

УДК 621.3

В.В. Белімов<sup>1</sup>, Я.Ю. Стасєва<sup>2</sup>, Ю.О. Черних<sup>3</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Державна інспекція зв'язку, Харків<sup>3</sup>Міністерство оборони України, Київ

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ БОРТОВОГО РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

Запропоновано метод підвищення ефективності функціонування бортового радіоелектронного обладнання (БРЕО), який дозволяє зменшити час доведення інформації до одержувача, що отримана радіоелектронними системами БРЕО. Доведено, що використання пристроїв комбінованого мажоритарного декодування розширює закладені потенційні можливості методу багаторазової передачі, оскільки знижується число копій повідомлення при заданих обмеженнях на вірогідність.

**Ключові слова:** бортове радіоелектронне обладнання, радіоелектронні системи, підвищення ефективності, пристрій комбінованого мажоритарного декодування.

### Вступ

До теперішнього часу конструктивно бортове радіоелектронне обладнання (БРЕО), як правило, створювалось за федеральним принципом побудови, що апіорі веде до високої вартості окремих систем і елементів БРЕО і постійному зростанню їх номенклатури, об'єму, споживаної енергії, вартості експлуатації, зниженню надійності і тому подібне, причому деякі вимоги до БРЕО (надійність, модернізуємість, масогабаритні характеристики тощо) важко досяжні по критерію "ефективність-вартість" [1 – 6]. У цих умовах об'єктивно необхідна реалізація нової системної архітектури, технологій комплексування БРЕО, автоматизації збору, обробки і контролю інформації, що видається екіпажу, забезпечення взаємозв'язку і інтеграції систем, що дозволяють реалізувати ключові принципи побудови нового покоління БРЕО [7 – 10]:

- функціональна і апаратурна інтеграція апаратури;
- модульність архітектури;
- внутрішньовидова і міжвидова уніфікація і стандартизація систем, елементів радіоелектронних комплексів (РЕК) і програмно-математичного забезпечення тощо.

Реалізація цих ключових принципів визначає склад і структуру перспективного комплексу бортового устаткування.

З урахуванням необхідності зниження вартості розробки і виробництва апаратури комплексу, різкого підвищення його бойових можливостей і ефективності, забезпечення високого еволюційного потенціалу (можливості безперервної і глибокої модернізації), що займають лідируюче положення в розробці його систем і елементів, основними апаратурно-інтегрованими інформаційними каналами РЕК, можуть бути:

– універсальна багатофункціональна радіотехнічна система, що забезпечує виконання функцій цілевказівок, розвідки, протидії і зв'язку, який повинен базуватися на практично всіх відомих алгоритмах і методах радіолокації, включаючи адаптивну просторово-часову обробку, методи енергетичної і функціональної скритності, бістатичної радіолокації, широкосмуговий направлений і ненаправлений НВЧ-зв'язок, високоточну пеленгацію і класифікацію джерел НВЧ-випромінювання з високою чутливістю, ефективна високопотенційна радіопротидія, дистанційне керування зброєю;

– багатофункціональна оптико-електронна оглядово-прицільна система, побудована на основі підсистем: лазерно-локаційною, лазерного дальнометрування і підсвітки;

– система зв'язку, навігація, пізнання і посадки, що забезпечує інформаційну підтримку виконання бойових завдань і безпеки польоту АК на всіх його етапах.

Серед багатьох задач, які в зв'язку із цим, стоять перед розробниками бортового радіоелектронного обладнання, окремо можна виділити завдання підвищення ефективності радіоелектронних систем (РЕС), які входять до складу БРЕО, що і є **метою даної статті**.

### Результати досліджень

Для визначення ефективності радіоелектронних систем БРЕО застосовують наступні технічні критерії: показники завадостійкості (відношення сигнал/шум, імовірність помилкового прийому та ін.), пропускна здатність, надійність, комбінації різних технічних параметрів. Вони характеризують якість системи, її технічний рівень. Однак, використовуючи тільки технічні показники, ми локально оцінюємо ефективність нової техніки. Тому при створенні РЕС варто враховувати й апаратурні витрати.

