

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ МАЛОГАБАРИТНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН ДЛЯ САМОЛЕТОВ И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Пилькевич Антон Владимирович (niiis@niiis.nnov.ru), Илларионов Иван Александрович, Кузнецов Алексей Викторович*

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

В настоящее время на предприятии ведутся работы по созданию антенн для систем телеметрии. Основными проблемами разработки антенн летательных аппаратов (ЛА) являются: 1) жесткие требования к массогабаритным характеристикам, 2) условия размещения антенн на металлическом экране-корпусе ЛА. Решение задачи синтеза антенн ЛА осложняется требованиями к широкой рабочей полосе частот (более 30 %), формированию всенаправленных или направленных характеристик излучения. Цель работы состояла в разработке комплекса малогабаритных приемных антенн L-диапазона, состоящего из четырех типов антенн с размещением на самолете или беспилотном ЛА систем телеметрии. В разработанный комплекс входят всенаправленные антенны линейной поляризации, построенные на базе широкополосных печатных дипольных антенн, направленные антенны круговой поляризации, построенные на базе монофильной спиральной антенны и плоской двухзаходной спиральной антенны. В докладе приводятся особенности конструкций каждого типа антенн, обеспечивающие требуемые характеристики излучения и конструктивную прочность, приводятся результаты теоретического и экспериментального исследований.

**Ключевые слова:** малогабаритная антенна, печатная дипольная антенна, широкополосная монополярная антенна, цилиндрическая спиральная антенна, плоская спиральная антенна.

## STUDY ON THE DESIGNING OF WIDEBAND SMALL-SIZED ANTENNAS FOR AIRCRAFT AND UNMANNED AERIAL VEHICLES

*Pilkevich Anton Vladimirovich (niiis@niiis.nnov.ru), Illarionov Ivan Alexandrovich, Kuznetsov Alexey Viktorovich*

Branch of RFNC-VNIIEF «NIIS named after Yu. Ye. Sedakov», Nizhny Novgorod

Now, the company is working on the creation of antennas for telemetry systems. The main problems of design of antennas of the aircraft are: 1) strict requirements to mass-dimensional characteristics, 2) conditions of placement of antennas on the aircraft metal screen case. The solution of the problem of synthesis of aircraft antennas is complicated by requirements to a wide working strip of frequencies (more than 30 %), formation of the omnidirectional or directed characteristics of radiation. The aim of the work was to design a set of small-sized L-band receiving antennas, consisting of four types of antennas, placed on an aircraft or an unmanned aerial vehicle of the telemetry system. The developed antenna complex includes omnidirectional antennas of linear polarization, based on the broadband printed dipole antennas, directional antennas of circular polarization, based on a monofilar helical antenna and a low-profile two-arm spiral antenna. The paper describes the design features of each type of antennas including methods of the miniaturization that provide the required radiation characteristics and constructive stability. The paper presents the results of theoretical and experimental studies.

**Keywords:** small-sized antenna, printed dipole antenna, printed wideband monopole antenna, helical antenna, low-profile spiral antenna, unmanned aerial vehicles.

## Введение

Одно из важных направлений развития любой радиотехнической системы, и в частности исследуемых в рамках экспериментальных работ предприятия антенн/антенных модулей, составными частями которых они являются, – это миниатюризация. При этом дополнительно необходимо сохранить/улучшить эксплуатационные характеристики. Ограничения также накладывают особенности условий применения изделий, а именно их установка на летающие объекты (самолеты и беспилотные летательные аппараты (ЛА)), что в свою очередь предъявляет повышенные требования стойкости к механическим, климатическим, аэродинамическим факторам.

Цель работы – разработка комплекса малогабаритных антенн L-диапазона, размещаемых на самолете и беспилотном ЛА, имеющих широкую рабочую полосу частот, а также обеспечивающих формирование всенаправленных или направленных характеристик излучения.

Антенны должны отвечать следующим исходным данным: диапазон рабочих частот 850 – 1250 МГц; коэффициент усиления (для самолетов) не менее 10 дБ, (для беспилотных ЛА) не менее 0 дБ; КСВн не более 2; ширина диаграммы направленности (для самолетов) по азимуту и углу места от 20° до 40°, (для беспилотных ЛА) по азимуту и углу места не менее 40°×40°. Чтобы обеспечить прием сигналов во всем рабочем диапазоне частот допускается применение нескольких исполнений антенн, каждая из которых будет обеспечивать перекрытие в своем поддиапазоне рабочего диапазона частот.

