

С. С. Серов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД ОЦІНКИ ПЕРЕШКОДОЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИГНАЛІВ З РОЗШИРЕННЯМ СПЕКТРУ

Предмет статті – оцінка перешкодозахисту інформаційних систем. **Мета статті** – розробка методу оцінки перешкодозахисту інформаційної системи управління з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти сигналами при впливі структурних перешкод. **Результати.** В роботі запропонований метод оцінки інформаційної системи при використанні сигналів з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти. Доведено, що забезпечити потрібні значення перешкодозахисту можливо при використанні великих ансамблів слабкорельованих систем сигналів. Отримані вирази для оцінки перешкодозахисту інформаційної системи при впливі структурних перешкод для псевдовипадкової перебудови робочої частоти фазової маніпуляції. Проведені дослідження показали, що необхідні значення цих характеристик радіосистем досягаються не тільки за рахунок поліпшеними властивостями, але й за рахунок засобів, які реалізують ефективне застосування складових сигналів. Показано, що для того, щоб зменшити вплив структурної перешкоди можливо при реалізації інформаційної системи провести динамічну зміну форм псевдовипадкової перебудови робочої частоти та фазової маніпуляції сигналів. Реалізація динамічної зміни форм сигналів забезпечує не тільки перешкодозахист інформаційної системи, але і активний імітозахист та скритність на фізичному рівні. **Висновки.** Проведені дослідження показали, що необхідні значення цих характеристик радіосистем досягаються не тільки за рахунок використання сигналів з поліпшеними властивостями, але й за рахунок засобів, які реалізують ефективне застосування складових сигналів.

Ключові слова: інформаційна система; псевдовипадкова перебудова робочої частоти; система управління; перешкодозахист; радіосистема; фазова маніпуляція.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. До теперішнього часу в інформаційних системах управління, які функціонують в складній перешкодовій обстановці, широке застосування знайшли сигнали з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (ППРЧ). Вибір цього класу сигналів обумовлений простотою реалізації пристроїв побудови та обробки таких сигналів. В науковій літературі достатньо розглянуто методів оцінки перешкодозахисту інформаційних систем управління при впливі на систему шумових перешкод. Разом з цим, як показано в [1 – 6], найбільш небезпечними є структурні перешкоди.

Мета статті – розробка методу оцінки перешкодозахисту інформаційної системи управління з ППРЧ сигналами при впливі структурних перешкод.

Результати досліджень

Нехай у інформаційній системі управління та зв'язку під час дії структурних завад використовуються сигнали з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (ППРЧ), фазоманіпульовані сигнали (ФМ) або дискретно-частотні фазоманіпульовані сигнали (ДСЧ-ФМ).

Кількісно завадозахищеність та імітостійкість оцінюється ймовірністю прийому хибного сигналу P_n . Тоді при використанні в радіолінії ППРЧ сигналів ймовірність прийому хибного сигналу з урахуванням дії в радіоканалі шуму і заважаючих сигналів запишеться у вигляді

$$P_n = P_n(P_m + P_c) + (1 - P_n)P_{ш}, \quad (1)$$

де P_n – апріорна ймовірність потрапляння заважаючого сигналу в розрізнений у даний момент часу частотний діапазон; P_m – умовна ймовірність прийо-

му хибного сигналу при дії заважаючого сигналу в каналі, де сигнал відсутній; P_c – умовна ймовірність перейменування сигналу при дії на нього заважаючого сигналу та шуму; $P_{ш}$ – ймовірність помилки через дію шуму.

Для обчислення P_m і P_c , як показано в [6, 7], необхідно знайти щільність розподілу ймовірності випадкової величини, яка характеризує амплітуду напруг на вході розв'язувального пристрою у момент повного згортання сигналу. Умовна щільність розподілу ймовірностей напруг на вході синфазного і квадратурного каналів некогерентного приймача, де діє корисний сигнал, заважаючий сигнал і шум, є узагальненою релеївською щільністю, а щільність на виході каналу, де діє шум, є просто релеївською щільністю. У результаті безумовна щільність розподілу ймовірності напруги на вході розв'язувального пристрою має вигляд

$$w_{axPY}^c(y) = \int_0^{E_i + E_m R} \int_{E_i - E_m R}^{E_i + E_m R} w(\alpha/R) \times \int_{-\infty}^{\infty} w(y/\alpha) dx d\alpha dR, \quad (2)$$

