

Требования к бортовой антенне декаметрового диапазона

К. В. Бакурский, С. Ю. Сёмин, Р. Г. Никитин
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
e-mail: vka@mil.ru

Аннотация. The article analyzes the conditions in which the operation of the onboard HF antenna is possible. On the basis of the analysis, the difficulties associated with the development and application of the antenna under consideration are determined, as well as the requirements for it are put forward. Options for practical implementation of such an antenna are offered.

Ключевые слова: HF antenna; aircraft antenna

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжается внедрение воздушных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различные отрасли народного хозяйства. Сфера применения БПЛА достаточна широка – от контроля интересующей области до доставки различных грузов.

При выполнении задач, возложенных на БПЛА, чаще всего, связь с ним осуществляется по радиоканалу. Эффективность передачи (приема) информации по радиоканалу зависит от многих факторов и в частности от качества работы бортовой антенны БПЛА.

Приступая к разработке бортовых антенн (БА) следует, прежде всего, предъявить ряд требований к БА БПЛА, которые зависят от условий применения и функционального предназначения летательного аппарата.

Условия в которых функционируют БА БПЛА, можно разделить на следующие взаимосвязанные группы:

- 1) условия, связанные с назначением радиоаппаратуры БПЛА и видом сигнала, передаваемого по радиоканалу;
- 2) условия, связанные с особенностями распространения радиоволн;
- 3) условия, связанные с конструкцией и особенностями эксплуатации БПЛА.

II. ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН ДЛЯ СВЯЗИ С БПЛА

Вид информации, передаваемой по радиоканалу, определяет состав радиоаппаратуры БПЛА, а также параметры и характеристики и сигнала. Для передачи больших объемов данных с высокой скоростью требуется широкая полоса частот, занимаемая сигналом. Следовательно, для сигналов с относительно широким спектром следует повышать несущую частоту. Чаще всего для этих целей используется диапазон УКВ.

Однако в ряде случаев нет необходимости применять широкополосные сигналы. Так, для аварийного контроля состояния БПЛА или различных исследовательских задач можно использовать простые сигналы с узкой полосой частот. Для этих случаев могут применяться, например, сигналы с одной боковой полосой. Чтобы передавать сигналы с узким спектром можно использовать более низкочастотные диапазоны, например, декаметровый диапазон.

В настоящее время продолжается внедрение технологий Digital Radio Mondiale (DRM) – набора технологий цифрового радиовещания с возможностью передачи звуковой информации в диапазоне декаметровых волн (ДКМВ). По сравнению с амплитудной модуляцией технологии DRM позволяют передавать больше каналов с более высоким качеством, используя различные кодеки MPEG-4. Сигналы в системе DRM занимают полосу частот около 10–15 кГц. [1]

Кроме того, сегодня известна практика использования сигналов с очень узким спектром. У радиолюбителей для контроля прохождения электромагнитных волн декаметрового диапазона реализована сеть радиомаяков, использующая сигналы WSPR (Weak Signal Propagation Reporter). Сигналы WSPR позволяют передавать короткие сообщения с малой скоростью, занимают полосу частот около 6 Гц, при этом, по словам разработчиков, превышение уровня шумов над уровнем сигнала может достигать 28 дБ при двухминутных и 37 дБ при пятнадцатиминутных длительностях передачи. [2]

Таким образом, особенность сигналов, применяемых для связи с БПЛА, является фактором, определяющим выбор несущей частоты сигнала. Например, для сигналов с высокими несущими частотами (УКВ) применяются относительно компактные антенны, что удобно для их установки на борту. Однако, диапазон УКВ наряду с достоинствами имеет и недостатки связанные с дальностью распространения сигнала ограниченной прямой видимостью и ослаблением радиоволн при распространении в атмосфере.

Диапазон декаметровых волн (ДКМВ) имеет ряд особенностей при применении в радиосвязи, что позволяет его активно использовать для передачи сигнала на расстоянии свыше 300 км сравнительно малыми мощностями.

Следует отметить, что радиоволны этого диапазона могут распространяться земной, прямой и отраженной от ионосферы (скачковой) волной. При этом земные и пространственные волны вследствие сильного поглощения в земной поверхности и плохих условий дифракции распространяются на десятки километров, а отраженные от ионосферы волны могут распространяться на расстояние до 3000 км и их свойства не зависят от типа подстилающей поверхности, но зависят от факторов, влияющих на ионосферу. Пример трасс распространения (расчет получен при помощи программы PNaRLAP [3]), где передатчик расположен в месте с координатами 30° в.д. и 60° с.ш. в направлении 320° по азимуту на дату 10.03.2019, время 14.00, частота сигнала 7 МГц, для углов возвышения 20° – 50° приведен на рис. 1.

