

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

Кафедра системного анализа и  
автоматического управления

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОРАНГОВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ  
СЕНСОРНОЙ СЕТИ НЕНАДЕЖНОЙ СЕТЬЮ МАССОВОГО  
ОБСЛУЖИВАНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы  
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника  
факультета компьютерных наук и информационных технологий  
Брускова Олега Дмитриевича

Научный руководитель

доцент, к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

Е. С. Рогачко

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

И. Е. Тананко

Саратов 2023

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Несмотря на то, что первые беспроводные сенсорные сети появились в конце прошлого века, с каждым годом растет качество и надежность беспроводной передачи данных, а также появляются новые датчики, которые позволяют получать более сложную информацию об окружающей среде. Следовательно, и сами беспроводные сенсорные сети не только не теряют актуальность, но и начинают использоваться в новых областях, для которых требуется качественный и надежный анализ, быстрая передача данных и экономия затрачиваемой электроэнергии.

Беспроводные сенсорные сети активно используются в разных областях. В качестве датчиков сети могут выступать камеры видеонаблюдения, термометры, медицинские приборы, а также любые другие устройства, способные получать информацию из среды, в которой они находятся. Это позволяет применять сенсорные сети практически в любой сфере деятельности, от сельского хозяйства до медицины и военного дела.

**Цель магистерской работы** — моделирование одноранговой беспроводной сенсорной сети ненадежной сетью массового обслуживания.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. Изучение основных понятий и общей структуры беспроводной сенсорной сети, а также примеров использования и областей применения беспроводных сенсорных сетей;
2. Изучение моделей массового обслуживания, применяемых для анализа и проектирования беспроводных сенсорных сетей;
3. Описание модели одноранговой беспроводной сенсорной сети в виде ненадежной сети массового обслуживания;
4. Описание алгоритма метода анализа модели беспроводной сенсорной сети;
5. Программная реализация модели беспроводной сенсорной сети;
6. Моделирование фрагмента беспроводной сенсорной сети по сбору медицинских данных и исследование работы сети при изменении различных параметров.

**Методологические основы** построения энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей представлены в работах [1-4]. Примеры использования беспроводных сенсорных сетей для анализа и сбора медицинских дан-

ных представлены в работах [5-6]. Основы теории массового обслуживания, а также примеры использования сетей массового обслуживания в качестве инструмента анализа работы беспроводных сенсорных сетей представлены в работах [7-10].

**Теоретическая значимость магистерской работы.** Была описана модель беспроводной сенсорной сети в виде ненадежной сети массового обслуживания, с помощью которой была смоделирована сеть по сбору медицинских данных.

**Практическая значимость магистерской работы.** Была разработана программная реализация алгоритма метода анализа беспроводных сенсорных сетей, которую можно использовать для решения задач анализа и оптимизации работы сетей соответствующего класса.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 71 страница, из них 59 страниц — основное содержание, включая 6 рисунков и список использованных источников информации — 28 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел «Основные принципы построения и функционирования беспроводных сенсорных сетей»** содержит основные понятия, связанные с работой сенсорных сетей, а также в нем приводятся примеры распространенных топологий, алгоритмов маршрутизации и областей, в которых могут быть использованы сенсорные сети.

В подразделе 1.1 описаны основные компоненты сенсорной сети: сенсорный узел, маршрутизатор и координатор. Также в нем описаны самые распространенные типы топологий, такие как: "точка-точка", "звезда" и "дерево".

Подраздел 1.2 посвящен методам маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях. Рассмотрены некоторые распространенные алгоритмы, такие как Sensor Protocols for Information via Negotiation, Directed Diffusion и Minimum Cost Forwarding.

В подразделе 1.3 приводятся примеры проблем, которые могут возникнуть при построении беспроводной сенсорной сети. Приведены примеры неко-

торых работ, посвященных таким проблемам как: энергоэффективность, безопасность, методы построения сетей и распределение узлов в пространстве.

В подразделе 1.4 рассмотрены примеры областей, в которых могут быть применены беспроводные сенсорные сети. Кратко описаны наземные, подземные, подводные, мультимедийные и мобильные сети. Приведены примеры работ, где беспроводные сенсорные сети используются для территориального мониторинга, медицины и реализации концепции "Интернет вещей".

В подразделе 1.5 указываются особенности построения одноранговых беспроводных сенсорных сетей, в которых каждый узел обладает одинаковыми функциями.

**Второй раздел «Модели массового обслуживания для беспроводных сенсорных сетей»** посвящен основам теории массового обслуживания как математическому аппарату анализа беспроводных сенсорных сетей. В нем приводятся основные понятия и формулы теории массового обслуживания.

