

УДК 629.73:358.421:621.396.43

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

**ПОНОМАРЕНКО С.О.**, провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

## **ІНТЕГРОВАНА АВІАЦІЙНА ЗВ'ЯЗКОВО-НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДВИЩЕНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СКРИТНОСТІ ДЛЯ БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ**

*Розглядаються питання підвищення скритності обміну інформацією між інтегрованими авіаційними зв'язково-навігаційними системами БпЛА із застосуванням радіостанцій, що працюють на антени з широкими і вузькими діаграмами спрямованості*

*Ключові слова: інтегрована зв'язково-навігаційна система, скритність, вузько спрямована антена, цифровий пакетний зв'язок, черговий режим, втрата і відновлення енергетично скритного зв'язку*

**Вступ.** В сучасних умовах безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) стали невід'ємним атрибутом локальних збройних конфліктів в усьому світі. В Україні їх ефективність підтверджена під час ведення бойових дій в зоні антитерористичної операції на сході країни. Як показує бойовий досвід, однією із ключових проблем при застосуванні БпАК є забезпечення скритності зв'язку і передачі даних між безпілотним літальним апаратом (БпЛА) і наземним пунктом управління. Скритність інформаційного обміну може стати основною проблемою застосування БпАК при збільшенні інтенсивності роботи засобів боротьби із БпАК. Пошук шляхів підвищення скритності обміну інформацією між наземною радіостанцією (НС) і БпЛА або між БпЛА в групі ґрунтується на застосовуванні нових технологій, засобів і технічних прийомів. До таких ефективних прийомів відноситься застосування інтегрованих зв'язково-навігаційних систем що функціонують із використанням зустрічно направлених вузько спрямованих антен.

Складність застосування вузько спрямованих антен полягає у забезпеченні швидкого пошуку рухомого об'єкта вузькою (декілька градусів) пелюсткою антени у тривимірному просторі. Розв'язати цю задачу можливо при інтегрованому застосуванні на кожному з взаємодіючих об'єктів навігаційної апаратури (НА), бортової електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) і двох дуплексних радіостанцій, одна з яких (РСШ) працює на антenu з широкою діаграмою спрямованості (ДС), а друга (РСВ) – на антenu з вузькою ДС. Радіостанції повинні бути придатні для ведення цифрового пакетного зв'язку.

**Постановка задачі.** Спрощені структурні схеми такої апаратури показані на рис.1, де, крім вище названих елементів, приведені джерела та користувачі інформації (ДКІ) і пульти управління (ПУ). Цифрами 1, 2 позначено, якому об'єкту належать елементи цих схем.

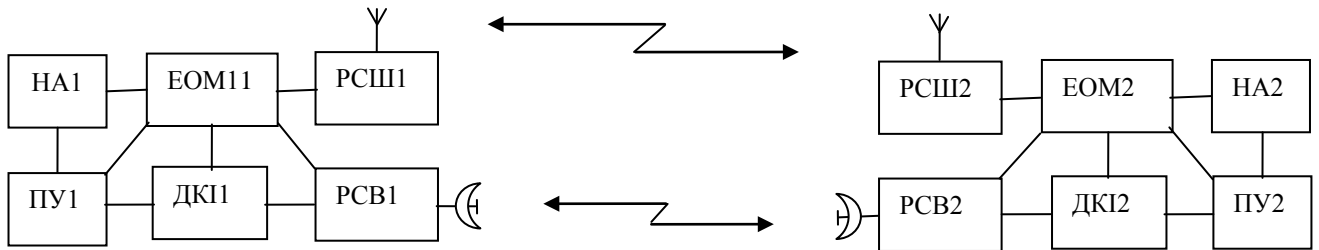


Рис. 1. Спрощені структурні схеми інтегрованих систем двох взаємодіючих об'єктів

Навігаційна апаратура з інтервалом часу  $\Delta t$  вимірює довготу  $L_i$ , широту  $B_i$  власного місцеположення і власну висоту  $h_i$  відносно рівня моря,  $i=1, 2$ . Обмін даними спочатку відбувається через РСШ. По ним необхідно визначити кути наведення своїх антен на взаємодіючий об'єкт, оперативно здійснити таке наведення і перейти на основний зв'язок через РСВ для підвищення енергетичної скритності подальшого обміну інформацією.

