

УДК 519.872:504.064.3

К. П. СТОРЧАК¹;В. Р. КОСЕНКО¹;О. А. МАШКОВ²,¹ Государственный университет телекоммуникаций, Киев;² Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЛИНИЙ СВЯЗИ С ДИСТАНЦИОННО ПИЛОТИРУЕМЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Рассматриваются требования, касающиеся формирования функционально-устойчивой системы связи при управлении дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами экологического мониторинга.

Ключевые слова: дистанционно пилотируемый летательный аппарат; связь; модуляция сигнала.

Введение

Использование дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) в системах мобильного экологического мониторинга предъявляет новые требования, касающиеся канала связи между ДПЛА и наземным комплексом управления (НКУ) [6–11]. Сегодня стал возможным автономный полет ДПЛА при полном отсутствии связи с НКУ, причем экологический мониторинг осуществим как в автономном, так и в управляемом с Земли режиме. Следует подчеркнуть, что при эксплуатации комплекса наряду с постоянным контролем состояния находящихся в воздухе ДПЛА требуется корректировка параметров полета в процессе мониторинга (в том числе уточнение задачи мониторинга). При этом весьма важно обеспечить функциональную устойчивость передачи большого объема данных от аппаратуры мониторинга (полезной нагрузки) ДПЛА на НКУ согласно заданным требованиям по полосе пропускания, вероятности битовой ошибки и другим требованиям [6–11].

Основная часть

Повышенные требования по функциональной устойчивости комплекса управления предъявляются к оборудованию ДПЛА, которое осуществляет навигацию и самолетовождение, обеспечивая при необходимости режимы ручной посадки, а также к сервоприводам и системе автоматического спасения (САС). Поломка любого элемента бортового оборудования приводит к немедленному прекращению выполнения полетного задания и возврату ДПЛА к месту посадки. Если же это невозможно, срабатывает САС и происходит выброс парашюта.

В случае применения малых (взлетная масса до 5 кг) ДПЛА при ограничениях по габаритным размерам и массе приемопередающего оборудования мониторинга имеет смысл использовать единый радиоканал связи для передачи командно-телеметрических данных и результатов мониторинга.

Посадка малых ДПЛА может осуществляться при помощи парашюта.

Для удовлетворения требованиям по пропускной способности канала связи при передаче данных телеметрии и полезной нагрузки необходимо расширять полосу частот приемопередающего оборудования, а также использовать спектрально-эффективные методы модуляции. Это, в свою очередь, приводит к повышенным требованиям, касающимся отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника. В то же время снижается дальность действия радиосистемы, повышается вероятность битовой ошибки и т. д.

На комплексах ДПЛА со взлетной массой более 5 кг целесообразно использовать отдельные радиолинии связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. При этом на первый план выходят вопросы электромагнитной совместимости приемопередающего оборудования, частотного разделения каналов связи и размещения антенно-фидерного оборудования на борту ДПЛА.

Для систем связи малых ДПЛА решающими факторами при выборе частотного диапазона являются масса и габаритные размеры бортового приемопередатчика, а также антенно-фидерного устройства (АФУ). Целесообразен выбор диапазона сверхвысоких частот (СВЧ), когда удается создать антенну малых размеров, способную разместиться в профиле крыла. Плотная компоновка оборудования внутри малого ДПЛА не позволяет эффективно использовать приемопередатчики большой мощности с укороченными антеннами ультракоротковолнового диапазона (УКВ) из-за проблем с электромагнитной совместимостью и большим влиянием окружающих объектов на характеристики антенны. Один из подходящих частотных диапазонов — диапазон 2,4 ГГц [1–4].

К системам связи ДПЛА среднего и большого класса предъявляются более жесткие требования по дальности работы, помехозащищенности и вероятности битовой ошибки. В этом случае воз-

© К. П. Сторчак, В. Р. Косенко, О. А. Машков, 2017

можним и оптимальним становится комплексирование нескольких каналов связи, работающих в разных частотных диапазонах (рис. 1).