Виходячи з цього, сформулюємо принципи мінімуму апаратних витрат і максимуму ефекту, на основі яких можуть формуватися критерії ефективності РЕС БРЕО різного призначення [12, 13]. Принцип мінімуму витрат використовують у тих випадках, коли при заданому ефекті потрібно визначити варіант  $z \in Z$ , при якому забезпечуються мінімально можливі апаратні витрати. Якщо ж при заданих витратах необхідно досягти цілі в максимальному ступені, прийнятний другий принцип. Висока якість прийому інформації досягається методом багаторазової передачі повідомлення, що широко застосовується в системах, які працюють по каналах низької якості, тобто КХ-радіоканалам. Використання в таких РЕС тільки першої вирішальної схеми зв'язано зі значними апаратними витратами, необхідними для забезпечення необхідного значення показника завадостійкості. Тому цю задачу краще вирішити, застосувавши другу вирішальну схему, що гарантує необхідний показник завадостійкості [14].

Оптимальні пристрої і системи проектують математичним методом з описом його розробки. Методологічною основою рішення задач оптимізації технічних систем є теорія дослідження операцій [11]. Відповідно до цієї теорії опишемо систему зв'язку і представимо задачу технічного проектування в математичній формі [4]:

$$\min v(X) = (x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (1)$$

$$\varphi_{x_k}(X) = 0, \quad \varphi_{x_1}(X) \leq 0; \quad (2)$$

$$\varphi_{y_k}(X) = 0, \quad \varphi_{y_1}(X) \leq 0. \quad (3)$$

Сформуємо задачу: знайти вектор внутрішніх параметрів  $X_{\text{опт}}$ , що задовольняє рівностям і нерівностям (2), (3) і забезпечує мінімум цільової функції  $v(X)$ .

Якщо на змінні накладені обмеження типу функціональних нерівностей, точку екстремального значення функції знаходимо методом їхнього вилучення або методом множників Лангранжа, коли перемінні неможливо або важко представити в вигляді

$$\min v(X), \quad X = (x_1, \dots, x_n); \quad (4)$$

$$\varphi_i(X) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad m < n. \quad (5)$$

При виборі параметрів для оцінки ефективності РЕС, що працюють на каналах низької якості і використовуючих багаторазове уявлення, відповідно до системного підходу в загальному випадку варто було б враховувати усі види витрат, що мають місце при організації лінії зв'язку. Так як проектується оптимальний пристрій, що забезпечує необхідну завадостійкість  $P_y^{\text{од}}$  при мінімальних витратах  $C_{\text{тр}}$ , показником порівняльної ефективності всіх припустимих проектів буде складність пристрою достовірного прийому  $Y_1$ . Очевидно, у цільову функцію повинен входити тільки цей параметр, оскільки відповідно до технічного завдання бажано його зменшити:

$$v(Y) = Y_1 = C_1 + C_2,$$

де  $Z_1$  – складність першої вирішальної схеми, що забезпечує одержання символів повідомлення з імовірністю помилкового прийому символу  $P_0$ ,  $Z_2$  – складність другої вирішальної схеми, що забезпечує одержання символу зі значенням еквівалентної імовірності помилки  $P_e$ . У результаті маємо наступне технічне завдання оптимального проектування в математичному вигляді: задані множини векторів внутрішніх і зовнішніх параметрів проектного пристрою  $X = (x_1, x_2)$ ;  $Y = (y_1, y_2)$ , компоненти яких  $x_1 = m$ , де  $m$  – аргумент числа повторень повідомлення  $\xi(m) = 2m - 1$ ;  $m = 2, 3, 4 \dots$ ;  $x_2 = P_0$ ;  $y_2 = \Delta_e^{\text{од}}$ .

Запишемо компоненти за допомогою системи обмежень

$$\Phi_x \rightarrow \begin{cases} 2 < x_1 < (t_a^{\text{од}} / 2t_a^{\text{мін}} + 0,5); \\ 0 < x_2 < 1; \end{cases}$$

$$\Phi_y \rightarrow \begin{cases} y_1 \leq C_{\text{од}}; \\ y_2 \leq P_e^{\text{од}}. \end{cases}$$

Тут  $t_a^{\text{од}}$  – припустимий час доведення повідомлення до абонента,  $t_a^{\text{мін}} = (k+r)/V$ , де  $k$  – число інформаційних символів у повідомленні;  $r$  – число перевірючих символів;  $V$  – швидкість модуляції.

