

УДК 621.396.4:623.746.4-519

АНАЛИЗ РАДИОЛИНИЙ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Р.А. РАЦ

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: russelraz@gmail.com

Аннотация: В статье рассматриваются ключевые аспекты построения радиолиний связи с беспилотными летательными аппаратами. Проведен анализ распространения радиоволн УКВ-диапазона, классификации трасс, выбора частотного диапазона и типов модуляции. Особое внимание уделено энергетическому расчету линии, а также компромиссу между помехоустойчивостью и спектральной эффективностью.

Abstract: This article examines key aspects of constructing radio communication links for unmanned aerial vehicles. It analysis VHF radio wave propagation, classifies paths, selects frequency ranges and modulation types. Particular attention is paid to link energy calculations and tradeoff between noise immunity and spectral efficiency.

Введение

Интенсивное развитие беспилотной авиации требует пересмотра классических подходов к проектированию каналов связи. В отличие от стационарных радиорелейных линий, канал связи с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) характеризуется непрерывным изменением геометрии трассы, жесткими массогабаритными ограничениями бортового оборудования и необходимостью передачи критически важной телеметрии в режиме реального времени [1].

Особенности распространения и геометрия трассы

Радиолинии БПЛА работают преимущественно в диапазоне ультракоротких волн (УКВ, $f > 30$ МГц), где основным механизмом распространения является прямая видимость [2]. Основной способ распространения УКВ — это распространение волн в пределах прямой видимости как показано на рис. 1.

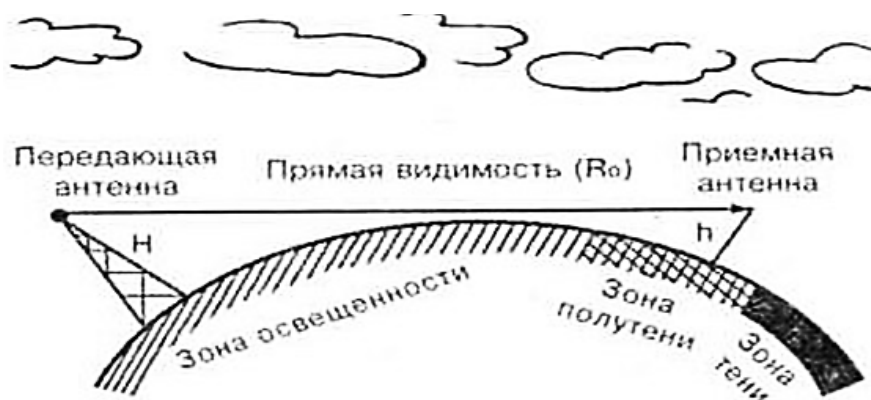


Рис.1. Прямая видимость между приёмной и передающей антеннами.

Предельная дальность действия определяется высотами подъема антенн носителя и наземного комплекса управления (НКУ). Без учета атмосферной рефракции расстояние прямой видимости описывается классической формулой (1):

$$r_0 = \sqrt{2a}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1)$$

С учетом стандартной тропосферной рефракции эквивалентный радиус Земли увеличивается, и формула принимает вид (2):

$$r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),_{\text{км}} \quad (2)$$

Трассу принято делить на три характерные зоны: освещенности, полутени ($0,8r_0 \leq r \leq 1,2r_0$) и тени [1, с. 145]. Качество связи напрямую связано с просветом трассы H_0 — кратчайшим расстоянием между линией «передатчик-приемник» и профилем трассы. Трасса считается открытой, если просвет H_0 больше или равен радиусу минимальной зоны Френеля [3]. В противном случае трасса классифицируется как полукрытая или закрытая на рис.2, что сопровождается глубокими замираниями сигнала из-за дифракции на препятствиях и требует закладывания энергетического запаса на замирания.