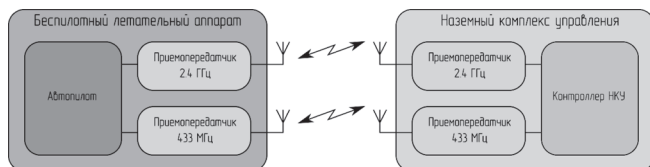


Рис. 1. Вариант комплексирования радиоканалов связи

Наличие нескольких каналов связи повышает надежность системы передачи данных, являясь, однако, избыточным с точки зрения эффективного использования радиочастотного спектра. Один из способов повышения эффективности комплексированной системы связи заключается в адаптивной работе указанной системы, подразумевающей передачу по командно-телеметрическим каналам связи части данных полезной нагрузки, объем которых варьируется в зависимости от текущих условий передачи радиосигнала [6–11].

Как правило, максимальное расстояние для прямой радиосвязи между ДПЛА экологического назначения и НКУ не превышает 100 км. Для командно-телеметрической связи на больших расстояниях возможно применение спутниковой связи. В этом случае поток данных ограничивается минимально необходимой информацией о состоянии ДПЛА. Временной интервал передачи может равняться, например, 30...300 с [6–11].

Перспективное направление в развитии систем связи с ДПЛА экологического мониторинга предполагает использование частотных диапазонов выше 5 ГГц. При этом становится возможной передача большого объема данных полезной нагрузки в режиме реального времени (это могут быть изображения с датчиков излучения различного диапазона длин волн). К факторам, резко ограничивающим радиус действия радиосистемы связи при использовании указанных диапазонов, относятся сильная зависимость характера распространения электромагнитных волн от погодных условий, а также необходимость прямой видимости.

Возможные ситуации взаимного расположения ДПЛА и НКУ иллюстрирует рис. 2. Для обеспечения связи на значительных расстояниях приходится увеличивать расстояние до радиогоризонта для наземной и бортовой антенн. Область воздушного пространства можно условно подразделить на три зоны: зону освещенности, зону полутени и зону тени. Зона полутени (в ней находится ДПЛА №1) является переходной между зоной освещенности (ДПЛА №2), в которой еще возможен уверенный прием, и зоной тени, прием в которой может быть осуществлен только благодаря дифракции сигнала вокруг земной поверхности [1–5].



Рис. 2. Зоны освещенности, полутени и тени

Зависимость максимальной дальности радиосвязи от высоты полета ДПЛА при некоторых заданных высотах подъема антенны НКУ приведена на рис. 3.

Что же касается зависимости максимальной дальности связи от высоты подъема антенны НКУ, то она весьма слабая. Поэтому высота мачты для установки наземной антенны определяется необходимостью снижения влияния многолучевости, с учетом возможных препятствий на пути распространения сигнала (рельеф и застройка местности).

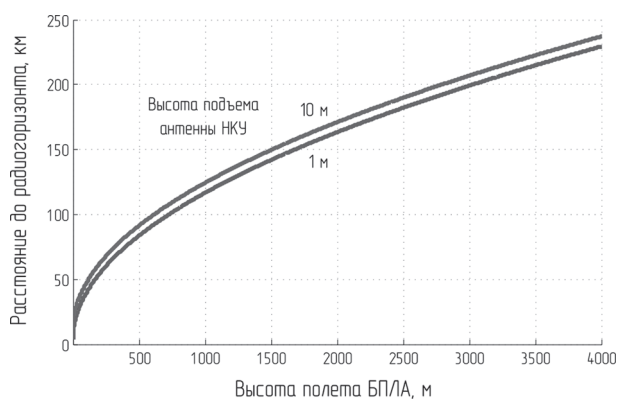


Рис. 3. Максимальная дальность связи в зависимости от высоты подъема антенны наземного комплекса управления