**Розв'язання задачі.** В черговому режимі:

ЕОМ кожного об'єкта за даними, що з інтервалом часу  $\Delta t$  надходять з власної навігаційної апаратури, розраховує параметр  $N_i$ , власні прямокутні геоцентричні координати  $x_i$   $y_i$   $z_i$  та складові швидкості за формулами [1]:

$$\begin{aligned}
 N_i &= a/(1-k\sin^2 B_i)^{1/2}, & x_i &= (N_i+h_i)\cos B_i \cos L_i, \\
 y_i &= (N_i+h_i)\cos B_i \sin L_i, & z_i &= [N_i(1-k)+h_i]\sin B_i, \\
 x_i' &= \Delta x_i/\Delta t, & y_i' &= \Delta y_i/\Delta t, & z_i' &= \Delta z_i/\Delta t,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $i=1, 2$ ;  $a=6378137$  м – велика піввісь загального земного еліпсоїда (ЗЗЕ);  $k=e^2=0,0066944$  – квадрат ексцентриситету ЗЗЕ в системі WGS-84 [2];

$L_i$  – довгота, перерахована до діапазону  $0...360^\circ$ . Розрахунки за (1) не проводять, якщо  $x_i, y_i, z_i, x_i', y_i', z_i'$  надходять від НА БпЛА;

РСШ, антени яких зорієнтовані в зону польоту чи дислокації взаємодіючого об'єкта, перебувають в режимі чергового приймання сигналів.

На етапі входження в енергетично скритний зв'язок:

РСШ  $i$ -го об'єкта, працюючи, за необхідністю, на підвищеній потужності, передає взаємодіючому  $j$ -му об'єкту ( $j=1, 2$ , але  $j \neq i$ ) у зашифрованому вигляді власні прямокутні геоцентричні координати  $x_i$   $y_i$   $z_i$ , складові швидкості та час їх визначення, упаковані у пакет з ознакою “навігаційний”;

РСШ взаємодіючого  $j$ -го об'єкта приймає цей пакет, поряд з пакетами іншого призначення, передає його у власну ЕОМ, де він розшифровується, а у прямокутні

геоцентричні координати вводяться поправки, що враховують складові швидкості і різницю часу їх визначення та застосування;

скориговані прямокутні геоцентричні координати перетворюються в ЕОМ у прямокутні топоцентричні координати  $i$ -го об'єкта в топосистемі, початок якої співпадає з центром  $j$ -го об'єкта, вісь  $Ox_T$  – спрямована точно на північ, вісь  $Oy_T$  – вертикально вгору, вісь  $Oz_T$  – доповнює перші дві вісі до правої трійки. Це перетворення робиться за формулою:

$$\begin{pmatrix} X_{Ti} \\ Y_{Ti} \\ Z_{Ti} \end{pmatrix} = C_j \cdot \begin{pmatrix} X_i - X_j \\ Y_i - Y_j \\ Z_i - Z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin B_j \cos L_j & -\sin B_j \sin L_j & \cos B_j \\ \cos B_j \cos L_j & \cos B_j \sin L_j & \sin B_j \\ -\sin L_j & \cos L_j & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i - X_j \\ Y_i - Y_j \\ Z_i - Z_j \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $C_j$  – матриця перетворення прямокутних геоцентричних координат взаємодіючих об'єктів у прямокутні топоцентричні координати  $i$ -го об'єкта у вище означеній топосистемі, центр якої суміщений з центром  $j$ -го об'єкта;

