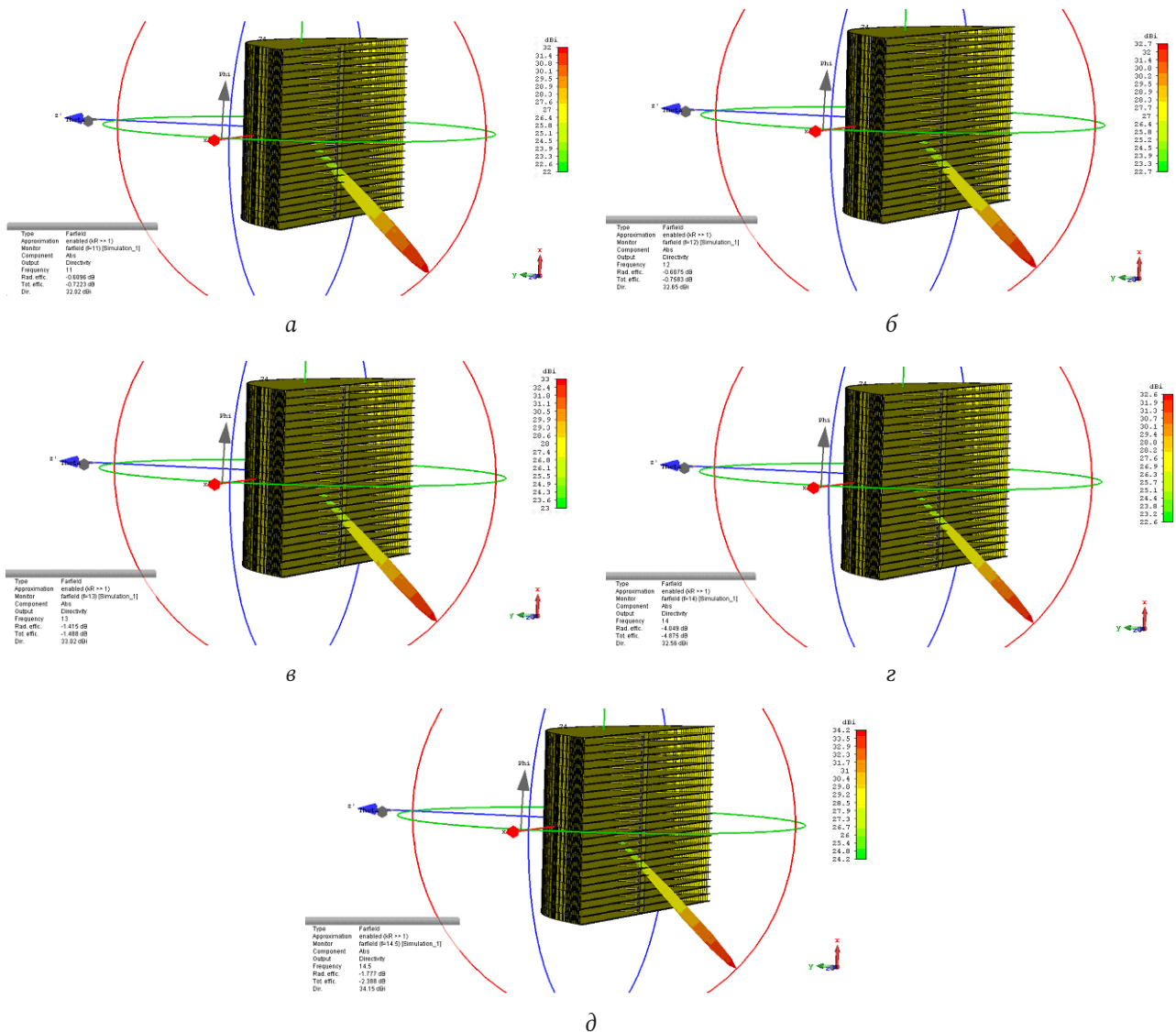


Рис. 5. Диаграммы направленности ФАР в объеме при отклонении луча на угол 45 град. от нормали: а - $f = 11$ ГГц; б - $f = 12$ ГГц; в - $f = 13$ ГГц; г - $f = 14$ ГГц; д - $f = 14,5$ ГГц
 Fig. 5. Directional diagrams of phased antenna array in the volume when the beam is deflected at an angle of 45 degrees from the normal: а - $f = 11$ GHz; б - $f = 12$ GHz; в - $f = 13$ GHz; г - $f = 14$ GHz; д - $f = 14,5$ GHz

