

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАНАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В СЕТЯХ КОГНИТИВНОГО РАДИО НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИГР

Д.В. Ошмарин,

аспирант кафедры «Теория Цепей и Телекоммуникации»

*Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева,
e-mail: dmitry.oshmarin@gmail.com.*

Адрес: г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корп. 5.

В статье рассмотрены теоретико-игровые модели распределения спектра в беспроводной сети когнитивного радио. Предложены функции полезности, при которых рассматриваемая игра сводится к потенциальной игре, что определяет сходимость к равновесному состоянию по Нэшу. Приводятся также результаты моделирования распределения спектра частот на основе полученных игровых моделей.

Ключевые слова: когнитивное радио, теория игр, эффективное распределение спектра, потенциальные игры, беспроводные сети.

1. Введение

Как показывают современные исследования [1], использование спектра неодинаково эффективно по всему диапазону частот, доступному для беспроводных телекоммуникаций. А так как спектр является конечным ресурсом, то вопрос его эффективного использования стал предметом исследования и породил различные подходы к его решению. Опубликованная в 1999 г. работа J. Mitola [2], посвященная когнитивному радио, рассматривает возможности увеличения эффективности использования спектра за счет его вторичного использования. Когнитивное радио — это интеллектуальная беспроводная система связи, способная анализировать окружающую обстановку и приспосабливаться к ней посредством обучения, реагируя на изменения в окружении изменени-

ем своих собственных параметров (например, несущей частоты, мощности, способа модуляции) в реальном времени с целью увеличения эффективности использования спектрального ресурса [3]. Теоретический и практический интерес представляет рассмотрение процесса распределения ресурсов в самоорганизующихся системах когнитивного радио. Такой процесс может быть представлен в виде интерактивного процесса принятия решений, при котором достигается некое равновесное состояние при распределении ресурсов в системе.

В данной статье применяется метод распределения каналов связи в сети приемопередающих пар, основанный на теории игр [4]. На основе модели сети строится игровая модель, функции полезности в которой выбираются таким образом, чтобы игра сводилась к потенциальной [5].

2. Модель сети

Рассмотрим, представленную на *рисунке 1*, модель беспроводной сети, представляющую собой совокупность приемников и передатчиков, образующих пары.

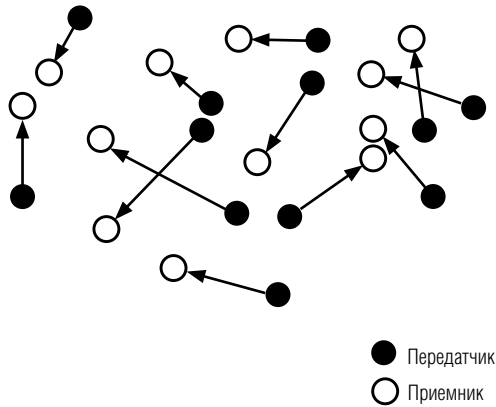


Рис. 1. Беспроводная сеть приемопередающих пар.

В данной модели беспроводной сети все приемопередающие пары находятся в одном кластере, что означает возможность обмена информацией без использования маршрутизации. Другими словами, передача информации от передатчика к приемнику осуществляется непосредственно между ними без использования каких-либо промежуточных узлов сети. Уровень излучаемой передатчиком мощности остается постоянным на протяжении работы сети при любых условиях. Кроме того, в сети может использоваться определенное количество каналов связи для передачи информации от передатчика к приемнику. При этом каждая приемопередающая пара может использовать не более одного канала связи.

Рассматриваемая модель сети может быть формализована в виде (1):

$$M = \langle N, A, U, d, T \rangle, \tag{1}$$

где $N = \{i: i = \overline{1, n}\}$ — множество приемопередающих пар; $A = \times A_i, i = \overline{1, n}$ — декартово произведение множеств действий (выборов каналов связи) $A_i = \{a_j: j = \overline{1, m}\}$, где m — количество каналов связи; $U = \{U_i: i = \overline{1, n}\}$ — множество целевых функций приемопередающих пар; $d = \{d_i: i = \overline{1, n}\}$ — множество правил принятия решений; $T = \cup T_i, i = \overline{1, n}$ — множество всех моментов времени, в которых может произойти обновления состояния любой приемопередающей пары, где $T_i = \{t_i^0, t_i^1, \dots, t_i^k, \dots\}$.