В зависимости от рабочей дальности полета ДПЛА роль антенны НКУ могут играть либо антенны с большим коэффициентом направленного действия (КНД), либо слабонаправленные антенны. Для антенн с большим КНД необходимо применение опорно-поворотного устройства и системы слежения за ДПЛА. Это обусловлено тем, что ширина основного лепестка диаграммы направленности (ДН) таких антенн, как правило, менее 10° . Так как к наземному оборудованию не предъявляются жесткие требования по массово-габаритным характеристикам, применять в качестве антенны НКУ сканирующую цифровую антенную решетку (АР) не всегда имеет смысл ввиду высокой ее стоимости. Однако указанные АР целесообразно использовать для одновременного слежения за несколькими ДПЛА.

Выбор вида модуляции сигнала в приемопередатчике ДПЛА весьма важен. Для сравнения различных видов модуляции воспользуемся критериями

спектральної та енергетическої ефективності. При цьому енергетическа ефективність визначається як енергія, яку необхідно затратити на передачу одного біта інформації з заданою достовірністю, а спектральна ефективність — як полоса частот, необхідна для передачі інформації з визначеною швидкістю.

Основним вимогою при створенні системи зв'язу з ДПЛА слід вважати забезпечення можливості передачі даних з заданою швидкістю та ймовірністю помилки при великих відстанях між ЛА та НКУ. Необхідна швидкість передачі телеметричних даних з борту ДПЛА на Землю дорівнює 115 200 біт/с при ймовірності біткової помилки, не перевищує 10^{-8} . В деяких випадках допустимо зниження швидкості до 38 400 біт/с для підтримання ймовірності біткової помилки на тому ж рівні. Порівняти енергетическу ефективність деяких видів модуляції дозволяє рис. 4.

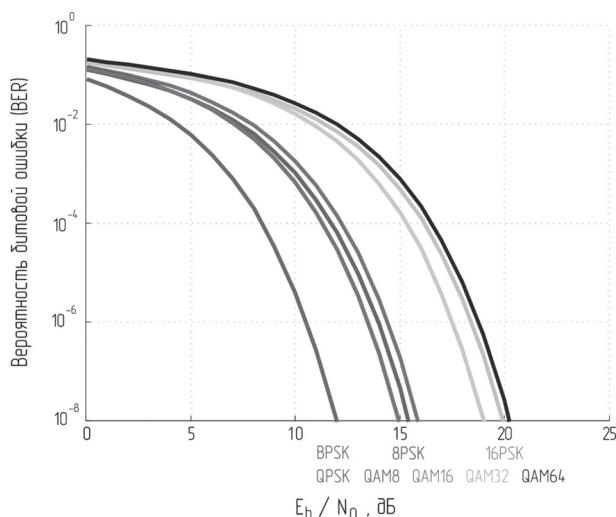


Рис. 4. Вероятность битовой ошибки для различных видов модуляции (когерентное детектирование, идеальная синхронизация, без кодирования)

Легко увидеть, что с увеличением позиционности модуляции вероятность битовой ошибки возрастает. Следовательно, для поддержания заданного уровня битовой ошибки необходимо увеличивать ОСШ на входе приемника. Поэтому использовать многопозиционную модуляцию оправдано только при малых расстояниях между ДПЛА и НКУ. Для обеспечения максимальной дальности связи необходимо применять наиболее выгодные в энергетическом плане виды модуляции — такие как двоичная фазовая модуляция (BPSK) и квадратурная фазовая модуляция (QPSK). В большинстве случаев квадратурная амплитудная модуляция превосходит по эффективности различные виды частотной модуляции. Фазовая модуляция в идеальных условиях имеет более высокую (приблизительно на 1...3 дБ) помехоустойчивость в сравнении с фазоразностной [6–11].

Анализ канала связи подразумевает проведение расчетов полезной мощности сигнала и мощности шума в приемнике с учетом всех этапов передачи радиосигнала. Потери радиосигнала на трассе рассчитываются по формуле [5]:

$$L = 20 \lg \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right),$$

где L — потери на распространение в свободном пространстве, дБ; D — расстояние между приемником и передатчиком, м; λ — длина волны, м.