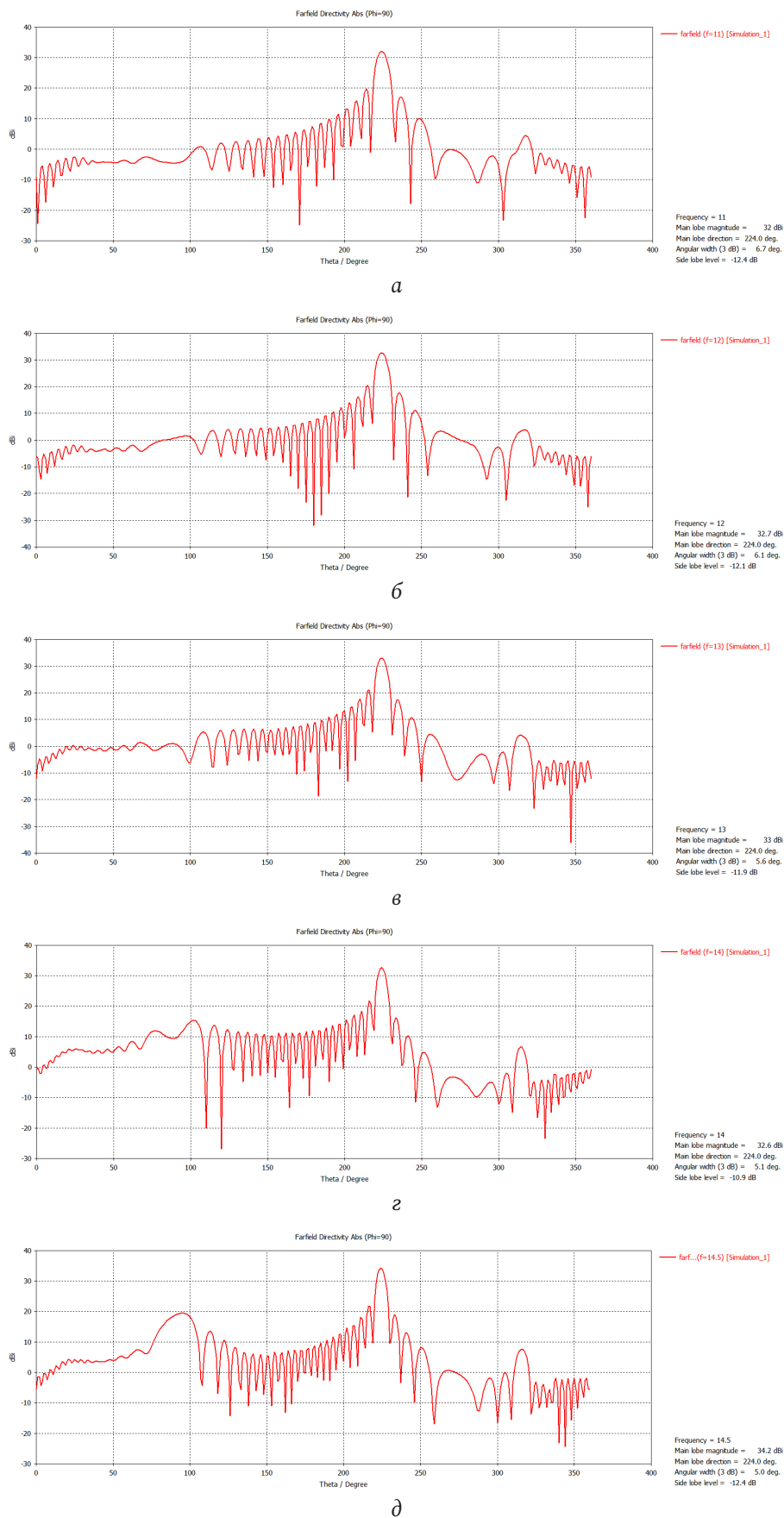


Рис. 6. Диаграммы направленности ФАР в угло-местной плоскости при отклонении луча на угол 45 град. от нормали: а - $f = 11$ ГГц; б - $f = 12$ ГГц; в - $f = 13$ ГГц; г - $f = 14$ ГГц; д - $f = 14,5$ ГГц

Fig. 6. Directional diagrams of phased antenna array in the angular plane when the beam is deflected at an angle of 45 degrees from the normal: a - $f = 11$ GHz; b - $f = 12$ GHz; c - $f = 13$ GHz; d - $f = 14$ GHz; e - $f = 14,5$ GHz

