

Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.391

О.В. Кувшинов, Є.М. Прокопенко

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАСОБУ РАДІОЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО КОНФЛІКТУ

В роботі запропонована математична модель засобу радіозв'язку у вигляді різницевих рівнянь у просторі станів, яка дозволяє врахувати різних види перешкод, нестаціонарність каналу зв'язку та управління режимами роботи засобу радіозв'язку.

Ключові слова: радіоелектронний конфлікт, засіб радіозв'язку, джерело перешкод.

Вступ

До засобів радіозв'язку (ЗРЗ), які функціонують в умовах апріорної невизначеності щодо умов ведення зв'язку, сигнальної і перешкодової обстановки, пред'являються високі вимоги по перешкодозахищеності та пропускну здатності. Постійне вдосконалення засобів радіорозвідки та радіоперешкод, впровадження автоматизованих комплексів радіоелектронного подавлення (РЕП) призвело за останні роки до істотного підвищення можливостей по радіоподавленню засобів радіозв'язку [1 – 7].

Процес передачі інформації може бути поданий як конфлікт між системою радіозв'язку та джерелом перешкод, оскільки він відповідає формальним ознакам конфлікту [8, 9]. Засоби радіозв'язку і джерело перешкод мають набір альтернатив – режимів роботи. Вони можуть вплинути на якість процесу передачі інформації, вибравши відповідний режим. Необхідно визначити як здійснювати цей вибір, тобто сформулювати стратегію управління режимами роботи.

Аналіз останніх публікацій. Для вирішення завдання управління ЗРЗ потрібна оцінка якості каналу зв'язку і прийнятої інформації. Завдання управління і оцінювання вирішуються різними методами. У роботах для цих цілей використовується апарат рівнянь станів. Оптимальному оцінюванню сигналів у ЗРЗ із урахуванням комплексу різних факторів, зокрема недосконалості апаратної реалізації, багато уваги приділено в роботах.

Але у більшості відомих робіт не приділяється увага конфліктним ситуаціям, які виникають при управлінні процесом передачі інформації. У явному

виді не враховується можливість зміни режиму роботи ЗРЗ і джерела перешкод у ході сеансу зв'язку.

Метою роботи є розробка математичної моделі засобу радіозв'язку, яка враховує наявність навмисних перешкод, нестаціонарність каналу зв'язку і можливість управління режимами роботи ЗРЗ.

Виклад основного матеріалу статті

Для вирішення завдання управління ЗРЗ потрібна оцінка якості каналу зв'язку і прийнятої інформації. Завдання управління і оцінювання вирішуються різними методами. У роботах [10, 11] для цих цілей використовується апарат рівнянь станів. Оптимальному оцінюванню сигналів у ЗРЗ із урахуванням комплексу різних факторів, зокрема недосконалості апаратної реалізації, багато уваги приділено в роботах [12, 13].

Але у більшості відомих робіт [10 – 17] не приділяється увага конфліктним ситуаціям, які виникають при управлінні процесом передачі інформації. У явному виді не враховується можливість зміни режиму роботи ЗРЗ і джерела перешкод у ході сеансу зв'язку.

Для відображення динаміки процесів у системі „засіб радіозв'язку – джерело перешкод“ при побудові математичної моделі ЗРЗ використовуємо апарат рівнянь стану [10]. До достоїнств методу рівнянь стану можна віднести наступне: метод дозволяє вирішувати завдання синтезу в деякому змісті оптимальних багатомірних лінійних і нелінійних дискретних систем при нестаціонарних впливах; використовуваний, у цьому методі математичний апарат зручний при моделюванні процесів на ЕОМ; метод дозволяє відобразити динаміку процесів в системі.

Сучасні засоби радіозв'язку можуть змінювати свої параметри, такі як потужність, частота, швидкість передачі інформації в процесі сеансу зв'язку. Джерело перешкод у відповідь також може змінити свої параметри. Ціль ЗРЗ – вибрати оптимальний режим роботи, з огляду на те, що при цьому можлива протидія постановника перешкод. Вибір оптимальної стратегії засобу радіозв'язку зводиться до формування керуючих впливів, які будуть переводити ЗРЗ в необхідні режими функціонування. Під режимом роботи розуміється сукупність робочих параметрів ЗРЗ.

