

УДК 621.391, 621.396

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА ВНЕШНИХ ДКМВ МАГНИТНЫХ АНТЕНН БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

А. В. Ананьев, А. Н. Катруша

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а**

Статья поступила в редакцию 27 октября 2017 г.

Аннотация. Одной из основных проблем управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) является ограниченная дальность радиосвязи в диапазоне УКВ. При этом потенциальная дальность полета с учетом конструктивных и технических возможностей БЛА может в несколько раз превышать максимальную дальность радиосвязи с БЛА. Возможным вариантом разрешения указанного противоречия является организация канала радиосвязи с БЛА в диапазоне КВ. Однако размещение приемно-передающих коротковолновых антенн на корпусе малогабаритного БЛА является сложной задачей. Электрические полноразмерные антенны в разы превосходят габариты БЛА, а их укорочение с целью установки в пределах корпуса приводит к существенному снижению коэффициента усиления антенны. В то же время магнитные антенны (например, резонансная рамочная антенна) имеют существенно меньшие габариты при сопоставимых характеристиках. В статье представлена разработка опытных образцов оригинальной магнитной резонансной рамочной антенны ДКМВ диапазона частот БЛА малой дальности (МД) в исполнениях по двум вариантам: для наземного дистанционного пункта управления и для бортового размещения. Разработка осуществлялась в несколько этапов: создание 3D-модели бортовой антенны с учетом конструкции типового БЛА МД, моделирование и расчет характеристик макета бортового варианта антенны на основе метода моментов, изготовление, настройка и измерение параметров опытных образцов наземного и бортового

вариантов исполнения. Изготовленные антенны имеют небольшие габариты и приемлемые для практической эксплуатации характеристики.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, магнитная антенна, 3D-модель, метод моментов, натурные испытания.

Abstract: One of the main problems of control of unmanned aerial vehicles (UAV) is restricted communication range in VHF range. Thus potential range of flight taking into account constructive and technical possibilities UAV can exceed several times the maximum range of a communication range with UAV. Possible variant of disambiguation is the organization of the channel of a radio service with UAV in range HF. However layout of transmitting short wave antennas on the body small-size UAV is challenging task. Electrical full-size antennas essentially exceed overall dimensions UAV, and their truncation for the purpose of setting within the case leads to essential lowering of antenna power gain. At the same time magnet antennas (for example, the resonance frame antenna) have essentially smaller overall dimensions at comparable characteristics. In research paper design of pre-production models original magnetic resonance frame HF antennas HF UAV of small range (SR) in executions by two variants is presented: for a ground distant operations control center and for onboard layout. Development was carried out in some stages: creation of 3D-model of the airborne antenna taking into account a construction typical UAV SR, modeling and calculation of characteristics of a breadboard model of an onboard variant of the antenna on the basis of a method of the moments, manufacture, adjustment and measurement of parameters of pre-production models of ground and onboard variants of execution. The fabricated antennas have small overall dimensions and characteristics comprehensible to practical maintenance.

Key words: the unmanned aerial vehicle, the magnet antenna, 3D-model, method of the moments, full-scale tests.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) все больше проникают во все сферы жизнедеятельности человека, наращивая потенциал средств и систем

дистанционного наблюдения, управления, сигнализационных систем и т.д. Одним из условий эффективного применения БЛА является устойчивость каналов радиосвязи между наземными дистанционными пунктами управления (НПДУ) и БЛА выполняющими полет, а также между отдельными БЛА в воздухе, эффективность применения которых существенно увеличивается за счет объединения отдельных БЛА в группы, например, БЛА малой дальности (МД) для решения задач связи в экстремальных условиях [1].

Как правило, информационный обмен в комплексах БЛА организуется с использованием двух взаимозаменяемых (взаимодополняющих) сетей связи: управления полетом, образуемых командно-телеметрическим радиопередачей (КТР) и управления работой и доступом к данным полезных нагрузок, образуемых каналами высокоскоростной связи (ВСКС).

