

УПРАВЛІННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ

Визначені напрямки підвищення рівня управління літальним апаратом в умовах активної радіоелектронної протидії. Наведено загальну структуру організаційно-технічної системи безпілотної авіації, яка базується на трьох головних рівнях. Розроблено алгоритм та схему роботи станції радіоелектронної протидії безпілотному літальному апарату. Особливістю алгоритму наведеного, у рамках статті, є можливість впровадження змінних параметрів радіоелектронної протидії за умови їх повної апріорної визначеності.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, безпілотна авіація, електронна протидія, зона антитерористичної операції, засоби навігації*

Вступ. Колізія, що склалася на сході України за останні кілька років перейшла у серйозну воєнну позицію. Розгорнута антитерористична операція (АТО) досягла значних масштабів у межах країни та потребує залучення сучасних засобів навігації. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) займають передове місце у розвідці, що є основним механізмом формування стратегічного захисту та можливої атаки. Упродовж 2014 року спостерігалось активне введення БПЛА у зону проведення АТО. Штатними БПЛА української армії є «Рейс» (Ту-143), які вироблялися за часів СРСР. Основним їх призначенням була аерофотозйомка. Штатні БПЛА не пристосовані для передачі інформації у режимі реального часу та фактично не відповідають сучасним задачам армії. У той час як противник використовує сучасні копії ізраїльських апаратів, які збирають в Російській Федерації за ліцензією. На Донбасі російські БПЛА застосовуються у якості засобів радіоелектронної протидії, у складі артилерії, у якості загальних рот розвідки або БПЛА зв'язку.

Використання сучасних модернізованих БПЛА призведе до суттєвого збільшення ефективності бойових операцій і дозволить знищити значну кількість сил і засобів незаконних військових формувань. Спираючись на недосконалість авіаційного обладнання та застосування противником спеціальних засобів моніторингу частотного діапазону, а також створення інформаційних завад та перехоплення безпілотних апаратів спостерігається втрата контролю та управління над БПЛА. Цей аспект підтверджує необхідність вдосконалення механізмів управління БПЛА в умовах радіоелектронної протидії.

Метою роботи є розробка ефективного алгоритму управління безпілотним літальним апаратом в умовах радіоелектронної протидії. При цьому вирішуються такі завдання:

- аналіз напрямків підвищення рівня управління літальним апаратом, в умовах активної радіоелектронної протидії;
- розрахунок шляху та імовірності потрапляння безпілотного літального апарату у зазначену зону в умовах радіоелектронної протидії.

Літературний огляд сучасних наукових досягнень за темою дослідження показав широкий спектр робіт, заснованих на принципах науки стосовно управління БПЛА в різних умовах слідування.

Серед дисертаційних досліджень варто відмітити такі роботи: [1], в якій виконано системний аналіз управління комплексами БПЛА подвійного призначення; [2], в якій висвітлено основні принципи роботи наземних просторово-розподілених антенних систем радіоліній управління і передачі інформації безпілотних авіаційних комплексів; [3], де досліджено головні аспекти оптимізації системи управління легкого безпілотного літального апарату за частотним критерієм і математично обґрунтовано вибір напрямку руху та обхід завад; [4], в якій розроблено інформаційно-вимірнювальну та управляючу систему малорозмірного БПЛА підвищеної точності.

Щодо використання БПЛА та управління в умовах завад під час проведення воєнних дій, варто відмітити публікацію [5], в якій наводиться короткий огляд сучасних засобів придушення радіоелектронної апаратури та перехоплення управління БПЛА сил АТО, а також розглянута можливість застосування засобу функціонального ураження радіоелектронних систем БПЛА. В роботі [6] розглянуті питання радіоелектронної боротьби під час воєнних операцій та основні принципи використання механізмів радіоелектронного придушення. Використання БПЛА в НАТО в умовах локальних конфліктів приведені в [7]. В роботі [8] розглянуті фізико-математичні аспекти впливу радіоелектронної апаратури при управлінні БПЛА з відокремленням параметрів сигналів випромінювачів.

Із зарубіжних вчених варто відмітити роботи David Hastings Dunn [9] та S. Masood [10].

Однак, незважаючи на масштабність наукових розробок відповідно до теми дослідження, питання управління БПЛА в умовах радіоелектронної протидії залишається відкритим та потребує детального вивчення.

