

УДК 629.73:358.421:621.396.43

**ОГОРОДНІЙЧУК М. Д.**, головний науковий співробітник, доктор технічних наук, професор

**ЦЕЛИЩЕВ І. Ю.**, начальник науково-дослідної лабораторії, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**ШЕВЧЕНКО Д.Г.**, ад'юнкт Національного університету оборони України ім. Івана Черняховського

## **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВИХ РАДІОЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ**

*Запропоновано методику визначення основних характеристик широкосмугових радіоліній зв'язку з безпілотним авіаційним комплексом: ширини смуги пропускання, потужності передавачів, чутливості приймачів, характеристик антен*

*Ключові слова: широкосмугові радіолінії, зв'язок з безпілотним авіаційним комплексом, ширина смуги пропускання, потужність передавача, чутливість приймача*

**Вступ.** Аналіз літератури останніх років [1...3] свідчить, що актуальною проблемою нині є створення умов для дій військ (сил) в єдиному інфокомунікаційному (адресному) просторі, ефект від сумісних і узгоджених дій в якому істотно перевищить суму ефектів від їх розрізнених і недостатньо узгоджених дій. Однак для досягнення такого ефекту інформаційна база має швидко наповнюватись точними розвідданими, зокрема даними про місцеположення важливих рухомих та нерухомих об'єктів противника і їх критичних точок.

Для здобуття точних розвідданих застосовуються, зокрема, безпілотні авіаційні комплекси (БпАК). Для передачі розвідданих (рис. 1) до наземної станції (НС) з великих відстаней можуть знадобитись ретранслятори: безпілотниковий (БР), літаковий (ЛР) або супутниковий (СР). Для швидкої передачі великого об'єму цифрових даних потрібні радіолінії зв'язку (РЛЗ) з високою пропускнуою спроможністю, здатні передавати як мінімум потік стандарту Е3. Такі радіолінії мають бути широкосмуговими, а це можна забезпечити в діапазоні дециметрових і більш коротких радіохвиль.

**Постановка задачі.** Задача полягає в обґрунтуванні методики розрахунку потужності передавачів, чутливості приймачів, основних характеристик антен, ширини смуги пропускання таких радіоліній. Радіолінії зв'язку, що розглядаються, наведені на рис. 1. Серед них РЛЗ.1 передбачає прямий зв'язок між наземною станцією (НС) і безпілотним авіаційним комплексом (БпАК). Він найпростіший, але через кривизну поверхні Землі забезпечує найменшу відстань прямої видимості. Інші варіанти зв'язку вимагають використання ретранслятора на безпілотному літальному апараті (БР, РЛЗ.2), або літакового ретранслятора (ЛР, РЛЗ.3), або супутникового ретранслятора (СР, РЛЗ. 4, 5), що перебуває на геостаціонарній орбіті (ГЕО) з висотою 35835 км.

