ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДОСТУПА К ЧАСТОТНОМУ СПЕКТРУ УЗЛОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

Е.Д. Бычков, О.Н. Коваленко, Д.В. Беленков

Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация

Рассматривается модель доступа к частотному спектру в системе когнитивного радио, построенной на теории систем массового обслуживания, в которой исследуется возможность одновременного использования частотного спектра для лицензируемых и нелицензируемых абонентов в различных режимах обслуживания: LW, WW, WL, LL. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективной моделью доступа в беспроводной когнитивной сети является интегрированная модель с режимом обслуживания WW.

Ключевые слова: модель доступа, когнитивное радио, частотный спектр, режим доступа.

STUDY OF THE MODEL OF ACCESS TO FREQUENCY SPECTRUM OF NODES IN A WIRELESS NETWORK

E.D. Bychkov, O.N. Kovalenko, D.V. Belenkov

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

Model of access to the frequency spectrum in a cognitive radio system based on the theory of queuing systems is examined, which explores the possibility of using the frequency spectrum for licensed and unlicensed subscribers in different service modes: LW, WW, WL, LL. Studies have shown that the most effective access model in a wireless cognitive network is an integrated model with WW service mode.

Keywords: access model, cognitive radio, frequency spectrum, access mode.

Введение

Задача использования частотного спектра в системе когнитивного радио уже рассматривалась в работах [1–3]. В этих работах рассматриваются модели динамического распределения спектра с использованием математических аппаратов: линейная алгебра, теория игр, нечеткая логика др. В данной работе предлагается исследование распределения частотного спектра (каналов) с использованием теории массового обслуживания для двух классов источников нагрузки (абонентов) на сеть A (лицензионные абоненты) и B (нелицензионные абоненты).

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу распределения радиочастотного спектра между двумя классами источников сообщений в некотором упрощенном виде. Предположим на некотором временном интервале ΔT , локальной сети, установился стационарный процесс распределения спектров частот или канальных спектров, т. е. есть N частотных каналов.

Имеется два класса источников потенциальных нагрузок: A – лицензионный класс источников нагрузок или абонентов; B – нелицензионный класс источников нагрузок или абонентов. Эти классы нагрузок совместно и независимо имеют доступ к N частотным каналам. Класс источников нагрузок A имеет абсолютный приоритет перед классом нагрузок B . Учитывая, что доступ к N частотным каналам абонентам B зависит от абонентов A , то вероятность совместного события доступа частотным каналам N определяется выражением:

$$P(A, B) = P(A) \cdot P(B / A). \quad (1)$$

Для решения уравнения (1) воспользуемся классической теорией телетрафика [4]. Пусть A – лицензионные источники нагрузок имеют абсолютный приоритет, с интенсивностью λ_A ; B – нелицензионные источники нагрузок не имеют приоритет, с интенсивностью λ_B . Процесс взаимодействия частотных каналов и нагрузок A и B в виде модели системы массового обслуживания:

$$M_1, M_2 | M | N, \quad (2)$$

где M_1, M_2 – пуассоновские потоки источников нагрузок соответственно классов нагрузок A, B ; M – экспоненциальный закон распределения обслуживания двух потоков; N – общее количество частотных каналов.

Модель СМО (2) отображает интегрированную систему передачи данных нагрузок различных классов [5; 6], при этом потоки M_1, M_2 могут иметь режимы обслуживания: LW – с потерями и ожиданием для соответствующих потоков; WW – с ожиданием отдельно для каждого потока; WL – с ожиданием и потерями для соответствующих потоков; LL – с потерями отдельно для каждого потока.

2. Модели исследований

1. Математическая модель системы (2) с режимом обслуживания LW . Вероятность загрузки сообщениями из класса A ровно i каналов из пучка N каналов определяется по формуле

$$P_A = \frac{\frac{\rho_A^i}{i!}}{\sum_{i=0}^N \frac{\rho_A^i}{i!}}, \quad (3)$$

где ρ_A – коэффициент использования оборудования абонентами из класса A ; i – количество занимаемых частотных каналов абонентами класса A , $i \in N$.

Коэффициент использования оборудования абонентами из класса A определяется по выражению

$$\rho_A = \frac{\lambda_A}{N\mu_A} < 1, \quad (4)$$

где λ_A – интенсивность поступления нагрузки из класса A ; μ_A – канальная интенсивность обслуживания нагрузки из класса A .