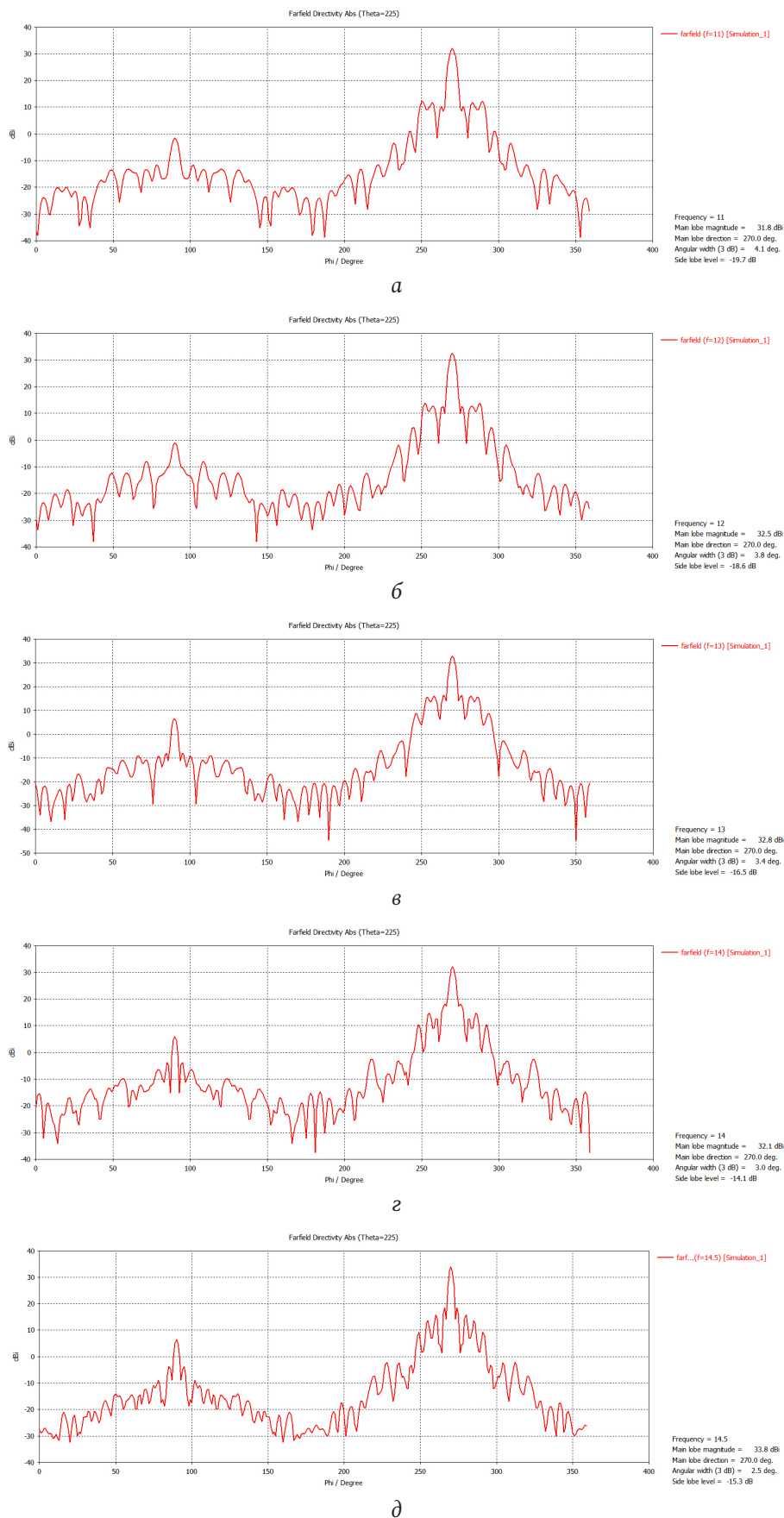


Рис. 7. Диаграммы направленности ФАР в азимутальной плоскости при отклонении луча на угол 45 град. от нормали: а - $f = 11$ ГГц; б - $f = 12$ ГГц; в - $f = 13$ ГГц; г - $f = 14$ ГГц; д - $f = 14,5$ ГГц
 Fig. 7. Directional diagrams of phased antenna array in the azimuthal plane when the beam is deflected at an angle of 45 degrees from the normal: а - $f = 11$ GHz; б - $f = 12$ GHz; в - $f = 13$ GHz; г - $f = 14$ GHz; д - $f = 14,5$ GHz

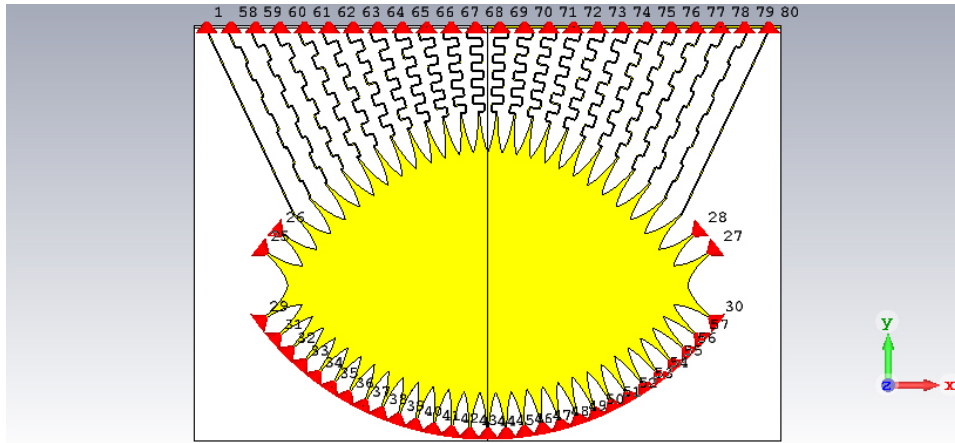


Рис. 8. Топология линзы Ротмана с системой полосковых трансформаторов и фазокорректирующих участков
Fig. 8. Topology of the Rotman lens with a system of stripline transformers and phase-correcting sections

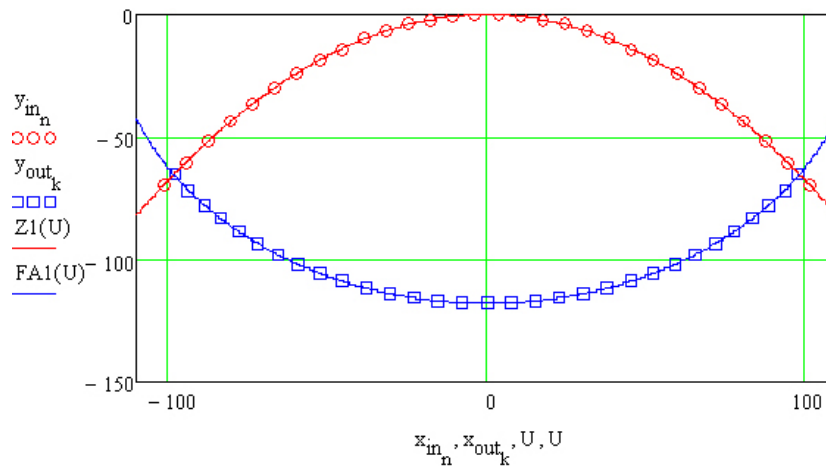


Рис. 9. Тело линзы Ротмана
Fig. 9. Rothman lens body

платы, содержащей 3 слоя проводников, из которых центральным проводником является тело линзы с системой полосковых трансформаторов и фазокорректирующих участков, а с двух сторон центральный проводник окружают два земляных проводника, разделенных диэлектриком марки Rogers 4003C толщиной 0,508 мм (диэлектрическая проницаемость 3,38). В качестве альтернативы может быть использован более качественный диэлектрик марки Rogers RT 6002 (диэлектрическая проницаемость 2,94) с проводниками, изготовленными по технологии проката из цельного листа. В СВЧ-ламинате марки Rogers 4003C используется гальванически осажденный слой меди толщиной 17 мкм, потери в котором выше, чем в цельном проводнике. Однако материал Rogers RT 6002 существенно дороже, что повлияет на стоимость антенной решетки в целом, поэтому для макета был выбран более дешевый и доступный материал Rogers 4003C.