Для вирішення завдання вибору стратегії управління режимами роботи і відображення можливості адаптації засобу радіозв'язку до перешкодової обстановки вектор стану повинен відображати, у якому режимі працює ЗРЗ.

Будемо вважати, що кількість можливих режимів роботи скінченна. Це справедливо для багатьох ЗРЗ, оскільки вибір робочих параметрів в них часто здійснюється дискретно. Наприклад, є декілька градацій потужності, дозволених робочих частот, видів модуляції або швидкостей перестроювання частоти [18].

Нехай вектор стану засобу радіозв'язку складається із двох, блоків: інформаційного і керуючого (рис. 1). Тривалість вектора $n = k + r$, де k – тривалість інформаційного блоку, а r – тривалість блоку керуючого блоку. Інформаційний блок відображає передану інформацію. Керуючий блок указує на обраний ЗРЗ режим роботи, тобто частоту, швидкість, потужність і інші параметри передачі. Максимальна кількість режимів роботи, що відображається блоком керуючих символів у моделі, дорівнює 2^r .

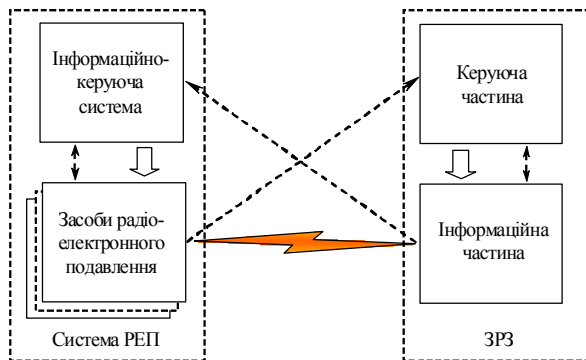


Рис. 1. Схема інформаційного конфлікту ЗРЗ і системи РЕП

Для зручності опису введемо додатково інформаційний вектор \vec{I} , перші k символів якого збігаються з інформаційними символами вектора \vec{X} , а інші є нулями.

У рівнянні спостереження представимо вектор \vec{Y} як результат групової операції над векторами стану ЗРЗ \vec{X} і джерела перешкод \vec{V} . Тоді розподіл ймовірностей вектора спостереження $\vec{Y}(i+1)$ визначається згортою розподілів векторів $\vec{X}(i+1)$ і $\vec{V}(i+1)$ [19].

На підставі вищесказаного система рівнянь, що описують процес передачі інформації в умовах радіоелектронного конфлікту, виглядає таким чином:

$$\begin{aligned} \vec{X}(i+1) &= A(i+1, i) \times \vec{I}(i) \oplus U(i+1, i) \times \vec{U}(i); \\ \vec{B}(i+1) &= B(i+1, i) \times \vec{E}(i) \oplus F(i+1, i) \times \vec{V}(i); \\ \vec{Y}(i+1) &= \vec{X}(i+1) \oplus \vec{B}(i+1), \end{aligned} \quad (1)$$

де \vec{X} – вхідний вектор (вектор стану ЗРЗ);

\vec{Y} – вихідний вектор (вектор спостереження системи);

\vec{B} – вектор стану джерела перешкод;

\vec{I} – інформаційний вектор, що відображає безпосередньо передане повідомлення;

\vec{E} – вектор помилок;

\vec{U} – вектор управління ЗРЗ;

\vec{V} – вектор управління джерела перешкод;

A – перехідна матриця стану джерела повідомлення;

U – перехідна матриця керуючого впливу ЗРЗ;

B – перехідна матриця генератора помилок джерела перешкод;

F – перехідна матриця керуючого впливу джерела перешкод;

i – певний момент часу;

$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{B}, \vec{I}, \vec{E}, \vec{U}, \vec{V} \in G_n, \oplus$ – порозрядне додавання за модулем 2.

Вектори $\vec{I}(i+1)$ і $\vec{U}(i+1)$ є результатом операцій:

$$\begin{aligned} \vec{I}(i+1) &= A(i+1, i) \times \vec{I}(i); \\ \vec{U}(i+1) &= U(i+1, i) \times \vec{U}(i). \end{aligned} \quad (2)$$

Щільності розподілу ймовірностей цих векторів на $i+1$ кроці визначаються як:

$$\begin{aligned} p[\vec{I}(i+1)] &= \Pi_A p[\vec{I}(i)]; \\ p[\vec{U}(i+1)] &= \Pi_U p[\vec{U}(i)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Щоб керуючі та інформаційні символи не впливали один на одного, при математичному записі повинен дотримуватися формат векторів. Досягається це за рахунок того, що елементи матриць Π_A, Π_B , які характеризують ймовірність переходу векторів у стан, що порушує їх формат, дорівнюють нулю.

