

Ю.В. Стасєв, С.С. Серов, В.О. Дядюн

*Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## УМОВИ ПОБУДОВИ РАДІОЛІНІЇ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ

*В роботі розглянута можливість забезпечення необхідної завадостійкості, імітостійкості й скритності радіолінії управління безпілотним літальним апаратом, захисту їх від можливого подавлення засобами радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби. Встановлено, що для вирішення оптимізаційних завдань застосовується апарат теорії ігор. Проведено аналіз і розроблена методика оцінки середнього значення показника якості функціонування системи зв'язку при різних стратегіях конфлікуючих сторін.*

**Ключові слова:** радіоелектронна протидія, сигнально-кодові конструкції, теорія ігор, імовірнісно-часові показники.

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді.

Вирішення проблеми забезпечення необхідної завадостійкості, імітостійкості й скритності радіолінії управління безпілотним літальним апаратом, захисту їх від можливого подавлення засобами радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби супротивника, електронного підслуховування, нав'язування хибної інформації, електронного шахрайства зводиться до оптимізації зміни параметрів використовуваних сигнально-кодових конструкцій та алгоритмів функціонування [1–2; 8].

Для вирішення оптимізаційних завдань, пов'язаних з вибором параметрів сигнально-кодових конструкцій та алгоритмів функціонування систем і засобів зв'язку, застосовується апарат теорії ігор [3–4]. Ігровий підхід пропонує кожному гравцю дії, розраховані на найменш вигідну для нього реакцію супротивника. До завдань, що легко перекладаються мовою теорії ігор, відноситься й синтез алгоритмів функціонування в умовах конфлікту між системою управління безпілотним літальним апаратом і протидіючою стороною за умови забезпечення гарантованих імовірнісно-часових показників системи.

У термінах теорії подібна ситуація адекватна вибору двома гравцями найкращих стратегій з множини всіх можливих на основі деякого середнього показника якості  $\bar{y}$ .

**Мета статті** – розробка рекомендацій, щодо побудови радіолінії управління безпілотним літальним апаратом в умовах радіоелектронної протидії.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** На основі результатів досліджень, отриманих в [5] аналіз концепції радіоелектронної протидії супротивника показує, що даний конфлікт є нерозв'язним у чистих концепціях.

Нехай радіолінія управління застосовує змішані стратегії, тобто змінює алгоритм функціонування

або клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій, що задані на множині  $\{A\}$ . Отже, показником якості в цьому випадку буде результат усереднення за всіма частковими показниками.

Супротивник може здійснювати вибір перешкоди як без оцінки результатів впливу на систему зв'язку, так і з оцінкою впливу. Спочатку припустимо, що евентуальний супротивник здійснює вибір стратегії радіоелектронного подавлення й завади без урахування їх впливу на систему зв'язку. У цьому випадку радіолінія управління може реалізувати такі стратегії поведінки в конфліктній ситуації:

– радіолінія управління не змінює алгоритм функціонування, але змінює клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій таким чином, щоб досягти максимального значення середнього показника якості вибором імовірності  $P_{ij}$  при заданому наборі стратегій радіоелектронної протидії й типів завад;

– радіолінія управління змінює алгоритм функціонування, клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій з метою максимізації середнього показника якості при фіксованих стратегіях радіоелектронної протидії й типів завад;

– радіолінія управління змінює алгоритм функціонування й клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій залежно від стратегії радіоелектронної протидії й типу завади з метою досягнення максимального значення часткового показника якості.

**Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження.** Нехай пропонується заданим, з одного боку, апріорний алфавіт можливих станів радіолінії управління  $\{A\}$  й імовірність їхнього створення  $\{P\} - \{P\{P_{00}, P_{01}, \dots, P_{0m}, P_{12}, \dots, P_{N0}, P_{N1}, \dots, P_{NN}\}\}$ , з іншого – різні стратегії радіоелектронної протидії й типи використовуваних завад  $\{S\}$  й імовірності їхнього створення  $\{Q\} - \{Q\{q_{00}, q_{01}, \dots, q_{02}, q_{10}, q_{11}, \dots, q_{10}, \dots, q_{M0}, q_{M1}, \dots, q_{Mq}\}\}$ ...

Тоді матриця гри описується табл. 1, де  $y_{ij}^{kc}$  – частковий показник якості застосування алгоритму функціонування радіолінії управління й викорис-

тання j-го класу сигнально-кодових конструкцій при k-й стратегії радіоелектронного подавлення супротивником й її перешкоди.

