

SERHII VASYLENKO

ANALYSIS SYSTEM CLOCK RADIO RESET WITH A FREQUENCY HOPPING SPREAD SPECTRUM

Obsolete and outdated noise immunity and immunity of radio communication equipment in conditions of jamming requires the development and introduction of the anti-interference means a new generation of radio. One of the most effective methods to increase the noise immunity of radio links is the use of broadband radio systems with a frequency hopping spread spectrum (FHSS). A necessary condition for good reception and processing of signals with FHSS, there is a precise synchronization pseudo-random sequence (PRS) receiver and transmitter. This synchronization is achieved by aligning the PRS at the receiving side, and keeping this state during operation. Matching PRS transmitter and receiver, as well as the task of finding a signal in the time-frequency uncertainty assigned to the synchronization system. The algorithm of the synchronization of the system is determined by the synchronization methods used in this system, and the rules for their implementation. The paper deals with a typical algorithm of the receiver synchronization system with FHSS, which is presented in the form of “search-seizure-track” strategy. In accordance with the synchronization algorithm is presented a generalized block diagram of the synchronization subsystem RCS with FHSS. Considered as an example of a typical timing diagram of the algorithm acquisition synchronization radiostation with FHSS, in which two options are detailed variances starting time of the receiver relative to the transmitter.

Keywords: radio communication system, wideband signals, frequency hopping spread spectrum, synchronization system.

Сергій Вікторович Василенко, аспірант, Державний заклад ”Інститут спеціального зв’язку та захисту інформації Національного технічного університету України ”Київський політехнічний інститут”, Київ, Україна.

E-mail: sirx0308@gmail.com.

Сергей Викторович Василенко, аспирант, Государственное учреждение ”Институт специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины ”Киевский политехнический институт”, Киев, Украина.

Serhii Vasylenko, postgraduate student, State institution ”Institute of special communication and information protection of National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnic institute”, Kyiv, Ukraine.

УДК 631.937.33

ДЕНИС БАХТІЯРОВ

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ДОСТУПНОСТІ ЗАСОБІВ ЗВ’ЯЗКУ З БПЛА В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ З БОКУ ПРОТИВНИКА

В даній статті проводилась порівняльна оцінка енергетичної доступності засобів радіозв’язку з безпілотними літальними апаратами, що показала можливість виконання просторової умови радіозаглушення засобами радіоелектронної боротьби для всіх розглянутих ліній радіозв’язку. Енергетична умова радіозаглушення виконується гарантовано тільки для ліній радіозв’язку, організованих на основі дискретних та широкосмугових систем модуляції без застосування завадостійкого кодування. Для дискретних систем модуляції і

© Д. Бахтіяров

ширококутних систем зв'язку із застосуванням завадостійкого кодування ця умова виконується частково. На основі аналітичних обчислень показників коефіцієнта радіозаглушення було встановлено, що найбільш перспективні системи, побудовані на основі ширококутних систем зв'язку, що володіють найвищим ступенем завадостійкості. А використання додатково різних способів завадостійкого кодування, як основного із заходів підвищення захисту від завад сигнального характеру, роблять їх незрівнянно більш завадостійкими засобами зв'язку, що мають необхідні показники захисту від радіорозвідки, прихованості та пропускну здатності.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, радіосигнал, коефіцієнт радіозаглушення, ширококутна система модуляції, енергетична ефективність, радіоелектронна боротьба.

Вступ. У сучасних умовах розвитку військово-повітряної техніки важлива роль відводиться засобам розвідки та висвітлення оперативної обстановки. Значне навантаження щодо вирішення цієї задачі покладається на безпілотні літальні апарати (БПЛА), які забезпечують в певній заданій зоні баражування ведення розвідки оптичними та радіоелектронними засобами.

На даний момент в США і передових країнах світу розроблені і продовжують високими темпами вдосконалюватися і створюватися нові зразки БПЛА широкого спектра льотно-технічних характеристик і призначення.

БПЛА середнього і великого розміру, що мають великі геометричні розміри, значний тепловий контраст завдяки використанню потужних двигунів внутрішнього згорання, що несуть гарматне і ракетно-бомбове озброєння, параболічні супутникові антени, що мають велике електромагнітне випромінювання (ЕМВ), представляють зручну ціль для засобів протиповітряної оборони (ППО). Малорозмірні ж БПЛА характеризуються малими геометричними розмірами, низькою теплової контрастністю, і швидкістю польоту, а також малим ЕМВ, що не дозволяє забезпечити достатню ефективність їх ураження засобами ППО. Як показує досвід бойових дій останніх років, рішенням проблеми нейтралізації цього класу БПЛА є засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) [1].

Зростання їх ролі та внеску в результат операції обумовлено розширенням можливостей з розвідки і радіозаглушення засобів зв'язку завдяки комплексному застосуванню наземних і повітряних засобів РЕБ. За оцінками фахівців, внесок РЕБ в сукупні втрати, що наносяться противнику, буде постійно зростати. У цій ситуації актуальним є дослідження можливостей противника по радіозаглушенню засобів зв'язку з урахуванням способів їх бойового застосування і основних тактико-технічних характеристик (ТТХ), а також аналіз ефективності різних заходів підвищення завадостійкості засобів зв'язку. При цьому доцільно вирішувати цю задачу шляхом порівняльної оцінки завадостійкості при роздільному і спільному (комплексному) застосуванню заходів захисту від завад [2].

Постановка завдання. Беручи до уваги, що в БПЛА, як правило, використовуються засоби зв'язку УКХ діапазону, які мають направлені або слабонаправлені антени, такі заходи підвищення завадостійкості, як зміна орієнтації антен, в роботі не розглядаються. Тому в подальшому основний аналіз проводився стосовно оцінки енергетичної доступності засобів зв'язку з БПЛА при використанні засобів РЕБ з боку противника. Особливість вирішення завдання полягає в тому, що оцінка проводилася в області великих значень імовірності помилкового прийому 1 біта інформації ($P_{ном2} = 0.1$), що гарантує максимальний ефект радіозаглушення. У відомій літературі, як правило, аналіз завадостійкості засобів зв'язку зазвичай проводиться для малих значень відношення сигнал / шум, коли $P_{ном2}$ істотно менше ($P_{ном2} < 10^{-3}$).

Основний матеріал. Вважатимемо, що противнику заздалегідь відомі характеристики ліній радіозв'язку (ЛРЗ) з БПЛА.

Оцінка енергетичної доступності при радіозаглушенні проводиться відповідно просторовим і енергетичним умовами радіозаглушення (РЗ), наведеними в [3-7].