В открытых источниках технической литературы приводятся следующие возможные типы антенн: штырьевые, печатные, спиральные, кольцевые [1, 2]. Исходя из особенностей конструкции каждого типа антенн, обеспечивающих требуемые характеристики излучения (прежде всего обеспечение необходимого усиления, поскольку это прямым образом отражается на дальности приема/передачи данных) и конструктивную прочность, в разрабатываемый комплекс были выбраны всенаправленные антенны линейной поляризации, реализуемые на базе широкополосных печатных дипольных антенн (излучателями являются – монополь и решетка продольных диполей), направленные антенны круговой поляризации, реализуемые на базе монофилярной спиральной антенны и плоской двухзаходной спиральной антенны.

Особенностями всех исследуемых антенн является необходимость обеспечения стыковки с посадочными местами антенн, разработанных ранее, для соответствующих им ЛА.

### Печатные дипольные антенны

Планарные антенны на основе печатных диполей разработаны и реализованы в самых разнообразных вариациях [2]. Ключевым фактором, выступаю-

щим за популяризацию данных антенн, – простота, позволяющая организовать массовый подход к их изготовлению, и малые размеры.

Некоторые варианты представления исполнений, к примеру, монопольных излучателей согласно публикуемым источникам можно увидеть на рис. 1 [3, 4]. Каждая топология рассчитана под свой диапазон частот и определенный материал. Поляризация определяется параметрами излучающего элемента.

Рассматриваемые антенны должны размещаться на беспилотном ЛА.

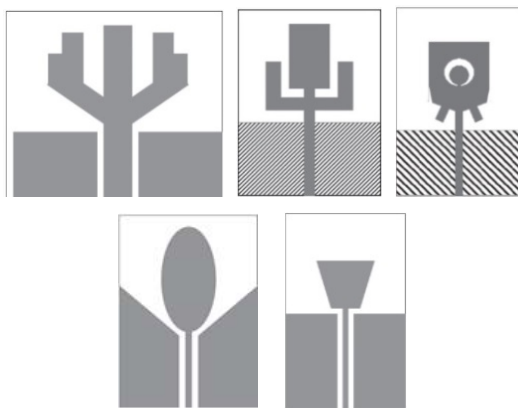


Рис. 1. Варианты топологий антенн с монополями

### Широкополосная печатная дипольная антенна (излучатель – монополь)

Эскиз базовой конструкции антенны представлен на рис. 2, а расчетные частотные зависимости на рис. 3.

Антенна имеет вертикальную поляризацию. Основным элементом антенны является излучатель, в качестве которого выступает широкополосный монополь эллиптической формы. Монополь выполнен на одностороннем фольгированном стеклотекстолите с толщиной диэлектрика 3 мм и толщиной металлизации 35 мкм. Излучающий элемент устанавливается на алюминиевое коническое основание. Внешнее возбуждение антенны обеспечивается через розетку СР-50-163ФВ в сочетании с кабелем РК-50-7-11. Волновой импеданс – 50 Ом.

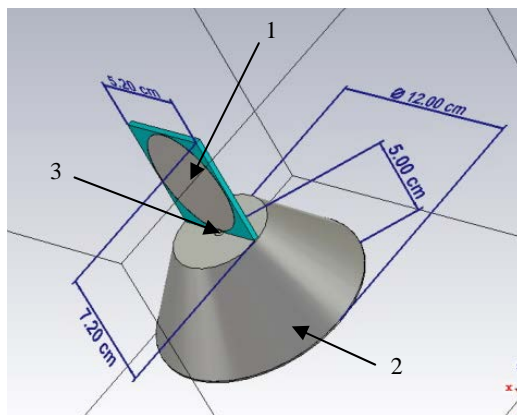


Рис. 2. Эскиз широкополосной печатной дипольной антенны (излучатель – монополь): 1 – широкополосный монополь на стеклотекстолите; 2 – коническое основание антенны; 3 – коаксиальное возбуждение

