

Многофункциональный бортовой РЛК с конформной антенной системой для беспилотных летательных аппаратов малой дальности

Е. М. Ильин, Ю. Н. Кривов, А. И. Полубехин, А. Н. Кренев, А. Г. Черевко

На примере двухдиапазонного (Ku, UHF) многофункционального бортового радиолокационного комплекса (МБРЛК) рассмотрены вопросы разработки и внедрения многодиапазонных конформных антенных систем (КАС) в БЛА малой и средней дальности, которые не ухудшают аэродинамических характеристик БЛА и позволяют существенно расширить функциональные возможности МБРЛК и решить поставленные оборонные и народнохозяйственные задачи. Предложена методология создания конформных антенных систем МБРЛК для таких БЛА. Одним из путей реализации этих КАС является использование конформных антенн с подложками из метаматериалов.

Ключевые слова: многофункциональный бортовой радиолокационный комплекс, БЛА малой и средней дальности, конформные антенные системы, метаматериалы.

1. Введение

Комплексы с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) нашли самое широкое применение как при ведении боевых действий, так и в народном хозяйстве [1, 2]. Такие комплексы рассматриваются военным руководством развитых зарубежных стран в качестве важнейшего средства повышения боевых возможностей вооруженных сил. Около 50 стран мира разрабатывают или закупают комплексы с БЛА для своих вооруженных сил [3].

В народном хозяйстве БЛА находят широкое применение при разведке полезных ископаемых в труднодоступных районах, в чрезвычайных ситуациях при ликвидации последствий стихийных катаклизмов. Всё большее применение они находят и при борьбе с терроризмом [3].

В настоящее время при решении вышеназванных задач особенно широкое распространение получили БЛА средней и малой дальности [4]. На рис. 1–3 в качестве примера приведены фото и 3D-модель отечественных БЛА малой дальности (МД).

Такое разнообразие применения БЛА требует от их создателей разработки большого многообразия целевых нагрузок-датчиков: видеокамер, многоспектральных приёмников ИК-диапазона, многодиапазонных средств радиотехнической и радиолокационной разведок и др.

Учитывая, что грузоподъемность БЛА средней и малой дальности такого назначения невелика (до 50...100 кг), возникает актуальная задача существенного снижения массогабаритных показателей их целевых нагрузок.

Существующие комплексы с БЛА оснащаются преимущественно оптическими (в видимом и ИК-диапазонах) средствами, недостатки и достоинства которых по сравнению с радиолокационными средствами широко известны. При этом задача реализации малых массогабаритных параметров нагрузок достаточно просто решается в видимом и ИК-диапазонах, а

наибольшие трудности возникают при разработке многофункциональных бортовых радиолокационных комплексов (МБРЛК) из-за наличия в их составе громоздких антенных систем, масса и габариты которых определяются как используемым частотным диапазоном, так и необходимостью формирования узких диаграмм направленности [5].



Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат «Корсар» в полёте



Рис. 2. Беспилотный летательный аппарат «Форпост» в полёте

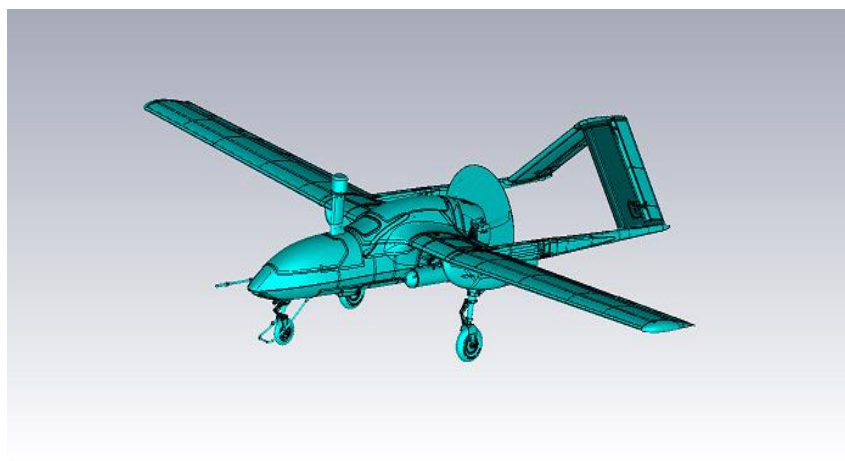


Рис. 3. 3D-модель беспилотного летательного аппарата малой дальности

2. Многофункциональный бортовой радиолокационный комплекс БЛА

Требование многодиапазонности МБРЛК обусловлено тем, что в разных частотных диапазонах качество радиолокационной информации (РЛИ) зависит от вида объектов, их маскировки, погодных условий и т.п. РЛИ в разных частотных диапазонах существенно дополняют друг друга, особенно при решении большого разнообразия военных и хозяйственных задач.

В работах [6, 7] приведено описание интегрированного двухдиапазонного МБРЛК, функционирующего в Ku- и UHF-диапазонах (рис. 4).

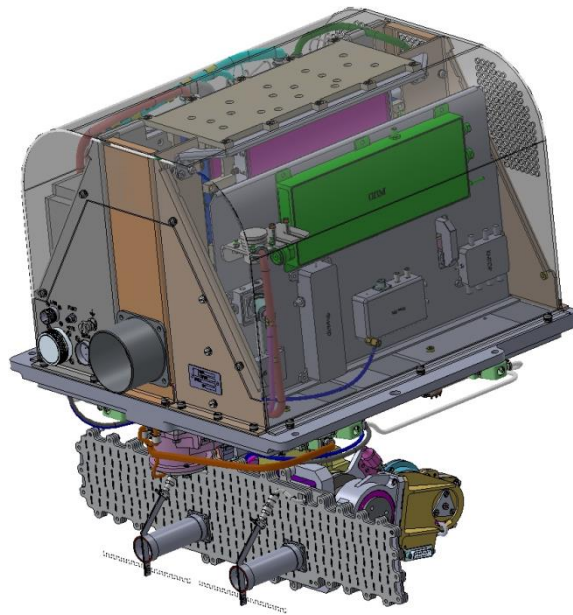


Рис. 4. Двухдиапазонный МБРЛК
(радиолокационный модуль + бортовая цифровая вычислительная машина),
Ku-диапазон (2 см) + UHF (70 см).
Полотно антенны Ku-диапазона – 520x140x50 мм³ (ШxВxГ),
длина антенных диполей UHF-диапазона – 80 мм

Данный МБРЛК может решать целый ряд задач [8, 9]:

- картографирование земной (водной) поверхности;
- обнаружение и измерение координат неподвижных радиоконтрастных и движущихся наземных (надводных) объектов;
- обнаружение и измерение координат неподвижных и движущихся воздушных объектов;
- оценка метеобстановки;
- информационное обеспечение маловысотного полёта;
- информационное обеспечение распознавания объектов;
- выдача целеуказаний оптико-электронным средствам (ОЭС) бортового радиоэлектронного оборудования и другим потребителям;
- обнаружение внешних излучений в диапазоне рабочих частот и определение координат их источников.

Ku-диапазон наиболее удобен для обнаружения и наблюдения за малоразмерными объектами (в том числе в прибрежной акватории) при разрешении от 0.25 м. Дальность обнаружения наземных и надводных объектов составляет до 50...80 км, воздушных – до 35...45 км, метеорообразований – до 200...250 км. Измерение наклонной дальности обеспечивается до 9...11 км. Дальность действия снижается несущественно при наличии дождя с интенсивностью до 0.5...1 мм/ч.

UHF-диапазон может быть использован для обнаружения и наблюдения за крупными наземными и надводными объектами при разрешении от 4 м на дальностях 50...60 км, в том числе при наличии дождя интенсивностью до 10 мм/ч. Важным достоинством этого диапазона является возможность обнаруживать и наблюдать укрытые объекты. При этом под укрытием понимают лесную растительность, слой земли или искусственное сооружение, а также пресную воду.