В ряде работ для повышения дальности радиосвязи с БЛА предлагается применение ДКМВ каналов [2, 3] с использованием ионосферной волны. В то же время существуют области применения БЛА, например, в условиях высоких широт [4, 5], где работа ионосферной волной существенно затруднена. Альтернативой применения отраженной волны от ионосферы является использование волны, распространяющейся вдоль земной поверхности [6]. Применение КВ-радиосвязи может обеспечить увеличение уровня сигнала на входе приемника КВ диапазона по отношению к приемнику УКВ диапазона в $\lambda_{\text{КВ}}/\lambda_{\text{УКВ}}$, раз при одинаковой напряженности поля, создаваемой в точке приема и условии равенства сопротивлений антенн и их коэффициентов усиления. Это объясняется увеличением действующей длины антенны пропорционально увеличению длины волны [7]. Преимущества и недостатки ДКМВ канала при распространении радиоволн вдоль земной поверхности по отношению к более высокочастотным каналам в достаточной мере предсказуемы: выигрыш по радиодоступности (дальности) за счет дифракции и рефракции [6]. Основным недостатком КВ-диапазона: низкая техническая скорость передачи данных, но тем не менее, достаточная для управления полетом БЛА и передачи коротких сообщений. Основная проблема создания ДКМВ канала БЛА МД,

выполняемых из композитных материалов – это обеспечение возможности излучения электромагнитных волн КВ-диапазона частот с борта БЛА, композитный корпус которого не может быть традиционно использован в качестве излучателя [8], а габариты и развиваемая мощность не позволяют использовать проволочные полноразмерные антенны. Для решения этих проблем в работе [9] была предложена конформная плоскостная контурная магнитная антенна, с предполагаемым размещением непосредственно в корпусе БЛА, что подразумевает изменение технологических процессов изготовления БЛА и формирование новых линий сборки. В тоже время, для сохранения возможности эффективного излучения в КВ-диапазоне частот и получения универсального, невстраиваемого, варианта магнитной антенны БЛА МД представляет интерес разработка объемного (не встраиваемого) варианта внешней антенны, что и является *целью работы*.

1. Разработка 3D-модели внешней бортовой магнитной антенны БЛА МД и ее моделирование с использованием метода моментов

Результирующая диаграмма направленности (ДН) антенны БЛА в воздухе должна быть близка к сферической, из условий необходимости обеспечения связи между БЛА, разнесенными относительно друг друга в трехмерном пространстве [1]. Предположение о возможности изготовления внешней антенны и сохранения ею ДН близкой к сферической было выдвинуто на основе существенного превышения длины излучаемой волны (десятки метров) по отношению к ее линейным размерам [9].

На начальном этапе изготовления антенны была создана 3D-модель, учитывающая конструктивные особенности БЛА МД, представленная на рис. 1.

3D-модель учитывает размещение продольной части излучающей петли и петли связи на верхней части фюзеляжа БЛА МД. Расширенная часть излучающей петли выполняется по формату центроплана, при этом снижение относительно плоскости центроплана должно быть таким, чтобы влияние на подъемную силу крыла было несущественным. Возможен и «инверсный» с

точки зрения размещения вариант: когда продольная часть антенны размещается в плоскости нижней части фюзеляжа.

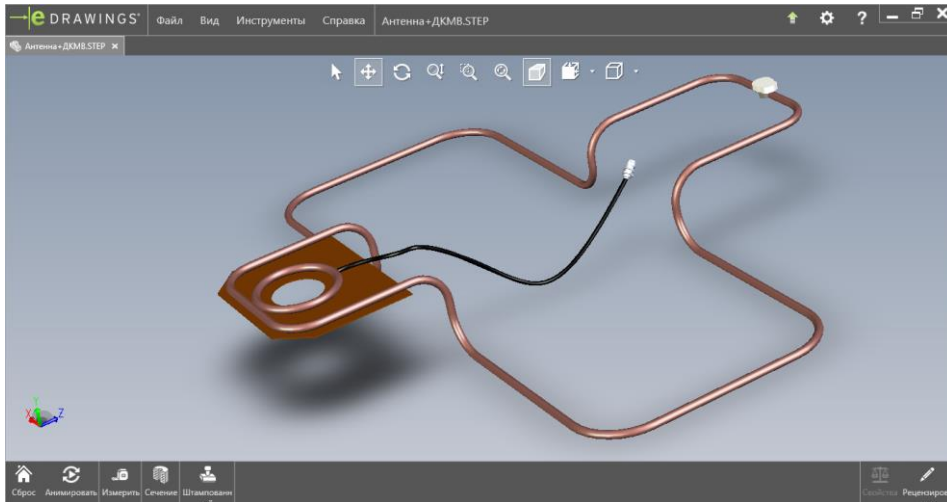


Рисунок 1 – 3D-модель внешней бортовой антенны БЛА МД

По результатам разработки 3D-модели была составлена модель в программе моделирования антенн MMANA GAL [11].