після цього по топоцентричним координатам  $i$ -го об'єкта визначаються кути наведення на  $i$ -ий об'єкт спрямованих антен РСВ і РСШ  $j$ -го об'єкта. Це робиться в ЕОМ  $j$ -го об'єкта за формулами:

$$\beta_{ij} = \arcsin[y_{Ti} / (x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + z_{Ti}^2)^{1/2}], \quad (3)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \varepsilon_{ij} & \text{при } x_{Ti} \geq 0, \quad z_{Ti} \geq 0, \\ 360^\circ + \varepsilon_{ij} & \text{при } x_{Ti} \geq 0, \quad z_{Ti} < 0, \\ 180^\circ - \varepsilon_{ij} & \text{при } x_{Ti} < 0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\alpha_{ij}$  – азимут,  $\beta_{ij}$  – кут місця,  $\varepsilon_{ij} = \arcsin[z_{Ti} / (x_{Ti}^2 + z_{Ti}^2)^{1/2}]$ .

Корені у цих формулах беруться зі знаком «+», тому що ними визначаються відстані. Знак  $\beta_{ij}$  визначається знаком  $y_{Ti}$ . Знак  $\varepsilon_{ij}$  визначається знаком  $z_{Ti}$ ;

нарешті, в кути, визначені за формулами (3, 4), вводяться поправки на «місце нуля», після чого ЕОМ  $j$ -го об'єкта видає скориговані кути наведення РСВ і РСШ  $j$ -го об'єкта для наведення їх спрямованих антен на  $i$ -ий взаємодіючий об'єкт.

Введенням поправки на «місце нуля» по азимуту усувається відхилення нульового (за показаннями індикатора) азимутального положення антени від напрямку осі  $Ox_T$  топосистеми. Аналогічно, введенням поправки на «місце нуля» по куту місця усувається відхилення нульового (за показаннями індикатора) кутмісного положення антени від площини  $Ox_T z_T$  топосистеми. Якщо у наземній станції ці відхилення являють собою постійні (або майже постійні) величини, що визначаються по місцевому контрольному орієнтиру, то у ЛА – це змінні величини, що залежать від кутового положення ЛА у тривимірному просторі під час польоту, яке описується кутами крену  $\gamma$ , курсу  $\psi$  і тангажу  $\nu$ .

Перехід від топоцентричних координат  $i$ -го об'єкта  $X_{Ti}^T = (x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti})$  до координат цього ж об'єкта у зв'язаній з ЛА системі координат  $X_{3Bi}^T = (x_{3Bi}, y_{3Bi}, z_{3Bi})$  у векторній формі виконується за формулою

$$X_{3Bi} = M X_{Ti},$$

де матриця переходу  $M$  від нормальної топоцентричної системи координат до зв'язаної з ЛА системи координат має такий вигляд:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\vartheta & \sin\gamma \sin\psi - \cos\gamma \cos\psi \sin\vartheta & \cos\gamma \sin\psi + \sin\gamma \cos\psi \sin\vartheta \\ \sin\vartheta & \cos\gamma \cos\vartheta & -\sin\gamma \cos\vartheta \\ -\sin\psi \cos\vartheta & \sin\gamma \cos\psi + \cos\gamma \sin\psi \sin\vartheta & \cos\gamma \cos\psi - \sin\gamma \sin\psi \sin\vartheta \end{bmatrix}.$$

