

*Константин Валерьевич Андреев  
Олег Игоревич Садыков  
Леонид Александрович Бондаренко  
Екатерина Александровна Ефанова*

*Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина*

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИСТЕМНЫХ СТРАТЕГИЙ В РАДИОЭЛЕКТРОННОМ КОНФЛИКТЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИГР

*В статье изложен методический подход к решению актуальной задачи обоснования состава и структуры радиоэлектронной защиты радиосредств, функционирующих в условиях внутрисистемных помех и воздействия радиоэлектронного подавления противника. Применение моделей основанных на вероятностно - временном подходе, теории Марковских цепей, являются предметом отдельного исследования при проектировании аппаратуры радиосвязи и обосновании оценки радиоэлектронной обстановки. Модель радиоэлектронного конфликта системы связи и радиоэлектронного подавления построена на математическом аппарате теории игр, сравнивая с вышеуказанными, является наиболее приемлемой по трудоёмкости вычислений и составлению программ для автоматизированных систем оценки радиоэлектронной обстановки.*

*Ключевые слова:* расширение спектра сигнала; моделирование конфликтов; теория игр.

### Вступление

Современные радиоэлектронные системы военного назначения функционируют, как правило, в условиях сложной радиоэлектронной обстановки, обусловленной влиянием как внутрисистемных и внешних помех, так и систем и средств радиоэлектронного подавления противника. Фактически в статье речь идет о столкновении двух противоборствующих сторон, потенциально находящихся в условиях динамического равновесия, поэтому для них применима методология системного анализа на основе теории координации в иерархических многоуровневых системах.

**Постановка проблемы.** В целях конкретизации формальной постановки задачи ограничимся, в дальнейшем, цифровыми системами радиосвязи с расширением спектра сигналов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ литературы, использованной для написания статьи показывает, что зачастую в ней излагаются описания энергетической и частотной эффективностей применяемых сигнальных конструкций, как метод повышения помехозащищенности систем радиосвязи, чего недостаточно для систематизированного применения знаний при конструировании современного оборудования и анализа электромагнитной обстановки в условиях радиоэлектронного конфликта системы связи – системы радиоэлектронного подавления.

**Цель статьи.** Предложить метод наиболее приемлемый по трудоёмкости вычислений при составлении программ для автоматизированных систем оценки радиоэлектронной обстановки.

### Методы исследования

В самом общем случае расширение спектра сигнала (РСС) есть метод передачи, при использовании которого радиосигнал занимает полосу частот значительно более широкую по сравнению с минимально необходимой для передачи информации.

Основными методами РСС, широко применяемыми в современных системах радиосвязи, являются [1,2]:

1. Метод непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью – широкополосный сигнал (ШПС) (метод DSSS).
2. Метод псевдослучайной перестройки рабочей частоты – ППРЧ (метод FHSS), разновидностью его является метод адаптивной ППРЧ – АППРЧ.
3. Метод псевдослучайной времяимпульсной модуляции – ПВИМ.
4. Комплексный метод – совместное применение различных методов РСС и др.

### Изложение основного материала исследования

Результаты дуэльного радиоэлектронного конфликта (РЭК) системы связи (СС) и станций помех (СП) противника могут быть смоделированы как детерминированным подходом, учитывающим энергетические показатели и статистическую динамику функционирования СС и СП [1, 2], так и на основе человеко-машинного подхода с использованием теоретико – игровых методов анализа радиоэлектронного конфликта СС–СП [3], поскольку технический конфликт СС – СП в конечном счете является реализацией конфликта людей, спроектировавших и разработавших эти

системы с целью повышения или сохранения их эффективности в условиях обдуманного противодействия за счет рационального выбора своих действий.

Сторонам конфликта приходится анализировать свои действия за обе стороны, оптимизировать возможные тактико – технические характеристики систем и способы их применения, зачастую в условиях ситуационной неопределенности.

Математической базой моделирования конфликтов и оптимизации конфликтующих систем может являться теория игр, которая позволяет формализовать аспекты поведения в конфликтной ситуации [4].

В целом теория игр обеспечивает мощный конструктивный подход к оценке результатов конфликта, но надо иметь в виду, что она дает решения оптимальные в среднем, а конкретную конфликтную ситуацию, в том числе конкретных пар СС – СП, лучше оценивать детерминированными методами.

В качестве единого показателя эффективности конфликтующих сторон примем среднюю вероятность ошибки на бит информации (СВО на1 бит –  $P_E$ ) как основную меру помехоустойчивости систем радиосвязи, а остальные характеристики будут использованы в качестве ограничений. С помощью выбора оптимальных стратегий показатель эффективности максимизируется со стороны СП и минимизируется со стороны СС, т.е. решаемая задача со стороны СП является максиминной, а со стороны СС – минимаксной.