де $w(\alpha/R)$ – щільність розподілу ймовірності випадкової величини α , що є функцією випадкових величин $(\phi_c - \phi_m)$ і ступеня кореляції сигналів R ;

$\alpha = y \cdot (\text{sign}(y) - 1) / 2$; $w(y/\alpha)$ – умовна щільність ймовірності, яка характеризує напругу на вході розв'язувального пристрою, при дії заважаючого сигналу; E_i і E_m – енергія корисного і заважаючого сигналів;

У [8] показано, що розподіл косинуса різниці фаз, незалежних і рівномірно розподілених на інтервалі $[-\pi, \pi]$, еквівалентний розподілу косинуса рівномірно розподіленої випадкової величини.

Позначимо $\xi = \cos(\phi_c - \phi_m)$. Функція розподілу випадкової величини ξ визначається як

$$w_\xi(x) = \sqrt{1-x^2}/\pi. \quad (3)$$

звідси $w_\alpha = w_\xi[\Psi(y)] \frac{d\Psi(y)}{dy}$, (4)

де $x = \Psi(y)$ – обернена функція для $\alpha = \phi(\xi)$.

З урахуванням (3) $w(\alpha/R)$ має вигляд

$$w(\alpha/R) = \frac{\alpha}{\pi E_i E_m R \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha^2 - E_i^2 - E_m^2 R^2}{2E_i E_m R} \right)^2}}. \quad (5)$$

Умовна щільність розподілу ймовірності випадкової величини, що характеризує напругу на вході розв'язувального пристрою когерентного приймача, при дії на робочий сигнал заважаючого сигналу:

$$w(y/\alpha) = \int_0^\infty \frac{x}{\alpha \sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + \alpha^2}{2\sigma_0^2}\right\} I_0 \times \times \left(x\alpha/\sigma_0^2\right) \left((x+y)/\sigma_0^2\right) \exp\left\{-(x+y)^2/(2\sigma_0^2)\right\} dx, \quad (6)$$

де σ_0^2 – дисперсія розподілу; I_0 – функція Бесселя нульового порядку.

Підставивши (5), (6) у (1) визначимо P_c :

$$P_c = \int_0^1 \int_{\alpha - E_m R}^{\alpha + E_m R} \frac{x}{\alpha \sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + \alpha^2}{2\sigma_0^2}\right\} I_0 \left(\frac{x\alpha}{\sigma_0^2}\right) dx dy \times \times \int_{E_i - E_m R}^{E_i + E_m R} \frac{\alpha}{\pi E_i E_m R \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha^2 - E_i^2 - E_m^2 R^2}{2E_i E_m R} \right)^2}} d\alpha, \quad (7)$$

У [8] показано, що подвійний інтеграл за x, y дорівнює $0,5 \exp\{-\alpha^2/4\sigma^2\}$. Отже, P_c має вигляд

$$P_c = \int_0^1 \int_{E_i - E_m R}^{E_i + E_m R} 0,5 \exp\left\{-\alpha^2/(4\sigma_0^2)\right\} \times \times \frac{\alpha}{\pi E_i E_m R \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha^2 - E_i^2 - E_m^2 R^2}{2E_i E_m R} \right)^2}} d\alpha dR. \quad (8)$$

Перетворимо вираз (8) до вигляду [8]:

$$P_c = \frac{\sqrt{2\pi}}{4\pi h_i h_m} \exp^{-0,5h_i^2} \times \times \left\{ (h_i + h_m) \otimes (h_n + h_i) - (h_m - h_i) \otimes (h_m - h_i) + \right. \quad (9) \\ \left. + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \times \left\{ e^{-0,5(h_m + h_i)^2} - e^{-0,5(h_m - h_i)^2} \right\} \right\},$$

де $\otimes(z)$ – функція Крампа; $h_i = \sqrt{E_j/N_0}$; N_0 – спектральна потужність шуму.

