

## Разработка технологии сборки излучающих модулей активной фазированной антенной решетки X-диапазона в современных космических радиоконплеках

© А.А. Ляшенко<sup>1</sup>, В.И. Колпаков<sup>1</sup>, Г.В. Подлесная<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Корпорация «Комета», Москва, 129281, Россия

*Космические аппараты различного назначения и установленные на них радиотехнические интегрированные системы с каждым годом все больше отличаются друг от друга своими технологическими особенностями, функциональными возможностями и целевой направленностью. В составе современных спутниковых систем военного и гражданского назначения все шире применяется активная фазированная антенная решетка (АФАР). В настоящей статье рассмотрена разработанная технология изготовления излучающих модулей АФАР X-диапазона, обеспечивающая высокую надежность передачи информации, одновременную работу на нескольких частотах и снижение массогабаритных показателей. При выборе новых материалов для сэндвич-панелей приемно-передающего излучающего модуля предпочтение отдано тем, которые удовлетворяют требованиям к физико-механическим характеристикам и геометрическим параметрам конструкции, а также оказывают минимальное влияние на электрические свойства многослойной конструкции радиоконплека. По разработанной технологии изготовлен образец излучающего модуля АФАР нового поколения.*

**Ключевые слова:** активная фазированная антенная решетка, сэндвич-панель, излучающий модуль

**Введение.** В настоящее время осуществляется непрерывный рост запусков новых космических аппаратов (КА) различного назначения. Только за последние пять лет на орбиту Земли было выведено более 200 КА.

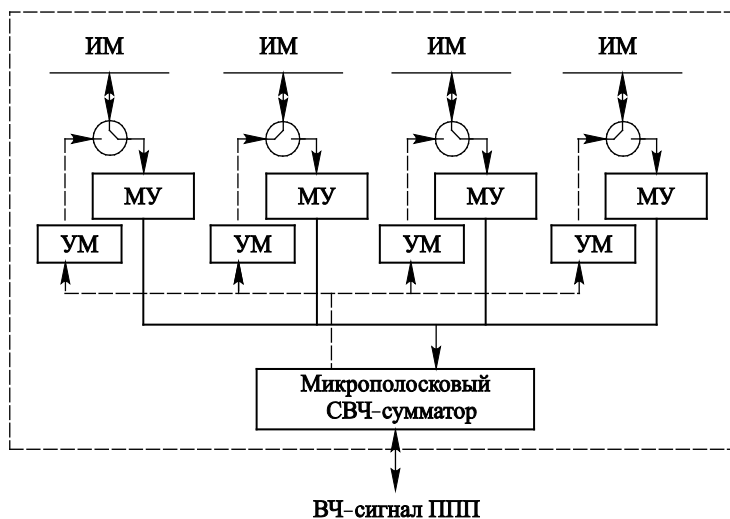
Разработка принципиально новой группировки спутниковых систем обеспечивает существенное повышение качества, надежности, устойчивости передаваемой информации, а также увеличение ее дальности и объема. Для решения данных задач в современных КА различного назначения применяются активные фазированные антенные решетки (АФАР). Такие системы позволяют реализовать многофункциональный режим работы и удовлетворить возрастающие требования к энергетическим и массогабаритным показателям аппаратуры связи [1].

АФАР, в том числе X-диапазона, является радиотехнической системой, в которой радиопередающее устройство и высокочастотный приемник интегрированы в единую антенную решетку в виде распределенной структуры. В таких структурах в качестве основных

узлов используют активные приемно-передающие модули (ППМ), каждый из которых имеет четыре собственных излучающих модуля (ИМ). Последние обеспечивают более высокую надежность передачи информации, а также возможность одновременной работы на нескольких частотах и существенно уменьшают массогабаритные показатели КА в целом [2]. Несмотря на указанные преимущества, использование АФАР в настоящее время сопряжено с трудностями сборки ее элементов (ИМ и ППМ) и всего радиоконкомплекса в целом, связанные с применением новых материалов и обеспечением геометрических параметров каждого слоя конструкции.

Целью настоящей работы является разработка технологии сборки приемно-передающего ИМ нового поколения, обеспечивающая реализацию требований, предъявляемых к геометрическим параметрам конструкции и физико-механическим характеристикам используемых материалов.

**Структура АФАР X-диапазона.** Структурно АФАР состоит из множества ППМ, включающих в себя приемные и передающие тракты, а также приемно-передающие ИМ. Множество ППМ образует многоканальные подрешетки, форма которых должна удовлетворять конструкторским требованиям радиоконкомплекса (рис. 1) [3].

