

## Антенная решетка с коммутационным сканированием в угло-местной плоскости

Ю.Г. Пастернак<sup>1, 2</sup>, В.А. Пендюрин<sup>2</sup>, К.С. Сафонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет  
394006, Россия, г. Воронеж,  
ул. 20-летия Октября, 84

<sup>2</sup> АО НПП «Автоматизированные системы связи»  
394062, Россия, г. Воронеж,  
ул. Пеше-Стрелецкая, 108

**Аннотация** – Известно, что самая надежная связь в труднодоступных местах, таких как, Арктика, тундра, тайга, – это спутниковая связь. Поэтому для аппаратуры мобильной высокоскоростной спутниковой связи необходимо создать недорогие отечественные антенные решетки с электрическим управлением диаграммой направленности в угло-местной плоскости. В данной статье рассмотрена волноводно-щелевая антенная решетка с линзой Люнеберга для мобильного терминала спутниковой связи, которая обеспечивает непрерывный и стабильный сигнал при движении носителя за счет электрического управления диаграммой направленности в угло-местной плоскости и механического сканирования – в азимутальной плоскости. Данная антенна работает в диапазоне частот от 10,9 до 14,5 ГГц. Поляризация – вертикальная. Габаритные размеры антенной решетки: диаметр диаграммо-образующей линзы – 256 мм (толщина 5 мм, материал – ФЛАН 2.8 (эпсилон 2,8, тангенс дельта – 0,0015)); длина волноводов – 600 мм (внутреннее сечение – 10,5 мм на 5 мм, заполнение – ФЛАН 2.8). Волноводно-щелевые антенны и линза изготавливаются из стандартного материала ФЛАН 2.8 (эпсилон 2,8, тангенс дельта – 0,0015) толщиной 5 мм, фольгированного с обеих сторон. К ВЧ-коммутатору идет 17 коаксиальных кабелей (равенство их длин не требуется), шаг сканирования по углу места – 5 градусов. При использовании 54 волноводно-щелевых антенн и 18 входов коммутатора обеспечивается сектор сканирования по углу места 90 градусов. Предварительно были промоделированы все узлы по отдельности – цилиндрическая линза Люнеберга с подходящими к ней волноводами, возбуждаемыми щелями; волноводно-щелевые антенны; коаксиально-волноводные переходы.

**Ключевые слова** – волноводно-щелевая антенная решетка; линза Люнеберга; спутниковая связь; мобильный терминал спутниковой связи.

### Введение

Наша планета обладает широким многообразием различных территорий, которые еще до сих пор не в полной мере освоены человеком. Россия является самой крупной страной по площади, где большинство территории еще предстоит освоить. Тундра, тайга занимают огромную территорию, где сотовой связи никогда не будет. Сейчас идет активное освоение неизведанных территорий, а без связи это невозможно. Так же активно осваивается и Арктика во всем мире. Известно, что самая надежная связь в труднодоступных местах, таких как Арктика, тундра, тайга, – это спутниковая связь [1–5]. Поэтому для аппаратуры мобильной высокоскоростной спутниковой связи необходимо создать недорогие отечественные антенные решетки с электрическим управлением диаграммой направленности в угло-местной плоскости. В данной работе рассмотрена кольцевая волноводно-щелевая антенная решетка с диаграммо-образующей линзой Люнеберга, сканирующая сектор 90 градусов в плоскости  $u$ - $z$ . В этой антенне расположены 17 коммутаторов. То есть в секто-

ре сканирования 90° формируется 17 лучей. Каждый антенный элемент представляет собой волноводно-щелевую антенную решетку, сделанную из стандартного волновода сечением 13 × 6,5 мм, толщиной стенки 0,8 мм. Волновод заполнен диэлектриком ФЛАН с диэлектрической проницаемостью 2,8. Размеры поперечного сечения диэлектрика волновода – 14,0 × 5,5 мм. Суммарная толщина стенок между соседними волноводами – 1,0 мм. Шаг решетки – 15 мм. Волноводно-щелевая решетка состоит из 36 пар щелей, где начальное смещение ряда щелей – 3,1 мм, а конечное – 3,4 мм. Начальная ширина щелей – 2,3 мм, конечная – 4,4 мм. Начальная длина щелей – 5,9 мм, конечная – 10,6 мм. Начальный шаг пар щелей – 15,8 мм, конечный – 15,3 мм. Запитка волновода осуществляется с помощью коаксиально-волноводных переходов.

