

УДК 623.618.2

Ю.В. Стасев¹, Д.О. Медведєв², І.Є. Лещенко¹¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

УМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛЬНО-КODOВИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПЕРЕШКОДОЗАХИЩЕНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ТА УПРАВЛІННЯ

В роботі розглянута можливість забезпечення активного завадо- та імітозахисту у системах і засобах зв'язку, захисту їх від засобів радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби. Встановлено, що для вирішення поставлених завдань застосовується реалізація динамічного режиму функціонування. Доведено теореми недешифрованості динамічного режиму функціонування і визначено необхідні та достатні умови для шляхів його досягнення.

Ключові слова: радіоелектронна протидія, динамічний режим функціонування, ентропія розкриття, сигнально-кодові конструкції, система зв'язку.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Забезпечення активного завадо- та імітозахисту у системах і засобах зв'язку та захист їх від засобів радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби евентуального супротивника можливо при реалізації динамічного режиму функціонування.

Для оцінки ефективності динамічного режиму функціонування використовується міра невизначеності відносно використання в системах і засобах зв'язку ансамблю сигнально-кодових конструкцій та їх конкретного вигляду, що назвемо ентропією розкриття.

Мета статті – розробка достатніх та необхідних умов динамічного режиму функціонування захисту системи зв'язку та управління.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Проведені дослідження показали, 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, можливо при реалізації динамічного режиму функціонування цифрової системи зв'язку.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Розв'язання задачі забезпечення необхідних показників завадозахищеності, скритності та імітотійкості радіоканалу управління досягається за рахунок сигналів і кодів з поліпшеними властивостями. Враховуючи реальну структуру коду, як сигнали переважно використовують ортогональні системи сигналів [1; 2; 3].

Використання регулярної структури сітки з М частот приводить до більшої уразливості радіоканалу при деяких видах навмисних завад і, в першу чергу, по відношенню до структурних завад [2; 4; 5; 6], під якими розумітимемо гармонічні (полігармонічні) завади, що мають вид модуляції, аналогічний сигналам, які передають; смугу частот; швидкість і крок перестройки за частотою; частоти, що відрізняються структурою (законом) ПСП, управляючих побудовою фази, і частоти сигналу. Можливо подібні завади є оптимальними з погляду завадопостановника [2; 4; 5; 6; 7; 8].

Для того, щоб зберегти корисні властивості використовуюваного класу сигналів і забезпечити їх достатню захищеність від оптимальної навмисної завади, необхідно позбавити завадопостановника можливості погодити структуру завади з сигналом. Цього ефекту можна досягти, якщо кожен послідовний інформаційний символ передавати складним символом із змінюваною в часі структурою, що задається спеціальним датчиком ПСП, строго синхронізованим з аналогічним датчиком на приймальній стороні [2; 4], тобто організувавши в радіоканалі режим періодичної зміни параметрів. Оскільки закон формування ПСП (зміни частот або форм ФМ сигналів) завадопостановнику невідомий, то він не

може досягти повної оптимізації завади із сигналом і вимушений обмежитися лише частковою оптимізацією за основними параметрами сигналу (смуга, розділені частоти, швидкість маніпуляції і т.д.). Випадок, коли здійснюються спроби визначити закон керуючих послідовностей, припускає великі часові та матеріальні витрати, а також переслідує іншу мету – постановку імітаційних завод.

Кількісною оцінкою показника заводозахищеності радіоканалу є ймовірність його подавлення навмисними заводами $P_{\text{под}}$. Ймовірність $P_{\text{под}}$ характеризуватимемо ймовірністю помилки на виході другої вирішувальної схеми (декодера), яка визначається із залежності вигляду

$$P_{\text{под}} = P_{\text{пом}}^{\text{к}}(P_{\text{пом}}^{\text{с}}), \quad (1)$$

де $P_{\text{пом}}^{\text{к}}$, $P_{\text{пом}}^{\text{с}}$ – ймовірність помилок відповідно на сигнальному рівні й рівні контуру кодування.