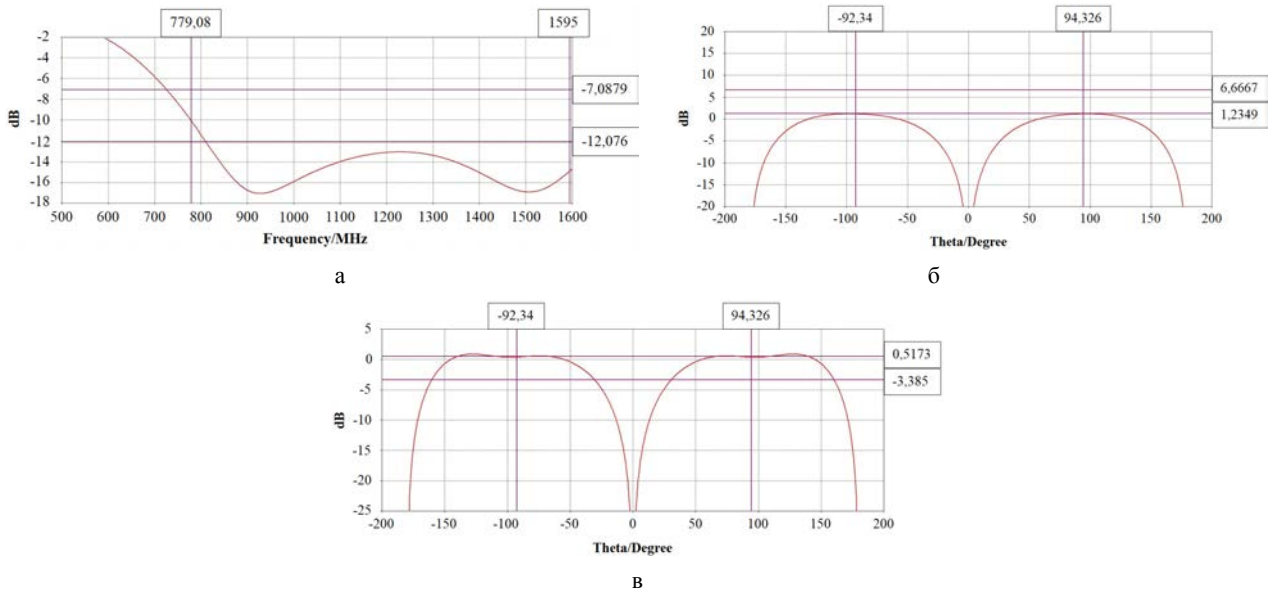


Рис. 3. Расчетные зависимости: а – частотная зависимость КО; б – сечение ДН на частоте 850 МГц ( $\varphi = 0$ ); в – сечение ДН на частоте 1250 МГц ( $\varphi = 0$ )

С учетом полученных расчетных частотных зависимостей видно, что рабочая полоса частот по уровню коэффициента отражения – 10 дБ составляет 780–1650 МГц (870 МГц). Антенна имеет осесимметричную диаграмму направленности.

Детализированная конструкция имеет вид, приведенный на рис. 4. Для монтажа к беспилотному ЛА был выполнен фланец с отверстиями по периметру под винты, соответствующими ответной части. Для защиты антенны от внешних воздействующих механических, климатических и аэродинамических факторов все составные части закрываются радиопрозрачным колпаком. Полученные габаритные размеры антенны составляют 200×200×150 мм, масса не превосходит 1,1 кг.

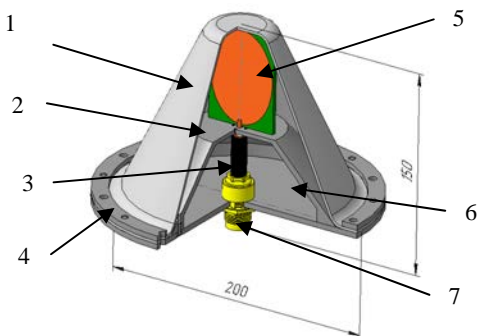


Рис. 4. Детализированная модель широкополосной печатной дипольной антенны (излучатель – монополь): 1 – колпак; 2 – коническое основание; 3 – кабель РК-50-7-11; 4 – кольцо; 5 – монополь; 6 – основание; 7 – розетка СР-50-163ФВ

*Широкополосная печатная дипольная антенна (излучатель – решетка продольных диполей)*

В отличие от предыдущей антенны поляризация волн текущей – горизонтальная. Предварительная конструкция антенны показана на рис. 5. Возбуждение антенны осуществляется по коаксиалу с волно-

вым сопротивлением 50 Ом. Излучающий элемент является решеткой продольных диполей, возбуждаемых параллельно по схеме Олфорда. В качестве материала для него заложен двусторонний фольгированный стеклотекстолит с толщиной диэлектрика 2 мм и толщиной металлизации 35 мкм.