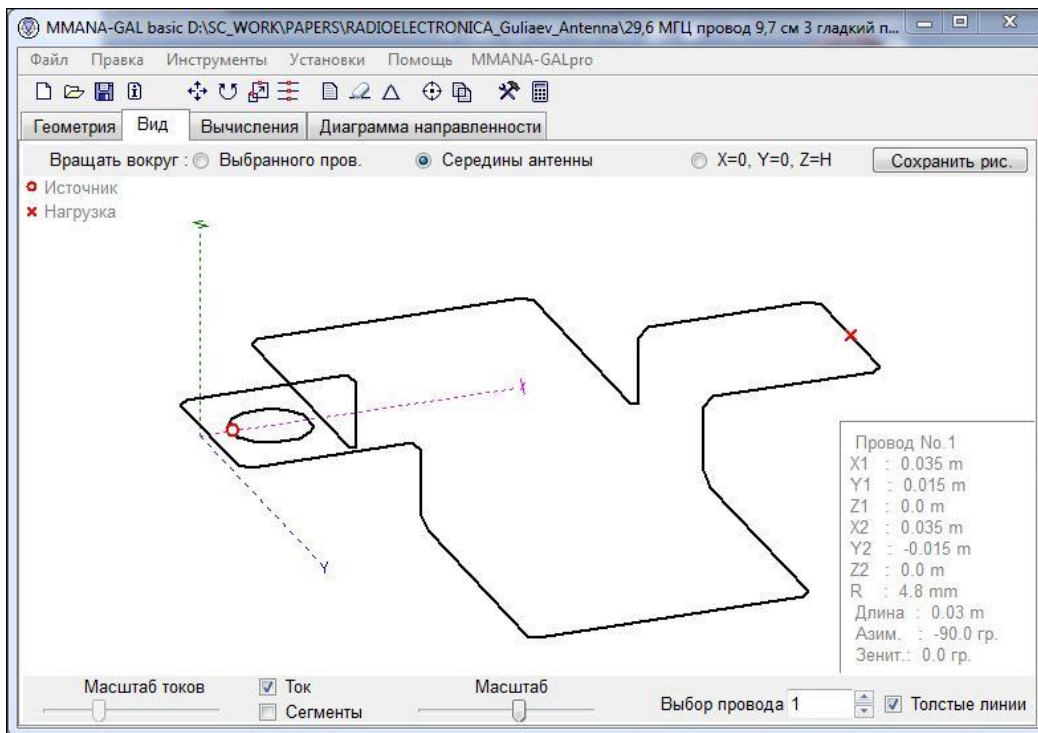


Рисунок 2 – Модель антенны в MMANA GAL basic

Предположение о том, что магнитная антенна, излучающая петля которой

лежит, по меньшей мере, в двух плоскостях, сохранит ДН близкую к виду ДН изотропного излучателя было подтверждено путем моделирования с использованием метода моментов [11]. Результаты моделирования трехмерной ДН приведены на рис. 3.

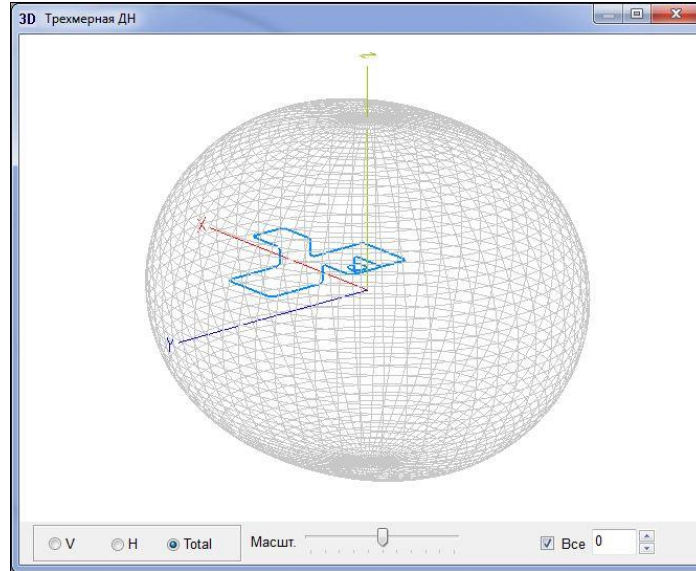


Рисунок 3 – Объемная ДН двухплоскостной бортовой магнитной антенны

На рис. 4. представлены результаты моделирования параметров антенны при настройке на одну из рабочих частот, равную 30,92 МГц.