Здесь будем считать, что интенсивность нагрузки μ_A одинаковая для всех каналов. Условная вероятность ожидания передачи пакетов для абонентов класса B при условии занятости i каналов абонентами класса A определяется второй формулой Эрланга:

$$E_{B,m} = \frac{\frac{(m\rho_B)^m}{(1-\rho_B^i) \cdot m!}}{\sum_{n=0}^{m-1} \frac{(m\rho_B)^n}{n!} + \frac{1}{1-\rho_B} \cdot \frac{(m\rho_B)^m}{m!}}, \quad m < N, \quad (5)$$

где m – количество занимаемых частотных каналов абонентами класса B при условии занятости i абонентами класса A ; ρ_B – коэффициент использования оборудования нагрузкой из класса B . Текущее количество занимаемых частотных каналов абонентами класса B определяется по выражению

$$m = N - i. \quad (6)$$

Коэффициент использования оборудования абонентами из класса B определяется выражением

$$\rho_B = \frac{\lambda_B}{N\mu_B} < 1, \quad (7)$$

где λ_B – интенсивность нагрузки (пакетов в секунду) класса B ; μ_B – интенсивность обслуживания нагрузки из класса B для каждого канала $m \in N$.

Ведem дополнительное условие стационарности СМО: $\rho_A + \rho_B \leq 1$. По мере увеличения нагрузки из класса A состояние i системы изменяется по всем возможным значениям $0 \leq i \leq N$. Поэтому вероятность совместного события уравнения (1) будет рассматриваться как условная вероятность средней задержки передачи пакетов абонентами класса B в системе интегрального обслуживания (2) и определяться выражением

$$P(B/A) = \sum_{i=0}^N P_A(i) \cdot E_{B,m}(\rho_B). \quad (8)$$

Если интегрированная система находится в установившемся (стационарном) режиме, то $\rho \leq 1$ определяет загрузку системы, как $\rho_A + \rho_B \leq \rho$. Выражение (8) можно рассматривать как вероятность задержки обслуживания системой части нагрузки из B , т.е. представить в виде

$$\rho_{SB} \leq \sum_{i=0}^N P_A(i) \cdot E_{B,m}(\rho_B). \quad (9)$$

Известно, что $\rho_{SB} = \lambda_B \cdot \bar{T}_B$, где $\bar{T}_B$ – среднее время обслуживания заявок из B . Среднее время задержки (обслуживания) сообщений в системе определяется формулой

$$\bar{T} \geq \sum_{i=0}^N P_A(i) \cdot E_{B,m}(\rho_B). \quad (10)$$

2. Математическая модель системы (2) с режимом обслуживания WW. Система функционирует в устойчивом состоянии $\rho \leq 1$, и пакеты сообщений класса A имеют абсолютный приоритет. В этом случае вероятность занятия частотных каналов при поступлении i пакетных сообщений класса A также определяется выражением

$$E_A(i) = p_0 \cdot \frac{(N\rho_A)^i}{i!}, \quad i < N, \quad (11)$$

где

$$p_0 = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(N\rho_A)^i}{i!} + \frac{1}{1-\rho_A} \cdot \frac{(N\rho_A)^N}{N!} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Условная вероятность ожидания передачи пакетов для абонентов класса B определяется выражением (5). Вероятность задержки обслуживания передачи пакетов абонентов класса B определяется по формуле

$$P_B = \rho_B \leq \sum_{i=0}^N E_A(i) \cdot E_{B,m}(\rho_B). \quad (13)$$

Среднее время задержки (обслуживания) сообщений из класса B в системе будет определяться выражением

$$\bar{T}_B \geq \frac{1}{\lambda_B} \sum_{i=0}^N E_A(i) \cdot E_{B,m}(\rho_B). \quad (14)$$

3. Математическая модель системы (2) с режимом обслуживания WL. Система функционирует в устойчивом состоянии $\rho < 1$, и пакеты сообщений класса A имеют абсолютный приоритет. В этом случае вероятность ожидания пакетов к частотным каналам (или вероятность доступа к частотным каналам) при поступлении i пакетных сообщений определяется выражением (11), преобразованным в виде

$$E_A(i) = \frac{\frac{(N\rho_A)^i}{i!}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(N\rho_B)^i}{i!} + \frac{1}{1-\rho_A} \cdot \frac{(N\rho_A)^N}{N!}}.$$