Вектор стану джерела перешкод \vec{U} , за аналогією з вектором стану ЗРЗ, поданий у вигляді двох блоків: блоку символів помилки і блоку керуючих символів. Довжина їх q і l відповідно. Максимальна кількість режимів роботи, відображуваних цим вектором 2^l . Уведемо також вектор управління джерела перешкод \vec{V} .

Аналогічно векторам \vec{I} і \vec{U} , використовуваним при описі ЗРЗ, вектори \vec{E} і \vec{V} та їхнього розподілу ймовірностей визначаються формулами

$$\begin{aligned} \vec{E}(i+1) &= B(i+1, i) \times \vec{E}(i); \\ \vec{V}(i+1) &= F(i+1, i) \times \vec{V}(i); \\ p[\vec{E}(i+1)] &= \Pi_B p[\vec{E}(i)]; \\ p[\vec{V}(i)] &= \Pi_F p[\vec{V}(i)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Значення вище формат векторів \vec{E} і \vec{V} забезпечується видом матриць Π_B і Π_F . Як і в матрицях Π_A і Π_U їх елементи, що вказують на ймовірність появи заборонених комбінацій, повинні дорівнювати нулю.

Видно, що існує аналогія у визначенні форматів вектора стану джерела перешкод і вектора стану засобу радіозв'язку \vec{X} . Однак є й відмінності. Інформація про стан ЗРЗ може передаватися каналом зв'язку, щоб на прийомному боці була інформація про зміну режимів передавача. Керуючі символи в цьому випадку можуть бути спотворені. Отже, тривалість блоку символів помилки повинна дорівнювати $q = k + r$. Тоді тривалість вектора \vec{V} складає $k + r + 1$ символів.

Щоб всі розглянуті вектори були однакової довжини n і для них можна було задати групову операцію, формально додамо до векторів \vec{X} , \vec{U} і \vec{I} блок з l нульових символів. Формат векторів буде визначатися таким чином:

$$\begin{aligned} \vec{X}: & x_1 x_2 \dots x_k u_1 u_2 \dots u_r 0_1 0_2 \dots 0_l; \\ \vec{U}: & 0_1 0_2 \dots 0_k u_1 u_2 \dots u_r 0_1 0_2 \dots 0_l; \\ \vec{I}: & x_1 x_2 \dots x_k 0_1 0_2 \dots 0_{r+l}; \\ \vec{V}: & e_1 e_2 \dots e_{k+r} v_1 v_2 \dots v_l; \\ \vec{X}: & 0_1 0_2 \dots 0_{k+r} v_1 v_2 \dots v_l; \\ \vec{E}: & e_1 e_2 \dots e_{k+r} 0_1 0_2 \dots 0_l; \end{aligned} \quad n = k + r + l, x \in \{0,1\}, u \in \{0,1\}, v \in \{0,1\}. \quad (5)$$

Стан каналу зв'язку залежить від режиму роботи, як ЗРЗ, так і джерела перешкод. Отже, розподіл імовірностей вектора $\vec{E}(i+1)$ і вид матриці Π_B багато в чому визначаються обраним режимом роботи, тобто станом векторів $\vec{U}(i+1)$ і $\vec{V}(i+1)$.

Оскільки нас цікавлять імовірності переходів між різними станами векторів на $i+1$ -му і i -му кроці, у загальному випадку матриця Π_B залежить від реалізації векторів \vec{U} і \vec{V} як на $i+1$ -му, так і на i -му кроці. Так, матриця $\Pi_B(i, i+1)$, що використовується у виразі (4) при переході від i -го до $i+1$ -го циклу, є однією з матриць цього набору

$$\begin{aligned} \Pi_B(i, i+1) &= \Pi_B(\vec{U}(i+1), \vec{V}(i+1) / \vec{U}(i), \vec{V}(i)) \\ &= \Pi_B^{j(i+1), m(i+1) / j(i), m(i)}; \\ j(i) &= 0, 1, \dots, 2^{r-1}, \quad m(i) = 0, 1, \dots, 2^{l-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

де $j(i)$ – номер режиму роботи ЗРЗ на i -му кроці, якому відповідає певний вектор \vec{U}_g ,

$m(i)$ – номер режиму роботи джерела перешкод на i -му кроці, якому відповідає певний, вектор \vec{V}_g .

