

УДК 621.391.372

**ОБ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМАХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО  
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ РАБОЧИХ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЙ В УСЛОВИЯХ  
СЛУЧАЙНЫХ И ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ**

**А. М. Чуднов**

**Военная академия связи им. С.М. Буденного**

Статья получена 30 марта 2015 г.

**Аннотация.** Рассмотрены принципы построения и оценки эффективности адаптивного алгоритма радиолинии с псевдослучайным переключением рабочих частот (ППРЧ), функционирующей в условиях случайных и преднамеренных помех. В теоретико-игровой постановке сформулированы оптимизационные задачи и приведен пример итеративной процедуры, обеспечивающей сходимость стратегий радиолинии и источника помехи к оптимальным. Приведены результаты расчетов, позволяющие оценить эффективность адаптивного алгоритма и скорость сходимости итеративных процедур.

**Ключевые слова:** псевдослучайное переключение частот, расширение спектра, адаптивная радиолиния, преднамеренные помехи.

**Abstract:** The article presents principles of construction and evaluation of an adaptive algorithm of pseudo-random frequency hopping spread spectrum (FHSS) radiolinks, functioning under a random and intentional interference. In the game-theoretic terms the problem of optimization is formulated and an example of an iterative procedure is given which ensures the convergence of strategies of the radiolink and the source of interference to the optimum. The results of calculations, allowing to evaluate the effectiveness of the adaptive algorithm and the convergence rate of iterative procedures, are given.

**Key words:** frequency hopping, spread spectrum, adaptive algorithm of radiolink, jamming.

## 1. Введение

Одним из способов защиты радиолиний (РЛ) от преднамеренных помех является псевдослучайное переключение рабочих частот (ППРЧ) [1-6]. Наиболее корректный анализ и синтез алгоритмов ППРЧ в условиях преднамеренных помех осуществляется методами теории игр [7, 8], при этом в качестве противодействующих сторон принимаются система передачи информации (СПИ) и источник помехи (ИП). По сути дела алгоритм ППРЧ и стратегия постановки помех радиолинии представляют собой смешанные стратегии сторон, эффективные для применения в соответствующих условиях конфликта.

Исследования систем передачи информации методами теории игр проводились в работах [1-5, 9-14]. Хорошо изучены принципы построения теоретико-игровых алгоритмов переключения рабочих частот СПИ и стратегий постановки помех ИП в случае, когда условия прохождения сигналов от передатчика к приемнику на различных частотах одинаковы. При этом доказано (см. [1, 3]), что в достаточно общем случае оптимальный (равновесный в игровой задаче) алгоритм ППРЧ на каждом временном интервале выбирает для передачи информации рабочую частоту равновероятно из имеющейся совокупности частот, а оптимальная (равновесная) стратегия ИП распределяет равномерно среднюю мощность помех на совокупности рабочих частот радиолинии, причем «тонкая» структура помехи на каждой частоте оптимизируется с учетом характеристик РЛ и свойств среды распространения сигналов и помех. В частности, оптимальное подавление РЛ может быть реализовано путем равновероятного выбора с определенной периодичностью совокупности  $S$  (оптимальное число) подавляемых частот и воздействия на них с одинаковой мощностью. В [4] разработана методика нахождения равновесных стратегий РЛ и ИП в том числе для неравномерного распределения воздействующих в различных каналах (на различных частотах) случайных помех. В обобщенной таким образом задаче результаты [4] позволяют получать

решения, допускающие простую реализацию вычислительными средствами, а в ряде случаев – в аналитическом виде.

С другой стороны, при отсутствии преднамеренных помех так называемым адаптивным алгоритмом управления радиолинией [17, 18] предусматривается определение наилучшей с позиции передачи информации частоты и использование ее в качестве рабочей на анализируемом временном интервале. При изменении помеховой ситуации приемная сторона радиолинии посылает передатчику сигнал о необходимости перехода на другую (оптимальную) рабочую частоту.