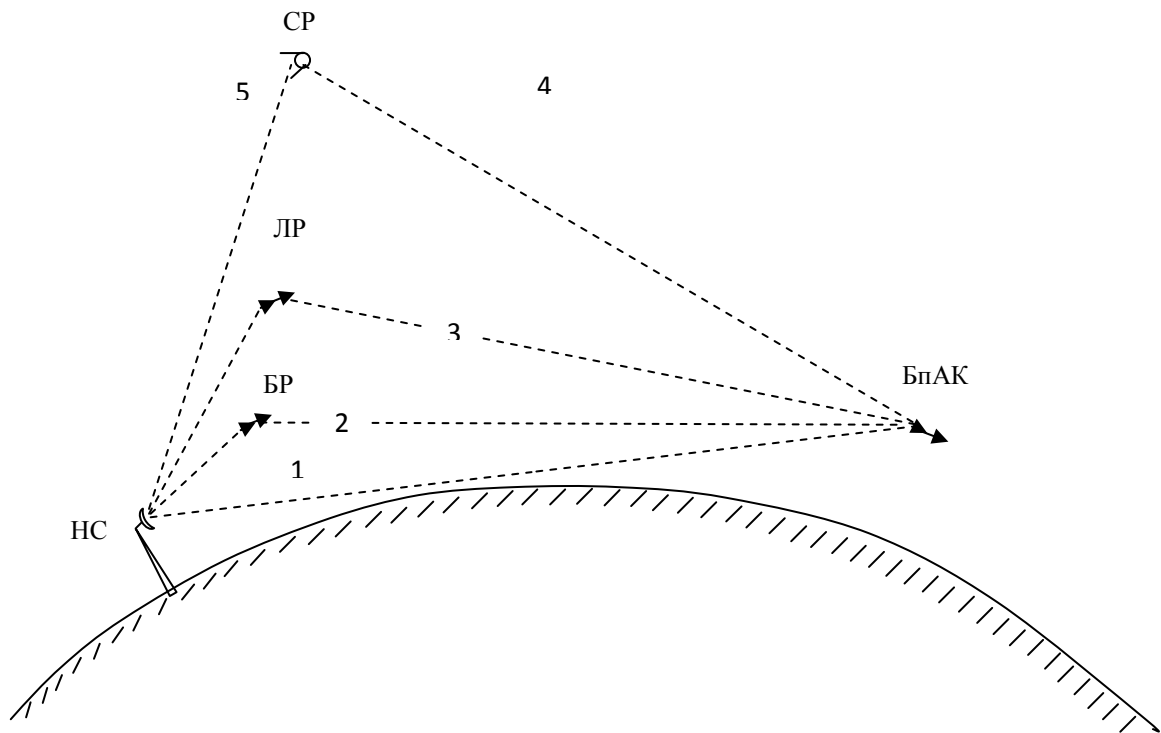


Рис. 1. Варіанти схем радіозв'язку

*Вихідні дані:* наземна станція розташована в десятках кілометрів від лінії бойового зіткнення, висота підняття її антени – відома; супутниковий ретранслятор перебуває на геостаціонарній орбіті, літаковий та безпілотний ретранслятори баражують неподалік від наземної станції, їх максимальні висоти і швидкості польоту – відомі; глибина проникнення БпАК на територію розвідки визначається дальністю прямої видимості відповідних ретрансляторів, максимальні висота і швидкість польоту БпАК теж відомі; відомі також площі розкриття дзеркал усіх антен, діапазони робочих частот (хвиль), необхідна швидкість передавання інформації, допустима ймовірність бітових помилок, координати усіх об'єктів зв'язку.

**Методика визначення характеристик радіоліній та її обґрунтування.** Якість військового зв'язку складається зі своєчасності, достовірності і скритності. Усі складові якості у більшому чи меншому ступені визначаються енергетичною ефективністю радіолінії. З неї й почнемо обґрунтування методики.

1. *Енергетична ефективність радіолінії*

$$h^2 = E_\sigma / N_0 = P_c / P_{ш}, \quad (1)$$

де  $E_\sigma$  – енергія символу, яким передається біт інформації;  $N_0$  – спектральна щільність потужності шуму;  $P_c / P_{ш}$  – відношення потужностей сигнал/шум на вході вирішувального пристрою (ВП) радіоприймача з інформаційною шириною смуги пропускання  $\Pi_i = 1/T_\sigma$ , що обернено пропорційна тривалості символу  $T_\sigma$ . Від  $h^2$  безпосередньо залежить ймовірність бітових помилок  $p_\sigma$ , що характеризує достовірність зв'язку, а опосередковано залежить і своєчасність, тому що на виявлення і усунення помилок потрібен додатковий час.

В радіолініях зв'язку ймовірність бітових помилок має не перевищувати  $10^{-2}$ . В таблиці 1 наведена залежність між ймовірністю бітових помилок  $p_\sigma$  і безрозмірним відношенням потужностей сигнал/шум  $h^2$  на вході ВП радіоприймача для різних методів маніпуляції: найкращого, двох часто застосовуваних і найгіршого (за енергетичною ефективністю  $h^2$ ). Компромiсними (за достовірністю і енергетичною

ефективністю) є квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) і частотна маніпуляція з мінімальним зсувом частот (ЧМн з МЗЧ). Вони відносяться до “економних” методів маніпуляції.

Таблиця 1

Залежність  $p_n$  від  $h^2$  для різних методів маніпуляції ЦС

$p_n$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$h^2$ при когерентній ФМн	0,8	2,5	4,5	6,7	-	-
$h^2$ при когерентній QPSK	1,3	3,1	4,9	6,8	8,6	10,4
$h^2$ при когерентній ЧМн з МЗЧ	1,3	3,1	4,9	6,8	8,6	10,4
$h^2$ при некогерентній ЧМн	3,2	7,4	12,5	16,6	-	-

Залежність, наведену в таблиці 1, можна представити формулою

$$p_n = 0,5 \exp(-ah^2), \quad (2)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що залежить від виду маніпуляції. Використовуючи формулу (2), можна показати, що для QPSK і ЧМн з МЗЧ  $a = 1,26$ . Це дає можливість екстраполювати залежність (2) для значень  $p_n = 10^{-5}$  і  $10^{-6}$  (таблиця 1).