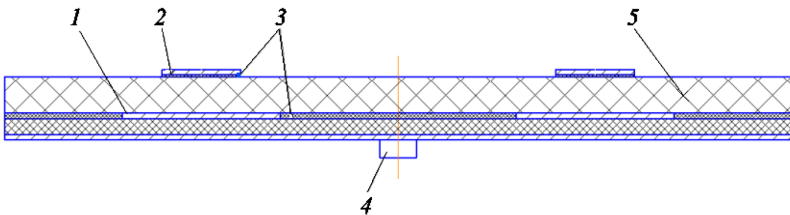


**Рис. 1.** Структурная схема приемно-передающего модуля:

ИМ — излучающий модуль; МУ — маломощный усилитель; УМ — усилитель мощности

Приемно-передающий ИМ представляет собой патч-антенну (тип слабонаправленной антенны, работающей в диапазонах очень высоких и сверхвысоких частот (СВЧ)), обеспечивающую излучение и прием радиоволн круговой поляризации за счет возбуждения полос-

ковых фольгированных элементов (патчей) [4]. ИМ является верхним уровнем ППМ и структурно представляет собой сэндвич-панель, состоящую из СВЧ-материалов, скрепленных термопластичными пленками [5]. К нижней поверхности ИМ припаян коаксиальный разъем для обеспечения взаимодействия с приемно-передающим трактом (рис. 2) [6].



**Рис. 2.** Структурная схема излучающего модуля:

1, 2 — верхний и нижний патчи; 3 — термопластичная пленка; 4 — коаксиальный кабель; 5 — промежуточный слой из материала Rohacell HF51

При подборе материалов для верхних и нижних патчей учитывали следующие критерии:

- работа в широком диапазоне частот (7...30 ГГц);
- единые электрические свойства при изменении частот;
- низкая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon \leq 2,5$ ).

На основании данных критериев были выбраны материалы Rogers (табл. 1). Они характеризуются наименьшей диэлектрической проницаемостью среди поставляемых в настоящий момент материалов данного класса. Это обеспечивает их применимость для ИМ АФАР, где дисперсия и потери должны быть минимизированы [7].

Слои патчей получают методом вытравливания слоя меди с поверхности фольгированного диэлектрика.

Таблица 1

**Характеристики материалов Rogers**

Характеристика	Класс		
	5880LZ	5880	5870
Диэлектрическая постоянная (10 ГГц)	1,96±0,04	2,20±0,04	2,33±0,04
Тангенс угла диэлектрических потерь (10 ГГц)	0,0027	0,0015	0,0015
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,32	0,20	0,22
Толщина диэлектрика, мм	0,254...4,318	0,127...3,175	0,127...3,175
Огнестойкость	94V-0**	94V-0	94V-0

Подбор материалов для промежуточного слоя между патчами осуществляли на основании следующих критериев:

- высокая способность передачи радиосигнала;
- единые электрические свойства при изменении частот;
- низкая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon \geq 1$ ).

С учетом данных критериев было решено использовать материалы Rohacell HF (табл. 2). Одним из преимуществ применения материалов Rohacell HF является закрытая ячеистая конструкция, которая практически не впитывает смолы при склейке, а также имеет отличные свойства совмещения с металлическими поверхностями, поскольку отсутствует возможность возникновения коррозии [8].

Таблица 2

Характеристики материалов Rohacell HF

Характеристика	Частота, ГГц	Rohacell 31HF	Rohacell 51HF	Rohacell 71HF
Диэлектрическая проницаемость	2,5	1,05	1,057	1,075
	5,0	1,043	1,065	1,106
	10,0	1,046	1,067	1,093
	26,5	1,041	1,048	1,093
Тангенс угла диэлектрических потерь	2,5	<0,0002	<0,0002	<0,0002
	5,0	0,0016	0,0008	0,0016
	10,0	0,0017	0,0041	0,0038
	26,5	0,0106	0,0135	0,0155

**Формирование сэндвич-панели.** Для соединения в сэндвич-панель рассмотренных элементов использовали клей с низкой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon < 2$ ). Необходимо отметить, что элементы из материала Rohacell HF подвержены разрушению при прессовании, что делает невозможным использование препрегов для изготовления пакета заготовки из-за высокого удельного давления при склеивании поверхностей. Поэтому для соединения использовали вакуумное прессование с применением термопластичной пленки Rogers 3001 (см. рис. 2, поз. 3). В этом случае пленка Rogers 3001 совместима со всеми используемыми материалами, не влияет на электрические свойства многослойных конструкций и очень хорошо подвергается механической обработке.

