

УДК 621.396

С.О. Дупелич

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, Житомир

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДАЛЬНОСТІ ВІЯВЛЕННЯ ТАКТИЧНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗАСОБАМИ РАДІОМОНІТОРИНГУ

Ефективність застосування засобу радіомоніторингу для виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів може бути оцінена за дальністю, на якій він спроможний виконати завдання за призначенням з імовірністю, не нижче заданої. Удосконалено методику розрахунку дальності виявлення цифрових систем передачі даних тактичних безпілотних літальних апаратів засобами радіомоніторингу та наведено приклад її застосування. Запропонований підхід враховує особливості інформативних електромагнітних випромінювань тактичних безпілотних літальних апаратів та дозволяє обґрунтувати вибір раціонального типу засобу радіомоніторингу з урахуванням необхідної дальності виявлення.

Ключові слова: виявлення, безпілотний літальний апарат, радіомоніторинг, методика.

Вступ

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Активне застосування тактичних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сучасних збройних конфліктах для виконання завдань розвідки спричинило актуалізацію питань щодо їх виявлення. Одним з можливих підходів до вирішення цього завдання може бути застосування засобів радіомоніторингу (РМ) для виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА в польоті.

Відомо, що для передачі на пункт управління (ПУ) інформації про стан обладнання літального апарата, навігаційних параметрів, а також фото- та відеоінформації тощо призначені командно-телеметричний радіоканал та радіоканал передачі даних корисного навантаження (КН) БПЛА [1]. Крім них можуть використовуватися радіоканали автоматичної рятувальної системи, пристрою забезпечення посадки та передачі диференційних поправок. Встановлено [2], що в тактичних БПЛА у зв'язку з масо-габаритними обмеженнями до бортових пристроїв передачі інформації (радіопередавачів) у переважній більшості випадків (близько 95%) використовують один об'єднаний радіоканал для передачі як телеметричних даних, так і даних КН. Робота такого радіоканалу і буде визначати інформативні електромагнітні випромінювання тактичного БПЛА в польоті, які доцільно виявляти засобами РМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню виявлення радіовипромінювань присвячена достатня кількість публікацій [3 – 6], проте особливості інформативних електромагнітних випромінювань тактичних БПЛА вимагають проведення додаткових досліджень щодо оцінки можливостей засобів РМ для виявлення БПЛА на дальності, за якої забезпечуватиметься своєчасне виконання заходів протидії.

Формулювання мети статті. Завданням досліджень є удосконалення методики розрахунку дальності виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА в

польоті для забезпечення обґрунтування вибору раціонального типу та параметрів засобу РМ.

Виклад основного матеріалу дослідження

Визначення дальності виявлення електромагнітних коливань у вільному просторі з урахуванням використання передавальної та приймальної антен здійснюється за допомогою відомого рівняння радіозв'язку [3]:

$$r_{\text{БПЛА}}^{\text{ід}} = \sqrt{\frac{E_{\text{БПЛА}} G_{\text{БПЛА}} F_{\text{нБПЛА}}(\Theta, \varphi) \gamma A_{\text{РМ}}}{4\pi N_{\text{РМ}}}}, \quad (1)$$

де $r_{\text{БПЛА}}^{\text{ід}}$ – дальність виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА, км; $E_{\text{БПЛА}}$ – енергія випромінювань радіопередавача тактичного БПЛА, В;

$A_{\text{РМ}} = \frac{\lambda_{\text{БПЛА}}^2}{4\pi} G_{\text{РМ}} F_{\text{нРМ}}(\Theta, \varphi)$ – ефективна площа антени засобу РМ, м² [4]; $\lambda_{\text{БПЛА}}$ – довжина хвилі випромінювань радіопередавача тактичного БПЛА, м; $G_{\text{БПЛА}}, G_{\text{РМ}}$ – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно, дБ; γ – коефіцієнт поляризації; $N_{\text{РМ}}$ – чутливість приймача

засобу РМ, мкВ; $F_{\text{нБПЛА}}(\Theta, \varphi) = \frac{F_{\text{пер}}(\Theta, \varphi)}{F_{\text{max пер}}(\Theta, \varphi)}$ –

нормована амплітудна діаграма спрямованості передавальної антени в напрямку "тактичний БПЛА –