3. Модель игры и алгоритм распределения каналных ресурсов

Игровая модель выбора канала связи в рассматриваемой модели сети (1) может быть представлена в виде игры Γ в нормальной форме (2):

$$\Gamma = \{N, A, U\}, \tag{2}$$

где $N = \{i: i = \overline{1, n}\}$ — множество игроков; $A = \times A_i, i = \overline{1, n}$ — пространство стратегий (действий), образованное декартовым произведением стратегий каждого игрока $A_i = \{a_j: j = \overline{1, m}\}$; $U = \{U_i: i = \overline{1, n}\}$ — множество целевых функций, называемых также функциями полезности (далее по тексту статьи будет использоваться термин «целевая функция»).

Из (1) и (2) видно, что множество игроков — это множество приемопередающих пар, пространство стратегий — это пространство всех возможных комбинаций каналов связи, а множество целевых функций — это множество целевых функций приемопередающих пар. Так же примем, что время дискретно и бесконечно, т. е. $T = \{t^0, t^1, \dots, t^k, \dots\}$, и, что каждый игрок будет играть стратегию, которая является наилучшим откликом на стратегии, играемые другими игроками. Далее примем, что понятия «приемопередающая пара» и «игрок» являются взаимозаменяемыми понятиями.

Введём в рассмотрение следующую целевую функцию:

$$U_i(a_i, a_{-i}) = \sum_{k=1, k \neq i}^n p_k g_{ki} f(a_k, a_i) + \sum_{k=1, k \neq i}^n p_i g_{ik} f(a_i, a_k) \tag{3}$$

где a_i — стратегия, играемая игроком i , или, иными словами, выбор канала связи приемопередающей парой i ; a_{-i} — стратегии, играемые остальными игроками, или, иными словами, каналы связи, выбранные остальными приемопередающими парами кроме i ; p_i — мощность i -ого передатчика; g_{ij} — коэффициент передачи радиочастотного тракта между i -ым передатчиком и j -ым приемником; $f(a_i, a_j)$ — функция, принимающая значение 1, если выбранные каналы связи совпадают, и 0 в ином случае. Как видно, целевая функция (3) представляет собой сумму уровня помех, создаваемых остальными передатчиками на собственном приемнике, и уровня помех, создаваемых собственным передатчиком на остальных приемниках. Очевидно, что выбор будет сделан в пользу того канала связи a_i , для которого значение целевой функции (3) будет минимально.

Покажем, что игра (2) с целевой функцией (3) сходится к равновесному состоянию по Нэшу. Для этого сведем рассматриваемую игру к потенциальной игре. Потенциальная игра — это игра в нормальной форме, в которой существует, так называемая, потенциальная функция $V : A \rightarrow \mathfrak{R}$, которая отражает любые односторонние изменения в целевой функции каждого из игроков [5]. В данной работе используется строгая потенциальная игра [5], т. е. игра в которой существует такая потенциальная функция, что выполняется равенство

$$U_i(b_i, a_{-i}) - U_i(a_i, a_{-i}) = V_i(b_i, a_{-i}) - V_i(a_i, a_{-i}), \forall i \in N, \forall a \in A.$$

В [5] так же показано, что в потенциальной игре существует хотя бы одно равновесное состояние по Нэшу.

Достаточным условием существования строгой потенциальной функции является выполнение равенства:

$$\frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i \partial a_j} = \frac{\partial^2 U_j(a)}{\partial a_j \partial a_i}, \quad (4)$$

где $a = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_n)$ — набор стратегий или элемент множества A .

Проверим на выполнение равенства (4) рассматриваемую целевую функцию (3). Так как она является дискретной функцией дискретного аргумента, то для ее дифференцирования необходимо аппроксимировать дифференциальный оператор в (4). Для этого введем сетку таким образом, что $a_i^{\delta_i} = a_i + \delta_i$ — изменение канала i -ой приемопередающей парой, а $a_j^{\delta_j} = a_j + \delta_j$ — изменение канала j -ой приемопередающей парой. Тогда:

$$U_i(a_i^{\delta_i}, a_j, a_{-ij}) = U(a_i, a_j, a_{-ij}) + \delta_i \frac{\partial U_i(a)}{\partial a_i} + \frac{1}{2} \delta_i^2 \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i^2} + O(\delta_i^2), \quad (5)$$