Для обчислення P_M необхідно знайти щільність розподілу на виході каналу, де діє корисний сигнал і шум, та каналу, де діє заважаючий сигнал і шум. Обидва ці розподіли – узагальнені релєвські розподіли. Імовірність прийому хибного сигналу P_M визначається інтегралом, аналогічним (7):

$$P_M = \int_0^1 \int_{\alpha - E_m R}^{\alpha + E_m R} \frac{x}{\alpha \sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + E_i^2}{2\sigma_0^2}\right\} I_0 \left(\frac{x E_i^2}{\sigma_0^2}\right) dy dx \times \times \int_0^\infty \left(\frac{x+y}{\sigma_0^2}\right) \exp\left\{-\frac{(x+y)^2 + E_m R}{2\sigma_0^2}\right\} dR. \quad (10)$$

Інтеграл (10) після громіздких перетворень може бути приведений до вигляду

$$P_M = 1 - \left(\frac{e^{-0,5h_i^2}}{3\sqrt{2\pi h_i h_m}} \right) \cdot (h_i + h_m)^3 \otimes \otimes (h_m + h_i) - (h_m - h_i)^3 \otimes (h_n - h_i) + \frac{2}{2\pi} \times \times e^{-0,5(h_m + h_i)^2} - (h_m - h_i)^2 \times e^{-0,5(h_m - h_i)^2}. \quad (11)$$

Імовірність помилки через дію шуму P_{ui} дорівнює $P_{ui} = 0,5e^{-0,5h_i}$, а після підстановки (9) – (11) у (1) одержимо

$$P_n = P_n \left\{ \frac{\sqrt{2\pi}}{4\pi h_i h_m} e^{-0,5h_i^2} \times \left\{ (h_i + h_m) \otimes (h_m + h_i) - \right. \right. \quad (12) \\ \left. \left. - (h_m - h_i) \otimes (h_m - h_i) + 2/\sqrt{2\pi} \right\} \times \times \left\{ e^{-0,5(h_m + h_i)^2} - e^{-0,5(h_m - h_i)^2} \right\} + \right. \\ \left. + \left\{ 1 - \left(\frac{e^{-0,5h_i^2}}{3\sqrt{2\pi h_i h_m}} \right) \left\{ (h_i + h_m)^3 \otimes (h_m + h_i) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. - (h_m - h_i)^3 \times (h_n - h_i) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \left[\begin{array}{l} (h_m + h_i)^2 e^{-0,5(h_m + h_i)^2} \\ - (h_m - h_i)^2 e^{-0,5(h_m - h_i)^2} \end{array} \right] \right\} \right\} + \\ \left. + 0,5(1 - P_n) e^{-0,5h_i} \right\}.$$

При використанні в мережі зв'язку й управління ФМ сигналів [2, 5-7] імовірність прийому хибного сигналу дорівнює [3]:

$$P_n = P_n P_c + (1 - P_n) P_M, \quad (13)$$

де P_n – імовірність постановки заважаючого сигналу; P_c – імовірність помилки при дії заважаючого сигналу; P_M – імовірність помилки за відсутності заважаючого сигналу. Вираз для обчислення P_c для випадку використання ФМ сигналів збігається з

(9). Проте треба пам'ятати, що h_m в \sqrt{L} раз менше, ніж при використанні ППРЧ сигналів, де L – кількість елементів ФМ сигналу. Імовірність постановки хибного ФМ сигналу із заданим ступенем кореляції визначається виразом [8]

$$P_n = \frac{1}{125L \left[(1+R)^{1+R} (1-R)^{1-R} \right]^{0,5L}} \quad (14)$$

З урахуванням висловлених зауважень, вираз для P_n запишеться у вигляді

$$P_n = \frac{1}{125L \left[(1+R)^{1+R} (1-R)^{1-R} \right]^{0,5L}} \cdot \frac{\sqrt{2\pi}}{4\pi h_i h_m} \times e^{-0,5h_i^2} \left\{ (h_i + h_m) \otimes (h_m + h_i) - (h_m - h_i) \otimes (h_m - h_i) + (h_m - h_i) \right\} + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-0,5(h_m+h_i)^2} - e^{-0,5(h_m-h_i)^2} \right] + \left[e^{-0,5 h_i} / \left(125 \cdot L \left[(1+R)^{1+R} (1-R)^{1-R} \right]^{0,5L} \right) \right]. \quad (15)$$

При використанні ППРЧ-ФМ сигналу ймовірність прийому хибного сигналу запишеться як

$$P_n = P_n \text{ ППРЧ} \left[\frac{P_n \text{ ФМ} (P_m + P_c) + (1 - P_{\text{ПФМ}}) P_{\text{ш}}}{(1 - P_n \text{ ППРЧ}) P_{\text{ш}}} \right] \quad (16)$$

де $P_n \text{ ППРЧ}$ – імовірність потрапляння на роздільну частоту; $P_n \text{ ФМ}$ – імовірність постановки ФМ завади із заданим ступенем кореляції.

