

УДК 621.396.933

**Р.І. Дмитрук,
І.М. Коротєєв,
М.В. Думанський**

АНАЛІЗ РАДІОЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

У статті розглянуто науково-технічні аспекти побудови різних радіоканалів зв'язку в малих і надмалих безпілотних авіаційних комплексах. Висвітлено питання щодо ймовірності безвідмовної роботи комплексу, визначення оптимальних технічних рішень, видів модуляції сигналу та спектральних характеристик сигналу корисного навантаження літального апарату.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, автопілот, корисне навантаження, сервоприводи, система автоматичного рятування.

В статье рассмотрены научно-технические аспекты построения различных радиоканалов связи в малых и сверхмалых беспилотных авиационных комплексах. Освещены вопросы относительно вероятности безотказной работы комплекса, определения оптимальных технических решений, видов модуляции сигнала и спектральных характеристик сигнала полезной нагрузки летательного аппарата.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, автопилот, полезная нагрузка, сервоприводы, система автоматического спасения.

Paper deals with the scientific and technical aspects of building of various radio channels of communication in small and microscopic unmanned aviation systems. Several issues about the probability of failure of the complex, determining the optimal technical solutions, types of modulation signal and spectral characteristics of the signal payload of the aircraft are highlighted.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs), autopilot, servomechanism, automatic rescue.

Стрімкий розвиток систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за кордоном і розвиток радіоелектроніки змушують постійно переглядати вимоги, висунуті до каналів зв'язку між БПЛА і наземним комплексом керування (НКК).

На сьогодні стало можливим здійснення керування польотом БПЛА за допомогою автопілота (АП) за повної відсутності зв'язку між бортом літального апарату (ЛА) і НКК. При цьому льотне завдання виконується в автономному режимі. Тим не менше це не дозволяє вести мову про те, що командно-телеметрична радіолінія зв'язку може бути виключена зі складу БПЛА. У зв'язку з підвищеною складністю і вартістю комплексу, під час його експлуатації необхідний постійний контроль за станом ЛА у повітрі. Крім того, іноді постає необхідність у коригуванні параметрів польоту БПЛА.

Актуальним завданням також є передача даних корисного навантаження ЛА на НКК. У цьому випадку потрібно забезпечити передачу великого обсягу даних при заданих вимогах по смузі пропускання каналу зв'язку, ймовірності бітової помилки та ін.

При створенні малих і надмалих БПЛА висуваються вимоги з мінімізації розмірів приймально-передавального та антенно-фідерного обладнання.

У випадку малих БПЛА (злітна маса до 5 кг) внаслідок обмежень за габаритами і масою є раціональним використання приймально-передавального обладнання з єдиним радіоканалом зв'язку для передачі командно-телеметричних даних і даних корисного навантаження. Посадка таких ЛА здійснюється, як правило, за допомогою парашута, що не вимагає додаткового радіоканалу зв'язку для передачі зображення з відеокамер ЛА, необхідного при ручній посадці. Додатковим радіоканалом зв'язку є лише лінія передачі даних САР. Для забезпечення вимог з пропускну здатності каналу зв'язку при передачі як даних телеметрії, так і даних корисного навантаження необхідно розширювати смугу частот приймально-передавального обладнання і використовувати спектрально-ефективні методи модуляції, що призводить до підвищених вимог стосовно сигналу/шуму (ВСП) на вході приймача, зниження відстані дії радіосистеми, підвищення ймовірності бітової помилки і т.д.

На комплексах БПЛА зі злітною масою більше 5 кг доцільним є використання окремих радіоліній зв'язку для передачі командно-телеметричних даних і даних корисного навантаження. При цьому на перший план виходять питання електромагнітної сумісності приймально-передавального обладнання, частотного поділу каналів зв'язку та розміщення антенно-фідерного обладнання на борту БПЛА.