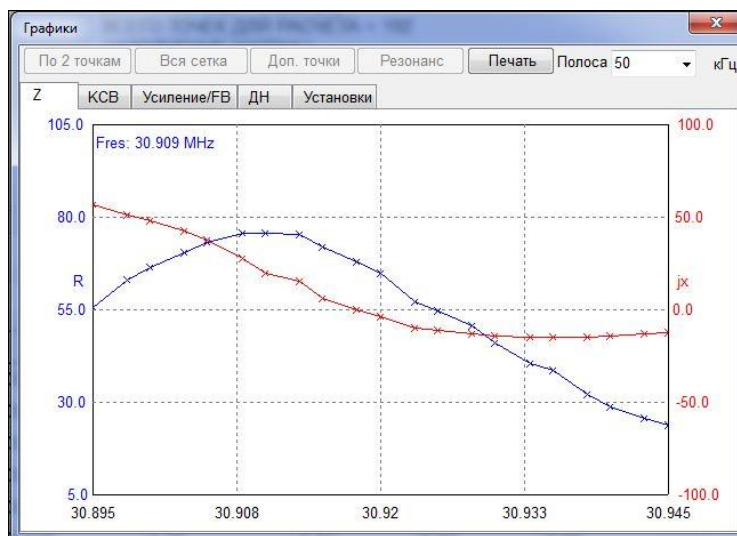


Рисунок 4 – Действительное и реактивные сопротивления при настройке антенны

Из графиков рис. 4 следует, что среднее значение активного сопротивления в

полосе 50 кГц составляет 55 Ом, а реактивное примерно равно нулю, что является весьма хорошими показателями.

На диаграммах рис. 5 видно, что ДН антенны имеет несущественный провал по мощности в угломестной плоскости, порядка 3 дБ.

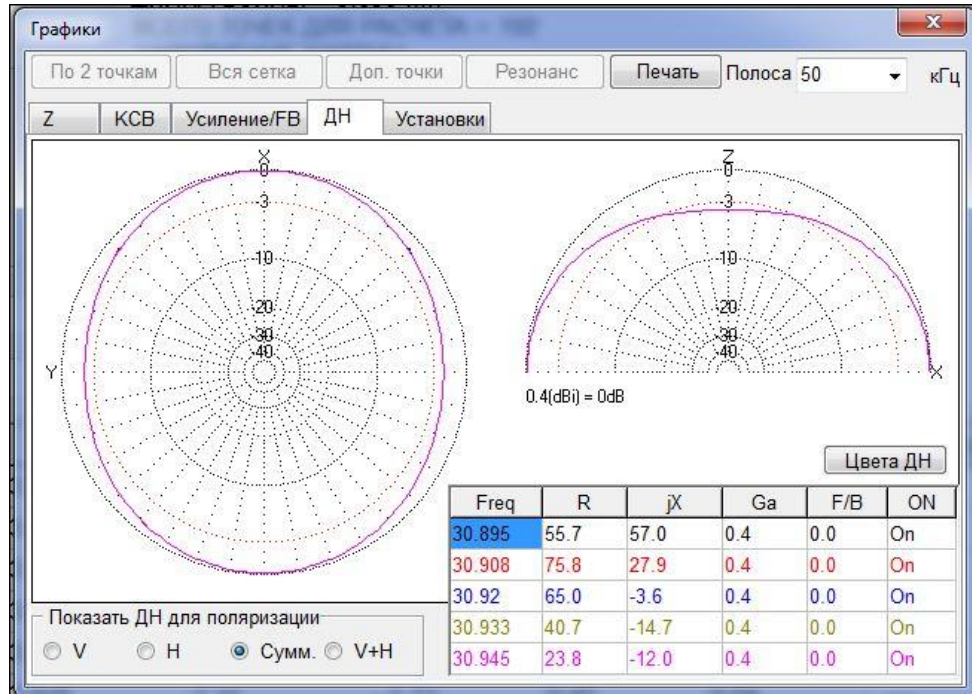


Рисунок 5 – ДНА в азимутальной и угломестной плоскостях без учета Земли

Подведя итог по результатам проведенного моделирования, можно заключить следующее. Антенна, выполненная в объемно варианте, т.е. излучающая петля которой имеет несколько плоскостей, сохраняет свои свойства по сравнению с плоскостным вариантом [6, 9].