Использование различных диапазонов длин волн позволяет значительно повысить информативность и, как следствие, решить всё многообразие задач, возникающих при ведении боевых действий, проведении контртеррористических операций, народнохозяйственных задач.

На рис. 5 приведен вариант размещения вышепоказанного МБРЛК на БЛА малой дальности (БЛА МД).

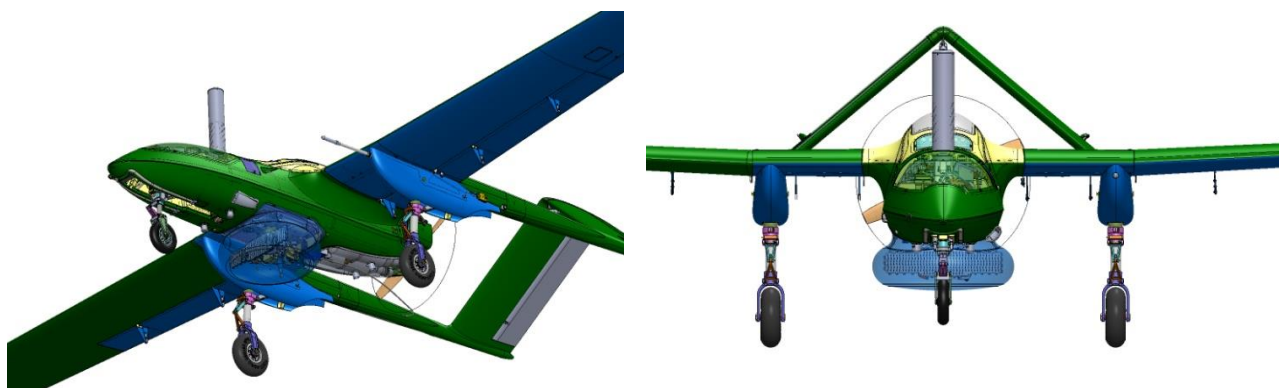


Рис. 5. Внешний вид БЛА МД с МБРЛК на борту с антенной в традиционном исполнении

Из приведенных выше изображений видно, что радиопрозрачный обтекатель, закрывающий антенну МБРЛК, имеет существенную фронтальную площадь (0.12 м^2). Это приводит к ухудшению аэродинамического качества летательного аппарата на 1.4 единицы, что, в свою очередь, сокращает максимальное время полета на 10 % по сравнению с гладким самолетом.

В связи с этим необходимо рассмотреть возможность сокращения лобового сопротивления обтекателя за счет применения конформной антенной системы (КАС), встроенной в контуры БЛА МД.

Одним из вариантов решения данной задачи является разработка и внедрение фазированных антенных решеток (ФАР) и конформное размещение антенн Ku- и UHF-диапазонов длин волн на БЛА МД [10].

3. Конформные антенные системы МБРЛК БЛА МД

В современных бортовых РЛС антенные системы по габаритам составляют примерно 20–40 %, а по массе – 15–30 % от массогабаритных параметров бортовой РЛС в целом.

Поэтому реализация перспективных технологий создания антенных систем даёт большие возможности по снижению массы и габаритов РЛС в целом.

Одной из таких технологий является создание и внедрение конформных антенных систем, логично вписанных в конструктив летательного аппарата [10].

3.1. КАС Ku-диапазона частот

Предварительная схемотехническая проработка ФАР Ku-диапазона частот показывает, что для обеспечения заданных излучающих характеристик антенных решёток (больших коэффициентов направленной деятельности и узких диаграмм направленности) необходимо использовать апертуры с размерами в несколько десятков длин волн. Это влечёт за собой необходимость размещения большого числа активных излучателей и приводит к существенному увеличению массы и габаритов ФАР, что затрудняет использование таких РЛС на малых БЛА.

Форма полотна антенны, способ её «запитки» решаются в каждом конкретном случае применительно к реальной поверхности носителя в зависимости от задач МБРЛК.