Отже, використовуючи значення допустимої ймовірності помилок  $p_n$ , можна з допомогою таблиці 1 або формули

$$h^2 = -(\ln 2p_n) / a \quad (3)$$

визначити енергетичну ефективність  $h^2$  радіолінії, що знадобиться для визначення чутливості її радіоприймачів.

2. *Ширина смуги пропускання.* Згідно з вихідними даними, треба забезпечити швидкість  $V$  передавання інформації, що відповідає потоку  $EЗ$ . З цього виходить, що тривалість символу, який переносить біт інформації

$$T_\delta = 1/V, \quad (4)$$

а ширина спектра первинного сигналу

$$F_c = 1/T_\delta. \quad (5)$$

При застосуванні економного метода маніпуляції, яким є когерентна двійкова ЧМн з МЗЧ [7], частота зсуву

$$\Delta f_{zc} = 1/(2T_\delta), \quad (6)$$

девіація частоти

$$f_\delta = \Delta f_{zc}/2 = 1/(4T_\delta), \quad (7)$$

а модуляційна частота

$$F_m \cong 1/(2T_\delta). \quad (8)$$

Оскільки девіація істотно менша модуляційної частоти, то, згідно [9], ширина спектра частотно-модульованого сигналу і інформаційна ширина смуги пропускання

$$\Delta f_c \cong 2F_m = 1/T_\delta. \quad (9)$$

Згідно [5, 6] ширина  $\Pi$  смуги пропускання радіоприймального пристрою (РПП) визначається шириною спектра сигналу, що приймається  $\Delta f_c$ , доплерівським зсувом частотного спектра сигналу  $\Delta f_\delta$ , запасом  $\Delta f_3$  на неточність налаштування та нестабільність частот сигналу і гетеродинів, наявністю автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) з коефіцієнтом  $K_{анч}$ :

$$\Pi = \Delta f_c + (2\Delta f_\delta + \Delta f_3)/K_{анч}. \quad (10)$$

Допплерівський зсув частотного спектра

$$\Delta f_d = f_c V_e / V_p, \quad (11)$$

де  $f_c$  – максимальна частота з відведеного радіолінії діапазону частот;  $V_e$  – максимальна відносна швидкість руху об'єктів зв'язку;  $V_p$  – швидкість поширення радіохвиль.

Для розрахунку запасу  $\Delta f_3$  припустимо, що використовується РПП з подвійним перетворенням частоти, з проміжними частотами  $f_{n1}$ ,  $f_{n2}$ , з верхнім настроюванням гетеродинів, з першим перестроюваним гетеродином. Тоді, згідно з [5],

$$\Delta f_3 = 2\sqrt{(\delta_c f_c)^2 + (\delta_{c1} f_{c1})^2 + (\delta_{c2} f_{c2})^2 + (\delta_n f_{c1})^2}. \quad (12)$$

У формулі (12) можна використати рекомендовані в [5] значення відносних нестабільностей частот сигналу і гетеродинів  $\delta_c = \delta_{c1} = \delta_{c2} = 10^{-6}$  і відносної неточності настроювання частоти першого гетеродину  $\delta_n = 10^{-3}$ .

Підставивши у формулу (10) визначені за формулами (9, 11, 12) значення ширини спектра сигналу, доплерівського зсуву частот, запасу на нестабільності і неточність, а також рекомендованого в [5] значення  $K_{анч}=20$ , дістанемо значення ширини смуги пропускання радіоприймального пристрою. В разі необхідності, цю ширину можна зменшити майже в 2-3 рази при застосуванні квадратурної амплітудної маніпуляції (QAM).

3. Чутливість РПП характеризує його здатність приймати слабкі сигнали. Кількісно вона оцінюється мінімальним рівнем приймаемого сигналу  $P_{с\ min}$ , за якого інформація, що передається, відтворюється з необхідною достовірністю.

В режимі узгодження [5, 6]

$$P_{с\ min} = \kappa T_o \Pi_{ш}(t_a + N - 1) h^2, \quad (13)$$

де  $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – стала Больцмана;  $T_o = 293^\circ K$  – абсолютне значення кімнатної температури;  $\Pi_{ш} = 1,1П$  – шумова смуга пропускання РПП [5];  $N = 7$  – коефіцієнт шуму РПП (в наземних радіорелейних станціях  $N = 3 \dots 7$ );  $h^2$  – енергетична ефективність радіолінії, що визначена за формулою (3);  $t_a$  – відносна шумова температура антени, що визначається за формулою

$$t_a = T_A / T_o, \quad (14)$$

де еквівалентна шумова температура антени

$$T_A = T_o (1 - \eta) + (T_k + T_a + T_3) \eta, \quad (15)$$

що залежить від складових, які визначаються [5] шумами космосу  $T_k$ , атмосфери  $T_a$ , Землі  $T_3$ , і від коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) антени  $\eta = 0,75$ . Підставивши ці дані у формулу (15), одержимо  $T_A$ , після чого за формулою (14) отримаємо  $t_a$ .

