

МНОГОДИАПАЗОННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА

А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев

Рассмотрены способы построения многодиапазонных микрополосковых антенн. Показаны недостатки представленных способов при построении бортовых антенн для класса малых космических аппаратов. Предложен вариант построения планарной, простой и надёжной конструкции микрополосковой антенны, позволяющий обеспечивать режим работы в двух диапазонах (метровым и дециметровым) для построения бортовой антенной системы класса малых космических аппаратов. Приведены результаты электродинамического моделирования микрополосковых антенн с использованием предложенного варианта. Оценены такие параметры антенны, как коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент усиления. Предложенные миниатюрные микрополосковые антенны разработаны для малого космического аппарата «Ионосфера». Также рассмотрен вариант применения в качестве связанной многодиапазонной антенны для сверхмалого космического аппарата «CubeSat».

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая антенна, микрополосковая антенна, коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Введение

В ходе обзора существующих вариантов построения малогабаритной, невыступающей бортовой антенной системы для класса малых космических аппаратов (КА) [1], предложено применение микрополосковых (печатных) антенн (МПА) [2].

МПА обладают необходимыми свойствами для применения их в составе бортовых антенных систем малых КА [3, 4] с учётом специфики бортовых антенн [5].

В [6, 7] представлены разработанные бортовые МПА метрового и дециметрового диапазонов для применения в составе малого КА «Ионосфера».

Учитывая свойство МПА работать в многодиапазонном режиме, возник интерес к построению многодиапазонной МПА. Такой подход к построению бортовой антенной системы малых КА позволит [8]:

- уменьшить количество бортовых антенн;
- более эффективно использовать поверхность КА для размещения бортовой аппаратуры;

– снизить массу антенной системы.

Способы построения многодиапазонных МПА

В [9] предложена двухчастотная МПА, представленная на рис. 1.

Антенна содержит проводящий экран 21, внутреннюю излучающую пластинку 22, внешнюю излучающую пластинку 23, множество или набор проводящих элементов 26, соединяющих внешнюю проводящую пластинку 22 с её экраном 21. Проводящие элементы 26 представляют собой, например, тонкие металлические пластинки или штыри произвольной формы.

Внутренняя (центральная) пластинка 22 имеет размер D_1 и представляет собой проводящую поверхность в виде круглого диска с набором выступов 24. Внешняя (периферийная) пластинка 23 имеет внешний размер D_{2out} и внутренний размер D_{2in} и представляет собой проводящую поверхность

в виде кольца с набором сегментов в форме выступов 25, расположенных на внутренней стороне кольца. Выступы 24 внутренней пластинки расположены в пазах, которые образованы выступами 25 внешней пластинки и наоборот. Форма выступов 24 и 25 может иметь прямоугольную, квадратную или иную форму, занимающую определенную площадь поверхности, например, они могут быть выполнены в виде трапеции, как показано на рис. 1. Между внешней и внутренней пластинками имеется зазор h . В выступах 25 расположены проводящие элементы 26, которые гальванически соединяют пластинку 23 с экраном 21. Проводящие элементы 26 могут располагаться как в каждом выступе 25, так и с определенным шагом, например через один выступ. Между экраном 21 и краями внешней пластинки 23 имеется диэлектрическое заполнение 28. Пластинки 22 и 23 могут быть выполнены методами изготовления печатных плат