$$U_i(a_i, a_j^{\delta_j}, a_{-ij}) = U(a_i, a_j, a_{-ij}) + \delta_j \frac{\partial U_i(a)}{\partial a_j} + \frac{1}{2} \delta_j^2 \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_j^2} + O(\delta_j^2), \quad (6)$$

$$U_i(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}, a_{-ij}) = U(a_i, a_j, a_{-ij}) + \delta_i \frac{\partial U_i(a)}{\partial a_i} + \delta_j \frac{\partial U_i(a)}{\partial a_j} + \frac{1}{2} \delta_i^2 \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i^2} + \delta_i \delta_j \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i \partial a_j} + \frac{1}{2} \delta_j^2 \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_j^2} + O(\delta_i \delta_j). \quad (7)$$

Таким образом, вычитая из (7) сумму (5) и (6), получим искомую аппроксимацию дифференциального оператора левой части соотношения (4):

$$\frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i \partial a_j} = \frac{U_i(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}, a_{-ij}) - U_i(a_i^{\delta_i}, a_j, a_{-ij}) - U_i(a_i, a_j^{\delta_j}, a_{-ij}) + U_i(a_i, a_j, a_{-ij})}{\delta_i \delta_j} \quad (8)$$

Следуя той же процедуре, получим выражение для аппроксимации дифференциального оператора правой части соотношения (4):

$$\frac{\partial^2 U_j(a)}{\partial a_j \partial a_i} = \frac{U_j(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i}, a_{-ji}) - U_j(a_j^{\delta_j}, a_i, a_{-ji}) - U_j(a_j, a_i^{\delta_i}, a_{-ji}) + U_j(a_j, a_i, a_{-ji})}{\delta_i \delta_j} \quad (9)$$

Расписав каждое из слагаемых в числителях (8) и (9), нетрудно получить результирующие выражения (10) и (11):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i \partial a_j} = & \frac{1}{\delta_i \delta_j} (p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i}) + p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}) - p_j g_{ji} f(a_j, a_i^{\delta_i}) - \\ & - p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j) - p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i) - p_i g_{ij} f(a_i, a_j^{\delta_j}) + p_j g_{ji} f(a_j, a_i) + p_i g_{ij} f(a_i, a_j)), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_j(a)}{\partial a_j \partial a_i} = & \frac{1}{\delta_i \delta_j} (p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}) + p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i}) - p_i g_{ij} f(a_i, a_j^{\delta_j}) - \\ & - p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i) - p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j) - p_j g_{ji} f(a_j, a_i^{\delta_i}) + p_i g_{ij} f(a_i, a_j) + p_j g_{ji} f(a_j, a_i)), \end{aligned} \quad (11)$$

Сравнивая правые части (10) и (11), заключаем, что они равны.

Таким образом, условие (4) выполняется, и игра с целевой функцией вида (3) является строгой потенциальной игрой.

Из определения потенциальной игры следует, что потенциальная функция отражает любое изменение в целевой функции при изменении стратегии любого игрока. В случае строгой потенциальной игры изменение потенциальной функции в точности совпадает с изменением целевой функции при изменении стратегии одного из игроков. Причем это утверждение справедливо для всех игроков, участвующих в игре. Из этого следует, что потенциальная функция должна содержать в себе информацию о целевых функциях всех игроков. Таким

образом, на основе целевой функции (3) вводится следующая потенциальная функция:

$$V(a) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1, k \neq i}^n p_k g_{ki} f(a_k, a_i) + \sum_{k=1, k \neq i}^n p_i g_{ik} f(a_i, a_k) \right) \quad (12)$$

В [5] показано, что для точных потенциальных игр должно выполняться соотношение:

$$\frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i \partial a_j} = \frac{\partial^2 U_j(a)}{\partial a_j \partial a_i} = \frac{\partial^2 V(a)}{\partial a_j \partial a_i} \quad (13)$$

Ранее было показано, что первая часть соотношения (13) выполняется для игры с целевой функцией вида (3). Проверим, выполняется ли вторая часть соотношения (13). Для этого необходимо найти вторую производную потенциальной функции (12).