Использовалась следующая методика построения профиля линзы Ротмана. Внешняя поверхность линзы, к которой присоединяются согласующие полосковые трансформаторы (с экспоненциальным законом распределения волнового сопротивления вдоль их длины), идущие далее к высокочастотному коммутатору, является сегментом окружности. Внутренняя поверхность линзы описывается параболической функцией, рис. 9.

Определялась разница длин оптических путей волн от центрального излучателя (порт 44, рис. 10) до выходов трансформаторов 1, 58–80, идущих к 24 элементам антенной решетки.

Длины фазовыравнивающих участков (рис. 11) выбирались таким образом, чтобы при возбуждении центрального диаграммообразующего порта 44 на выходах портов 1, 58–68 (учитывалась симметрия линзы относительно оси y) сигналы были синфазными в рабочей полосе 10,9–14,5 ГГц. При этом также контролировалось групповое время задержки зондирующих импульсов.

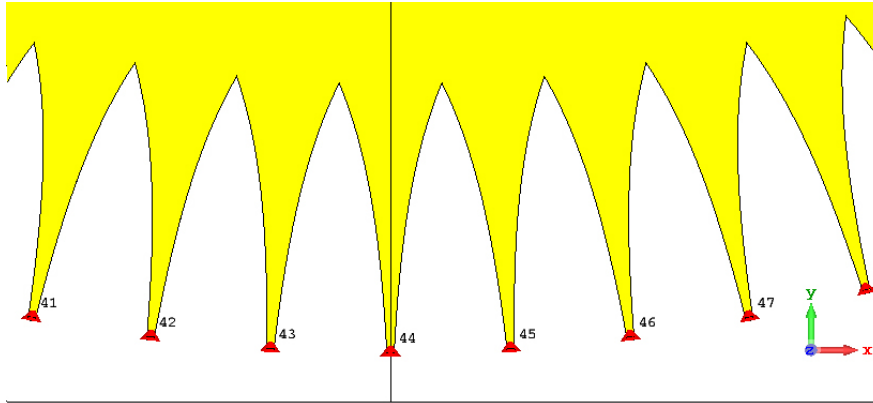


Рис. 10. Порты, ведущие к высокочастотному коммутатору
 Fig. 10. Ports leading to the high frequency switch

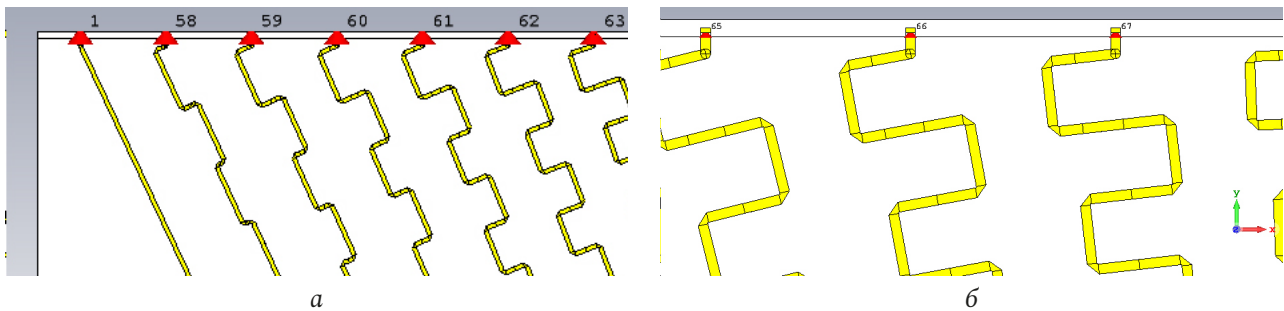


Рис. 11. Фазовыравнивающие участки линзы Ротмана
 Fig. 11. Phase alignment areas of the Rothman lens

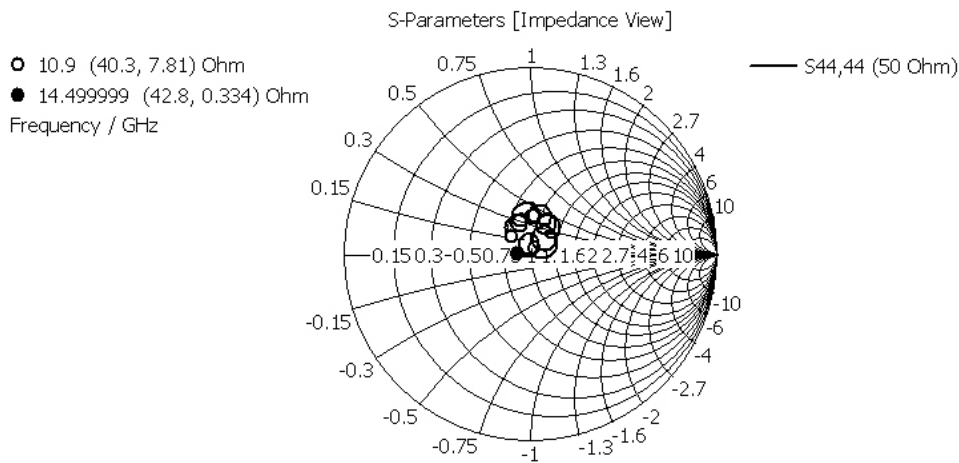


Рис. 12. Номограмма Смита для центрального диаграммирующего порта 44 линзы Ротмана
 Fig. 12. Smith nomogram for the central diagramming port 44 of the Rothman lens

Характеристики согласования центрального порта 44 показаны на рис. 12–14. В силу того что диэлектрическая проницаемость ламинатов марок Rogers 4003С и Rogers RT 6002 близка (3,38 и 2,94 соответственно), характеристики согласования являются удовлетворительными для обоих видов материалов подложки.