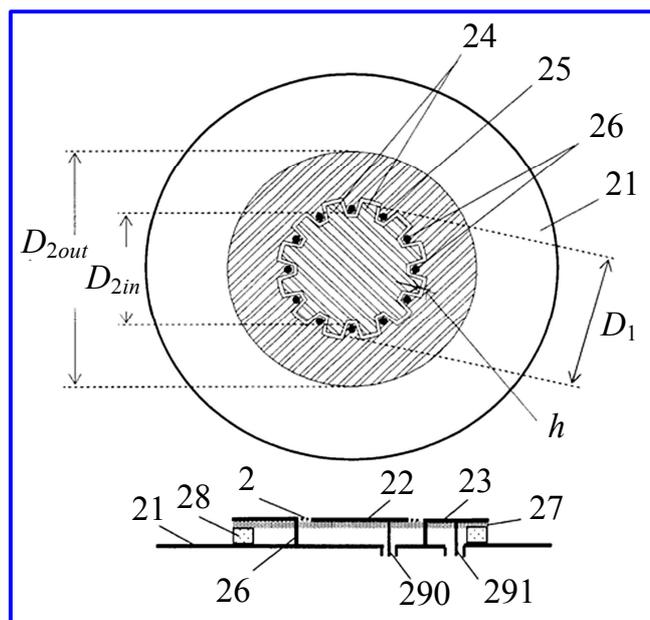


Рис. 1. Конструкция двухчастотной МПА

в виде слоёв металлизации, расположенных на диэлектрической подложке 27, которые выполняют роль несущего основания. Экран 21 и проводящие пластинки 22 и 23 образуют два открытых резонатора: внешний и внутренний. Размеры D_1 , D_{2in} и D_{2out} подбираются так, чтобы на рабочих частотах возбуждались резонансные колебания, соответствующие каким-либо модам резонаторов, тип которых выбирается исходя из требуемой диаграммы направленности (ДН). Так, для антенн спутниковой навигации необходимо иметь максимально равномерную ДН в передней полусфере. Для этого посредством системы питания, через соответствующие возбуждающие штыри 290 для внутренней и 291 для внешней пластинки, возбуждаются резонансные колебания, соответствующие модам TM_{11} , как во внутреннем, так и во внешнем резонаторах. Электромагнитная энергия подводится к каждой из пластинок, например, с помощью двух коаксиальных кабелей.

В [10] представлена многодиапазонная МПА, показанная на рис. 2.

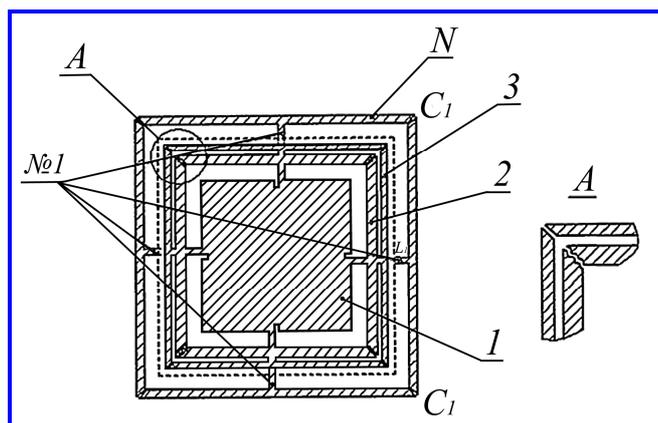


Рис. 2. Конструкция многодиапазонной МПА плоскостного типа

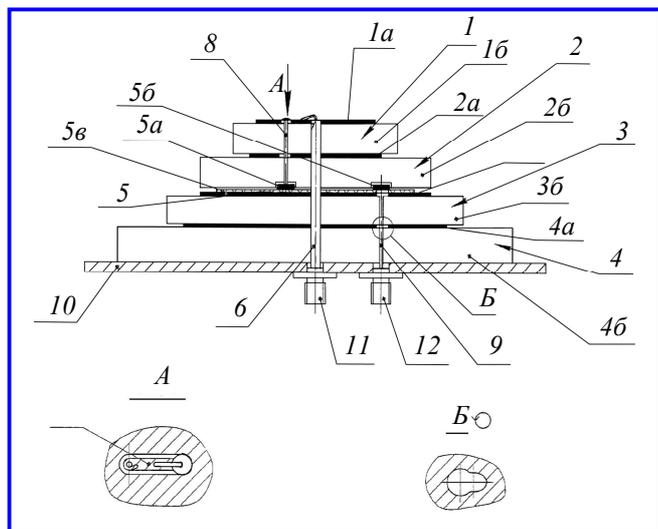


Рис. 3. Многодиапазонная МПА этажерочного типа

Многодиапазонная МПА плоскостного типа состоит из первого планарного антенного элемента 1 и разрезных кольцевых планарных антенных элементов 2, 3, ... N с внешними формами, симметричными относительно центра МПА, четырёх отрезков полосковых проводников N+1, двух штырей N+2, направленного ответвителя N+3, высокочастотного соединителя N+4 и экрана N+5.

Первый планарный антенный элемент 1 выполнен в центре МПА, внутри кольцевых антенных элементов 2, 3, ... N, и имеет симметричную форму. В топологии первого антенного элемента имеются четыре щели, отходящие от его краев к центру и расположенные с пространственным интервалом в 90° относительно центра МПА (для обеспечения согласования и подстройки первого антенного элемента). Разрезные кольцевые планарные элементы 2, 3, ... N соединены электрически с планарным элементом 1 с помощью четырёх отрезков полосковых проводников N+1, которые расположены по одинаковым (правым или левым) сторонам четырёх щелей.