С помощью бортовой вычислительной машины (БЦВМ) определяются требуемые сдвиги фазы излучаемых элементами антенны сигналов с целью формирования требуемых диаграмм направленности. Изменения формы БЛА во время полёта, «болтанка» в воздухе БЛА и т.п. могут быть «нейтрализованы» с помощью системы микронавигации, комплексированной с БЦВМ [11].

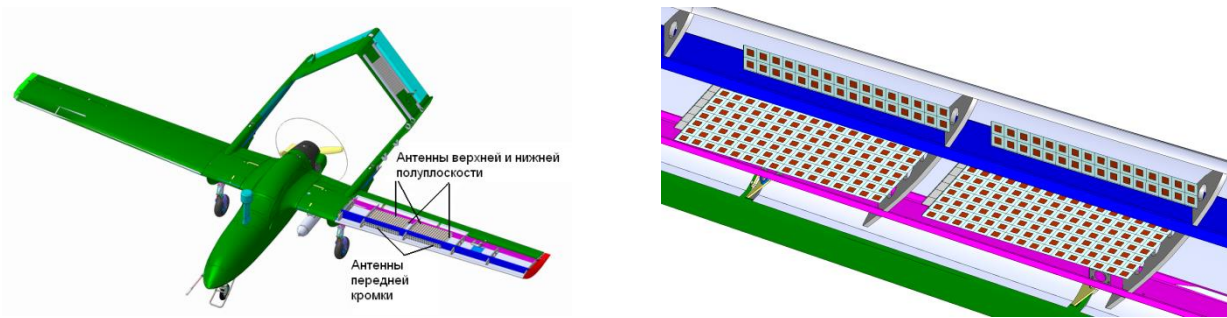


Рис. 6. Расположение антенных систем Ку-диапазона в крыльях БЛА МД.
Размеры отсеков в крыле (ДхШхТ): 1-260x224x70 мм³, 2-510x(224...211)x65 мм³

Применительно к БЛА МД рассмотрим вариант ФАР Ку-диапазона с синтезированной апертурой размером 240 x 120 мм², на которой размещены 16 x 8 = 128 управляемых излучающих элементов. Излучатели могут быть выполнены в печатном или волноводном исполнении.

Такие ФАР с представленной апертурой могут быть размещены по левому и правому борту БЛА (рис. 6). Такое размещение позволяет конформно вписать излучатели в обводы БЛА. Для обеспечения максимального сектора сканирования (180⁰) необходимо, чтобы каждый излучатель формировал в пространстве собственную диаграмму направленности (ДН) кардиоидного типа. Применение таких излучателей, размещённых по внутренней поверхности БЛА, приводит к сужению собственных ДН. При формировании луча в направлении, близком к плоскости решётки, происходит расширение ДН, увеличение уровня бокового излучения и, соответственно, уменьшение коэффициента усиления (КУ) антенной решётки. Таким образом, создаваемое амплитудно-фазовое распределение мощности в антенной решётке обеспечивает формирование максимально узкого луча в перпендикулярном направлении относительно плоскости решётки. При максимальном отклонении от вертикали при сканировании происходит уменьшение КУ приблизительно на 3 дБ и расширение ДН.

Для размещения антенных решёток Ку-диапазона частот можно предложить вариант использования двух ортогонально расположенных линеек конформных излучателей. Излучатели могут быть расположены вдоль борта и крыла. При излучении синфазной мощности каждая линейка излучателей формирует в пространстве две веерообразные диаграммы, развернутые на 90° относительно друг друга и совпадающие по вектору поляризации. В направлении пересечения двух диаграмм будет сформирована суммарная диаграмма направленности.

3.2. КАС UHF-диапазона частот

Более трудной задачей является конформное размещение антенны UHF-диапазона. Связано это с большими размерами излучающих элементов (рис. 4) и ограниченными размерами стабилизатора БЛА (рис. 7). В отсеках стабилизатора можно разместить два антенных полотна с размерами примерно 800x240 мм². Толщина антенны не должна превышать 40 мм.

