

УДК 621.396.677

М.М. Ясечко, А.О. Ковальчук, Д.В. Максютя

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОЦІНКА ТОЧІСНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СУПРОВОДЖЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ЦІЛЕЙ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО УРАЖЕННЯ

В статті аналізується перспективний напрямок боротьби з БПЛА тактичного рівня шляхом їх функціонального придушення і поразки (ФПП). Даний метод боротьби є альтернативою до традиційного фізичного знищення повітряних цілей вогневидами засобами, ефективність яких стосовно до тактичних БПЛА істотно знижується як з тактико-технічної, так і економічної точки зору.

Ключові слова: функціональне придушення і поразка, безпілотні літальні апарати, електромагнітний імпульс, багаточастотний просторово-часовий сигнал.

Вступ

В останні роки в світі все більше застосовуються безпілотні літальні апарати (далі – БПЛА). БПЛА вже давно зарекомендували себе в якості ефективного засобу ведення розвідки, нанесення ударів по об'єктах противника і виконання інших завдань. По деяким оцінкам, тільки США за останні 15 років було виготовлено більше 30 тисяч БПЛА різних класів і типів, більша частина яких використовується військовими і спеціальними підрозділами. Безпілотники активно використовувались та використовуються у всіх локальних конфліктах останнього часу, не є виключенням і збройний конфлікт на території України.

Досвід бойових дій в зоні проведення антитерористичної операції (АТО) на Донбасі, демонструє масовість та регулярність застосування подібної техніки. Більш того, небезпечні наслідки застосування БПЛА примушують активно шукати шляхи їх ефективного знищення.

Найбільш логічний спосіб позбавитись від БПЛА – фізично знищувати їх. Ще у роки великої вітчизняної війни з малошвидкісними об'єктами боролись шляхом сфокусованого ведення вогню з стрілецької зброї (рис.1). Для ураження тактичних БПЛА в зоні проведення АТО і досі застосовують цей метод. Більші за розміром БПЛА (оперативно-тактичні, стратегічні) знищують зенітними ракетними комплексами. Головною проблемою при цьому є виявлення малорозмірної та малопомітної цілі для проведення її успішної атаки. Розповсюдженням засобом виявлення БПЛА є радіолокаційні станції короткохвильового діапазону. Вони можуть виявляти літаки та гелікоптери на відстані від десятків до сотень кілометрів, в залежності від характеристик цілі і особливостей місцевості. Необхідно відзначити, що тактичні БПЛА є достатньо складною ціллю для РЛС старого парку, особливо за несприятливої радіолокаційної обстановки. Це обумовлено їх ма-

лою ЕПР, низьким тепловим випромінюванням і т.ін.

В сучасних радіолокаційних станціях зазначені вище недоліки усуваються наступними шляхами. Істотно покращується роздільна здатність РЛС, застосовуються складні сигнали, використовуються багатфункціональні антенні системи з можливістю фокусування енергії в певному обмеженому об'ємі простору, застосовується апаратура ідентифікації цілі. Наприклад, легкі БПЛА з малою ЕПР, що рухаються порівняно з невеликою швидкістю можуть сприйматись РЛС, як птах і т.п..



Рис. 1. Ураження повітряного об'єкта у роки другої світової війни

Ще більших складностей зустрічає ураження БПЛА існуючими вогневидами засобами ППО, мало-ефективне в зв'язку з обмеженим часом обстрілу та небезпекою розкриття вогневих позицій засобів ППО. Застосування стрілецького озброєння ускладнено внаслідок малого розміру дронів та їх високою живучістю, навіть за умови пошкодження планера.

На думку авторів, ефективним засобом боротьби з тактичними БПЛА може стати застосування електромагнітної зброї з безпосереднім впливом електромагнітного випромінювання (електромагнітного імпульсу – ЕМІ) на бортове обладнання БПЛА з метою його пошкодження або придушення. Подібні

засоби класифікують як засоби фізичного придушення і поразки (ФПП).

