

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и
автоматического управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ КОГНИТИВНЫХ
БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 481 группы
направления 27.03.03 — Системный анализ и управление
факультета КНиИТ
Фролова Романа Сергеевича

Научный руководитель
доцент, к. ф.-м. н.

Е. П. Станкевич

Заведующий кафедрой
к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последние годы интернет-трафик резко увеличился из-за более широкого использования смартфонов, планшетных компьютеров и т.д. Современные устройства в основном полагаются на беспроводные соединения, однако, большая часть выделенного диапазона радиочастот используется от случая к случаю, что приводит к неэффективному использованию частотного ресурса. Число услуг беспроводной связи растет и требуется выделение все большего числа диапазонов частот для их обеспечения. Это вызывает проблему нехватки беспроводного спектра для их бесперебойной работы [1].

Когнитивные сети рассматривают как перспективное решение этой проблемы [1-2]. Однако для оценки производительности той или иной сети и ее конфигурации необходимы подходящие инструменты.

Цель бакалаврской работы – исследование модели когнитивных беспроводных сетей.

Поставленная цель определила следующие задачи:

- изучить математические модели когнитивных беспроводных сетей;
- разработать алгоритм анализа модели когнитивных беспроводных сетей;
- разработать программу для анализа модели когнитивной беспроводной сети;
- исследовать модель когнитивной беспроводной сети.

Методологические основы анализа когнитивных беспроводных сетей представлены в работах О. Salameh [2], Е. V. Morozov [3], S. A. Alqahtani [4], S. L. Castellanos-Lopez [5].

Практическая значимость бакалаврской работы. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана программа для анализа модели когнитивной беспроводной сети, с помощью которой можно вычислить её показатели эффективности.

Структура и объем работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 64 страницы, из них 50 страниц — основное содержание, включая 14 рисунков и 1 таблицу, список использованных источников информации — 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Модельные цепи Маркова с непрерывным временем» посвящен описанию основных понятий когнитивных беспроводных сетей и цепей Маркова с непрерывным временем, используемых для описания эволюции таких сетей.

В подразделе 1.1 рассмотрены структура и функционирование когнитивных беспроводных сетей и метод анализа моделей этих сетей.

Когнитивные радиосети состоят из первичной и вторичной сетей. Предполагается, что эти типы сетей работают одновременно. Первичная сеть включает зарезервированные каналы передачи за первичными пользователями (PU) и координирует их доступ к отдельным каналам. Вторичная сеть координирует доступ вторичных пользователей (SU) к каналам не занятым PU. Единственная цель вторичной сети – увеличить использование недостаточно используемых каналов спектра. Перед передачей SU выполняет сканирование канала, чтобы убедиться, что он свободен. Также SU должен выполнять зондирование во время передачи, чтобы избежать столкновения с PU.

Процесс поступления PU моделируется марковским процессом с двумя состояниями (активным и неактивным). Активное состояние означает, что PU поступают в систему в соответствии с процессом Пуассона с интенсивностью λ_1^* , а неактивное состояние – PU не поступают. Длительности пребывания цепи в активном и неактивном состояниях имеют экспоненциальное распределение. Обозначим γ_1 интенсивность перехода цепи из неактивного в активное состояние, а γ_2 – интенсивность перехода из активного в неактивное состояние. Тогда вероятность того, что процесс находится в активном состоянии определяется выражением:

$$P_{active} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}.$$

Средняя интенсивность поступления PU равна $\lambda_1 = \lambda_1^* P_{active}$, длительности передачи PU и SU имеют экспоненциальное распределение с параметрами μ_1 и μ_2 соответственно.

Существует два вида ошибок обнаружения SU: ложная тревога и не правильное обнаружение PU. Первый вид ошибок - ложная тревога имеет два типа. Ложная тревога типа I – при наличии свободного канала SU не мо-

жет его обнаружить (вероятность этого события p_{f1}), ложная тревога типа II – SU покидает канал, ошибочно полагая, что на него поступил PU (интенсивность возникновения δ_{f2}). Второй вид имеет 2 класса ошибок не правильного обнаружения: класс А – SU решает, что канал свободен, в то время как он занят PU (вероятность этого события p_{m1}), класса В – SU не может обнаружить поступление PU на канал (вероятность этого события p_{m2}).

В сети имеется N частотных диапазонов (каналов) для первичных пользователей PU. Поступающие PU готовы для передачи данных, и их доступ к каналам координируется первичной базовой станцией, поэтому первичная сеть не имеет конфликтов. Поступающему PU случайным образом назначается доступный канал. Если доступных каналов нет, поступающие PU будут заблокированы. Заметим, что в первичной сети нет знания об активности SU, а значит, и все каналы, занятые SU, считаются доступными. Длительность передачи PU (или время которое он занимает канал) предполагается экспоненциально распределенной случайной величиной с параметром μ_1 .