2. Изготовление и настройка опытных образцов магнитных антенн в бортовом и наземном вариантах исполнения

В процессе изготовления магнитных антенн БЛА МД было реализовано несколько опытных образцов. На рис. 6 представлено изображение варианта плоскостной антенны БЛА МД выполненного в соответствии с разработкой [9].

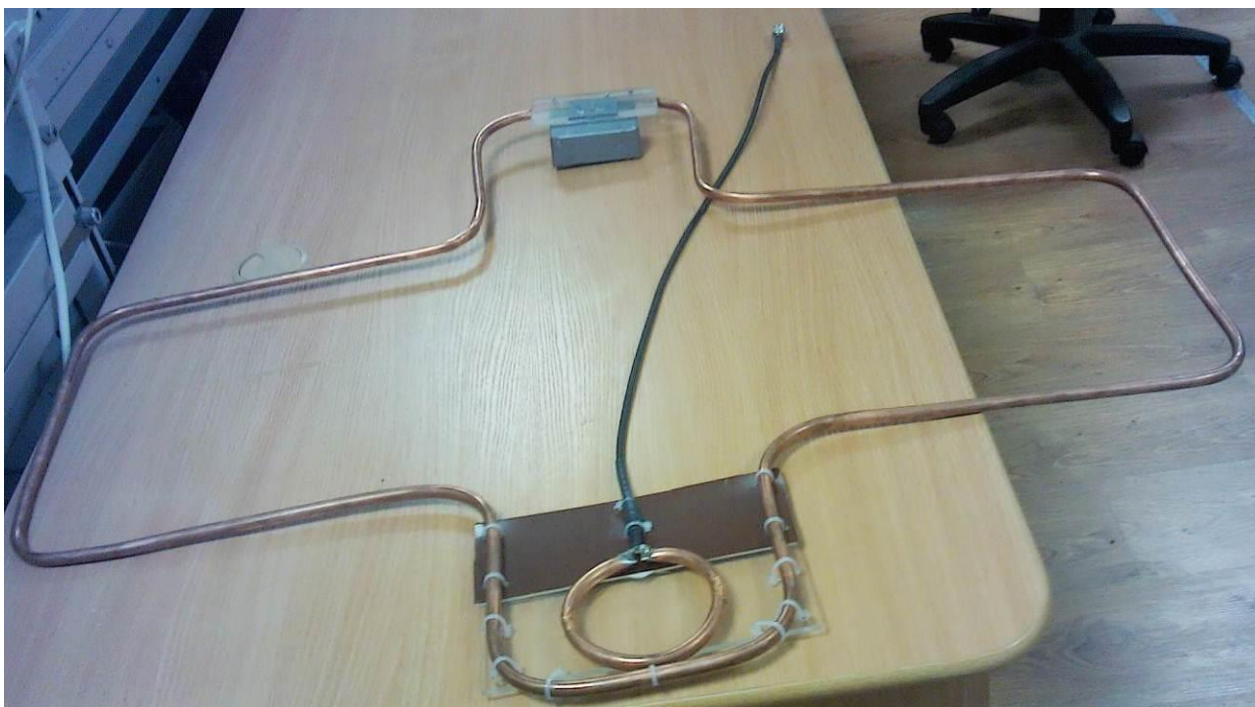


Рисунок 6 – Вариант плоскостной магнитной резонансной антенны БЛА МД

На рис. 7 представлено изображение варианта образца объемной антенны БЛА МД выполненного в соответствии с моделированием, представленным в первом параграфе статьи (3D-модель, рисунок 1).



Рисунок 7 – Бортовая магнитная объемная антенна БЛА

Изготовленный образец магнитной антенны для НПДУ БЛА МД был размещен на треноге с диэлектрическими стойками (рис. 8).



Рисунок 8 – Установка наземной антенны на треногу

Бортовой вариант магнитной антенны был размещен на типовом БЛА МД (рис. 9).