В статті розглядаються питання пов'язані з оцінкою точностних можливостей виявлення та супроводження малорозмірних БПЛА для їх функціонального ураження.

Результати досліджень

Нижче представлені основні характеристики засобів ФПП, що розглядається, як альтернативи вогневим засобам боротьби з БПЛА.

Відомо, що в радіолініях «мікро БПЛА – наземні абоненти» доцільно використовувати OFDM-сигнали. Діапазон частот OFDM-сигналів стандарту DVB-S лежить в межах діапазону частот супутникових каналів зв'язку (10,3...11,8 ГГц), смуга одного радіоканалу за рівнем -30 дБ досягає 20 МГц. Граничний радіус зони обслуговування однієї центральної станції в умовах прямої видимості при потужності передавача БПЛА 50 мВт і інтенсивності опадів до 40 мм/год заявлено в межах 50...60 км.

Для виконання умов ФПП повинні бути висунуті певні вимоги до часових і енергетичних параметрів сигналу ураження. Обґрунтовано, що з урахуванням характерного часу релаксації теплових процесів, який для напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем складає $\tau_r \geq 10...100$ нс, часу спрацьовування захисних пристроїв, приблизно 10 нс, доцільно використовувати послідовність сфокусованих ЕМІ з наступними параметрами: тривалість одиночного імпульсу дорівнює $\tau_{\text{пвс}} \leq 5$ нс, період слідування $T_{\text{пвс}} = 250$ нс, шпаруватість $Q = 50$, тривалість пачки складає $\tau_{\text{рз}} = 255$ мкс.

Визначено, що при реалізації внутрішньосмугового режиму роботи засобу ФПП БПЛА для деградації мікрохвильових діодів та інтегральних схем необхідна потужність на вході радіотехнічних систем, що вражаються, повинна складати величину від 0,006 до 0,4 Вт, а на вході комутуючих діодів і малопотужних транзисторів відповідно – 0,06 ... 9,5 Вт.

Для здійснення позасмугового ФПП мікрохвильових діодів і мікросхем необхідна потужність складає величину від 6,125 до 125 Вт, а комутуючих діодів і малопотужних транзисторів відповідно – 62...31250 Вт.

В якості основного пропонується обрати внутрішньосмуговий режим.

В якості антенної системи, пропонується використовувати ФАР циліндричної конструкції, що дозволяє здійснювати внутрішньосмугове функціональне ураження (ФУ) БПЛА в діапазоні частот від 10 ГГц до 12 ГГц. Так, для дальності дії $R = 5$ км в багаточастотних (БЧ) засобах ФУ доцільно використовувати циліндричну ФАР з максимальним розміром апертури $L=2,54$ м; крок решітки вздовж направляючої $d_x=1,0\lambda$, $d_y=0,8\lambda$. Для кількості випроміню-

вачів $M_x=88$ в площині направляючої радіус циліндра складе 1,25 м, кількість випромінювачів, які беруть участь у формуванні поля $N = 88 \times 20 = 1760$, коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени – 37 дБ. Уточнене значення потужності, що підводиться до антенної системи, при випромінюванні одиночного сигналу складає $P_{\text{випр}} = 0,25$ МВт або для одного випромінювача $P_{\text{випр1}} = 142$ Вт.

Важливим є проведення розрахунку робочої зони циліндричної ФАР. Під робочою зоною ФАР розуміється кількість випромінювачів, що приймає участь у формуванні поля в дальній зоні при конформному скануванні. При визначенні кількості випромінювачів враховується, що ширина діаграми спрямованості (ДС) при використанні пірамідального рупора дорівнює $2\theta_{0,5\text{P}} = 76^\circ$, границя далекої зони – 400м, $R_{\text{макс}} = 5000$ м.