### 1. Принцип действия антенной решетки

Модель антенной решетки с коммутационным сканированием в угло-местной плоскости представляет собой волноводно-щелевые антенные

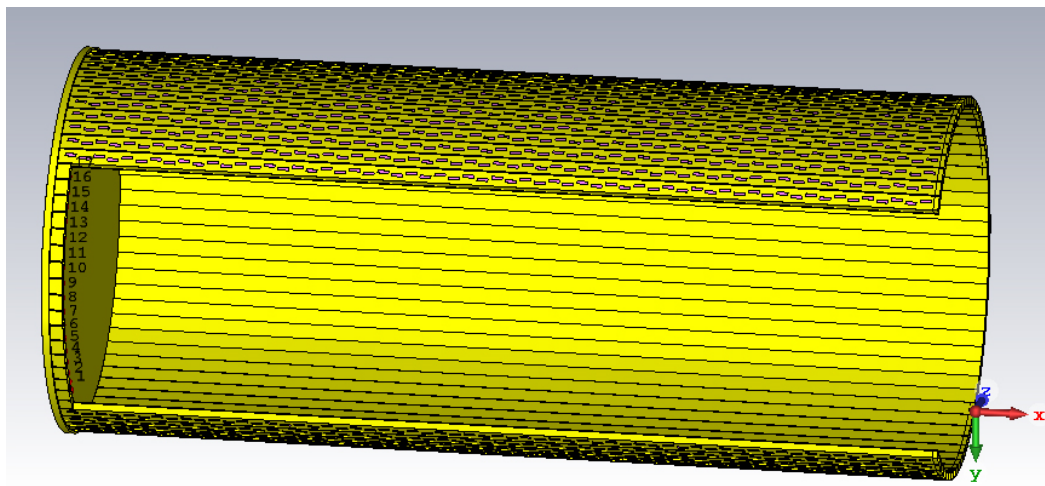


Рис. 1. Антенная решетка с коммутационным сканированием в угло-местной плоскости  
 Fig. 1. Antenna array with commutation scanning in the angular plane

решетки, запитанные с помощью коаксиальных волноводных переходов и диаграммообразующего элемента – линзы Лунеберга (рис. 1). Данная решетка работает в диапазоне от 10,9 до 14,5 ГГц, имеет вертикальную поляризацию и габаритные размеры: диаметр диаграммообразующей линзы – 256 мм (толщина – 5 мм, материал – ФЛАН 2.8 (эпсилон 2,8, тангенс дельта – 0,0015)); длина волноводов – 600 мм (внутреннее сечение – 10,5 мм на 5 мм, заполнение – ФЛАН 2.8). Волноводно-щелевые антенны и линза изготавливаются из стандартного материала ФЛАН 2.8 (эпсилон 2,8, тангенс дельта – 0,0015) толщиной 5 мм, фольгированного с обеих сторон. К ВЧ-коммутатору идет 17 коаксиальных кабелей (равенство их длин не требуется), шаг сканирования по углу места – 5 градусов. При использовании 54 волноводно-щелевых антенн и 18 входов коммутатора обеспечивается сектор сканирования по углу места 90 градусов. Предварительно были промоделированы все узлы по отдельности – цилиндрическая линза Лунеберга с подходящими к ней волноводами, возбуждаемыми щелями; волноводно-щелевые антенны; коаксиально-волноводные переходы.