Все антенные элементы выполнены на общей диэлектрической подложке. Основанием МПА служит внешняя обкладка направленного ответвителя N+3, выполненного на связанных полосковых линиях и питающего пару штырей N+2, проходящих через отверстия в основании и пластине диэлектрика и подключённых к центральному антенному элементу в точках, расположенных под углом 90° относительно центра МПА (для обеспечения излучения поля круговой поляризации) симметрично относительно центральной линии одной из щелей (произвольной). Запитывается многочастотная МПА от общего коаксиального кабеля, который подсоединяется к высокочастотному соединителю N+4, установленному в проводящем (земляном) экране N+5.

Проводящий экран N+5 имеет электрическое соединение с основанием антенны и служит для создания преимущественно однонаправленного излучения (приёма) многодиапазонной МПА.

В [11] представлен ещё один вариант построения многодиапазонной МПА, показанный на рис. 3.

Многодиапазонная МПА этажерочного типа состоит из первого антенного элемента 1, второго антенного элемента 2, третьего антенного элемента 3 и четвертого антенного элемента 4, каждый из которых включает печатный проводник 1a, 2a, 3a, 4a и диэлектрическую подложку 1б, 2б, 3б, 4б разделительной платы 5, включающей две печатные проводящие площадки 5a, 5б и диэлектрическую подложку 5в, высокочастотного коаксиального ка-

беля 6, передающей линии 7, первого штыря 8, второго штыря 9, проводящего экрана 10, первого высокочастотного соединителя 11, второго высокочастотного соединителя 12.

Каждый антенный элемент имеет отверстие в центре для прохождения коаксиального кабеля 6 и два отверстия на определённых расстояниях от центра для прохождения первого и второго штырей 8, 9, а каждый печатный проводник имеет в металлизации «окно», большего по сравнению с диаметром штыря размера для бесконтактного прохождения сквозь него первого или второго штырей 8, 9. «Окна» в печатном проводнике 3а третьего антенного элемента 3 и в печатном проводнике 1а первого антенного элемента выполнены круглой формы, а «окна» в печатных проводниках 2а и 4а второго антенного элемента 2 и четвёртого антенного элемента 4 выполнены грушевидной формы с ориентацией узкой части к краю печатного проводника. Разделительная плата 5 также имеет отверстие в центре для прохождения коаксиального кабеля 6 и одно отверстие вне центра для прохождения второго штыря 9. Все четыре антенных элемента и разделительная плата скреплены (склеены) между собой, а печатные проводники 1а, 2а, 3а, 4а припаяны в центре к внешнему проводнику коаксиального кабеля 6. Таким образом, все антенные элементы зашунтированы в центре на землю (внешний проводник коаксиального кабеля электрически соединен с экраном 10 через первый высокочастотный соединитель 11).

Передающая линия 7 может быть выполнена в виде обычной несимметричной микрополосковой линии, в которой роль земляной пластины выполняет печатный проводник 1а первого антенного элемента 1, либо в виде копланарной линии в топологии самого печатного проводника 1а. В последнем случае внешний проводник коаксиального кабеля 6 должен иметь косой срез на конце и запаиваться в центре к верхнему печатному проводнику 1а по полукругу, чтобы не переключать копланарную линию.

Высокочастотный кабель 6 одним концом электрически соединён с первым высокочастотным соединителем 11, а другим концом в центре электрически соединён с одним концом передающей линии 7. Вторым концом передающей линии электрически соединён с первым штырем 8, который пропущен через отверстия в диэлектрических подложках 1б, 2б и в печатных проводниках 1а, 2а без электрического контакта с ними и электрически соединён с печатной проводящей площадкой 5а разделительной платы 5.

Второй штырь 9 одним концом электрически соединён с центральным проводником высокочастотного соединителя 12, пропущен через отверстия в диэлектрических подложках 3б, 4б разделительной плате 5 и в печатных проводниках 3а, 4а без электрического контакта с ними и электрически соединён с печатной проводящей площадкой 5б разделительной платы 5.

Печатные проводящие площадки 5а, 5б образуют разделительные ёмкости с печатным проводником 3а. Их назначение – компенсация собственных индуктивностей штырей 8, 9. Место их расположения выбирается из условия оптимального согласования по импедансу входов антенны с подводящими фидерами в рабочих частотных диапазонах.

Высокочастотные соединители 11, 12 установлены на проводящем (земляном) экране 10 и служат для подключения к ним подводящих фидеров передающих или приёмных устройств.

Проводящий экран 10 служит для создания однопольного излучения (приёма) многодиапазонной МПА.

Вариант построения многодиапазонных МПА

Приведённые выше варианты построения многодиапазонных МПА обладают рядом недостатков, а именно сложной конструкцией, сложной схемой возбуждения, большим количеством элементов и т. д.