засіб РМ"; $F_{\text{нРМ}}(\Theta, \varphi) = \frac{F_{\text{пр}}(\Theta, \varphi)}{F_{\text{max пр}}(\Theta, \varphi)}$ – нормована

амплітудна діаграма спрямованості приймальної антени в напрямку "засіб РМ – тактичний БПЛА";

$F_{\text{пер}}(\Theta, \varphi)$ – значення амплітудної діаграми спрямо-

ваності антени тактичного БПЛА; $F_{\max \text{ пер}}(\Theta, \varphi)$ – найбільше значення амплітудної діаграми спрямованості антени тактичного БПЛА; $F_{\text{пр}}(\Theta, \varphi)$ – значення амплітудної діаграми спрямованості антени засобу РМ; $F_{\max \text{ пр}}(\Theta, \varphi)$ – найбільше значення амплітудної діаграми спрямованості антени засобу РМ; Θ, φ – кут між дійсним і головним напрямками діаграм спрямованості антен засобу РМ і тактичного БПЛА у вертикальній та горизонтальній площині відповідно, град.

Однією з основних вимог до систем зв'язку тактичних БПЛА є забезпечення передачі даних з необхідною швидкістю і заданою ймовірністю помилки при значних відстанях між тактичним БПЛА і ПУ [1]. У результаті проведеного аналізу основних стандартів передачі даних [7] встановлено, що значення швидкості передачі даних з борту БПЛА на ПУ повинне бути не менше 32 кбіт/с за ймовірності бітової помилки не більше 10^{-5} . Забезпечення зазначених вимог можливе в цифрових системах передачі даних. Для оцінки ефективності виявлення таких систем використовують підхід, згідно з яким визначають залежність ймовірності появи помилкового біта (бітової помилки) P_b від нормованого показника якості цифрових систем передачі даних $(E_b/N_0)_{\text{раз}}$ – відношення енергії 1-го біта сигналу E_b до спектральної щільності адитивного білого гауссівського шуму N_0 у смузі 1 Гц [8]:

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du, \quad (2)$$

де ρ – коефіцієнт кореляції між реалізаціями сигналу.

Параметр $(E_b/N_0)_{\text{раз}}$ є відношенням величини енергії символу E_s до спектральної щільності потужності шуму засобу РМ $N_{\text{РМ}}$, нормованим на значення ширини смуги пропускання засобу РМ $W_{\text{РМ}}$ і швидкість передачі біта R_b :

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{раз}} = \frac{E_s}{N_{\text{РМ}}} \frac{W_{\text{РМ}}}{R_b}. \quad (3)$$

У формулі (3) E_s визначається енергією випромінювання радіопередавача тактичного БПЛА $E_{\text{БПЛА}}$, а $N_{\text{РМ}}$ характеризує чутливість радіоприймача засобу РМ і може бути задане відомим співвідношенням [4]:

$$N_{\text{РМ}} = kK_{\text{ш}}T_0W_{\text{РМ}}, \quad (4)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; $K_{\text{ш}}$ – коефіцієнт шуму радіоприймача; T_0 – температура, К.

У такому разі отримаємо

$$\frac{E_{\text{БПЛА}}}{N_{\text{РМ}}} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{раз}} \frac{R_b}{W_{\text{РМ}}}. \quad (5)$$

Анени, які використовують у тактичних БПЛА, характеризуються малою направленістю і нерівномірністю коефіцієнта підсилення в межах робочого сектора [5]. Якщо для конкретного тактичного БПЛА значення амплітудної нормованої діаграми спрямованості невідоме, то в межах робочого сектора приймається $F_{\text{БПЛА}}(\Theta, \varphi) \approx 1$, а рівняння (1) для тактичних БПЛА може бути записане в такому вигляді:

$$I_{\text{БПЛА}}^{\text{ід}} = \frac{\lambda_{\text{БПЛА}} \sqrt{G_{\text{БПЛА}} G_{\text{РМ}} F_{\text{нРМ}}(\Theta, \varphi) \gamma}}{4\pi} \times \sqrt{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{раз}} \frac{R_b}{W_{\text{РМ}}}}. \quad (6)$$