Вибір робочого частотного діапазону радіоканалу зв'язку обумовлюється кількома факторами:

- вимогами до маси, габаритів і споживання приймально-передавального пристрою БПЛА;
- необхідною відстанню роботи при заданій ймовірності бітової помилки;
- можливістю отримання ліцензії на використання в необхідному діапазоні або можливістю безліцензійної роботи.

Для систем зв'язку малих БПЛА вирішальними факторами при виборі частотного діапазону є маса і габарити бортового приймача та антенно-фідерного пристрою (АФП). Доцільним є вибір діапазону надвисоких частот (НВЧ), при цьому вдається створити антену малих розмірів, здатну розміститися в профілі крила. Щільне компонування устаткування всередині малого БПЛА не дозволяє ефективно використовувати передавачі великої потужності з укороченими антенами ультракороткохвильового діапазону (УКХ) внаслідок проблем з електромагнітною сумісністю і великим впливом навколишніх об'єктів на характеристики антени. Одним з відповідних частотних діапазонів є діапазон 2,4 ГГц.

До систем зв'язку БПЛА середнього і великого класу пред'являються більш жорсткі вимоги по відстані роботи, завадозахищеності та ймовірності бітової помилки. У цьому випадку є можливим і оптимальним дублювання декількох каналів зв'язку, що працюють у різних частотних діапазонах (рис. 1).

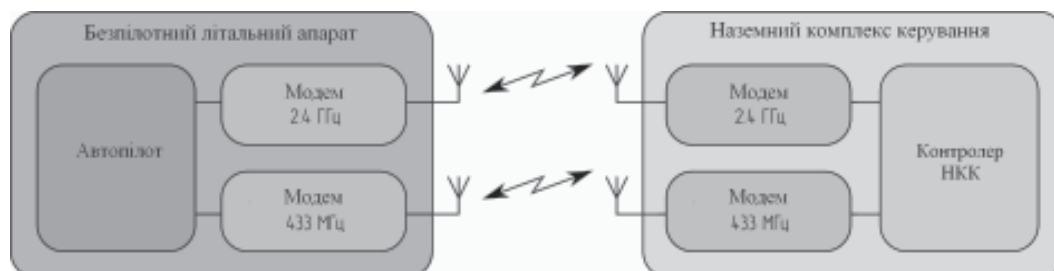


Рис. 1. Приклад дублювання радіоканалів зв'язку

У процесі роботи системи зв'язку (рис. 1) оцінюються ймовірності бітової помилки для кожного каналу зв'язку і приймається рішення про розподіл командно-телеметричного потоку даних між каналами. Використання декількох каналів зв'язку підвищує надійність системи передачі даних і водночас є надлишковим з точки зору ефективного використання радіочастотного спектра. Одним зі способів підвищення ефективності дублювання системи зв'язку є адаптивна робота системи, яка має на меті передачу по командно-телеметричним каналам зв'язку частини даних корисного навантаження, обсяг яких змінюється залежно від наявних умов передачі радіосигналу.

Як правило, максимальна відстань для прямого радіозв'язку між БПЛА та НКК на сьогодні становить не більше 100 км. Для командно-телеметричного зв'язку на великих відстанях можливе використання супутникового зв'язку. У цьому випадку потік даних обмежується мінімально необхідною інформацією про стан БПЛА, інтервал передачі якої може становити, наприклад, від 30 до 300 секунд.

Перспективним напрямом у розвитку систем зв'язку з БПЛА є використання частотних діапазонів вище 5 ГГц. При цьому стає можливою передача великого обсягу даних корисного навантаження в режимі реального часу (наприклад, це можуть бути зображення з датчиків випромінювання різного діапазону довжин хвиль). Факторами, які раптово обмежують радіус дії радіосистеми зв'язку при використанні даних діапазонів, є сильна залежність умов розповсюдження електромагнітних хвиль від погодних умов, необхідність прямої видимості і вплив багатопробеневого розповсюдження радіохвиль.