В подразделе 2.1 описываются системы массового обслуживания и связанные с ними понятия. Вводятся такие характеристики системы, как среднее время ожидания и среднее общее время пребывания требования в системе.

Подраздел 2.2 посвящен анализу систем массового обслуживания. В нем поясняется символика обозначений систем массового обслуживания. Приводятся формулы для вычисления коэффициента использования, среднего времени пребывания требования в системе, а также формула Литтла.

В подразделе 2.3 рассмотрены марковские процессы, их значимость при изучении систем вида  $M/M/1$  и  $M/M/m$ .

Подраздел 2.4 посвящен сетям массового обслуживания, которые представляют из себя совокупность взаимосвязанных систем массового обслуживания, способных передавать требования друг другу.

В подразделе 2.5 описано значение теории массового обслуживания для проектирования и анализа беспроводных сенсорных сетей. В частности, приведен пример моделирования алгоритма перехода узлов беспроводной сети процессом выхода из строя систем сети массового обслуживания.

**Третий раздел «Модель одноранговой беспроводной сенсорной сети в виде ненадежной сети массового обслуживания»** посвящен описанию модели одноранговой беспроводной сенсорной сети, в которой

каждый узел способен переходить в режим сна для экономии электроэнергии. Для этого беспроводная сеть представляется в виде ненадежной сети массового обслуживания.

В подразделе 3.1 описывается сеть массового обслуживания с  $J$  ненадежными узлами.

Вводятся следующие обозначения:

- $n_j$  - количество требований в узле  $j$ ,  $j=1, \dots, J$ ;
- $e_j$  - интенсивность поступления требований в узел  $j$ ;
- $\lambda_j$  - интенсивность поступления требований в узел  $j$  из внешней среды;
- $p_j$  - коэффициент использования узла  $j$ ;
- $\vec{n} = [n_1, n_2, \dots, n_J]$  - вектор состояния сети, элементами которого являются число требований в системах сети (в очереди и на обслуживании);
- $R = [r_{ij}]$  - матрица вероятностей переходов (маршрутная матрица сети) размера  $J \times J$ ;
- $\bar{J}^* = \{0 \cup \bar{J}\}$ , где  $\bar{J} = \{1, \dots, J\}$ , - множество узлов, включающее в себя узел 0, который подразумевает внешний источник требований, откуда требования поступают в сеть и куда возвращаются после завершения обслуживания в сети.

Интенсивность поступления требований в узел  $j$  находится из следующей системы уравнений:

$$e_j = \lambda_j + \sum_{i=1}^J e_i r_{ij}, j = 1, \dots, J.$$

Далее описывается процесс выхода из строя и восстановления узла. Все узлы могут находиться в одном из двух состояний, либо узел включен, либо он выключен. Когда узел включен, то он отправляет и принимает требования. Когда узел выключен, он не отправляет требования и не может их принимать. Извне сети в выключенный узел требования не поступают. Требования, которые не смогли поступить в выключенный узел из других узлов сети, остаются в них и обслуживаются повторно. После завершения повторного обслуживания требования переходят в другие узлы согласно новой маршрутной матрице.

Далее предполагается, что узел может выйти из строя только в том случае, если в нем нет требований, а также абсолютно все узлы выходят из

строю и восстанавливаются с одинаковой интенсивностью  $\alpha$  и  $\beta$ . Длительность времени, которое пройдет перед тем как узел сломается, а также время восстановления вышедшего из строя узла экспоненциально распределены с параметрами  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно. Тогда совместное распределение вероятностей  $\bar{\pi}(\bar{I}_{off}, \vec{n})$ , где  $\bar{I}_{off}$  - множество выключенных узлов сети, вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{\pi}(\bar{I}_{off}, \vec{n}) = H^{-1} \frac{A(n_i : i \in \bar{I}_{off})}{B(n_i : i \in \bar{I}_{off})} \prod_{j=1}^J p_j^{n_j},$$

где  $A(n_i : i \in \bar{I}_{off}), B(n_i : i \in \bar{I}_{off})$  - интенсивности выхода из строя и восстановления сети в состоянии  $\vec{n}$  соответственно, а  $H$  - нормализующая константа.

Подраздел 3.2 посвящен описанию модели беспроводной сенсорной сети в виде сети Джексона с включающимися и выключающимися узлами, для которой допустимы только те состояния, которые удовлетворяют критерию осуществимости  $|U_j| \leq F$ , где  $U_j$  - множество активных узлов, смежных узлу  $j$ ,  $F$  - заданное ограничение. Обозначим ограниченное пространство состояний, удовлетворяющих критерию осуществимости, как  $\Omega$ , а ограниченное пространство множеств выключенных узлов как  $\Lambda$ .