Как и ранее, аппроксимируя дифференциальный оператор для потенциальной функции, получим:

$$\frac{\partial^2 V(a)}{\partial a_i \partial a_j} = \frac{V(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}, a_{-ij}) - V(a_i^{\delta_i}, a_j, a_{-ij}) - V(a_i, a_j^{\delta_j}, a_{-ij}) + V(a_i, a_j, a_{-ij})}{\delta_i \delta_j} \quad (14)$$

Расписав каждое из слагаемых в (14), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V(a)}{\partial a_i \partial a_j} = \frac{1}{\delta_i \delta_j} & (p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}) + p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i}) - p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j) - \\ & - p_j g_{ji} f(a_j, a_i^{\delta_i}) - p_i g_{ij} f(a_i, a_j^{\delta_j}) - p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i) + p_i g_{ij} f(a_i, a_j) + p_j g_{ji} f(a_j, a_i)). \end{aligned} \quad (15)$$

Правые части выражений (10), (11) и (15) равны, что позволяет утверждать, что функция (12) является строгой потенциальной функцией для игры с целевой функцией вида (3). Рассмотрим далее другую возможную целевую функцию рассматриваемой игры:

$$U_i(a_i, a_{-i}) = \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^n p_k g_{ki} f(a_k, a_i)}{p_i g_{ii}} + \sum_{k=1, k \neq i}^n \frac{p_i g_{ik} f(a_i, a_k)}{p_k g_{kk}} \quad (16)$$

В отличие от функции (3) она представляет собой сумму инверсного отношения сигнал/помеха на собственном приемнике и инверсных отношений сигнал/помеха на остальных приемниках. Проверим выполнение соотношения (4) для игры с целевыми функциями вида (16):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_i(a)}{\partial a_i \partial a_j} = \frac{1}{\delta_i \delta_j} & \left(\frac{p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i}) + p_j g_{ji} f(a_j, a_i) - p_j g_{ji} f(a_j, a_i^{\delta_i}) - p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i)}{p_i g_{ii}} + \right. \\ & \left. + \frac{p_i g_{ij} f(a_i, a_j) + p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}) - p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j) - p_i g_{ij} f(a_i, a_j^{\delta_j})}{p_j g_{jj}} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_j(a)}{\partial a_j \partial a_i} = \frac{1}{\delta_i \delta_j} & \left(\frac{p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j}) + p_i g_{ij} f(a_i, a_j) - p_i g_{ij} f(a_i, a_j^{\delta_j}) - p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j)}{p_j g_{jj}} + \right. \\ & \left. + \frac{p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i) + p_j g_{ji} f(a_j, a_i^{\delta_i}) - p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i}) - p_j g_{ji} f(a_j, a_i)}{p_i g_{ii}} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Поскольку правые части (17) и (18) равны, то игра с целевой функцией вида (16) является строгой потенциальной игрой.

На основе потенциальной функции (12) введём потенциальную функцию для игры с целевой функцией (16) в виде:

$$V(a) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{k=1, k \neq i}^n p_k g_{ki} f(a_k, a_i)}{p_i g_{ii}} + \sum_{k=1, k \neq i}^n \frac{p_i g_{ik} f(a_i, a_k)}{p_k g_{kk}} \right) \quad (19)$$

Проверим выполнение соотношения (13) для игры с потенциальной функцией:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V(a)}{\partial a_i \partial a_j} &= \frac{1}{\delta_i \delta_j} \left(\frac{p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j^{\delta_j})}{p_i g_{ii}} + \frac{p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i^{\delta_i})}{p_j g_{jj}} - \right. \\ &- \frac{p_i g_{ij} f(a_i^{\delta_i}, a_j)}{p_i g_{ii}} - \frac{p_j g_{ji} f(a_j, a_i^{\delta_i})}{p_j g_{jj}} - \frac{p_i g_{ij} f(a_i, a_j^{\delta_j})}{p_i g_{ii}} - \\ &- \left. \frac{p_j g_{ji} f(a_j^{\delta_j}, a_i)}{p_j g_{jj}} + \frac{p_i g_{ij} f(a_i, a_j)}{p_i g_{ii}} + \frac{p_j g_{ji} f(a_j, a_i)}{p_j g_{jj}} \right). \quad (20) \end{aligned}$$

Правые части выражений (17), (18) и (20) равны, что позволяет утверждать, что функция (19) является строгой потенциальной функцией для игры с целевой функцией вида (16).

На основе игровой модели (2) с определенными целевыми функциями (3) или (16) предлагается следующий алгоритм распределения канальных ресурсов в рассматриваемой сети приемопередающих пар, описываемых моделью (1).

