

Антенная решетка из волноводных рупоров с Е-плоскостным раскрывом, а также рупоров с раскрывом в Е- и Н-плоскостях

Ю.Г. Пастернак¹, В.А. Пендюрин², Д.К. Проскурин¹, К.С. Сафонов¹

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

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

Аннотация – Обоснование. В настоящее время в связи с проведением специальной военной операции очень актуальным является вопрос наличия недорогих мобильных терминалов высокоскоростной спутниковой связи отечественного производства, а также в связи с большой протяженностью территорий нашей страны существует ряд областей, где сотовая связь отсутствует, например тайга, Арктика, территория Северного Ледовитого океана и т. д. Поэтому единственная возможная связь на этих территориях – это спутниковая связь. **Цель.** Разработка линейной эквидистантной антенной решетки с равноамплитудным и синфазным возбуждением для мобильного терминала спутниковой связи. **Методы.** Антенная решетка проектировалась из открытых концов волноводов сечением 19×11 мм с воздушным заполнением. Соседние пары излучающих волноводов запитывались с помощью Е-плоскостного делителя: волновод разделен пополам по высоте тонкой металлической диафрагмой, отражения волн от которой незначительны; далее, в каждой половине делителя мощности реализованы разнесенные по высоте повороты направо и налево и плавные переходы в Е-плоскости – расширение от 5,25 мм до 11 мм. **Результаты.** Разработана антенная решетка с периодом 19,5 мм. Габаритные размеры: ширина раскрыва – 624 мм, высота – 12 мм, глубина – 118 мм. Особенностью конструкции антенной решетки является использование плавных несимметричных переходов в Е-плоскости по экспоненциальному закону; в раскрыве ФАР чередуются с периодом, равным 4 значениям ширины волноводов с учетом ширины их узких стенок, волноводные несимметричные рупоры, расширяющиеся в верхнем (2 соседних излучателя) и нижнем (следующие 2 излучателя) направлениях. **Заключение.** Достоинством использования подхода к построению линейных антенных решеток, питаемых с помощью многоканальных делителей мощности, является возможность минимизации глубины антенной системы. Основными недостатками – конструктивная и технологическая сложность делителей мощности и существенные потери мощности при большом числе каналов. Возможные технологии изготовления разработанной ФАР: 1. Штамповка из полистирола внутренней части делителя мощности и излучателей. Далее – полировка, напыление меди и гальваническое покрытие слоем меди. 2. Печать на 3D-принтере из полистирола, полировка, напыление меди и гальваническое покрытие слоем меди. 3. Изготовление делителя мощности с использованием SIW-технологии на базе стандартных СВЧ-ламинатов. Использование металлизированных сквозных отверстий для согласования делителей мощности. Антенные элементы и коаксиально-волноводные переходы изготавливаются путем штамповки из полистирола, или печати на 3D-принтере из полистирола, далее – полировка, напыление слоя меди и гальваническое покрытие слоем меди. 4. Штамповка из металла делителя мощности, излучателей и коаксиально-волноводных переходов (2 детали). Диэлектрический вкладыш может печататься на 3D-принтере из полистирола.

Ключевые слова – спутниковая связь мобильного и бортового базирования; линейные антенные решетки; волноводные рупоры.

Введение

Одной из главных задач, решаемых в аппаратуре спутниковой связи, является возможность сканирования главным лепестком диаграммы направленности. Абоненты спутниковой связи, как правило, находятся в движении, следовательно, антенна должна быть легкой и компактной для того, чтобы она не препятствовала безопасному перемещению транспорта, как наземного, так и морского и воздушного [1–4].

В настоящей статье рассмотрена линейная эквидистантная антенная решетка с равноамплитуд-

ным и синфазным возбуждением, состоящая из открытых концов волноводов сечением 19 мм на 11 мм с воздушным заполнением. Период решетки – 19,5 мм. Габаритные размеры разработанной антенной решетки: ширина раскрыва – 624 мм, высота – 12 мм, глубина – 118 мм. Особенностью конструкции антенной решетки является использование плавных несимметричных переходов в Е-плоскости по экспоненциальному закону; в раскрыве ФАР чередуются с периодом, равным 4 значениям ширины волноводов с учетом ширины их узких стенок, волноводные несимметричные рупоры, расширяющиеся в верхнем (2 соседних