Отже, дальність виявлення інформативних електромагнітних випромінювань тактичних БПЛА, крім зазначених у формулі (1) параметрів, залежить від нормованого показника якості цифрових систем передачі даних, ширини смуги пропускання засобу РМ та швидкості передачі даних. При цьому мінімально необхідна смуга пропускання засобу РМ W_{min} (ширина смуги частот за Найквістом) [8] визначається швидкістю передачі даних з урахуванням кількості позицій виду маніпуляції M :

$$W_{\text{min}} = \frac{R_b}{2 \log_2 M}. \quad (7)$$

Таким чином, вихідними даними для розрахунку дальності виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА в польоті є параметри радіовипромінювання БПЛА $\lambda_{\text{БПЛА}}$, $G_{\text{БПЛА}}$, γ , R_b , характеристики засобу РМ $G_{\text{РМ}}$, $F_{\text{нРМ}}(\Theta, \varphi)$, $W_{\text{РМ}}$, а також нормований показник якості цифрових систем передачі даних $(E_b/N_0)_{\text{раз}}$. За виконання умови забезпечення достатності ширини смуги пропускання засобу РМ методика розрахунку дальності виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА в польоті передбачає виконання таких етапів:

1. Для досліджуваного сигналу визначають нормоване відношення сигнал/шум $(E_b/N_0)_{\text{дБ}}$ за заданою ймовірністю бітової помилки $P_b \leq 10^{-5}$.

Оскільки відношення $(E_b/N_0)_{\text{раз}}$ для різних видів маніпуляції характеризується ймовірністю бітової помилки, то діапазон його значень може бути визначений у межах, заданих P_b . Проте безпосереднє розв'язання рівняння (2) для різних видів маніпуляцій радіопередавача тактичного БПЛА в аналітичному вигляді виконати неможливо. Тому з ура-

хуванням проведених досліджень взаємозв'язку якісних характеристик для різних видів цифрової маніпуляції [8 – 10], можливо записати спрощені вирази, які дозволяють з похибкою близько 0,1 дБ розрахувати значення P_b . Наближені формули для розрахунку бітової помилки для основних видів маніпуляції радіопередавача тактичного БПЛА, у яких $Q(x)$ є гауссовим інтегралом помилок, зведено в табл. 1.

Таблиця 1
Ймовірність P_b для різних видів маніпуляцій

Вид маніпуляції	P_b
MSK GMSK	$Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$
BPSK, QPSK OQPSK	$Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
8PSK	$\frac{2}{3}Q\left(\sqrt{\frac{6E_b}{N_0}}\sin\left(\frac{\pi}{8}\right)\right)$
16PSK	$\frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{8E_b}{N_0}}\sin\left(\frac{\pi}{16}\right)\right)$
QAM8	$\frac{4}{3}\left(1-\frac{1}{\sqrt{8}}\right)Q\left(\sqrt{\frac{9E_b}{7N_0}}\right)$
QAM16	$\left(1-\frac{1}{\sqrt{16}}\right)Q\left(\sqrt{\frac{12E_b}{15N_0}}\right)$
QAM32	$\frac{4}{5}\left(1-\frac{1}{\sqrt{32}}\right)Q\left(\sqrt{\frac{15E_b}{31N_0}}\right)$

Порівняльні енергетичні характеристики для видів маніпуляцій, застосовувані для передачі інформації з тактичного БПЛА на ПУ, можуть бути побудовані за допомогою пакету прикладних програм для числового аналізу MATLAB. Для розв'язку задачі визначення залежності ймовірності бітової помилки від нормованого показника якості цифрових систем передачі даних для різних видів маніпуляцій розробники MATLAB реалізували графічне середовище BERTool, призначене для побудови залежностей P_b від відношення $(E_b / N_0)_{дБ}$.

Теоретично розраховані за допомогою середовища BERTool залежності ймовірності бітової помилки від нормованого відношення сигнал/шум для визначених видів маніпуляцій радіопередавача, які можуть застосовуватися в тактичних БПЛА, наведено на рис. 1.

Оскільки для систем передачі даних з тактичного БПЛА на ПУ $P_b \leq 10^{-5}$, то за допомогою наведених графічних залежностей можна встановити значення параметра $(E_b / N_0)_{дБ}$ для визначених

видів модуляції, які використовуються в радіопередавачах тактичних БПЛА. Результати таких розрахунків для деяких значень величини ймовірності бітової помилки наведено у табл. 2.