Развязка между диаграммирующими портами линзы Ротмана иллюстрируется рис. 15. Во всем рабочем диапазоне частот от 10,9 до 14,5 ГГц она не менее 16 дБ.

Средний уровень сигнала в портах, подключаемых к 24 элементам антенной решетки, составляет около -17 дБ относительно уровня входного сигнала, рис. 16. Расчетные потери мощности в линзе – около 3 дБ. Для уменьшения потерь мощности в линзе можно компенсировать фазовые искажения с помощью использования полужестких коаксиальных волноводов, соединяющих выходные порты линзы Ротмана и антенную решетку (при этом не требуется использования фазокорректирующих линий на печатной плате). Но более

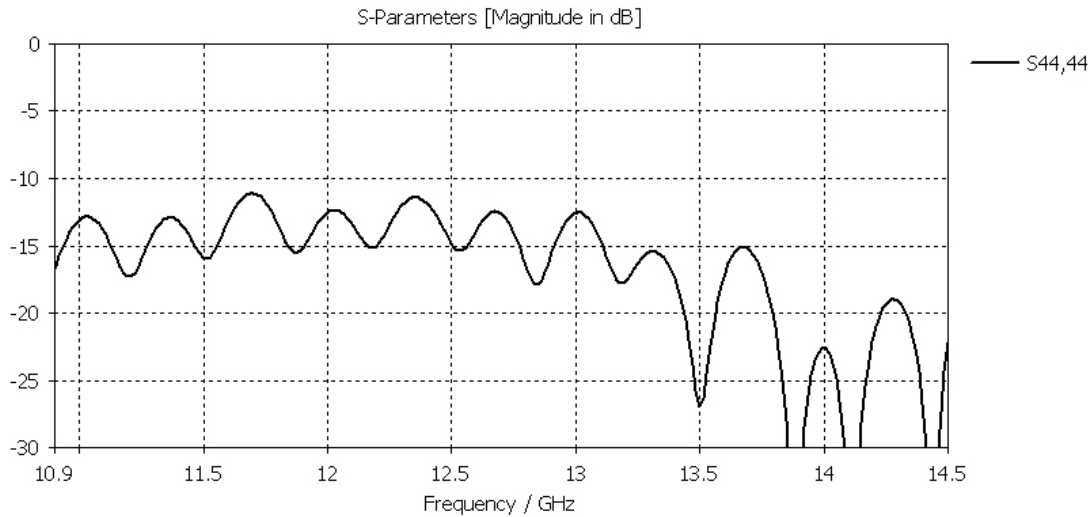


Рис. 13. Коэффициент отражения (дБ) в рабочей полосе частот для центрального диаграммообразующего порта 44 линзы Ротмана
Fig. 13. Reflection coefficient (dB) in the operating frequency band for the central beamforming port 44 of the Rothman lens

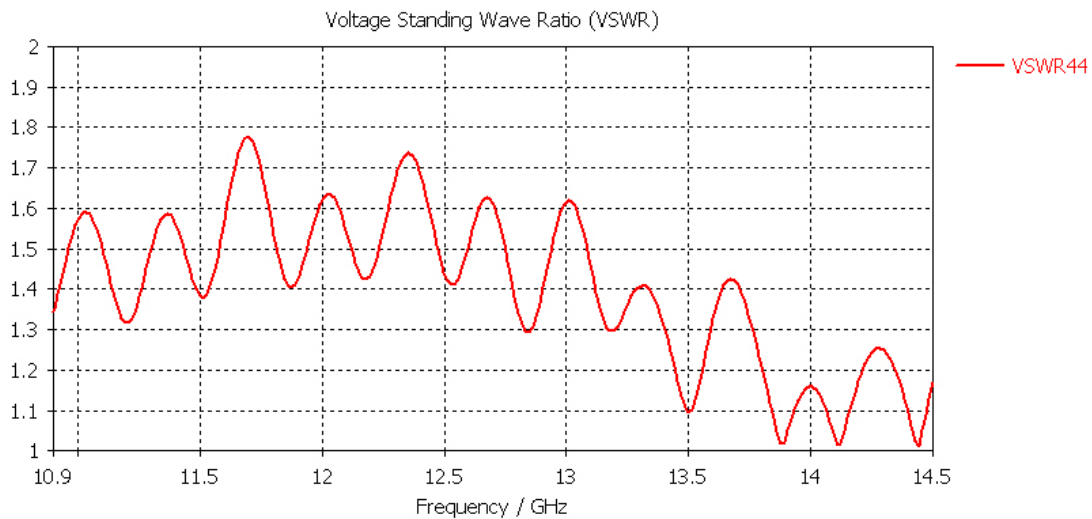


Рис. 14. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны для центрального диаграммообразующего порта 44 линзы Ротмана (волновое сопротивление симметричной полосковой линии – 50 Ом)
Fig. 14. Frequency dependence of the standing wave ratio for the central diagramming port 44 of the Rothman lens (the characteristic impedance of the symmetrical strip line is 50 Ohm)