Рисунок 9 – Бортовое размещение ДКМВ антенны на БЛА МД

При размещении антенны на БЛА были учтены особенности работы функциональных узлов БЛА, в том числе систем заправки и посадки (см. рис. 10).

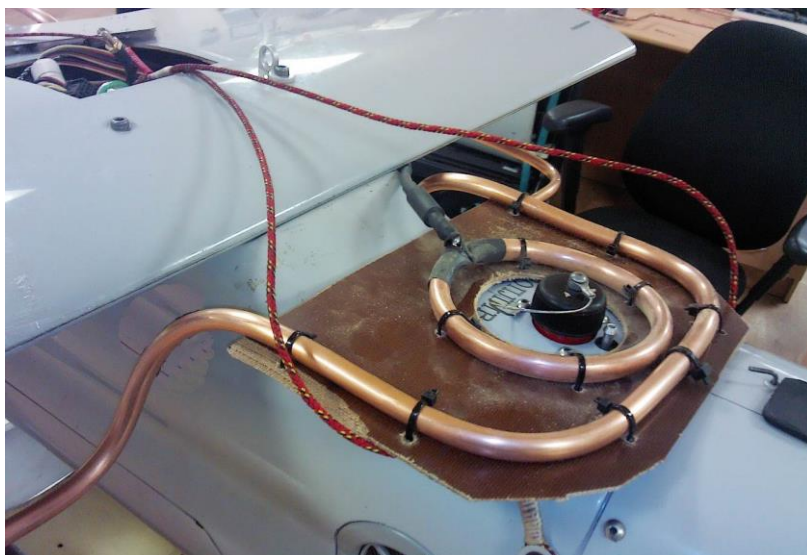


Рисунок 10 – Конструктивные особенности размещения ДКМВ антенны на БЛА МД

Для обеспечения проведения измерений в условиях близким к реальной эксплуатации, антенна НПДУ БЛА МД поднималась на высоту 5 метров, что согласно расчетам [11] за счет отражения от земной поверхности обеспечивает коэффициент усиления порядка 6 дБ.



Рисунок 11 – Условия измерения параметров наземной антенны

Результаты измерений минимального значения коэффициента стоячих волн (КСВ) на частоте настройки в резонанс, приведенные на рис. 12, подтверждают возможности реализации КСВ в пределах 2 в рабочей полосе частот от 15 МГц до 40 МГц. Также на рисунке для сравнения представлены результаты расчетов минимального КСВ в программе MMANA (сплошная линия).

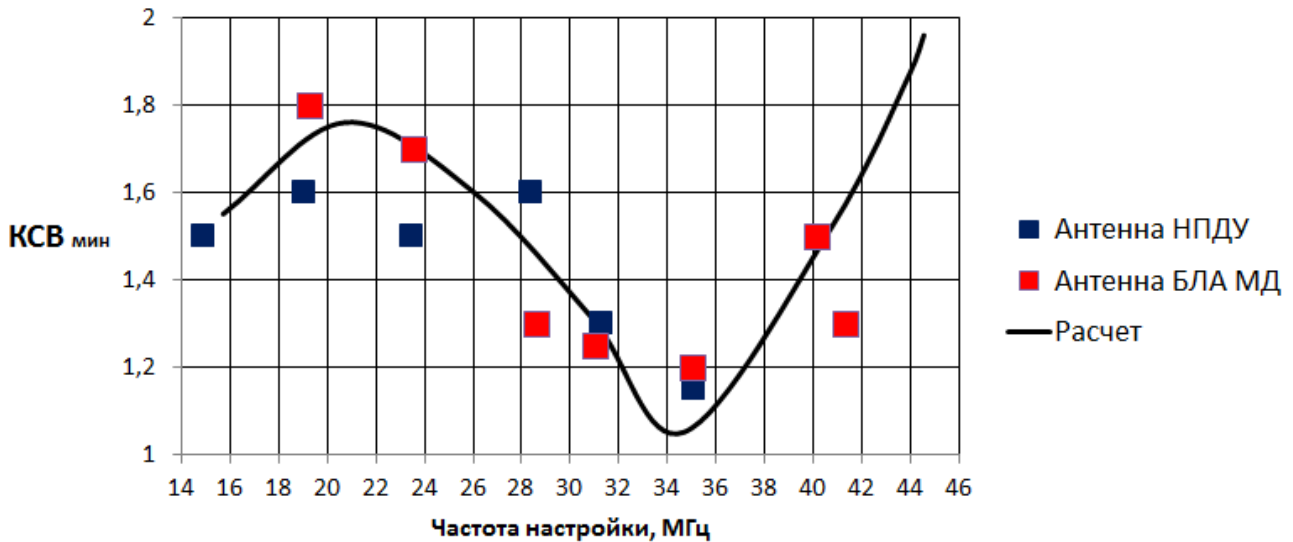


Рисунок 12 – Зависимости измеренного минимального КСВ от частоты настройки

Анализ зависимостей рис. 12 показывает достаточно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных результатов с использованием метода моментов.