Розглянемо можливі ситуації взаємного розташування БПЛА та НКК (рис. 2). Для забезпечення зв'язку на великих відстанях необхідно збільшувати відстань до радіогоризонту для наземної і бортової антен. Максимальна дальність радіозв'язку (без урахування впливу різних видів атмосферної рефракції) визначатиметься сумою відстані радіогоризонту для антени НКК та БПЛА. При цьому зону повітряного простору можна умовно розділити на зону освітленості, зону півтіні і зону тіні (рис. 2). Зона півтіні (в ній знаходиться БПЛА № 1) є перехідною між зоною освітленості (БПЛА № 2), в якій ще можливий впевнений прийом, і зоною тіні, прийом в якій може бути здійснений тільки завдяки дифракції сигналу навколо земної кулі.

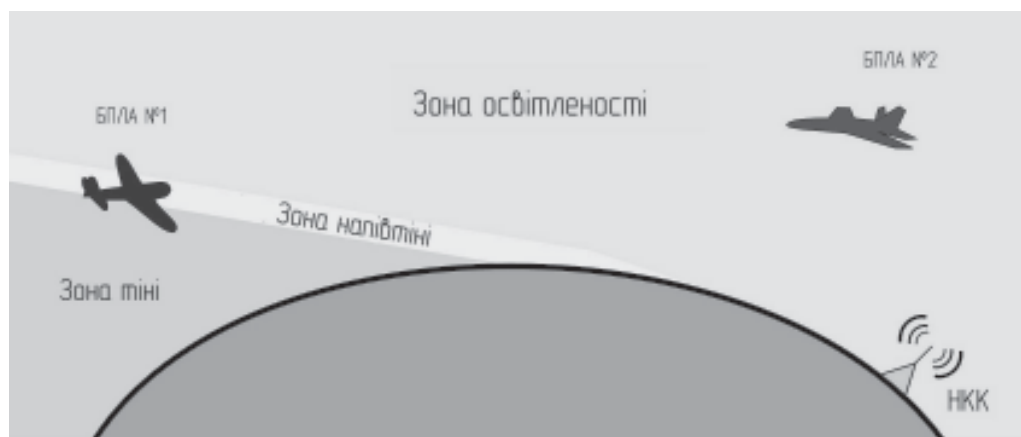


Рис. 2. Зони освітленості, півтіні та тіні.

Максимальна дальність радіозв'язку визначається як [1]:

$$r_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

де: h_1 – висота підйому першої антени, м;
 h_2 – висота підйому другої антени, м;
 r_0 – максимальна дальність радіозв'язку, км.

Як правило, антена НКК є мобільною і встановлюється на висоті не більше 10 м. На рис. 3 показана залежність максимальної дальності радіозв'язку від висоти польоту БПЛА при деяких заданих висотах підйому антени НКК.

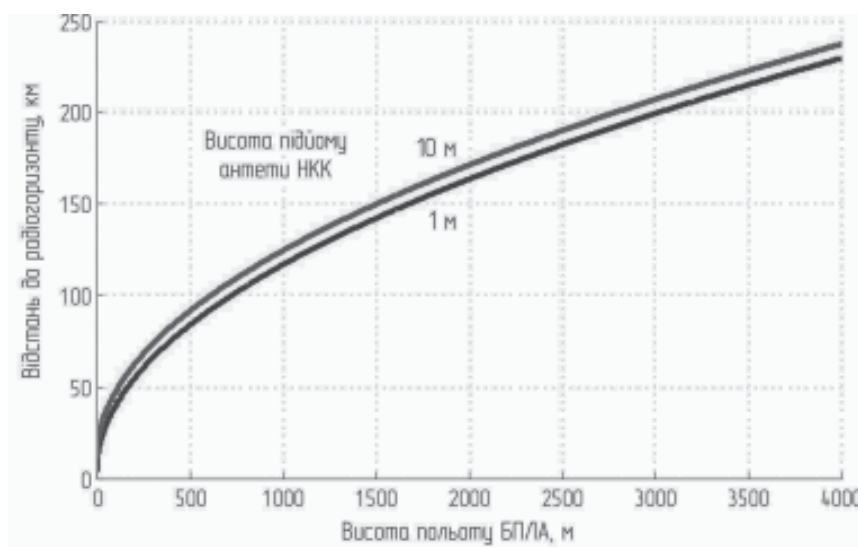


Рис. 3. Максимальна дальність зв'язку в залежності від висоти підйому антен БПЛА и НКК