Таблиця 1

Матриця гри

Алгоритм функціонування		Імовірності	Стратегії еventуального супротивника			
			S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	...	S <sub>m</sub>
			Q <sub>0</sub>	Q <sub>1</sub>	...	Q <sub>m</sub>
		P <sub>00</sub>	q <sub>00</sub> , q <sub>01</sub> , ..., q <sub>0L</sub> y <sub>00</sub> <sup>00</sup> , y <sub>10</sub> <sup>00</sup> ... y <sub>i0</sub> <sup>00</sup>	q <sub>10</sub> , ..., q <sub>b0</sub>	...	q <sub>0</sub> , ... q <sub>Mq</sub> y <sub>00</sub> <sup>m0</sup> ... y <sub>q0</sub> <sup>m0</sup>
		P <sub>01</sub>	y <sub>01</sub> <sup>00</sup> , y <sub>11</sub> <sup>00</sup> ... y <sub>i1</sub> <sup>00</sup>	...	...	y <sub>01</sub> <sup>m0</sup> ... y <sub>q1</sub> <sup>m0</sup>
A <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	...	...	...	...	...
		P <sub>0m</sub>	y <sub>0m</sub> <sup>00</sup> , y <sub>1m</sub> <sup>00</sup> ... y <sub>im</sub> <sup>00</sup>	y <sub>0m</sub> <sup>10</sup> ... y <sub>bm</sub> <sup>10</sup>		y <sub>0m</sub> <sup>m0</sup> ... y <sub>qm</sub> <sup>m0</sup>
...	...	...	...	...	...	...
		P <sub>i0</sub>	y <sub>00</sub> <sup>0i</sup> , y <sub>10</sub> <sup>0i</sup> ... y <sub>i0</sub> <sup>0i</sup>	y <sub>10</sub> <sup>li</sup> ... y <sub>b0</sub> <sup>li</sup>		y <sub>00</sub> <sup>mi</sup> ... y <sub>q0</sub> <sup>mi</sup>
A <sub>i</sub>	P <sub>i</sub>	...	...	...	...	...
		P <sub>N0</sub>	y <sub>00</sub> <sup>0N</sup> , y <sub>10</sub> <sup>0N</sup> ... y <sub>i0</sub> <sup>0N</sup>	y <sub>10</sub> <sup>1N</sup> ... y <sub>b0</sub> <sup>1N</sup>		y <sub>00</sub> <sup>mN</sup> ... y <sub>q0</sub> <sup>mN</sup>
A <sub>N</sub>	P <sub>N</sub>	...	...	...	...	...
		P <sub>Nz</sub>	y <sub>0z</sub> <sup>0N</sup> , y <sub>1z</sub> <sup>0N</sup> ... y <sub>iz</sub> <sup>0N</sup>	y <sub>1z</sub> <sup>1N</sup> ... y <sub>bz</sub> <sup>1N</sup>		y <sub>0z</sub> <sup>mN</sup> ... y <sub>qz</sub> <sup>mN</sup>

Твердження 1. Нехай у радіолінії управління реалізується A<sub>i</sub> алгоритм функціонування з i-м класом сигнально-кодових конструкцій. Причому система зв'язку не змінює алгоритм функціонування й клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом

$$\bar{y} = \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jz} y_{iz}^i R^i, \quad (1)$$

де R<sub>j</sub> залежно від j дорівнює l, b, ..., q...

Твердження 2. Нехай у радіолінії управління й управління реалізується A<sub>i</sub> стратегія функціонування. У процесі функціонування, залежно від стратегії радіоелектронної протидії й типу завод, клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій змінюється. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом.

$$\bar{y} = \max_{P_{ic} \in P_i} \sum_{c=0}^{z_i} \left( \sum_{j=0}^m \sum_{r=0}^{R_j} Q_j q_{jz} y_{ic}^{ji} \right) P_{ic} P_i, \quad (2)$$

де z<sub>i</sub> дорівнює m, ... Z залежно від i.