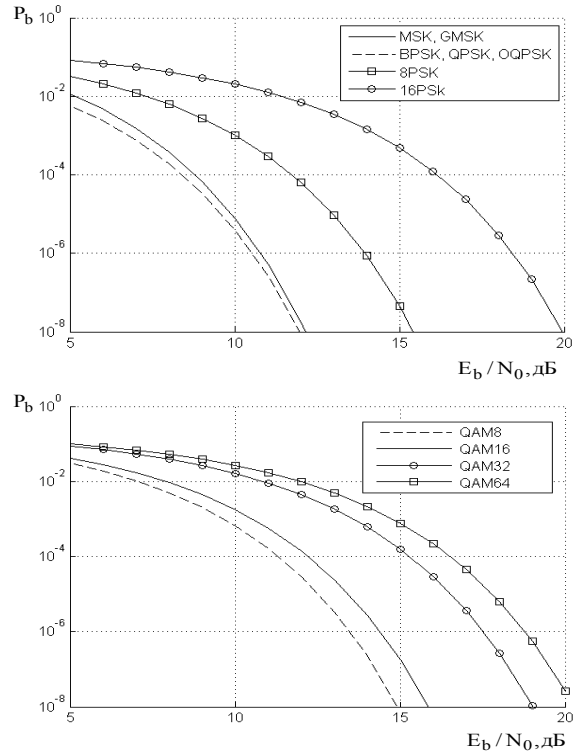


Рис. 1. Залежність ймовірності бітової помилки від енергії сигналу для різних видів маніпуляцій

Таблиця 2
Значення $(E_b / N_0)_{дБ}$ для різних видів маніпуляцій радіопередавача тактичного БПЛА

P_b	Вид маніпуляції			
	GMSK	QPSK	16 PSK	QAM 64
10^{-5}	9,89	9,58	17,43	17,78
10^{-6}	10,77	10,53	18,44	18,77
10^{-7}	11,51	11,31	19,26	19,59

2. Визначають значення швидкості передачі даних R_b .

Швидкість передачі даних R_b з борту тактичного БПЛА на ПУ визначається, в основному, характеристиками обладнанням КН і бортового комплексу управління. Інформаційний потік у такому разі формується двома групами даних: розвідувальними та навігаційними. Дані тактичних БПЛА здебільшого надходять від пристроїв, які формують відеозображення. Такий потік відеоданих може супроводжуватися допоміжною інформацією з бортового навігаційного обладнання та бортової системи управління. Таким чином, швидкість передачі даних з тактичних БПЛА на ПУ визначається якістю розвідувальних відеоданих, яка характеризується розряд-

ністю і формою пікселів, їх кількістю в кадрі зображення, частотою і форматом кадру, ступенем стиснення зображення, імовірністю появи помилкових пікселів у кадрі та типом зображення [7]. Характеристики основних форматів відеоданих, які застосовуються у пристроях формування відеозображень тактичних БПЛА, наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Типові значення швидкості передачі даних для деяких відеоформатів

Параметр	R _b , Мбіт				
	3-10	1,5-5	1,024-1,5	0,768-1,024	0,032-0,056
Глибина пікселів, біт	8	8	8	8	8
Розрядність пікселів: по горизонталі по вертикалі	720 576	720 480	480-576 320-352	480-576 320-352	160-176 120-144
Частота кадрів, Гц	24-30	24-30	24-30	24-30	12-15
Формат кадру	5:4	3:2	3:2	3:2	4:3
Коефіцієнт стиснення зображення	28:1	56:1	110:1	165:1	5200:1

За ними з'ясовують значення R_b для відповідного відеоформату, який визначається типом відеоапаратури певного тактичного БПЛА.

3. За формулою (7) розраховують мінімально необхідну смугу пропускання засобу РМ W_{min} та перевіряють виконання умови W_{min} < W_{PM}.

4. На основі вихідних та отриманих даних за формулою (6) розраховують дальність виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА в польоті з урахуванням переведення відношення (E_b / N₀)_{дБ} з децибел на безрозмірні одиниці за допомогою формули (E_b / N₀)_{раз} = 10lg(E_b / N₀)_{дБ}.

5. Обґрунтовують вибір раціонального типу та параметрів засобу РМ з урахуванням необхідної дальності, за якої буде можливо забезпечити своєчасну протидію БПЛА.