Структура організаційно-технічної системи безпілотної авіації. В умовах сьогодення БПЛА є безперечно не тільки новим класом літальних апаратів (ЛА), а й новим рівнем сучасної воєнної авіації. В даний час пріоритетним напрямом сучасної науки є теоретичне дослідження БПЛА як вітчизняного так і зарубіжного виробництва, а також застосування нових моделей і алгоритмів для вирішення проблемних питань, що неминуче виникають в процесі проектування, впровадження та використання БПЛА.

Загальна структура організаційно-технічної системи безпілотної авіації базується на трьох головних рівнях (рис. 1). Перший рівень, це безпосередньо безпілотний літальний апарат. Другий – безпілотний авіаційний комплекс (БАК). Третій – ергатичний.

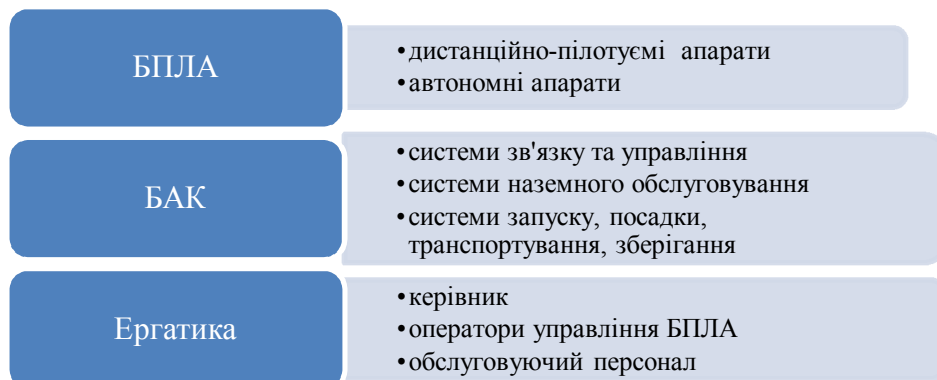


Рис. 1. Загальна структура організаційно-технічної системи безпілотної авіації

Система управління безпілотними літальними апаратами базується на пілотажно-навігаційному та навігаційному комплексах, які включають в себе радіотехнічні навігаційні системи (РНС) для оцінки рівня позиціонування [11].

Основними методами управління БПЛА виступають:

– *політ стабілізований автопілотом*: відбувається за наведеними показниками цілі та за даними, що передаються з відеокамери безпілотної авіації під час польоту;

– *політ згідно наміченої програми*: відбувається по чітко встановленому плану, який визначено на всій довжині маршруту та який не підлягає корекції;

– *політ згідно наміченої програми з можливими відхиленнями від курсу*: відбувається по встановленому плану, який визначено на всій довжині маршруту та який підлягає корекції, тобто відведення (у разі потреби) БПЛА від намічено курсу та, у подальшому, повернення до нього.

Станції радіоелектронної протидії (СРЕП) працюють за схемою, наведеною на рис. 2. Головною умовою роботи СРЕП є постійна зміна місця дислокації у просторі неба. Основним аспектом у рамках забезпечення ефективного управління БПЛА є умова апаратного програмування на зміну курсу при виявленні завад, зниження рівня сигналів (або

їх повна відсутність) управління з землі, спроби втручання в управління. Даний напрямок є ефективним при радіоелектронній протидії за відео трактами або радіоканалами. У випадку впливу СРЕП на координати, тобто постановки завдань по GPS, БПЛА повинен переходити на управління згідно з інерціальною системою управління або по магнітному компасу.

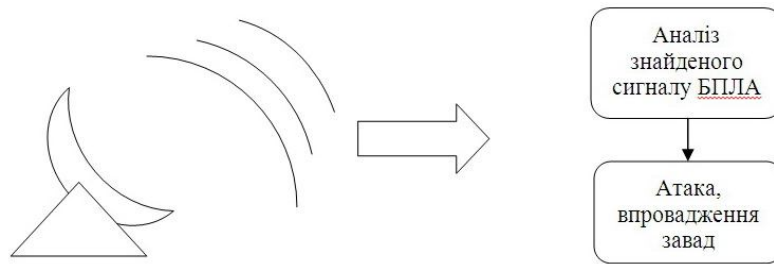


Рис. 2. Схема роботи станції радіоелектронної протидії БПЛА

*Примітка. Джерело: Власна розробка автора

Зважаючи на дію радіоелектронного придушення, найбільшому впливу підлягають бортові навігаційні приймачі. Інтегрування радіотехнічних навігаційних систем, як супутникових так і наземних, є пріоритетним напрямком розвитку систем радіонавігації [12].