При построении двухчастотных МПА применяют следующее соотношение [12]:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где f_1, f_2 – резонансные (рабочие) частоты двухчастотной антенны; a – ширина излучателя антенны; b – длина излучателя антенны.

При построении МПА на две рабочие частоты одного диапазона длин волн (например, сантиметровый диапазон) габариты антенны, рассчитанные по соотношению (1), приемлемы для использования в качестве бортовой антенны для малых КА.

Однако, если разность двух резонансных (рабочих) частот Δf превышает полосу одного из каналов, например $\Delta f = |f_1 - f_2| > 30$ МГц, а отношения $\Delta f/f_1$ и $\Delta f/f_2$ больше чем 10 – 15 %, то полученные по формуле (1) габариты антенн становятся неприемлемыми для использования такой двухдиапазонной МПА в качестве бортовой антенны малого КА [12].

При разработке бортовых антенн особое внимание уделяется размещению их на поверхности КА, что в свою очередь накладывает жёсткие ограничения по

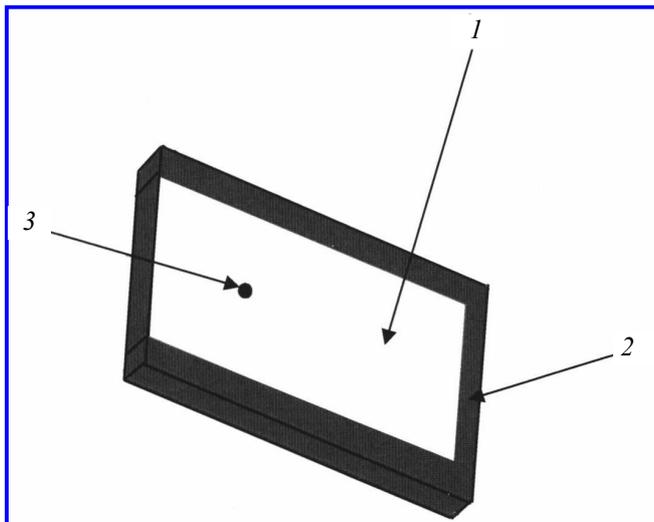


Рис. 4. Электродинамическая модель многодиапазонной МПА: 1 – излучатель; 2 – подложка; 3 – точка возбуждения

массогабаритным показателям антенн. Например, при $f_1 = 100$ МГц (метровый диапазон (30 – 300 МГц)) и $f_2 = 400$ МГц (дециметровый диапазон (300 МГц – 3 ГГц)) отношение сторон такой двухчастотной МПА $a/b = 1/3$, т. е. одна сторона излучателя должна быть больше другой в 3 раза.

Учитывая, что габариты одной из сторон микрополосковой антенны рассчитываются по следующему соотношению

$$b < \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны; ε – значение диэлектрической подложки микрополосковой антенны, то, из (2) видно, что габариты такой двухчастотной микрополосковой антенны (метрового и дециметрового диапазонов) получаются примерно $0,3 \times 0,9$ м.

Если рабочие частоты разнесены по частотной оси достаточно далеко друг от друга, то на каждой из них одно из сопротивлений существенно меньше другого, как сопротивление параллельного контура при сильной расстройке, а входное сопротивление двухчастотного излучателя практически равно входному сопротивлению одночастотного излучателя на соответствующей частоте.

Для построения многодиапазонных МПА предлагается вариант, который заключается в следующем. Для обеспечения излучения в разных диапазонах, например метровом и дециметровом, необходимо обеспечить отношение сторон излучателя a/b в пределах $0,5 \dots 1$. В то же время используется плоская, невыступающая конструкция самой антенны, а также один запитывающий штырь [13].

Такая конструкция позволяет упростить способ построения работы МПА в многодиапазонном диапазоне, что в свою очередь повышает надёжность такой антенны, так как в её конструкции используется минимальное количество элементов.

Применение метода

Проведено электродинамическое моделирование модели многодиапазонной МПА [14].

Для моделирования были использованы следующие входные данные:

- материал диэлектрика фольгированный арилокс листовой наполненный (ФЛАН), а именно ФЛАН-10 ($\varepsilon = 10$; $\text{tg}\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$) [15];
- толщина подложки 20 мм;
- возбуждение антенны осуществлялось с помощью штыря, который проходит через диэлектрик и соединяется с излучателем;
- точка возбуждения расположена на оси симметрии антенны на расстоянии примерно $2/3$ длины от торца с соединителем;
- габариты излучателя модели антенны $220 \times 125 \times 1$ мм ($125/220 \approx 0,6$);
- габариты подложки модели антенны $230 \times 160 \times 20$ мм;
- габариты экрана модели антенны $300 \times 300 \times 30$ мм.