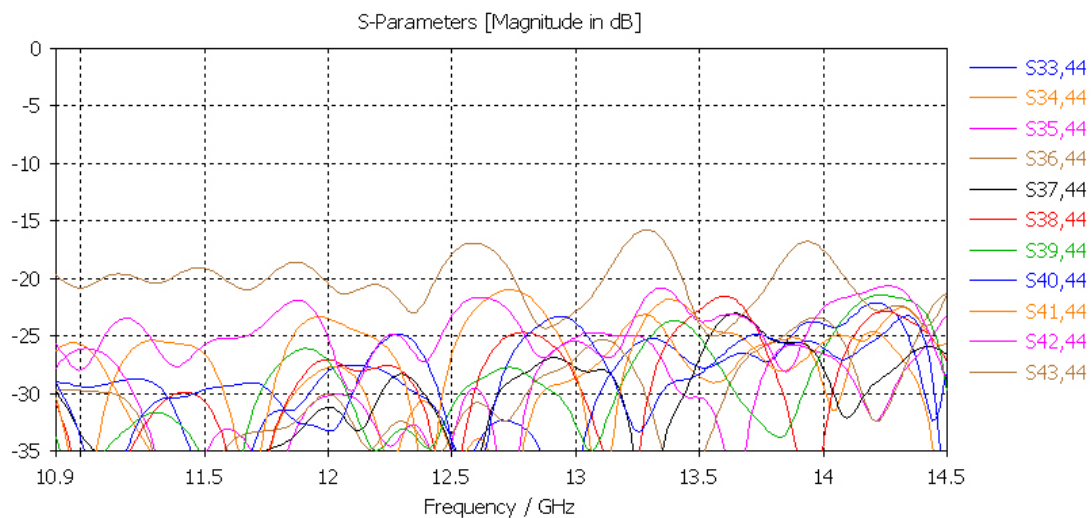


Рис. 15. Развязка между диаграммообразующими портами линзы Ротмана, дБ
Fig. 15. Isolation between the beamforming ports of the Rothman lens, dB

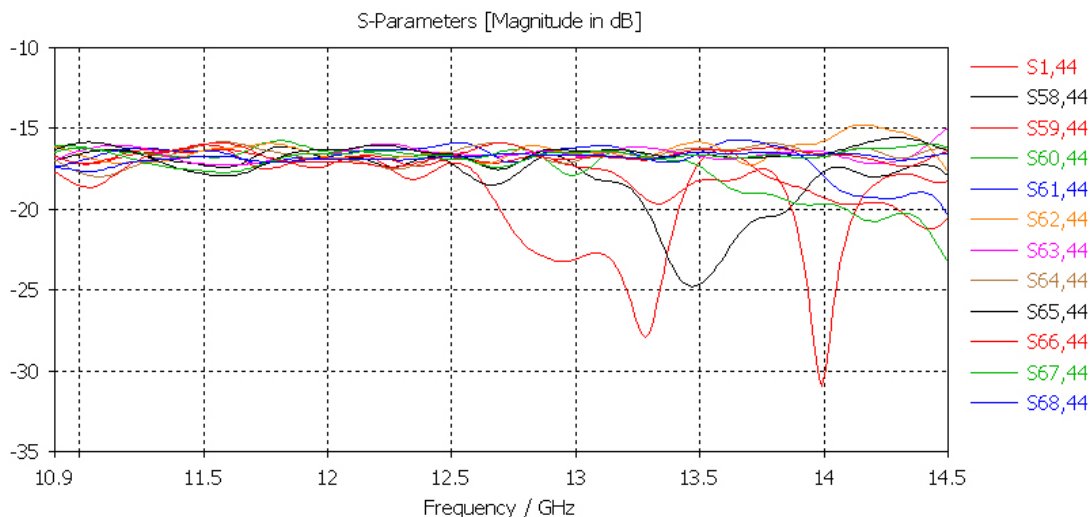


Рис. 16. Амплитудно-частотные характеристики входного порта 44 и выходных портов 1, 58–68
Fig. 16. Amplitude-frequency characteristics of input port 44 and output ports 1, 58–68

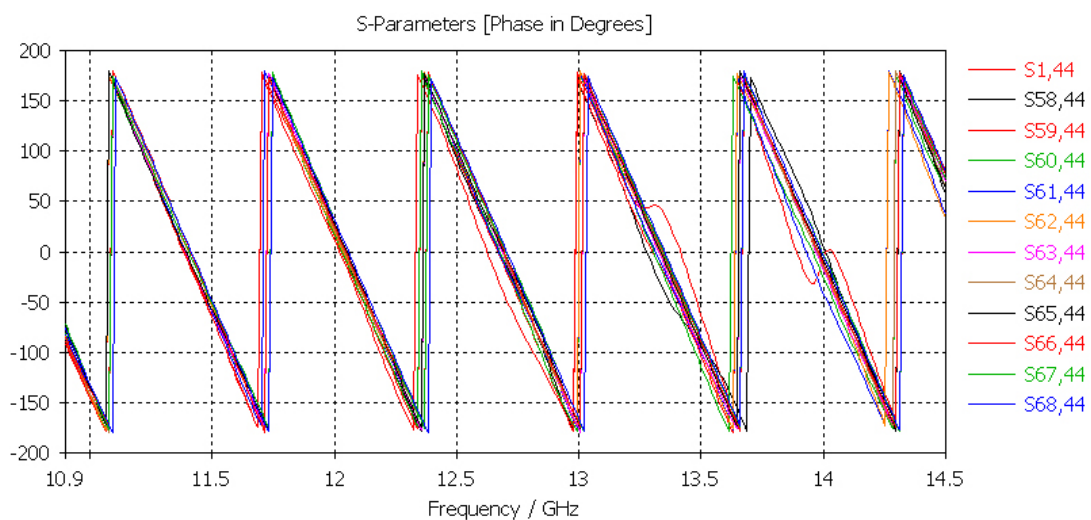


Рис. 17. Амплитудно-частотные характеристики входного порта 44 и выходных портов 1, 58–68
Fig. 17. Amplitude-frequency characteristics of input port 44 and output ports 1, 58–68