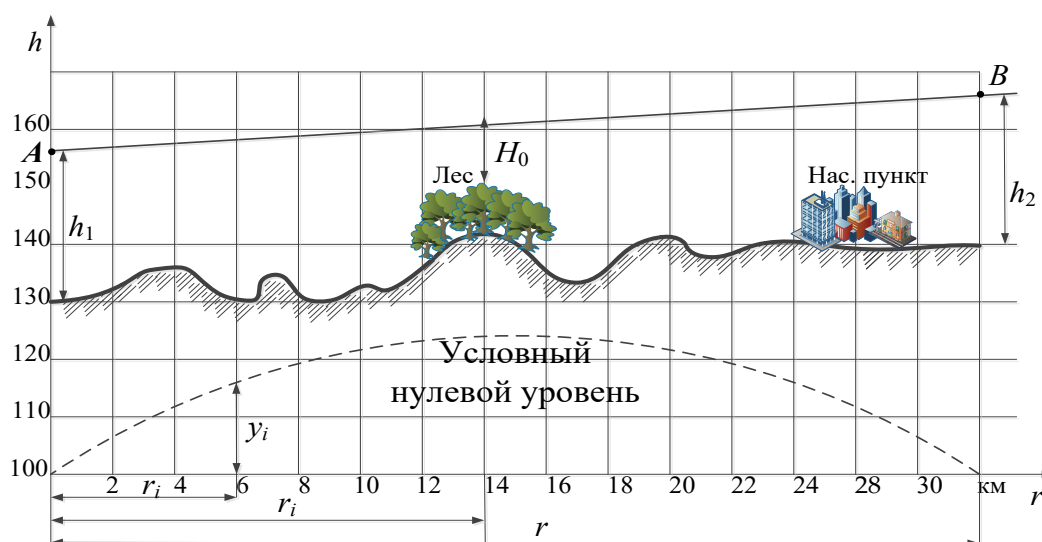


Рис. 2. Профиль трассы с учетом рефракции

Выбор частотного диапазона и дальность связи

Выбор несущей частоты — это компромисс между размерами антенных систем и условиями распространения. Малые БПЛА (до 5 кг) тяготеют к диапазону СВЧ (например, 2,4 ГГц), поскольку размеры антенн позволяют встраивать их заподлицо в крыло без ущерба аэродинамике. Для средних и больших БПЛА актуально комплексирование каналов с адаптивным распределением трафика.

Диапазоны выше 5 ГГц привлекательны широкими полосами для передачи потокового видео и данных в реальном времени, однако они имеют существенные ограничения: высокое затухание в гидрометеорах, строгое требование прямой видимости и негативное влияние многолучевого распространения [3]. На таких частотах цифровые системы должны обладать механизмами эквализации и разнесенного приема [4].

В условиях прямой связи БПЛА–НКУ достижима дальность до 100 км. При необходимости работы за пределами прямой видимости используется спутниковый канал, однако из-за высоких задержек интервал передачи данных увеличивается до 30–300 секунд. Высота подъема антенны НКУ (обычно не более 10 м) слабо влияет на абсолютную дальность, так как основной вклад дает высота полета БПЛА [2]. Вместе с тем этот параметр принципиально важен для снижения коэффициента отражения от подстилающей поверхности и борьбы с многолучевостью (рис. 3).

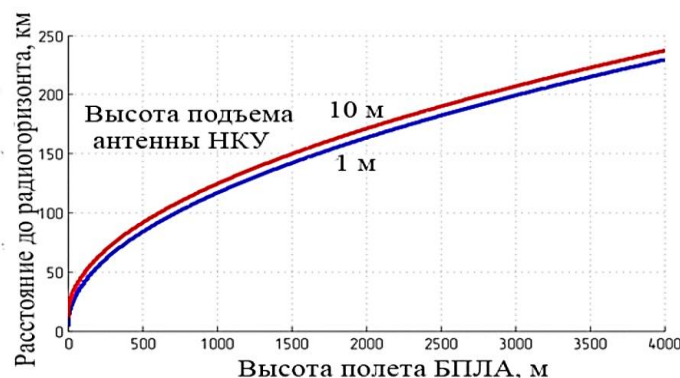


Рис. 3. Максимальная дальность связи в зависимости от высоты подъема антенн БПЛА и НКУ

К системам связи БПЛА среднего и большого класса предъявляются более жесткие требования по дальности работы, помехозащищенности и вероятности битовой ошибки. В этом случае является возможным и оптимальным комплексирование нескольких каналов связи, работающих в разных частотных диапазонах как представлено на рис.4.

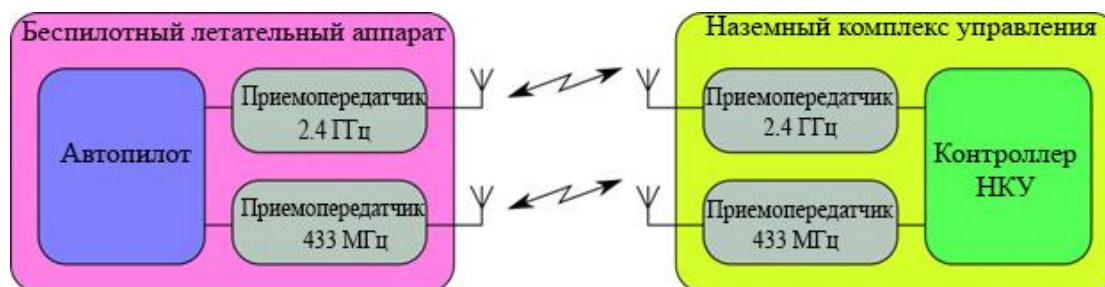


Рис.4. Пример комплексирования радиоканалов связи

В зависимости от рабочей дальности полетов БПЛА, в качестве антенны НКУ используются либо антенны с большим коэффициентом направленного действия (КНД), либо слабонаправленные антенны. Для антенн с большим КНД необходимо использование опорно-поворотного устройства и системы слежения за БПЛА, так как ширина основного лепестка диаграммы направленности (ДН) таких антенн, как правило, менее 10° . Так как к наземному оборудованию не предъявляется жестких требований по массо-габаритным характеристикам, использование в качестве антенны НКУ сканирующей цифровой антенной решетки (АР) не всегда оправдано ввиду ее большой стоимости, за исключением случаев использования АР для одновременного слежения за несколькими БПЛА.