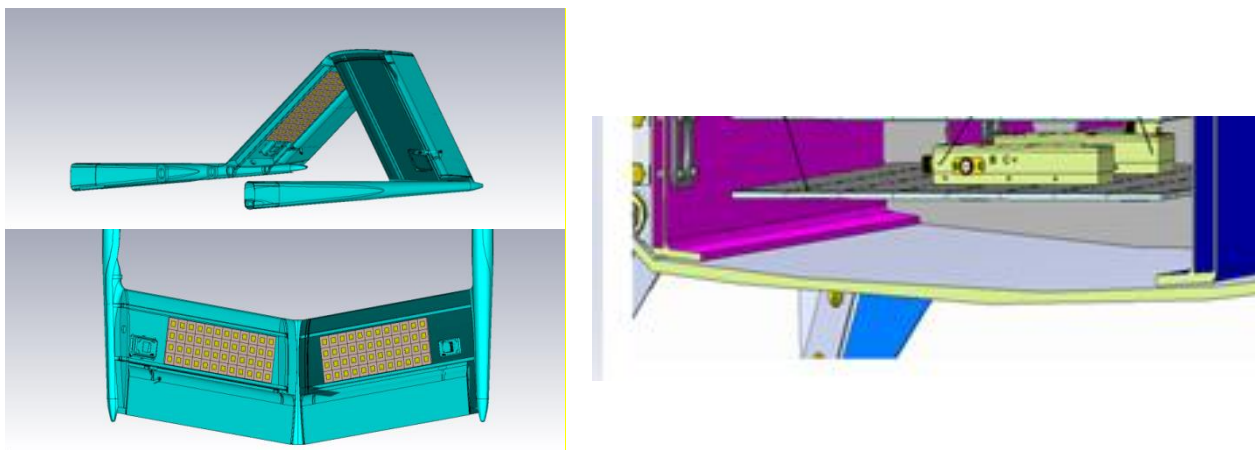


Рис. 7. Вариант размещения КАС УHF-диапазона в стабилизаторе БЛА.
Габариты отсека стабилизатора – $800 \times 240 \times 40$ мм³

Уменьшение размеров УHF-антенн может быть осуществлено несколькими способами.

1. Использование подложек с высокой диэлектрической проницаемостью, что снижает эффективность излучения волн, но уменьшает размеры антенны. Так, например, излучающий элемент печатной антенны на материале «Флан 16» с $\epsilon = 16$ и толщиной подложки 2 мм на $\lambda = 70$ см будет иметь размеры излучателя 125×90 мм², а размеры экрана – 215×182 мм², т.е. в стабилизаторе БЛА можно разместить две решетки по 3×1 элемента. Излучающий элемент патч-антенны показан на рис. 8.

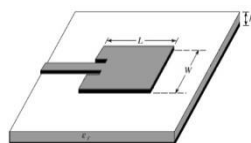


Рис. 8. Излучающий элемент патч-антенны

2. Применение в фазированных антенных решетках УHF-диапазона в качестве излучающих элементов полоскового вибратора, используя приемы геометрического укорочения, позволяет уменьшить размеры излучателя, а это приведет к уменьшению шага решетки и подавлению высших дифракционных максимумов [12].

Значительно уменьшить размеры УHF-антенн позволяет использование необычных свойств метаматериалов. Применение метаматериалов – это новое и чрезвычайно перспективное направление развития антенных систем [13, 14]. Согласно установившейся терминологии под метаматериалами сегодня понимают «искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе» [14]. Применительно к устройствам радиочастотных диапазонов понятие «метаматериал» относят, как правило, к периодической системе проводящих элементов, выполненных из материала с высокой проводимостью и размещаемых в диэлектрике, роль которого ограничивается обеспечением механической целостности конструкции. Форма, геометрические размеры указанных элементов и расстояния между ними определяют значения диэлектрической и магнитной проводимостей материала, которым представляют указанную совокупность элементов.

Метаматериалы в качестве подложек для печатных миниатюризированных антенн позволяют снижать размеры традиционных излучателей, увеличивать их полосы пропускания и эффективность излучения [15]. Структура метаматериала, формирующего подложку, может быть однородной либо композитной, образованной из нескольких типов сред.