В данной модели предполагается, что SU поступают в соответствии с Пуассоновским процессом с интенсивностью λ_2 . В когнитивной беспроводной сети используются некоторые ограничения доступа. Они направлены на обеспечение качества обслуживания. Если при поступлении нового SU, количество одновременно сканирующих SU в системе ниже заданного числа K , то вновь поступивший SU начинает сканирование, иначе его сканирование блокируется. Предполагается, что длительность обнаружения канала имеет экспоненциальное распределение с параметром σ .

В подразделе 1.2 для описания эволюции модели когнитивной беспроводной сети используются цепи Маркова с непрерывным временем, а также приведены основные характеристики ее функционирования.

Производительность рассматриваемой системы может быть исследована с помощью четырехмерной цепи Маркова с непрерывным временем. Обозначим состояние цепи через $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, где x_1 обозначает количество PU в системе, x_2 и x_3 - количество передающих и сканирующих SU, соответственно, и x_4 указывает, находится ли процесс поступления PU в активном ($x_4 = 1$) или в неактивном ($x_4 = 0$) состояниях. Пространство состояний S цепи Маркова с непрерывным временем содержит все состояния x , удовле-

творяющие условиям:

$$x_1 + x_2 \leq N, \quad x_3 \leq K, \quad \text{и } x_4 = 0, 1.$$

Далее определим элементы инфинитезимального оператора $Q = (q_{x,y})$, $x, y \in S$, цепи Маркова при $x \neq y$ [2]:

$$q_{x,y} = \lambda_1^* \frac{N - x_1 - x_2}{N - x_1}, \quad \text{если } y = (x_1 + 1, x_2, x_3, x_4), \quad x_1 < N, \quad x_4 = 1,$$

$$q_{x,y} = \lambda_1^* \frac{x_2}{N - x_1} (1 - p_{m2}),$$

$$\text{если } y = (x_1 + 1, x_2 - 1, x_3 + 1, x_4), \quad x_1 < N, \quad x_4 = 1, \quad x_3 < K,$$

$$q_{x,y} = \lambda_1^* \frac{x_2}{N - x_1} (1 - p_{m2}),$$

$$\text{если } y = (x_1 + 1, x_2 - 1, x_3, x_4), \quad x_1 < N, \quad x_4 = 1, \quad x_3 = K,$$

$$q_{x,y} = \lambda_2, \quad \text{если } y = (x_1, x_2, x_3 + 1, x_4), \quad x_3 < K,$$

$$q_{x,y} = x_1 \mu_1, \quad \text{если } y = (x_1 - 1, x_2, x_3, x_4),$$

$$q_{x,y} = x_2 \mu_2, \quad \text{если } y = (x_1, x_2 - 1, x_3, x_4), \quad x_4 = 0, \quad x_3 < K,$$

$$q_{x,y} = x_2 (\mu_2 + \delta_{f2}), \quad \text{если } y = (x_1, x_2 - 1, x_3, x_4), \quad x_4 = 0, \quad x_3 = K,$$

$$q_{x,y} = \lambda_1^* \frac{x_2}{N - x_1} p_{m2} + x_2 \mu_2,$$

$$\text{если } y = (x_1, x_2 - 1, x_3, x_4), \quad x_1 < N, \quad x_4 = 1, \quad x_3 < K,$$

$$q_{x,y} = \lambda_1^* \frac{x_2}{N - x_1} p_{m2} + x_2 (\mu_2 + \delta_{f2}),$$

$$\text{если } y = (x_1, x_2 - 1, x_3, x_4), \quad x_1 < N, \quad x_4 = 1, \quad x_3 = K,$$

$$q_{x,y} = x_2 \delta_{f2}, \quad \text{если } y = (x_1, x_2 - 1, x_3 + 1, x_4), \quad x_3 < K,$$

$$q_{x,y} = x_3 \sigma \frac{N - x_2 - x_1}{N - x_2} (1 - p_{f1}), \quad \text{если } y = (x_1, x_2 + 1, x_3 - 1, x_4), \quad x_2 < N,$$

$$q_{x,y} = x_3 \sigma \frac{x_1}{N - x_2} p_{m1}, \quad \text{если } y = (x_1 - 1, x_2, x_3 - 1, x_4), \quad x_2 < N,$$

$$q_{x,y} = \gamma_1, \quad \text{если } y = (x_1, x_2, x_3, x_4 + 1), \quad x_4 = 0,$$

$$q_{x,y} = \gamma_2, \quad \text{если } y = (x_1, x_2, x_3, x_4 + 1), \quad x_4 = 1.$$

Для всех других комбинаций состояний x и y ($x = y$) интенсивность перехода $q_{x,y}$, равна 0:

$$q_{x,y} = 0.$$

Вектор-строка $\pi = (\pi(x_1, x_2, x_3, x_4))$ является решением уравнения [6, 7]:

$$\pi Q = 0,$$

с условием нормировки $\pi \mathbf{1} = \mathbf{1}$, где $\mathbf{1}$ – единичный вектор-столбец [8].