Етап радіорозвідки. Для зони прямої видимості:

1. Визначається потужність електромагнітного поля (ЕМП) в точці розташування радіоелектронного засобу зв'язку (РЕЗ):

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{нс}} \cdot G_{\text{мтз}} \cdot F(\theta, \varphi) \cdot A_{\text{еф}} \cdot F^{n^2}(\theta, \varphi)}{4\pi R^2}, \quad (1)$$

Визначається зона радіовидимості в межах відстані між системою заглушення засобів зв'язку (СП) і заглушеними РЕЗ ЛРЗ (освітленості, півтіні або тіні).

Залежно від зони радіовидимості проводяться обчислення множників ослаблення уздовж ЛРЗ (для УКХ проводиться додатково перевірка умови на радіовидимості в ближній або дальній зоні від випромінювача).

Обчислюються напруженості поля СП і РЕЗ у точках РЗ.

Обчислюється відношення сигнал / завада (ВСЗ) $K_{\text{вх}}$.

2. Проводиться порівняння $K_{\text{вх}}$ з пороговою чутливістю станції $K_{\text{пр}}$, тобто – перевіряється енергетична умова поширення радіохвиль.

3. Проводиться обчислення граничної дистанції зони поширення радіохвиль УКХ радіозв'язку $R_{\text{пр}}$:

– визначається максимальна дальність зони поширення радіохвиль $R_{\text{птх}}$ при $K_{\text{пр}}$.

– визначається радіус зони розвідки $R_{\text{пр}}$ для обчисленого $K_{\text{вх}}$.

– визначається дальність прямої видимості $D_{\text{пр.в}}$ з урахуванням рельєфу місцевості [2].

4. Проводяться порівняння $R_{\text{птх}}$ з $D_{\text{пр.в}}$, $R_{\text{пр}}$ з $R_{\text{птх}}$ або $D_{\text{пр.в}}$ – перевіряється просторова умова РП. За меншим із показників визначається $D_{\text{емд}}$.

5. Проводиться порівняння реального віддалення наземної станції від ЛРЗ $R = D_{\text{плсв}} + D_{\text{слсв}}$.

6. Проводиться побудова зон розповсюдження радіохвиль (РР).

Вважають, що $P_{\text{прм}} = P_{\text{прм.мін}}$ і $R = R_{\text{м}}$ для визначення максимальної дальності РР у вільному просторі:

Отримаємо

$$R_{\text{м}} = R_{\text{м}}(\Theta, \varphi, \Theta'', \varphi'') = \sqrt{\frac{P_{\text{нс}} G_{\text{мтз}} A_{\text{еф}}}{4\pi P_{\text{прм.мін}}} F(\Theta, \varphi) F''(\Theta'', \varphi'')}, \quad (2)$$

де $P_{\text{прм.мін}}$ – мінімальний рівень сигналу на вході станції РР, необхідний для ведення РР, тобто гранична чутливість приймача,

$F(\theta, \varphi)$ і $F''(\theta'', \varphi'')$ – КНД,

$A_{\text{еф}}$ – ефективна площа приймальної антени системи радіозв'язку.

У випадку, якщо виконуються обидві умови, робиться висновок про те, що задана ЛРЗ з притаманними їй параметрами буде розкрита. Говорити про ймовірнісно-часові показники в даному випадку не доцільно – обчислення енергетичних можливості РР такої відповіді не дає [6].

На підставі проведених енергетичних обчислень $D_{\text{емд}}$ визначаються зони електромагнітної доступності (ЕМД) зі співвідношення:

$$\Gamma_{\text{ЕМД}} = D_{\text{ЕМД}} - D_{\text{ЛСВ}}^{\text{с}}, \quad (3)$$

На підставі отриманих відомостей про ЛРЗ противник прийме рішення про початок процесу радіозаглушення.

Етап радіорозвідки при оцінці енергетичної доступності ЛРЗ показано на рис. 1.

Етап радіозаглушення. На основі отриманих даних в результаті РР противник зробить наступні дії при оцінюванні можливості РП розкритої ЛРЗ:

Визначається тип ЛРЗ.

Пряма задача:

1. Обчислюється ВСЗ на вході приймального пристрою заглушеного каналу зв'язку $K_{\text{вх}}$ за формулою:

$$K_{\alpha} = \frac{P_{пз} \cdot G_{пз} \cdot G_{прз} \cdot D_c^2 \cdot \varphi(D_c) \cdot \gamma}{P_{пс} \cdot G_{пс} \cdot G_{прс} \cdot D_з^2 \cdot \varphi(D_з)}, \quad (4)$$

де $P_{пс}, P_{пз}$ – потужності передавачів сигналу та завади;
 $G_{пс}, G_{пз}$ – коефіцієнти завад (СП) у бік приймача ЛРЗ;
 $G_{прс}, G_{прз}$ – коефіцієнти спрямованості антени приймача ЛРЗ у бік передавача АРС і в бік передавача СП;
 λ – довжина хвилі;
 γ – коефіцієнт поляризаційних втрат внаслідок відмінностей у поляризації випромінювання завади та антени приймача ЛРЗ;
 $D_c, D_з$ – дистанції зв'язку і заглушення;
 $\varphi(D_c), \varphi(D_з)$ – коефіцієнти ослаблення радіохвиль на трасах поширення від передавачів сигналу та завад до заглушеного приймача.

2. Визначається зона РР в межах відстані між СП і заглушуваними РЕЗ ЛРЗ (освітленості, півтіні або тіні).

Залежно від зони РР проводяться обчислення множників ослаблення уздовж ЛРЗ і ЛРП (лінія радіозаглушення). Для УКХ проводиться додатково перевірка умови на РР в ближній або дальній зоні від випромінювача РЕЗ.

3. Проводиться облік загасання підстильної поверхні.
4. Визначаються напруженості поля СП і РЕЗ у точках РП.
5. Визначаються ВЗС $K_{вх}$ для заданої ЛРЗ, визначається ПЕ з ансамблю можливих.
6. Здається необхідне значення $ПЕ_{необх}$ при якому буде досягнута необхідна ступінь ефективності РП
7. Визначається коефіцієнт заглушення $K_з$ відповідний $ПЕ_{необх}$.
8. По знайденому $K_{вх}$ визначається значення показника ефективності ($ПЕК_{вх}$).
9. Визначається залежність $K_{вх} = f(K_{вх})$.
10. Визначається залежність $ПЕК_{вх} = f(K_{вх} [K_{вх}])$.
11. Проводиться порівняння $K_{вх}$ з $K_з$, тобто $ПЕК_{вх}$ з $ПЕ_{необх}$ – перевіряється енергетична умова РП – робиться висновок про ступінь ефективності РП.