Рассмотрим подробнее конструкцию антенны и особенности ее функционирования. На рис. 2, а показано сечение модели таким образом, чтобы был виден разрез самой линзы. Из рисунка видно, что оболочка линзы Лунеберга (желтым цветом) представляет собой 2 листа металла снизу и сверху, между которыми расположен диэлектрик с канавками, глубина которых уменьшается при приближении к центру линзы (рис. 2, б), диэлектрик показан сиреневым цветом. По сути, линза Лунеберга с оболочкой фактически является

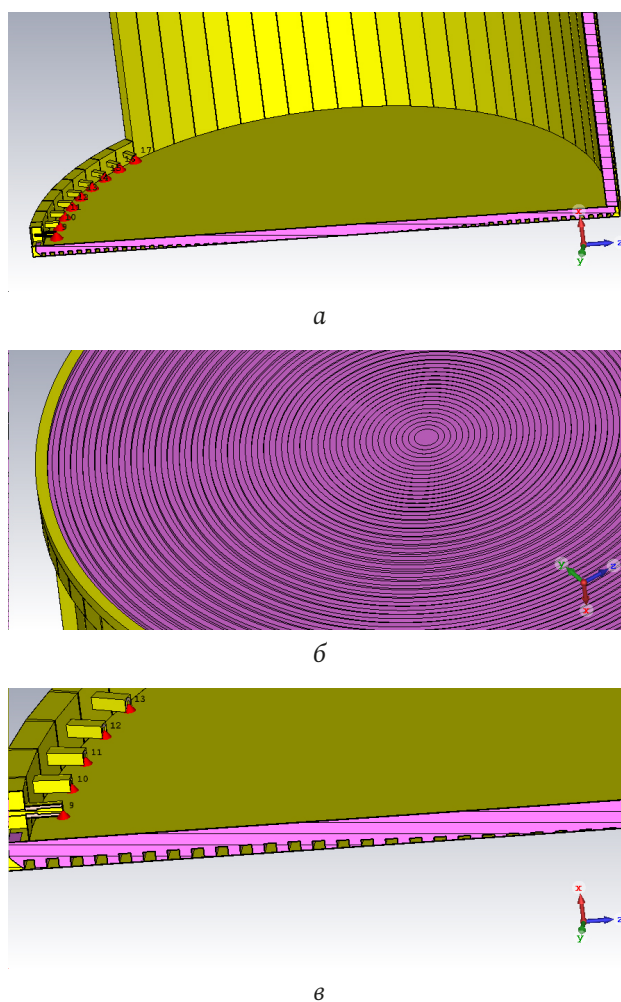
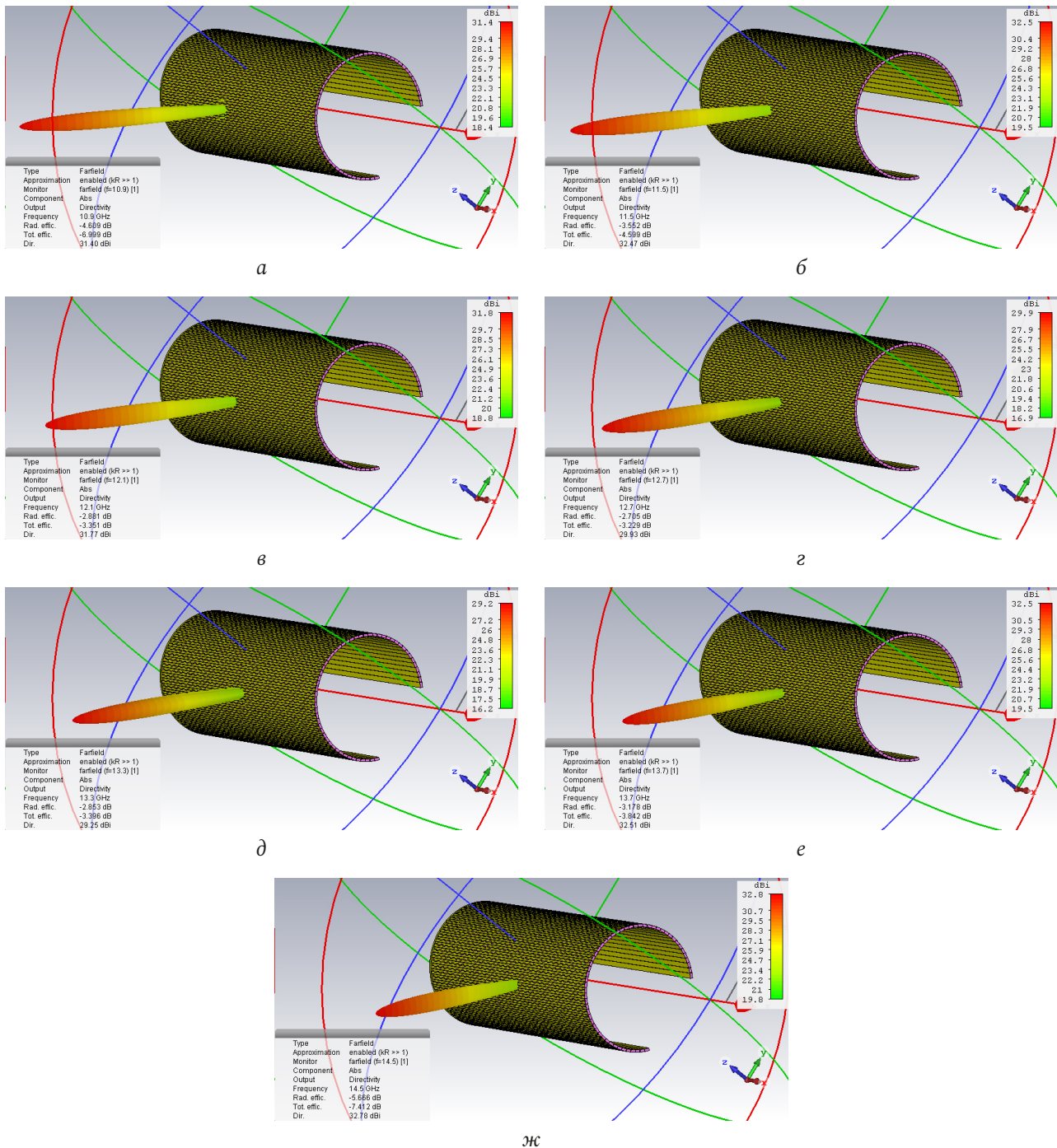