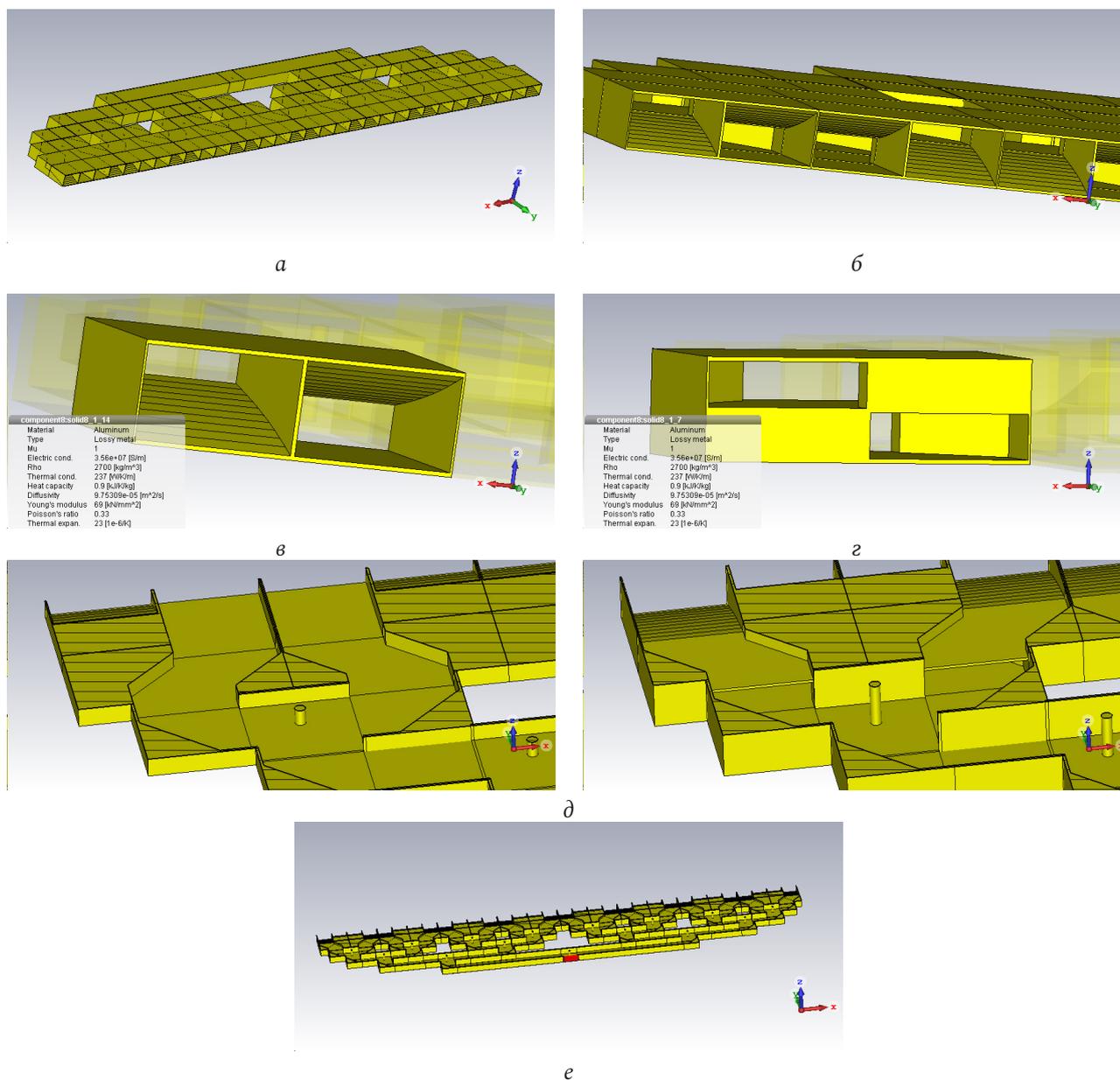


Рис. 1. Линейная эквидистантная антенная решетка с делителем мощности 1:32, в котором использованы E-плоскостные (для запитки излучателей) и H-плоскостные делители мощности 1:2: а – внешний вид линейной решетки; б – фрагмент излучающей апертуры; в – пара соседних излучателей с противоположными направлениями раскрытий несимметричных волноводных E-плоскостных рупоров; г – волноводы, питающие соседние излучатели; д – продольные разрезы решетки на различных значениях высоты; е – разрез решетки и волноводный порт ее запитки

Fig. 1. Linear equidistant antenna array with a 1:32 power divider, in which E-plane (for powering the emitters) and H-plane 1:2 power dividers are used: а – appearance of the linear array; б – fragment of the emitting aperture; в – a pair of adjacent emitters with opposite opening directions of asymmetrical waveguide E-plane horns; д – waveguides feeding adjacent emitters; е – longitudinal sections of the grating at different heights; ф – section of the grating and the waveguide port for powering it

излучателя) и нижнем (следующие 2 излучателя) направлениях.