Обернена задача:

1. По заданому $ПЕ_{необх}$, тобто ПЕ ($K_з$) визначається необхідне ВЗС на вході заглушеного РЕЗ $K_{вхнеобх} = (K_з)$.

2. Проводиться визначення граничної дистанції радіозаглушення УКХ радіозв'язку $R_з$:

$$R_з = D_c \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{пз} \cdot G_{пз} \cdot G_{прз} \cdot \varphi(D_c) \cdot h_{пз}^2 \cdot \gamma}{P_{пс} \cdot G_{пс} \cdot G_{прс} \cdot \varphi(D_з) \cdot h_{пс}^2 \cdot K_з}}, \quad (5)$$

Формула (5) дозволяє визначати $R_з$ тільки для випадку далекої зони, межі якої для УКХ діапазону визначаються співвідношенням виходячи з умови [4]:

$$\frac{1}{\sqrt{\varphi(D_{с,з})}} = 2 \left| \sin \frac{2\pi \cdot I_{с,з}^*}{\lambda D_{с,з}} \right|, \quad (6)$$

За співвідношенням (6) можна побудувати графік залежності $\varphi(D_з)$ і $\varphi(D_c)$ від $D_з$ і D_c відповідно (див. рис 1).

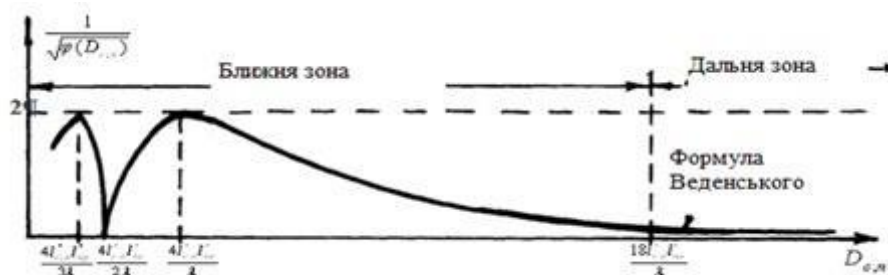


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта ослаблення від дальності

Таким чином, для далекої зони, у випадку якщо параметри РР уздовж лінії радіозв'язку та радіозаглушення наближено співставні ($\varphi(D_3) = \varphi(D_c)$), формула (5) перетвориться до виду:

$$R_3 = D_c \sqrt[4]{\frac{P_{nz} G_{nz} G_{npz} (h_z^*)^2 \gamma}{P_{nc} G_{nc} G_{npc} (h_c^*)^2 K_3}}, \quad (7)$$

де h_z^* , h_c^* – наведені висоти антен.

Для випадку ближньої зони користуватися формулою (5) складно. У цьому випадку визначення зони РП проводиться за формулою (4). Тому необхідно врахувати, що на межі зони заглушення $R_3 = D_3$, а коефіцієнт K_{ex} стає рівним коефіцієнту заглушення K_3 . Тоді:

$$R_n^2 \varphi(R_n) = \frac{P_{nz} G_{nz} G_{npz} D_c^2 \varphi(D_c) \gamma}{P_{nc} G_{nc} G_{npc} K_3} \quad (8)$$

Коефіцієнти ослаблення сигналу і завади $\varphi(D_c)$ і $\varphi(D_3)$ в цьому випадку на трасах поширення будуть рівні:

$$\varphi(D_{c,3}) \approx \frac{\lambda^2 D_{c,3}^2}{16\pi^2 (l_c^*)^2 (l_{np}^*)^2}, \quad (9)$$

- визначається максимальна дальність РП R_{nmax} при K_3 ;
- визначається радіус зони придушення R_3 для обчисленого K_{ex} ;
- визначається дальність прямої видимості $D_{np.в}$ з урахуванням рельєфу місцевості (РЕБ);
- проводиться порівняння R_{nmax} з $D_{np.в}$;
- проводиться порівняння R_n з R_{nmax} або $D_{np.в}$ – перевіряється просторова умова РП;
- проводиться порівняння реального віддалення СП від ЛРЗ $R = D_{плсв} + D_{слсв}$;
- проводиться побудова зон РП.
- перевіряються обидві умови енергетичної доступності (просторова та енергетична) при РП заданої ЛРЗ. Якщо вони виконуються одночасно, ЛРЗ буде гарантовано заглушена при заданих параметрах ЛРЗ і ЛРП [8-9].

Згідно вищенаведеного алгоритму, можна визначити K_{ex} для різних систем модуляції для варіанту комплексів РЕБ наземного та повітряного базування. На підставі цього визначаються залежності радіуса зон заглушення від різних значень K_{ex} для різних ЛРЗ.

Врахуємо, що поширення радіохвиль для наземних комплексів РЕБ відбувається в далекій зоні, межі якої розташовані на відстані 240 м від антени комплексу РЕБ (для заданих вихідних даних: висота антени станції завад – 20 м, РЕЗ зв'язку – 3 м). Можна прийняти, що множники ослаблення уздовж лінії радіозаглушення і радіозв'язку в цьому випадку відповідно рівні

$$\varphi(D_3) = \varphi(D_c),$$

тобто має місце РР в дальній зоні.

Для повітряних комплексів РЕБ поширення радіохвиль відбувається також у дальній зоні, межі якої розташовані на відстані 24 км від антени комплексу РЕБ (для заданих вихідних даних: висота польоту носія комплексу РЕБ – 2000 м, висота підйому антени РЕЗ зв'язку – 3 м), однак, віддалення носія від лінії зв'язку не повинно перевищувати 15 км.

Множники ослаблення уздовж лінії радіозаглушення і радіозв'язку в цьому випадку будуть відповідно рівні

$$\varphi(D_3) = \varphi(D_c),$$

в іншому випадку (при наближенні носія РЕБ ближче 15 км від лінії зв'язку) РР буде проходити в ближній зоні і множники ослаблення $\varphi(D_3)$ і $\varphi(D_c)$ з урахуванням цього будуть відрізнятися

$$\varphi(D_3) \neq \varphi(D_c).$$

При обчисленнях були прийняті наступні допущення (найгірші для РЕЗ) зазначені в табл. 1. Прийнято 3 групи ЛРЗ, що використовуються для зв'язку з безпілотними літальними апаратами. Виходячи з призначення ЛРЗ, будуть змінюватися їх характеристики.