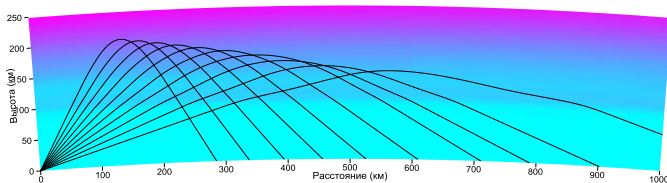


Рис. 1. Трассы распространения ДКМВ

Распространение ионосферной волной происходит путем последовательного отражения от слоя *F* (иногда слоя *E*) ионосферы и поверхности Земли. При этом волны проходят через нижнюю область ионосферы – слои *E* и *D*, в которых претерпевают поглощение. Для осуществления радиосвязи в диапазоне ДКМВ должны быть выполнены два условия: волны должны отражаться от ионосферы и напряженность электромагнитного поля в данном месте должна быть достаточной для приема, т. е. поглощение волны в слоях ионосферы не должно быть слишком большим. Эти два условия ограничивают диапазон применимых рабочих частот. В течение суток длина волны колебания должна меняться, в связи с отражением от разных областей ионосферы. Для более точного выбора длины волны можно рассчитать оптимальную рабочую частоту и ее зависимость от времени, что предъядит требования конструкции антенной системы и параметрам радиолинии. Также характерно наличие окон повышенного прохождения, когда один из пунктов связи находится в зоне восхода Солнца, а другой – в зоне захода.

Факторами влияющие на качество радиосвязи, в диапазоне ДКМВ, являются:

- частота колебаний, пропорциональная расстоянию распространения радиоволн;
- время суток (чем выше солнце, тем более высокую частоту необходимо использовать);
- погодные условия (наличие бури приводит резкому усилению шуму эфира, влияют и статические разряды молний);
- электрические помехи, вызванные техногенным характером района применения радиолинии;
- тип применяемой антенной системы и точность ее настройки.

К недостаткам систем связи этого диапазона волн можно отнести:

- высокое требование стабилизации частоты;
- неоднобразное распространение радиоволн в разное время суток и года;
- возникающие замирания сигнала, рассеяние радиоволн на неоднородностях ионосферы и интерференцией рассеянных волн, а также интерференцией обыкновенной и необыкновенной составляющих магниторасщепленной волны;
- наличие зоны молчания, связь в которой на данной длине волны невозможна, и размер зоны растет с укорочением волны.

Для борьбы с замираниями применяют приемные антенны с узкой диаграммой направленности, с ориентацией для приема только волны, пришедшей самым коротким путем. Направление прихода волны может меняться в течение суток и необходимо предусмотреть возможность изменения направления максимума диаграммы направленности антенны.

Работа радиолинии прежде всего нарушается на высоких частотах, а восстанавливается раньше на низких частотах. Сильно влияют на работу радиолинии нерегулярные явления – ионосферно-магнитные бури и появление спорадического слоя.

Ослабление поля в радиолиниях диапазона ДКМВ вызвано расходимостью волны, поглощением в ионосфере, отражением от поверхности Земли и другими причинами. Одним из основных методов расчета напряженности поля является метод, предложенный А.Н. Казанцевым. Наибольшую точность этот метод обеспечивает при расчете трасс, проходящих в средних широтах. С помощью этого метода рассчитаем действующее значение E_D напряженности поля в точке приема для случая одного отражения от ионосферы:

$$E_D = \frac{173 \sqrt{P_1 (\text{кВт}) D_1}}{r (\text{км})} \times 0,5 \times \frac{1+R}{2} \times e^{-\Gamma_{и}},$$

где P_1 – излученная мощность в кВт, D_1 – коэффициент направленного действия антенны, r – расстояние между передающим и приемным пунктом в км. Множитель (0,5) соответствует, уменьшению мощности на 6дБ. Из них 3 дБ за счет того, что приемная антенна имеет линейную поляризацию, а волна в процессе отражения от ионосферы приобретает эллиптическую (а иногда и круговую) поляризацию, а другие 3 дБ обусловлены тем, что волна в ионосфере расщепляется на обыкновенную и необыкновенную; необыкновенная составляющая сильно поглощается, а для приема оказывается полезной только половина излученной мощности. Множитель $\frac{1+R}{2}$ учитывает влияние отраженной от земли волны в месте расположения приемной антенны, множитель $\exp(-\Gamma_{и})$ учитывает поглощение в ионосфере, рассчитанное с помощью выражения [4]:

$$\Gamma_{И} = \frac{3 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos \varphi_D} + \frac{2,5 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos \varphi_E},$$

где $f_0 E$ – критическая частота слоя E, $f_0 E = 3,2$ МГц; φ_D , φ_E – углы наклонного падения волны на границу слоев D и E; f – частота колебания; f_L – продольная составляющая гиромагнитной частоты, $f_L = 1$ МГц.