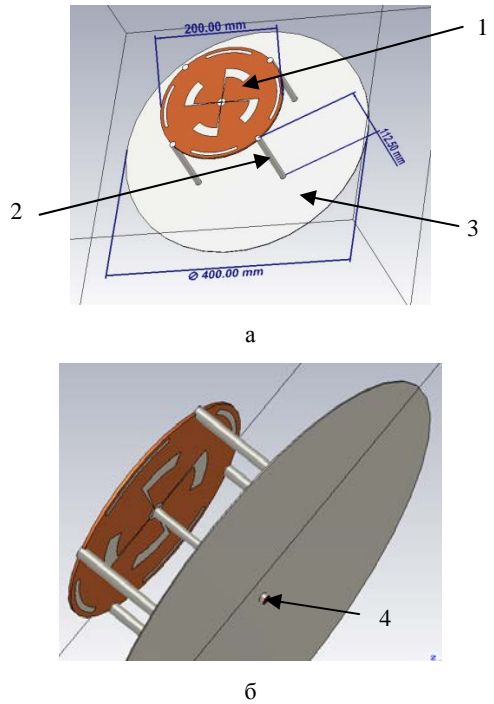


Рис. 5. Эскиз широкополосной печатной дипольной антенны (излучатель – решетка продольных диполей): а – вид сверху: 1 – диэлектрическая подложка с вытравленными продольными диполями; 2 – металлические стойки; 3 – металлический фланец; б – вид снизу: 4 – коаксиальное возбуждение

По уровню коэффициента отражения – 10 дБ рабочая полоса составляет 827–1350 МГц (523 МГц). Диаграмма направленности антенны имеет осесимметричный вид. Расчетные частотные зависимости можно увидеть на рис. 6.

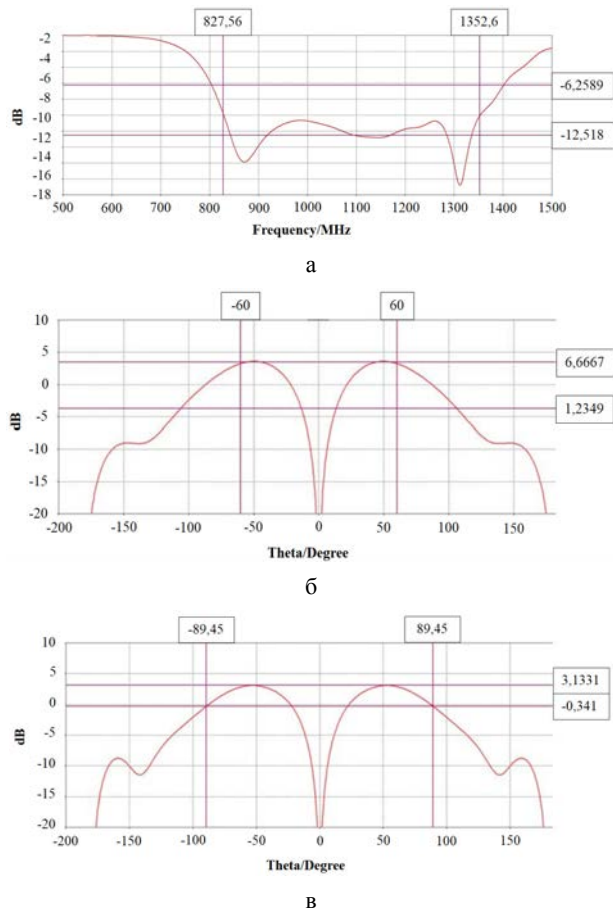


Рис. 6. Расчетные зависимости: а – частотная зависимость КО; б – сечение ДН на частоте 850 МГц ( $\varphi = 0$ ); в – сечение ДН на частоте 1250 МГц ( $\varphi = 0$ )

Итоговый конструктив приведен на рис. 7. Внешнее возбуждение осуществляется через розетку CP-50-163ФВ. Далее по отрезку коаксиального кабеля, подключенному к разъему с одной стороны и смонтированному непосредственно на плату с другой, сигнал доходит до излучателя. Дополнительными элементами конструкции являются стальные втулки, обеспечивающие крепление антенны, расположение которых совпадает с посадочными местами ответной части, радиопрозрачный колпак, который, как и в случае широкополосной печатной дипольной антенны с излучателем монополюсом, обеспечивает ее защиту от внешних воздействующих механических, климатических и аэродинамических факторов. Антенна имеет габаритные размеры, не превышающие 190×190×146 мм, и массу 1,2 кг.