Кути наведення на  $i$ -ий об'єкт спрямованих антен РСВ і РСШ  $j$ -го об'єкта в системі координат зв'язаній із БпЛА визначаються в ЕОМ  $j$ -го об'єкта за формулами

$$\beta_{ij}^* = \arcsin[y_{3Bi} / (x_{3Bi}^2 + y_{3Bi}^2 + z_{3Bi}^2)^{1/2}], \quad (5)$$

$$\alpha_{ij}^* = \begin{cases} \varepsilon_{ij}^* & \text{при } x_{3Bi} \geq 0, \quad z_{3Bi} \geq 0, \\ 360^\circ + \varepsilon_{ij}^* & \text{при } x_{3Bi} \geq 0, \quad z_{3Bi} < 0, \\ 180^\circ - \varepsilon_{ij}^* & \text{при } x_{3Bi} < 0, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\alpha_{ij}^*$  – азимут,  $\beta_{ij}^*$  – кут місця,  $\varepsilon_{ij}^* = \arcsin[z_{3Bi} / (x_{3Bi}^2 + z_{3Bi}^2)^{1/2}]$ ;

етап переходу до скритого зв'язку закінчується після обміну РСШ взаємодіючих об'єктів квитанціями про готовність їх інтегрованих систем до скритного обміну інформацією.

*На етапі енергетично скритного обміну інформацією:*

відбувається високошвидкісний дуплексний обмін інформацією між взаємодіючими об'єктами, яка надходить від джерел ДКІ<sub>і</sub>, ДКІ<sub>j</sub> відповідно до РСВ<sub>і</sub>, РСВ<sub>j</sub> і далі за призначенням до користувачів;

у той же час навігаційна апаратура, ЕОМ, РСВ продовжують вище описану роботу по визначенню нових величин кутів наведення спрямованих антен на взаємодіючий об'єкт. РСШ перебувають у режимі “мовчання”.

*На етапі втрати і відновлення енергетично скритного зв'язку:*

передача інформації від джерел ДКІ на цей час припиняється;

РСШ, НА, ЕОМ, РСВ включаються в роботу по відновленню енергетично скритного зв'язку і, взаємодіючи за вище описаним алгоритмом, через деякий час досягають позитивного результату.

**Пропозиції щодо реалізації інтегрованої системи.** Аналіз вітчизняних радіорелейних і тропосферних комплексів показує, що найбільш придатним для побудови на його основі наземної системи (рис.1) є цифровий радіорелейний комплекс (РЛК) Р-425 [3].

Він розміщується в двох автомашинах. Апаратна машина містить в собі пульт управління, ЕОМ, навігаційну апаратуру, апаратуру ущільнення, розділення та

комутації каналів 4-х радіорелейних станій (РРС), апаратуру приймання даних від джерел та передавання даних користувачам інформації.

Антенно-щоглова машина містить в собі 4 антени, телескопічну щоглу з гідравлічним пристроєм, що забезпечує її швидке розгортання та підйом антен разом з приймально-передавальними блоками РРС на висоту до 30 м. Управління антенами по азимуту і куту місця дистанційне з індикацією положення антен на пульті управління.

За даними ВАТ «Олімп» [3], Р-425 має такі основні ТТХ: діапазони робочих хвиль  $\lambda=1,95\dots2,03$  см і  $6,25\dots6,79$  см, потужність передавача  $P_{нд}=1$  Вт, чутливість приймача  $P_{с\ min}=10^{-11}$  Вт, довжина відкритого інтервалу  $R_{инт}=35$  і  $60$  км, ймовірність бітових помилок  $p_b \leq 10^{-6}$  (при завадостійкому кодуванні  $10^{-8}$ ), швидкість передавання інформації у кожному напрямку  $V \leq 34,368$  Мбіт/с. Характеристики антен, на жаль, відсутні, але їх можна визначити за наведеними даними.

В пошуках таких значень геометричних характеристик антени РРС: діаметра апертури (поверхні розкриву)  $d$  або/і її площі  $S$ , що забезпечують найвужчу ДС антени, за методикою [4] були проаналізовані усі можливі комбінації інтервалів  $R_{инт}$  та робочих довжин хвиль  $\lambda_{ср}$ . Такою виявилась комбінація  $R_{инт}=60$  км,  $\lambda_{ср}=6,52$  см, за якої  $d=19$  см,  $S=283$  см<sup>2</sup>. При цьому коефіцієнт підсилення антени  $G=53$ , ширина головної пелюстки ДС  $\theta = 22^\circ$ .