1. Модель антенного элемента

Соседние пары излучающих волноводов запитываются с помощью E-плоскостного делителя: волновод разделен пополам по высоте тонкой металлической диафрагмой, отражения волн от которой незначительны; далее, в каждой полови-

не делителя мощности реализованы разнесенные по высоте повороты направо и налево и плавные переходы в E-плоскости – расширение от 5,25 мм до 11 мм, рис. 1. Описанное техническое решение предпринято для уменьшения модуля коэффициента отражения в E-плоскостных делителях мощности (в H-плоскостном делителе мощности вертикальная стенка, делящая волновод пополам, вносит существенные отражения). Остальные де-

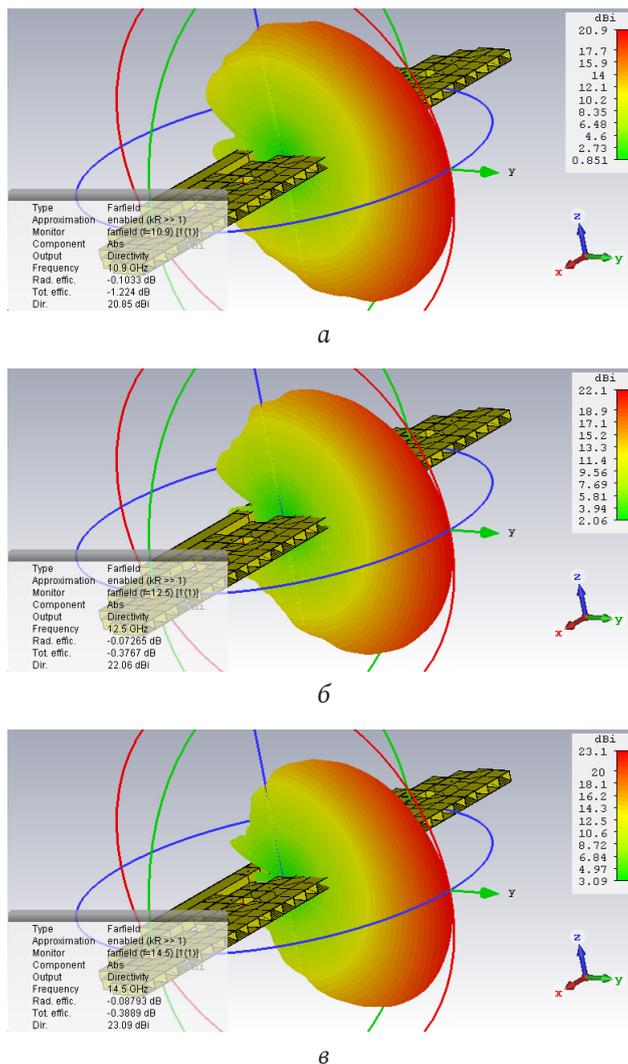


Рис. 2. Диаграммы направленности в объеме линейной эквидистантной антенной решетки с E- и H-плоскостными делителями мощности

Fig. 2. Radiation patterns in the volume of a linear equidistant antenna array with E- and H-plane power dividers

лители мощности – H-плоскостные. Основные характеристики антенной решетки содержатся на рис. 1–5.

2. Результаты моделирования

На рис. 2–5 приведены основные характеристики антенного устройства. На рис. 2 показаны диаграммы направленности в объеме линейной эквидистантной антенной решетки с E- и H-плоскостными делителями мощности. На рис. 3 – диаграммы направленности линейной эквидистантной антенной решетки с E- и H-плоскостными делителями мощности в азимутальной и угло-местной плоскостях. Рис. 4 иллюстрирует частотную зависимость коэффициента стоячей волны на входе антенной решетки. Рис. 5 показывает частотную зависимость потерь в металле и суммарных потерь (с учетом отражений).

3. Конструкция волноводной антенной решетки

Достоинством технического решения является отсутствие диэлектрических вкладышей в волноводных делителях мощности и в излучателях, а также минимизация толщины стенки, разделяющей соседние излучатели, питаемые делителями мощности 1:2 (в H-плоскостных делителях мощности расстояние между соседними излучателями определяется шириной стенки делителя мощности, разделяющей его соседние выходы, рис. 7, а).

Конструкция волноводной антенной решетки, состоящей из 24 линейных синфазных подрешеток (каждая из которых состоит из 32 рупорных излучателей с расширением по экспоненциальному закону в E- и H-плоскостях, питаемых волноводными делителями мощности 1:32), показана на

