

## РАЗРАБОТКА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА (150 МГц) ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ «ИОНОСФЕРА»

В.С. Бочаров, А.Г. Генералов, Э.В. Гаджиев  
(ОАО «НИИЭМ»)

*Представлены результаты разработки прямоугольной микрополосковой антенны метрового диапазона (рабочая частота 150 МГц) для перспективного применения на КА «Ионосфера». Рассмотрены основные этапы проектирования микрополосковых антенн.*

**Ключевые слова:** микрополосковая антенна, излучатель, подложка, экран, космический аппарат.

КА «Ионосфера», входящий в состав космического комплекса (КК) «Ионозонд», создаётся в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» по заказу Федерального космического агентства. К моменту создания комплекса орбитальная группировка должна включать в себя пять КА: четыре КА «Ионосфера» и один КА «Зонд» [1]. КА «Ионосфера» однотипные.

Для КА «Ионосфера» № 1 и 2 была разработана антенная система, состоящая из спиральной (рабочая частота 137 МГц), штыревой (рабочая частота 150 МГц) и вибраторной (рабочая частота 400 МГц) антенн [2].

Для бортовых антенно-фидерных устройств (АФУ) КА на поверхности КА заказчиком отводится определённое место. Зачастую этого отведённого места бывает недостаточно для установления того АФУ, которое полностью бы отвечало заданным требованиям. В связи с этим приходится использовать выносные элементы (кронштейны, штанги) или другие типы антенн (ленточные, выдвижные). Использование элементов такого типа ухудшает надёжность, что недопустимо в космической технике. При разработке бортовых АФУ следует учитывать вредные факторы влияния космического пространства и влияние элементов бортовой аппаратуры КА и корпуса самого КА на электрические параметры антенн.

В ОАО «НИИЭМ» ведутся работы по созданию малогабаритных, невыступающих бортовых антенн для малогабаритных КА [3 – 5], в частности для КА «Ионосфера».

В процессе работы возник интерес к микрополосковым антеннам (МПА). МПА создаются методами планарной технологии в интегральном исполнении, поэтому обеспечивают высокую технологичность, производительность размеров антенн, низкую стоимость, малые габариты и массу. Также

МПА могут излучать волны линейной, круговой и эллиптической поляризации; обеспечивать работу в многочастотных режимах [6]. МПА обладают простой структурой, состоящей из минимального числа элементов (рис. 1).

В [7] представлена разработка МПА на рабочей частоте 400 МГц для КА «Ионосфера».

В данной работе авторы приводят материалы по разработке МПА на рабочей частоте 150 МГц (МПА 150 МГц) и пути миниатюризации МПА, разрабатываемых на таких низких частотах без ухудшения электрических параметров.

Как правило, МПА состоит из излучателя, расположенного на диэлектрическом слое с проводящей подложкой (см. рис. 1) [8, 9]. В связи с этим необходимо при разработке устройства определить форму излучателя, конфигурацию подстилающей диэлектрической структуры, тип используемого СВЧ-диэлектрика, геометрические размеры МПА.

В настоящий момент существует огромное количество излучателей МПА различной формы: прямоугольные, круглые, секторные, эллиптические, кольцевые, круглые и т. д. Учитывая принятую общую компоновку КА «Ионосфера», была предложена прямоугольная форма излучателя МПА.