Характерный пример композитной подложки рассмотрен в работе [16]. Применение такой подложки позволило создать печатную антенну UHF-диапазона с размерами излучателя $30 \times 30 \text{ мм}^2$. Такие размеры излучающего элемента позволят в нашем случае уже разместить в стабилизаторе БЛА четыре решетки из $8 \times 8 = 64$ элементов с апертурой $240 \times 240 \text{ мм}^2$.

На рис. 9, 10 схематично приведены диаграммы направленности КАС Ku- и UHF-диапазонов длин волн.

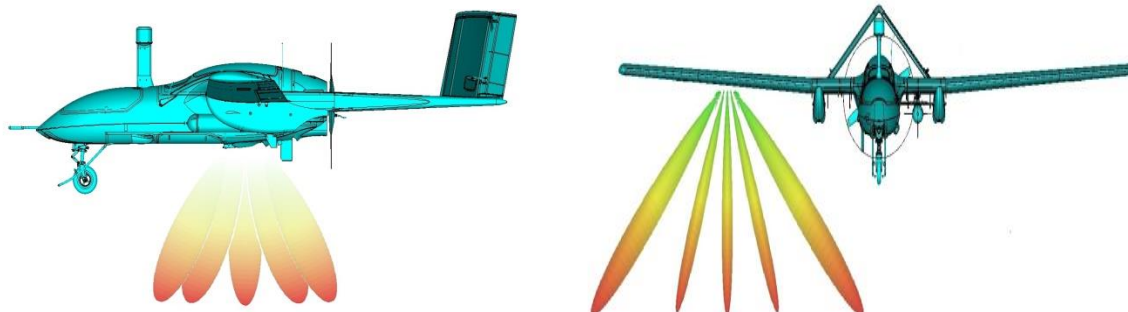


Рис. 9. Диаграммы направленности КАС Ku-диапазона

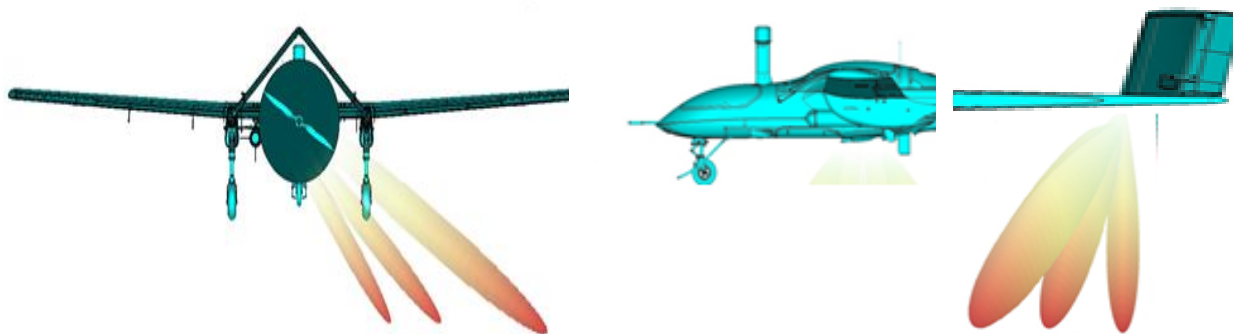


Рис. 10. Диаграммы направленности КАС UHF-диапазона

4. Методология создания конформных антенных систем МБРЛК перспективного БЛА МД

На рис. 11 схематично представлен вид снизу БЛА МД с КАС Ku- и UHF-диапазонов длин волн.