Отже, для забезпечення достовірності відтворення, не гіршої від заданої, потужність сигналу на вході РПП має бути не меншою чутливості  $P_{с\ min}$ , розрахованої за формулою (13).

4. Дальність прямої видимості необхідна для визначення максимальної потужності передавача. Вона визначається в кілометрах за формулою

$$D_n = K_n (\sqrt{h_i} + \sqrt{h_j}), \quad (16)$$

де  $h_i$ ,  $h_j$  – максимальні висоти підняття антен  $i$ -го і  $j$ -го об'єктів зв'язку в метрах;  $K_n$  – коефіцієнт, що змінюється в межах 3,56...4,12 залежно від рівня атмосферної

рефракції. Для оцінки максимальної дальності прямої видимості доцільно використати  $K_n=4,12$ .

5. Коефіцієнт підсилення антени і ширина  $\theta$  діаграми спрямованості в градусах визначаються [4, 7], відповідно за формулами

$$G = 4\pi\epsilon S/\lambda^2, \quad \theta = \sqrt{25000/G}, \quad (17)$$

де  $\lambda$  – найбільша довжина радіохвилі з відведеного діапазону хвиль;  $S$  – площа розкриву дзеркала антени;  $\epsilon = 0,5$  – коефіцієнт пропорційності між площею і ефективною площею розкриву антени, найменший з рекомендованих в [4].

6. Потужність радіопередавача  $P_{nd}$  має бути такою, щоб потужність сигналу  $P_c$  на вході радіоприймача, з яким він підтримує зв'язок, була не меншою чутливості  $P_{cmin}$  цього радіоприймача.

Згідно [4, 7], потужність сигналу на вході радіоприймача

$$P_c = \frac{P_{nd} G_{nd} G_{nm} \lambda^2 \eta_{nd} \eta_{nm} \eta_{pc}}{(4\pi R)^2}, \quad (18)$$

отже, максимальна потужність радіопередавача має бути не меншою

$$P_{nd} = \frac{(4\pi R)^2 P_{cmin}}{G_{nd} G_{nm} \lambda^2 \eta_{nd} \eta_{nm} \eta_{pc}}, \quad (19)$$

де  $R$  – максимальна відстань між передавачем і приймачем;  $G_{nd}, G_{nm}$  – коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен;  $\lambda$  – довжина хвилі радіосигналу;  $\eta_{nd}, \eta_{nm}$  – к.к.д. фідерних трактів передавального і приймального пристроїв, відповідно;  $\eta_{pc}$  – коефіцієнт, що враховує втрати потужності радіосигналу в реальному середовищі.

Максимальні потужності передавачів  $P_{nd}$  повітряних радіоліній (1...3, рис.1) визначають для найскладніших умов, а саме, коли: відстань між передавачем та приймачем дорівнює максимальній дальності прямої видимості ( $R = D_n$ ); довжина радіохвилі  $\lambda$  – найбільша з відведеного діапазону хвиль; втрати потужності сигналу – найбільші, а коефіцієнти, що характеризують ці втрати ( $\eta_{nd} = \eta_{nm} = 0,75, \eta_{pc} = 0,87$ ) найменші з рекомендованих у [4, 5, 8]). З отриманих значень потужності вибирають найбільше її значення.

Те саме роблять для супутникових радіоліній (4, 5), які на півтора порядки довші. Їх довжина визначається через прямокутні геоцентричні координати  $i$ -го і  $j$ -го об'єктів зв'язку за формулою

$$R = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (20)$$

де  $x = (N+h)\cos B\cos L, y = (N+h)\cos B\sin L, z = [N(1-e^2)+h]\sin B, N = a/\sqrt{1-e^2\sin^2 B}, L, B, h$  – геодезичні довгота, широта і висота відповідних об'єктів зв'язку,  $a = 6378137$  м – велика напіввісь загального земного еліпсоїда,  $e^2 = 0,0066944$  – квадрат його ексцентриситету в системі WGS-84 [11].

Значення максимальної потужності за формулою (19) отримані в припущенні, що передавальна і приймальна антени спрямовані точно максимумами своїх діаграм одна на одну. Однак, враховуючи вузькоспрямованість головних пелюсток діаграм

спрямованості і можливу неточність наведення, слід отримане значення потужності передавачів, по крайній мірі, подвоїти.