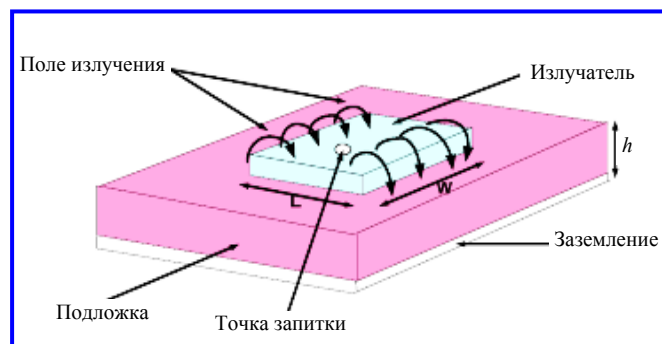


Рис. 1. Микрополосковая антенна

Геометрическая форма МПА	Прямоугольная
Рабочая частота $f$ , МГц	150
Тип СВЧ-диэлектрика подложки МПА	ФЛАН
Диэлектрическая проницаемость ФЛАН, $\epsilon$	10
Тангенс угла диэлектрических потерь ФЛАН $\text{tg}\delta$	$1,5 \times 10^{-3}$
Толщина подложки $h$ , м	0,02
Ширина излучателя МПА $w$ , м	0,43
Эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{эфф}}$	7,38
Длина излучателя МПА $L$ , м	0,38

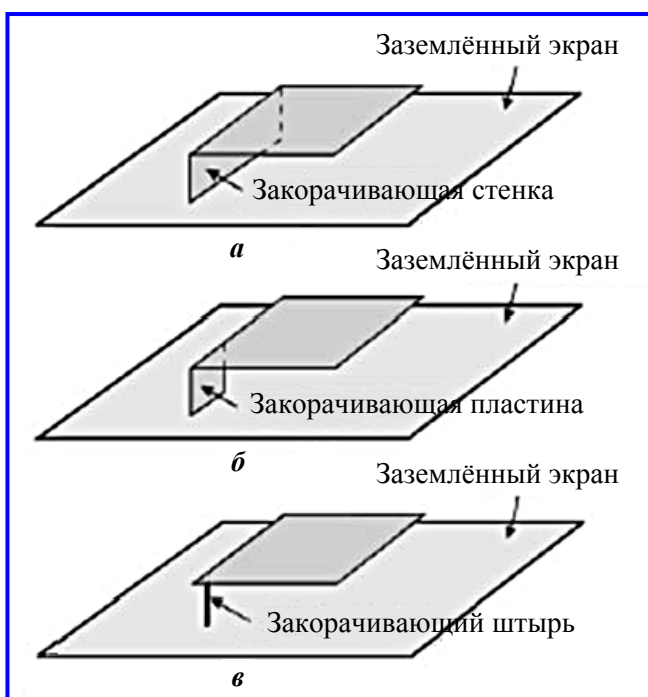


Рис. 2. Варианты построения закороченных МПА с помощью: а – закорачивающей стенки; б – закорачивающей пластины; в – закорачивающего штыря

Проанализировав имеющиеся на сегодняшний день варианты конфигурации подстилающей поверхности, был предложен вариант диэлектрической экранированной подложки [6].

После выбора формы излучателя и подстилающей диэлектрической поверхности, необходимо оценить геометрические параметры разрабатываемой бортовой МПА:

– ширину излучателя

$$w = \frac{c}{2f_p} \sqrt{\frac{2}{\epsilon + 1}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;  $f_p$  – резонансная частота излучения;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость подложки;

– длину излучателя:

$$L = \frac{c}{2f_p \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{\text{эфф}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость, которая определяется:

$$2\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon + 1 + (\epsilon - 1) \left(1 + 10 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина подложки.

При выборе оптимальной толщины подложки  $h$  нужно исходить из предъявляемых требований по электрическим и механическим параметрам к бортовым АФУ. Как правило, толщина подложки составляет  $(0,1 - 0,01) \lambda$ .

Для миниатюризации МПА обычно используются диэлектрические подложки с большим значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Однако в этом случае значительно повышается концентрация электрического поля ближней зоны антенны, что приводит к низкой интенсивности излучения из-за большого реактивного поля и узкой полосы пропускания, что является существенным недостатком.

Так как МПА будет работать в условиях космоса, то необходимо при выборе диэлектрического материала учитывать влияние космического излучения, а именно ионизирующего излучения, которое состоит из первичного излучения, поступающего из космического пространства, и вторичного излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного излучения с атмосферой Земли [10]. Также не следует забывать о больших перепадах температур, которым подвергается КА, а следовательно, вся бортовая аппаратура, при движении в космосе по заданной траектории; нагрузках при старте и движении ракеты-носителя до выхода на заданную рабочую орбиту и отделения КА от ракеты-носителя (вибрации и удары).