Рис. 2. Различные сечения модели антенной решеткой: а – сечение линзы Лунеберга с оболочкой; б – канавки на линзе Лунеберга; в – сечение коаксиально волноводного перехода (левая часть рисунка)

Fig. 2. Different sections of the antenna array model: а – section of the Luneberg lens with a shell; б – grooves on the Luneberg lens; в – cross section of the coaxial waveguide junction (left side of the figure)



**Рис. 3.** Диаграммы направленности антенны в диапазоне от 10,9 ГГц до 14,5 ГГц: а –  $f = 10,3$  ГГц; б –  $f = 11,5$  ГГц; в –  $f = 12,1$  ГГц; г –  $f = 12,7$  ГГц; д –  $f = 13,3$  ГГц; е –  $f = 13,7$  ГГц; ж –  $f = 14,5$  ГГц  
**Fig. 3.** Antenna radiation patterns in the range from 10,9 GHz to 14,5 GHz: а –  $f = 10,3$  GHz; б –  $f = 11,5$  GHz; в –  $f = 12,1$  GHz; г –  $f = 12,7$  GHz; д –  $f = 13,3$  GHz; е –  $f = 13,7$  GHz; ж –  $f = 14,5$  GHz

радиальным плоскопараллельным волноводом с неоднородным диэлектрическим заполнением.