На рис. 4 представлена электродинамическая модель антенны.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) модели, на которой видно, что рабочей частотой предлагаемой модели антенны является 247 МГц, что в свою очередь соответствует метровому диапазону волн (30 – 300 МГц), а значение КСВ на рабочей частоте 247 МГц составляет 1,4 и не превышает заданного предела, равного 2, в достаточно широком диапазоне частот (примерно ± 10 МГц), а второй рабочей частотой предлагаемой модели антенны является 945 МГц, что в свою очередь соответствует дециметровому диапазону волн (300 МГц – 3 ГГц), а значение КСВ на рабочей частоте 945 МГц составляет 1,1 и не превышает заданного предела, равного 2, в достаточно широком диапазоне частот (примерно ± 12 МГц) [8].

На рис. 6 представлена ДН модели.

Показано, что ДН предлагаемой модели антенны имеет преимущественное направление на центр Земли (излучение вдоль оси абсцисс) на обеих частотах, а также обеспечивает излучение в пределах $\pm 65^\circ$ на обеих частотах, т. е. достаточно широкая [8].

На рис. 7 представлен коэффициент усиления (КУ) модели. Из рисунка видно, что КУ предлага-

емой модели антенны в направлении центра Земли составляет порядка 4 дБ (усиление вдоль оси абсцисс), а усиление в пределах $\pm 60^\circ$ составляет примерно 1,2 дБ, т. е. данная модель антенны обладает достаточно хорошим КУ [8].

Помимо приведённых выше результатов, предложенный способ построения многодиапазонной антенны нашёл применение при проектировании многодиапазонной МПА для бортового двухчастотного передатчика «МАЯК 150/400» [16].

Полученные результаты представлены в работах [17, 18].

Также предлагаемый вариант построения многодиапазонной МПА предложен при построении бортовой двухчастотной связной МПА для применения в составе антенной системы сверхмалого КА «CubeSat». Рабочие частоты 145 МГц и 435 МГц [19].

Заключение

В данной работе представлен обзор существующих способов построения многодиапазонных МПА. Показаны недостатки при их применении для построения бортовой антенны класса малых КА.