Учитывая всё вышесказанное и проанализировав имеющиеся на сегодняшний день материалы (БРИКОР, ФЛАН, ФАФ-4Д, СВЧ и др.), в качестве СВЧ-диэлектрика был выбран фольгированный листовой арилокс наполненный (ФЛАН). Данный материал представляет собой листовой материал, изготавливаемый на основе наполненных простых полиэфиров, облицованных с двух сторон медной гальваностойкой электролитической плёнкой толщиной 35 мкм. ФЛАН обладает малыми потерями, хорошей прочностью и радиационной стойкостью.

Далее используя формулы (1) – (3), были определены геометрические размеры полуволновой МПА. Параметры МПА приведены в таблице.

Анализируя полученные результаты, было предложено проектировать четвертьволновую МПА, так как полученные габариты полуволновой антенны на рабочей частоте 150 МГц неприемлемы из-за ограниченного места для размещения антенны на поверхности корпуса КА.

Для построения четвертьволновой МПА необходимо ввести закорачивающий элемент, что приведёт к уменьшению габаритов МПА в два раза [11]. На рис. 2 показаны возможные варианты построения таких МПА.

При разработке четвертьволновой прямоугольной МПА 150 МГц было предложено в качестве закорачивающего элемента использовать вариант, представленный на рис. 3, а, т. е. использовать закорачивающую стенку. Данный выбор обусловлен тем, что этот вариант не ухудшит прочностных, электрических параметров МПА и надёжности работы МПА при работе на борту КА «Ионосфера». Таким образом, четвертьволновая МПА 150 МГц имеет следующие габариты  $0,21 \times 0,19$  м.

После определения оптимальных параметров габаритов МПА 150 МГц, была проанализирована диаграмма направленности (ДН) антенны. В сферической системе координат электрическое поле излучателя имеет компоненты  $E_\theta$ ,  $E_\varphi$ . Поляризацию антенны определяет проекция компонента  $E_\theta$  на нормаль к плоскости щели (ось  $Y$ ). Тогда ДН антенны имеет вид [12]:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\sin(\pi\lambda^{-1} \cos \varphi)}{\pi\lambda^{-1} \cos \varphi} \cos \theta \cos\left(\frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta\right). \quad (4)$$

Первые два множителя в (4) определяют ДН эквивалентного линейного излучателя, а последний множитель является характеристикой направленности системы из двух одинаковых излучателей, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга.

Используя (4), была рассчитана теоретическая ДН МПА 150 МГц, представленная на рис. 3.

Представленная ДН была рассчитана в Mathcad для свободного пространства, т. е. без учёта влияния на ДН антенны элементов бортовой аппаратуры КА «Ионосфера», солнечной батареи и самого корпуса КА. По полученной ДН можно сделать вывод, что ДН МПА 150 МГц имеет преимущественное направление на центр Земли в

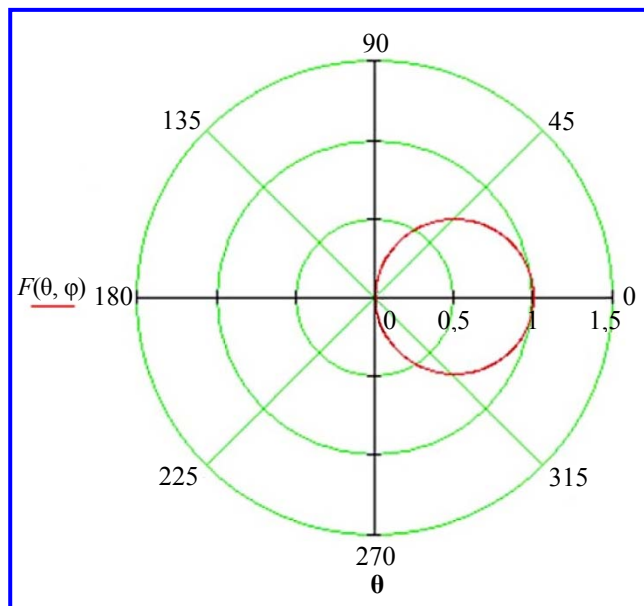


Рис. 3. Теоретическая ДН МПА 150 МГц

пределах  $0^\circ - 45^\circ$  от надира и  $0^\circ - 360^\circ$  по азимуту, что соответствует заданным требованиям к антенне на рабочей частоте 150 МГц, входящей в антенную систему КА «Ионосфера».