Як видно з рис. 3, залежність максимальної дальності зв'язку від висоти підйому антени НКК слабка, тому висота щогли для установки наземної антени визначається необхідністю зниження впливу багатопроменевості, з урахуванням можливих перешкод на шляху поширення сигналу (рельєф місцевості, будівлі).

Залежно від робочої дальності польотів ЛА, як антена НКК використовуються або антени з великим коефіцієнтом направленої дії (КНД), або антени з малою спрямованістю. Для антен з великим КНД необхідне використання поворотного пристрою і системи спостереження за ЛА, так як ширина основної пелюстки діаграми направленості (ДН) таких антен, як правило, менше 10° . Так як до наземного обладнання не пред'являється жорстких вимог до масово-габаритних характеристик, використання як антени НКК скануючої цифрової антенної решітки (АР) не завжди виправдане з огляду на її велику вартість, за винятком випадків використання АР для одночасного стеження за декількома ЛА.

Розглянемо питання вибору виду модуляції сигналу в прийомопередавачі.

При порівнянні різних видів модуляції користуються критеріями спектральної та енергетичної ефективності. При цьому енергетична ефективність визначається як енергія, яку необхідно витратити на передачу одного біта інформації

із заданою вірогідністю, а спектральна ефективність визначається як смуга частот, яка необхідна для передачі інформації з певною швидкістю. Основною вимогою при створенні системи зв'язку з БПЛА є забезпечення можливості передачі даних із заданою швидкістю і ймовірністю помилки при великих відстанях між ЛА і НКК. Типове значення необхідної швидкості передачі телеметричних даних з борту ЛА на землю становить 115 200 біт/сек при ймовірності бітової помилки не більше 10^{-6} ... 10^{-8} . У деяких випадках допустиме зниження швидкості до 38 400 біт/сек для підтримки ймовірності бітової помилки на тому ж рівні. Максимальне значення смуги частот, займаних радіосистемою, обмежується вимогами Національної комісії з питань регулювання зв'язку (НКРЗ) і залежить від робочого діапазону частот і типу роботи (ліцензійна, безліцензійна). Наприклад, для діапазону частот 2,4 ГГц смуга займаних частот за рівнем -3 дБ не повинна перевищувати 15 МГц, а по нулях спектра – не більше 22 МГц (необхідно зазначити, що це рішення регулює використання смуги частот 2 400–2 483,5 МГц). Таким чином, доцільним є повне використання дозволеного частотного діапазону з застосуванням методів розширення спектру (пряме розширення спектру, розширення спектру методом псевдовипадкової перебудови носійної частоти). Для забезпечення максимальної дальності зв'язку в цьому випадку необхідно використовувати найбільш енергетично ефективні методи модуляції. На рис. 4 показано порівняння енергетичної ефективності деяких видів модуляції.