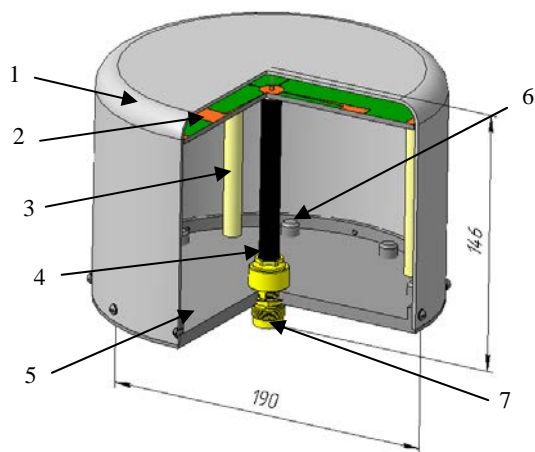


Рис. 7. Детализированная модель широкополосной печатной дипольной антенны (излучатель – решетка продольных диполей): 1 – колпак; 2 – излучатель; 3 – стойки; 4 – кабель РК-50-7-11; 5 – основание; 6 – розетка CP-50-163ФВ; 7 – втулка

### Спиральные антенны

Динамично развивающиеся отрасли радиоэлектроники привели к необходимости в антеннах, которые могли бы обеспечить излучение и прием в широком диапазоне частот эллиптически поляризованного поля. Из довольно обширного спектра типов широкополосных антенн спиральные антенны занимают важное место. Они обладают близкой к круговой (эллиптической) поляризацией, являясь слабо- и средненаправленными. Применяются такие антенны, как в качестве самостоятельных антенн, так и в качестве облучателей зеркальных, линзовых антенн, возбуждателей волноводно-рупорных антенн, элементов антенных решеток [1, 5].

Конструкций спиральных антенн значительное множество. Их отличительными особенностями являются диапазонные свойства, поляризация поля и т. д. Классическая спиральная антенна – цилиндрическая регулярная однозаходная спиральная антенна с коэффициентом перекрытия по частоте в режиме осевого излучения равным 1,8, излучающая поле с круговой поляризацией в направлении оси. Направление скручивания спирали определяет направление поляризации: правая или левая.

Излучатель спиральной антенны не обязательно должен быть цилиндрическим, он может быть реализован в виде конической или даже плоской спирали, что с одной стороны позволяет уменьшить продольный размер антенны, но с другой стороны при этом уменьшается коэффициент перекрытия по частоте. Повысить этот коэффициент можно путем увеличения числа заходов спирали. Если направление их намотки задать в противоположные стороны, то можно обеспечить управление поляризацией излучения за счет изменения амплитуд и фаз токов, возбуждающих отдельные заходы.



Плоская спиральная антенна имеет меньший коэффициент перекрытия по частоте по сравнению с цилиндрической, поскольку ее излучение направлено не только в «полезном» направлении передачи (приема), но и в сторону экрана. Поэтому чтобы сложения полей происходило синфазно расстояние между экраном и спиралью должно быть ориентировочно равно четверти длины волны.

Примеры спиральных антенн показаны на рис. 8.

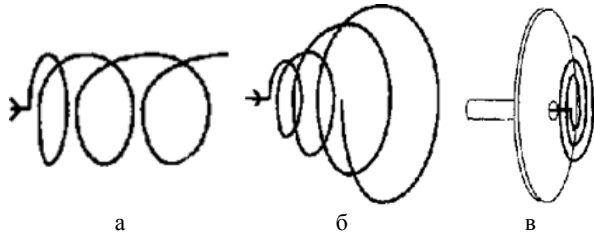


Рис. 8. Антенны: а – цилиндрическая спиральная, б – коническая спиральная, в – плоская спиральная

Далее будут рассмотрены цилиндрическая и плоская спиральные антенны как представители двух крайностей одного семейства антенн. Обе антенны устанавливаются на самолетах.

#### Монофилярная спиральная антенна

Предлагаемая конструкция антенны приведена на рис. 9. Антенна является маловитковой, в итоговой версии количество витков равно 2,4. Питание осуществляется по коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Возможно применение двух аналогичных взаимозаменяемых материалов, применяемых в качестве диэлектрической основы: ТСЭФ (трубка электротехническая стеклоэпоксифенольная) или ЦСЭФ (цилиндр электротехнический стеклоэпоксифенольный). Материал имеет стабильные характеристики, его относительная диэлектрическая проницаемость находится в диапазоне 4 – 5. В качестве устройства для согласования сопротивлений, как и в случае классической версии, была выбрана согласующая линия Джейсона Хеккера с плавным

переходом, поскольку особенность крепления к ответной части с использованием стойки не позволяет применить другие возможные варианты согласующих изделий, к примеру, одним из которых является конусообразный коаксиальный трансформатор.