Рассчитанная с помощью этого метода зависимость амплитуды напряжённости электрического поля $E_D(r)$, от расстояния r , для мощности передатчика 5 Вт, частоты сигнала $f = 7$ МГц, коэффициентом отражения $R=0,8$, коэффициентом направленного действия антенны $D_1 = 10$ для приведенной ранее трассы показан на рис. 2.

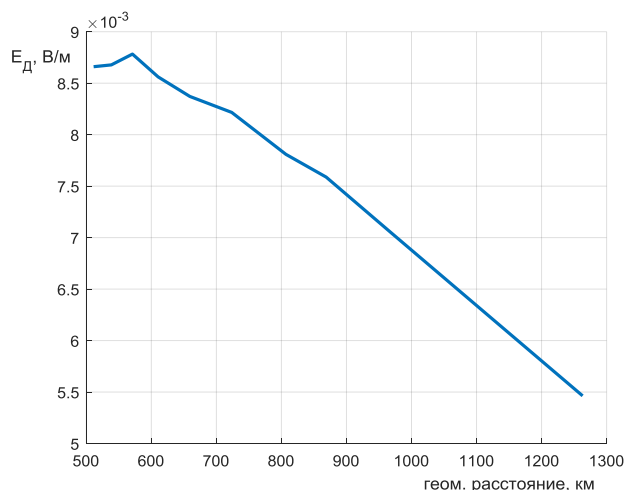


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля от длины трассы

Учет особенностей распространения волн ДКМВ диапазона позволит правильно определить параметры и характеристики БА БПЛА, а также выбрать место ее установки на борту.

III. БОРТОВЫЕ АНТЕННЫ ДКМВ ДИАПАЗОНА

Диапазон ДКМВ активно применяется в авиации в качестве связного диапазона в силу, описанных выше, свойств электромагнитных волн этого диапазона.

На практике применяются следующие виды самолетных антенн ДКМВ [5]:

- выпускные антенны;
- жесткие проволочные антенны (наружные и невыступающие);
- антенны, в качестве излучающей поверхности которых используется проводящий корпус самолета.

Выпускные антенны могут применяться в диапазонах волн от средневолновых. Такие антенны представляют

собой провод на одном конце, возбуждаемые источником, а на другом конце которого прикрепляется грузик. Антенна может выпускаться через специальное отверстие наружу или находиться в сложенном состоянии внутри самолета. Одним из главных недостатков такой антенны в выпущенном состоянии является затруднение маневра летательного аппарата, особенно это касается высокоскоростных самолетов. Однако в качестве полноразмерной антенны, выпускаемой наружу на короткое время такая антенна вполне применима для низкоскоростных летательных аппаратов.

Наружная жесткая проволочная антенна может служить в качестве альтернативного варианта бортовой антенны ДКМВ. Жесткая антенна, как и выпускная, представляет собой провод, однако его концы прикрепляются к частям корпуса летательного аппарата. Применение таких антенн в высокоскоростных летательных аппаратах нецелесообразно, ввиду значительного аэродинамического сопротивления таких антенн. Описанного выше недостатка лишены невыступающие жесткие проволочные антенны. Такие антенны могут быть размещены внутри корпуса летательного аппарата, изготовленного из радиопрозрачных материалов.

Часто корпус летательного аппарата или отдельные элементы его конструкции изготавливается из хорошо проводящих материалов. Следовательно, в диапазоне ДКМВ внешняя поверхность корпуса летательного аппарата или отдельные элементы его конструкции могут применяться в качестве антенны. Для возбуждения обшивки самолета или отдельных проводящих элементов фюзеляжа применяются генераторы, расположенные внутри корпуса летательного аппарата. По способу связи между генератором и обшивкой летательного аппарата различают антенны с емкостной, индуктивной, кондуктивной и дифракционной связями. Считается, что для более эффективного применения антенны ДКМВ размеры корпуса летательного аппарата должны быть сопоставимы с длиной волны излучаемого сигнала.