**Алгоритм
распределения канальных
ресурсов в сети приемопередающих пар**

n – количество приемопередающих пар,
m – количество каналов связи,
a – канал связи,
U[*m*] – массив значений функций полезности,
C[*n*, 2] – массив, содержащий информации о текущем и предыдущем распределении каналов связи среди приемопередающих пар,
C[*i*, 1], *i*=1, *n* содержит исходное распределение каналов связи.

```

Begin
Do
    eoo=true
    for i=1 to n
        for j=1 to m
            Подсчет значения
    
```

```

        функции полезности
        Ui(ai, a-i) для канала
        связи j
        U[j]=Ui(ai, a-i)
    end for j
    Выбор канала связи a с
    наименьшим значением
    функции полезности из
    массива U
    C[i, 2]=a
end for i

for i=1 to n
    if C[i, 2] != C[i, 1]
        then
            C[i, 1]=C[i, 2]
            eoo=false
        end if
    end for i
while eoo==false
END.
    
```

В алгоритме стоит различать шаг и раунд игры. Шаг игры – это одна адаптация приемопередающей пары; раунд игры – это последовательная адаптация всех приемопередающих пар, при условии, что каждая приемопередающая пара выбирает канал связи один раз. На каждом шаге игры приемопередающая пара подсчитывает значение целевой функции для каждого из каналов связи и принимает решение о выборе того канала связи, для которого полученное значение является минимальным. Иными словами каждая приемопередающая пара будет играть ту стратегию, которая является наилучшим откликом на стратегии, играемые другими парами. Игра длится до тех пор, пока в очередном раунде игры ни одна из приемопередающих пар не изменит своего канала связи. Результирующее распределение канальных ресурсов будет равновесным по Нэшу ввиду того, что любое одностороннее изменение стратегии любой приемопередающей парой приведет лишь к увеличению значения целевой функции относительно ее значения при уже играемой стратегии.

**4. Экспериментальные
результаты**

Для имитационного моделирования рассматриваемого алгоритма распределения канальных ресурсов в сети приемопередающих пар на основе игровой модели с целевыми функциями (3) и (16) была разработана программа на языке MATLAB.

Моделирование проводилось при следующих значениях параметров:

- ◆ количество приемопередающих пар $n=30$;
- ◆ количество каналов связи $m=4$;
- ◆ приемопередающие пары распределены равномерно на плоскости размером $400 \times 400 \text{ м}^2$;
- ◆ мощности всех передатчиков одинаковы и равны 1 Вт;
- ◆ исходное распределение каналов связи между приемопередающими парами принято случайным;
- ◆ распределение каналов связи производится посредством игры с целевыми функциями (3) и (16);
- ◆ игра заканчивается и распределение каналов среди приемопередающих пар считается окончательным тогда и только тогда, когда в очередном раунде игры ни один из игроков не поменяет вы-

бранный в предыдущем раунде канал связи.

На *рисунке 2* представлены распределения каналов связи среди приемопередающих пар до, и после игры. Оси отражают расположение приемопередающих пар на плоскости, в то время как выбранные каналы связи отображаются градацией серого цвета. Как видно, в результате игры с целевыми функциями (3) и (16) достигаются различные результирующие распределения канальных ресурсов среди приемопередающих пар.

Исходное распределение каналов связи и соответствующие отношение сигнал/помеха, полученное исходя из условия случайного исходного распределения каналов связи, а так же гистограмма распределения количества приемников с соответствующим отношением сигнал/помеха представлены на *рисунке 3*.