Твердження 3. Нехай радіолінія управління змінює алгоритм функціонування та клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій з метою максимізації середнього показника якості при фіксованих стратегіях радіоелектронної протидії й типів завод. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом

$$\bar{y} = \sum_{i=v}^N \left\{ \max_{P_{ic} \in P_i} \sum_{c=0}^{z_i} \left( \sum_{j=0}^m \sum_{r=0}^{R_j} Q_j q_{jz} y_{ic}^{ji} \right) P_{ic} P_i \right\}. \quad (3)$$

Твердження 4. Нехай радіолінії управління змінює алгоритм функціонування та клас використовуваних сигнально-кодових конструкцій залежно від стратегії радіоелектронної протидії й типу завади з метою максимізації значення часткового показника якості.

Тоді середнє значення показника якості визначається виразом

$$\bar{y} = \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jz} \left\{ \left[ P_i^* P_i^* C^* \max_{i \in N} (y_{ic}^{ji}) \right] + \sum_{i=0}^N \sum_{\substack{c=c^* \\ i \neq i^*}} P_i P_{io} y_{zc}^{ji} \right\}, \quad (4)$$

де P<sub>i</sub><sup>\*</sup> й P<sub>i</sub> C<sup>\*</sup> – імовірності використання i-стратегії і C-класу сигнально-кодових конструкцій, що мають максимальне значення частотного показника y<sub>ic</sub><sup>ji</sup> при впливі j-ї стратегії радіоелектронної протидії й г-ї завади.

При виборі еventуальним супротивником завод з урахуванням оцінки їх впливу на систему зв'язку за умови максимального її подавлення можуть використовуватися ті ж стратегії поведінки системи зв'язку в конфліктній ситуації, що і в першому випадку. Варто врахувати, що супротивник вибирає стратегію радіоелектронного подавлення й заваду, за якої показник якості функціонування має мінімальне значення.

З використанням апарата теорії ігор проведений аналіз і розроблена методика оцінки середнього значення показника якості функціонування системи зв'язку при різних стратегіях конфліктуючих сторін.

Визначимо межі зміни середнього показника якості функціонування радіолінії управління при

впливі завад.

Позначаючи через  $\bar{y}_{\text{зад}}$  задане значення середнього показника якості функціонування системи зв'язку й управління в умовах радіоелектронної про-

тидії, отримуємо межі зміни  $\bar{y}$ .

При радіоелектронній протидії без оцінки результатів впливу завад відповідно до тверджень 1 й 4.

$$\sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jr} \left\{ \left[ P_i^* c^* \max_{i \in r} (y_{rc}^{ji}) \right] + \sum_{i=0}^N \sum_{c=0}^{Z_i} P_i P_{ic} \bar{y}_{rc}^{-ij} \geq \bar{y}_{\text{зад}} \right\} \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jr} y_{rc}^{ji}. \quad (5)$$

При виборі стратегії радіоелектронної протидії й завади

$$Q_j^* q_{jr}^* P_i^* p_{ic}^* c \min_{j \in m} (m_j) \max_{i \in N} (N_i y_{rc}^{ji}) + \sum_{j=0}^m \sum_{r=0}^{R_j} Q_j q_{jr} \times \sum_{i=0}^N \sum_{c=0}^{Z_i} P_i P_{ic} y_{rc}^{ij} \geq \bar{y}_{\text{зад}} \left\{ q_{jr}^* \min_{r \in R} (y_{rc}^*) \right\} + \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j y_{rc}^{ji}. \quad (6)$$

Аналіз виразів (5) і (6) показує, що розв'язання проблеми підвищення якості функціонування системи зв'язку можливе за рахунок:

– застосування змішаної стратегії поведінки системи зв'язку, що полягає у випадковому виборі алгоритму функціонування системи та використовуваних сигнально-кодових конструкцій (зменшення ймовірності постановки оптимальної перешкоди);

– вибору структури і параметрів системи зв'язку, що збільшують часткові показники якості її функціонування;

– збільшення ймовірності розпізнавання діючої стратегії радіоелектронного подавлення і класу завад та зміни алгоритму функціонування системи зв'язку.

Забезпечувати виконання цих умов, як показали дослідження [6–7; 9–10] можливо при реалізації

динамічного режиму функціонування цифрової системи зв'язку.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, в роботі розглянута можливість забезпечення необхідної заводостійкості, імітостійкості й скритності радіолінії управління безпілотним літальним апаратом, захисту їх від можливого подавлення засобами радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби. Встановлено, що для вирішення оптимізаційних завдань застосовується апарат теорії ігор. При цьому проведено аналіз і розроблена методика оцінки середнього значення показника якості функціонування радіолінії управління безпілотним літальним апаратом при різних стратегіях конфліктуючих сторін.