Частота столкновений α между PU и SU:

$$\begin{aligned} \alpha = & \sum_{x_2=0}^{N-1} \sum_{x_1=0}^{N-x_2} \sum_{x_3=0}^K \sum_{x_4=0}^1 \pi(x_1, x_2, x_3, x_4) x_3 \sigma \frac{x_1}{N-x_2} p_{m1} + \\ & + \sum_{x_1=0}^{N-1} \sum_{x_2=0}^{N-x_1} \sum_{x_3=0}^K \pi(x_1, x_2, x_3, 1) \lambda_1^* \frac{x_2}{N-x_1} p_{m2}. \end{aligned}$$

Вероятность блокировки PU:

$$\beta_{PU} = \frac{1}{P_{active}} \sum_{x_3=0}^K \pi(N, 0, x_3, 1).$$

Вероятность блокировки SU:

$$\beta_{SU} = \sum_{x_1=0}^{N-1} \sum_{x_2=0}^{N-x_1} \sum_{x_4=0}^1 \pi(x_1, x_2, K, x_4).$$

Пропускная способность PU - интенсивность, с которой PU успешно завершают передачу:

$$\eta_{PU} = \sum_{x_1=0}^{N-1} \sum_{x_2=0}^{N-x_1} \sum_{x_3=0}^K \sum_{x_4=0}^1 \pi(x_1, x_2, x_3, x_4) x_1 \mu_1.$$

Пропускная способность SU - это интенсивность, с которой SU успешно завершает передачу:

$$\eta_{SU} = \sum_{x_1=0}^N \sum_{x_2=0}^{N-x_1} \sum_{x_3=0}^K \sum_{x_4=0}^1 \pi(x_1, x_2, x_3, x_4) x_2 \mu_2.$$

Математическое ожидание (м.о.) длительности пребывания SU в когни-

тивной радиосистеме:

$$E[d_{SU}] = \frac{E[\eta_{SU,tr}] + E[\eta_{SU,se}]}{\lambda_2(1 - \beta_{SU})},$$

где м.о. числа передающих SU:

$$E[\eta_{SU,tr}] = \sum_{x_1=0}^N \sum_{x_2=0}^{N-x_1} \sum_{x_3=0}^K \sum_{x_4=0}^1 x_2 \pi(x_1, x_2, x_3, x_4),$$

м.о. числа считывающих SU:

$$E[\eta_{SU,se}] = \sum_{x_1=0}^N \sum_{x_2=0}^{N-x_1} \sum_{x_3=0}^K \sum_{x_4=0}^1 x_3 \pi(x_1, x_2, x_3, x_4).$$

Второй раздел «Системы массового обслуживания» посвящен описанию математических моделей когнитивной радиосети в виде многоприборных систем массового обслуживания.

В подразделе 2.1 в качестве математической модели когнитивной радиосети рассматривается система $M/M/N$ с бесконечным буфером для вторичных пользователей, в которой первичные пользователи имеют абсолютный приоритет. PU поступают в систему в соответствии с пуассоновским процессом. SU сначала проверяют каналы, прежде чем занять их.

В подразделе 2.2 рассматривается система $M/G/c$. Приводится условие устойчивости этой системы и стационарные вероятности ее состояний.

В подразделе 2.3 описывается система $M/M/c$, в которой длительности обслуживания PU и SU имеют экспоненциальное распределение [9]. Для вычисления стационарного распределения вероятностей состояний этой системы используется матрично-геометрический метод [10].

Третий раздел «Описание алгоритма и программы для анализа модели когнитивных беспроводных сетей» посвящен описанию разработанного алгоритма и программы для анализа модели когнитивной беспроводной сети.

В подразделе 3.1 приводится алгоритм программы для анализа модели когнитивных беспроводных сетей. Алгоритм состоит из шести блоков, которые выполняются последовательно.

В первом блоке осуществляется ввод начальных параметров, необходимых для анализа функционирования модели когнитивной беспроводной сети.

Во втором блоке формируется пространство состояний S .

В третьем блоке вычисляются элементы матрицы Q , которая имеет размерность равную количеству состояний в пространстве S .

В четвертом блоке вычисляется стационарное распределение π .

В пятом блоке рассчитываются основные показатели эффективности системы когнитивной беспроводной сети.