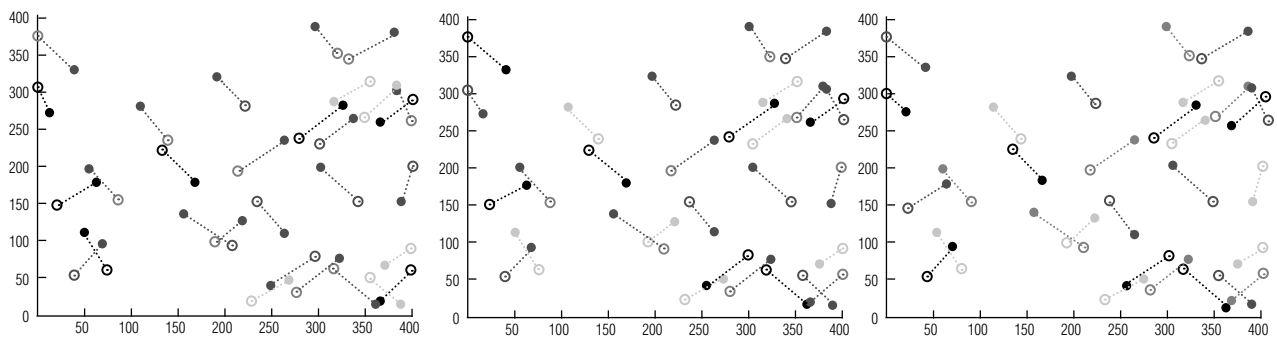


Рис. 2. Исходное распределение каналов (слева); результирующее распределение каналов в игре с целевой функцией (3) (в центре); результирующее распределение каналов в игре с целевой функцией (16) (справа).

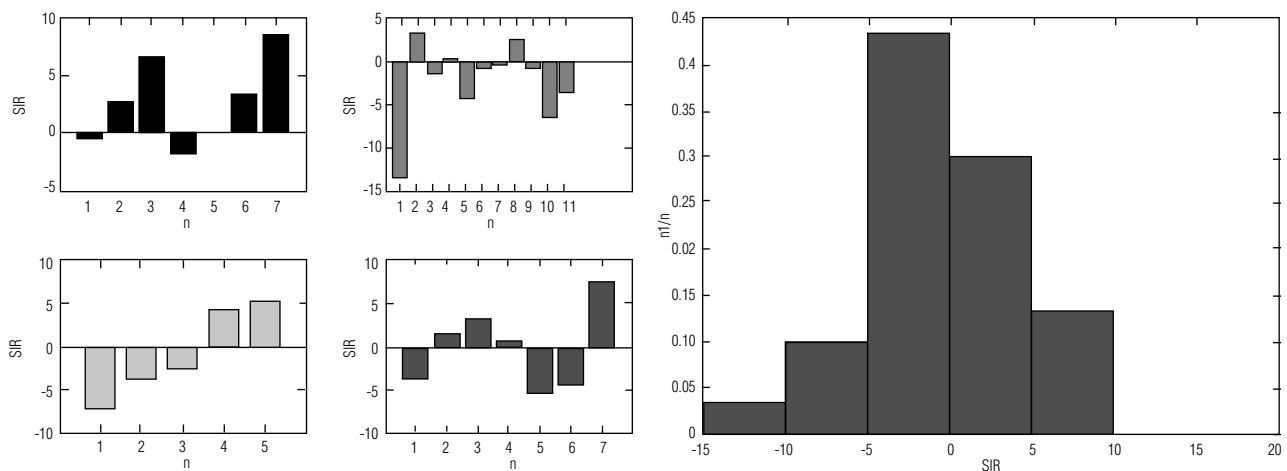


Рис. 3. Исходное отношение сигнал/помеха на каждом из приемников в сети (слева); исходная гистограмма распределения количества приемников с соответствующим отношением сигнал/помеха (справа).