### Список літератури

1. Теорія сигнально-кодових конструкцій: моногр. / М.І. Науменко, Ю.В. Стасев, О.О. Кузнецов, С.П. Євсєєв. – Х.: ХУПС, 2008. – 541 с.
2. Discrete Signals with Multi-Level Correlation Function Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP2010): Proceedings / Y. Stasev, A. Kuznetsov, V. Sai, O. Karpenko. – Discrete Kyiv, Ukraine, October 13-14, 2010. – K.: National Aviation University “NAU-Druk” Publishing House, 2010. – 180 p.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М., 2002. – 480 с.
5. Nelder J.A. A simplex method for function minimization / J.A. Nelder, R. Mead // Computer Journal. – 1965. – № 7. – P. 308-313.
6. Добринін І.С. Основи радіоелектронної боротьби в радіотехнічних військах / І.С. Добринін. – Х.: ООО “Контур”, 2006. – 108 с.
7. Oppenheim A.V. Prentice-Hall Signal Processing Series / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer. – Discrete-Time Signal Processing, 3rd Edition. Pearson, 2010. – 1137 p.
8. Ирвин Дж. Передача данных в сетях и инженерный поход / Дж. Ирвин, Д. Харль. – С.Пб.: Питер., 2002. – 405 с.
9. Животовський Р.М. Аналіз способів застосування безпілотних авіаційних комплексів / Р.М. Животовський, Ю.О. Горобець // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 4 (48). – С. 16-21.
10. Methodological basis for constructing a method for compressing of transformants bit representation, based on nonequilibrium positional encoding / V.V. Barannik, Yu.N. Ryabukha, V.V. Tverdokhle, D.V. Baranik // 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017, Proceedings. – Lviv, 2017. – P. 188.
11. Barannik V.V. Structural slotting with uniform redistribution for enhancing trustworthiness of information streams / V.V. Barannik, Yu.N. Ryabukha, S.A. Podlesnyi // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). – 2017. – № 76 (7). – P. 607.
12. Науменко М.І. Методи синтеза сигналів с заданими свойствами / М.І. Науменко, А.А. Кузнецов // Междуна-

## References

1. Naumenko, M.I., Stasev, Yu.V., Kuznetsov, A.A. and Evseev, S.P. (2008), “*Teoriya signal'no kodovykh konstrukcij*” [*Signal code of theory*], Kharkiv, 541 p.
2. Stasev, Yu.V., Kuznetsov, A.A., Sai, V.V. and Karpenko, O.I. (2010), Discrete Signals with Multi-Level Correlation Function, *Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010), October 13–14*, National Aviation University “NAU-Druk” Publishing House, Kyiv, Ukraine, 180 p.
3. Ventcel, E.S. and Ovcharov, L.A. (1988), “*Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya*” [*Probability theory and its engineering approaches*], Science, Moscow, 480 p.
4. Gmurman, V.E. (2002), “*Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika*” [*Theory of Probability and Mathematical Statistics*], Moscow, 480 p.
5. Nelder, J.A. and Mead, R. (1965), A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, No. 7, pp. 308-313.
6. Dobrinin, I.S. (2006), “*Osnovi radioelektronnoi borot'bi v radiotekhnichnih vijs'kah*” [*Fundamentals of radio electronic warfare in the radio engineering forces*], ООО “Kontur”, Kharkiv, 108 p.
7. Oppenheim, A.V. and Schaffer, R.W. (2010), *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd Edition. Pearson, 1137 p.
8. Irvin, Dzh. and Harl, D. (2002), “*Peredacha dannyh v setyah i inzhenernyj podhod*” [*Data transfer in networks and engineering approach*], S.Pb, 405 p.
9. Zhivotovskij, R.M. and Gorobec, Yu.O. (2016), “*Analiz sposobiv zastosuvannya bezpilotnih aviacijnih kompleksiv*” [*Analysis of the use of unmanned aircraft systems*], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4 (48), pp. 16-21.
10. Barannik, V.V., Ryabukha, Yu.N., Tverdokhle, V.V. and Baranik, D.V. (2017), Methodological basis for constructing a method for compressing of transformants bit representation, based on nonequilibrium positional encoding, *2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies*, Lviv, pp. 188.
11. Barannik, V.V., Ryabukha, Yu.N. and Podlesnyi, S.A. (2017), Structural slotting with uniform redistribution for enhancing trustworthiness of information streams, *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, No. 76(7), pp. 607.
12. Naumenko, M.I. and Kuznetsov, A.A. (2007), “*Metody sinteza signalov s zadannymi svojstvami*” [*Methods of synthesis of signals with specified properties*], *International Scientific and Technical Journal*, Vol. 3, Institute Cybernetics NAN Ukraine, Kyiv, pp. 10-17.