Настоящая работа по постановке задачи близка к работам [3, 4] и направлена на отыскание оптимальных в игровом смысле (равновесных) алгоритма переключения частот радиолинии и алгоритма управления частотно-энергетическим ресурсом источника помехи. Однако в отличие от [1-3] здесь изучается адаптивный алгоритм ППРЧ, обеспечивающий сходимость параметров, определяющих режимы излучения сигналов РЛ и ИП, к равновесным при любом стационарном (квазистационарном) состоянии среды распространения сигналов и помех. В отличие от [4] здесь не предполагается для определения параметров режима ППРЧ предварительное решение теоретико-игровой задачи, требующей задания в качестве исходных данных характеристик среды прохождения сигналов и помех от их источников до приемника РЛ, а используются итерационные процедуры [8], позволяющие осуществлять настройку алгоритмов РЛ и ИП в процессе их взаимодействия, которые сходятся к равновесным в теоретико-игровом смысле стратегиям РЛ и ИП. При отсутствии преднамеренных помех рассматриваемый адаптивный алгоритм ППРЧ сходится к адаптивному алгоритму выбора наилучшей частоты [17, 18].

Далее в работе описывается модель взаимодействия РЛ с ИП, приведена формулировка теоретико-игровой задачи синтеза оптимальных (равновесных) стратегий РЛ и ИП и показано их существование. Предложены конструкции адаптивных алгоритмов РЛ и ИП, построенных на основе реализации

рекуррентных процедур оптимизации [8], путем моделирования получены оценки эффективности и сходимости адаптивных алгоритмов к оптимальным.

## 2. Модель взаимодействия РЛ и ИП. Постановка и редукция теоретико-игровой задачи

Рассматривается радиолиния, в которой передача информации в каждый момент времени может осуществляться на одной из  $n$  выделенных частот. При этом передатчик и приемник радиолинии синхронно по неизвестному для источника преднамеренной помехи закону перестраиваются для работы на определенной частоте.

Рассматриваемые ниже модели ориентированы на так называемые одношаговые задачи оптимизации, в которых полагается, что инерционность контура подавления радиолинии источником помехи («прием сигналов РЛ – анализ ситуации – постановка помехи») достаточно велика, чтобы обеспечивалась невозможность подавления источником помехи текущей частоты передачи информации в РЛ (т. е. постановки помехи «вслед сигналу») [14].

Сначала приведем формализацию описания алгоритмов РЛ и ИП для стационарных условий их взаимодействия. Для этого используются следующие конструкции:  $\mathbb{R}^n$  –  $n$ -мерное евклидово пространство,  $\mathcal{M}(\mathbb{R}^n)$  – множество функций распределения вероятностей в  $\mathbb{R}^n$ . Смешанная стратегия радиолинии задается распределением вероятностей  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u_1 + \dots + u_n = 1$ , на множестве номеров частот, а смешанная стратегия источника помехи (режим функционирования ИП) – функцией распределения вероятностей  $V_\delta(\delta)$  на множестве допустимых распределений мощности помехи  $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_n)$ , определенном ограничениями на среднюю мощность ИП в виде:

$$\sum_{i=1}^n \int_{\mathbb{R}^n} \delta_i dV_\delta(\delta) \leq n\delta_{\text{cp}}. \quad (1)$$

При этом множества допустимых стратегий РЛ и ИП  $\mathcal{U}, \mathcal{V}$  описываются соответственно условиями:

$$\mathcal{U} = \{\mathbf{u} \in \mathbb{R}^n \mid u_1 + \dots + u_n = 1\}, \quad (2)$$

$$\mathcal{V} = \{V \in \mathcal{M}(\mathbb{R}^n) \mid \text{выполняется (1)}\}. \quad (3)$$

При постановке задачи полагаются заданными:  $\delta_{\text{cp}}$  – отношение средней (приходящейся на одну рабочую частоту) мощности помехи к мощности сигнала, приведенное ко входу приемника радиолинии,  $q_i(\boldsymbol{\delta}), i = 1, \dots, n$ , – функция, характеризующая качество связи в РЛ при чистых стратегиях РЛ и ИП:  $i$  (номер текущей рабочей частоты РЛ) и  $\boldsymbol{\delta}$  (распределение мощности помехи по частотам) соответственно, и обобщенный показатель эффективности (ОПЭ) функционирования РЛ, определяемый соотношением

$$Q(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \sum_{i=1}^n u_i \int_{\mathbb{R}^n} q_i(\boldsymbol{\delta}) dV_{\boldsymbol{\delta}}(\boldsymbol{\delta}) \leq n\delta_{\text{cp}}. \quad (4)$$