Рівняння зв'язку зовнішніх і внутрішніх параметрів:

$$y_1 = A_1(\bar{h}_i)^\alpha + A_2\gamma_j(m); \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3; \quad (6)$$

$$y_2 = \beta_k(m)P_0^m; \quad k = 1, 2; \quad (7)$$

$$C_1 = A_1(\bar{h}_i)^\alpha = dP^\alpha = D \left( \frac{(4\pi R)^2}{G_1 G_2 \lambda^2 F^2} h_1 P_0 \right)^\alpha, \quad (8)$$

де  $d$ ,  $\alpha$  – постійні коефіцієнти, що характеризують тип передавальних пристроїв,  $P$  – потужність передавача,  $\bar{h}_i$  – середнє значення відносини сигнал-перешкода [5].

Ефективний засіб підвищення завадостійкості радіозв'язку в дециметровому діапазоні і при тропосферному розсіюванні в метровому діапазоні – це рознесений радіоприйом сигналів. У загальному виді визначимо завадостійкість систем з активною паузою і некогерентним прийомом, використовуючи формулу для середньої імовірності помилки при  $n$ -кратному рознесенні сигналів [5]:

$$P_0(\bar{h})_n = (n!/2(1+\bar{h}/2)(2+\bar{h}/2)\dots(n+\bar{h}/2))$$

$$\text{при } n = 1; \quad P_0 = 1/(\bar{h} + 2); \quad \bar{h}_1 \cong 1/P_0; \quad n = 2;$$

$$P_0 = 1/(1+\bar{h}/2)(2+\bar{h}/2);$$

$$h_2 \cong 2/\sqrt{P_0}.$$

Підставивши у вираз (8) значення для  $\bar{h}_i$  отримали

маємо при  $\alpha = 1$   $C_1 = A_1 (1/P_0)^\alpha$ ;  $C'_1 = A_1 (2\sqrt{P_0})^\alpha$ .

У той же час  $C_2 = A_2 \gamma_j(m)$ , де  $A_1, A_2$  – нормовані коефіцієнти, а  $\gamma_j(m)$  – функція, що визначає складність другої вирішальної схеми,

$$\begin{aligned} \gamma_1(m) &= 2(m-1); \gamma_2(m) = \log_2(m+1); \\ \gamma_3(m) &= 2 + \log_2(m+1); \\ \beta_1(m) &= c_{2^{m-1}}^m \geq 1/2\sqrt{2} \times \\ &\times \left( m^{-m-0.5} (1/2m-1)^{-m} \cdot ((m-1)/(2m-1))^{-m+0.5} \right); \\ \beta_2(m) &= 3^{m-2} + 1. \end{aligned}$$

Уведемо рівняння зв'язку в цільову функцію й обмеження і запишемо задачу оптимального математичного програмування з нелінійним функціоналом одним нелінійним обмеженням у виді рівності і двома обмеженнями у виді нерівностей:

$$\tilde{O} \left[ A_1 (\bar{h}_i) + A_2 \gamma_j(m) \right] \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$\beta_{\bar{e}}(M) P_0^m \leq P_y^{\delta\delta} = 10^{-10}; \quad (10)$$

$$2 \leq m \leq 5; \quad (11)$$

$$0 < P_0 \ll 1. \quad (12)$$

Таким чином, розглянута задача зводиться до

перебування значень  $m$  і  $P_0$ , що задовольняють рівнянням (10) – (12) і мінімізують функціонал (9).