Для оценки рабочей полосы пропускания в работе было принято допустимое значение КСВ меньше или равное двум, по результатам чего построены зависимости ширины полосы пропускания от частоты настройки, представленные на рис. 13.

Из зависимостей рис. 13 следует, что полоса пропускания увеличивается с ростом частоты настройки. Характер такой зависимости совпадает с результатами моделирования ранних работ и с расчетными результатами [9]. Однако измеренные значения полосы пропускания несколько больше расчетных значений во всем диапазоне частот. Это может объясняться упрощенной моделью антенны, используемой при расчетах методом моментов.

Кроме того, расширение полосы обусловлено снижением добротности за счет увеличения токов утечки (или иначе, снижением сопротивления изоляции) реальной антенны обусловленных примененными диэлектриками, изолирующими конденсатор.

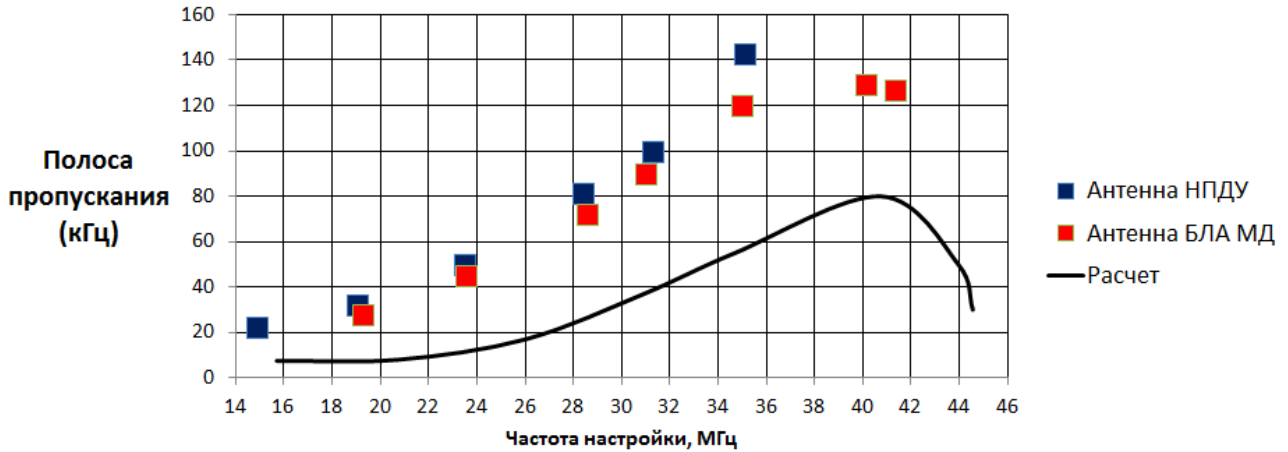


Рисунок 13 – Зависимости ширины полосы пропускания от частоты настройки

На рис. 14 представлены зависимости активного и реактивного сопротивлений на центральной частоте настройки.