Задача синтеза алгоритма функционирования РЛ в условиях оптимизированного подавления ИП состоит в определении допустимой стратегии  $\mathbf{u}$ , максимизирующей ОПЭ (4) для наихудшей допустимой стратегии  $\mathbf{v}$ , и записывается в виде:

$$\inf_{\mathbf{v} \in \mathcal{V}} Q(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rightarrow \max_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}}. \quad (5)$$

Аналогично двойственной задаче (5) задачу синтеза алгоритма функционирования ИП для РЛ с адаптивным ППРЧ можно представить соотношением

$$\sup_{\mathbf{v} \in \mathcal{V}} Q(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}}. \quad (6)$$

Пара двойственных минимаксной и максиминной задач (5), (6) составляют игру  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}, Q(\cdot))$ , в которой множества допустимых стратегий игроков  $\mathcal{U}, \mathcal{V}$  (РЛ и ИП) определяются соотношениями (2), (3).

Важно отметить, что в силу компактности множества  $\mathcal{U}$ , слабой компактности множества  $\mathcal{V}$ , ограниченности и непрерывности функций  $q_i(\boldsymbol{\delta})$  в игре  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}, Q(\cdot))$  существует равновесная ситуация  $(\mathbf{u}^*, \mathbf{v}^*)$ . При этом:

1) в (5), (6) достигаются все минимумы и максимумы;

- 2) стратегии  $\mathbf{u}^*, \mathbf{v}^*$  являются оптимальными как в прямой, так и двойственной оптимизационных задачах (5), (6);
- 3) изменение стратегии любой из сторон относительно оптимальной не может привести к повышению эффективности функционирования соответствующей системы в рассматриваемой задаче.

Преобразуем игру  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}, Q(\cdot))$  к редуцированному виду для практического случая, при котором величина  $q_i(\boldsymbol{\delta})$  зависит лишь от условий прохождения сигналов на текущей частоте их передачи, т. е.  $q_i(\boldsymbol{\delta}) = q(i, \delta_i)$ . В качестве дополнительной к такой функции  $q(i, \delta_i)$  в соответствии с физическим смыслом задачи обычно используется зависимость  $\varphi(i, \delta_i)$  вероятности ошибочного приема сигналов при различных способах формирования и приема сигналов с учетом свойств среды распространения сигналов на различных частотах. Для этого случая преобразуем выражения (1), (4) соответственно к виду

$$\int_0^\infty \delta_i dv_i(\delta_i) = w_i \wedge \sum_{i=1}^n w_i \leq n\delta_{\text{ср}}, \quad (7)$$

$$p(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \sum_{i=1}^n u_i \int_0^\infty \varphi(i, \delta_i) dv_i(\delta_i) \leq n, \quad (8)$$

где:  $v_i(\delta_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n V_\delta(\delta)$  – одномерная функция распределения вероятностей случайной величины  $\delta_i$ , определяющая смешанную стратегию ИП по постановке помехи на  $i$ -й частоте,  $p(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  – средняя вероятность ошибочного приема сигналов в РЛ в ситуации  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ ,  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)$ . Как видно, с учетом (7), (8) игра  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}, Q(\cdot))$  уже редуцирована в игру  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}', p(\cdot))$  (с функцией проигрыша первого игрока  $p(\cdot)$ ) путем перехода от исходного множества допустимых стратегий ИП  $\mathcal{V}$  (3) к множеству  $\mathcal{V}'$  допустимых кортежей  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)$ , определенному условием (7).

Дальнейшую редукцию, существенно упрощающую решение сформулированных игровых задач, можно осуществить методами [14, 19], разработанными на основе использования теоремы Каратеодори [20] и предполагающими построение выпуклых оболочек оптимизируемых функционалов.