Визначення $P_{\text{пом}}^{\text{с}}$ за наявності багатоканально-го приймача припускає розгляд випадку M гіпотез постановки навмисних завод [1; 3], що є важковирішуваним завданням. Уникнути цього можна, якщо замінити реальний багатоканальний приймач адекватною в значенні збереження показників заводостійкості моделлю радіоканалу з двома каналами обробки, а при розрахунках $P_{\text{пом}}^{\text{с}}$ використовувати адитивні межі Буля-Бонферроні [1; 8]. Так, для випадку найгіршої заводової обстановки (ураження $M-1$ підканалів) з нерівності Буля-Бонферроні маємо

$$P_{\text{пом}}^{\text{с}} = (M-1)P_{\text{пом дв}}^{\text{с}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{пом дв}}^{\text{с}}$ – ймовірність помилки у двоканальному приймачі.

Ймовірність помилки $P_{\text{пом дв}}^{\text{с}}$ визначимо виходячи із співвідношення [1]:

$$P_{\text{пом дв}}^{\text{с}} = P_{\text{р}}^{\text{ф}} \cdot (P_{\text{пом}}(s, n) + 1 - P_{\text{р}}^{\text{ф}}) \cdot P_{\text{пом}}(s, \text{ш}), \quad (3)$$

де $P_{\text{р}}^{\text{ф}}$ – ймовірність розвідки основних параметрів сигналів-переносників;

$P_{\text{пом}}(s, n)$ – складова ймовірність помилки, яка характеризується наявністю в робочому каналі навмисної завади;

$P_{\text{пом}}(s, \text{ш})$ – складова ймовірність помилки, яка характеризується присутністю в каналі лише власних шумів приймача.

За аналогією з [1] ймовірність $P_{\text{р}}^{\text{ф}}$ визначатимемо як відношення кількості виставлених структурних завод G до кількості L можливих (розділених) підканалів, тобто

$$P_{\text{р}}^{\text{ф}} = G / L, \quad (4)$$

де $G = \overline{1, L}$.

У свою чергу, кількість L характеризується відношенням смуги частот радіоканалу $\Delta F_{\text{к}}$ до смуги $\Delta F_{\text{с}}$, тобто

$$L = \Delta F_{\text{к}} / \Delta F_{\text{с}}. \quad (5)$$

Тривалість елемента ЧФМ сигналу визначається із співвідношення вигляду

$$\tau_{\text{е}} = \frac{m \cdot \kappa}{R_{\text{і}} \cdot B \cdot N} = \frac{m \cdot R_{\text{к}}}{R_{\text{і}} \cdot B}, \quad (6)$$

ширина спектра сигналу

$$\Delta F_{\text{с}} = \frac{B \cdot 2 \cdot R_{\text{і}}}{m \cdot R_{\text{к}}}.$$

У результаті одержимо, що величина L визначається

$$L = \frac{\Delta F_{\text{к}} \cdot m \cdot R_{\text{к}}}{B \cdot 2 \cdot R_{\text{і}}}. \quad (7)$$

Як уже вказувалося, найбільш небезпечними для даного класу сигналів є гармонічні (полігармонічні) заводи, схожі за структурою основних параметрів на робочі сигнали. Дослідження заводозахищеності радіоканалу проводитимемо в припущенні постановки даного класу навмисних завод. Відомо [1; 8], що ефект рівномірно фазоманіпульованої гармонійної, синфазної за високою частотою і синхронної за тактами з сигналом завод зводиться до ефекту дії гауссівського шуму з рівномірним спектром тієї ж середньої потужності за умови, що база ФМ послідовності $B \geq 50$. Дане обмеження врахуємо при виведенні розрахункових співвідношень і отриманні оцінок заводозахищеності радіоканалу.