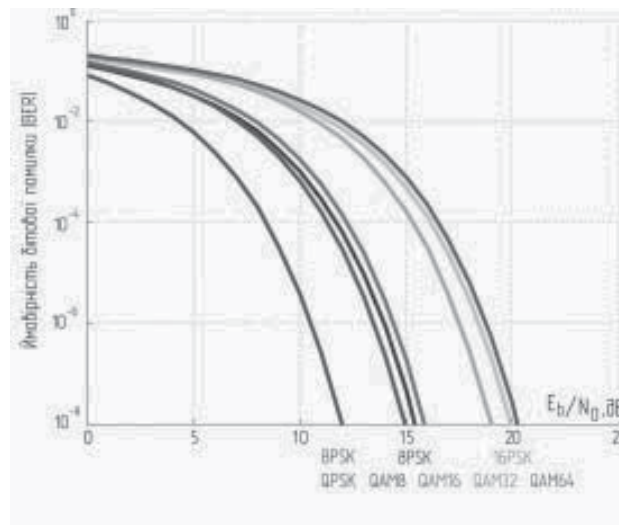


Рис. 4. Ймовірності бітової помилки для різних видів модуляції (Когерентне детектування, ідеальна синхронізація, без кодування)

Як видно з рис. 4, зі збільшенням позиційності модуляції ймовірність бітової помилки збільшується, тобто для підтримки заданого рівня бітової помилки необхідно збільшувати ВСШ на вході приймача. Тому доцільним є використання багатопозиційної модуляції тільки при малих відстанях між ЛА і НКК. Для забезпечення максимальної дальності зв'язку необхідно використовувати енергетично найбільш ефективні види модуляції – такі як двійкова фазова маніпуляція (BPSK) і квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) (рис. 4). Варто зазначити, що при однаковій енергетичній ефективності цих видів модуляцій QPSK у два рази спектрально ефективніше ніж BPSK (без урахування міжсимвольної інтерференції). У загальному випадку, в умовах обмеженої смуги частот, найбільш ефективним методом модуляції є квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМ, QAM),

що визначається найбільшими відстанями між точками в сигнальному сузір'ї на відміну від простої фазової маніпуляції або амплітудної маніпуляції. У більшості випадків квадратурна амплітудна маніпуляція більш ефективна ніж різні види частотної маніпуляції [2]. Число рівнів маніпуляції визначається ВСШ на вході приймача, яке найпростіше знайти через оцінку ймовірності бітової помилки по відомій залежності (рис. 4).

Для когерентного детектування сигналів BPSK і QPSK необхідне застосування схем відновлення носійної коливання в приймачі (схема зі зведенням сигналу в квадрат, петля Костаса та ін.). При цьому виникає проблема вирішення фазової неоднозначності відновлюваного несучого коливання, яка може бути вирішена декількома способами:

- використанням фазо різносної маніпуляції (ФРМ);
- введенням унікальної послідовності біт перед блоком даних, що дає гострий автокореляційний пік при прийомі сигналу;
- використанням методів каналного кодування.

Фазова маніпуляція в ідеальних умовах має більш високу завадостійкість у порівнянні з ФРМ (на $\sim 1-3$ дБ) [3]. Велике розповсюдження систем з ФРМ пояснюється їх більш простою реалізацією, що на сьогодні не є принциповим чинником.

Аналіз каналу зв'язку має на увазі проведення розрахунків корисної потужності сигналу і потужності шуму в приймачі з урахуванням усіх етапів передачі радіосигналу.

Втрати радіосигналу на трасі розраховуються за формулою [2]:

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

де: L – втрати на розповсюдження у вільному просторі, дБ;

D – відстань між приймачем та передавачем, м;

λ – довжина хвилі, м.

Розглянемо залежність згасання сигналу від відстані між БПЛА і НКК для двох частот (рис. 5).

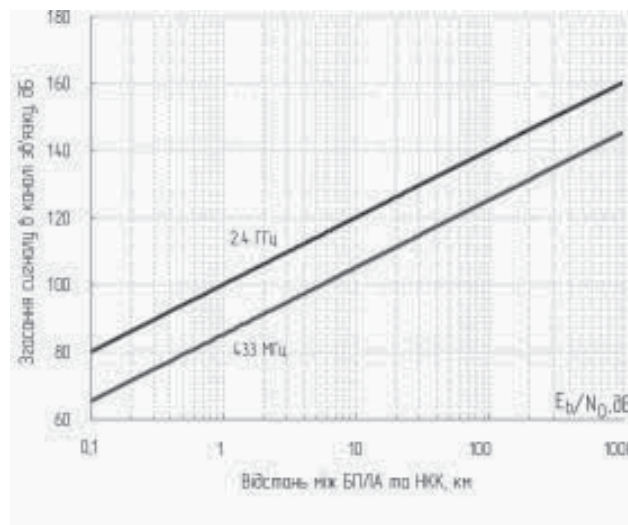


Рис. 5. Загасання сигналу на трасі в залежності від відстані між БПЛА і НКК для двох різних частот