Используя основной принцип теории игр – принцип минимакса [4], диктующий конфликтующим системам выбор соответствующих параметров и характера действий (так называемых стратегий, решений), математическую модель РЭК “система радиосвязи – система радиоэлектронного подавления (РЭП)” можно представить в виде со стороны системы радиоэлектронного подавления:

$$\begin{aligned} \min_{a_{СП}} P_E(a_{СП}^*, a_{СРС}^*) &= P_E[a_{СП}^*, a_{СРС}^*(a_{СП}^*)] = \\ &= \max_{a_{СП}} \min_{a_{СРС}} P_E(a_{СП}, a_{СРС}), \end{aligned} \quad (1)$$

со стороны СРС

$$\begin{aligned} \max_{a_{СП}} P_E(a_{СП}, a_{СРС}^*) &= P_E[a_{СП}^*(a_{СРС}^*), a_{СРС}^*] = \\ &= \min_{a_{СРС}} \max_{a_{СП}} P_E(a_{СП}, a_{СРС}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a_{СП}, a_{СРС}$  - стратегии СРС и системы РЭП;

$a_{СП}^*(a_{СРС}^*), a_{СРС}^*(a_{СП}^*)$  – наилучшие стратегии системы РЭП и СРС при условии, что стратегии противной стороны известны;

$a_{СП}^*$  - стратегия системы РЭП, максимизирующая СВО на бит  $P_E$ ;

$a_{СРС}^*$  – стратегия СРС, минимизирующая СВО на бит  $P_E$ .

Сформированный максиминный критерий (1) определяет нижнюю цену игры  $P_E[a_{СП}^*, a_{СРС}^*(a_{СП}^*)]$ , т.е. гарантированный для

системы РЭП верхний уровень эффективности, а минимакс (2) – верхнюю цену игры

$P_E[a_{СП}^*(a_{СРС}^*), a_{СРС}^*]$ , т.е. гарантированный для СС нижний уровень своей эффективности.

Приведенные минимаксные стратегии из предположения, что одна сторона обладает всей необходимой информацией, а противная сторона детальной информации не имеет. Более естественно предположить, что и противная сторона будет иметь требуемую информацию. При таких условиях каждая из сторон будет использовать недостатки противной стороны.

В ситуации, когда нижняя и верхняя цены игры не равны [4], чистые минимаксные стратегии, вытекающие из (1) и (2), являются неустойчивыми, так как каждая из сторон стремится использовать недостатки другой по мере того, как они становятся известными.

Напротив, если обе цены игры равны между собой, т.е. соответствующая пара стратегий определяет как максимин, так и минимакс, то эти стратегии приобретают устойчивость. В отличие от предыдущего случая стремление каждой из противной стороны достичь большего результата, который определяется чистой ценой игры, становится невозможным: таких стратегий не существует, если противная сторона остается на своей минимаксной стратегии. Игра, приводящая к такой ситуации, называется игрой с седловой точкой, при которой выполняется условие:

$$P_E(a_{СП}, a_{СРС}^*) \leq P_E(a_{СП}^*, a_{СРС}^*) \leq P_E(a_{СП}^*, a_{СРС}) \quad (3)$$

Стратегии  $a_{СП}^*, a_{СРС}^*$  в (3), являющиеся координатами седловой точки в матрице игры, называются оптимальными, а их совокупность представляет решение игры.

Сравнение полученной таким образом вероятности ошибки с заданной даст ответ на вопрос соответствия проектируемой системы своему назначению. Другой важный вывод состоит в том, что рассчитанная на наихудший случай ( $a_{СП}^*$ ) стратегия СС( $a_{СС}^*$ ) даст только лучший результат, если СП отступит от оптимальной стратегии.

В настоящее время задача оптимизации систем далека от своего полного разрешения из-за наличия множества видов и параметров сигнально кодовых конструкций сигналов и видов и параметров помех.

Известные успехи здесь достигнуты лишь на пути конфликтной оптимизации дискретного множества СП и СС, которое можно принять на уровне сегодняшних знаний за достаточно полное.

Процесс конфликтного проектирования помехозащищенной СС целесообразно разбить на два этапа. На первом этапе определяются существенно различные варианты

конфликтующих СС и СП (системные стратегии), и в дуэльной ситуации методами теории игр оптимизируются значения параметров каждой пары. На втором этапе сравниваются системные стратегии, определенные на первом этапе, и находится тот из них, который приводит к наилучшему результату в конфликте.

Если в каком-то варианте на втором этапе анализа системных стратегий отсутствует доминирующая пара стратегий, то возможно использование смешанных стратегий, что означает одновременное применение с какой-либо стороны нескольких стратегий в определенной пропорции.

Последнее заключение представляет собой один из важнейших результатов применения теории игр к анализу конфликтной ситуации СС и СП. Ценность его в том, что он напрямую ведет к практически важному выводу: какие варианты СС разрабатывать и в каком соотношении применять их в дуэльной ситуации СС – СП для достижения гарантированного эффекта со стороны СС.

Примеры анализа работы СС с позиции теории игр должны рассматриваться применительно к конкретным видам помех:

- широкополосные, заградительные помехи;
- помехи в части полосы;
- следающие (ответные), прицельные по частоте помехи;
- импульсные помехи;
- ретранслированные помехи.