Применительно к рассматриваемой задаче необходимо определить выпуклые сверху оболочки функций  $\varphi(i, z)$  по аргументу  $z$  в соответствии с выражением:

$$\varphi^{\wedge}(i, z) = \max_{x, y, p: (1-p)x + py \leq z} (1 - p)\varphi(i, x) + p\varphi(i, y). \quad (9)$$

Как видно, в данном случае построение выпуклой оболочки функции сводится к задаче двухпараметрической оптимизации. При этом практически для всех используемых в приложениях функций  $\varphi(i, z)$  оптимальная точка в (9) достигается при  $x = 0$ , что сводит эту задачу к однопараметрической оптимизации. При выпуклости сверху функции  $\varphi(i, z)$ , очевидно,  $\varphi^{\wedge}(i, z) = \varphi(i, z)$ .

Использование функции  $\varphi^{\wedge}(i, z)$  позволяет декомпозировать игру  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}, p(\cdot))$  на внутреннюю оптимизационную задачу (9) и внешнюю игру  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{W}, p^{\wedge}(\cdot))$ , где  $\mathcal{W}$  – множество допустимых стратегий ИП, определяемое соотношением  $\mathcal{W} = \{\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n \mid w_1 + \dots + w_n \leq n\delta_{\text{cp}}\}$ , а  $p^{\wedge}(\cdot)$  – функционал средней вероятности ошибки, представленный в виде:

$$p^{\wedge}(\mathbf{u}, \mathbf{w}) = \sum_{i=1}^n u_i \varphi^{\wedge}(i, w_i). \quad (10)$$

Ситуация  $(\mathbf{u}, \mathbf{w})$  игры  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{W}, p^{\wedge}(\cdot))$  имеет следующий физический смысл: РЛ, как и в игре  $\mathcal{G}(\mathcal{U}, \mathcal{V}, p(\cdot))$  использует для ППРЧ распределение вероятностей  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ , ИП распределяет средние мощности помех в соответствии с вектором  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_n)$ , а «тонкие» параметры стратегии ИП (вероятность выхода на определенную частоту в каждый момент времени и воздействующая при этом мощность) определяются на основе решения оптимизационной задачи (7). Следует отметить, что, как правило, совокупность всех выделенных частот может быть разбита на относительно небольшое число групп эквивалентных по качеству прохождения сигналов частот. При этом все соотношения и постановка задачи остаются справедливыми, если участвующими в них величинами характеризовать не отдельные частоты, а группы в целом. В таком случае реализация источником помехи нужных

значений параметров  $W_i$  может осуществляться путем постановки (с поэлементным перемешиванием) помех определенной мощности на подходящей совокупности частот.

### 3. Итерационная процедура оптимизации и моделирование адаптивного алгоритма ППРЧ

В отличие от линий с простой программной ППРЧ, далее рассматривается адаптивная радиолиния [4], алгоритм выбора рабочей частоты которой может основываться на информации о состоянии совокупности выделенных частот с позиции возможности их использования для эффективной передачи информации. По сути дела при построении адаптивного алгоритма РЛ полагается, что в процессе взаимодействия РЛ с ИП условия, определяющие исходные данные игровой задачи, могут меняться, что обуславливает целесообразность соответствующего изменения стратегий  $\mathbf{u}, \mathbf{v}$  РЛ и ИП.

При адаптивном алгоритме ППРЧ после вхождения в синхронизм и начала процесса передачи сообщений по заранее определенной процедуре ППРЧ (т. е. в заранее определенном режиме) работа радиолинии осуществляется следующим образом:

- на приемной стороне радиолинии в течение определенного времени проводится анализ состояния совокупности выделенных частот;
- по результатам анализа осуществляется расчет оптимальной (равновесной в теоретико-игровом смысле) совокупности параметров, определяющих целесообразный режим ППРЧ в данном состоянии среды распространения сигналов;
- данные о целесообразном режиме по обратному каналу передаются на передающую сторону радиолинии;
- в определенный момент времени передатчик и приемник РЛ переходят в новый режим ППРЧ.

В свою очередь источником помех на каждом шаге (очередном временном отрезке определенной длины) выбирается некоторое распределение имею-



щегося ресурса мощности по совокупности частот, на которых может функционировать РЛ, и оптимизированное подавление сигналов РЛ на этих частотах.