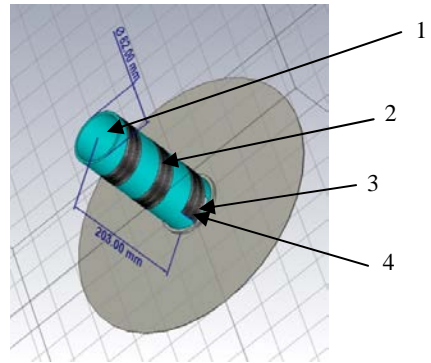


Рис. 9. Эскиз монофилярной спиральной антенны: 1 – ТСЭФ; 2 – металлическая лента; 3 – согласующий трансформатор отрезок спиральной линии; 4 – коаксиальное возбуждение

В результате моделирования получены следующие показатели: коэффициент усиления антенны имеет значения не менее 8,5 дБ, а ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ в двух ортогональных плоскостях – не менее 60×63 ... 43×44 градусов. Картины распределения электромагнитного поля продемонстрированы на рис. 10.

Проработанную модель антенны можно увидеть на рис. 11. В диэлектрическом основании выполнен паз-канавка, в котором размещается проводник, обеспечивающий функцию излучателя. Согласующая линия была пересчитана с изменением общей формы, что позволило сократить ее размеры и минимизировать искажения за счет рассогласования сопротивлений в картине распределения электромагнитного поля. Антенна имеет габаритные размеры 150×150×343 мм при массе 1,3 кг.

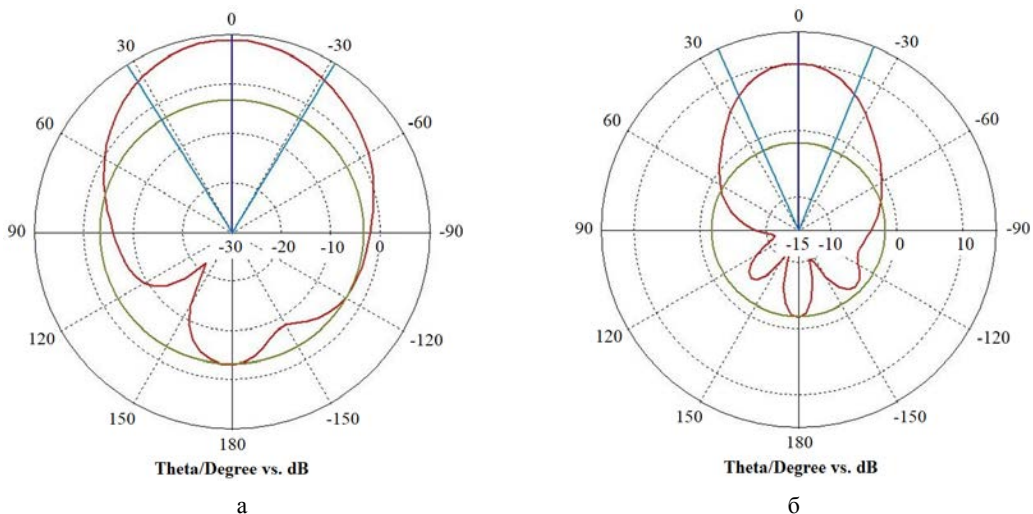


Рис. 10. Угловые зависимости КУ ( $\varphi = 0$ ): а – на частоте 850 МГц; б – на частоте 1250 МГц

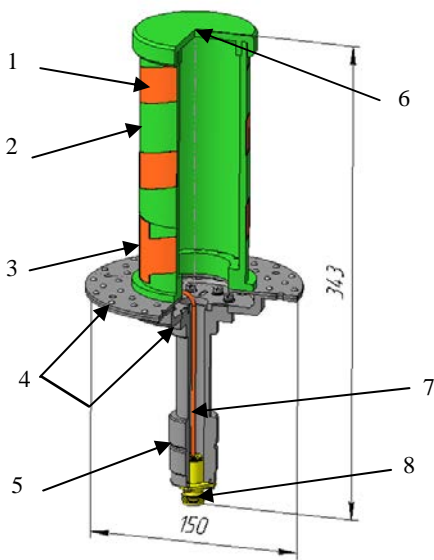


Рис. 11. Детализированная модель монофилярной спиральной антенны: 1 – медная лента; 2 – ТСЭФ; 3 – согласующая линия Джейсона Хеккера с плавным переходом; 4 – основания; 5 – стойка; 6 – крышка; 7 – кабель РК-50-2-25; 8 – розетка СР-50-759ФВ

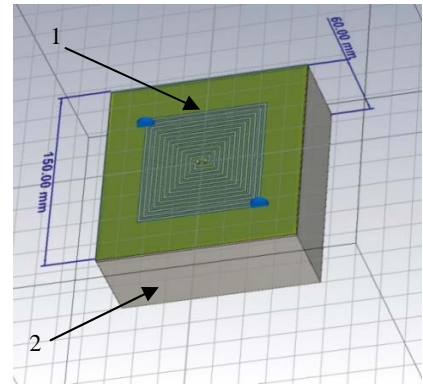
#### Плоская двухзаходная спиральная антенна