Можна показати [1; 8], що в разі використання ЧФМ сигналів на етапі їх розрізнення проста ретрансляція завади недоцільна, оскільки при некогерентному прийомі не враховується знак при накладенні синфазних і квадратурних складових сигналу. Якщо ж з ймовірністю 1/2 чергувати таку заваду і заваду з протилежними частотами, тобто за допомогою гетеродинування перетворювати робочу частоту в її обернену і навпаки, то оскільки в приймальному сигналі не містяться протилежні частоти, а їх фази називаються невідомими, когерентність складання ретранслюючої завади після гетеродинування буде порушена [1; 8].

Таким чином, ймовірність $P_{\text{пом}}(s, n)$ при некогерентному розрізненні квазіортогонального ЧФМ сигналу на фоні структурної завади визначимо, використовуючи вираз (1):

$$P_{\text{пом}}(s, n) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{P_{\text{с}} \cdot B \cdot (1 - R_{\text{с}})}{P_{\text{ш}} + P_{\text{нн}}}\right), \quad (8)$$

де $R_{\text{с}}$ – коефіцієнт АФВК застосовуваних сигналів;

$P_{ш}$ – потужність складової шуму в смузі ΔF_c ;

$P_{пн}$ – потужність навмисної завади в смузі підканалу.

В умовах активної дії на радіоканал потужних навмисних завад і наявності у завадопостановника можливостей забезпечення відношення $W = P_{пн}/P_c$ в інтервалі $40 \leq W \leq 60$ (дБ) [1; 3] у подальших розрахунках можна нехтувати складовою в (8) по відношенню до $P_{пн}/P_c$ як величиною значно меншого порядку і переписати дане співвідношення у вигляді

$$P_{пом}(s, n) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B \cdot (1 - R_6)}{P_{пн}/P_c}\right). \quad (9)$$

Вважатимемо, що складова потужності навмисної завади $P_{пн}$ у кожному з G підканалів однакова і дорівнює $P_{пн}/G$, тобто вираз (9) можна записати у вигляді

$$P_{пом}(s, n) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B \cdot (1 - R_6)}{W/G}\right). \quad (10)$$

Складова ймовірності помилки $P_{пом}(s, ш)$ визначається виходячи із співвідношення вигляду [2; 3; 8; 13]:

$$P_{пом}(s, ш) = \frac{1}{2} \exp(-H_c^2/2), \quad (11)$$

де $H_c^2 = E_c/N_0$ – відношення сигнал-шум на вході розв'язувального пристрою.

Таким чином, після підстановки (7), (9), (11) в (2) і (1) ймовірність помилки в каналному символі на сигнальному рівні визначимо із співвідношення

$$P_{пом}^s = (M-1) \left[\frac{Q \cdot B \cdot 2R_i}{\Delta F_k \cdot m \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B(1-R_6)}{W/Q}\right) + \frac{G \cdot B \cdot 2R_i}{\Delta F_k \cdot m \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B(1-R_6)}{W/G}\right) + \left(1 - \frac{G \cdot B \cdot 2R_i}{\Delta F_k \cdot m \cdot R_k}\right) \cdot \frac{1}{2} \exp(-H_c^2/2) \right]. \quad (12)$$

На рис. 1 зображений графік залежності $P_{пом}^k$ від відносної кількості підканалів, уражених навмисними завадами G/L , розрахованими за співвідношенням (12) при $\Delta F = 2$ ГГц, $R_i = 1,2$ кбіт/с, $W = 40$ дБ, $B = 128$, $m = 6$, $R_k = 0,7$, $N = 63$.

З аналізу поданого рисунка видно, що оптимальною для завадопостановника є організація всього 0,4 % (від загальної кількості підканалів) структурних завад.

На рис. 2 – 5 зображені графіки, що пояснюють залежність при різних значеннях R_6 і фіксованих значеннях $B = 128$, $m = 5$.

Аналіз кривих, наведених на цих рисунках, до-

зволяє побачити, що з одного боку, для кожного значення R_6 , H_6^2 спостерігається явно виражений максимум, що відповідає оптимальному значенню R_k , з іншого боку – досягнення необхідних значень вірогідності повідомлень, які передаються в радіоканалі (наприклад ділянка в межах 10^{-3} – 10^{-5} , виділена вертикальними лініями на рисунках), можливе за рахунок оптимального вибору енергетичних параметрів H_6^2 радіоканалу і відносної швидкості кодування для цього випадку.