Розглядаєма задача вирішена класичним методом множників Лагранжа. Підставляємо функцію  $\varphi(X) = (\beta_{\bar{e}}(m) P_0^m - 10^{-10} = 0)$  з невідомим множником  $\lambda$  у цільову функцію трьох перемінних  $x_1, x_2, \lambda$ ;  $v(X, \lambda) = v(X) + \lambda \varphi(X)$  та одержуємо задачу оптимального математичного програмування без обмежень

$$\min_{X, \lambda} v(X, \lambda) = \min_{X, \lambda} \left[ A_1 \bar{h}_i + A_2 \gamma_j(m) + \lambda \varphi(X) \right]. \quad (13)$$

Звідки оптимальні значення незалежних перемінних знаходимо рішенням системи з трьох рівнянь

$$\frac{\partial [v(X, \lambda)]}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial [v(X, \lambda)]}{\partial x_2} = 0; \quad \varphi(X) = 0.$$

Варіанти рішення цієї системи для різних  $\bar{h}_i$ ,

$\gamma_j(m), \beta_k(m)$  зведені в табл. 1, де

$$\psi(m) = (m^2 - m + 0,5)/(m(m-1)(2m-1));$$

$$K(m) = (3^{m-2} \ln 3)/(3^{m-2} + 1).$$

Шукане оптимальне рішення  $X_{\text{опт}}$  одержуємо за допомогою методу ітерації. Підставляючи у формулу (7) значення  $m_{\text{опт.і}}$ ,  $P_{0.\text{опт.і}}$ , знаходимо мінімальне значення цільової функції (табл. 2).

Таблиця 1

Варіанти рішення системи для різних  $\bar{h}_i, \gamma_j(m), \beta_k(m)$

$\bar{h}_i$	$\gamma_j$	$\beta_k(m)$	Система рівнянь для $X_{\text{опт}}$
1/P <sub>0</sub>	2(m-1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (2A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> )/A <sub>1</sub> ]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	log <sub>2</sub> (m+1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> )/A <sub>1</sub> (m+1)ln 2]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	2 + log <sub>2</sub> (m+1)	3 <sup>m-2</sup> + 1	ln P <sub>0</sub> = -[K(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> )/(A <sub>1</sub> (m+1)ln 2)]; (3 <sup>m-2</sup> + 1)P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
2/√P <sub>0</sub>	2(m-1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (2A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> )/A <sub>1</sub> ]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	log <sub>2</sub> (m+1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> )/A <sub>1</sub> (m+1)ln 2]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	2 + log <sub>2</sub> (m+1)	3 <sup>m-2</sup> + 1	ln P <sub>0</sub> = -[K(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> )/(A <sub>1</sub> (m+1)ln 2)]; (3 <sup>m-2</sup> + 1)P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>

На рис. 1 показано поведження цільової функції від  $P_0$  при значеннях  $m$ , що задовольняють умові (7).

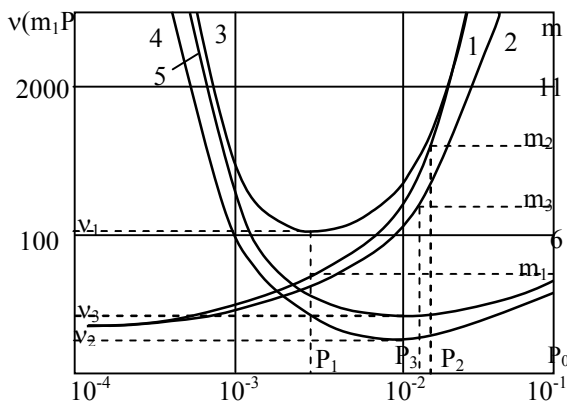


Рис. 1. Варіанти поведження цільової функції

Аналітичні записи побудованих кривих зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Аналітичні записи побудованих кривих

Функція	Аналітичний запис	№ кривої
y <sub>2</sub>	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>	1
y <sub>2</sub>	(3 <sup>m-2</sup> + 1)P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>	2
y <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> (1/P <sub>0</sub> ) <sup>α</sup> + A <sub>2</sub> 2(m-1)	3
y <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> (1/P <sub>0</sub> ) <sup>α</sup> + A <sub>2</sub> log <sub>2</sub> (m+1)	4
y <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> (1/P <sub>0</sub> ) <sup>α</sup> + A <sub>2</sub> [2 + log <sub>2</sub> (m+1)]	5

## Висновки

Відхилення значень параметрів від оптимальних приводить до помітного збільшення складності проєктованих пристроїв. У той же час застосування в другій вирішальній схемі комбінованих пристроїв мажоритарного декодування підвищує ефективність РЕС БРЕО (рис. 1, криві 4, 5), що працює по каналах низької якості  $10^{-3} < P_0 < 10^{-1}$ . У результаті порівняльного аналізу можливих варіантів рознесеного прийому, здвоєний частотно-рознесений прийом більш ефективний, чим одиночний при  $P_0 < 10^{-3}$ . Використання ж пристроїв комбінованого мажоритарного декодування розширює закладені потенційні можливості методу багаторазової передачі, оскільки знижується число копій повідомлення при заданих обмеженнях на вірогідність. Це зменшує час доведення інформації до одержувача підвищує ефективність функціонування РЕС БРЕО.