Совместная вероятность состояния сенсорной сети с множеством выключенных узлов обозначается через  $\pi'(\bar{I}_{off}, \vec{n})$ , ее можно вычислить воспользовавшись следующей формулой:

$$\pi'(\bar{I}_{off}, \vec{n}) = \frac{1}{G} \bar{\pi}(\bar{I}_{off}, \vec{n}), \forall \{\vec{n} \in \Omega \cap \bar{I}_{off} \in \Lambda\},$$

где

$$G = \sum_{\vec{n} \in \Omega \cap \bar{I}_{off} \in \Lambda} \bar{\pi}(\bar{I}_{off}, \vec{n}).$$

В подразделе 3.3 приводятся формулы для показателей качества работы сети.

Первый показатель - это среднее количество активных узлов, его можно найти по следующей формуле:

$$\bar{s} = \sum_{k=0}^J k * Pr(s = k),$$

где

$$Pr(s = k) = \frac{1}{G} \sum_{\{\bar{I}_{off} \in \Lambda \cap |\bar{I}_{off}| = J - k \cap \vec{n} \in \Omega\}} \pi'(\bar{I}_{off}, \vec{n}).$$

Другим показателем качества работы сети является вероятность блокировки узла во время пробуждения:

$$P_j = \frac{\sum_{\{\vec{n} \in \Omega \cap j \in \bar{I}_{off} \cap |\bar{U}| \leq F\}} \pi'(\bar{I}_{off}, \vec{n})}{\sum_{\{\vec{n} \in \Omega \cap j \in \bar{I}_{off}\}} \pi'(\bar{I}_{off}, \vec{n})}.$$

Третьим показателем качества работы сети является среднее время, которое узел проводит в режиме сна.

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{\beta(1 - P_j)}.$$

Четвертый показатель качества работы сети - средняя задержка пакета данных, она будет равна:

$$\bar{d} = \frac{1}{\lambda \bar{\varphi}} \sum_{j=1}^J \bar{n}_j,$$

где  $\bar{\varphi}$  - это вероятность активности узла,  $\bar{n}_j$  - средняя длина очереди в узле, а  $\lambda$  это общая интенсивность поступления пакетов данных в сеть,

$$\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j.$$

Последний показатель качества работы сети, который будет рассмотрен в этой работе - это пропускная способность сети:

$$S = \lambda \bar{\varphi} = \frac{\lambda \bar{s}}{J}.$$

**Четвертый раздел «Описание алгоритма и программы для анализа модели беспроводной сенсорной сети»** посвящен программной реализации модели, описанной в третьем разделе. Программа была написана на языке Python, так как его простой синтаксис хорошо подходит для реализации математических формул. В качестве среды программирования

был выбран Google Colab, так как он обладает удобным функционалом для совмещения развернутых комментариев и программного кода.

В подразделе 4.1 описывается алгоритм метода анализа ненадежной сети массового обслуживания, состоящий из 6 этапов.

В подразделе 4.2 приводятся примеры использования программы для двух произвольных сетей из 5 и 6 узлов и вычисляются показатели качества работы сети для соответствующих примеров.

**Пятый раздел «Моделирование фрагмента беспроводной сенсорной сети по сбору медицинских данных»** посвящен использованию программной реализации модели беспроводной сенсорной сети для анализа работы сети по сбору медицинских данных. Сенсорная сеть должна собирать данные о состоянии здоровья пациентов и отправлять их на ЭВМ врача в реальном времени.

В подразделе 5.1 описываются условия работы сети и процесс получения значений параметров сети. В частности, описывается процесс составления пакета данных, содержащего в себе информацию о пациенте. Такой пакет включает в себя 34 байта служебной информации, а также 4.5 байта информации о температуре тела пациента, его пульсе, частоте дыхания и давлении.

Пакеты данных поступают в сеть с интенсивностью 0.2 пакета в секунду, среднее время обслуживания пакета равно 0.00308 секунд, а параметры  $\alpha$  и  $\beta$  изменяются от одного эксперимента к другому, при этом изменяется интенсивность перехода узла в режим сна и в активный режим.

Подраздел 5.2 посвящен исследованию работы сети при изменении топологии.

В первом примере внутри сети нет никакого ограничения на распространение сигнала. Другими словами, все узлы находятся в зоне доступа друг друга, а также способны передавать данные на координатор. В качестве параметров сети были взяты следующие данные:  $J = 8$ ,  $\lambda = 0.2$ ,  $\mu = 324.6753$ ,  $\alpha = 1.5$ ,  $\beta = 1$ ,  $F = 2$ . В результате в среднем внутри сети было включено около 5 узлов, средний период сна был равен 2 секундам, а средняя задержка пакета составила примерно 7 секунд.