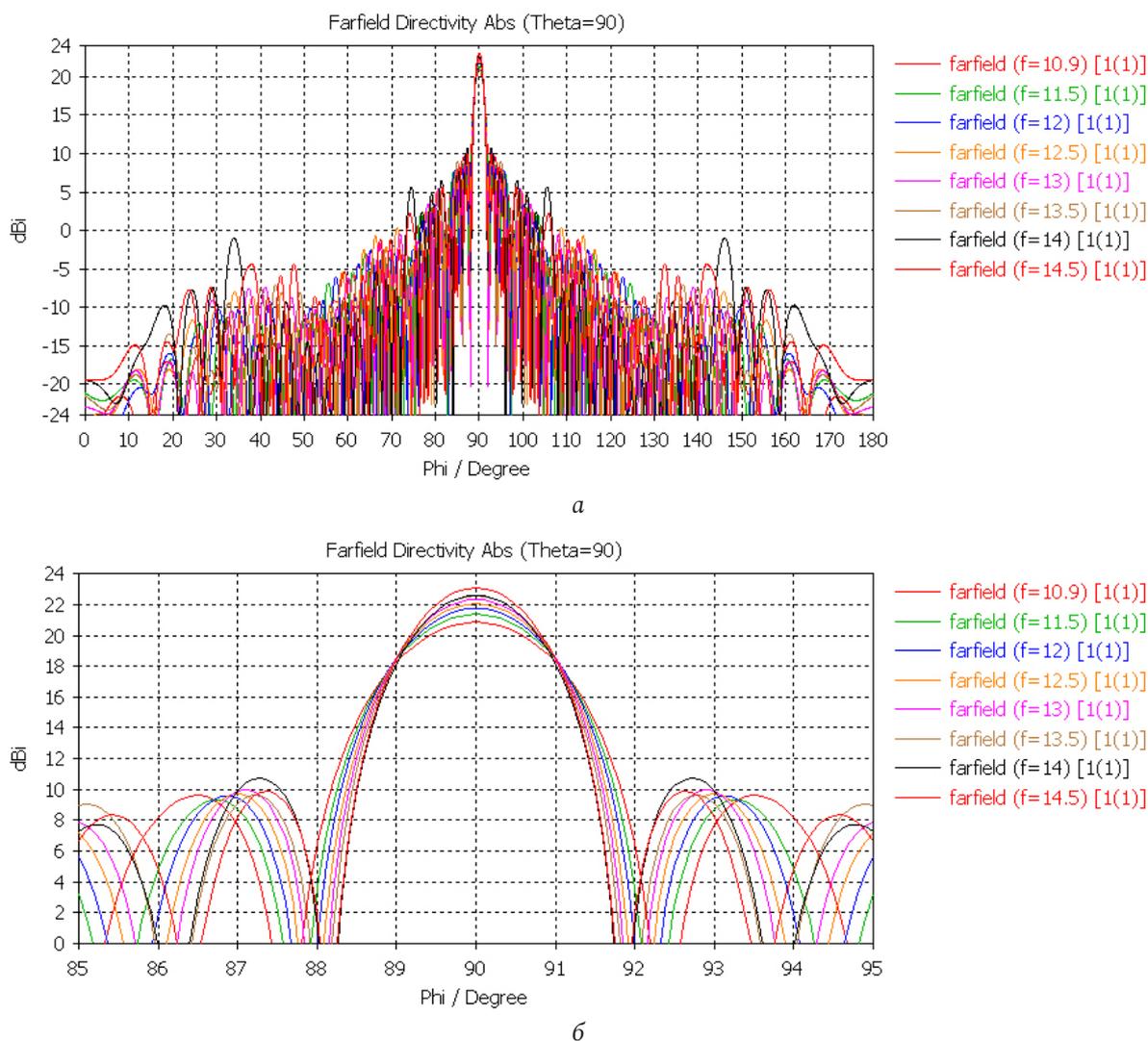


Рис. 3. Диаграммы направленности линейной эквидистантной антенной решетки с E- и H-плоскостными делителями мощности в азимутальной (а) и угло-местной (б) плоскостях
 Fig. 3. Radiation patterns of a linear equidistant antenna array with E- and H-plane power dividers in the azimuthal (a) and elevation (b) planes

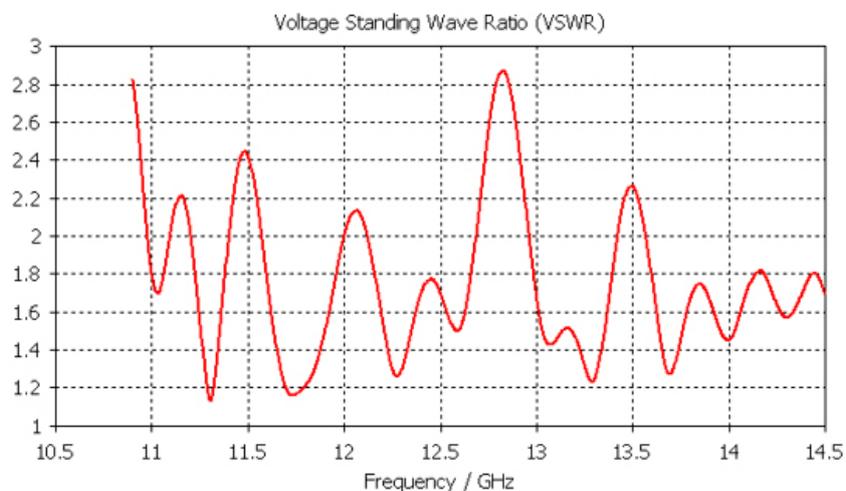


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны на входе антенной решетки
 Fig. 4. Frequency dependence of the standing wave ratio at the antenna array input