В ході аналізу просторово-часових характеристики БЧ просторово-часовий сигнал (ПЧС) з використанням багатоступеневого V-подібного закону розподілення частот по апертурі для різної шпаруватості ($Q=25; 12; 6$), визначено, що просторова тривалість послідовності ПЧС за рівнем 0,1 складає величину порядку $\Delta u_\phi=60$ м, тривалість – 3 нс, крутизна переднього фронту – 1 нс. Поперечний розмір «плями» $\Delta x_\phi=70$ м. Рівень першої бічної пелюстки не перевищує $E_{\text{бок}} < 0,15E_{\text{макс}} \cdot [1, 5, 6]$.

Виходячи з характеристик засобу ФПП БПЛА, вирішується питання щодо точності видачі цілевказівки на засіб ФПП БПЛА, штатними засобами радіолокаційної розвідки. При супроводженні безпілотних літальних апаратів багатоканальною РЛС враховується невелике відношення сигнал/шум приймального пристрою, у зв'язку з їх малими розмірами, і виникає задача оцінки можливості виконання умов щодо точності стеження за дальністю та кутовими координатами для можливості видачі цілевказівки засобом функціонального ураження. Можна показати, що точність стеження за дальністю багатоканальної РЛС достатньо висока і необхідна точність цілевказівки забезпечується, а тому залишається оцінити точність супроводження за кутовими координатами.

В даний час найбільше застосування знайшла запропонована в [1] модель руху цілей, у якій кореляційна функція значень прискорення цілі записується у виді

$$R_M(\tau) = \sigma_M^2 e^{-\frac{|\tau|}{T_M}}, \quad (1)$$

де T_M – постійна маневрування цілі;

σ_M^2 - дисперсія значень прискорення цілі.

Величина σ_M^2 в залежності від типу безпілотних літальних апаратів може приймати значення у досить широких межах.

Що стосується постійної маневрування T_m , то даний параметр характеризує середню тривалість маневру і може складати від одиниць до десятків секунд.

Розглянемо випадок, коли для опису руху маневруючої цілі за кутовими координатами використовується лінійна стохастична модель з експоненційно корельованим прискоренням, розподіленим по нормальному закону

$$\bar{x}(t_n + T_n) = \Phi(T_n)\bar{x}(t_n) + B\xi(t_n), \quad (2)$$

де $\bar{x}(t_n + T_n)$ - вектор стану по кутовим координатам, компонентами якого є координата цілі x , її перша \dot{x} , і друга \ddot{x} похідні;

$$\Phi(T_n) = \begin{pmatrix} 1 & T_n & T_n^2/2 \\ 0 & 1 & T_n \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix} - \quad (3)$$

перехідна матриця стану по кутовим координатам;

$$B = (0 \quad 0 \quad 1)^T - \quad (4)$$

матриця збудження по кутовим координатам;

T_n - інтервал часу між спостереженнями;

$\xi(t_n)$ - дискретна біла послідовність шумів збудження з нульовим середнім і дисперсією

$$v_\xi(T_n) = \frac{\sigma_M^2(1-\rho^2)}{T_n^2}; \quad (6)$$

$$\rho = e^{-T_n/T_m} - \quad (7)$$

параметр кореляції значень другої похідної на інтервалі спостережень;

r - дальність цілі.

При синтезі лінійних систем супроводження модель спостережень представляється таким рівнянням

$$y(t_n) = H\bar{x}(t_n) + f(t_n), \quad (8)$$

де $H = (1 \ 0 \ 0)$ - матриця спостережень;

$f(t_n)$ - дискретна біла послідовність шумів спостереження за відповідною координатою з нульовим середнім і дисперсією $v_f(t_n)$.

В зазначених моделях параметрами, що підлягають завданню, є σ_M , T_m , v_f , причому перші два параметри визначаються маневреними властивостями цілі, а останній - величиною відношення сигнал/шум і структурою дискримінатора. Інтервал спостережень T_n багатоканальної РЛС складає 0,1с.