**Изготовление технологического оснащения с помощью аддитивных технологий.** Поскольку данное изделие относится к опытному производству, для изготовления технологического оснащения, с помощью которого будут формироваться сэндвич-панели, применяли аддитивные технологии, а именно технологию FDM-печати (Fused Deposition Modeling). Данная технология в сочетании с термопластиком производственного класса позволяет создавать прочные и стабильные по размерам изделия, что дает возможность быстро отработать технологию и при необходимости оперативно получить изделия с измененными геометрическими параметрами при коррекции конструкции технологического оснащения.

Для изготовления оснастки выбран материал АБС (акрилонитрилбутадиенстирол), так как он обладает наиболее высокой стойкостью к ударным нагрузкам по сравнению с другими термопластичными, применяемыми в FDM-печати.

**Технологический процесс сборки ИМ.** К началу процесса сборки ИМ каждый элемент панели должен быть изготовлен с соблюдением всех предъявляемых требований к геометрическим параметрам, качеству поверхностей заготовки, к упаковке, транспортировке к месту сборки, распаковке и т. д. Перед началом сборки к нижнему слою сэндвич-панели припаивали QMA-разъем (см. рис. 2, поз. 4). Пайку выполняли стандартным оловянно-свинцовым припоем ПОСб1 с использованием канифольно-спиртовых флюсов. После окончания операции проводили визуальный контроль полученного соединения.

После предварительных операций осуществляется сборка элементов заготовки, которую затем подвергают вакуумному прессованию. Для этого нижний слой укладывается на оснастку, на которой под разъемы выпилены специальные технологические отверстия. Далее проводится укладка клеевой пленки Rogers 3001, представляющая собой тонкий лист с вырубленными отверстиями под патчи, на верхнюю поверхность первого слоя заготовки. Операция осуществляется в стерильных условиях с использованием тонких резиновых перчаток. Необходимо отметить, что перед наложением промежуточного слоя защитная пленка полностью снимается. Аналогичным образом укладывается медная фольга (см. рис. 2, поз. 1). После завершения процесса укладки заготовки, представляющей собой набор слоев из различных материалов, осуществляется ее вакуумное прессование под давлением 0,15 МПа в течение 15 мин при температуре 60 °С. По завершении прессования проводится визуальный контроль качества готового изделия. Экспериментальный образец ИМ нового поколения, изготовленный по разработанной технологии, приведен на рис. 3.

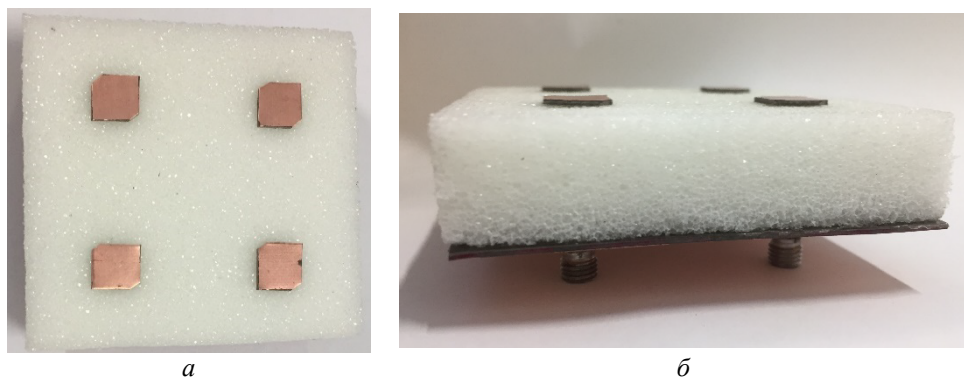


Рис. 3. Экспериментальный образец излучающего модуля:  
а — вид сверху; б — вид спереди

**Заключение.** Обоснованы критерии (диэлектрическая проницаемость, плотность) и осуществлен выбор материалов, обеспечивающих более высокую надежность передачи информации, для изготовления АФАР X-диапазона. Планируется осуществить замещение всех используемых материалов на отечественные аналоги.