Энергетический расчет и выбор типа модуляции

Ключевым этапом анализа является расчет энергетического баланса линии. Потери в свободном пространстве определяются выражением (3):

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right), \quad (3)$$

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

Для определения мощности теплового шума на входе приемника применяется формула (4):

$$N = kTB \quad (4)$$

где N – мощность шума, Вт; k – постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура, К; B – ширина полосы пропускания, Гц.

Для диапазона 2,4 ГГц на дистанции 30 км потери составляют порядка 130 дБ [5]. Это предъявляет жесткие требования к чувствительности приемного тракта. Мощность теплового шума на входе приемника при ширине полосы $B = 22$ МГц и шумовой температуре $T = 320$ К составляет $N = -100$ дБм.

Типовые требования к каналу связи БПЛА включают скорость передачи 115200 бит/с при значения вероятности битовой ошибки $PBER = 10^{-8}$ отношении $E_b/N_0 = 12$ дБ, для $PBER = 10^{-3}$ отношение $E_b/N_0 = 7$ дБ, при отношении $R/BT = 0,5$ получим следующие ОСШ на входе приемника: 9 дБ и 4 дБ соответственно. Мощность сигнала на входе приемника должна быть не ниже уровня мощности шума на данные величины.

С точки зрения помехоустойчивости и максимальной дальности связи наибольшую эффективность обеспечивают двоичная (BPSK) и квадратурная (QPSK) фазовая. QPSK предпочтительнее, так как при равной с BPSK вероятности ошибки на бит она занимает вдвое меньшую полосу частот, то есть обладает вдвое большей спектральной эффективностью [6].

Использование квадратурной амплитудной модуляции (QAM) высокой размерности позволяет дополнительно выиграть в спектральной эффективности, однако это требует существенно большего отношения сигнал/шум. С ростом позиционности модуляции пороговый SNR растет, что при фиксированной мощности передатчика ведет к сокращению дальности связи [6]. Следовательно, в каналах с ограниченным энергетическим бюджетом целесообразно применять BPSK/QPSK, тогда как в условиях высокой мощности и дефицита частотного ресурса оправдан переход к QAM-64 и выше (рис. 5).

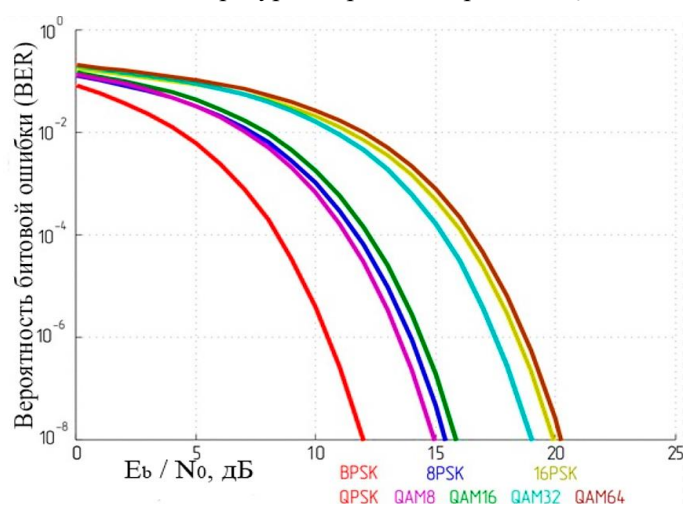


Рис. 5. Вероятности битовой ошибки для различных видов модуляции

Заключение

Таким образом, эффективная радиолиния БПЛА строится на компромиссе между энергетической эффективностью, помехозащищенностью, массогабаритными ограничениями и требуемой дальностью. Теоретический анализ подтверждает, что для обеспечения связи на предельных дистанциях с высокой надежностью необходим системный подход: учет рефракции и зон Френеля при расчете трасс, рациональный выбор частотного диапазона под класс БПЛА, применение направленных антенн с автоматическим сопровождением и адаптивный выбор типа модуляции в зависимости от текущего отношения сигнал/шум.

Список использованных источников

1. Austin R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. — Chichester: John Wiley & Sons, 2010. — 368 p.
2. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. — М.: Связь, 1972. — 336 с.
3. Recommendation ITU-R P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. — Geneva: International Telecommunication Union, 2021.
4. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. — 2nd ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. — 1079 p.
5. Recommendation ITU-R P.525-4. Calculation of free-space attenuation. — Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
6. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2003. — 1104 с.