Эскиз конструкции антенны показан на рис. 12, близок к классическому случаю [6]. Для увеличения коэффициента перекрытия по частоте число заходов спирали было выбрано равным двум. Излучатель расположен в резонаторе глубиной 60 мм. Спираль антенны сформирована на одностороннем фольгированном стеклотекстолите с толщиной диэлектрика 2 мм и толщиной металлизации 35 мкм. В каждое из двух плеч излучателя встраиваются по одному СВЧ резистору (P1-85-0,25). Сопротивление резисторов определяют методом подбора из диапазона возможных номинальных значений от 100 до 200 Ом, что позволяет уменьшить возникающие переотражения, образующиеся из-за остаточной энергии, доходящей к концам спирали. Антенна питается от разъема с волновым сопротивление 50 Ом, далее сигнал проходит через симметрирующий трансформатор с волновым сопротивлением 65 Ом, который представляет собой усеченную коаксиальную линию и располагается внутри резонатора.

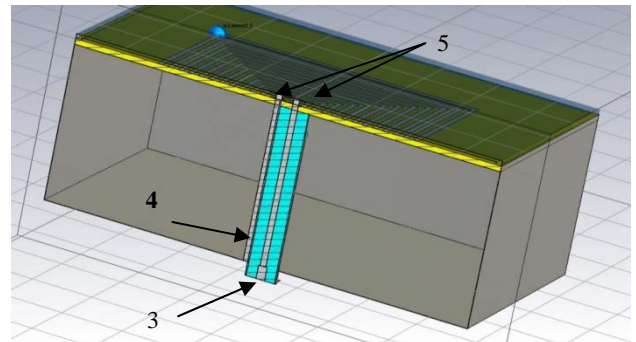
Картины распределения электромагнитного поля показывают, что коэффициент усиления антенны в требуемом диапазоне частот составляет 5–7 дБ, а ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ в двух ортогональных плоскостях – не менее 68×68... 90×90 градусов. Графики представлены на рис. 13.

Итоговая конструкция изображена на рис. 14. Она имеет цилиндрическую форму с габаритными размерами 150×150×78 мм и массой 0,7 кг. Для снижения влияния на картину распределения электро-

магнитных полей металлические элементы в конструкции были минимизированы. Резонатор, крышка и винты выполнены из полиамида.

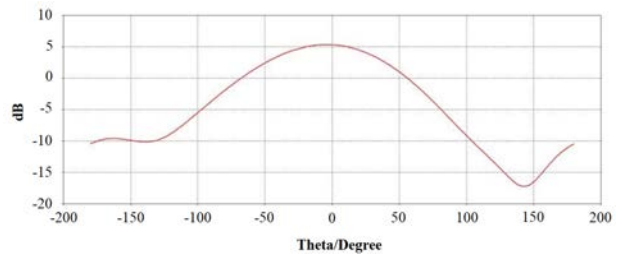


а

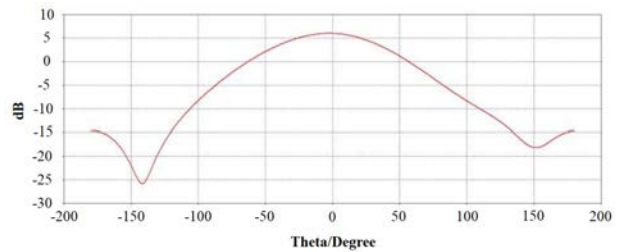


б

Рис. 12. Эскиз плоской двухзаходной спиральной антенны: а – габаритные размеры: 1 – излучатель, 2 – резонатор; б – трансформатор: 3 – разъем 50 Ом, 4 – симметрирующий трансформатор 65 Ом, 5 – штыри к плечам спирали



а



б

Рис. 13. Угловые зависимости КУ ( $\varphi = 0$ ): а – на частоте 850 МГц; б – на частоте 1250 МГц

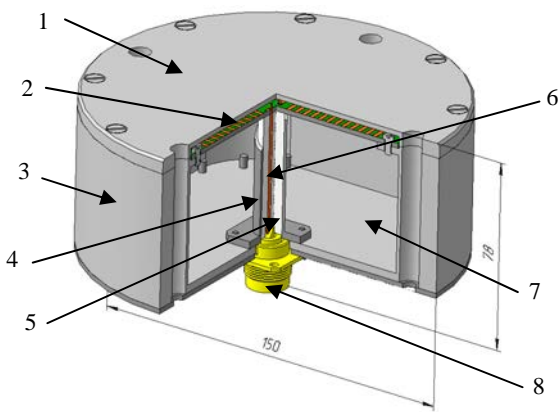


Рис. 14. Детализированная модель плоской двухзаходной спиральной антенны: 1 – крышка; 2 – излучатель; 3 – резонатор; 4 – контакт; 5 – изолятор; 6 – контакт; 7 – основание; 8 – розетка CP-50-165ФВ