Таблиця 1 – Вихідні дані при обчисленнях енергетичної доступності

| | ЛРЗ -1 Для наземних / повітряних комплексів РЕБ | ЛРЗ -2 Для наземних / повітряних комплексів РЕБ | ЛРЗ -3 Для наземних / повітряних комплексів РЕБ |
|-----------------|--|--|--|
| $D_{лсвр}$, км | 3/15 | 3/15 | 3/15 |
| D_c , км | 2-10 | 2-4 | 4-6 |
| $D_{лсвс}$, км | 2-10 | 0.2-2 | 2-4 |
| F , МГц | 80 | 80 | 80 |
| $P_{сп}$, Вт | 1500 | 1500 | 1500 |
| $P_{лрз}$, Вт | 100 | 10 | 50 |
| $h_{сп}$, м | 20 / 2000 | 20 / 2000 | 20 / 2000 |
| $h_{лрз}$, м | 3-20 | 1.5-10 | 1.5-15 |

Примітка. де D_c – дальність зв'язку, $D_{лсвс}$ – віддалення від ЛСВ заглушеного приймача ЛРЗ, $D_{лсвр}$ – віддалення від ЛСВ засобів РЕБ, $P_{сп}$ і $P_{лрз}$ – потужності СП і передавачів АРС.

Так на рис. 2-4 наведена залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушеного приймача (наземний варіант базування засобів РЕБ) для кожної з ЛРЗ, а на рис. 5-7 наведена залежність радіусів зон заглушення від величини ВСЗ на вході заглушеного приймача (повітряний варіант базування засобів РЕБ) для варіанту РР в дальній зоні. Залежності наведені для типових потужностей передавачів ($P_{лрз} = 100, 50$ і 10 Вт) і висот підняття антен РЕЗ зв'язку ($h_{лрз} = 1.5, 3$ і 20 м).

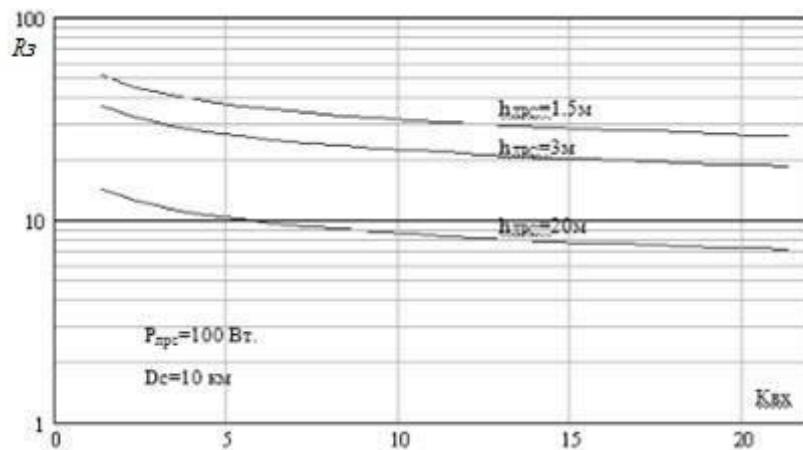


Рисунок 2 – Залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушеного приймача (наземний варіант базування засобів РЕБ)

Вихідні дані (ЛРЗ-1): $h_{лрз} = 20, 3, 1.5$ м; $P_{лрз} = 100$ Вт; $D_c = 10$ км; $D_{лсвн} = 13$ км, $h_{сп} = 0.02$ км.

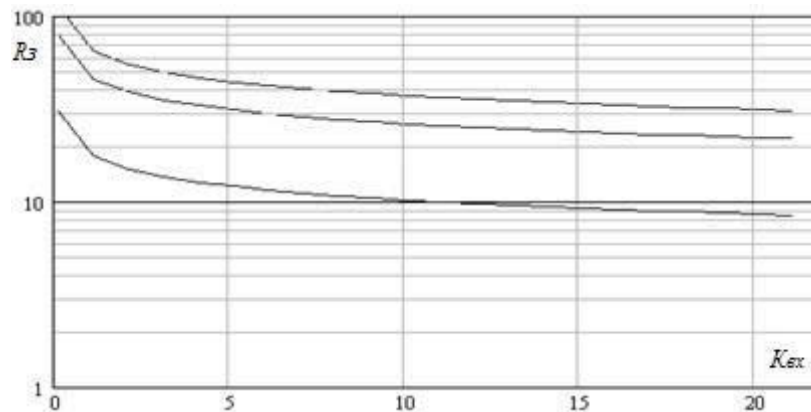


Рисунок 3 – Залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушеного приймача (наземний варіант базування засобів РЕБ)

Вихідні дані (ЛРЗ-2): $h_{лрз} = 1.5, 3, 20$ м, $P_{лрз} = 10$ Вт, $D_c = 3$ км, $D_{лсвн} = 3$ км, $h_{сп} = 0.02$ км.

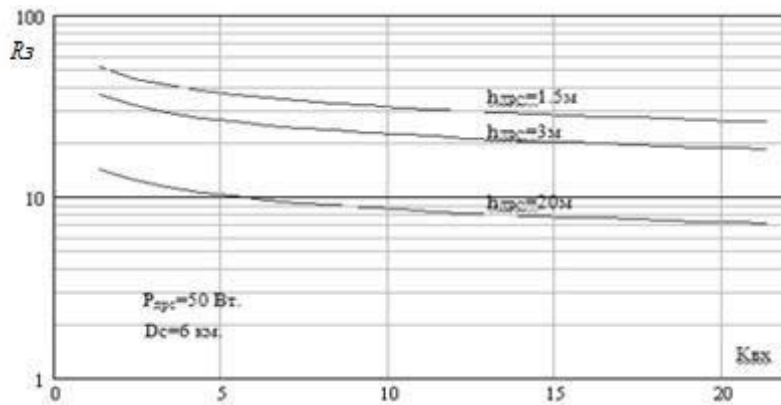


Рисунок 4 – Залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушуваного приймача (наземний варіант базування засобів РЕБ)

Вихідні дані (ЛРЗ-3): $h_{лрз} = 1.5, 3, 20$ м, $P_{лрз} = 50$ Вт, $D_c = 6$ км, $D_{лсвп} = 3$ км, $h_{сн} = 0.02$ км.