Напрямок подальших досліджень – застосування запропонованого методу для розробки методики підвищення ефективності використовуваних РЕС БРЕО.

## Список літератури

1. Меркулов В.И. Радиоэлектронные системы управления самолетом и его оружием / В.И. Меркулов. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2001. – 244 с.
2. Канащенков А.И. Расширение информационных возможностей бортовых РЛС на основе концепции траекторного управления наблюдением / А.И. Канащенков // Радиотехника. – 2003. – №9. – С. 45-52.
3. Авиационные системы радиоперехвата. Т. 1. Принципы построения систем радиоперехвата. Основы синтеза и анализа / В.И. Меркулов, В. Дрогалин, А.И. Канащенков. и др. / под ред. А.И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 326 с.
4. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 1 / В.И. Меркулов, А.И. Канащен-

ков, А.И. Перов и др. / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004.

5. Экспериментальные исследования информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов / М.М. Черных, О.В. Васильев, В.В. Богданов и др. // Радиотехника. – 2000. – № 8. – С. 35-42.

6. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993.

7. Меркулов В.И., Чернов В.С., Юрчик И.А. Авиационные многопозиционные системы радиоперехвата / В.И. Меркулов, В.С. Чернов, И.А. Юрчик // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 12.

8. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием: монография / Ю.М. Перунов, К.И. Фомичев, Л.М. Юдин; под ред. Ю.М. Перунова. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2008 (Вологда). – 415 с.

9. Андреев Г.Н. Радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации: учеб. пособ. / Г.Н. Андреев. – М.: [б. и.], 2008. Ч. 1: Общие вопросы радиотехники, связи, УВД; радиолокационное оборудование ВС. – 2008. – 112 с.

10. Шишко А.А. Радиоэлектронное оборудование (боевая авиационная техника): моногр. / В.А. Болдин, Г.И. Горгонов, В.Д. Коновалов и др./ под ред. В.М. Сидорина. – М.: Воениздат, 1990. – 288 с.

11. Вентцель Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. – М.: Сов. радио, 1972. – 551 с.

12. Окунев Ю.Б. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи / Ю.Б. Окунев, В.Г. Плотников. – М.: Связь, 1976. – 183 с.

13. Пеннин П.И. Системы передачи цифровой информации / П.И. Пеннин. – М.: Сов. радио, 1976. – 365 с.

14. Бухалев В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой / В.А. Бухалев. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 344 с.

Надійшла до редколегії 28.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаєв, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, Харків.

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.В. Белимов, Я.Ю. Стасева, Ю.А. Черных

Предложен метод повышения эффективности функционирования бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО), который позволяет уменьшить время доведения информации к получателю, которая получена радиоэлектронными системами БРЭО. Доказано, что использование устройств комбинированного мажоритарного декодирования расширяет заложенные потенциальные возможности метода многократной передачи, поскольку снижается число копий сообщения при заданных ограничениях на достоверность.

**Ключевые слова:** бортовое радиоэлектронное оборудование, радиоэлектронные системы, повышение эффективности, устройство комбинированного мажоритарного декодирования.

## METHOD OF INCREASE OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF SIDE RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

V.V. Belimov, Ya.Yu. Staseva, Yu.A. Chernyh

The method of increase of efficiency of functioning of side radio electronic equipment is offered, which allows to decrease time of leading to of information to the recipient, which is got the radio electronic systems of side radio electronic equipment. It is proved that the use of devices of the combined majority decoding extends the stopped up potential possibilities of method of multiple transmission, as a number of copies of report goes down at the set limits on authenticity.

**Keywords:** side radio electronic equipment, radio electronic systems, increase of efficiency, device of the combined majority decoding.