Рассмотрим зависимость затухания сигнала от расстояния между ДПЛА и НКУ для двух частот (рис. 5). Затухание сигнала в диапазоне 2,4 ГГц при расстоянии между БПЛА и НКУ 30 км составит 130 дБ. Для компенсации такого затухания необходимо задействовать все возможные способы, в том числе повышение коэффициента усиления антенны (главным образом, наземной), применив энергетически выгодные виды модуляции и повысив выходную мощность передатчиков до максимально разрешенной.

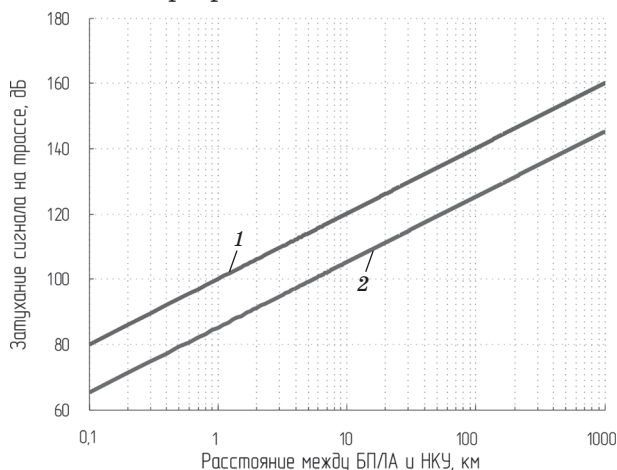


Рис. 5. Затухание сигнала на трассе в зависимости от расстояния между ДПЛА и НКУ для двух частот: 1 — 2,4 ГГц; 2 — 433 МГц

Проведенный анализ показал, что для обеспечения связи между бортом ЛА и НКУ в диапазоне 2,4 ГГц на расстоянии 30 км необходимо иметь наземную антенну с большим (свыше 20 дБ) коэффициентом усиления. Ширина ДН такого типа антенн менее 10° , что налагает ограничения на применение их в условиях близкого полета ЛА. Целесообразно использовать два типа антенн для различной дальности полета ДПЛА: с усилением около 8 дБ при ближнем полете и более 20 дБ — при дальнем полете. Требования к опорно-поворотному устройству антенны НКУ определяются исходя из ширины ДН антенны: допустимая погрешность установки поворотной платформой азимутального угла и угла возвышения антенны не должна превышать половины ширины ДН. В случае установки антенны с усилением 27 дБ ширина ДН будет близка к 6° , а допустимая погрешность составит 3° .

При изменении расстояния между ДПЛА и НКУ в широких пределах мощность сигнала на входе приемника будет изменяться примерно на 50 дБ (рис. 6, при изменении расстояния от 500 м до 100 км), что позволяет использовать энергетический запас при малых расстояниях для передачи большего объема информации без изменения ширины полосы частот. Реализация данного подхода требует использования алгоритмов адаптивного изменения вида модуляции цифровой системы связи.

Переход от одного вида модуляции к другому позволит повысить спектральную эффективность системы связи (см. рис. 6). Наиболее эффективное решение — создание универсального квадратурного модулятора со следующими видами модуляции: BPSK, QPSK, QAM16, QAM32 и т. д.