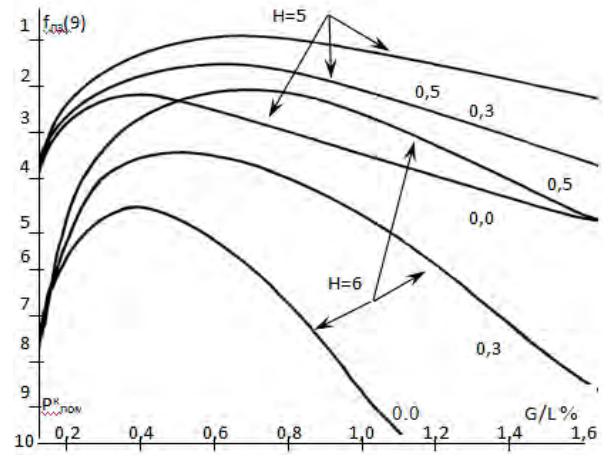


Рис. 1. Залежність $P_{пом}^k$ від G/L

Таким чином, аналіз рис. 1 та виразу (12) показує, що залежність ймовірності помилки від параметрів сигнально-кодових конструкцій має складний вигляд

$$f_{пз} = \phi(B, R_6, N) \quad (13)$$

при фіксованих (ΔF_k , W , R_i , H_6^2) і оптимальних (G , R_k).

Вплив величини m на ймовірність $P_{пом}^k$ при фіксованих $B = 128$, $H_6^2 = 6$ дБ і різних значеннях R_6 показано на рис. 2 – 5 зображені графіки залежності $P_{пом}^k$ від R_6 і R_k при $m = 6$, $B = 128$, $H_6^2 = 5$ дБ.

Аналіз даних, наведених на цих рисунках, показує, що із зменшенням величин m і H_6^2 відмінність між значеннями показника $P_{пом}^k$ залежно від значень R_6 скорочується в значній мірі. Так, використання квазіортогональних ФМ сигналів з $R_6 = 0,3$ і $R_6 = 3,4$ при $m = 6$, $B = 128$, $H_6^2 = 5$ дБ (рис. 3) приводить до відмінності завадозахищеності в 1,25 дБ. У той же час для даних значень R_6 , B значення показника $f_{скр}^s$ радіоканалу підвищиться на 3 порядки.

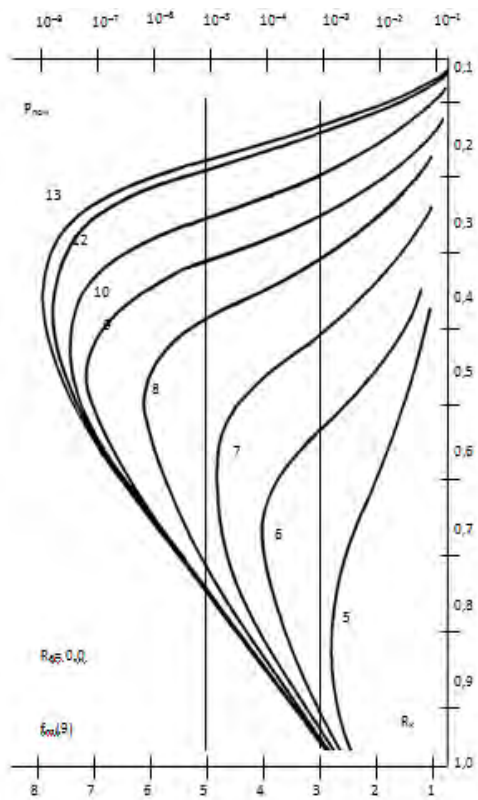


Рис. 2. Залежність $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$ від R_k при $R_b = 0,0$