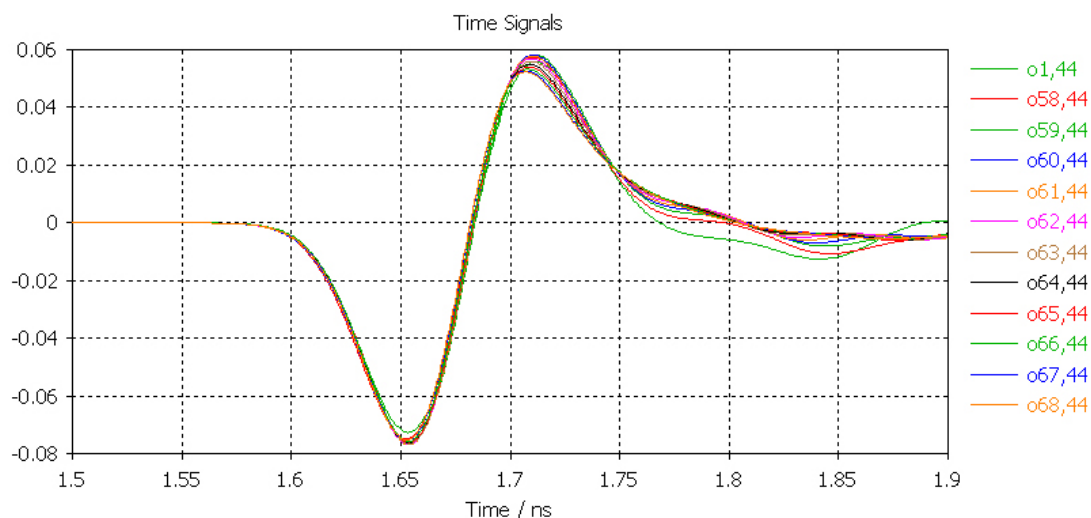


Рис. 18. Временные зависимости импульса, поданного на диаграммообразующий вход 44 и прошедшего на выходные порты 1, 58–68 (эффективная полоса частот импульса – от 0,5 до 14,5 ГГц)
Fig. 18. Time dependences of the pulse applied to the diagram-forming input 44 and transmitted to the output ports 1, 58–68 (effective pulse bandwidth – from 0.5 to 14.5 GHz)



Рис. 19. Действующий макет ФАР
Fig. 19. Current layout of the phased antenna array

технологичным является предложенный вариант выполнения фазокорректирующих линий на единой печатной плате с линзой Ротмана.

Фазовые искажения, вызванные интерференционными явлениями в линзе, иллюстрируются рис. 18, 19.

Таким образом, в рамках настоящих исследований разработаны два альтернативных подхода к управлению диаграммой направленности разработанных вариантов фазированных антенных решеток для мобильного терминала спутниковой связи.

4. Изготовление действующего макета ФАР

По окончании моделирования антенной решетки и проведения электронных расчетов была проработана эскизная конструкторская документация для изготовления макета ФАР из сегменто-параболических антенн и проведены работы по изготовлению действующего макета ФАР (рис. 19).

Предприятием – промышленным партнером ВГТУ – АО «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) заказана плата линзы Ротмана с коаксиальными разъемами. Также были проведены работы по изготовлению высокочастотных коммутаторов и маломощных усилителей, компенсирующих потери мощности в линзе Ротмана.

Следующий этап исследований, связанный с испытаниями действующего макета антенной решетки для мобильного терминала спутниковой

связи, в настоящее время проводится совместно с промышленным партнером ВГТУ – АО «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж).

Заключение

Для спутниковых терминалов связи есть свои особенности, такие как ограничение по весу, размеру и простоте конструкции антенны, существуют свои потребности в значении коэффициента усиления, в уровне боковых лепестков. А также есть особенности, связанные с необходимостью формирования лепестков в довольно широкой полосе частот и стабильностью диаграмм направленности элементов. Высота антенных элементов ограничена необходимостью минимизации боковых лепестков при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот и качеством согласования в низкочастотной области указанного выше диапазона частот, особенно при максимальном отклонении лепестков диаграммы направленности.

Все эти требования были тщательно проанализированы и выполнены на стадии разработки и планирования.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты.

1. Разработана фазированная антенная решетка из 24 сегменто-параболических антенн, функционирующая в диапазоне частот 10,9–14,5 ГГц.
2. Разработана печатная линза Ротмана, используемая в качестве диаграммообразующей схемы фазированной антенной решетки.

Список литературы

1. Satellite Communication Market Size, Share & Trends Analysis Report by Component (Equipment, Services), by Application (Broadcasting, Data Communication), by End-Use Industry, by Region, and Segment Forecasts, 2020–2027. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/satellite-communication-market>
2. Zhou H., Jong M., Lo G. Evolution of satellite communication antennas on mobile ground terminals // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 2015. P. 436250. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/436250>
3. Elbert B.R. *The Satellite Communication Applications Handbook*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2004. P. 32–35.
4. Elbert B.R. *Introduction to Satellite Communication*. 3rd ed. Boston: Artech House, 2008. P. 55–60.
5. Rabinovich V., Alexandrov N., Alkhateeb B. *Automotive Antenna Design and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2010. P. 138–141.
6. Ohmori S. Vehicle antennas for mobile satellite communications // *IEICE Transactions on Communications*. 1991. Vol. E74-B, No. 10. P. 3210–3221.
7. Sheriff R.E., Hu Y.F. *Mobile Satellite Communication Networks*. New York: John Wiley & Sons, 2001. P. 30–38.
8. Minoli D. *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology, the Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. New York: John Wiley & Sons, 2015. P. 101–112.
9. Weerackody V., Cuevas E.G. Technical challenges and performance of satellite communications on-the-move systems // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 2011. Vol. 30, No. 2. P. 113–121. URL: <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V30-N02/30-02-Weerackody.pdf>
10. Imbriale A., Gao S., Boccia L. *Space Antenna Handbook*. New York: John Wiley & Sons, 2012. P. 66–75.
11. Antenna system for land mobile satellite communications / B. Basari [et al.] // *Satellite Communication* / ed. by N. Diodato. London: IntechOpen, 2010. P. 131–142. DOI: <https://doi.org/10.5772/9980>
12. Energy calculation of the terahertz radio link / T.M. Narytnyk [et al.] // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No. 6. P. 537–557. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i6.60>
13. Marcellini L., Lo Forti R., Bellaveglia G. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move // *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Rome, Italy. 2011. P. 2346–2350.
14. Brand J. Practical on-the-move satellite communications for present and future mobile warfighters // *Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM)*. Atlantic City, NJ, USA. 2005. P. 625–629.
15. Bringing broadband connectivity to trains with satellite communication / Yunus Thariq Rizky [et al.]. URL: <https://www.slideshare.net/adenthoriq/bringing-broadband-connectivity-to-trains-with-satellite-communication>
16. A novel hybrid phased array antenna for satellite communication on-the-move in Ku-band / G.D. Han [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 63, No. 4. P. 1375–1383. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2389951>
17. Virtual phase shifter array and its application on Ku band mobile satellite reception / P. Chen [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 63, No. 4. P. 1408–1416. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2393887>