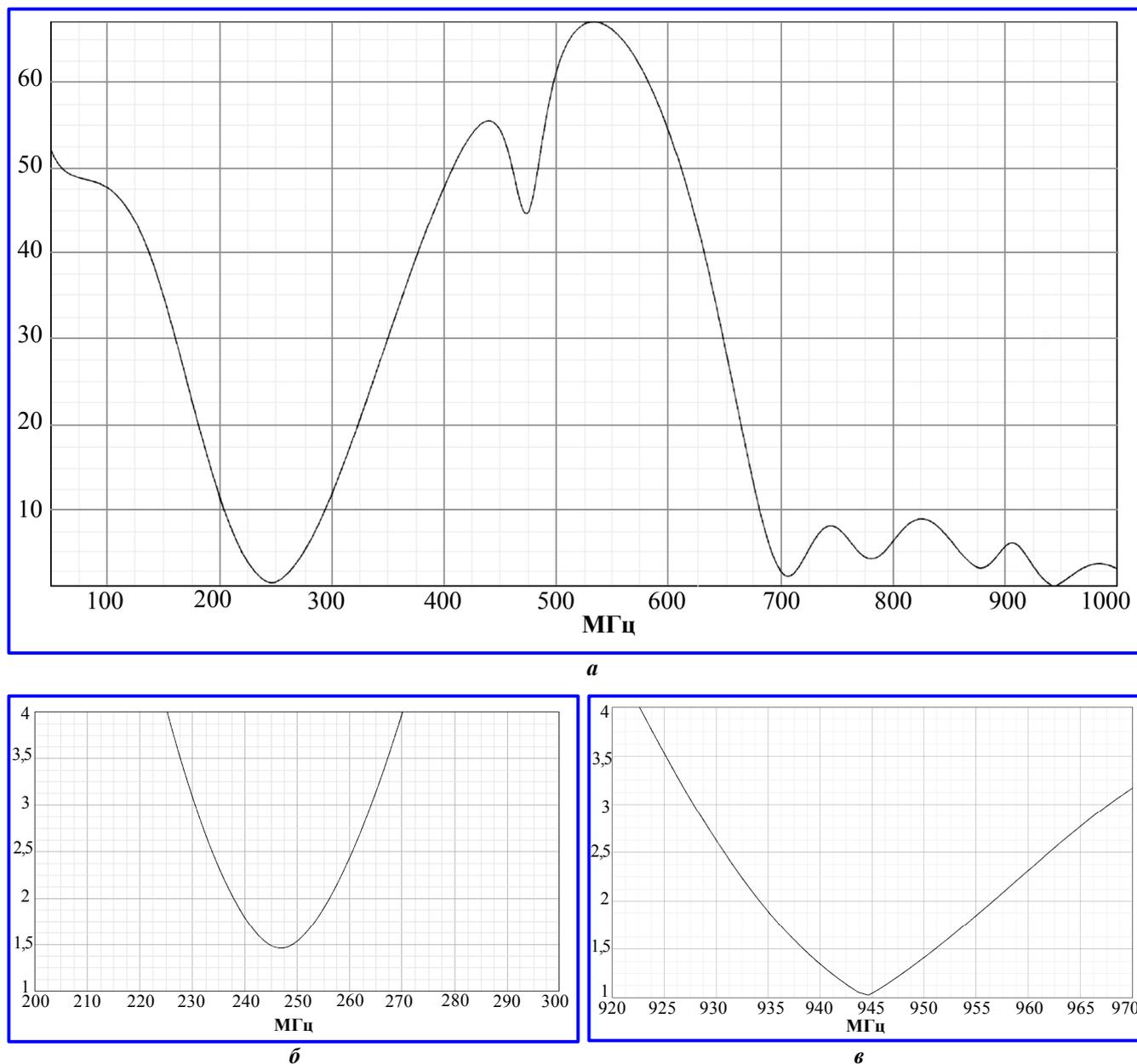


Рис. 5. КСВ модели многодиапазонной МПА: *a* – общий вид; *b* – на одной рабочей частоте; *c* – на второй рабочей частоте

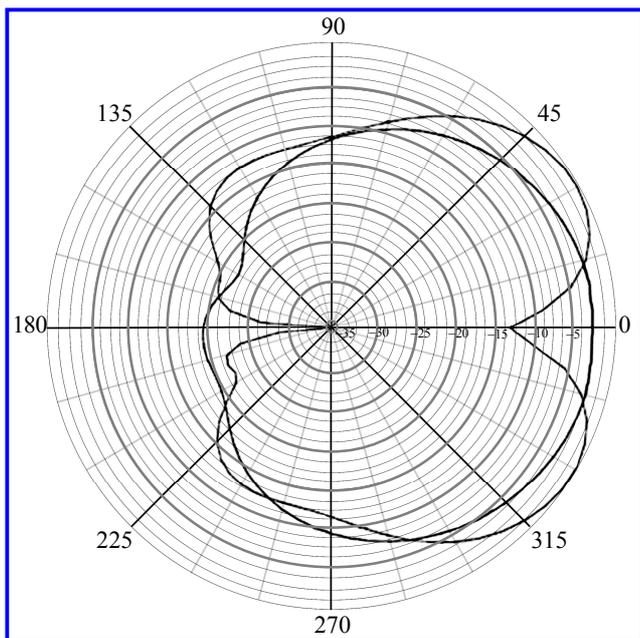


Рис. 6. ДН модели многодиапазонной МПА

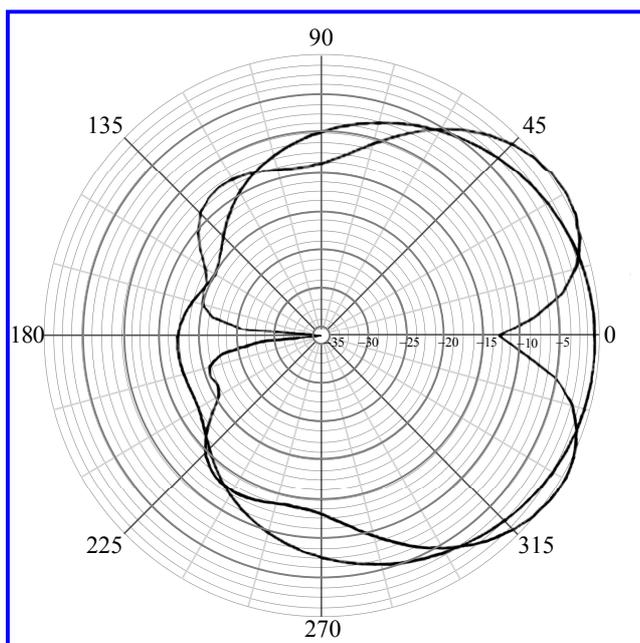


Рис. 7. КУ модели многодиапазонной МПА

Предложен способ построения многодиапазонной МПА, позволяющий разработать миниатюрную, с простой конструкцией, не требующей дополнительных действий при настройке, надёжную бортовую МПА [13].