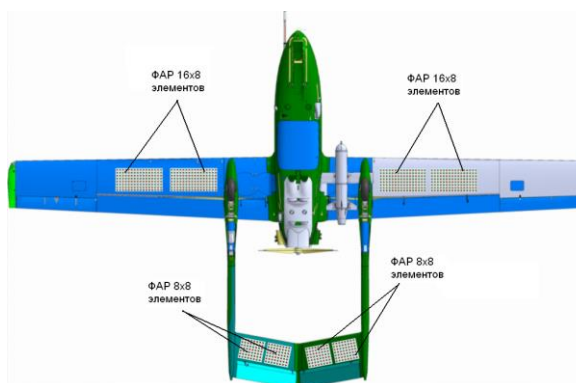


Рис. 11. БЛА МД с КАС Ku- и UHF-диапазонов длин волн, вид снизу

Антенны закрываются радиопрозрачными обтекателями, конформно вписанными в корпус БЛА. Таким образом, не нарушаются аэродинамические характеристики БЛА, а применение ФАР позволяет расширить функциональные возможности МБРЛК.

Выполненный анализ позволяет свести методологию создания конформных антенных систем МБРЛК перспективного БЛА МД к нескольким позициям, важнейшими из которых являются:

– конформные антенные системы разрабатываются под конкретный носитель, в связи с чем имеют свою специфику и не могут быть унифицированы. Унификация в данном случае возможна на уровне комплектующих элементов, технологических методов и алгоритмов функционирования;

– размещение КАС на борту БЛА определяется несколькими факторами:

- рабочим диапазоном длин волн;
- режимами функционирования: картографирование земной поверхности, подповерхностное зондирование, селекция воздушных, наземных/морских целей и др.;
- возможной площадью реализации ФАР на корпусе БЛА, поскольку она определяет ДН антенны, а следовательно, и характеристики МБРЛК в целом;

– КАС на борту БЛА не должны ухудшать его летные характеристики и снижать его функциональные возможности;

– при размещении КАС на отдельных частях БЛА, подверженных вибрации и аэроупругим колебаниям, необходимо учитывать эти явления в системе фазирования ДН антенн, особенно в коротковолновых диапазонах длин волн [17];

– в случае сложной конфигурации поверхности планера БЛА возможны варианты реализации на его борту квази-КАС, когда КАС с меньшей кривизной поверхности размещается под прозрачной для данного диапазона длин волн обшивкой БЛА;

– БЦВМ на борту БЛА для обеспечения формирования и сканирования диаграммы направленности ФАР КАС в требуемых секторах пространства должна иметь информационный ресурс как по быстродействию, так и по оперативной памяти;

– в зависимости от конструктивной реализации КАС на БЛА изменяются принципы его эксплуатации, а в отдельных случаях требуется изменение тактики применения БЛА;

– переход от традиционного исполнения бортовых РЛС БЛА к бортовым РЛС с КАС не должен снижать коэффициент «эффективность – стоимость» БЛА в целом.

5. Заключение

Таким образом, внедрение конформных антенных систем особенно важно для БЛА МД в связи с массогабаритными ограничениями и, с одной стороны, требует решения целого ряда противоречивых задач, а с другой – позволяет обеспечить требуемые массогабаритные показатели целевых нагрузок БЛА МД, не нарушая аэродинамических характеристик БЛА, расширить функциональные возможности МБРЛК и решить поставленные оборонные и народнохозяйственные задачи.

Литература

1. *Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Анаев М. А., Соловьев В. В., Шагин С. И.* Многоцелевой авиационный комплекс мониторинга, предупреждения и защиты от стихийных бедствий на базе беспилотного летательного аппарата «Нарт» // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3. С. 229–238.
2. *Полтавский А. В.* Беспилотные летательные аппараты в системе вооружения // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 163. С. 163–170.
3. *Нейвинский В.* Перспективы производства за рубежом беспилотных летательных аппаратов // Зарубежное обозрение. 2009. № 11. С. 52–55.