Вероятность задержки загрузки сообщениями из класса B в $m = N - i$ каналов определяется по формуле

$$P_{B,m}(i) = \frac{\frac{\rho_B^n}{n!}}{\sum_{n=0}^m \frac{\rho_B^n}{n!}}, n \in m. \quad (15)$$

Для этой модели вероятность задержки обслуживания источников абонентов класса B будет определяться формулой

$$P_B \leq \sum_{i=0}^N E_A(i) \cdot P_{B,m}(\rho_B). \quad (16)$$

4. Математическая модель системы (2) с режимом обслуживания LL. По-прежнему будем считать, что система функционирует в устойчивом состоянии $\rho < 1$, и пакеты сообщений класса A имеют абсолютный приоритет. Здесь вероятность загрузки сообщений из класса B также определяется по выражению (15), а вероятность загрузки абонентов из класса A находится выражением (3). Для этой модели вероятность задержки обслуживания источников абонентов класса B , будет определяться формулой

$$P_B \leq \sum_{i=0}^N P_A(i) \cdot P_{B,m}(\rho_B). \quad (17)$$

Таким образом, предложены для анализа четыре модели доступа нагрузок различного класса по приоритетности к частотным каналам беспроводной локальной сети на основе модели системы массового обслуживания типа $M_1, M_2 | M | N$. Исследование проводилось для следующих данных. По условию система из класса A и класса B имеет доступ к двадцати частотным каналам, $N = 20$. Общая нагрузка системы (или коэффициент использования оборудования) $\rho = \rho_A + \rho_B < 1$, т. е. рассматривается система, функционирующая в стационарном режиме. Исследование приведенной модели в различных режимах проводилось в программной среде MATCAD.

3. Результаты экспериментов

1. Исследование модели (2) в режиме обслуживания с потерями и ожиданием для соответствующих потоков (LW). Приведем графики зависимости вероятности загрузки сообщениями из класса A от количества занимаемых частотных каналов сообщений класса A , определяющейся по формуле (3), при различных видах нагрузки (рис. 1).

Рис. 1. Вероятность блокировки сообщениями из класса A при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$: **1** — $\rho_A = 0,1$; **2** — $\rho_A = 0,2$; **3** — $\rho_A = 0,3$; **4** — $\rho_A = 0,4$

Приведем график зависимости условной вероятности ожидания передачи пакетов для абонентов класса B от количества занимаемых каналов (частот) i абонентами класса B , определяемой по формуле (5), при различных видах нагрузки (рис. 2).

Рис. 2. Условная вероятность ожидания передачи пакетов для абонентов класса B при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$: 1 – $\rho_A = 0,1$; 2 – $\rho_A = 0,2$; 3 – $\rho_A = 0,3$; 4 – $\rho_A = 0,4$

Условная вероятность средней задержки передачи пакетов абонентами класса B в системе интегрального обслуживания (2) и определяется выражением (8) (рис. 3).

Рис. 3. Условная вероятность задержки передачи пакетов абонентами класса B при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$: 1 – $\rho_A = 0,1$; 2 – $\rho_A = 0,2$; 3 – $\rho_A = 0,3$; 4 – $\rho_A = 0,4$

Анализируя график рис. 3, видим, что при коэффициенте использования до $\rho = 0,3$ передача сообщений происходит без потери пакетов, далее с повышением нагрузки увеличивается вероятность задержки пакетов класса B , так как сообщения лицензионными источниками передаются в режиме коммутации каналов с наивысшим приоритетом.

2. *Исследование модели (2) в режиме обслуживания с ожиданием отдельно для каждого потока (WW).* Приведем графики зависимости вероятности занятия частотных каналов при поступлении i пакетных сообщений класса A от количества занимаемых канальных частот абонентами класса A , которая определяется по формуле (11) при различных видах нагрузки (рис. 4).

Рассмотрим график зависимости условной вероятности ожидания передачи пакетов для абонентов класса B от количества занимаемых канальных частот абонентами класса B , определяемой по формуле (5), при различных видах нагрузки (рис. 5).