Во втором примере был рассмотрен случай расположения узлов, в котором каждый узел способен передать пакет данных только ближайшим соседям. У каждого узла может быть максимум 3 соседних узла. В качестве пара-



метров сети были взяты данные, аналогичные первому примеру. В результате вычислений было установлено, что внутри сети в среднем было включено около 4 узлов, средняя задержка пакета данных стала равна 10 секундам, а каждый узел находился в режиме сна от 3 до 5 секунд (в зависимости от количества соседей). В сравнении с предыдущим примером уменьшилось среднее количество включенных узлов и увеличился средний период сна. Таким образом, более разреженное расположение узлов внутри сети позволяет экономить больше энергии. В то же время средняя задержка пакета данных увеличилась.

В подразделе 5.3 проводится исследование алгоритма экономии электроэнергии. В качестве топологии сети используется топология из второго примера подраздела 5.2. Параметр  $\alpha/\beta$  принимает значения от 0.85 до 2 с шагом 0.05, остальные параметры сети будут такие же, как в подразделе 5.2.

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. при увеличении параметра  $\alpha/\beta$  уменьшается среднее количество включенных узлов и пропускная способность сети;
2. при увеличении параметра  $\alpha/\beta$  увеличивается средний период сна, вероятность блокировки узла при пробуждении и средняя задержка пакета данных;
3. даже при максимальном количестве включенных узлов средняя задержка составила 5 секунд, что может говорить о недостатках топологии;
4. в случае, если для работы сети важны все показатели качества, оптимальным значением  $\alpha/\beta$  является 1.2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской работе были изучены основы построения и методы анализа беспроводных сенсорных сетей. Были рассмотрены основные типы топологий и алгоритмов маршрутизации беспроводных сенсорных сетей, а также часто возникающие проблемы при их практическом применении. Были описаны различные области применения беспроводных сенсорных сетей.

В целях построения модели сенсорной сети были изучены основы теории массового обслуживания. Была описана модель одноранговой беспроводной сенсорной сети в виде сети массового обслуживания с ненадежными узлами.

Был разработан алгоритм метода анализа модели беспроводной сенсорной сети. Далее разработанный алгоритм был реализован в виде программного кода на языке Python.

В работе был смоделирован фрагмент беспроводной сенсорной сети по сбору медицинских данных. Было проведено несколько исследований, в частности, анализ качества работы сети при разном расположении узлов относительно друг друга.

**Отдельные части магистерской работы были представлены на конференции:**

1. Брусков О. Д. Моделирование одноранговой беспроводной сенсорной сети ненадежной сетью массового обслуживания. – Студенческая научная конференция "Компьютерные науки и информационные технологии", СГУ, 20 апреля 2023 г.

**Основные источники информации:**

- 1 Кучерявый, А.Е. Самоорганизующиеся сети / А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, Е.А. Кучерявый. - Санкт-Петербург: Типография Любавич, 2011. -312 с.
- 2 Мочалов, В.А. Принципы построения и функционирования сенсорных сетей связи / В.А. Мочалов, А.П. Пшеничников. - Москва: Московский технический университет связи и информатики, 2014. - 55 с.
- 3 Мальцева, Н.С. Анализ способов построения БСС / Н.С. Мальцева, А.Д.Зубова, И.Н. Марышева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. - 2018. - Т.2 (24). - С.31-36.
- 4 Mustafa, K.M.A. A Performance Modeling of Wireless Sensor Networks as a Queueing Network with On and Off Servers / K.M.A. Mustafa, Hao Gu // Journal of Communications and Networks. - 2009. - Vol. 11, №4. - P.406-415.
- 5 Экспериментальная сверхширокополосная беспроводная сенсорная сеть медицинского назначения / А. С. Дмитриев, А. И. Рыжов, В. А. Лазарев [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 9. – С. 974-984.
- 6 Lopez, G. E-Textile and Wireless-Sensor-Network-Based Platform for Healthcare Monitoring in Future Hospital Environments / G. Lopez, V. Custodio, J.I. Moreno //IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine – 2010. – № 14. – P. 1446-1458.
- 7 Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок. -

- М.: Мир, 1979. - 595 с.
- 8 Bolch, G. Queueing Networks and Markov Chains / G. Bolch, S. Greiner, H. Meer, Kishor S. Trivedi. - Nashville: John Wiley & Sons, 2006. - 896 p.
- 9 Вишнеvский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишнеvский. - М: Техносфера, 2003. - 512 с.
- 10 Sauer, C. Availability Formulas and Performance Measures for Separable Degradable Networks / C. Sauer, H. Daduna // Economic Quality Control – 2003. – № 18(2). – P. 165-194.