Преимущества предлагаемого способа заключаются в следующем:

- упрощение конструкции многодиапазонной МПА (в виде параллелепипеда) по сравнению с прототипом (этажерочной конструкции);

- упрощение способа крепления плоской, невыступающей конструкции антенны на рабочую поверхность, например, борт КА, по сравнению с крепежом антенны этажерочного типа;

- упрощение схемы возбуждения антенны, так как не требуется дополнительных действий по согласованию антенны с фидерным трактом в сторону уменьшения потерь в нём, как в случае с антенной этажерочного типа.

Таким образом, разработана и представлена бортовая, планарная, миниатюрная, многодиапазонная МПА.

Литература

1. Гаджиев Э. В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенно-фидерных систем космических аппаратов / Э. В. Гаджиев // Труды МАИ. – 2014. – № 76. – С. 13.
2. Гаджиев Э. В. Возможность применения микрополосковых антенн на космических аппаратах // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». – М. : ООО «Принт-салон», 2012. – С. 87 – 88.
3. Панченко Б. А., Нефёдов Е. И. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефёдов. – М. : Радио и связь, 1986. – 144 с.
4. Нефёдов Е. И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
5. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Сборник тезисов научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев. – Истра : ОАО «НИИЭМ», 2013. – С. 55 – 58.
6. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны метрового диапазона (150 МГц) для применения на космическом аппарате «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 136. – № 5. – С. 15 – 18.
7. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на КА «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Труды МАИ. – М. : МАИ, 2013. – № 65. – С. 34. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://elibrary.ru/item.asp?id=20283165>.
8. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Проблемы построения антенной системы малых космических аппаратов // В сборнике: 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016): материалы конференции: в 13 тт. – 2016. – С. 1058 – 1064.
9. Татарников Д. В., Астахов А. В., Степаненко А. П. Патент на изобретение № 2471272 от 23.06.11. Двухчастотная микрополосковая антенна.

10. Урличич Ю. М., Авдонин В. Ю., Бойко С. Н., Королёв Ю. Н. Патент на изобретение № 2480870 от 31.08.2011. Многодиапазонная антенна круговой поляризации с метаматериалом.
11. Королёв Ю. Н., Бойко С. Н., Исаев А. В. Патент на изобретение № 2315398 от 23.06.2006. Многодиапазонная микрополосковая антенна этажерочного типа.
12. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарёв Л. И. Устройства СВЧ и антенны. – М.: Радиотехника, 2008. – 384 с.
13. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Многодиапазонная микрополосковая антенна. Патент на полезную модель RUS 162204 от 07.09.2015.
14. Гаджиев Э. В. Моделирование бортовых антенн СВЧ космических аппаратов // Антенны. – 2013. – № 9 (196). – С. 65 – 68.
15. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Выбор диэлектрика подложки микрополосковой антенны при построении миниатюрной антенны. // Антенны. – 2014. – № 12 (211). – С. 38 – 44.
16. Bocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiev E.V. design of microstrip antennas for dual-frequency on-board transmitter 'МАЯК 150/400' // В сборнике: CriMiCo 2013 – 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings 2013. – С. 582 – 583.
17. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Разработка модели двухчастотной микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – Т. 141. – № 4. – С. 23 – 26.
18. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Миниатюризация антенной системы космического аппарата «Ионосфера» // Антенны. – 2015. – № 3 (214). – С. 32 – 38.
19. Гаджиев Э. В. Миниатюрные антенны для малых космических аппаратов «CubeSat» / Э. В. Гаджиев // Сборник тезисов IV научно-технической конференции «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» «ИСС» им Решетнёва. – Красноярск: Изд-во «Sital», 2017. – С. 27 – 29. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf>.

Поступила в редакцию 05.12.2017

Александр Георгиевич Генералов, начальник лаборатории.

*Эльчин Вахидович Гаджиев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
т. (495) 994-55-57.*

E-mail: otd24@niiem.ru.

(Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИЭМ»)).

MULTIBAND MICROSTRIP ANTENNA

A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev

The article deals with the methods of constructing multiband microstrip antennas. Disadvantages of the specified methods applied for construction of on-board antennas for small satellites are demonstrated. A simple and reliable planar structure of a microstrip antenna which ensures its operation in two bands (VHF and UHF) is suggested to be used for construction of an on-board antenna system for small satellites. The results of electrodynamic modeling of microstrip antennas with the use of the suggested structure are provided. Such antenna parameters as the standing wave ratio, radiation pattern and gain are evaluated. The suggested microstrip mini antennas have been designed for the Ionosphere small satellite. Application of the suggested antenna as a communication multiband antenna for miniaturized satellite CubeSat is also considered.