Будемо вважати, що матриці переходів U і F для i -го та $i+1$ -го моментів часу визначаються

$$\begin{aligned} &U(i+1, i) \\ &= \begin{cases} U(i+1, i+1-L), & \text{якщо } i+1 - i_{зрз} = L; \\ 1, & \text{якщо } i+1 - i_{зрз} < L; \end{cases} \\ &F(i+1, i) \\ &= \begin{cases} F(i+1, i+1-M), & \text{якщо } i+1 - i_{сз} = M; \\ 1, & \text{якщо } i+1 - i_{сз} < M; \end{cases} \end{aligned}$$

$$L = 1, 2, \dots; M = 1, 2, \dots \quad (7)$$

де $i_{зрз}$ та $i_{сз}$ – моменти часу, коли останній раз була здійснена зміна режимів ЗРЗ і станцією перешкод відповідно;

L і M – інтервали, через які здійснюється зміна режимів ЗРЗ і станцією перешкод.

У моменти часу, коли матриці переходів U і F дорівнюють 1, матриці перехідних ймовірностей що відповідають їм дорівнюють одиничній матриці.

Модель (1) справедлива при наступних допущеннях і обмеженнях.

1. Вектори \vec{X} , \vec{Y} , \vec{B} , \vec{I} , \vec{E} , \vec{U} , \vec{V} є векторами тривалістю n . Вони представляють букви кінцевого алфавіту й належать групі G_n .

2. У будь-який момент часу $i = 1, 2, \dots$ для будь-яких $g = (g_1, g_2, \dots, g_n) \in G_n$ можна визначити розподіли ймовірностей векторів \vec{I} , \vec{E} , \vec{U} , \vec{V} за допомогою формул (3), (4), (7).

3. ЗРЗ і станція перешкод мають скінченну кількість можливих режимів (стратегій) роботи S . ЗРЗ – $S_a = 2^r$, джерело перешкод – $S_b = 2^l$.

4. Дотримання формату векторів забезпечується видом матриць Π_A , Π_U , Π_B і Π_F . Заборонені реалізації векторів мають нульову ймовірність появи.

5. Задано набір матриць Π_B , які характеризують стан каналу зв'язку, для різних сполучень реалізацій векторів керування ЗРЗ і станції перешкод.

Структурна схема моделі зображена на рис. 2 (K1, K2 – електронні ключі 1 та 2).

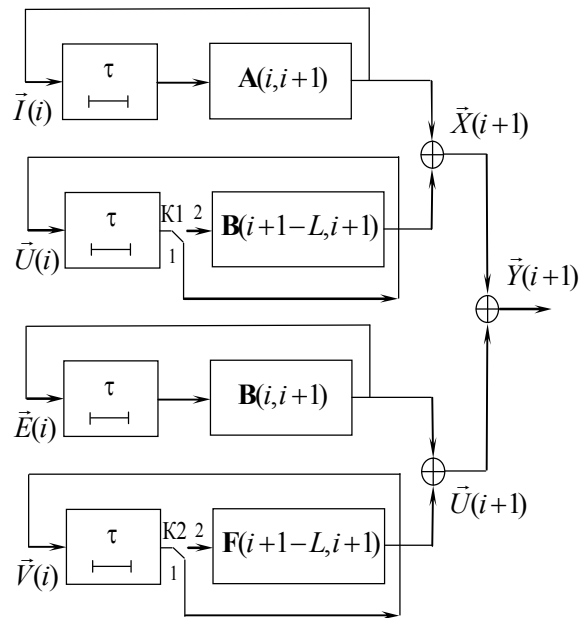


Рис. 2. Структурна схема моделі ЗРЗ

Відповідно до моделі (1) вектор спостереження містить блок інформаційних символів, спотворених символами помилок, і блоки керуючих символів, що відображають режими роботи ЗРЗ і станції перешкод. Однак оператори або апаратура системи радіозв'язку

далеко не завжди можуть визначити режим роботи (стан) джерела перешкод. Можна вважати, що в цьому випадку спостерігаються тільки перші $k + r$ символів вектора, отриманого в результаті групової операції над векторами стану \vec{X} і \vec{V} .