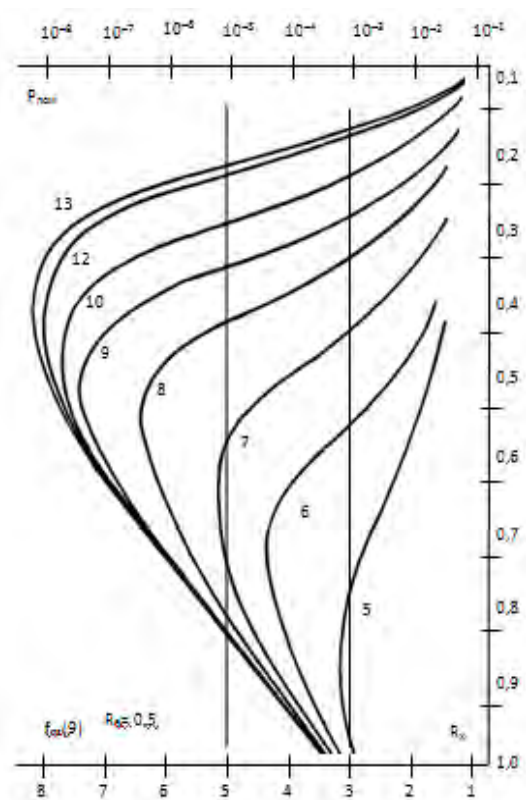


Рис. 4. Залежність $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$ від R_k , H_0^2 (дБ) при $R_b = 0,4$

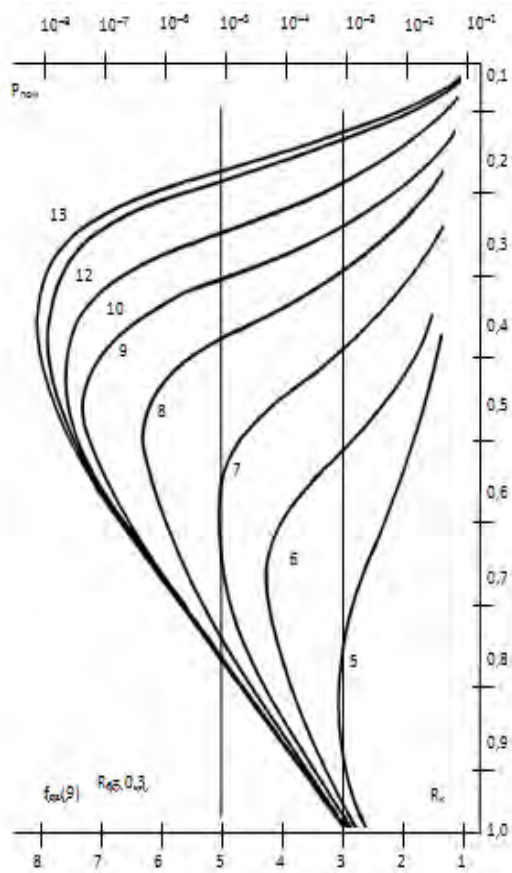


Рис. 3. Залежність $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$ від R_k , H_0^2 (дБ) при $R_b = 0,3$