Як видно з рис. 4, загасання сигналу в діапазоні 2,4 ГГц при відстані між БПЛА і НКК 30 км становитиме 130 дБ. Для компенсації такого загасання необхідно використовувати всі можливі способи, в тому числі підвищення коефіцієнта посилення антен (головним чином наземної), використання енергетично вигідних видів модуляції (рис. 3), підвищення вихідної потужності передавачів до максимально дозволеної.

Визначимо потужність теплового шуму на вході приймача за формулою [2]:

$$N = kTB,$$

де: N – потужність шуму, Вт;
 k – постійна Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
 T – температура, К;
 B – ширина полоси пропускання, Гц.

При максимально можливій ширині смуги частот для діапазону 2,4 ГГц, $B=22$ МГц [1] і температурі $T=320$ К потужність теплового шуму на вході приймача буде: $N = -100$ дБм.

Розрахуємо необхідну ВСШ на вході приймача для досягнення заданої якості зв'язку [2]:

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R}{B_T},$$

де: E_b – енергія біта інформації, Вт · с;
 N_0 – спектральна щільність потужності шуму, Вт/Гц;
 R – швидкість передачі даних, біт/сек;
 B_T – полоса пропускання, Гц.

Для значення ймовірності бітової помилки $P_{BER} = 10^{-8}$ відношення $E_b/N_0 = 12$ дБ, для $P_{BER} = 10^{-3}$ відношення $E_b/N_0 = 7$ дБ (рис. 5), при відношенні $R/B_T = 0,5$ отримуємо такі ВСШ на вході приймача: 9 дБ і 4 дБ відповідно. Потужність сигналу на вході приймача повинна бути не нижче рівня потужності шуму на дані величини. Крім того, значення необхідних ВСШ можуть бути зменшені при спектральному розширенні сигналу. Так, наприклад, при розширенні спектра прямою послідовністю Баркера завдовжки 11 біт графік залежності значення ймовірності бітової помилки від ВСШ (рис. 4) зміститься вліво, ВСШ $P_{BER} = 10^{-8}$ на ~ 5 дБ.

Зведемо в таблицю отримані дані (таблиця 1).

Таблиця 1

Аналіз каналу зв'язку

Найменування позиції	Підсилення/послаблення, дБ (дБм)	Разом, дБм
Вихідна потужність передавача	+30	+30
Втрати у фідері і штекерах НКК	-1,5	+28,5
Підсилення антени НКК	+24	+52,5
Втрати на розповсюдження (2,4 ГГц, 30 км)	-130	-77,5
Підсилення бортової антени	+2	-75,5
Втрати у бортовому фідері і штекерах	-1,5	-77
Чутливість приймача	-90	+13
Разом, (по каналу зв'язку)		13

Як видно з таблиці 1, для забезпечення зв'язку між бортом ЛА та НКК у діапазоні 2,4 ГГц на відстані 30 км необхідно мати наземну антену з великим коефіцієнтом підсилення (більше 20 дБ). Ширина діаграми спрямованості (ДС) такого типу антен менше 10° , що накладає обмеження на застосування їх в умовах близького польоту ЛА. Є доцільним використання двох типів антен для різних відстаней для БПЛА: з підсиленням ~ 8 дБ для умов ближнього польоту і більше 20 дБ для умов дальнього польоту. Вимоги до поворотного обладнання антени НКК визначаються, виходячи з ширини ДС антени: допустима похибка установки поворотної платформи азимутального кута і кута піднесення антени не повинна перевищувати половину ширини ДС. У разі встановлення антени з підсиленням 27 дБ ширина ДС матиме приблизно 6° , тоді допустима похибка становитиме 3° .