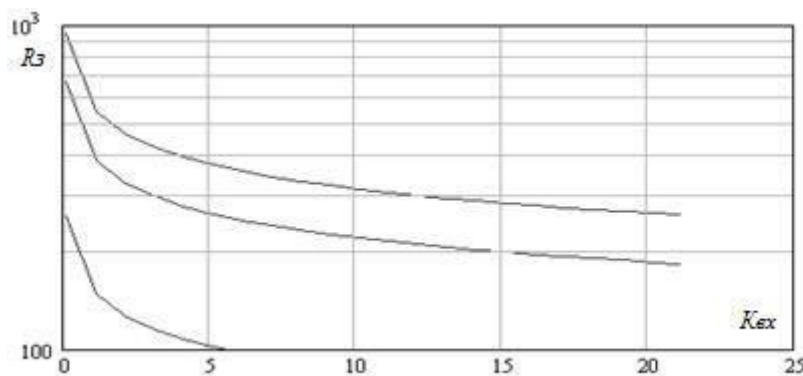


Рисунок 5 – Залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушуваного приймача (повітряний варіант базування засобів РЕБ)

Вихідні дані (ЛРЗ-1): $h_{лрз} = 1.5, 3, 20$ м, $P_{лрз} = 100$ Вт, $D_c = 10$ км, $D_{лсвп} = 25$ км, $h_{сн} = 0.02$ км.

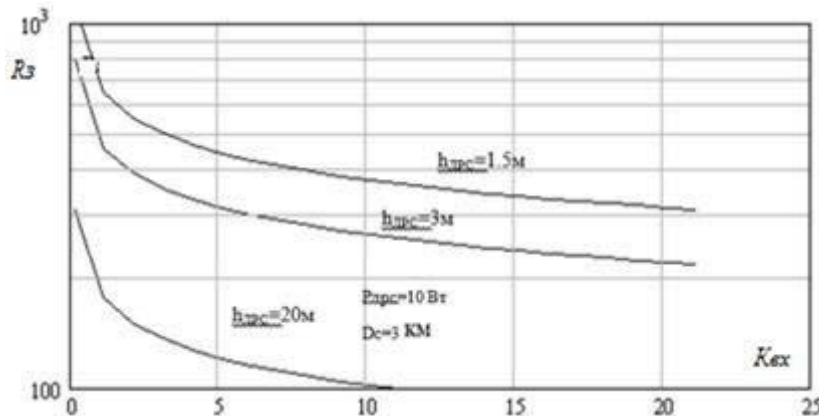


Рисунок 6 – Залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушуваного приймача (повітряний варіант базування засобів РЕБ)

Вихідні дані (ЛРЗ-2): $h_{лрз} = 1.5, 3, 20$ м, $P_{лрз} = 10$ Вт, $D_c = 3$ км, $D_{лсвп} = 15$ км, $h_{сн} = 2$ км.

Вихідні дані (ЛРЗ-3): $h_{лрз} = 1.5, 3, 20$ м, $P_{лрз} = 50$ Вт, $D_c = 6$ км, $D_{лсвп} = 17$ км, $h_{сн} = 2$ км.

Зробимо обчислення для варіанта повітряного розташування засобів РЕБ на віддаленні від лінії зв'язку на відстані менше 5 км, тобто зробимо обчислення для ближньої зони за формулами (8-9). У цьому випадку побудована залежність $K_{вх}$ від дальності заглушення D_z , при фіксованій дальності зв'язку D_c . Для обчислень були прийняті дальності зв'язку і заглушення, характерні для кожного з типу АРС і системи ІЕWCS (див. табл. 2).

Отримані залежності $K_{вх}$ від D_3 наведено на рис. 8-9.

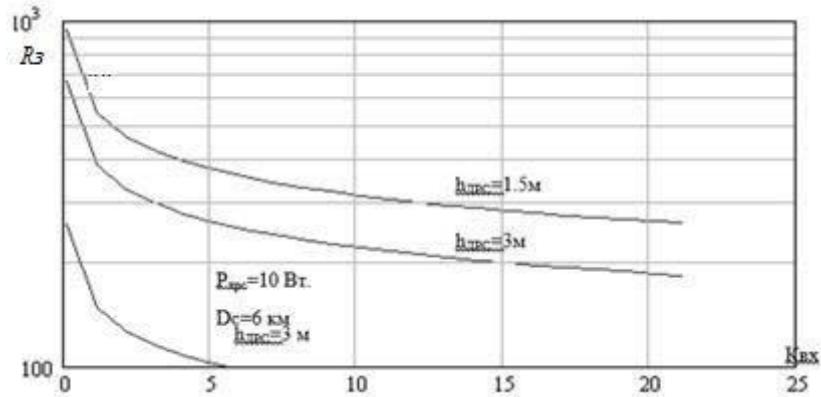


Рисунок 7 – Залежність радіусів зон заглушення від величини ВЗШ на вході заглушуваного приймача (наземний варіант базування засобів РЕБ)

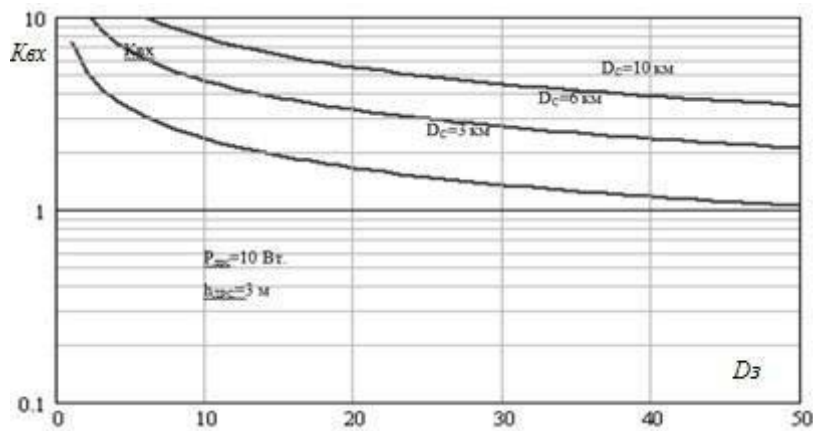


Рисунок 8 – Залежність ВЗШ на вході заглушуваного приймача від дальності радіозаглушення D_3 (повітряний варіант базування засобів РЕБ) для ближньої зони РРВ

Вихідні дані (ЛРЗ-1,2,3): $h_{лрз} = 3$ м, $P_{лрз} = 10$ Вт, $D_c = 10, 6, 3$ км, $D_{лсвн} = 5$ км, $h_{сн} = 2$ км.

Для перевірки просторової умови РП на підставі отриманих залежностей R_3 від $K_{вх}$ (див. рис. 4-7) отримані їх числові значення для різних ліній радіозв'язку (ЛРЗ), значення коефіцієнта заглушення K_3 яких наведено в табл. 3 [3]. Граничні значення R_3 обчислені відповідно зі значеннями параметра K_3 кожної конкретної ЛРЗ. Для випадку ближньої зони при повітряному комплексі РЕБ отримані зворотні залежності $K_{вх}$ від D_3 . Граничні значення R_3 в останньому випадку визначаються графічно за умови рівності $K_{вх}$ і K_n .