Треба мати на увазі, що при будь-яких відстанях між об'єктами зв'язку для підвищення скритності робота має здійснюватись в адаптивному режимі на мінімально необхідних рівнях сигналів. Для цього необхідно контролювати стан радіолінії вимірюванням частоти помилок в сигналах, що приймаються, і автоматично регулювати потужність передавача в залежності від результатів цього контролю. Крім того, для підвищення скритності можуть застосовуватись шумоподібні сигнали, комбінування роботи на антени з широкою і вузькою діаграмами спрямованості, скорочення часу виходу в ефір, шифрування і кодування сигналів.

7. *Обмеження по потужності живлення і як їх обійти.* Розрахунки показу -ють, що при застосуванні вузькоспрямованих антен з діаметром дзеркал 0,5...2,5 м, передавачі повітряних радіоліній повинні генерувати потужність долі, або одиниці ват, а передавачі супутникових радіоліній – близько сотні ват. В той же час енергетичні коефіцієнти корисної дії радіорелейних станцій діапазону 12...34 ГГц перебувають в межах 0,001...0,005. З цього виходить, що передавачам супутникових радіоліній необхідна потужність живлення більше 20 кВт, яку на БпАК забезпечити неможливо. Звідси виходить, що на супутнику-ретрансляторі необхідно застосувати більші за розміром антени. Такий досвід існує.

Відомо [4, 7], що на супутнику зв'язку "Astra-1k" використовувалось 10 антен і серед них антена з рекордною величиною площі розкриву  $S=222 \text{ м}^2$ . На супутнику зв'язку "Thuraya" використовується антена з  $S=196 \text{ м}^2$ .

Розрахунки за вищенаведеними формулами показують, що за таких розмірів супутникових антен потужність живлення (сотні ват) стає цілком прийнятною.

Разом з тим, вибираючи супутникову антену з більшою площею розкриву, треба контролювати за формулою (17), як змінюється ширина її діаграми спрямованості, і, перевівши її в радіани, визначати діаметр зони обслуговування поверхні Землі супутниковим ретранслятором

$$D=R \cdot \theta . \quad (21)$$

Якщо ця зона менша зони бойових дій, то необхідно переходити до застосування двох антен або однієї багатопелюсткової антени.

### **Висновки**

Запропонована методика дає можливість:

досліджувати різні варіанти схем зв'язку наземної станції з БпАК і, порівнюючи їх між собою, вибрати найбільш придатний;

визначати характеристики застосованих в них радіоліній;

досліджувати вплив на характеристики змінювання різних вихідних даних, коефіцієнтів і природних умов;

виявляти різного роду обмеження і знаходити шляхи їх подолання.

Методику доцільно розвивати в напрямку врахування особливостей, що виникають при виконанні маловисотних польотів.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Слипченко В. И. Войны шестого поколения. Оружие и военное искусство будущего / В. И. Слипченко. – М.: "Вече". – 2002. – 384 с.

2. Молитвин А. О реализации концепции единого информационного пространства НАТО / А. Молитвин // ЗВО. – №1. – 2008. – С. 35-39.
3. Балахонцев Н. Влияние концепции “сетевая” война на эффективность разведывательного обеспечения ВС США / Н. Балахонцев, А. Кондратьев. // ЗВО. – №2. – 2011. – С. 14-20.
4. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз.– 2005. – 392 с.
5. Белкин М. К. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств / М. К. Белкин, В. Т. Белинский, Ю. Л. Мазор, Р. М. Терещук. – К.: «Вища школа». – 1988.– 472 с.
6. Огороднійчук М. Д. Аналогові електронні пристрої. Підручник / М.Д. Огороднійчук.– К.: МО України – КІ ВПС.– 2000. – 232 с.
7. Огороднійчук М. Д. Комплекси і засоби військових телекомунікаційних мереж / М. Д. Огороднійчук (ред), Ю. Д. Чайка, О. Г. Оксіюк.– К.: МО України – НУОУ. – 2010.– 384 с.
8. Мельник Ю. А. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю. А. Мельник (ред), С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко и др. – М.: «Советское радио».– 1980. – 264 с.
9. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: «Советское радио».–1977.– 608 с.
10. Огороднійчук М. Д. Системотехніка засобів і комплексів військових ТКМ. Ч. 3. Системи супутникового зв'язку та визначення місцеположення / М. Д. Огороднійчук, Л. І. Слепов. – К.: МО України – НАОУ.– 2005.– 140 с.
11. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз – К.: «Наукова думка».–1996.–302 с.

*Надійшла до редакції 15.10.2013*