Надійшла до редколегії 7.06.2018

Схвалена до друку 17.07.2018

**Відомості про авторів:****Стасєв Юрій Володимирович**

доктор технічних наук професор  
 професор кафедри  
 Харківського національного університету  
 Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
 Харків, Україна  
<http://orcid.org/0000-0002-3893-0313>

**Серєв Сергій Сергійович**

Інженер  
 Харківського національного університету  
 Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
 Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-5922-1161>

**Дядюн Вікторія Олександрівна**

Бакалавр  
 Харківського національного університету  
 Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
 Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-7159-6804>

**Information about the authors:****Yuriy Stasiev**

Doctor of Technical Sciences Professor  
 Professor of Department  
 of Ivan Kozhedub Kharkiv  
 National Air Force University,  
 Kharkiv, Ukraine  
<http://orcid.org/0000-0002-3893-0313>

**Sergey Serov**

Engineer  
 of Ivan Kozhedub Kharkiv  
 National Air Force University,  
 Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5922-1161>

**Victoria Dyadyun**

Bachelor  
 of Ivan Kozhedub Kharkiv  
 National Air Force University,  
 Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7159-6804>

**УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ  
БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ  
В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

С.Ю. Стасев, С.С. Серов, В.О. Дядюн

*В работе рассмотрена возможность обеспечения необходимой помехоустойчивости, имитостойкости и скрытности радиолинии управления беспилотным летательным аппаратом, защиты их от возможного подавления средствами радиоэлектронной разведки и радиоэлектронной борьбы. Установлено, что для решения оптимизационных задач применяется аппарат теории игр. Проведен анализ и разработана методика оценки среднего значения показателя качества функционирования системы связи при различных стратегиях конфликтующих сторон. Обоснована необходимость применения динамических радиолиний управления беспилотным летательным аппаратом. Разработан алгоритм псевдослучайной изменения форм широкополосных сложных сигналов. Опыт эксплуатации беспилотных летательных аппаратов показал, что наиболее уязвимым звеном системы управления. Стратегия вероятного противника может заключаться или в подавлении радиолинии управления беспилотным летательным аппаратом средствами радиоэлектронной борьбы, или в введенные ложной информации в систему управления беспилотным летательным аппаратом. Решением проблемы связывают с применением широкополосных динамических режимов функционирования радиолиний управления беспилотным летательным аппаратом на основе алгоритмов псевдослучайного изменения форм используемых широкополосных сложных сигналов.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронное противодействие, сигнально-кодовые конструкции, теория игр, вероятность часовые показатели

**CONDITIONS FOR CREATING A RADIO LINK FOR CONTROLLING  
AN UNMANNED AERIAL VEHICLE  
UNDER RADIO-ELECTRONIC COUNTERMEASURES**

Yu. Stasev, S. Serov, V. Dyadyun

*The paper considered the possibility of providing the necessary noise immunity, simulated brightness and Criticality of the radio link for controlling an unmanned aerial vehicle, and protecting them against possible suppression by means of electronic intelligence and electronic warfare. It has been established that the apparatus of game theory is used for solving optimization problems. The analysis has been carried out and a methodology has been developed for estimating the average value of an indicator of the quality of functioning of a communication system for various strategies of the conflicting parties. The necessity of using dynamic radio control lines of an unmanned aerial vehicle has been substantiated. An algorithm for pseudorandom change in the shapes of wideband complex signals has been developed. Experience in operating unmanned aerial vehicles has shown that the most vulnerable element of the control system. The strategy of the likely adversary may consist either in suppressing the radio link of the control of the unmanned aerial vehicle by means of radio-electronic counterwork, or in the false information entered into the control system of the unmanned aerial vehicle. The solution of the problem is associated with the use of broadband dynamic modes of functioning of the radio lines of control of an unmanned aerial vehicle based on algorithms of pseudo-random change of the forms of the used broadband complex signals.*

**Keywords:** radio-electronic countermeasures, game theory, probabilistic temporal characteristics, signal coding constructs.