В левом углу на рис. 2, в показано сечение коаксиально-волноводного перехода там, где расположен порт 9. Он подключен к коаксиальному кабелю. Коаксиальный кабель возбуждает монополь, который возбуждает колебания в данном отрезке волновода. Таким образом, в данной антенне реализован коаксиально-волноводный переход. Вол-

ны, бегущие по волноводу, возбуждают щели, прорезанные в верхних стенках плоскопараллельного волновода. Далее через щель возбуждается плоскопараллельный волновод с линзой Люнеберга. К каждому коаксиальному входу подводится энергия электромагнитных волн, которая возбуждает коаксиально-волноводный переход. Далее через щель прямоугольной формы энергия поступает в плоско-параллельный волновод круглого сечения

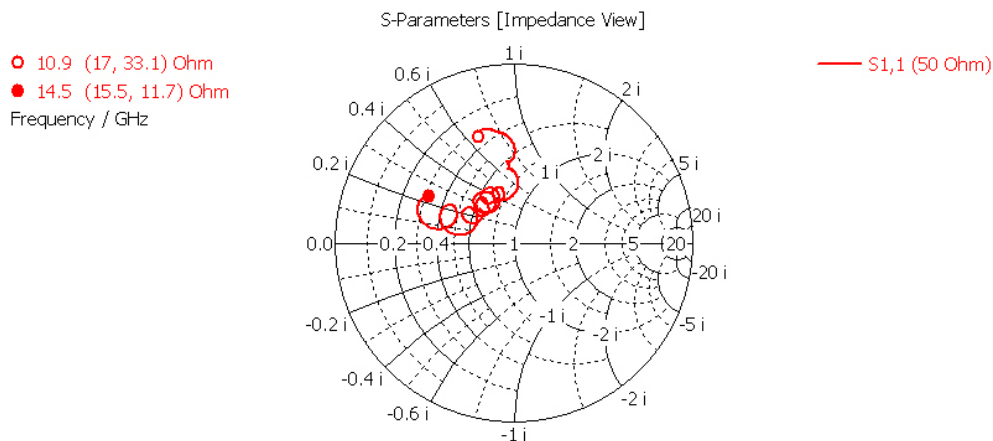


Рис. 4. Номограмма Смита на коаксиально-волноводной переходе, находящегося в составе решетки (50 Ом)  
 Fig. 4. Smith's nomogram on the coaxial-waveguide junction included in the array (50 Ohm)

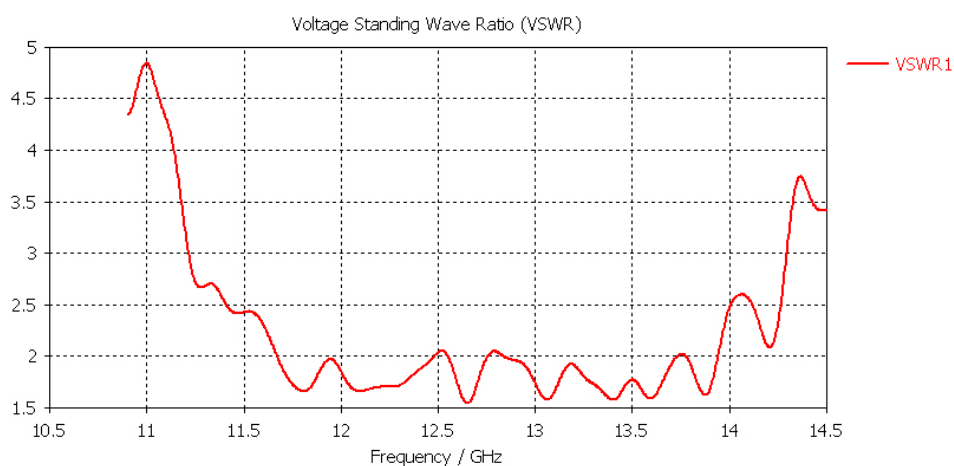


Рис. 5. КСВН на коаксиальном входе антенны (волновое сопротивление – 50 Ом)  
 Fig. 5. VSWR at the coaxial input of the antenna (characteristic impedance – 50 Ohm)