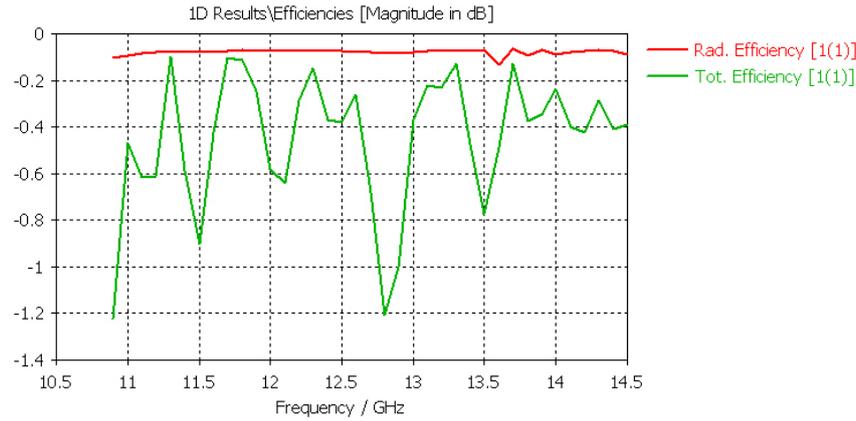


Рис. 5. Частотная зависимость потерь в металле и суммарных потерь (с учетом отражений)
 Fig. 5. Frequency dependence of losses in metal and total losses (including reflections)

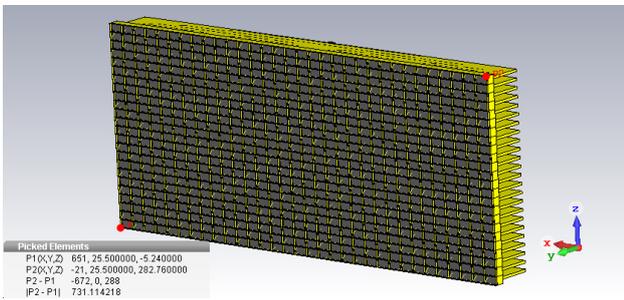


Рис. 6. ФАР из 24 строк и 32 столбцов. Ширина – 672 мм. Высота – 288 мм. Глубина с учетом коаксиально-волноводных переходов – 75,7 мм
 Fig. 6. FAR of 24 rows and 32 columns. Width – 672 mm. Height – 288 mm. Depth, taking into account coaxial-waveguide transitions – 75,7 mm

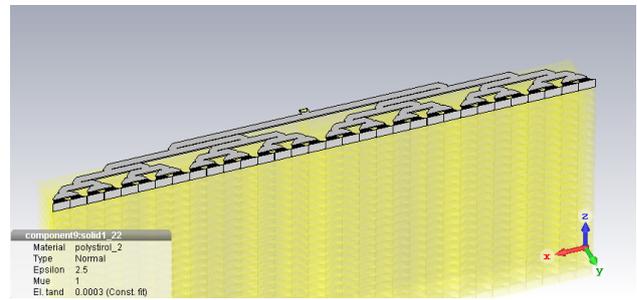


Рис. 9. Диэлектрик заполнения синфазного и равноамплитудного делителя мощности 1:32 и рупоров (полистироловый вкладыш)
 Fig. 9. Dielectric filling of the common-mode and equal-amplitude power divider 1:32 and horns (polystyrene liner)

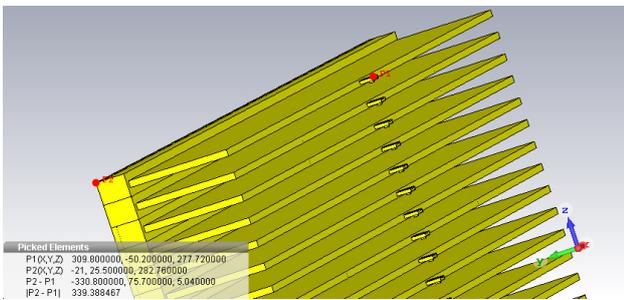


Рис. 7. Обратная сторона ФАР. Коаксиально-волноводные переходы (к линзе Ротмана с ВЧ-коммутатором)
 Fig. 7. Reverse side of phased array. Coaxial-waveguide transitions (to a Rothman lens with an RF switch)