В работах по теории игр (см., например, [7, 8]) рассматриваются рекуррентные процедуры отыскания равновесных ситуаций, основанные на последовательной, поочередной оптимизации смешанных стратегий игроков. Далее показывается, что такие процедуры могут быть использованы для настройки (перестройки) стратегий РЛ и ИП непосредственно в процессе их взаимодействия. Рассматриваемый ниже адаптивный алгоритм РЛ в отличие от варианта адаптивно-игрового алгоритма, предложенного в [4], не предполагает решение на каждом шаге подстройки игровой задачи для вычисления локально оптимальных стратегий  $\mathbf{u}^*, \mathbf{v}^*$ , а основывается лишь на информации о последовательности наилучших для передачи сигналов номеров частот, которая может быть получена либо априорно от специального объекта, контролирующего состояние выделенных частот, либо апостериорно на основе статистики ошибок при прохождении информации на различных частотах. Аналогичный адаптивный алгоритм ИП может использовать лишь информацию о последовательности номеров частот, на которых РЛ осуществляла передачу сигналов.

Для моделирования такого алгоритма предварительно должны быть заданы величины:  $n$  – число частот,  $m$  – число групп эквивалентных частот,  $\beta_i$  – распределение случайных помех на выделенных частотах,  $\delta_{\text{ср}}$  – средняя мощность ИП,  $(\mathbf{u}(0), \mathbf{w}(0))$  – исходная ситуация,  $d_u$  – шаг перестройки вероятностей  $u_i$ ,  $d_w$  – шаг перестройки средних мощностей  $w_i$  и критерий останова процедуры, в качестве которого может быть принято, например, число выполненных итераций, условие по выигрышу в эффективности при переходе в новый режим и другие.

Последовательность операций на каждом  $j$ -м,  $j = 1, 2, \dots$ , шаге процедуры следующая:

1. Вычисление вероятности ошибочного приема символов  $p^{\wedge}(\mathbf{u}, \mathbf{w})$  на каждой из  $n$  выделенных частот.

2. Определение номера оптимальной рабочей частоты (группы частот) для использования РЛ на следующем шаге:  $i(j) = \operatorname{argmin}_i \varphi^{\wedge}(i, w_i)$ .
3. Модификация стратегии РЛ:  $u_{i(j)}(j) = u_{i(j)}(j - 1) + d_u$ , нормирование распределения вероятностей  $\mathbf{u}$  с обеспечением условия  $\mathbf{u} \in \mathcal{U}$ .
4. Модификация стратегии ИП:  $w_{i(j)}(j) = w_{i(j)}(j - 1) + d_w$ , нормирование распределения мощностей  $\mathbf{w}$  относительно  $n\delta_{\text{ср}}$ .
5. Проверка критерия останова, если не выполняется, то переход к п. 1.

В приведенных ниже примерах расчетов полагалось, что случайные шумы в выделенном диапазоне имеют две составляющие: постоянную с относительной средней мощностью  $\beta_0$  и переменную с относительной средней мощностью  $\beta_{\text{ср}}$ , распределенную по экспоненциальному закону  $\beta_{1i} = \beta_{\text{ср}} k_0 \exp(k_1 i)$ , где  $k_0 = 1 / \sum_{i=1}^n \exp(k_1 i)$  - нормирующий коэффициент,  $k_1$  - показатель, характеризующий неравномерность распределения случайных помех в диапазоне частот, так что  $\beta_i = \beta_0 + \beta_{1i}$ . В качестве функций  $\varphi(i, w_i)$  использовались зависимости вида:

$$\varphi(i, \delta_i) = 1 - \mathcal{F}(h_i), \quad (11)$$

где  $\mathcal{F}(\cdot)$  – интеграл вероятностей Гаусса,  $h_i = (\beta_i + \delta_i)^{-1/2}$ ,  $\beta_i$  – отношение мощности случайных помех (шумов) к мощности сигнала в точке приема. Основанием для использования здесь функций вида (11) является то, что к таким функциям сходятся зависимости гарантированной вероятности ошибочного приема как амплитудно-фазоманипулированных псевдослучайных сигналов (корреляционный прием) [13, 15], так и фазоманипулированных сигналов (корреляционный прием с дополнительным ограничением на оптимальном уровне) [16] в условиях оптимизированных помех с ограниченной средней мощностью.