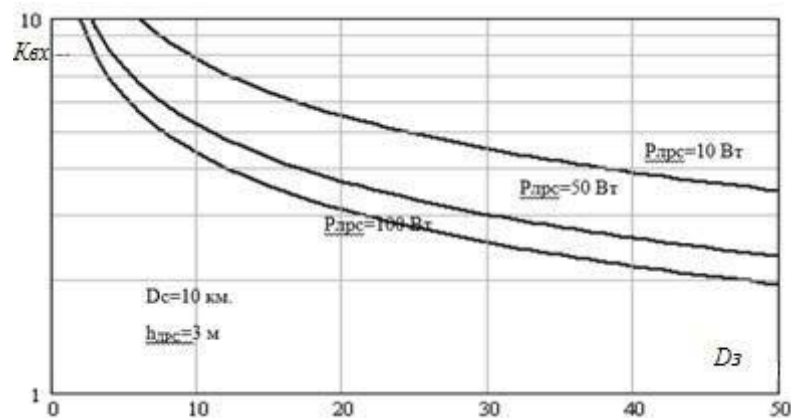


Рисунок 9 – Залежність ВЗШ на вході заглушуваного приймача від дальності радіозаглушення D_3 (повітряний варіант базування засобів РЕБ) для ближньої зони РРВ

Вихідні дані (ЛРЗ-1,2,3): $h_{лрз} = 3$ м, $P_{лрз} = 100, 50$ і 10 Вт, $D_c = 10$ км, $D_{лсвн} = 5$ км, $h_{сн} = 2$ км.

Таблиця 3 – Значення K_3 і R_3 для різних типів ЛРЗ

| Тип модуляції | K_3 | R_3 , км (ЛРЗ-1) / пов. | R_3 , км (ЛРЗ-2) / пов. | R_3 , км (ЛРЗ-3) / пов. |
|----------------------------|-----------|---|---|---|
| Дискретні без кодування | 0.75-3.22 | 18-14/160-100 | 70-50/400-220 | 26-16/360-240 |
| Дискретні з кодуванням | 0.82-5.32 | 16-12/150-85 | 68-45/360-200 | 24-14/350-200 |
| ШСЗ без кодування | 0.5-1.5 | 20-15/180-120 | 78-60/380-250 | 28-18/400-260 |
| ШСЗ з кодуванням | 1.36-21.5 | 18-16/130-60 | 62-32/280-150 | 20-10/280-150 |
| Дальності прямої видимості | --- | 37/203 | 24/190 | 26/192 |
| Умови розрахунків | --- | $h_{лрз}=20$ м, $P_{лрз}=100$ Вт, $D_c=10$ км, $D_{лсвн}=13/25$ км, $h_{сн}=0.02/2$ км. | $h_{лрз}=1.5$ м, $P_{лрз}=10$ Вт, $D_c=3$ км, $D_{лсвн}=3/15$ км, $h_{сн}=0.02/2$ км. | $h_{лрз}=3$ м, $P_{лрз}=50$ Вт, $D_c=6$ км, $D_{лсвн}=7/17$ км, $h_{сн}=0.02/2$ км. |

Для перевірки енергетичної умови РП необхідно обчислити значення ВЗШ на вході заглушеного РЕЗ зв'язку для кожної конкретної ЛРЗ.

Таблиця 4 – Значення КВХ для ЛРС різних типів

| Тип модуляції | K_3 | $K_{вх}$ (ЛРЗ-1) / пов. | $K_{вх}$ (ЛРЗ-2) / пов. | $K_{вх}$ (ЛРЗ-3) / пов. |
|-------------------------|------------|--|--|--|
| Дискретні без кодування | 0.75-3.22 | 1.7/6.8 | 9.9/19.8 | 4.1/16.5 |
| Дискретні з кодуванням | 0.82-5.32 | 1.7/6.8 | 9.9/19.8 | 4.1/16.5 |
| ШСЗ без кодування | 0.50-1.55 | 1.7/6.8 | 9.9/19.8 | 4.1/16.5 |
| ШСЗ з кодуванням | 1.36-21.50 | 1.7/6.8 | 9.9/19.8 | 4.1/16.5 |
| Умови обчислень | --- | $h_{лрз}=20$ м, $P_{лрз}=100$ Вт, $D_c=10$ км, $D_3=13/25$ км, $h_{сн}=0.02/2$ км. | $h_{лрз}=1.5$ м, $P_{лрз}=10$ Вт, $D_c=3$ км, $D_3=3/15$ км, $h_{сн}=0.02/2$ км. | $h_{лрз}=3$ м, $P_{лрз}=50$ Вт, $D_c=6$ км, $D_3=7/17$ км, $h_{сн}=0.02/2$ км. |

На підставі отриманих результатів обчислень R_3 можна зробити наступні висновки.

1. Випадок наземного варіанту базування станції завад.

Отримані результати обчислень R_3 доцільно проаналізувати окремо для кожного конкретного типу АРС.

Так, для ЛРЗ 1 типу значення R_3 змінюються в межах (12-25 км). Для ЛРЗ 2 типу значення R_3 змінюються в межах (32-105 км). Для ЛРЗ 3 типу значення R_3 змінюються в межах (10-36 км). Як видно, найменші значення радіуса зон РП характерні для ЛРЗ 1 типу, що пояснюється, насамперед, відносно великими потужностями передавачів і висотами підйому антен. Найбільші значення R_3 має для ЛРЗ 2 типу, що, в свою чергу, обумовлено малими потужностями передавачів РЕЗ та малими висотами підйому антен. R_3 для ЛРЗ 3 типу має середні значення. Необхідно додати, що всі 3 типи ЛРЗ, будуть входити в зони РП противника, тому необхідно проводити подальший аналіз стосовно вже конкретних заходів ПЗ, як основному засобу підвищення величини K_3 .

Як можна помітити, найбільші зони РП будуть характерні для дискретних ЛРЗ без застосування кодування ці величини складуть (14-70 км), а із застосуванням завадостійкого кодування кодами РС ці показники будуть дещо меншими і складуть (12-68 км). Для ШСЗ без застосування завадостійкого кодування величина зон РП знаходиться в межах (15-78 км). Найменші зони РП (10-62 км) характерні для ШСС з комплексним застосуванням заходів захисту від завад.

Порівняльна оцінка результатів обчислення зон радіозаглушення R_3 показує, що в межах глибини побудови бойових порядків військ в зоні АТО, для всіх ЛРЗ, організованих у

відповідності з тим чи іншим видом модуляції, просторова умова РП буде виконуватися для зазначених вихідних даних в дослідженні. Як можна помітити, застосування заходів ПЗ істотно знижує величину зон РП. Так, при комплексному застосуванні заходів ПЗ величина зон РП не повною мірою перебиває глибину ТЗУ.