В шестом блоке осуществляется вывод полученных результатов.

В подразделе 4.2 описывается структура программы, реализующая разработанный алгоритм метода анализа модели когнитивной беспроводной сети. Приводится описание модулей, методов и функций, а также список основных идентификаторов, используемых в программе.

Программная реализация алгоритма была написана на языке программирования «*Python*» с помощью интегрированной среды разработки *PyCharm*. Программа состоит из трех модулей.

Main.py – модуль, отвечающий за запуск программы и отображение всплывающих окон.

Form.py – модуль, отвечающий работу окон программы.

Algorithm.py – модуль, в котором вычисляются характеристики производительности модели сети когнитивного радио.

В подразделе 4.3 описывается интерфейс и принцип использования программы.

В четвертом разделе «Результаты исследования работы сети когнитивного радио» приведены результаты экспериментов по рассмотрению зависимостей различных характеристик функционирования когнитивной беспроводной сети от интенсивности поступления PU. В результате экспериментов были сделаны следующие основные выводы:

1. При уменьшении интенсивности поступления PU, вероятность блокировки PU стремятся к 0 независимо от значения γ_1 и γ_2 .

2. При увеличении интенсивности поступления PU, средняя задержка SU увеличивается. Причем, средняя задержка SU повышается при увеличении γ_1 и γ_2 .

3. Увеличение интенсивности поступления PU приводит к увеличению

пропускной способности PU и снижению пропускной способности SU, при любых γ_1 и γ_2 .

4. При увеличении интенсивности поступления PU вероятность блокировки SU возрастает.

5. При увеличении вероятностей возникновения ошибок обнаружения класса A и класса B, частота столкновений между PU и SU увеличивается.

6. Пропускная способность системы для PU и SU выше в случае, если отсутствуют ошибки обнаружения и ложных тревоги по сравнению со случаем, когда эти ошибки присутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе были рассмотрены математические модели когнитивных беспроводных сетей. Кроме того, подробно была рассмотрена модифицированная система Эрланга для сетей когнитивного радио и связанных с ними приложений.

Был разработан алгоритм для анализа модели когнитивной беспроводной радиосети и разработана программа на языке программирования «Python», позволяющая быстро рассчитывать показатели эффективности работы такой системы.

Полученные результаты могут быть использованы для распределения ресурсов в сетях когнитивного радио и связанных с ними приложениях.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ:

1. Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. / В.М. Вишневский // - М.: Техносфера, 2003 – 512 с.
2. Salameh, O. Performance Evaluation of Cognitive Radio Networks with Imperfect Spectrum Sensing and Bursty Primary User Traffic / O. Salameh, H. Bruneel, S. Wittevrongel // [Электронный ресурс]: Mathematics Problems in Engineering, 2 июня 2020
- URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/4102046/> (дата обращения: 15 мая 2023). Загл. с экр. – Яз. Англ.
3. Morozov, E. V. Modified erlang loss system for cognitive wireless networks / E. V. Morozov, S. S. Rogozin, H. Q. Nguyen, T. Phung-Duc // [Электронный ресурс]: Journal of Mathematical Sciences, 9 февраля 2021 - URL:

<https://arxiv.org/abs/2103.03222> (дата обращения: 15 мая 2023). Загл. с экр. – Яз. Англ.

4. Alqahtani, S. A. An admission control scheme for secondary users in cognitive radio networks / S. A. Alqahtani and H. Ahmed // Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Networking, Sensing and Control, Miami, FL, USA, 2014. – pp. 245–250.
5. Castellanos-Lopez, S. L. Call admission control strategy for cognitive radio networks with VoIP traffic / S. L. Castellanos-Lopez, G. Hernandez-Valdez, M. E. Rivero Angeles, F. A. Cruz-Perez // Proceedings of the IEEE 81st Vehicular Technology Conference, Glasgow, Scotland, 2015. – 7 p.
6. Риска, А. Марковские процессы типа $M/G/1$: Учебное пособие. Оценка эффективности сложных систем: методы и инструменты. / А. Риска // Конспект лекций по информатике, 2002. – 36 с.
7. Зорин, А.В. Введение в общие цепи Маркова. Учебно-методическое пособие / А.В. Зорин, В.А. Зорин, Е.В. Пройдакова, М.А. Федоткин. // Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2013. – 51 с.
8. Soren, A. Applied Probability and Queues. / A. Soren. - New York.: Springer, 2003 – 438 с.
9. Serfozo, R. Basics of applied stochastic processes / R.Serfozo // Berlin: Spronger-Verlag, 2009. – 425 p.
10. Neuts, M.R. Matrix geometric solutions in stochastic models — an algorithmic approach. / M.R Neuts. - Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1981 – 352 с.