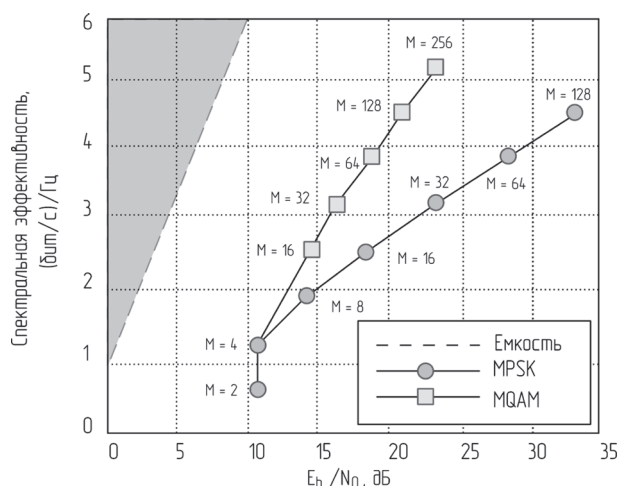


Рис. 6. Сравнение спектральной эффективности различных видов модуляции

Выводы

• Современная система связи наземного комплекса управления с ДПЛА на уровне обработки сигнала должна быть реализована как программно-определяемая радиосистема. Это позволит в зависимости от условий прохождения сигнала на трассе ДПЛА – НКУ адаптивно изменять виды модуляции, выходную мощность передатчика, виды

канального кодирования сигнала, параметры расширения его спектра, скорость передачи данных, соотношение времени передачи и приема для полудуплексных каналов связи, а также параметры шифрования передаваемых данных.

• По возможности необходимо использовать управляемые антенные решетки или направленные антенны с поворотным устройством на борту ДПЛА и два типа автоматически переключаемых антенн НКУ: остронаправленную на опорно-поворотном устройстве (или АР) и ненаправленную.

• Одной из актуальных задач является создание сетевых систем связи с кодовым разделением, позволяющих передавать данные как между ДПЛА и НКУ, так и транзитом через все доступные ДПЛА. При этом для обеспечения устойчивой связи с удаленными ДПЛА возможно использовать малые ДПЛА в качестве ретрансляторов сигнала.

Список использованной литературы

1. **Машков, О. А.** Науково-технічне супроводження аерокосмічних технологій для екологічного моніторингу та прогнозування стану природного середовища / [О. А. Машков, Р. К. Н. Аль-Тамімі, Д. Д. Х. Ламі, В. Р. Косенко] // Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології» (17–20 листопада 2015 р.).— К.: ДУТ.— 2015.— Том III.— С. 27–29.

2. **Машков, О. А.** Теоретические основы создания функционально-устойчивого комплекса управления групповым полетом беспилотных летательных аппаратов экологического мониторинга / [О. А. Машков, М. В. Коробчинский, А. Н. Щукин, О. Р. Ярема] // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць.— 2012.— Вип. 66.— С. 215–223.

3. **Машков, О. А.** Методы и технические средства экологического мониторинга / О. А. Машков, В. Э. Васильев, В. Ф. Фролов // Екологічні науки.— 2014.— № 1(5).— С. 57–67.

4. **Машков, О. А.** Исследование свойств функционально-устойчивого комплекса управления групповым полетом БПЛА экологического мониторинга / [О. А. Машков, М. В. Коробчинский, А. Н. Щукин, О. Р. Ярема] // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць.— 2012.— Вип. 65.— С. 202–214.

5. **Основы синтеза систем летательных аппаратов** / Под ред. А. А. Лебедева.— М.: Машиностроение, 1987.— 224 с.

Рецензент: доктор техн. наук, профессор С. В. Козелков, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

К. П. Сторчак, В. Р. Косенко, О. А. Машков

ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ РАДІОЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ З ДИСТАНЦІЙНО-ПІЛОТОВАНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ ПРИ ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ

Розглянуто вимоги до формування функціонально-стійкої системи зв'язку при керуванні дистанційно пілотованим літальним апаратом екологічного моніторингу.

Ключові слова: дистанційно пілотований літальний апарат; екологічний моніторинг; зв'язок; модуляція сигналу.

К. P. Storchak, V. R. Kosenko, O. A. Mashkov

TO THE QUESTION OF PROVIDING THE FUNCTIONAL STABILITY OF RADIOLINIC COMMUNICATION WITH REMOTE PILOATED AIRCRAFTS IN ENVIRONMENTAL MONITORING

The article considers the requirements for the formation of functionally stable communication systems for the management of remotely piloted aircrafts of environmental monitoring.

Keywords: remote piloted aircraft; environmental monitoring; signal modulation.