и распространяется в линзе Лüneберга. В свою очередь, линза Лüneберга преобразует излучение точечного источника на ее входе в плоскую волну на ее выходе. Сформированная плоская волна возбуждает волноводно-щелевые антенны, расположенные на  $\frac{3}{4}$  периметра «барабана», которые и являются излучающими элементами нашей антенны.

## 2. Результаты электродинамического моделирования

На рис. 3 приведены диаграммы направленности антенной решетки в диапазоне рабочих частот от 10,9 ГГц до 14,5 ГГц.

В результате моделирования мы получили достаточно узкий лепесток диаграммы направленности и усиление порядка 30 дБ на всей полосе рабочих частот.

На рис. 4, 5 приведены номограмма Смита и КСВН антенного элемента в составе антенной решетки в диапазоне частот от 10,5 до 14,5 ГГц.

Видно, что качество согласования антенных элементов почти на всей рабочей полосе не превышает 2 дБ, что допустимо для данной антенной решетки, но на крайних частотах мы видим рассогласование, поэтому антенную решетку еще надо оптимизировать.

На рис. 6 наглядно показано качество согласования на входах антенны.

Из рисунка видно, что антенные элементы достаточно хорошо между собой развязаны, то есть волны, возбуждаемые на каждом входе, не влияют друг на друга, а коэффициент отражения не хуже 15 дБ.

Также на рис. 7 показаны потери мощности, которые происходят в материалах антенной решетки, и суммарные потери мощности с учетом отражения, передачи мощности в различные узлы антенны, потери вследствие нагревания элементов и потери с учетом рассогласования и взаимной связи элементов решетки. Другими словами, на графике показан КПД антенны в дБ.

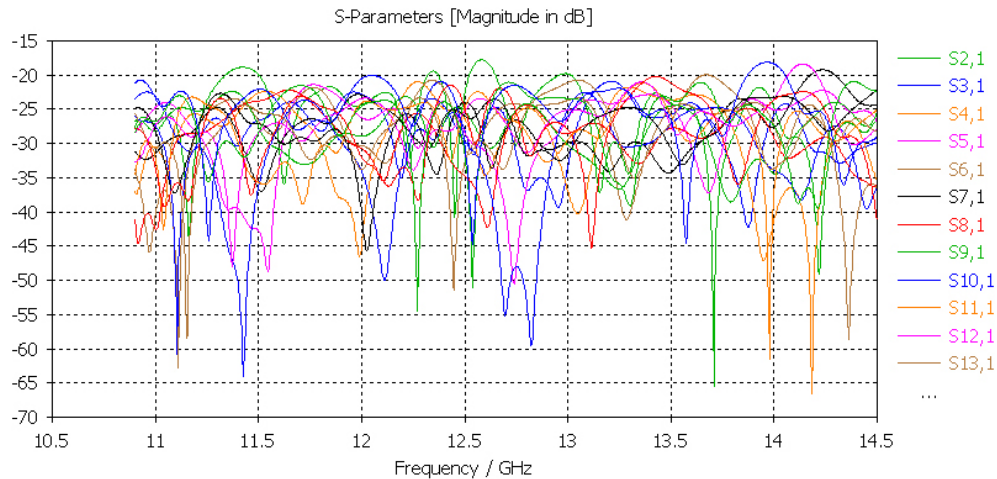


Рис. 6. Коэффициенты отражения от входов антенны  
Fig. 6. Coefficients of reflection from the antenna inputs