В примерах были использованы следующие исходные данные:  $m = 10$ ,  $\beta_0 = \beta_{\text{ср}} = 0,05$ ,  $k_1 = 0,6$ ,  $d_u = d_w = 0,1$ , причем в каждом режиме РЛ и ИП осуществлялся один цикл оптимизации. Расчеты осуществлялись для двух

случаев: а) переход РЛ от работы на одной оптимальной частоте ( $u_i = 1$ ) при появлении преднамеренной помехи к оптимальному распределению и б) переход РЛ от оптимального распределения к работе на одной частоте при выключении ИП. В каждом режиме РЛ и ИП осуществлялся один цикл оптимизации.

Полученные в результате расчетов значения величин,  $p^{\wedge}(\mathbf{u}, \mathbf{w})$  на различных шагах процесса приведены в таблице 1.

Таблица 1.

$n, \delta_{cp}$	Про- цесс	Номер шага							
		0	4	8	12	16	20	24	$\infty$
$\delta_{cp} = 0,01$ $n = 10$	a	1,9E-02	1,1E-02	7,6E-03	5,9E-03	4,9E-03	4,2E-03	3,7E-03	2,9E-03
	b	7,8E-04	5,8E-04	3,9E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04
$\delta_{cp} = 0,01$ $n = 100$	a	1,7E-01	9,2E-02	5,1E-02	3,0E-02	2,0E-02	1,5E-02	1,3E-02	1,1E-02
	b	4,2E-04	3,9E-04	3,6E-04	3,5E-04	3,4E-04	3,3E-04	3,3E-04	3,2E-04
$\delta_{cp} = 0,05$ $n = 10$	a	9,6E-02	5,2E-02	3,8E-02	3,1E-02	2,7E-02	2,4E-02	2,1E-02	1,3E-02
	b	7,6E-04	5,6E-04	4,1E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04
$\delta_{cp} = 0,05$ $n = 100$	a	3,3E-01	2,3E-01	1,6E-01	1,2E-01	8,8E-02	7,1E-02	6,2E-02	5,3E-02
	b	4,1E-04	3,8E-04	3,6E-04	3,5E-04	3,4E-04	3,3E-04	3,3E-04	3,2E-04

Как видно, в рассмотренных случаях процедура обеспечивает быструю сходимость стратегий РЛ и ИП к оптимальным. При увеличении числа рабочих частот сходимость процедуры ухудшается. Эффективность применения адаптивного алгоритма РЛ можно оценить по выигрышу в вероятности ошибочного приема сигналов, обеспечиваемого при перестройке режима ППРЧ от начального (исходное состояние) до оптимального ( $j \rightarrow \infty$ ), который составляет от 2,5 до 6 раз. Учитывая, что в интересных для практики интервалах значений вероятности ошибки зависимости  $p^{\wedge}(i, \delta_{cp})$  линейны по  $\delta_{cp}$ , соответствующий энергетический выигрыш можно оценить в 4 – 8 дБ.

В ходе моделирования установлено, что повышение точности описания случайных помех (в рамках определенного распределения их мощности по частотам) не приводит к заметному повышению точности решения

рассматриваемых оптимизационных задач, но в то же время снижает скорость сходимости рассмотренной процедуры.

#### 4. Заключение

Итерационные процедуры поиска равновесных ситуаций, с одной стороны, обеспечивают возможность анализа эффективности адаптивных алгоритмов рассмотренного типа и, с другой, могут непосредственно использоваться для управления режимами работы радиолинии в процессе ее функционирования. Моделирование процесса функционирования РЛ с адаптивным алгоритмом ППРЧ, построенным на основе итерационных процедур оптимизации, показало возможность его эффективного использования на практике. Следует отметить следующие два важных достоинства подобных алгоритмов: 1) прежде всего, это универсальность, обусловленная сходимостью к оптимальному в теоретико-игровом смысле при наличии преднамеренных помех и к адаптивному выбору оптимальной частоты – при их отсутствии и 2) использование в процессе функционирования лишь данных о последовательности номеров наилучших из выделенных частот без необходимости идентификации присутствующих в частотном диапазоне преднамеренных и непреднамеренных помех.