Напрямки підвищення рівня управління БПЛА. З метою досконалого управління БПЛА на сьогодні активно використовуються локальні радіотехнічні навігаційні системи (ЛРНС), що дозволяють забезпечити ефективне управління літальним апаратом в умовах складної заводої ситуації, в тому числі в умовах активної радіоелектронної протидії.

До основних напрямків підвищення рівня управління БПЛА в умовах активної радіоелектронної протидії варто віднести:

- модернізація ЛРНС у системі підвищення потужності передавачів;
- налаштування динамічної зміни коду та потужності передавачів псевдо супутників ЛРНС, за урахуванням зміни зовнішніх умов;
- псевдовипадкова перебудова робочих частот задля розширення спектра, – сутність полягає у періодичній зміні частотного каналу кожного фізичного каналу;
- розширення спектру довжини псевдовипадкової послідовності, як наслідок отримуємо сигнал з розширеним спектром, ширина якого визначається спектром псевдовипадкової послідовності та збільшується пропорційно заданій величині;
- впровадження комутованих антен або спрямованих антен з механічним скануванням для підвищення рівня управління променем передавача в умовах БПЛА.

На точність визначення координат БПЛА в умовах радіоелектронної протидії впливають: заводозалежність радіотехнічних коректорів; геометричний фактор; рівень автономності радіотехнічних коректорів; дальність розташування радіотехнічної навігаційної системи; ступінь впливу основних факторів протидії та їх спрямованість.

Сучасні науковці [13, 14] пропонують, з метою підвищення точності навігаційного комплексу на борту БПЛА, використання фільтру Калмана. Це ефективний рекурсивний фільтр, який направлено на оцінку вектора стану динамічної системи. Калмановська фільтрація, на сьогодні, є важливою частиною теорії управління.

Модернізація управління БПЛА, у багатьох випадках ґрунтується на впровадженні псевдо супутників різного базування, підвищення рівня заводозахищеності БПЛА досягається за рахунок розсіювання сигналу серед базових супутників, що також сприяє підвищенню точності навігаційних визначень і є пріоритетним аспектом в умовах воєнних дій.

Актуальним виступає питання резервування супутникової радіотехнічної навігаційної системи за допомогою локальної РНС з посиленою заводостійкістю. При відстані слідування БПЛА до 50 км першочерговим завданням є введення резервної мобільної ЛРНС, структуру якої складають три окремі опорні станції, які використовують для навігації БПЛА складний захищений сигнал. При практичному застосуванні, між опорними станціями та БПЛА навігаційний сигнал набуває доплерівського зсуву частоти, причому значення цієї частоти можна вибрати досить високим, він залежить від довжини хвилі, кутів спостереження і швидкості БПЛА.

Управління БПЛА на основі фазової маніпуляції навігаційного сигналу. Сучасним механізмом зменшення впливу радіопротидії на БПЛА та підвищення рівня управління виступає впровадження адаптивної доплерівської фільтрації. Сутність механізму полягає у тому, що через смугові фільтри доплерівської частоти (ФДЧ) проходять сигнали обмежені двома відповідними лініями положення з постійною частотою Доплера [15].

В рамках даної роботи пропонується впровадження випадкової фазової маніпуляції навігаційного сигналу від імпульсу до імпульсу, цифрової фазової фільтрації та багатоканальної доплерівської обробки сигналу, що надходить. Дана концепція передбачає наявність бортової системи сенсорів, файлу тривимірних прискорень, поточних GPS-даних у вигляді файлу просторових координат, файлу зображень навігаційних орієнтирів вздовж маршруту польоту та бортового процесора з необхідним програмним забезпеченням.

Програмне забезпечення повинно у період всього польоту обчислювати траєкторію проходження шляху БПЛА в умовах радіоелектронної протидії. Алгоритм обчислення можна представити у вигляді кривої Безьє, що описується чисельною стабільністю.

Загальне рівняння для n -го порядку полінома Безьє має вигляд

$$r(q) = \sum_{k=0}^n b_k \binom{n}{k} q^k (1-q)^{n-k}, \quad q \in [0, 1], \quad (1)$$

де $b_k = (x_k, y_k)$, $k = 1, \dots, n$, – це контрольні точки;

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!};$$

$r(q)|_q=0$ і $r(q)|_q=1$ – початкова і кінцева точки шляху, відповідно. Варто зазначити, що параметр q унормований на одиницю.