В настоящее время ведутся работы по отработке габаритных размеров МПА 150 МГц (с учётом крепления антенны на поверхности КА); получению ДН МПА 150 МГц с учётом влияния бортовой аппаратуры, расположенной на поверхности корпуса КА «Ионосфера», т. е. практической ДН; оценки коэффициента усиления МПА 150 МГц, а также поиску оптимального месторасположения на корпусе КА МПА 150 МГц. Указанные выше работы будут осуществлены с помощью электродинамического моделирования, т. е. с помощью применения систем автоматизированного проектирования антенн и устройств СВЧ.

Таким образом, с помощью применения микрополосковых (печатных) антенн в качестве бортовых АФУ можно решить задачу по созданию малогабаритных, невыступающих бортовых антенн, а также:

- повысить степень защищённости антенны в связи с отсутствием выступающих элементов антенн;
- повысить надёжность антенны, благодаря уменьшению количества элементов, входящих в структуру антенны;
- более эффективно использовать поверхность корпуса КА;
- уменьшить затраты на производство антенны, т. е. стоимость изделия;

– улучшить массогабаритные показатели в сторону уменьшения массы антенны, а следовательно, и самого КА.

*Авторы благодарят доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой 406 МАИ (НИУ) Д.И. Воскресенского за научное руководство работой.*

### Литература

1. Космический комплекс «Ионозонд» [Электронный ресурс] URL: [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=469:-lr&catid=37:spaceprograms&Itemid=62](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=469:-lr&catid=37:spaceprograms&Itemid=62). – (дата обращения 02.07.2013).
2. Антенная система космического аппарата «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 11 – 14.
3. Макриденко Л. А., Боярчук К. А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение / Л. А. Макриденко, К. А. Боярчук // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т. 102. – С. 12 – 27.
4. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко [и др.] // Труды Московского физико-технического института. – Долгопрудный : ГОУВПО «Московский физико-технический институт», 2009. – Т. 1. – № 3. – С. 14 – 22.
5. Гершензон В., Карпенко С. Малые спутники – провокация или перспективное направление? / В. Гершензон, С. Карпенко // Экология и жизнь. – М. : ООО «Время знаний», 2011. – № 12 (121). – С. 50 – 57.
6. Современная теория и практические применения антенн / В. А. Неганов, Д. П. Табаков, Г. П. Яровой. – М. : Радиотехника, 2009. – 720 с.
7. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на КА «Ионосфера» [Электронный ресурс] / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Труды МАИ. – М. : МАИ, 2013. – № 65. – С. 34. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=20283165>.
8. Панченко Б. А., Нефёдов Е. И. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефёдов. – М. : Радио и связь, 1986. – 144 с.
9. Нефёдов Е. И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : учеб. пособие / Е. И. Нефёдов. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
10. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций / Под редакцией В. К. Князева, Н. А. Сидорова. – М. : Советское радио, 1976. – 568 с.
11. Antenna theory: analysis and design / Constantine A. Balanis. – 2-nd ed. – Wiley-Interscience, 1997. – 959 p.
12. Антенны и устройства СВЧ / Под редакцией Д. И. Воскресенского. – М. : Радио и связь, 1981. – 431 с. – (Проектирование фазированных антенных решёток).

Поступила в редакцию 11.09.2012

*Владимир Семёнович Бочаров, начальник лаборатории.  
Александр Георгиевич Генералов, начальник сектора.  
Эльчин Вахидович Гаджиев, инженер, аспирант.  
Т. (495) 994-55-57.  
E-mail: otd24@niiem.ru.*