Рис. 4. Вероятность задержки сообщений класса A при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$:
1 – $\rho_A = 0,1$; **2** – $\rho_A = 0,2$; **3** – $\rho_A = 0,3$; **4** – $A = 0,4$

Рис. 5. Условная вероятность ожидания передачи пакетов для абонентов класса B
при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$:
1 – $\rho_A = 0,1$; **2** – $\rho_A = 0,2$; **3** – $\rho_A = 0,3$; **4** – $A = 0,4$

Анализируя полученные зависимости на рис. 4, 5, можно сделать вывод, что с увеличением числа занятости частотных каналов лицензионными абонентами растет вероятность ожидания пакетов для нелицензионных абонентов (класс B). Из графиков видно, что считается «справедливым» (оптимальным) занятие десяти частотных каналов лицензионными абонентами и десяти частотных каналов нелицензионными абонентами.

Рис. 6. Условная вероятность задержки передачи пакетов абонентами класса B
при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$:
1 – $\rho_A = 0,1$; **2** – $\rho_A = 0,2$; **3** – $\rho_A = 0,3$; **4** – $A = 0,4$

3. Исследование модели (2) в режиме обслуживания с ожиданием и потерями для соответствующих потоков (WL). Приведем графики зависимости вероятности ожидания пакетов к частотным каналам (или вероятность ожидания доступа к частотным каналам) при поступлении i пакетных сообщений класса A от количества занимаемых частотных каналов, которые определяются по формуле (11), при различных видах нагрузки (рис. 7). Следует отметить, что в этой модели сообщения от лицензионных абонентов передаются в режиме ожидания, но также имеют приоритет перед нелицензионными абонентами.

Рис. 7. Вероятность ожидания доступа к частотным каналам абонентов класса A при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$:
1 — $\rho_A = 0,1$; **2** — $\rho_A = 0,2$; **3** — $\rho_A = 0,3$; **4** — $\rho_A = 0,4$

Приведем графики вероятности доступа источников абонентов из класса B от количества занимаемых частотных каналов абонентами класса A , определяемой по формуле (16), при различных видах нагрузки (рис. 8).

Рис. 8. Условная вероятность задержки передачи пакетов абонентами класса B при максимальных нагрузках $\rho_A = 0,4$, $\rho_B = 0,4$:
1 — $\rho_A = 0,1$; **2** — $\rho_A = 0,2$; **3** — $\rho_A = 0,3$; **4** — $\rho_A = 0,4$

Проведя анализ графиков, можно сделать вывод, что средняя вероятность $P(B/A)$ задержки пакетов сообщений класса B значительно ниже в режиме функционирования WL системы (2) по сравнению с режимом WW. Однако при этом сохраняется высокая вероятность блокировки пакетов сообщений класса B .

Выводы и заключение

По полученным расчетным данным сделаем вывод, что эффективнее используется радиочастотный диапазон в режиме обслуживания с ожиданием отдельно для каждого потока

(WW) сообщений лицензионных и нелицензионных абонентов. В этом режиме наблюдаются наименьшие задержки передачи пакетов класса B , а также возможна равноправная передача пакетов сообщений как лицензионными, так и нелицензионными абонентами.

Проведенный анализ модели доступа к частотному диапазону (каналам) БСС при условии стационарного распределения спектра частот лицензионными абонентами показывает, что наиболее эффективной интегральной моделью доступа к частотному диапазону в зоне действия сенсорной сети является модель типа $M_1, M_2 | M | N | WW$, т. е. система СМО с пакетным режимом обслуживания данных для обоих классов источников нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ошмарин Д.В.* Динамическое распределение спектра в беспроводных сетях следующего поколения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер.: Математическое моделирование. Оптимальное управление. 2010. № 4 (1). С. 158–164.
2. *Трубин И.С.* Динамическое распределение спектра в когнитивных сетях связи // Advanced science. 2017. № 2. URL: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Технические/trubin-kpachat-ispr.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Технические/trubin-kpachat-ispr.pdf).
3. *Михалев О.А., Аванесов М.Ю., Сорокин К.Н.* Управление радиочастотным спектром в когнитивной сети радиосвязи // Информация и космос. 2017. №1. С. 57–66. URL: <https://infokosmo.ru/file/article/16492.pdf>.
4. Основы инфокоммуникационных технологий. Теория телетрафика / Е.Д. Бычков [и др.]; под ред. В.А. Майстренко. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 156 с.
5. *Бычков Е.Д., Коваленко О.Н.* Модель интеграции трафика мультисервисной сети с различными параметрами качества обслуживания // Омский научный вестник. 2009. №1 (77). С. 199–201.
6. *Шварц М.* Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: в 2 ч. М.: Наука, 1992. 326 с.