Як відомо [2], система автосупроводження, оптимальна за критерієм мінімуму середньоквадрати-

чної похибки, описується такими рекурентними рівняннями:

$$\hat{\bar{x}}(t_n) = \hat{\bar{x}}_3(t_n) + K(t_n)[y(t_n) - H\hat{\bar{x}}_3(t_n)]; \quad (9)$$

$$\hat{\bar{x}}_3(t_n + T_n) = \Phi(T_n)\hat{\bar{x}}(t_n); \quad (10)$$

де $\hat{\bar{x}}_3(t_n + T_n)$ - оцінка екстрапольованого значення вектора стану цілі за кутовою координатою до чергового моменту часу;

$K(t_n)$ - матриця коефіцієнтів підсилення, обумовлена виразом

$$K(t_n) = V_3(t_n)H^T [HV_3(t_n)H^T + v_f(t_n)]^{-1}, \quad (11)$$

$$V(t_n) = V_3(t_n) - V_3(t_n)H^T [HV_3(t_n)H^T + v_f(t_n)]^{-1} HV_3(t_n); \quad (12)$$

$$V_3(t_n + T_n) = \Phi(T_n)V(t_n)\Phi^T(T_n) + BV_\xi(T_n)B^T, \quad (13)$$

у яких $V(t_n)$, $V_3(t_n + T_n)$ - матриці других центральних моментів похибок оцінювання і екстраполяції стану відповідно.

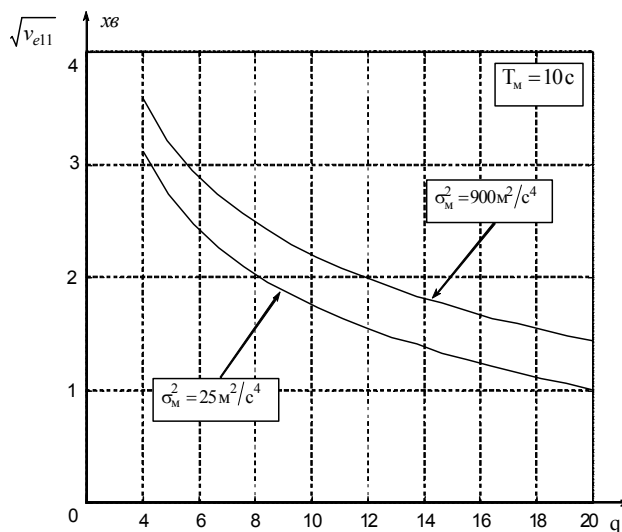


Рис. 2. Залежність середньоквадратичного відхилення помилки супроводження за кутовими координатами від відношення сигнал/шум

Дисперсія похибки супроводження σ_3^2 дорівнює елементу v_{311} матриці $V_3(t_n)$. При постійних характеристиках зовнішніх впливів розрахунок дисперсії похибки супроводження в сталому режимі може бути виконаний шляхом багаторазового рішення рекурентних рівнянь (9-13). Результати рішення для системи автосупроводження за кутовими координатами наведені на рис. 2.

Як видно з отриманих графіків, середньоквадратичне відхилення помилки супроводження за куто-

вими координатами $\sqrt{v_{el1}}$ суттєво залежить від відношення сигнал/шум, та інтенсивності маневрування літального апарату. У разі перерахунку кутів хвилин в метри, маємо що максимальна дальність видачі цілевказівки не перевищує 30-40 км від точки стояння РЛС.

Висновки

Аналізуючи хід проведення АТО, можна прийти до висновку, що мікро і міні БПЛА російського виробництва активно використовуються проти українського війська. На початку АТО у 2014-2015 роках більше десятка БПЛА противника було знищено з використанням стрілецького озброєння, після чого противник почав використовувати БПЛА на висотах, що не є доступними для стрілецької зброї. На теперішній час Збройні Сили України, не мають достатньо ефективних засобів для знищення БПЛА. У військах, на передній лінії зіткнення, для боротьби з такими цілями пропонується, використовувати кулемети 12,7 мм та ЗУ-23, але інформації, що така зброя є достатньо ефективною немає. Засобів радіоелектронної боротьби з малорозмірними повітряними цілями також немає.