2. Випадок повітряного варіанту базування станції завад.

Доцільно отримані результати обчислень R_z також як і для випадку наземного варіанту базування станції завад проаналізувати окремо для кожного конкретного типу АРС.

Так, для ЛРЗ 1 типу значення R_z змінюються в межах (60-220 км). Для ЛРЗ 2 типу значення R_z змінюються в межах (150-500 км). Для ЛРЗ 3 типу значення R_z змінюються в межах (150-510 км). Як видно, найменші значення радіуса зон РП характерні для ЛРЗ 1 типу, що пояснюється, насамперед, відносно великими потужностями передавачів і висотами підйому антен. Найбільші значення R_z має для ЛРЗ 2 типу, що, у свою чергу, зумовлено відносно малими потужностями передавачів РЕЗ та малими висотами підйому антен. Зони РП для ЛРЗ 3 типу мають середні значення.

Необхідно додати, що всі 3 типи ЛРЗ, будуть входити в зони РП противника, тому необхідно проводити подальший аналіз стосовно вже до конкретних заходів ПЗ, як основному засобу підвищення величини K_z .

Як можна помітити, найбільші зони РП будуть характерні для дискретних ЛРЗ без застосування кодування ці величини складуть (100-400 км), а із застосуванням завадостійкого кодування кодами РС ці показники будуть дещо меншими і складуть (85-360 км). Для ШСЗ без застосування завадостійкого кодування величина зон РП знаходиться в межах (120-400 км). Найменші зони РП (60-280 км) характерні для ШСЗ з комплексним застосуванням заходів.

Для всіх трьох типів ЛРЗ просторова умова РП ($R_z > D_z$) в заданих умовах виконана в межах всієї глибини побудови бойових порядків військ в зоні АТО.

На підставі отриманих результатів K_{ex} можна зробити наступні висновки:

1. Випадок наземного варіанту базування станції завад.

Найменші значення K_{ex} отримані для ЛРЗ 1 типу ($K_{ex} = 1.7$). Порівняльна оцінка K_{ex} і K_z для ЛРЗ 1 типу показує, що умова РП виконується частково. Для ЛРЗ 2 типу ($K_{ex} = 10$) енергетична умова в повному обсязі виконується для дискретних (як з кодуванням так і без нього) і для ШСЗ без застосування кодування. Для ШСЗ із застосуванням ШПЗ і завадостійкого кодування умова виконується частково. Для ЛРЗ 3 типу ($K_{ex} = 3$) енергетична умова виконується повністю для дискретних без кодування і ШСЗ без кодування; для всіх інших СЗ умова виконується повністю.

Для випадку повітряного варіанту базування станції завад. Показники K_{ex} для всіх розглянутих ЛРЗ мають величину, що дозволяє стверджувати про виконання енергетичної умови РП для всіх типів модуляції, за винятком ШСЗ із застосуванням завадостійкого кодування (в цьому випадку енергетична умова виконується тільки частково).

Так, порівняльна оцінка енергетичної доступності засобів радіозв'язку показує, що просторова умова РП виконується для всіх розглянутих ЛРЗ. Енергетична умова РП виконується гарантовано тільки для ЛРЗ, організованих на основі дискретних та ширококугових систем модуляції без застосування ПК. Для дискретних систем модуляції і ШСЗ із застосуванням ПК ця умова виконується частково.

Таким чином, порівняльна оцінка результатів обчислень енергетичної доступності ЛРЗ заснованих на різних принципах модуляції показала, що характеристики завадостійкості систем з комплексним застосуванням заходів ПЗ перевищують аналогічні показники для систем, що не використовують ці заходи. Внаслідок чого, доведено доцільність організації радіосистем керування безпілотними літальними апаратами на основі принципів ШСЗ з комплексним застосуванням заходів ПЗ сигнального характеру.

Висновок. Розроблено в середовищі математичного моделювання MathCad 15 алгоритми оцінки енергетичної доступності засобів зв'язку, що враховують комплексне застосування заходів захисту від завад сигнального характеру.

Порівняльна оцінка енергетичної доступності засобів радіозв'язку показала, що просторова умова РП виконується для всіх розглянутих ЛРЗ. Енергетична умова РП виконується гарантовано тільки для ЛРЗ, організованих на основі дискретних та широкосмугових систем модуляції без застосування ПК. Для дискретних систем модуляції і ШСЗ із застосуванням завадостійкого кодування ця умова виконується частково.

Для випадку наземного варіанту базування станції завад для дискретних ЛРЗ без застосування кодування ці величини складуть (14-70 км), а із застосуванням завадостійкого кодування кодами РС ці показники будуть дещо меншими і складуть (12-68 км). Для ШСЗ без застосування завадостійкого кодування величина зон РП знаходиться в межах (15-78 км). Найменші зони заглушення (10-62 км) характерні для ШСЗ з комплексним застосуванням заходів захисту від завад.

Найменші значення K_{ex} отримані для ЛРЗ 1 типу ($K_{ex} = 1.7$). Порівняльна оцінка K_{ex} і K_z для ЛРЗ 1 типу показує, що умова РП виконується частково. Для ЛРЗ 2 типу ($K_{ex} = 10$) енергетична умова в повному обсязі виконується для дискретних (як з кодуванням так і без нього) і для ШСЗ без застосування кодування. Для ШСЗ із застосуванням ШПЗ і завадостійкого кодування умова виконується частково. Для ЛРЗ 3 типу ($K_{ex} = 3$) енергетична умова виконується повністю для дискретних без кодування і ШСЗ без кодування; для всіх інших СЗ умова виконується повністю.

Для випадку повітряного варіанту базування станції завад для дискретних ЛРЗ без застосування кодування ці величини складуть (100-400 км), а із застосуванням завадостійкого кодування кодами РС ці показники будуть дещо меншими і складуть (85-360 км). Для ШСЗ без застосування завадостійкого кодування величина зон РП знаходиться в межах (120-400 км). Найменші зони РП (60-280 км) характерні для ШСЗ з комплексним застосуванням заходів.

Показники K_{ex} для всіх розглянутих ЛРС мають величину, що дозволяє говорити про здійснюваність енергетичної умови РП для всіх типів модуляції, за винятком ШСЗ із застосуванням завадостійкого кодування (в цьому випадку енергетична умова виконується тільки частково).

