РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2018, том 5, выпуск 4, с. 73–79

—— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ———

УДК 621.396.946 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.73.79

# Антенна приемопередающего модуля активной фазированной решетки Ка-диапазона частот

**М. В. Моисеев**, moiseev.mv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. Ю. Авдонин**, avdonin.by@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А.А.Нелин**, к. в. н., innovation@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Проведен анализ конструкции антенн миллиметрового диапазона частот, оптимизированных под изготовление по технологии LTCC. Проведено математическое моделирование следующих конструкций антенн: спиральная антенна, полосковая (патч) антенна, рупорная антенна. Проведен анализ влияния технологических ограничений по точности изготовления проводящих структур, усадки диэлектрических слоев на стабильность согласования с линией передачи, коэффициента усиления, поляризационных характеристик и формы диаграммы направленности антенн. Рассмотрена возможность применения конструкции антенн в двухчастотном режиме. Приведены рекомендации по оптимальной конструкции антенны для применения в активных фазированных решетках (АФАР) миллиметрового диапазона частот.

Ключевые слова: патч-антенна, полосковая антенна, LTCC керамика, активная фазированная решетка, АФАР

### Antenna of the Transmitter Receiver Module for an Active Electronically Scanned Array of the Ka-band

**M. V. Moiseev**, moiseev.mv@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. Yu. Avdonin, avdonin.by@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation A. A. Nelin, Cand. Sci. (Military), innovation@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents the analysis of the design of the millimeter frequency band antennas optimized for the LTCC technology production. Mathematical simulation of the following antenna structures: a spiral antenna, stripline (patch) antenna, and horn antenna is conducted. The article analyzes the impact of technological limitations on the manufacturing accuracy of conductive structures, shrinkage of dielectric layers on the stability of matching with the transmission line, gain, polarization characteristics, and the shape of the antenna pattern. The possibility of using the antenna design in the dual mode is considered. The recommendations for an optimal antenna design for an active electronically scanned array (AESA) of the millimeter frequency band are given.

Keywords: patch antenna, stripline antenna, LTCC ceramics, active electronically scanned array, AESA

#### Введение

В настоящее время наблюдается стремительное развитие космических систем, что влечет за собой существенное увеличение количества космических аппаратов (КА) и увеличение объемов передаваемой информации по каналам связи. При этом частотный ресурс в разрешенных диапазонах L, S, C, X существенно ограничен и в большинстве случаев занят существующими системами. В связи с этим перед разработчиками перспективных космических систем связи стоит задача освоения миллиметровых диапазонов К-, Ка- для решения задач связи как между КА, так и между КА и наземными станциями.

При построении каналов связи в диапазонах К-, Ка- возникают следующие проблемы:

- уменьшение расстояний между элементами антенных решеток;
- увеличение требований по точности изготовления;
- увеличение потерь в линиях передачи.

Чтобы компенсировать влияние данных негативных факторов, необходимо использование технологий с высокой плотностью монтажа. Технология LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) обладает высокими электрическими характеристиками в диапазонах частот до 110 ГГц с большим количеством слоев, что позволяет обеспечить высокую плотность монтажа. Теплопроводность LTCC существенно выше, чем у плат на основе CBЧ-ламинатов, что позволяет обеспечить необходимый тепловой режим компонентов при высокой плотности монтажа.

Совмещение антенны и входного/выходного каскада ППМ дает возможность существенно снизить фазовые искажения и потери полезного сигнала за счет кабельного тракта и разъемов. Такой тип конструкции позволяет использовать в составе АФАР новые типы излучающих элементов.

Далее приведено несколько типов излучающих элементов, выполненных по технолгии LTCC, с результатами моделирования в САПР.

#### Спиральная антенна

На рис. 1 представлена двухзаходная логарифмическая спиральная антенна. Данный тип антенны относится к типу антенн бегущей волны.



Рис. 1. Спиральная антенна

Излучателем спиральной антенны являются два проводника в виде спирали, подключенные к источнику сигнала в центре антенны.

В качестве диэлектрика используется керамика Ferro A6M. Диаметр диэлектрика — 16 мм, высота — 2,3 мм. Основные электрические параметры антенны представлены на рис. 2, 3, 4.

Как видно из рис. 2, 3, 4, в требуемом диапазоне частот значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) не превышает 1,5, ширина диаграммы направленности по уровню  $-3 \, \text{дБ}$  составляет 50°, коэффициент эллиптичности в рабочем диапазоне углов менее 1 дБ, данные значения соответствуют требованиям к антенне.

Основным недостатком данного типа антенн является входное сопротивление антенны около 188 Ом. Что, в свою очередь, требует применения согласующего устройства. На требуемых частотах согласующие устройства будут иметь габариты меньше технологического предела LTCC-технологии, что, в свою очередь, влечет за собой применение внешних согласующих устройств. Такое схемотехническое построение приводит к существенному снижению технологичности антенны.

#### Полосковая антенна

Технология LTCC позволяет хорошо реализовать полосковые антенны. Полосковая антенна представляет собой металлический излучатель



Рис. 2. Коэффициент стоячей волны по напряжению модели спиральной антенны



Рис. 3. Сечение диаграммы направленности, правая круговая поляризация



Рис. 4. Коэффициент эллиптичности, правая круговая поляризация

над экраном. Использование диэлектрика между излучателем и экраном позволяет сократить габаритные размеры антенны и обеспечить высокие конструктивные характеристики.