При предложенном методе исследования предельно упрощена задача определения оптимальных системных стратегий, которая сводится лишь к одному показателю эффективности – СВО на бит. Задача станет значительно сложнее, если учитывать другие системные характеристики радиосредств: массу, габариты, пропускную способность, стоимость и др.

Эти аспекты имеют самостоятельное значение и в работе не рассматриваются, хотя теория игр применима и здесь.

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

1. Приведенная математическая модель РЭК наиболее полно может быть реализована на этапах проектирования и разработки СС, в частности при синтезе помехоустойчивых алгоритмов приема и обработки сигналов.

Вместе с тем, отдельные элементы теории РЭК могут быть использованы и при анализе качества функционирования СС в условиях РЭП, например, при оценке минимальной, помехоустойчивости СС в условиях наихудших помех.

2. При разработке и проектировании СС возможно использование моделей, основанных на вероятностно-временном подходе, при котором процессы поиска, обнаружения, измерения параметров и направления прихода сигналов СРС являются вероятностными событиями как энергетического, так и временного характера.

### **Література**

1. **Борисов В. И.**, Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. В. И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с. 2. **Макаренко С. И.**, Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. –166 с.

3. **Гремяченский С. С.**, Николаев В. И. Введение в теоретико – игровой анализ радиоэлектронного конфликта систем радиосвязи со средствами радиоподавления и некоторые оценки результатов конфликта. – Воронеж: Воронежский НИИ связи, 1995. – 48 с. 4. **Вентцель Е. С.** Исследование операций/ Е.С. Вентцель. – М. : Сов. радио, 1972. – 552 с.

## **МЕТОДИ АНАЛІЗУ СИСТЕМНИХ СТРАТЕГІЙ У РАДІОЕЛЕКТРОННОМУ КОНФЛІКТІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ІГОР**

*Костянтин Валерійович Андрєєв*

*Олег Ігорович Садиков*

*Леонід Олександрович Бондаренко*

*Катерина Олександрівна Єфанова*

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна*

*В статті викладено методичний підхід до вирішення актуальної задачі обґрунтування складу і структури радіоелектронного захисту радіозасобів, що функціонують в умовах внутрішньо-системних перехід і дії радіоелектронного подавлення противника. Застосування моделей, що засновані на імовірно-часовому підході, теорії Марківських ланцюгів, являються предметом окремого дослідження при проектуванні апаратури радіозв'язку та обґрунтуванні оцінки радіоелектронної обстановки. Модель радіоелектронного конфлікту системи зв'язку і радіоелектронного подавлення побудована на математичному апараті теорії ігор, яка порівнюється з вище зазначеною – являється найбільш прийнятною за працевмісністю розрахунку та створення програм для автоматизованих систем оцінки радіоелектронної обстановки.*

**Ключові слова:** розширення спектру сигналу; моделювання конфліктів; теорія ігор

THE SYSTEM STRATEGIES ANALYSIS METHODS IN A RADIO ELECTRONIC CONFLICT  
BASED ON THE GAME THEORY

*Kostiantyn V. Andrieiev*

*Oleh I. Sadykov*

*Leonid O. Bondarenko*

*Kateryna O. Yefanova*

*Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine*

*The article describes a methodical approach to the solution of actual problem of substantiation of composition and structure of electronic protection radio equipment, operating in conditions of intra-system interference and the effects of electronic countermeasures of the enemy. The application of models based on probabilistic - temporal approach, the theory of Markov chains that are the subject of a separate study in the design of radio communications equipment and the basis for evaluation of radio electronic situation. The conflict model of electronic communications systems and jamming devices built on the mathematical apparatus of game theory, comparing with the above, that most appropriate to the complexity of calculations and programming for automated systems evaluation electronic environment.*

**Keywords:** *expansion of spectrum of signal; design of conflicts; game theory.*

**References**

- 1. Borisov V.I.,** Zinchuk V.M., Limarev A.E. (2008), Immunity of radio systems to spread spectrum signals by tuning the operating frequency of the pseudorandom. [*Pomehozashhennost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchajnoj perestrojki rabochej chastoty*], pod red. V. I. Borisova; izd. 2-e, pererab. i dop, Moscow, RadioSoft, 512 p.
- 2. Makarenko S.I.,** Ivanov M.S., Popov S.A. (2013), Immunity communication systems with pseudo-restructuring operating frequency. Monograph. [*Pomehozashhennost' sistem svjazi s psevdosluchajnoj perestrojkoj rabochej*
- 3. Gremjachenskij S.S.,** Nikolaev V.I. (1995), Introduction to game - theoretic analysis of the electronic systems of the conflict with the means of jamming radio and some evaluation of the conflict. [*Vvedenie v teoretiko – igrovoj analiz radiojelektronного konflikta sistem radiosvjazi so sredstvami radiopodavlenija i nekotorye ocenki rezul'tatov konflikta*], Voronezh: Voronezhskij NII svjazi, 48 p.
- 4. Ventcel' E.S.** (1972), Operations research. [*Issledovanie operacij*], Moscow, Sov. radio, 552 p.

Отримано: 06.11.2015 р.