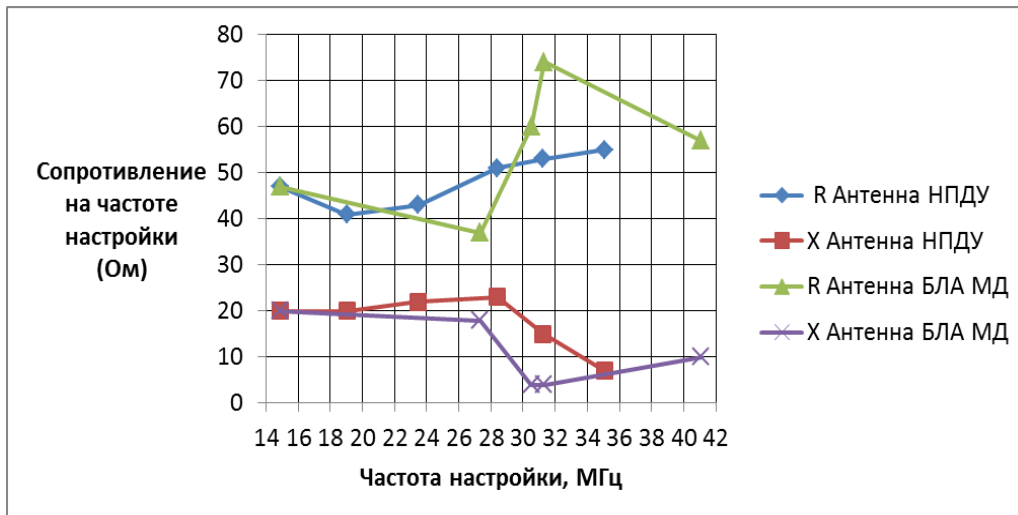


Рисунок 14 – Зависимости активного и реактивного сопротивления от центральной частоты настройки

Из графиков рис. 14 следует, что как наземная, так и бортовая антенны имеют среднее значение активного сопротивления близкие к 50 Ом, что

обеспечивает согласование с нагрузкой без применения дополнительных согласующих устройств.

Выводы

1. Методом натурального эксперимента проведена верификация моделей магнитных резонансных ДКМВ антенн, разработанных с помощью моделирования и расчета характеристик на основе метода моментов. Результаты измерений, произведенных в ходе изготовления антенн, показали приемлемые для эксплуатации параметры.

2. В ходе моделирования и практической разработки установлена возможность изготовления внешней магнитных резонансных антенн, излучающая петля которых имеет объемный вид.

3. Установка магнитной антенны на корпус реального БЛА не приводит к существенному изменению характеристик антенны, однако требуемые параметры конденсатора для настройки антенны в резонанс незначительно отличаются.

Литература

1. А.В. Ананьев, И.Х. Ерзин, С.В. Филатов, А.А. Щербаков. Аэромобильная сеть связи – эффективная система ретрансляции воздушного эшелона объединенной автоматизированной цифровой системы связи в условиях вооруженного конфликта. // Военная мысль. – 2017. – №4. – С. 26-34.

2. К.Л. Войткевич, А.А. Сулима, П.А. Зац. Проблемы построения канала управления беспилотными летательными аппаратами на основе ДКМВ-радиолинии. // Электросвязь. – 2014. – №7. – С. 9-11.

3. А.И. Семенихин, А.И. Черноколпаков. Моделирование конформной магнитной ферритовой антенны летательного аппарата // Приволжский научный вестник. – 2015. – № 4-1 (44). – С. 39-42.

4. С.В. Кореванов, В.В. Казин. Анализ проблем эксплуатации навигационных систем беспилотных летательных аппаратов на высоких широтах // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – №201 – С. 31-34.

5. Д.В. Благовещенский, О.А. Мальцева, М.М. Анишин. Использование КВ-радиосвязи в высоких широтах // Техника радиосвязи. – 2015. – №4(27). – С. 5-13.
6. А.В. Ананьев, А.Н. Катруша. Разработка контурных антенн декаметрового диапазона волн беспилотных летательных аппаратов работающих в составе аэромобильной сети связи. // Сборник трудов XI Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». – 15-16 марта 2017 г. – С. 21-22.
7. Надененко С.И. Антенны. М.: Гос. из-во лит. по вопр. связи и радио. – 1959. – 564 с.
8. Каталог антенн ФНПЦ ОАО “НПП “Полет”. – 2012. – 56 с.
9. А.В. Ананьев, А.Н. Катруша, Контурная антенна ДКМВ диапазона для беспилотных летательных аппаратов // Антенны. – 2017. – №8. – С. 45-52.
10. Российский беспилотник «Орлан-10»: Новости высоких технологий, науки и техники. Техкульт Электрон. журн. – Режим доступа: <https://www.techcult.ru/technics/2736-bespilotnik-orlan-10>.
11. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ / И.В. Гончаренко. – Москва: Радиософт, 2016. – 744 с.

Ссылка на статью:

А. В. Ананьев, А. Н. Катруша. Экспериментальная разработка внешних ДКМВ магнитных антенн беспилотных летательных аппаратов малой дальности. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/7/text.pdf>