При зміні відстані між ЛА і НКК в широких межах потужність сигналу на вході приймача буде змінюватися на ~ 50 дБ (рис. 5), при зміні відстані від 500 м до 100 км, що дозволяє використовувати енергетичний запас при малих відстанях для передачі більшого обсягу інформації без зміни ширини смуги частот. Реалізація цього підходу вимагає створення алгоритмів адаптивної зміни виду модуляції цифрових систем зв'язку.

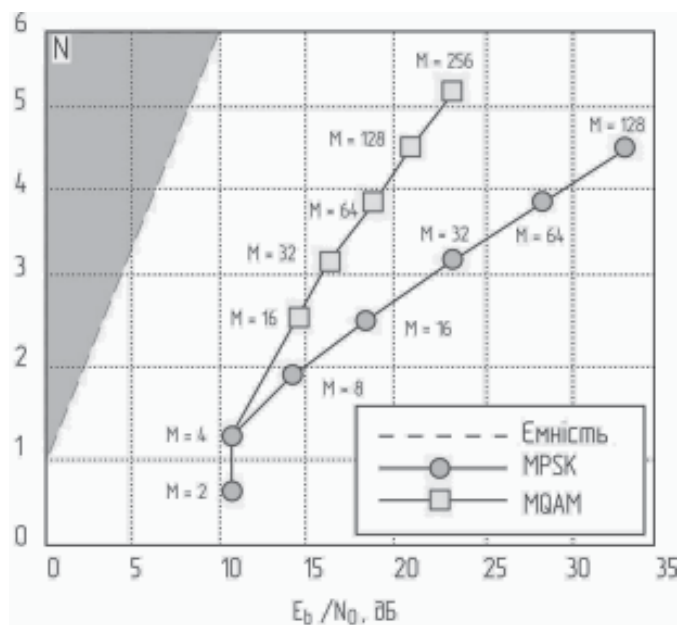


Рис. 6. Порівняння спектральної ефективності різних видів модуляції

Перемикання між різними видами модуляції дозволить підвищити спектральну ефективність системи зв'язку (рис. 6). Найбільш ефективним рішенням є створення універсального квадратурного модулятора з такими видами модуляції: BPSK, QPSK, QAM16, QAM32 і т. д.

Таким чином, сучасна система зв'язку НКК з БПЛА на рівні обробки сигналу повинна бути реалізована як програмно-адаптивна радіосистема, що дозволяє залежно від умов проходження сигналу на трасі БПЛА – НКК адаптивно змінювати види модуляції, вихідну потужність передавача, види каналного кодування сигналу, параметри розширення спектра сигналу, швидкість передачі даних, співвідношення часу передачі і прийому для напівдуплексних каналів

зв'язку, параметри шифрування переданих даних. По можливості необхідно використовувати керовані антенні решітки або спрямовані антени з поворотним пристроєм на борту ЛА і два типи автоматично перемикаючих антен НКК: гостронаправлену на поворотному пристрої (або АР) і ненаправлену. Одним з актуальних завдань на сьогодні є створення мережевих систем зв'язку з кодовим поділом, що дозволяють передавати дані як між БПЛА і НКК, так і транзитом через всі доступні БПЛА. При цьому для забезпечення стійкого зв'язку з віддаленим БПЛА можна використовувати малі БПЛА як ретранслятори сигналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн / М.П. Долуханов. – М. : Связь, 1972. – 336 с.
2. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2003. – изд. 2-е, испр. – 1104 с.
3. *Окунев Ю.Б.* Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами / Ю.Б. Окунев. – М. : Радио и связь, 1991. – 296 с.
4. *Прокис Д.* Цифровая связь / Д. Прокис. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.

Отримано 07.10.2014.