4. Фомин П. М., Захаров А. В., Поздеев А. Г., Белый Ю. М. Интеллектуальные системы обеспечения безопасности с использованием беспилотных летательных аппаратов // Вестник НЦ БЖД. 2012. Т. 15. С. 124–131.
5. Yohandri A., Wissan V., Firmansyah I., Rizki Akbar P., Sri Sumantyo J.T., Kuze H. Development of circularly polarized array antenna for synthetic aperture radar sensor installed on UAV // Progress in electromagnetic research. 2011. V. 19. P. 119–133.
6. Ильин Е. М., Самарин О. Ф., Савостьянов В. Ю., Кудашев В. С., Ровкин М. Е., Алексеев А. С., Руссков Д. А., Киселев С. В., Борзов А. Б. Многофункциональная интегрированная двухдиапазонная радиолокационная система для летательных аппаратов // Патент на изобретение: ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана, АО «НПФ «Микран». Свидетельство № 2621714 от 01.06.2016 г.
7. Guskov Y., Samarin O., Savostyanov V. Decimetr/Centimetr Double-Band Integrated Small Radars // Radio Electronic Technology. Information & Analysis magazine. 2016. № 4. P. 34–35.
8. Ильин Е. М., Савостьянов В. Ю., Самарин О. Ф., Черевко А. Г. Состояние и перспективы создания многодиапазонных малогабаритных радиолокационных систем // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 156–163.
9. Ильин Е. М., Полубехин А. И., Савостьянов В. Ю., Самарин О. Ф., Черевко А. Г. Малогабаритный многофункциональный бортовой РЛК для беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник СибГУТИ. 2017. № 4. С. 104–109.
10. Ильин Е. М., Полубехин А. И., Черевко А. Г. Конформные антенные системы – перспективное направление развития бортовых РЛК для беспилотных летательных аппаратов // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 149–155.
11. Ильин Е. М., Козорез Д. А., Красильщиков М. Н., Полубехин А. И., Савостьянов В. Ю., Сыпало К. И. Облик бортовой интегрированной навигационной системы летательного аппарата, обеспечивающей высокоточное позиционирование фазового центра антенны бортовой РЛС // Вестник СибГУТИ. 2016. № 3. С. 33–45.
12. Овсянников В. В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками. М: Радио и связь, 1985. 229 с.
13. Engheta N., Ziolkowski R. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. Wiley-IEEE Press, 2006. 352 p.
14. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. № 3–4. С. 44–60.
15. Седельников Ю. Е. Метаантенны: взгляд с позиции традиционных представлений [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/feb14/11/text.html> (дата обращения: 05.08.2018).
16. Wu M. et al. Miniaturization of a Patch Antenna with Dispersive Double Negative Medium Substrates [Электронный ресурс]. URL: <http://sci-hub.tw/10.1109/APMC.2005.1606177> (дата обращения: 05.08.2018).
17. Черевко А. Г., Черевко А. А., Моргачев В. Ю., Ильин Е. М., Полубехин А. И., Влияние аэроупругости на эффективность локаторов с конформными антеннами // Вестник СибГУТИ. 2017. № 3. С. 86–93.

Статья поступила в редакцию 07.09.2018;
переработанный вариант – 20.09.2018.

Ильин Евгений Михайлович

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: evgil45@mail.ru.

Кривов Юрий Николаевич

к.т.н., доцент ЯрГУ (150064, Ярославль, ул.Советская, д.14), e-mail: yu269kr@yandex.ru.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана, e-mail: polub1980@mail.ru.

Крнев Александр Николаевич

к.т.н., доцент ЯрГУ, ведущий научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ, тел. (4852) 72-51-53, e-mail: krenev@uniyar.ac.ru.

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-20, e-mail: cherevko@mail.ru.

Airborne multifunctional radar with a conformal antenna system for shot-range UAVs

E. Il'in, A. Polubehin, Yu. Krivov, A. Krenev, A. Cherevko

The development and implementation of multi-band conformal antenna systems (CAS) into small and medium range UAVs have been considered. The dual-band (Ku, UHF) multifunctional airborne radar complex (MARC) is used as an example. The considered CASs do not degrade the aerodynamic characteristics of the UAVs. They allow to expand significantly MARC functional capabilities and to solve defensive and national economic tasks. A methodology for creating MARC conformal antenna systems for such UAVs has been developed. The use of conformal antennas with substrates from metamaterials is one of the ways of implementing these CASs.

Keywords: multifunctional airborne radar complex, small and medium range UAVs, conformal antenna systems, metamaterials.