На сьогоднішній день, за умови визначених характеристик засобу ФПП БПЛА, актуальним залишається пошук можливих варіантів їх сумісної роботи зі штатними засобами радіолокаційної розвідки, що знаходяться в складі сил та засобів, які виконують завдання пов'язані з виявленням та супроводженням повітряних цілей.

Список літератури

1. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства: моногр. / М.Н. Ясечко, А.И. Дохов, М.Г. Иванец, О.В. Тесленко; под ред. М.Н. Ясечко. – Х.: Диска плюс, 2015. – 216 с.
2. Небабин В.Г.. Защита РЛС от противорадиолокационных ракет / В.Г. Небабин, И.Б. Кузнецов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – № 5. – С. 67-81.

3. Панов В.В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения / В.В. Панов, А.П. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10-12. – С. 29-34.

4. Воздействие на различные объекты СВЧ излучения большой мощности. // Радиотехника и связь, экспресс информация, ВИНТИ, №9, 1995. – С. 11-13.

5. Гомозов В.И. Фокусировка электромагнитного излучения на основе пространственно-фазо-частотно-временного управления сигналами в ФАР и разнесенных системах излучателей / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, С.В. Титов // Сб. научн. трудов по материалам 1-го Международного радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". МРФ-2002 (8 - 10 октября 2002 г.) Ч. 2. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – С. 435-438.

6. Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в цилиндрических ФАР при V-образной дискретизации частот / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, А.А. Лоскутов, С.В. Титов // Всеукр. межвед. научно-техн. сб. Радиотехника. – Харьков: ХНУРЭ, вып. 127, 2002. – С. 42-49.

7. Антипин В.В. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В. Антипин, В.А. Годовицын, Д.В. Громов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37-53.

8. Whalen J.J. Computer-aided analysis of RFI effects in digital integrated circuits / J.J. Whalen, J.G. Tront, C.E. Larson // IEEE Trans. – 1979. – Vol. EMC-21, № 4. – P. 291-297.

9. Jenkins C.R. EMP susceptibility of integrated circuits / C.R. Jenkins, D.L. Durgin // IEEE Trans. – 1975. – Vol. NS-22. – P. 24.94-24.99.

10. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Р.А. Зингер // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – №8. – С. 40-57.

11. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. / Э. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Связь, 1976. – 495 с.

Надійшла до редколегії 7.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОПРОВОЖДЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЦЕЛЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ

М.Н. Ясечко, А.А. Ковальчук, Д.В. Максута

В статье анализируется перспективное направление борьбы с БПЛА тактического уровня путем их функционального подавления и поражения (ФПП). Данный метод борьбы является альтернативой традиционному физическому уничтожению воздушных целей огневыми средствами, эффективность которых, применительно к тактическим БПЛА, существенным образом снижается как с тактико-технической, так и экономической точки зрения.

Ключевые слова: функциональное подавление и поражение, беспилотные летательные аппараты, электромагнитный импульс, многочастотный пространственно-временной сигнал.

EVALUATION OF THE ACCURACY CAPABILITIES OF THE TRACK LITTLE DIMENSIONAL PURPOSES FOR A FUNCTIONAL DESTRUCTION

M.M. Iasechko, A.O. Kovalchuk, D.V. Maksuta

The article examines promising area of combat UAV tactical level by functional suppression and destruction (FRR). This method of struggle is an alternative to traditional physical destruction of air targets firing means, the effectiveness of which, for tactical UAVs, significantly reduces performance and economic point of view.

Keywords: functional suppression and destruction, unmanned aerial vehicles, electro-magnetic pulse, multifrequency space-time signals.