Таким чином, порівняльна оцінка результатів обчислення енергетичної доступності ЛРЗ заснованих на різних принципах модуляції показала, що характеристики завадостійкості систем з комплексним застосуванням заходів ПЗ перевищують аналогічні показники систем, що не використовують ці заходи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М.И. Маймистов, “Комплекс борьбы с малоразмерными беспилотными летательными аппаратами”. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://ntc-reb.ru/article10.html>. Дата обращения: Дек. 19, 2016.
- [2] В. А. Азов, “Батальоны разведки и РЭБ дивизий СВ США”, *ЗВО*, № 2, с. 20-24, 1998.
- [3] В.А. Бабуль, И.М. Быков, В.В. Гордей, А.Г. Лукашевич, и В.Л. Ржевусский. *Основы радиоэлектронной борьбы в ракетных войсках*. Минск, Белоруссия: ВА РБ, 2000.
- [4] В.В. Гордей, и В.Л. Ржевусский. *Основы энергетических расчетов радиоподавления радиосвязи*. Минск, Белоруссия: ВА РБ, 2004.
- [5] Ю.А. Семашко, А.Н. Бобовик, и С.Г. Голубцов. *Основы организации связи*. Минск, Белоруссия: УО ВОРБ, 2004.
- [6] М.П. Долуханов. *Распространение радиоволн*. Москва, Россия: Связь, 1965.
- [7] Я. Торопчин, та ін. *Довідник з протиповітряної оборони*. Київ, Харків, Україна: МО України, ХВУ, 2003.
- [8] Ю.П. Мельников. *Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности)*. Москва, Россия: Радиотехника, 2005.
- [9] Б.А. Никольский. *Основы радиотехнических систем*. Самара, Россия: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013.

Стаття надійшла до редакції 11 січня 2016 року.

REFERENCES

- [1] M.I. Maimistov, "The complex to combat small-sized unmanned aerial vehicles". [Online]. Available: <http://ntc-reb.ru/article10.html>. Accessed on: Dec. 15, 2016.
- [2] V.A. Azov, "The battalions of intelligence and REW divisions of the US Army", *ZVO*, iss. 2, pp. 20-24, 1998.
- [3] V.A. Babul, I.M. Bykov, V.V. Gordei, A.G. Lukashevich, and V.L. Rzhevusskii. *Fundamentals of Electronic Warfare in the Missile Forces*. Minsk, Belarus: Military Academy of Belarus, 2000.
- [4] V.V. Gordei, and V.L. Rzhevusskii. *Fundamentals of energy calculations of radio communication suppression*. Minsk, Belarus: Military Academy of Belarus, 2004.
- [5] I.A. Semashko, A.N. Bobovik, and S.G. Golubtsov. *Basics of communication organization*. Minsk, Belarus: UO VORB, 2004.
- [6] M.P. Dolukhanov. *Radiowave propagation*. Moscow, Russia: Sviaz, 1965.
- [7] Y. Toropchyn, et al. *Handbook of air defense*. Kyiv, Kharkiv, Ukraine: Ministry of Defence Ukraine, KHVU, 2003.
- [8] I.P. Melnikov. *Aerial radio-electronic intelligence (performance assessment methods)*. Moscow, Russia: Radiotekhnika, 2005.
- [9] B.A. Nikolskii. *Fundamentals of radio systems*. Samara, Russia: Samara State Aerospace University (National Research University), 2013.

ДЕНИС БАХТИЯРОВ

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДОСТУПНОСТИ СРЕДСТВ СВЯЗИ С БПЛА В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СО СТОРОНЫ ПРОТИВНИКА

В процессе исследования проводились расчеты показателей помехоустойчивости и энергетической доступности средств связи с беспилотными летательными аппаратами в соответствии с рассмотренными в этой статье алгоритмами на основании анализа как оперативно-боевых показателей построения группировок противоборствующих войск в зоне проведения антитеррористической операции на востоке Украины, так и тактико-технических характеристик рассматриваемых средств связи и радиоэлектронной борьбы. Поставленной цели по оценке возможности эффективного функционирования рассматриваемых систем радиосвязи в условиях активного полномасштабного применения комплексов радиопротиводействия и средств радиоэлектронной борьбы противника с учетом всех применяемых мер защиты от помех настоящая работа достигла в полном объеме. На основании данных расчетов целесообразно развертывать системы управления беспилотными летательными аппаратами с использованием помехоустойчивых средств радиосвязи, построенных в соответствии с рассмотренными принципами широкополосных систем связи с применением мер защиты от помех преимущественно сигнального характера, наиболее эффективно повышают показатели помехоустойчивости. Разработанные алгоритмы в случае их программной реализации могут использоваться в качестве конечного продукта для повышения степени автоматизации и оперативности при расчетах эффективности функционирования средств радиосвязи в условиях радиопротиводействия противника. Полученные в ходе исследования результаты могут в настоящее время использоваться при оценке помехоустойчивости и энергетической доступности существующих и перспективных средств радиосвязи.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, радиосигнал, коэффициент радиоподавления, широкополосная система модуляции, энергетическая эффективность, радиоэлектронная борьба.

DENYS BAKHTIAROV

EVALUATION OF ENERGY AVAILABILITY OF MEANS TO COMMUNICATE WITH UAVs IN CONDITIONS OF RADIOELECTRONIC COUNTERMEASURES BY THE ENEMY

During the research the calculations of noise immunity indicators and energy availability of means to communicate with unmanned aerial vehicles according to the reviewed in this article algorithms, based on the analysis of both operational and combat indicators of opposing troops building in the area of anti-terrorist operation in eastern Ukraine, and tactical and technical characteristics of examined means of communication and radio-electronic warfare. The real work fully achieved the goal to assess the possibilities of effective functioning of the reviewed radio communication systems in conditions of full active use of radio countermeasure systems and means of radio-electronic warfare, taking into account all applicable noise protection measures. Based on the data calculations it is expedient to deploy UAV's control systems with the implementation of noise stability means of radio communication, built according to the reviewed principles of wideband communication systems using measures of protection against noise, mainly of signal character, that most effectively improves the noise immunity indicators. The developed algorithms, in case of software implementation, can be used as a final product to enhance the degree of automation and promptness during the calculation of the efficiency of radio communication means in condition of opponent's radio countermeasures. The results, received during the study, can be used in assessing noise immunity and energy availability of existing and future (prospective) means of radio communication.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), radio signal, coefficient of radio suppression, wideband modulation system, energy efficiency, radio-electronic warfare.

Денис Ілшатович Бахтіяров, аспірант, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

E-mail: bakhtiyaroff@nau.edu.ua

Денис Илшатович Бахтияров, аспирант, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Denys Bakhtiiarov, postgraduate student, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.