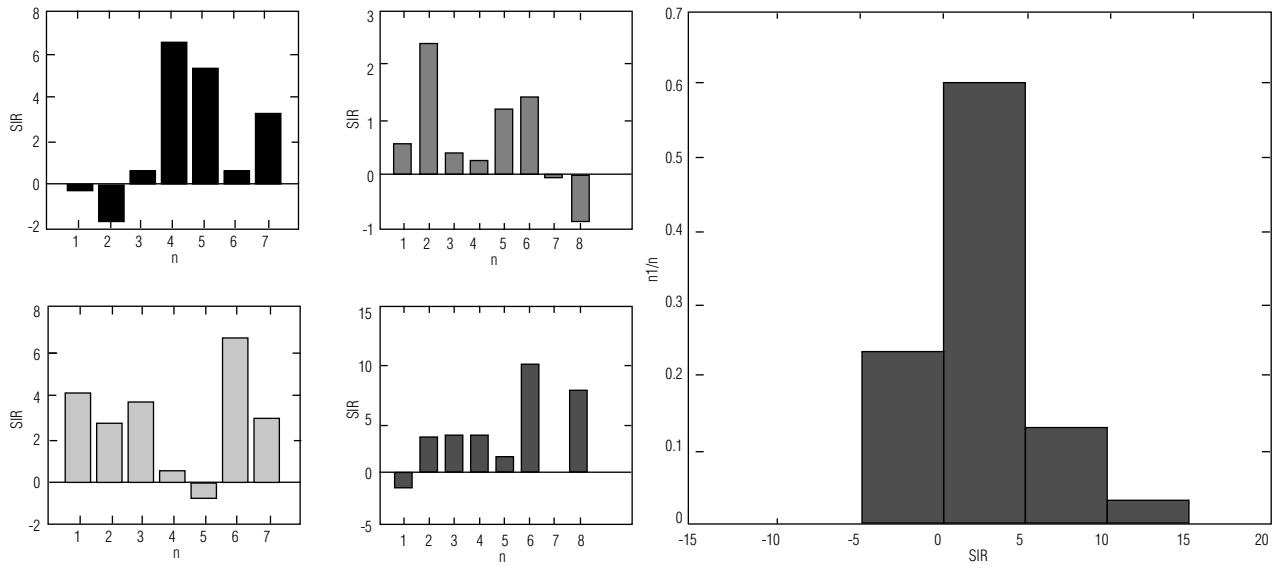


Рис. 4. Результирующее отношение сигнал/помеха в игре с целевой функцией (3) на каждом из приемников в сети (слева); результирующая гистограмма распределения количества приемников с соответствующим отношением сигнал/помеха в игре с целевой функцией (3) (справа).

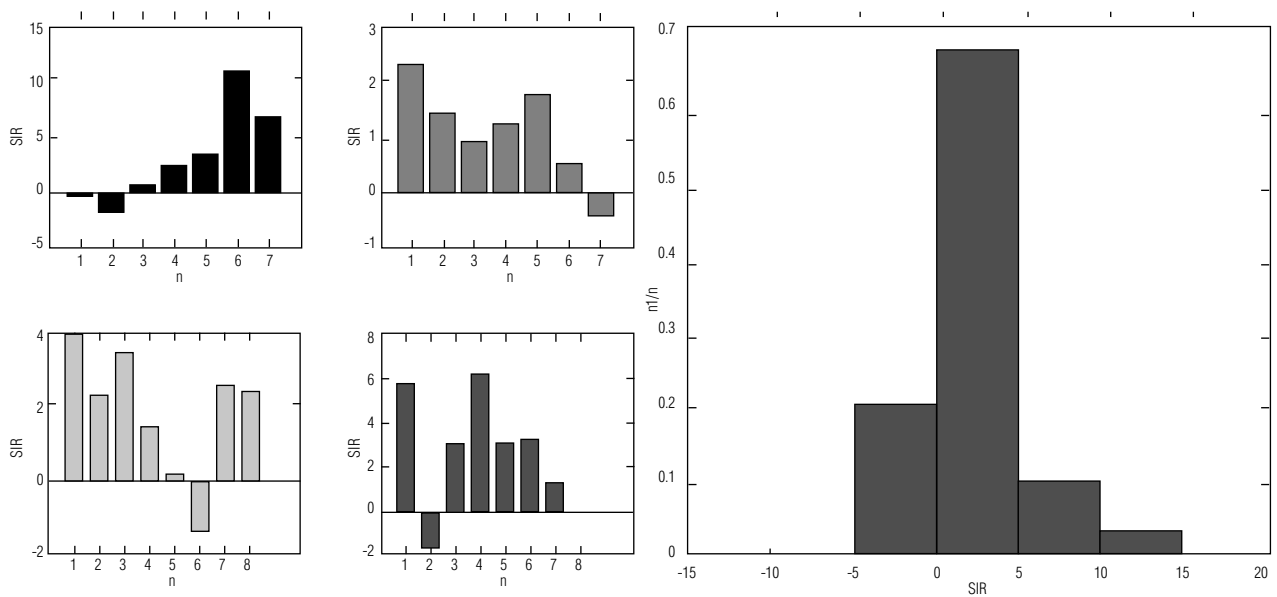


Рис. 5. Результирующее отношение сигнал/помеха в игре с целевой функцией (16) на каждом из приемников в сети (слева); результирующая гистограмма распределения количества приемников с соответствующим отношением сигнал/помеха в игре с целевой функцией (16) (справа).