Підставивши значення змінних, що входять у вираз (16), одержимо

$$P_n = P_n \text{ ППРЧ} \left\{ \frac{1}{125L \left[(1+R)^{1+R} (1-R)^{1-R} \right]^{0,5L}} \times \left[1 - \left(\frac{e^{-0,5h_i^2}}{3\sqrt{2\pi} h_i h_m} \right) \times \left\{ (h_i + h_m)^3 \otimes (h_m + h_i) - (h_m - h_i)^3 \otimes (h_m - h_i) + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \left[(h_m + h_i)^2 e^{-0,5(h_m+h_i)^2} - (h_m - h_i)^2 e^{-0,5(h_m-h_i)^2} \right] \right\} \frac{\sqrt{2\pi}}{4\pi h_i h_m} e^{-0,5h_i^2} \right] \right\}$$

$$\times \left\{ (h_i + h_m) \otimes (h_m + h_i) - (h_m - h_i) \otimes (h_m - h_i) + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-0,5(h_m+h_i)^2} - e^{-0,5(h_m-h_i)^2} \right] \right\} \times \left[1 - \frac{1}{125L \left[(1+R)^{1+R} (1-R)^{1-R} \right]^{0,5L}} \right] \times \left[0,5e^{-0,5h_i} + 0,5(1 - P_n \text{ ППРЧ}) e^{-0,5h_i} \right]. \quad (17)$$

З використанням виразів (13), (16) і (17) був проведений аналіз імовірності нав'язування хибного сигналу.

Установлено, що для ППРЧ і ППРЧ-ФМ сигналів імовірність нав'язування залежить від методу обробки та співвідношення P_c/P_n на елементі ППРЧ і кількості завад, що виставляються. При цьому найбільш небезпечними є випадки, коли відношення потужності сигналу до потужності завади ППРЧ сигналу є мінімальними.

Для фазоманіпульованих сигналів імовірність нав'язування хибного сигналу залежить від енергетичних співвідношень сигналу та завади і ступеня їх кореляції.

Отже, імітостійкість і завадозахищеність суміщеної командно-телеметричної радіолінії можуть бути підвищені за рахунок розширення ансамблю використаних сигналів та збільшення ступеня невизначеності для зловмисника конкретної форми сигналу, а також зменшення ступеня кореляції між сигналами.

Висновки

Таким чином, розв'язання задачі підвищення імітостійкості та скритності інформаційної системи на фізичному рівні досягається використанням сигналів з поліпшеними ансамблевими, кореляційними, структурними характеристиками і застосуванням алгоритмів динамічної зміни сигнальних конструкцій.

Проведені дослідження показали, що необхідні значення цих характеристик радіосистем досягаються не тільки за рахунок використання сигналів з поліпшеними властивостями, але й за рахунок засобів, які реалізують ефективне застосування складових сигналів. Розроблені і широко вживані засоби передачі інформації в радіосистемах або не забезпечують необхідних значень завадозахищеності та імітостійкості, або забезпечують пасивний імітозахист, який забезпечує вимкнення апаратури на приймальній стороні при появі імітаційних завад.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Свердлин М. Б. Оптимальные дискретные сигналы / М. Б. Свердлин. – М.: Связь, 1975. – 101 с.
3. 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 – К.: National Aviation University "NAU-Druk" Publishing House, 2010. – 180 p.
4. Дядюнов Н. Г. Ортогональные и квазиортогональные сигналы / Н. Г. Дядюнов, А. И. Сенин. – М.: Связь, 1977. – 224 с.
5. Горбенко И. Д. Безопасность информации в космических системах связи и управления / И. Д. Горбенко, Ю. В. Стаев // Космічні науки і технологія. – 1996. – Т. 2, № 5-6. – С. 64-69.