Вместе с тем следует принять во внимание ряд проблемных вопросов, связанных с разработкой, реализацией и использованием подобных адаптивных алгоритмов РЛ, к основным из которых нужно отнести вопросы оптимизации параметров настройки с учетом показателей стационарности случайных факторов, реализуемого темпа переключения частот и темпа смены режимов ППРЧ, а также возможности использования источником помехи «адаптивных свойств» алгоритма для оптимизации своей стратегии. Поиск ответов на эти вопросы лежит вне пределов рассмотренной задачи и требует ее обобщения на основе перехода к описанию алгоритмов РЛ и ИП динамическими стратегиями и решения соответствующих теоретико-игровых задач с учетом отмеченных факторов.

Автор благодарит С.М. Одоевского за интересные обсуждения и ценные предложения.

### Литература

1. Жодзишский А.И., Жодзишский М.И. Потенциальные возможности командных радиолиний с дискретно изменяемой несущей частотой. Ракетно-космическая техника, 1973, сер. VI, вып. 2 (11), С. 15-26.
2. Cook D.B. Interleaving frequency hopping and spread spectrum for finite messages under jamming// Proc/ IEEE Nat/ Aerosp. and Electron. Conf.-NAECON'77.- Dayton, N.Y., 1977.- P.1300-1306. Kullstam P. A. Spread Spectrum Performance Analysis in Arbitrary Interference. – IEEE Trans. Commun, 1977, v. 25, №8. P. 848-853.
3. Чуднов А.М. Помехозащищенность системы передачи информации с псевдослучайным переключением частот в условиях наихудших помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1984, т. 27, №9. С. 3-8.
4. Одоевский С.М., Ерышев В.Г. Адаптивно-игровой алгоритм переключения каналов передачи информации. Сети связи и коммутация. Сб. научных трудов Военного университета связи, вып. 1. – Санкт-Петербург: Тема, 2000, с. 91-98.
5. Одоевский С.М., Калюка В.И. Адаптивно-игровое моделирование военных сетей беспроводного абонентского доступа. Ч. 1. Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2009, 216 с.
6. Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000, 384 с.
7. Воробьев Н.Н. Основы теории игр. Бескоалиционные игры. М.: Наука, 1984.
8. Урясьев С.П. Адаптивные алгоритмы стохастической оптимизации и теории игр / Под ред. Ю. М. Ермольева. – М.: Наука, 1990.
9. Bazar T., Wu Y. A Complete Characterization of Minimax and Maximin Encode-Decoder Policies for Communication Channels with Incomplete Statistical

- Description // IEEE Trans. Inform. Theory. 1985. V. 31. №4. P. 482-489.
10. Cahn C Performance of Digital Matched Filter Correlator with Unknown Interference // IEEE Trans. Commun. 1971. V. 19. №6. P. 1163-1172.
  11. Жодзишский М.И. Применение теории игр к синтезу оптимальной системы посимвольной передачи информации // Радиотехника. 1982. № 11. С. 77-81.
  12. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1986. Т. 22. №4. С. 49-54.
  13. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1991. Т. 27. № 3. С. 57-65.
  14. Чуднов А.М. Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех. Л.: ВАС. 1986.
  15. Чуднов А.М. Помехоустойчивость корреляционного приема псевдослучайных сигналов, модулированных по амплитуде и фазе // Радиотехника и электроника. 1987, Т. 31, вып. 1. С. 62 - 68.
  16. Путилин А.Н., Чуднов А.М. Оптимизация приемника фазоманипулированных псевдослучайных сигналов при наихудшей помехе с ограниченной средней мощностью // Радиотехника и электроника. 1990, Т. 35, вып. 8. С. 1646 - 1650.
  17. Комарович В.Ф, Романенко Г.В. КВ радиосвязь Состояние и направления развития// Зарубежная радиоэлектроника. 1990 , №12. С 3-16.
  18. Marko Höyhtyä. Adaptive power and frequency allocation strategies in cognitive radio systems. // Espoo 2014. VTT Science 61. 119 p.  
[Электронный ресурс]. URL:  
<http://www.slideshare.net/VTTFinland/s63>
  19. Чуднов А.М. Анализ систем в структурно неопределенных условиях // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1983, Т. 26, № 3, С. 17-20.
  20. Крейн М.Г., Нудельман А.А. Проблема моментов Маркова и экстремальные задачи. М.: Наука, 1973.