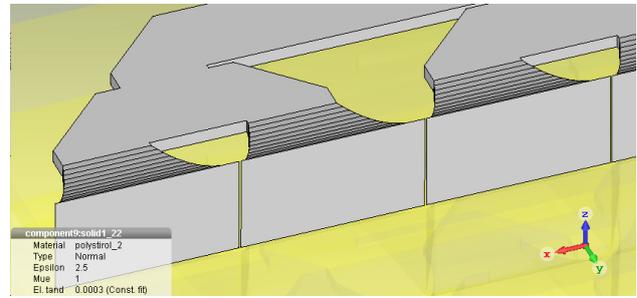


Рис. 10. Фрагмент диэлектрического заполнения делителя мощности и рупорных излучателей
 Fig. 10. Fragment of the dielectric filling of the power divider and horn emitters

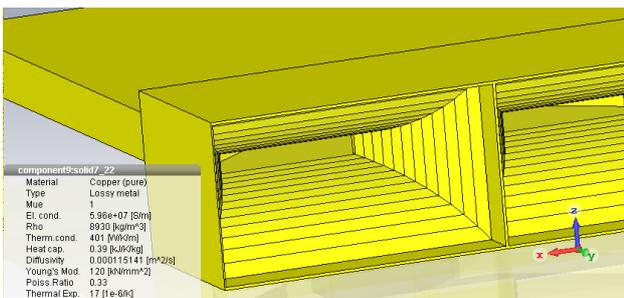


Рис. 8. Волноводные излучатели соединены с делителем мощности экспоненциальными переходами
 Fig. 8. Waveguide emitters are connected to the power divider using exponential junctions

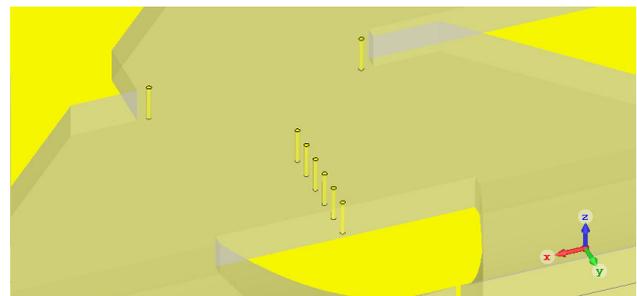


Рис. 11. Металлические штыри в делителе мощности, выполняющие функцию улучшения его согласования
 Fig. 11. Metal pins in the power divider that improve its matching