РСВ пропонуємої системи має забезпечувати *набагато більшу* максимальну дальність зв'язку  $R_{макс}$ . В таблиці 1 наведена залежність характеристик антен та  $R_{макс}$  від  $d$  при  $P_{нд}=1$  Вт,  $P_{с\ min}=10^{-11}$  Вт і *роботі на*  $\lambda =2$  см. З таблиці видно, що при збільшенні діаметра апертури антени до 34 см (як у РРС «Мірта»)  $R_{макс}=371$  км, тобто майже дорівнює гарантованій дальності прямого бачення (375 км) при висоті польоту ЛА 10 км.

При збільшенні діаметра апертури антени до 40 см –  $R_{макс}=904$  км. При сумісній роботі НС і ЛА таку дальність реалізувати неможливо через недостатню гарантовану дальність прямого бачення (523 км) навіть при висоті польоту ЛА 20 км. Однак її можна реалізувати між двома ЛА, що перебувають на висоті 20 км, коли гарантована дальність прямого бачення досягає 1007 км.

Таблиця 1.

Залежність характеристик антен і  $R_{макс}$  від  $d$  при  $\lambda =2$  см,  $P_{нд}=1$  Вт і  $P_{с\ min}=10^{-11}$  Вт

Варіанти	$d, см$	$S, см^2$	$G$	$\Theta, град$	$R_{макс}, км$
1	19	283	578	6,6	204
2	34	908	1054	4,9	371
3	40	1257	2567	3,1	904

*Отже, для РСВ є достатніми 2-й або 3-й варіанти антен (табл. 1).*

*Як основу для доробки антени РСШ розглянемо більш детально антену РРС з геометричною площею апертури  $S=283$  см<sup>2</sup>, яка на  $\lambda_{ср}=6,52$  см забезпечувала коефіцієнт підсилення антени  $G=53$ , ширину головної пелюстки ДС  $\theta=22^\circ$ ,  $R_{макс}=60$  км.*

Суть пропозиції полягає в переході від круглої (чи квадратної) до прямокутної апертури антени. Адже у вертикальній площині достатньо мати  $\theta_e=10^\circ$ , оскільки при цьому вже на відстані 56,7 км від НС буде охоплений діапазон висот польоту ЛА від 0 до 10 км. Це дасть можливість розширити ДС у горизонтальній площині до  $\theta_z=48,4^\circ$ , зберігаючи при цьому незмінним добуток  $\theta_z\theta_e = 484$  і коефіцієнт підсилення антени. Як випливає з формули

$$G = 25000 / \theta_z \theta_e = 4\pi\epsilon S / \lambda^2, \quad (7)$$

наведеної у [5], для цього треба зберегти незмінною і площу  $S$  апертури при такому самому за величиною, як у  $\theta_z/\theta_e=4,84$ , але оберненому відношенні сторін прямокутної апертури антени. Це досягається при ширині прямокутника  $l_z= 7,65$  см, висоті  $l_e=37$  см, коли їх відношення  $l_z/l_e=4,84^{-1}$ , а добуток  $l_z l_e=S=283$  см<sup>2</sup>.

Крім того, при роботі на антену з широкою ДС треба збільшити потужність передавача пропорційно квадрату збільшення відстані між взаємодіючими об'єктами. Наприклад, при збільшенні відстані у 6 разів (з 60 до 360 км) потужність передавача треба збільшити у 36 разів, тобто з 1 до 36 Вт.