References

1. Satellite Communication Market Size, Share & Trends Analysis Report by Component (Equipment, Services), by Application (Broadcasting, Data Communication), by End-Use Industry, by Region, and Segment Forecasts, 2020–2027. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/satellite-communication-market>
2. Zhou H., Jong M., Lo G. Evolution of satellite communication antennas on mobile ground terminals. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, vol. 2015, pp. 436250. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/436250>
3. Elbert B.R. *The Satellite Communication Applications Handbook*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2004, pp. 32–35.
4. Elbert B.R. *Introduction to Satellite Communication*. 3rd ed. Boston: Artech House, 2008, pp. 55–60.
5. Rabinovich V., Alexandrov N., Alkhateeb B. *Automotive Antenna Design and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2010, pp. 138–141.
6. Ohmori S. Vehicle antennas for mobile satellite communications. *IEICE Transactions on Communications*, 1991, vol. E74-B, no. 10, pp. 3210–3221.
7. Sheriff R.E., Hu Y.F. *Mobile Satellite Communication Networks*. New York: John Wiley & Sons, 2001, pp. 30–38.
8. Minoli D. *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology, the Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. New York: John Wiley & Sons, 2015, pp. 101–112.
9. Weerackody V., Cuevas E.G. Technical challenges and performance of satellite communications on-the-move systems. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2011, vol. 30, no. 2, pp. 113–121. URL: <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V30-N02/30-02-Weerackody.pdf>
10. Imbriale A., Gao S., Boccia L. *Space Antenna Handbook*. New York: John Wiley & Sons, 2012, pp. 66–75.
11. Basari B. et al. Antenna system for land mobile satellite communications. *Satellite Communication*. Ed. by N. Diodato. London: IntechOpen, 2010, pp. 131–142. DOI: <https://doi.org/10.5772/9980>
12. Narytnyk T.M. et al. Energy calculation of the terahertz radio link. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol. 78, no. 6, pp. 537–557. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i6.60>
13. Marcellini L., Lo Forti R., Bellaveglia G. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move. *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Rome, Italy, 2011, pp. 2346–2350.

14. Brand J. Practical on-the-move satellite communications for present and future mobile warfighters. *Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM)*. Atlantic City, NJ, USA, 2005, pp. 625–629.
15. Yunus Thariq Rizky et al. Bringing broadband connectivity to trains with satellite communication. URL: <https://www.slideshare.net/adenthoriq/bringing-broadband-connectivity-to-trains-with-satellite-communication>
16. Han G.D. et al. A novel hybrid phased array antenna for satellite communication on-the-move in Ku-band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1375–1383. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2389951>
17. Chen P. et al. Virtual phase shifter array and its application on Ku band mobile satellite reception. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1408–1416. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2393887>

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2021, vol. 24, no. 2, pp. 88–102

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.2.88-102

Received 19 May 2021

Accepted 21 June 2021

Development of a phased array antenna powered by Rotman printed lens for a mobile satellite communication terminal

Yuri G. Pasternak^{1,2}, Vladimir A. Pendyurin¹, Kirill S. Safonov², Sergey M. Fedorov²

¹ JSC NPP «Automated communication systems»
108, Peshe-Streletskaia Street,
Voronezh, 394062, Russia

² Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya Street,
Voronezh, 394006, Russia

Abstract – Connecting to the Internet whenever and wherever you travel is no longer a luxury. All people have the ability to connect to the Internet and share data away from home. Satellite communications are now an integral part of successful and high-quality communications. Satellite communications antennas are usually installed on mobile ground terminals. Due to its wide coverage and versatility, satellite communications are continuously improving and adapting to the telecommunications needs of many countries, despite the fact that broadband, Internet and fiber - optic communications are used almost everywhere. We know that more than 50 % of all satellites in orbit are communications satellites.

Keywords – mobile satellite communication terminal; phased array antenna; segment-parabolic antennas; Rotman lens.

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: pasternaky@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич, генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

Сафонов Кирилл Сергеевич, аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: safonov-kirik@mail.ru

Федоров Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: fedorov_sm@mail.ru

Information about the Authors

Yuri G. Pasternak, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.
E-mail: pasternaky@mail.ru

Vladimir A. Pendyurin, director general of JSC NPP «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.
E-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

Kirill S. Safonov, post-graduate student of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.
E-mail: safonov-kirik@mail.ru

Sergey M. Fedorov, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.
E-mail: fedorov_sm@mail.ru