Key words: satellite, on-board antenna, microstrip antenna, standing wave ratio, radiation pattern, gain.

List of References

1. Gadzhiev E. V. Methods of constructing small flat on-board antenna-feeder systems of satellites / E.V. Gadzhiev // MAI Proceedings. – 2014. – No. 76. – P. 13.
2. Gadzhiev E. V. Possibility of microstrip antenna application for satellites // Collection of report theses of the Moscow Youth Research and Practice Conference «Innovations in Aviation and Cosmonautics – 2012». – Moscow : «Print Salon» JSC, 2012. – Pp. 87 – 88.
3. Panchenko B. A., Nefedov E. I. Microstrip antennas / B. A. Panchenko, E. I. Nefedov. – Moscow : Radio and communications, 1986. – 144 p.
4. Nefedov E. I. Radio wave propagation and antenna feeder devices: Textbook. – Moscow : Publishing House «Academia», 2010. – 320 p.
5. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Features of satellite on-board antenna feeder devices. Collection of theses of the Scientific and Research Seminar «Prospects for the development of satellite antenna feeder devices» / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev. – Istra: JSC «NIIEM». – 2013. – Pp. 55 – 58.
6. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Design of a rectangular microstrip VHF 150 MHz antenna for the Ionosphere satellite / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Electromechanical matters. VNIEM studies. – Moscow : JSC «VNIEM Corporation», 2013. – Vol. 136. – No. 5. – Pp. 15 – 18.

7. Design of a rectangular microstrip UHF antenna for the Ionosphere satellite / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // MAI Proceedings. – Moscow : MAI, 2013. – No. 65. – Pp. 34. – [Electronic resource]. – Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20283165>.
8. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Issues of construction of an antenna system for small satellites. In Collected Volume: 26th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo 2016): Conference Proceedings: in 13 volumes. – 2016. – Pp. 1058 – 1064.
9. Tatamikov D. V., Astakhov A. V., Stepanenko A. P. Patent of invention No. 2471272 of 23.06.11. Dual-frequency microstrip antenna.
10. Urlichich Iu. M., Avdonin V. Iu., Boiko S. N., Korolev Iu. N. Patent of invention No. 2480870 of 31.08.2011. Multi-band circularly polarized antenna with metamaterial.
11. Korolev Iu. N., Boiko S. N., Isaev A. V. Patent of invention No. 2315398 of 23.06.2006. Multiband stacked microstrip antenna.
12. Voskresenskii D. I., Gostiukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. UHF devices and antennas. Moscow : Publishing house «Radiotekhnika», 2008. – 384 p.
13. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Multiband microstrip antenna. Useful model patent No. RUS 162204 of 07.09.2015.
14. Gadzhiev E. V. Modeling of on-board microstrip UHF antennas for spacecraft // Antennas. – 2013. – No. 9 (196). – Pp. 65 – 68.
15. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Selection of a dielectric to be used as a microstrip antenna substrate during the mini antenna construction // Antennas. – 2014. – No. 12 (211). – Pp. 38 – 44.
16. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Design of microstrip antennas for dual-frequency on-board transmitter «MAYAK 150/400» // In Collected Volume: CriMiCo 2013 – 2013 23rd International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology». Conference Proceedings 2013. – C. 582 – 583.
17. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Development of a dual-frequency microstrip antenna model for prospective application on the Ionosphere satellite / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Electromechanical matters. VNIEM studies. – Moscow : JSC «VNIEM Corporation», 2014. – Vol. 141. – No. 4. – Pp. 23 – 26.
18. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Miniaturizing of the Ionosphere satellite antenna system // Antennas. – 2015. – No. 3 (214). – Pp. 32 – 38.
19. Gadzhiev E. V. Mini antennas for small satellites «CubeSat». / E. V. Gadzhiev // Collection of theses of IVth Science and Research Youth Conference «Development, production, testing and operation of spacecraft and spacecraft systems» at ISS Reshetnev. – Krasnoyarsk: Publishing House «Sital». – 2017. – Pp. 27 – 29. [Electronic resource]. – Available at : <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf>.

*Aleksandr Georgievich Generalov, Head of Laboratory.
Elchin Vakhidovich Gadzhiev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Researcher,
tel.: (495) 994-55-57, e-mail: otd24@niiem.ru.
(JSC «Scientific Research Institute of Electromechanics» (JSC «NIIEM»)).*