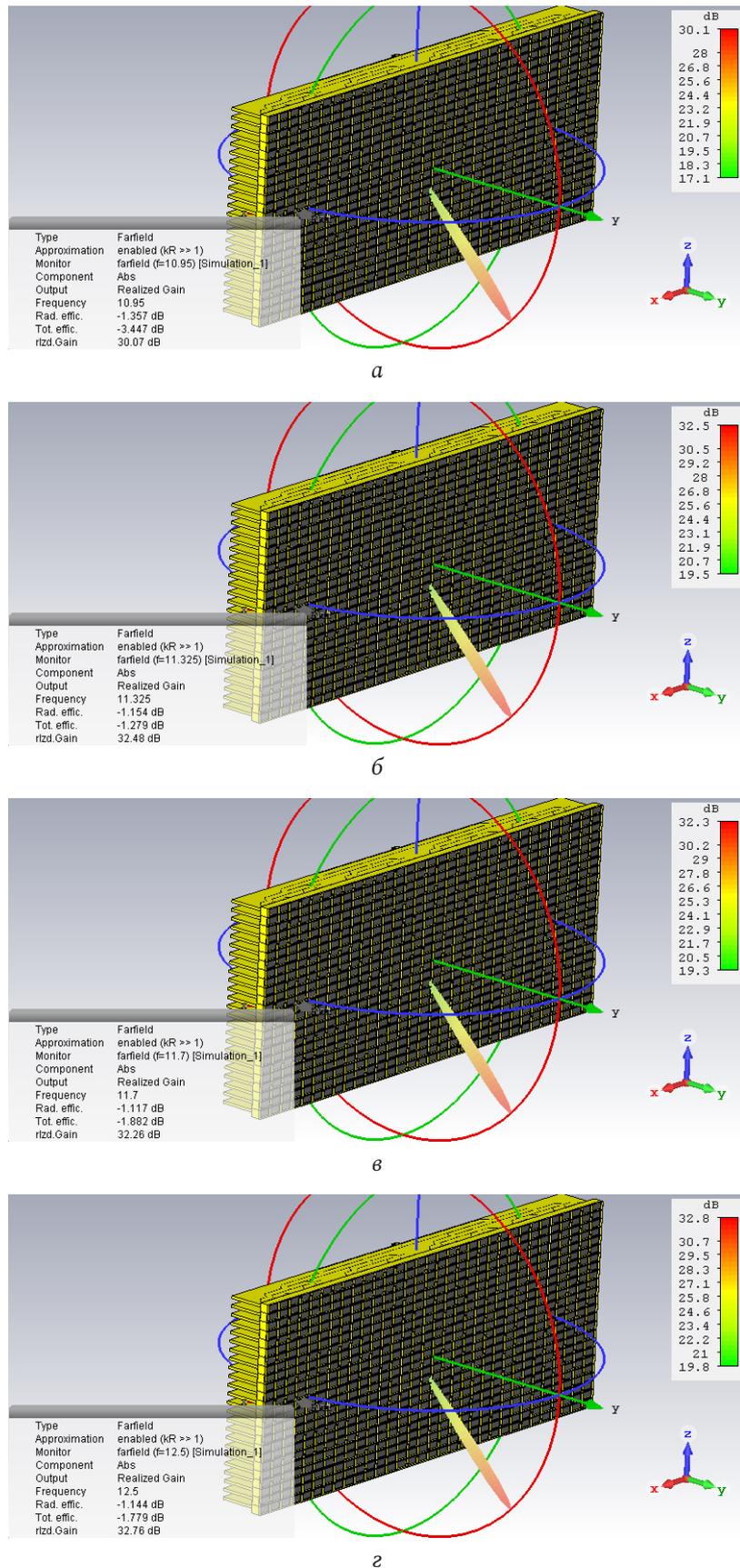


Рис. 12. Диаграмма направленности ФАР при отклонении луча на угол 45° от нормали на частотах: а - $f = 10,95$ ГГц; б - $f = 11,325$ ГГц; в - $f = 11,7$ ГГц; г - $f = 12,5$ ГГц

Fig. 12. Phased array radiation pattern when the beam deviates at an angle of 45° from the normal at frequencies: а - $f = 10,95$ GHz; б - $f = 11,325$ GHz; в - $f = 11,7$ GHz; г - $f = 12,5$ GHz

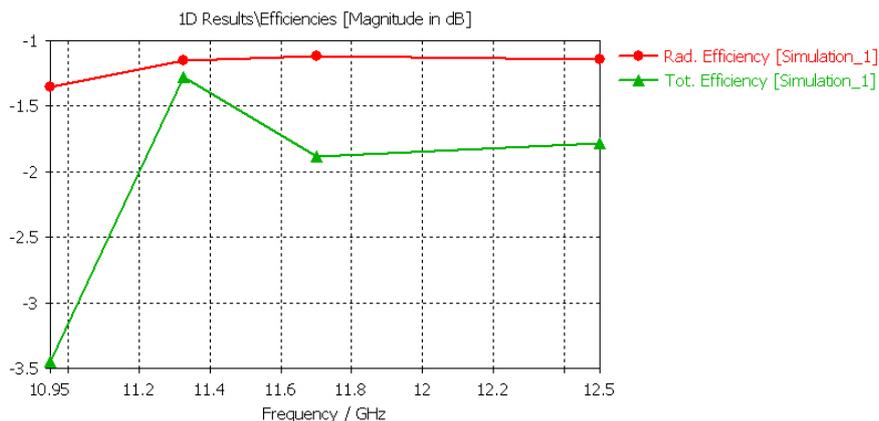


Рис. 13. КПД ФАР при отклонении луча на угол 45° от нормали, дБ
Fig. 13. Phased array efficiency when the beam deviates at an angle of 45° from the normal, dB

рис. 6–11. Диаграммы направленности ФАР приведены на рис. 12.

Частотные зависимости коэффициента эффективности излучения и суммарных потерь с учетом рассогласования приведены на рис. 13.

Заключение

Достоинством использования подхода к построению линейных антенных решеток, питаемых с помощью многоканальных делителей мощности, является возможность минимизации глубины антенной системы. Основными недостатками – конструктивная и технологическая сложность делителей мощности и существенные потери мощности при большом числе каналов.

Возможные технологии изготовления разработанной ФАР:

1. Штамповка из полистирола внутренней части делителя мощности и излучателей. Далее – по-

лировка, напыление меди и гальваническое покрытие слоем меди.

2. Печать на 3D-принтере из полистирола, полировка, напыление меди и гальваническое покрытие меди.

3. Изготовление делителя мощности с использованием SIW-технологии на базе стандартных СВЧ-ламинатов. Использование металлизированных сквозных отверстий для согласования делителей мощности. Антенные элементы и коаксиально-волноводные переходы изготавливаются путем штамповки из полистирола, или печати на 3D-принтере из полистирола, далее – полировка, напыление слоя меди и гальваническое покрытие слоем меди.

4. Штамповка из металла делителя мощности, излучателей и коаксиально-волноводных переходов (2 детали). Диэлектрический вкладыш может печататься на 3D-принтере из полистирола.

Список литературы

1. Brand J. Practical on-the-move satellite communications for present and future mobile warfighters // Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM '05), Atlantic City, NJ, USA, October 2005. P. 625–629.
2. Дементьев А.Н. Математическое моделирование электромагнитной обстановки на борту космического аппарата // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 4. С. 26–36. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/6946>
3. Глушанков Е.И., Царик В.И. Практическая реализация пространственно-временной фильтрации спутниковых навигационных сигналов в реальном времени // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 2. С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.2.64-69>
4. Бойчук С.И., Коровкин А.Е., Юхнов В.И. Методики создания и проверки многодиапазонных антенно-волноводных трактов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.52-58>

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.