6. Стасєв Ю. В. Умови реалізації динамічного режиму функціонування захисту системи зв'язку та управління / Ю. В. Стасєв, О. О. Мелешенко, І. О. Ткаченко // Системи озброєння і військова техніка. –Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 12 (16). – С. 28-32.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
8. Теорія сигнально-кодових конструкцій: моногр. / М.І. Науменко, Ю.В. Стасєв, О.О. Кузнецов, С.П. Євсєєв. – Х.: ХУПС, 2008. – 541 с.:

REFERENCES

1. Varakin, L.E. (1985), *Communication Systems with Noise-Like Signals*, Radio and Communication, Moscow, 384 p.
2. Sverdlin, M.B. (1975), *Optimal discrete signals*, Communications, Moscow, 101 p.
3. Stasev, Y., Kuznetsov, O., Sai V. and Karpenko, O. (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, pp. 176-179.
4. Dyadyunov, N.G. and Senin, A.I. (1977), *Orthogonal and quasi-orthogonal signals*, Communications, Moscow, 224 p.
5. Gorbenko, I.D. and Stasev, Yu.V. (1996), “Information Security in Space Communication and Control Systems”, *Cosmic Sciences and Technology*, Vol. 2, No. 5-6, pp. 64-69.
6. Stasev, Y.V., Meleshenko, O.O. and Tkachenko, I.O. (2016), “Terms of realization of dynamic mode of operation of communication and control system protection”, *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 12(16), pp. 28-32.
7. Gorbenko, I.D. and Stasev, Yu.V. (1996), “Information Security in Space Communication and Control Systems”, *Cosmic Sciences and Technology*, Vol. 2, No. 5-6, pp. 64-69.
8. Naumenko, M.I., Stasev, Y.V., Kuznetsov, O.O. and Evseev, S.P. (2008), *The theory of signal-code structures: a monograph*, KAFU, Kharkiv, 541 p.

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.05.2018

Метод оценки помехозащиты информационной системы при использовании сигналов с расширением спектра

С. С. Серов

Предмет статьи – оценка **помехозащиты** информационных систем. **Цель статьи** – разработка метода оценки помехозащиты информационной системы управления с псевдослучайным перестроением рабочей частоты сигналами при воздействии структурных препятствий. **Результаты.** В работе предложен метод оценки информационной системы при использовании сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Доказано, что обеспечить нужные значения помехозащиты возможно при использовании больших ансамблей слабокоррелированных систем сигналов. Полученные выражения для оценки помехозащиты информационной системы при воздействии структурных препятствий для псевдослучайной перестройки рабочей частоты фазовой манипуляции. Проведенные исследования показали, что необходимые значения этих характеристик радиосистем достигаются не только за счет улучшенных свойств, но и за счет средств, реализующих эффективное применение составляющих сигналов. Показано, что для того, чтобы уменьшить влияние структурного препятствия, можно при реализации информационной системы динамически изменять формы псевдослучайной перестройки рабочей частоты и фазовой манипуляции сигналов. Реализация динамического изменения форм сигналов обеспечивает не только помехозащиту информации системы, но и активную имитозащиту и скрытность на физическом уровне. **Выводы.** Проведенные исследования показали, что необходимые значения этих характеристик радиосистем достигаются не только за счет использования сигналов с улучшенными свойствами, но и за счет средств, которые реализуют эффективное применение составляющих сигналов.

Ключевые слова: информационная система; псевдослучайная перестройка рабочей частоты; система управления; помехозащита; радиосистема; фазовая манипуляция.

Method of evaluation of breaking diagnostic information system in using signals with extended spectrum

S. Serov

Subject of the article – assessment of the impedance of information systems. **The purpose of the article** is the development of a method for assessing the immunity of the information management system with the pseudo-random tuning of operating frequency signals under the influence of structural obstacles. **Results.** The method of estimating the information system with the use signals with pseudorandom processing of the operating frequency was proposed. Proved that provide the required values noise immunity possibly use large ensembles of weakly correlated signal systems. Obtained expressions for evaluation noise immunity information systems under the influence of structural obstacles for noise immunity pseudorandom alteration of working frequency phase manipulation. The conducted studies have shown that the necessary values of these characteristics of radio systems are achieved not only due to improved properties, but also at the expense of means that realize the effective use of constituent signals. It is shown to reduce the impact of structural impediments possible, with the implementation of the information system of the dynamic change in the forms of pseudorandom processing frequency, and phase signal manipulation. Realization of dynamic change of forms of signals provides not only an impediment of information system but also active imitoprotection, and secrecy at the physical level. **Conclusions.** The conducted studies have shown that the necessary values of these characteristics of radio systems are achieved not only due to the use of signals with improved properties, but also at the expense of means that implement the effective application of composite signals.

Keywords: information system; frequency-hopping spread spectrum; control system, noise immunity; radio system; phase-shift keying.