Разработан технологический процесс с использованием новых материалов. На основе разработанной технологии изготовлен экспериментальный образец ИМ нового поколения АФАР.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Talisa S.H., O'Haver K.W., Comberiate T.M., Sharp M.D., Somerlock O.F. Benefits of Digital Phased Array Radars. *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, pp. 530–543.
- [2] Гостюхин В.Л. *Активные фазированные антенные решетки*. Москва, Радиотехника, 2011, 304 с.
- [3] Глазунов Р.А. Планарный излучатель для ППМ. *Антенны*, 2012, № 11, с. 44–47.
- [4] Воскресенский Д.И. *Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток*. Москва, Радиотехника, 2012, 741 с.
- [5] Воскресенский Д.И. *Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы*. Москва, Радиотехника, 2013, 208 с.
- [6] Porras M.J.P., Bertuch T., Loecker C., Adams R., Wunderlich R., Heinen S. An AESA Antenna Comprising an RF Feeding Network With Strongly Coupled Antenna Ports. *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 2015, vol. 63, pp. 182–194.
- [7] *Rogers Corporation*. URL: <https://www.rogerscorp.com/index.aspx> (дата обращения 27.01.2017).
- [8] *EVONIC. Rohacell*. URL: <http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/Pages/default.aspx> (дата обращения 10.02.2017).

Статья поступила в редакцию 30.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ляшенко А.А., Колпаков В.И., Подлесная Г.В. Разработка технологии сборки излучающих модулей активной фазированной антенной решетки X-диапазона в современных космических радиоконструкциях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1681>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

**Ляшенко Артем Андреевич** — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [articoon@gmail.com](mailto:articoon@gmail.com)

**Колпаков Владимир Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [kolpakov@sm.bmstu.ru](mailto:kolpakov@sm.bmstu.ru)

**Подлесная Галина Владленовна** — заместитель главного инженера, главный технолог ОАО «Корпорация космических систем специального назначения «Комета». e-mail: [podlesna55@yandex.ru](mailto:podlesna55@yandex.ru)

## Development of assembly technology for the radiating modules for the X-band active electronically scanned array in the current space radio systems

© A.A. Lyashenko<sup>1</sup>, V.I. Kolpakov<sup>1</sup>, G.V. Podlesnaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup> JSC Space Special-Purpose System Corporation «Comet», Moscow, Russia

*The article presents the technology of manufacturing the radiating modules for the X-band active electronically scanned array (AESA) providing high reliability of information transmission, simultaneous operation at several frequencies and reduction of mass-size parameters. New materials are selected for sandwich panels of the receiving and transmitting radiating module, satisfying the requirements for the physical and mechanical characteristics and geometric parameters of the structure and providing the minimal effect on the electrical properties of the multilayer structure of the radio system as well. A prototype of the AESA radiating module was made.*

**Keywords:** active electronically scanned array, sandwich panel, radiating module

### REFERENCES

- [1] Talisa S.H., O'Haver K.W., Comberiate T.M., Sharp M.D., Somerlock O.F. *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, pp. 530–543.
- [2] Gostukhin V.L. *Aktivnye fazirovannye antenyne reshetki* [Active electronically scanned arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011, 304 p.
- [3] Glazunov R.A. *Antenny — Antennas*, 2012, no. 11, pp. 44–47.
- [4] Voskresensky D.I. *Ustroystva SVCh and antenyne. Proektirovanie fazirovannykh antenyne reshetok* [Microwave devices and antennas. Design of electronically scanned arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, 741 c.
- [5] Voskresensky D.I. *Bortovye tsifrovye antenyne reshetki i ikh elementy* [Onboard digital antenna arrays and their elements]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 208 c.
- [6] Porras M.J.P., Bertuch T., Loecker C., Adams R., Wunderlich R., Heinen S. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, pp. 182–194.
- [7] *Rogers Corporation*. Available at: <https://www.rogerscorp.com/index.aspx> (accessed January 27, 2017).
- [8] *EVONIC. Rochacell*. Available at: <http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/Pages/default.aspx> (accessed February 10, 2017).

**Lyashenko A.A.**, student, Department of Technologies of Space-Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [articoon@gmail.com](mailto:articoon@gmail.com)

**Kolpakov V.I.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [kolpakov@sm.bmstu.ru](mailto:kolpakov@sm.bmstu.ru)

**Podlesnaya G.V.**, Deputy Chief Engineer, Chief Technologist, JSC Space Special-Purpose System Corporation «Comet». e-mail: [podlesna55@yandex.ru](mailto:podlesna55@yandex.ru)