Наряду с описанными выше в диапазоне ДКМВ применяются рамочные антенны без сердечников и рамочные антенны с ферритовыми сердечниками [2]. Причем в качестве БА могут использоваться, как классические рамки различных форм, так и рамочные антенны с несколько измененной геометрией. [6]

Кроме, приведенных выше вариантов ДКМВ антенн, в радиолюбительской практике применяются варианты укороченных антенн данного диапазона с дополнительными реактивными элементами. Обычно такие антенны представляют собой вибраторные или рамочные антенны, к которым подключены реактивные элементы (так называемые удлинительные катушки индуктивности или конденсаторы). Также, в качестве варианта укороченной антенны диапазона ДКМВ может служить вибраторная антенна, плечи которой выполнены в виде спиралей. [7]

Среди современных БПЛА могут быть выделены летательные аппараты с большим (сотни-тысячи

километров) радиусом действия. В связи с ограничением по дальности связи на диапазоне УКВ на таких БПЛА целесообразна установка антенн диапазона ДКМВ.

При размещении антенн на борту воздушных летательных аппаратов, в частности БПЛА большого радиуса действия, следует обеспечить, прежде всего, соблюдение требований по аэродинамическим характеристикам, которые связаны со скоростью и высотой полета БПЛА.

Кроме того, современный летательный аппарат содержит на своем борту различные радиотехнические устройства для качественной работы которых, необходимо обеспечить электромагнитную совместимость этих устройств.

Также при полете БПЛА должен поддерживать связь с наземным пунктом управления, расположенным под любым курсовым углом.

С учетом выше перечисленного к БА БПЛА можно предъявить следующие требования:

- БА должна обеспечивать надежную связь с пунктом управления.
- БА должна обеспечивать работоспособность бортовой радиоэлектронной аппаратуры и экономию бортового энергоресурса.
- БА не должна значительно нарушать аэродинамические свойства летательного аппарата.
- БА должна быть максимально компактной и легкой.

IV. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕННИЮ БА БПЛА ДКМВ

На основе приведенных требований к бортовым антеннам можно предложить вариант такой антенны для обеспечения резервного канала связи с БПЛА дальнего радиуса действия.

БА БПЛА должна быть ненаправленной в горизонтальной плоскости для обеспечения связи с пунктом управления под любым курсовым углом.

Обычно БПЛА дальнего радиуса действия обладают значительными размерами. Например, размах крыльев БПЛА Дозор 600 составляет величину около 12 метров. Причем, крыло металлическое собранное по традиционной схеме из штампованных нервюр и сборного, клепаного

лонжерона. Также, крыло имеет металлическую обшивку [8]. Так как, крыло БПЛА вполне сравнимо с длиной волны около 20 метров (14 МГц) и 40 метров (7 МГц), то может служить антенной, представляющей полуволновый (для 20 метров) или четвертьволновый (для 40 метров) симметричный вибратор. Данные диапазоны ДКМВ достаточно устойчивы для прохождения ЭМВ и слабо зависят от суточных и сезонных условий прохождения ЭМВ.

Энергоресурс БПЛА дальнего радиуса действия чаще всего ограничен. Поэтому, для экономии электроэнергии, в качестве ответчика можно использовать пассивные системы, построенные по аналогии с метками RFID.

Также как было отмечено выше, кроме возбуждения проводящих элементов фюзеляжа интересен вариант использования укороченных антенн.

Для повышения эффективности коротких антенн они должны быть резонансными, должны быть хорошо согласованными с приемником и иметь малые собственные потери, которые могут быть скомпенсированы положительной обратной связью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] http://lib.broadcasting.ru/articles2/Regandstan/vnerd_drmvesh_na_territ_rf.
- [2] Бакурский К.В., Семин С.В. Коротковолновый канал связи с подвижными объектами / Сборник трудов 73-й научно-технической конференции СПб НТО РЭС имени А.С.Попова. СПб.: 2018. С. 17-19.
- [3] <https://www.dst.defence.gov.au/opportunity/pharlap-provision-high-frequency-raytracing-laboratory-propagation-studies>.
- [4] Попов Н.А., Чернова М.М., Макаев А.И. Территориальное распределение уровней сигнала различных частот на радиотрассах декаметрового диапазона волн от передатчика с антенной «диполь» / Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14, №6, С. 285-291.
- [5] Резников Г.Б. Самолетные антенны. М.: Советское радио, 1962. 456 с.
- [6] Ананьев А.В., Катруша А.Н. 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>.
- [7] Ротхаммель К., Кришке А. Энциклопедия антенн. М.: ДМК Пресс, 2016. 812 с.
- [8] https://www.ruvs.com/catalog/dozor_600.