Отже, пропозиції по *першому варіанту* системи (рис. 1) полягають:

у побудові її НС на основі РПК Р-425 з доробкою деяких елементів;

у використанні однієї РРС цього РПК як РСШ, другої – як РСВ, третьої – як ретранслятора інформації до користувача у центр її обробки, четвертої – як резервної;

у підвищенні дальності і скритності зв'язку між РСВ шляхом збільшення площі апертури антени, роботою РСВ у 2-х сантиметровому діапазоні радіохвиль (РХ) і на мінімально необхідних поточних рівнях потужності;

у розширенні ДС РСШ у горизонтальній площині шляхом застосування антен з прямокутної апертурою і необхідним співвідношенням сторін, роботою РСШ у 6-ти сантиметровому діапазоні РХ;

у підвищенні максимальної дальності зв'язку між РСШ шляхом збільшення максимальної потужності їх передавачів пропорційно збільшенню квадрату відстані між ними, а скритності – роботою передавачів на мінімально необхідних поточних рівнях потужності;

у застосуванні на борту БпЛА (в якості РСШ і РСВ) РРС цього самого типу з аналогічною доробкою її елементів та ще й у *авіаційному* виконанні;

у підвищенні рівня автоматизації процесів з урахуванням запропонованого алгоритму визначення кутів наведення антен на взаємодіючий об'єкт і автоматизації управління цим наведенням.

*Другий варіант системи* передбачає стаціонарну або сеансову дислокацію НС. У цьому разі відпадає необхідність частого передавання координат НС на борт БпЛА. Достатньо занести їх один раз або один раз на сеанс у пам'ять бортової ЕОМ. Це дасть можливість трохи спростити систему і її роботу.

*Третій варіант системи* розрахований на застосування в кожному з взаємодіючих об'єктів однієї широкодіапазонної РС, що працює на дві антени з різними, за шириною, ДС.

*Четвертий варіант системи* передбачає застосування в ній в якості РСШ типових *цифрових* авіаційних зв'язкових радіостанцій діапазону метрових-дециметрових РХ з їх штатними антенами.

### **Висновки.**

Таким чином, у статті:

запропонована структура інтегрованої авіаційної зв'язково-навігаційної системи БпАК підвищеної енергетичної скритності, яка забезпечується застосуванням зустрічно направлених вузько спрямованих антен і роботою передавачів РС на мінімально необхідних поточних рівнях потужності випромінюваних сигналів;

для полегшення і прискорення пошуку взаємодіючого об'єкта в системі передбачений оперативний обмін зашифрованою навігаційною інформацією, швидкий розрахунок по цій інформації на ЕОМ кутів наведення на взаємодіючий об'єкт спрямованих зв'язкових антен;

запропоновано алгоритм взаємодії елементів системи, зокрема алгоритм перетворення навігаційних даних в кути наведення антен на взаємодіючий об'єкт;

запропоновано 4 варіанти можливої реалізації інтегрованої системи і обґрунтовані пропозиції по доробці деяких елементів існуючих систем зв'язку з метою забезпечення їх придатності до виконання завдань в інтегрованій авіаційній зв'язково-навігаційній системі БпАК підвищеної енергетичної скритності;

структурна та інформаційна скритність мають бути забезпечені відповідними методами кодування та шифрування.

Зазначені пропозиції можуть бути реалізовані при обґрунтуванні вимог до зв'язково-навігаційної системи БпАК підвищеної скритності та при створенні вітчизняних БпАК як військового, так і подвійного призначення.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Б. Ф. Жданюк, – М.: «Сов. Радио». – 1978. – 384 с.
2. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. – К.: «Наукова думка». – 1996. – 302 с.
3. Сіренко В. В. Цифрові станції тропосферного та радіорелейного зв'язку / В. В. Сіренко. – К.: Матеріали IV НТК ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2008. – С.74-75.
4. Огороднійчук М. Д. Методика розрахунку енергетичних і спектральних характеристик ширококутових радіоліній зв'язку / М. Д. Огороднійчук, І. Ю. Целіщев, Д. Г. Шевченко. – К.: Збірник наукових праць ДНДІА. – 2013. – вип. № 9 (16). – С. 96-102.
5. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики. Учебное пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М.: «Эко-Трендз». – 2005. – 392 с.