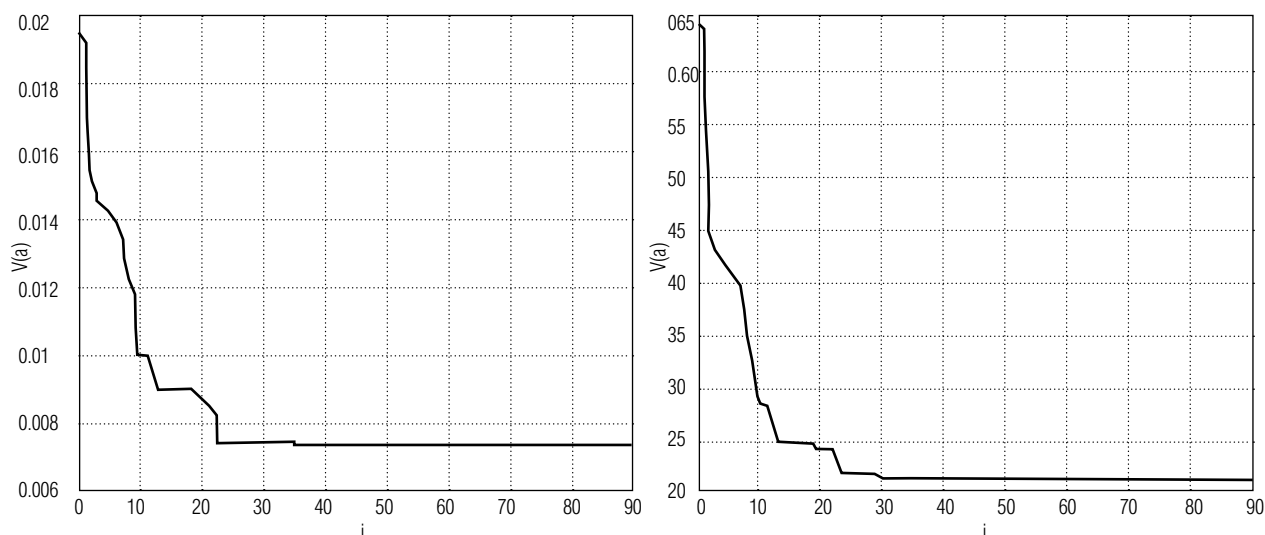


Рис. 6. Изменение потенциальной функции (12) в ходе игры (слева); изменение потенциальной функции (19) в ходе игры (справа).

Результирующее распределение каналов связи и соответствующее отношение сигнал/помеха, а также гистограмма распределения количества приемников с соответствующим отношением сигнал/помеха представлены на рисунке 4 для игры с целевой функцией (3) и на рисунке 5 для игры с целевой функцией (16). Исходы игр являются различными для игр с разными целевыми функциями, но, сравнивая полученные в результате моделирования гистограммы с исходной, можно сделать вывод, что как для игры с функцией полезности (3), так и для игры с функцией полезности (16) гистограмма распределения количества приемников сдвигаются в сторону положительных значений отношения сигнал/помеха.

Наконец, на рисунке 6 представлены графики изменения потенциальных функций в зависимости от шага игры для игр с целевыми функциями (3) и (16) соответственно. Так как шаг игры яв-

ляется одной адаптацией одной приемопередающей пары, а один раунд – одной адаптацией всех приемопередающих пар, то можно утверждать, для обеих функций полезности (3) и (16) в приведенном примере игра сходится за 90 шагов или 3 раунда.

5. Заключение

Таким образом, в статье построена игровая модель распределения каналов связи в сетях приемопередающих пар. На основе игровой модели предложен алгоритм распределения ресурсов в сети. Рассмотрены две целевые функции (3) и (16), при которых игра сводится к потенциальной игре с потенциальными функциями (12) и (19) соответственно. Так же приведены результаты моделирования распределения каналов связи при использовании рассматриваемого алгоритма. ■

Литература

1. Cabric, D. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios / D. Cabric, S.M. Mishra, R.W. Brodersen // Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference. 2004. Vol. 1. P. 772-776.
2. Mitola, J. Cognitive radio for flexible mobile communications / J. Mitola // Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop. 1999. P. 3-10.
3. Haykin, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications/S. Haykin//Selected Areas in Communications, IEEE Journal. 2005. Vol. 23. P. 201-202.
4. Оуэн, Г. Теория игр: пер. с англ. – М.: Издательство «Мир», 1971, – 230 с.
5. Monderer, D. Potential games / D. Monderer, L.S. Shapley // Games and Economic Behavior. 1996. Vol. 14. P. 124-143.