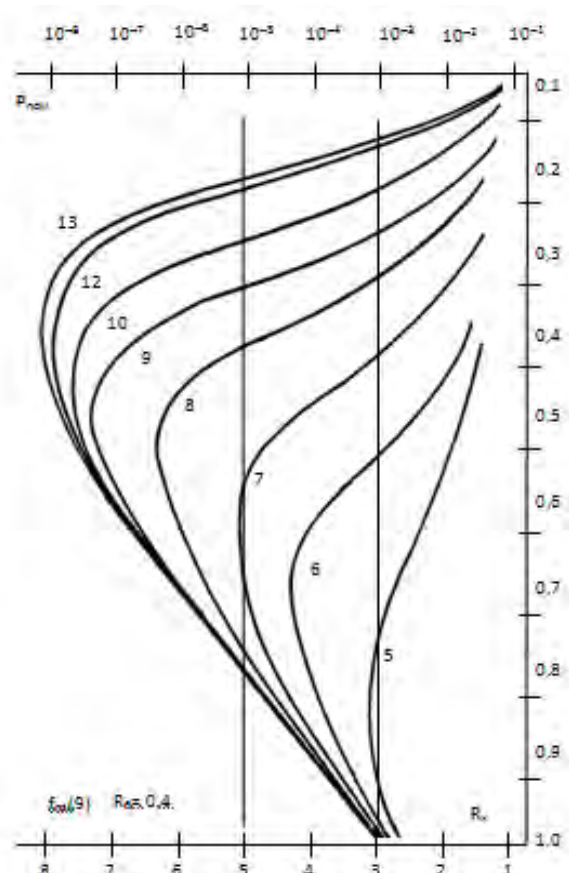


Рис. 5. Залежність $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$ від R_k , H_0^2 (дБ) при $R_b = 0,5$

Висновки і напрями подальших досліджень

Таким чином, наведені вище співвідношення дозволяють, на відміну від відомих методик оцінки врахувати сумісне застосування в радіоканалі з параметрами, які вимірюються, ортогональних ЧФМ сигналів і завадостійких кодів, провести дослідження з метою вибору і обґрунтування параметрів сигнально-кової конструкції. Повної оптимізації необхідних параметрів радіоканалу при використанні даного математичного апарата досягти не можна, оскільки необхідно враховувати інші показники якості функціонування радіоканалу.

Список літератури

1. Науменко М.І. Теорія сигнально-кодових конструкцій: монографія / М.І. Науменко, Ю.В. Стасев, О.О. Кузнецов, С.П. Євсєєв. – Х.: ХУПС, 2008. – 541 с.
2. Стасев Ю.В. Несимметричные теоретико-кодовые схемы с использованием алгеброгеометрических кодов / Ю.В. Стасев, А.А. Кузнецов // Кибернетика и системный анализ: Международный научно-теоретический журнал. – К.: Институт кибернетики НАН Украины. – 2005. – № 3. – С. 47-57.

3. Стасев Ю.В. Умови реалізації динамічного режиму функціонування захисту системи зв'язку та управління / Ю.В. Стасев, О.О. Мелешенко, І.О. Ткаченко // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2016. – Вип. 2(139). – С. 53-55.

4. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

5. Мак-Вильямс Ф.Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж.А. Слоэн. – М.: Связь, 1979. – 744 с.

6. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибок: Пер. с англ. / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

7. Сорока Л.С. Основы теории минимально-избыточных сигналов. Математические методы и средства обработки / Л.С. Сорока. – Х.:МОУ, ОНИИ ВС, 2005. – 280 с.

8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.А. Кучук, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ

Ю.В. Стасев, Д.О. Медведев, И.Е. Лещенко

В работе рассмотрена возможность обеспечения активной помехо- и имитозащиты в системах и средствах связи, защиты их от средств радиоэлектронной разведки и радиоэлектронной борьбы. Установлено, что для решения поставленных задач применяется реализация динамического режима функционирования. Доказаны теоремы недешифруемости динамического режима функционирования и определены необходимые и достаточные условия для путей его достижения.

Ключевые слова: радиоэлектронное противодействие, динамический режим функционирования, энтропия раскрытия, сигнально-кодовые конструкции, система связи.

CONDITIONS OF IMPLEMENTATION SIGNAL-CODE CONSTRUCTIONS IN ANTI-INTERFERENCE COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS

Y.V. Stasev, D.O. Medvedev, I.E. Leshchenko

The paper considers the possibility of providing an active noise-and simulation protection systems and means of communications, protecting them from the means of electronic intelligence and electronic warfare. It was found that for the task implementation applies a dynamic mode of operation. Theorems nedeshif-bility of the dynamic mode of operation and defined the necessary and sufficient conditions for the ways to achieve it.

Keywords: electronic countermeasures, the dynamic mode of operation, dis-covering entropy, signal-code construction, the communication system.