E-mail: pasternakyg@mail.ru

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

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: pva777777@yandex.ru

Проскурин Дмитрий Константинович, кандидат физико-математических наук, доцент, ректор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика и техника СВЧ.
E-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Сафонов Кирилл Сергеевич, младший научный сотрудник Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

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

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2027, vol. 27, no. 2, pp. 91–99

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.2.91-99
UDC 621.396.67
Original Research

Received 18 October 2023
Accepted 20 November 2023
Published 29 June 2024

Antenna array of waveguide horns with an E-plane aperture, as well as horns with an aperture in the E- and H-planes

Yuri G. Pasternak¹, Vladimir A. Pendyurin²,
Dmitry K. Proskurin¹, Kirill S. Safonov¹

¹ Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya Street,
Voronezh, 394006, Russia

² JSC RPE «Automated communication systems»
108, Peshe-Streletskaya Street,
Voronezh, 394062, Russia

Abstract – Background. Currently, in connection with the conduct of a special military operation, the issue of the availability of inexpensive mobile terminals for high-speed satellite communications of domestic production is very relevant, as well as due to the large extent of the territories of our country, there are a number of areas where cellular communication is absent, for example, the Taiga, the Arctic, the territory of the Arctic Ocean, etc. Therefore, the only possible connection in these territories is satellite communication. **Aim.** Development of a linear equidistant antenna array with equal amplitude and common-mode excitation for a mobile satellite communication terminal. **Methods.** The antenna array was designed from the open ends of waveguides with a cross section of 19 × 11 mm with air filling. Adjacent pairs of radiating waveguides are powered by an E-planar divider: the waveguide is divided in half in height by a thin metal diaphragm, wave reflections from which are insignificant; further, in each half of the power divider, height-separated right and left turns and smooth transitions in the E-plane are implemented – an extension from 5,25 mm to 11 mm. **Results.** An antenna array with a period of 19,5 mm has been developed. Overall dimensions: opening width – 624 mm, height – 12 mm, depth – 118 mm. A feature of the antenna array design is the use of smooth asymmetric transitions in the E-plane according to the exponential law; in the opening of the headlights, waveguide asymmetric horns alternate, with a period equal to 4 values of the width of the waveguides, taking into account the width of their narrow walls, expanding in the upper (2 adjacent radiators) and lower (next 2 radiators) directions. **Conclusion.** The advantage of using an approach to the construction of linear antenna arrays powered by multichannel power dividers is the ability to minimize the depth of the antenna system. The main disadvantages are the constructive and technological complexity of power dividers and significant power losses with a large number of channels. Possible manufacturing technologies of the developed phased array: 1. Stamping of polystyrene of the inner part of the power divider and emitters. Next, polishing, copper spraying and electroplating with a layer of copper. 2. Printing on a 3D polystyrene printer, polishing, copper spraying and copper electroplating. 3. Manufacture of a power divider using SIW technology based on standard microwave laminates. The use of metallized through holes for matching power dividers. Antenna elements and coaxial waveguide junctions are made by stamping from polystyrene, or printing on a 3D printer from polystyrene, then polishing, spraying a layer of copper and electroplating with a layer of copper. 4. Metal stamping of the power divider, emitters and coaxial waveguide junctions (2 parts). The dielectric insert can be printed on a 3D printer made of polystyrene.

Keywords – mobile and airborne satellite communications; linear antenna arrays; waveguide horns.

References

1. J. Brand, “Practical on-the-move satellite communications for present and future mobile warfighters,” *Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM '05)*, Atlantic City, NJ, USA, Oct. 2005, pp. 625–629.
2. A. N. Demytyev, “Mathematical modeling of the electromagnetic environment on board the spacecraft,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 26–36, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/6946>. (In Russ.)
3. E. I. Glushankov and V. I. Tsarik, “Practical realization of space-time filtering of satellite navigation signals in real time,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 64–69, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.2.64-69>. (In Russ.)
4. S. I. Boychuk, A. E. Korovkin, and V. I. Yukhnov, “Methods for creating and testing multi-band antenna-waveguide paths,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 52–58, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.52-58>. (In Russ.)

Information about the Authors

Yuri G. Pasternak, Doctor of Technical Sciences, professor of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.

E-mail: pasternaky@mail.ru

Vladimir A. Pedyurin, Candidate of Technical Sciences, general director of JSC RPE «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.

E-mail: pva77777@yandex.ru

Dmitry K. Proskurin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, rector of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.

E-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Kirill S. Safonov, junior researcher of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics and microwave technology.

E-mail: Safonov-kirik@mail.ru