Тепер, r -на похідна n -го порядку кривої Безьє має вигляд:

$$\frac{d^r r(q)}{dq^r} = \frac{n!}{(n-r)!} \sum_{j=0}^{n-r} \Delta^r b_j \binom{n-r}{j} q^j (1-q)^{(n-r-j)}, \quad (2)$$

де $\Delta^r b_i = \sum_{j=0}^r \binom{r}{j} (-1)^{r-j} b_{i+j}$, $\Delta b_j = b_{j+1} - b_j$ і $\Delta^0 b_j = b_j$.

При $n = 5$ рівняння (1) має вигляд:

$$r(q) = \sum_{k=0}^5 b_k \binom{5}{k} q^k (1-q)^{(5-k)},$$

або
$$r(q) = b_0(1-q)^5 + 5b_1q(1-q)^4 + 10b_2q^2(1-q)^3 + 10b_3q^3(1-q)^2 + 5b_4q^4(1-q) + b_5q^5. \quad (3)$$

З рівняння (2) перша похідна шляху $r(q)$ має вигляд

$$\frac{dr(q)}{dq} = 5 \sum_{j=0}^4 \binom{4}{j} \Delta^1 b_j q^j (1-q)^{4-j}, \quad \text{або}$$

$$\frac{dr(q)}{dq} = 5(b_1 - b_0)(1-q)^4 + 20(b_2 - b_1)q(1-q)^3 + 30(b_3 - b_2)q^2(1-q) + 5(b_5 - b_4)q^4. \quad (4)$$

Тепер ці рівняння можуть бути використані для інтерполяції між двома позиціями і для визначення форми сполучної кривої. Так як положення і напрямки на початковій і кінцевій точках відомі, використовуємо інтерполяції першого порядку.

Підставляючи координати положення при $T = 0$ і $t = 1$ в рівняння (3) і використовуючи першу похідну шляху по рівнянню (4), контрольні точки b_0, b_1, b_5 і b_4 розраховуються згідно (5):

$$\begin{cases} b_0 = (x_s, x_s); & b_5 = (x_f, x_f); \\ d_0 = (\cos(\varphi_s), \sin(\varphi_s)); & d_5 = (\cos(\varphi_f), \sin(\varphi_f)); \\ b_1 = b_0 + \frac{1}{5} d_0; & b_4 = b_5 + \frac{1}{5} d_5. \end{cases} \quad (5)$$

Таким чином, контрольні точки (b_0, b_1, b_4, b_5) в рівнянні (5) фіксовані до початку. Мінімальне рішення кривої, яке має плавну зміну кривизни стосовно впливу радіоелектронних завад, використовується для планування шляху. А ймовірність входження БПЛА у зону дії радіоелектронних перешкод визначається по залежності:

$$P_{зPEП} = M_{зн1} + M_{зн2},$$

де $M_{зн1}$ та $M_{зн2}$ – результуючі значення особливостей польоту, які визначаються як:

$$M_{зн1} = \operatorname{erf} \left(\frac{d_x(\langle \eta \rangle + 1)}{2L_{cl}(\sigma_{дну}^2 + \sigma_{нн}^2 + \sigma_{нв}^2)^{1/2}} \right),$$

$$M_{зн2} = \operatorname{erf} \left(\frac{d_x(\langle \eta \rangle - 1)}{2L_{cl}(\sigma_{дну}^2 + \sigma_{нн}^2 + \sigma_{нв}^2)^{1/2}} \right),$$

де erf – це функція Лапласа, яка описується як:

$$\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt;$$

$$\operatorname{erf}(-x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^{-x} e^{-t^2} dt = \left(\frac{t=-z}{dt=-dz} \right) = -2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-z^2} dz = -\operatorname{erf}(x),$$

d_x – лінійний розмір шляху слідування, що відповідає проекції на площину; L_{cl} – загальна довжина шляху слідування; $\sigma_{дну}$ – динамічна похибка управління; $\sigma_{нн}$ – похибка навігації; $\sigma_{нв}$ – похибка візування.

Особливістю зазначеного алгоритму є можливість впровадження змінних параметрів радіоелектронної протидії за умови їх повної апіорної визначеності. Прямим чинником впливу на якість управління БПЛА є кореляційна функція радіоелектронної протидії та модель навігаційного сигналу у межах БПЛА.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у даному напрямку. З метою підвищення ефективності управління БПЛА в умовах радіоелектронної протидії розроблено ефективний алгоритм управління БПЛА, який базується на впровадженні випадкової фазової маніпуляції навігаційного сигналу від імпульсу до імпульсу, цифрової фазової фільтрації та багатоканальної доплерівської обробки сигналу, що надходить. Виконання зазначеного алгоритму вимагає наявності бортової системи сенсорів, файлу тривимірних прискорень, поточних GPS-даних у вигляді файлу просторових координат, файлу зображень навігаційних орієнтирів вздовж маршруту польоту та бортового процесора з необхідним програмним забезпеченням.