### Испытания и итоги

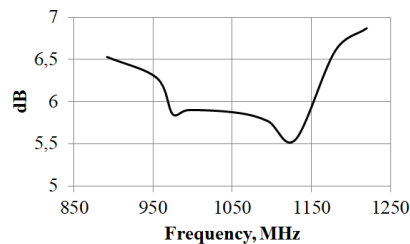
Для каждой из антенн проводились испытания по замеру частотных характеристик в антенном зале и реальных условиях. Отличие результатов относительно расчетных не превосходит 10 %. Возможно построение фазированной антенной системы из нескольких модификаций антенн, сегментировано перекрывающих частотный диапазон, что позволит увеличить коэффициент усиления в среднем на 3–5 дБ.

Все антенны показали удовлетворяющие исходным требованиям результаты, таким образом, можно сделать общий вывод о достижении главной цели – создании малогабаритных широкополосных антенн для самолетов и беспилотных ЛА. Наиболее перспективной антенной показала себя плоская двухзаходная спиральная антенна с точки зрения как антенна с самыми минимальными массогабаритными характеристиками и одновременно обеспечивающая заданные показатели по частотным зависимостям. Результаты ее испытаний будут рассмотрены более подробно.

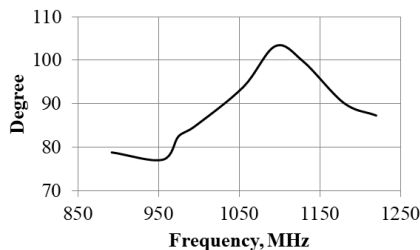
Измерения коэффициентов усиления и ширины диаграммы направленности в антенном зале плоской двухзаходной спиральной антенны приведены к графическому виду (см. рис. 15). Расхождение результатов относительно расчетных данных не более 5 %.

Выявление резонансных частот проводилось при воздействии синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц с амплитудой ускорения 2g при плавном изменении частоты вибрации со скоростью 1 окт/мин. Результаты с графиком перегрузок, снятые с помощью пьезодатчика, можно увидеть на рис. 16. Результаты показали наличие следующих резонансных частот в диапазоне, определяемом условиями эксплуатации: 700 и 1750 Гц. Несмотря на наличие резонансов, конструкция выдержала предъявляемые к ней механические воздействия.

Полученный опыт должен позволить улучшить эксплуатационные характеристики приемно-регистрирующего комплекса за счет возможности работы на всем диапазоне рабочих частот.



а



б

Рис. 15. Измеренные характеристики плоской двухзаходной спиральной антенны в антенном зале: а – коэффициенты усиления; б – ширина диаграммы направленности

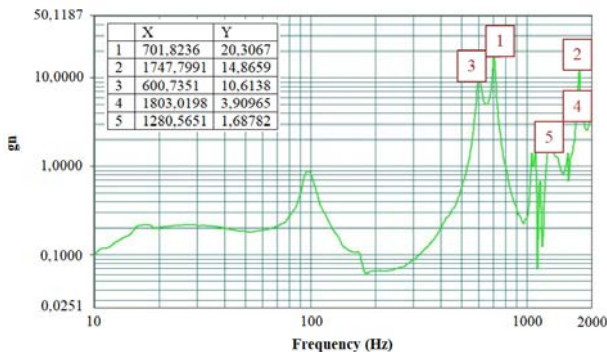


Рис. 16. График перегрузки плоской двухзаходной спиральной антенны

### Список литературы

1. Климов. К. Н., Годин А. С., Гежа Д. С. Электрически малые антенны (часть 1). // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 47–62.
2. Климов. К. Н., Годин А. С., Гежа Д. С. Электрически малые антенны (часть 2). // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 17–34.
3. Мальцев П. П., Матвеев О. В., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем монополюсом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34–43.
4. Goubau G. Multi-Element Monopole Antennas // Proc. Workshop on Elec. Small Ant. USARO, 1976. Durham, N. Carolina. P. 63–67. AD-A031-845.
5. Wheeler H. A. A Helical Antenna for Circular Polarization // Ibid. P. 1484–1488.
6. Best S. R. The Radiation Properties of Electrically Small Folded Spherical Helix Antennas // Trans. IEEE. 2004. Vol. AP-52. P. 953–960.