Для визначення залежності дальності виявлення радіовипромінювання тактичного БПЛА в польоті від різних значень енергії сигналу та швидкості передачі даних реалізовано побудову сімейства графіків, які демонструють залежність дальності виявлення випромінювання бортового радіопередавача тактичного БПЛА від смуги пропускання радіоприймача засобу РМ $\gamma_{БПЛА}^{id} = f(W_{PM})$ для тактичного БПЛА з параметрами: $\lambda_{БПЛА} = 0,659\text{ м}$, $G_{БПЛА} = 5\text{ дБ}$, $G_{PM} = 12\text{ дБ}$, $F_{нPM}(\Theta, \varphi) = 1$ – у максимумі головної пелюстки діаграми спрямованості антени засобу РМ при $\gamma = 1$.

Побудовані графіки залежності $\gamma_{БПЛА}^{id} = f(W_{PM})$ для QPSK маніпуляції та відеоформату стандарту MPEG2, який широко застосовується в системах передачі зображень, для різних значень (E_b / N₀)_{дБ} при R_b = 768 кбіт наведено на рис. 2, а, а для (E_b / N₀)_{дБ} = 9,58 дБ з різною швидкістю передачі даних – на рис. 2, б.

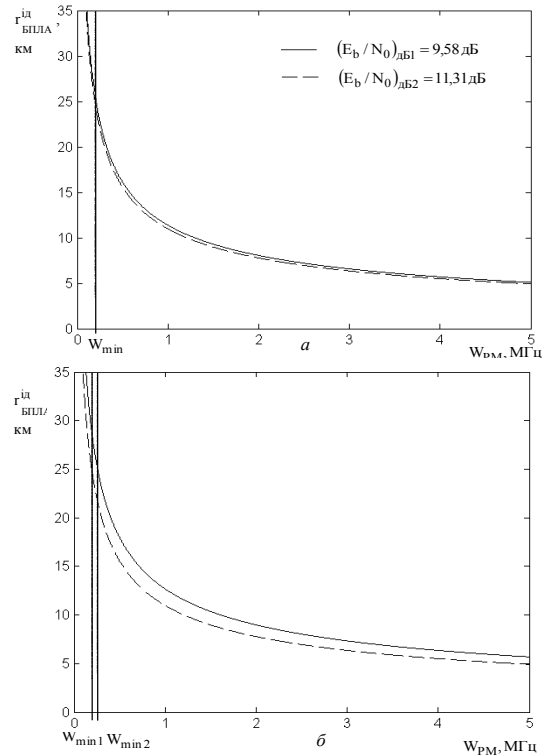


Рис. 2. Залежність дальності виявлення тактичного БПЛА від смуги пропускання радіоприймача засобу РМ

Розраховані значення дальності виявлення $\gamma_{БПЛА}^{id}$ радіовипромінювання тактичного БПЛА без урахування впливу перешкод для різних бітових швидкостей за ймовірності біткової помилки не менше 10⁻⁵ наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Дальність виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА $\gamma_{БПЛА}^{id}$, км

R _b , Мбіт	W _{min} , МГц	W _{PM} , МГц				
		0,2	0,5	1	2	10
0,768	0,192	25,12	15,89	11,23	7,94	3,55
1,024	0,256	-	18,35	12,97	9,17	4,10

Таким чином, встановлено залежність дальності виявлення цифрових систем передачі даних тактичних БПЛА від характеристик радіопередавача та засобу РМ, який використовується. Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки:

1. Збільшення швидкості передачі даних з борту тактичного БПЛА на ПУ зумовлює необхідність підвищення потужності радіопередавача, що, у свою чергу, підвищує дальність його виявлення засобами РМ.

2. Збільшення ширини смуги пропускання засобу РМ призводить до зменшення дальності виявлення випромінювання радіопередавача тактичного БПЛА.

3. Застосування малих значень бігової швидкості, хоч і зменшує дальність виявлення бортового радіопередавача тактичного БПЛА, проте і значно обмежує його розвідувальні можливості. Це пов'язано з низькою роздільною здатністю зображення, яке передається на ПУ.

4. Підвищення дальності виявлення радіовипромінювань тактичних БПЛА може бути досягнуто за рахунок виконання таких заходів:

- використання в засобах РМ направлених антен з вузькою діаграмою спрямованості та можливістю керування нею в азимутальній та кутомірній площині;

- керування значенням смуги пропускання радіоприймача в процесі РМ;

- зміни рівня порога виявлення залежно від заданого значення ймовірності хибної тривоги.