Висновки

Запропонована модель ЗРЗ, дозволяє синтезувати та досліджувати пристрої послідовної обробки цифрових сигналів з врахуванням нестационарності каналу зв'язку та наявності джерела організованих перешкод. Модель враховує можливість зміни робочих параметрів ЗРЗ безпосередньо в ході сеансу зв'язку з метою адаптації до умов роботи. Вона також дозволяє відобразити зміни стану джерела природних перешкод і режимів роботи постановником перешкод.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методів та методик управління режимами роботи засобів радіозв'язку на основі отриманих оцінок перешкодової обстановки в каналі зв'язку.

Список літератури

1. Баушев С.В. Разработка перспективных систем связи вооруженных сил США и Объединенных вооруженных сил НАТО / С. . Баушев, А.В. Передрий // Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. – № 7. – С. 3–20.
2. Кондратьев А. Перспективный комплекс РРТР и РЭВ сухопутных войск США „Профет” / А. Кондратьев // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 7. – С. 22–28.
3. Стрелецкий А. Американский перспективный наземный комплекс ведения радиоэлектронной войны „Вулфпак” / А. Стрелецкий // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 10. – С. 27–28.
4. Tactical Radio Communications [Electronic resource] // Mode of access: <http://www2.rohde-schwarz.com/en/products>. – Title from the screen.
5. Агафонов А.А. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / А.А. Агафонов; ред. В. Г. Радзиевского. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
6. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
7. Азов В.О. реализации в США концепции ведения военных действий в едином информационном простран-

стве / В.О. Азов // Зарубежное военное обозрение. – 2004. – № 6. – С. 10–17.

8. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.

9. Гремяченский С.С. Введение в теоретико-игровой анализ радиоэлектронного конфликта систем радиосвязи со средствами радиоподавления и некоторые оценки результатов конфликта / С.С. Гремяченский, В.И. Николаев. – Воронеж: Воронежский НИИ связи, 1995. – 48 с.

10. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами: Пер. с англ. / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт; ред. Б.Р. Левина. – М.: Радио и связь, 1982.

11. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление Пер. с англ. / Дж. Медич; ред. А. С. Шаталова. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

12. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: Підр. / В.К. Стеклов. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.

13. Uhm M. Adaptivity in Action for SDR and Cognitive Radio [Electronic resource] / M. Uhm // COTS Journal. – 2006. – Vol. 8. – Mode of access: <http://www.cotsjournal-online.com/home/20062.php>. – Title from the screen.

14. Курьянов А. И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учеб. пособие / А. И. Курьянов, А. В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.

15. Перунов Ю.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю.М. Перунов, К.И. Фомичев, Л.М. Юдин; ред. Ю.М. Перунова. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.

16. Богданович В.А. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов / В.А. Богданович, А.Г. Вострецов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.

17. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы / А.Л. Фрадков. – М.: Наука, 1990. – 296 с.

18. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. – М.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.

19. Голяницкий И.А. Математические модели и методы в радиосвязи / И.А. Голяницкий. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 440 с.

Надійшла до редколегії 26.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук доц. І.Ю. Субач, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРЕДСТВА РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОНФЛИКТА

А.В. Кувшинов, Е.Н. Прокопенко

В статье предложена математическая модель средства радиосвязи в виде разностных уравнений в пространстве состояний, которая позволяет учесть множество различных видов помех, нестационарность канала связи и управление режимами работы средства радиосвязи.

Ключевые слова: радиоэлектронный конфликт, средство радиосвязи, источник помех.

MATHEMATICAL MODEL OF RADIO COMMUNICATIONS IN THE CONDITIONS OF ELECTRONIC CONFLICT

A. V. Kuvshinov, E. M. Prokopenko

The article proposes a mathematical model of radio communications in the form of differential equations in the state space, which allows to take into account a variety of different types of interference and non-fixed communication channel, control modes of radio communications.

Keywords: radio electronic conflict, means of radio, the source of interference.