Для подальшого наукового дослідження пропонується визначення основних механізмів управління групою БПЛА в умовах радіоелектронної протидії у зоні проведення антитерористичної операції, з урахуванням можливості планування змінного шляху та посилення радіоелектронної боротьби.

Список використаної літератури

1. Полтавский А. В. Методы, модели и системный синтез управления комплексами беспилотных летательных аппаратов двойного назначения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / А. В. Полтавский. – Москва, 2009. – 38 с
2. Лучкин С. А. Наземные пространственно-распределенные антенные системы радиолиний управления и передачи информации беспилотных авиационных комплексов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.07 / С. А. Лучкин. – Казань, 2010. – 15 с.
3. Летунов Д. А. Оптимизация системы управления легкого беспилотного летательного аппарата по частотному критерию: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Д. А. Летунов. – Рыбинск, 2011. – 16 с.

4. Машнин М. Н. Информационно-измерительная и управляющая система малоразмерного беспилотного летательного аппарата повышенной точности: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / М. Н. Машнин. – Тула, 2013. – 20 с.
5. Ясечко М. Н. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО // М. Н. Ясечко, А. В. Очкурено, А. А. Ковальчук, Д. В. Максюта / Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2015. – № 3(44). – С. 54-57.
6. Иванов И. Содержание и роль радиоэлектронной борьбы в операциях XXI века / И. Иванов, И. Чадов // Зарубежное военное обозрение. – 2011. – № 1. – С. 14-20.
7. Балыко Ю. Беспилотники НАТО в локальных конфликтах / Ю. Балыко // Военный парад. – 2008. – № 1. – С.38-39.
8. Ясечко М. Н. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства / М. Н. Ясечко, Дохов А. И., М. Г. Иванец, О. В. Тесленко ; под ред. М. Н. Ясечко. – Харьков: ХУПС, 2015. – 220 с.
9. Dunn D. H. Drones: disembodied aerial warfare and the unarticulated threat / David Hastings Dunn // International Affairs. – 2013. – Vol. 89. – PP. 1237-1246.
10. Masood S. C.I.A. Leaves Base in Pakistan Used for Drone Strikes / Salman Masood // The New York Times : website. 2016. – Режим доступу. – <http://www.nytimes.com/2011/12/12/world/asia/cia-leaves-pakistan-base-used-for-drone-strikes.html>
11. Веремеенко К. К. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / К. К. Веремеенко, А. Н. Головинский, В. В. Инсаров ; под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. – Москва : Физматлит, 2013. – 280 с.
12. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Куприянов. – Москва : Вузовская книга, 2013. – 360 с.
13. Mohinder S. Grewal. Kalman Filtering: Theory and Practice / Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. – John Wiley & Sons. Inc. 2001.
14. Родионов В. В. Помехоустойчивость РЛС в условиях радиоэлектронного подавления / В. В. Родионов // Радиолокация, навигация, связь: докл. конф., Воронеж, 15-17 апреля 2014. – 2014. – Т. 3. – С. 1476-1485.
15. Филиппов А. А. Повышение эффективности управления беспилотного летательного аппарата в условиях помех / А. А. Филиппов, Д. А. Бажин, А. Н. Хлобыстов // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 6. – С. 45-50.

Автори статті

Фесенко Олексій Дмитрович – ад'юнкт науково-організаційного відділу. Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, м. Київ. Тел.: +380(63) 617 98 31.

Радзівілов Григорій Данилович – кандидат технічних наук, доцент. Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, м. Київ. Тел.: +380 (99) 245 06 95. E-mail : rocimean123@gmail.com

Authors of the article

Fesenko Oleksii Dmytrovych – associate of scientific organizational department. Military Institute of Telecommunications and Information, Kiev. Tel: +380 (63) 617 98 31.

Radzivilov Hryhorii Danylovych – candidate of sciences (technical), associate professor. Military Institute of Telecommunications and Information. Kiev. Tel.: +380 (99) 245 06 95. E-mail : rocimean123@gmail.com.

Рецензент:

доктор технічних наук, професор В. А. Дружинін
Державний університет телекомунікацій

Дата надходження
в редакцію: 18.10.2016 р.