Висновки

У результаті проведених досліджень визначено особливості інформативних електромагнітних випромінювань тактичних БПЛА та запропоновано вдосконалену методику розрахунку дальності їх виявлення засобами РМ. На основі модельного прикладу побудовано та проаналізовано графіки залежності дальності виявлення випромінювання бортового радіопередавача гіпотетичного тактичного БПЛА від смуги пропускання радіоприймача певного засобу РМ залежно від нормованого показника якості цифрових систем передачі даних та швидкості передачі даних, а також визначено напрямки підвищення дальності виявлення радіовипромінювань

тактичних БПЛА. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методики оцінювання часу на застосування засобу РМ для своєчасного виявлення тактичних БПЛА.

Список літератури

1. Аналіз радіолиній зв'язу з беспилотними летальними апаратами [Електронний ресурс] // *Радиотехнические системы*. – Режим доступу: http://radio-systems.org/uav_communications_links.

2. Даник Ю.Г. Аналіз власних випромінювань обладнання тактичних безпілотних літальних апаратів / Ю.Г. Даник, С.О. Дупелич // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр.* – Житомир: ЖВІ ДУТ, 2015. – Вип. 10. – С. 21-27.

3. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Торопчин, І.О. Романенко, Ю.Г. Даник та ін. – К.: МО України, Х.: ХВУ, 2003. – 368 с.

4. Смирнов Ю.А. *Радиотехническая разведка* / Ю.А. Смирнов – М.: Воениздат, 2001. – 456 с.: ил.

5. Мельников Ю.П. *Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности)* / Ю.П. Мельников. – М.: Радиотехника, 2005. – 304 с.: ил.

6. Рембовский А.М. *Радиомониторинг – задачи, методы, средства* / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин: под. ред. А.М. Рембовского. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 624 с.: ил.

7. Слюсар В. *Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО* / В. Слюсар // *Электроника: НТБ*. – 2010. – № 3. – С. 80–86.

8. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение* / Б. Скляр; пер. с англ. – [2-е изд., испр.]. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

9. Мелихов С.В. *Взаимосвязь качественных характеристик для различных видов цифровой манипуляции* / С.В. Мелихов, В.А. Кологривов // *Доклады ТУСУРа. Технические науки*. – 2006. – № 10. – С. 68-77.

10. Шелковина Е.А. *Сравнительный анализ методов цифровой модуляции в стандартах цифрового радиовещания* / Е.А. Шелковина, О.Г. Лебедев // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вип. 8. – С. 55-58.

Надійшла до редколегії 12.09.2016

Рецензент: д-р техн. наук Ю.В. Журавський, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СРЕДСТВАМИ РАДИОМОНИТОРИНГА

С.А. Дупелич

Эффективность применения средства радиомониторинга для обнаружения тактических беспилотных летательных аппаратов может быть оценена за дальностью, на которой оно способно выполнить задание с вероятностью, не ниже заданной. Усовершенствована методика расчета возможной дальности обнаружения цифровых систем передачи данных тактических беспилотных летательных аппаратов средствами радиомониторинга и представлен пример ее применения. Предложенный подход учитывает особенности информативных электромагнитных излучений тактических беспилотных летательных аппаратов и позволяет обосновать выбор рационального типа средства радиомониторинга с учетом необходимой дальности обнаружения.

Ключевые слова: обнаружение, беспилотный летательный аппарат, радиомониторинг, методика.

THE IMPROVED METHOD OF CALCULATION DISTANCE OF DETECTION OF TACTICAL UNMANNED AERIAL VEHICLES MEANS TO RADIOMONITORING

S.O. Dupelich

Efficiency of detecting of tactical unmanned aerial vehicles can be appraised after distance, on which it is able to do a task with probability, not below set. The improved method of calculation of possible distance of detection of digital transmissions systems of tactical unmanned aerial vehicles means to radiomonitoring is developed and the example its application is given. Offered approach takes into account the features of digital transmissions systems of tactical unmanned aerial vehicles. It enables to ground the choice of rational type of radiomonitoring mean taking into account necessary distance of detecting.

Keywords: detecting, unmanned aerial vehicle, radiomonitoring, method.