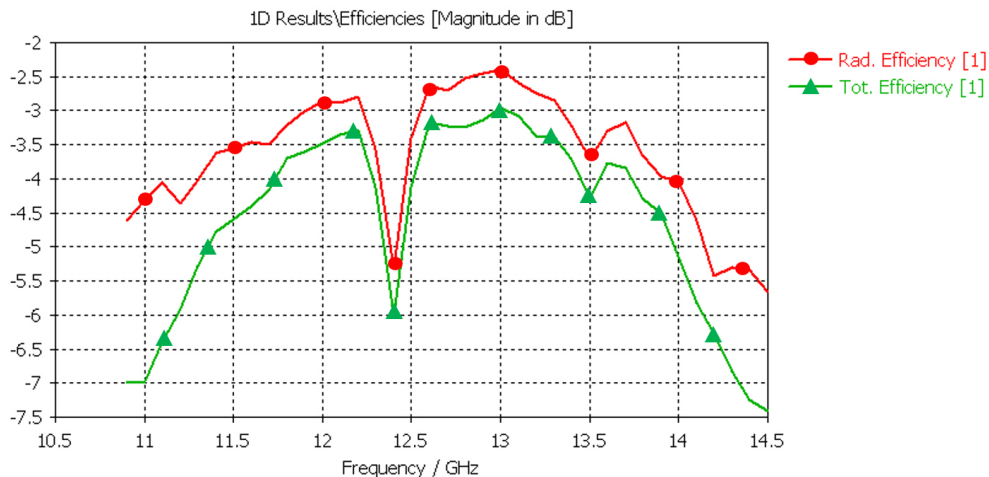


Рис. 7. КПД (дБ) элемента, находящегося в составе решетки: линия с кружками – потери в материалах; линия с треугольниками – суммарные потери  
Fig. 7. Efficiency (dB) of an element in the array: line with circles – losses in materials; line with triangles – total losses

Из графика видно, что на всей полосе частот суммарные потери мощности только на некоторых частотах доходят до 7 дБ, а почти во всей полосе частот суммарные потери не превышают 5 дБ. Резкое возрастание потерь на частоте 12,4 ГГц связано с излучением по нормали в режиме резонанса Брэгга 2-го порядка.

### Заключение

Проанализировав результаты моделирования, можно сделать вывод, что антенная решетка обладает достаточно высоким значением коэффициента направленного действия (31,4–32,8 дБи) в полосе рабочих частот; при этом значения ши-

рины главного лепестка в обеих плоскостях близки к соответствующим значениям для идеального раскрыва (равноамплитудного и синфазного) с эквивалентным поперечным сечением.

Достоинства антенны – простота диаграммообразующей схемы и возможность одновременного формирования нескольких лучей диаграммы направленности.

В настоящее время проводится параметрическая оптимизация антенной системы; при этом анализ характеристик антенны проводится с использованием метода Вейланда конечного интегрирования, реализованного в пространственно-временной области.

### Список литературы

1. Проблемы радиосвязи в Арктике / И.А. Кулешов [и др.] // IV Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь (РЭИС-2017)»: сб. докладов. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2017. С. 63–73.

2. Андрианов М.Н., Корбаков Д.А., Пожидаев В.Н. Возможные спутниковые линии связи в условиях Арктики // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 8. С. 1–10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug20/14/text.pdf>
3. Калмыков Д.А. Особенности обеспечения и организации связи в арктической зоне // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 3–4 (129–130). С. 31–39.
4. Birkeland R. An overview of existing and future satellite systems for arctic communication // ESA Small Satellites Systems and Services Symposium. 2014. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.3762.3367>
5. Bekkadal F. Arctic communication challenges // Marine Technology Society Journal. 2014. Vol. 48, no. 2. P. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.48.2.9>