На рис. 5 представлена полосковая антенна диапазона частот 32,3–33 ГГц.



Рис. 5. Полосковая антенна

В качестве диэлектрика используется керамика Ferro A6M. Размеры диэлектрика  $3 \times 3 \times 0,013$  мм, размеры излучателя  $1,705 \times 1,705$  мм. Основные электрические параметры антенны представлены на рис. 6, 7, 8.

Как видно из рис. 6, 7, 8, в требуемом диапазоне частот значение КСВН не превышает 1,8, ширина диаграммы направленности по уровню –3 дБ составляет 100°, коэффициент эллиптичности в рабочем диапазоне углов — менее 2 дБ, данные значения соответствуют требованиям к антенне.

Основным недостатком данного типа антенн является достаточно узкая полоса частот, 1-2%от центральной частоты рабочей полосы частот. Если требуется антенна с большим диапазоном рабочих частот либо с несколькими рабочими диапазонами, следует применять другие типы антенн. Также для обеспечения точной настройки по частоте и хорошей эллиптичности необходимо обеспечить точность изготовления порядка одного микрона. Технология LTCC позволяет обеспечить точность 5-10 мкм. Следовательно, необходима дополнительная настройка антенны после изготовления, что приводит к существенному снижению технологичности антенны.

## Многослойная антенна рупорного типа

Рупорная антенна классического типа состоит из волновода переменного сечения, с расширением к излучающей части (рис. 9). В простейшем случае рупорная антенна возбуждается волноводом, также возможно совместить антенну и коаксиально-волноводный (КВП) либо полосково-волноводный переходы (ПВП).

На высоких частотах габариты рупорных антенн уменьшаются пропорционально уменьшению длины волны. Данный факт позволяет реализовать рупорную антенну в рамках технологии LTCC. На рис. 10 представлена модель рупорной антенны в диапазоне частот 32–36 Ггц.

Рупорная антенна представляет собой открытый конец квадратного волновода с возбуждением полосковыми линиями.

Круговая поляризация формируется путем сложения полей от двух полосковых линий, которые, в свою очередь, подключены через гибридное кольцо. Полосковые линии формируют поле со сдвигом  $90^{\circ}$ , так же геометрически линии расположены под  $90^{\circ}$  относительно друг друга. Такая конструкция позволяет сформировать на выходе рупора поле круговой поляризации. Гибридное кольцо реализуется во внутренних слоях структуры LTCC.

На рис. 11, 12, 13 представлены характеристики модели антенны.

По графику КСВН полоса рабочих частот от 31,8 до 35,6 ГГц (КСВН менее 1,5). Значение коэффициента эллиптичности на средней частоте не превышает 2,5 дБ. Исходя из анализа характеристик модели антенны можно сделать следующие выводы:

- предлагаемая конструкция антенны обеспечивает требуемые электрические характеристики;
- за счет широкой полосы рабочих частот точность изготовления по технологии LTCC достаточна для обеспечения нужных значений электрических параметров;
- размеры конструкции позволяют использовать данную антенну для построения антенных решеток с расстоянием между элементами порядка половины длины волны.



Рис. 6. Коэффициент стоячей волны по напряжению модели полосковой антенны



Рис. 7. Сечение диаграммы направленности, правая круговая поляризация



Рис. 8. Коэффициент эллиптичности, правая круговая поляризация





Рис. 9. Рупорная антенна

Рис. 10. Модель рупорной антенны, LTCC-исполнение. Габариты антенны  $4\times 4\times 2$  мм



Рис. 11. Коэффициент стоячей волны по напряжению модели рупорной антенны



Рис. 12. Сечение диаграммы направленности, правая круговая поляризация



Рис. 13. Коэффициент эллиптичности, правая круговая поляризация

#### Выводы

Исходя из анализа достоинств и недостатков рассмотренных типов антенн для решения задачи создания АФАР с использованием LTCC-технологии оптимальной является рупорная антенна.

#### Список литературы

- 1. Улиг П. Интеграция антенн в многослойные керамические подложки // Технологии в электронной промышленности, 2010, № 4.
- 2. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 144 с.
- Панченко Б.А., Нефедов Е.И. и др. Электродинамический расчет характеристик полосковых антенн. М.: Радио и связь, 2002. 256 с.
- Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
- 5. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проек-

тирования и численное моделирование / Под ред. В. А. Обуховца. М.: Радиотехника, 2006. 240 с.

- Yu A., Yang F., Elsherbeni A. A dual band circularly polarized ring antenna based on composite right and left handed metamaterials // Progress In Electromagnetics Research. Massachusetts: USA: EMW Publishing Cambridge, 2008, vol. 78. P. 73–81.
- 7. James J.R., Hall P.S. Handbook of Microstrip antennas P. Peregrinus, 1989.
- 8. Uhlig P., Gunner C., Holzwarth S., Kassner J., Kulke R., Lauer A., Rittweger M. LTCC Short Range Radar Sensor for Automotive Applications at 24 GHz/IMAOS 2004. Long Beach, 2004.
- Litschke O., Simon W., Holzwarth S. A 30 GHz highly integrated LTCC antenna element for digital beam forming arrays / Conference proceedings APS2006. Washington, 2006.
- 10. *Teshirogi et al.* Wideband circularly polarized array antenna with sequential rotations and phase shift of elements/ International Sumposium on Antennas & Propagation Proceedings. Japan, 1995.