## References

1. Kuleshov I.A. et al. Radio communication problems in the Arctic. *IV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferentsija «Radiotekhnika, elektronika i svjaz' (REIS-2017)»: sb. dokladov*. Omsk: Omskij nauchno-issledovatel'skij institut priborostroenija, 2017, pp. 63–73. (In Russ.)
2. Andrianov M.N., Korbakov D.A., Pozhidaev V.N. Possible satellite communication links in the Arctic. *Zhurnal radioelektroniki*, 2020, no. 8, pp. 1–10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug20/14/text.pdf> (In Russ.)
3. Kalmykov D.A. Features of providing and organizing communications in the Arctic zone. *Voprosy oboronnoj tehniki. Serija 16. Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu*, 2019, no. 3–4 (129–130), pp. 31–39. (In Russ.)
4. Birkeland R. An overview of existing and future satellite systems for arctic communication. *ESA Small Satellites Systems and Services Symposium*, 2014, DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.3762.3367>
5. Bekkadal F. Arctic communication challenges. *Marine Technology Society Journal*, 2014, vol. 48, no. 2, pp. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.48.2.9>

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 3, pp. 100–106

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.3.100-106

Received 19 May 2021  
Accepted 21 June 2021

## Antenna array with switching scanning in elevation plane

Yuri G. Pasternak<sup>1, 2</sup>, Vladimir A. Pendyurin<sup>2</sup>, Kirill S. Safonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University  
84, 20-letiya Oktyabrya Street,  
Voronezh, 394006, Russia

<sup>2</sup> JSC RPE «Automated communication systems»  
108, Peshe-Streletsкая Street,  
Voronezh, 394062, Russia

*Abstract* – It is known that the most reliable communication in hard-to-reach places such as the Arctic, Tundra, Taiga is satellite communication [1-5]. Therefore, for satellite communications, it is necessary to develop your own antenna arrays. This article discusses a waveguide-slot antenna array with a Luneburg lens for a mobile satellite communications terminal, which provides a continuous and stable signal. This antenna operates in the 10.9 to 14.5 GHz frequency range. Possesses vertical polarization. The overall dimensions of the antenna array are: diameter of the diagram-forming lens 256 mm (thickness 5 mm, material – FLAN 2.8 (epsilon 2.8, tangent delta – 0.0015)); waveguide length 600 mm (internal section – 10.5 mm by 5 mm, filling – FLAN 2.8). Slotted waveguide antennas and lens are made of standard FLAN 2.8 material (epsilon 2.8, tangent delta – 0.0015) 5 mm thick, foiled on both sides. There are 17 coaxial cables to the HF switch (equal lengths are not required), the scanning step in elevation is 5 degrees. When using 54 waveguide-slot antennas and 18 switch inputs, a scanning sector in elevation of 90 degrees is provided. All the nodes were pre-modeled separately – a cylindrical Luneburg lens with suitable waveguides, excited by slits; slotted waveguide antennas; coaxial-waveguide transitions.

*Keywords* – waveguide-slot antenna array; Luneburg lens; satellite communications; mobile satellite communications terminal.

---

## Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадиевич, 1966 г. р., доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, физика полупроводников, техника СВЧ.

E-mail: [pasternaky@mail.ru](mailto:pasternaky@mail.ru)

## Information about the Authors

Yuri G. Pasternak was born in 1966, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics, semiconductor physics, microwave technology.

E-mail: [pasternaky@mail.ru](mailto:pasternaky@mail.ru)

**Пендюрин Владимир Андреевич**, 1960 г. р., генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», г.Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* техника СВЧ.  
*E-mail:* pva@acc-npp.com

**Сафонов Кирилл Сергеевич**, аспирант, ассистент 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

**Vladimir A. Pendyurin** was born in 1960, CEO of JSC RPE «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

*Research interests:* microwave technology.  
*E-mail:* pva@acc-npp.com

**Kirill S. Safonov**, post-graduate student, assistant 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

**Неганов, В.А.**

**Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова.** – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.

В.А. Неганов, Г.П. Яровой

ISBN 5-256-01812-4

**ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ  
УСТРОЙСТВ СВЧ**



УДК 621.396.67  
ББК 32.840  
Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

*Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.*