

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра системного анализа и автоматического управления

Анализ модели беспроводных сенсорных сетей

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 481 группы
направления 27.03.03 – Системный анализ и управление
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Черневского Алексея Дмитриевича

Научный руководитель
старший преподаватель

Е. П. Станкевич

Заведующий кафедрой
к.ф.-м.н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Беспроводные сенсорные сети (БСС) – это автономные беспроводные системы, состоящие из набора различных взаимодействующих узлов с датчиками (сенсорных узлов), образующих самонастраивающуюся сеть с или без определенной инфраструктуры. Мобильными могут быть все, некоторые, или ни один из узлов БСС, в зависимости от её предназначения. БСС – это особый тип беспроводных самоорганизующихся сетей. Основные задачи БСС – это минимизация проблем связи между узлами сети, вызванных мобильностью этих узлов, минимизация энергопотребления узлов, сбор данных сенсорами и их агрегация на сенсорных узлах. Проблемы связи между узлами сети могут быть связаны с мобильностью узлов, средой, в которой они расположены, или низким зарядом батареи сенсорных узлов [1–3]. В данной работе существенное внимание уделяется неполадкам (помехам) связи между узлами сети.

В последнее десятилетие БСС были предметом огромного интереса, как в научной, так и в промышленной областях, из-за множества своих потенциальных приложений таких, как, например: отслеживание грузовых контейнеров, военный надзор, системы обнаружения вторжений, строительный и сейсмический контроль, системы обнаружения неисправностей в самолетах, системы датчиков домашних приборов, наблюдение за окружающей средой, медицинские системы мониторинга и системы управления спасательными операциями.

Цель бакалаврской работы – изучение математической модели беспроводных сенсорных сетей и методов её анализа.

Поставленная цель определила **следующие задачи:**

- изучить методы анализа открытых сетей массового обслуживания, являющихся математическими моделями беспроводных сенсорных сетей с помехами;

- разработать алгоритмы методов анализа открытых сетей массового обслуживания;
- разработать программу для анализа моделей беспроводных сенсорных сетей;
- провести исследование гипотетических беспроводных сенсорных сетей.

Методологические основы исследования моделей беспроводных сенсорных сетей представлены в работах R. V. Lenin, S. Ramaswamy [1], J. Hayes, T. Ganesh Babu Hoboken [2], S. Basagni, S. Carosi, C. Petrioli [3]. Используются результаты по теории вероятностей [8 – 10] и теории систем и сетей массового обслуживания [4 – 7, 11 – 15, 19, 20].

Теоретическая и практическая значимость бакалаврской работы.

В ходе выполнения работы была рассмотрена математическая модель для описания БСС с помехами, представленными на транзитных участках и вызванными мобильностью узлов. Модель является открытой сетью массового обслуживания, состоящей из систем типа GI/G/1/B [4].

Практическая значимость работы заключается в возможности дальнейшего использования программного продукта (программы для анализа открытых сетей массового обслуживания с прерываниями потоков требований) для исследования беспроводных сенсорных сетей с помехами.

Структура и объём работы. Бакалаврская работа состоит из списка обозначений и сокращений, введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Общий объём работы – 92 страницы, из них 61 страница – основное содержание, включая 14 рисунков и 2 таблицы, список использованных источников информации – 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Беспроводные сенсорные сети» посвящен описанию беспроводных сенсорных сетей и их математических моделей – открытых сетей массового обслуживания.

Подраздел «Описание беспроводной сенсорной сети» включает в себя подробное описание беспроводной сенсорной сети и сенсорных узлов, а также описание соответствия элементов беспроводной сенсорной сети и элементов сети массового обслуживания.

Рассматривается беспроводная сенсорная сеть с мобильными узлами. Сенсорный узел состоит из датчика (сенсора), микроконтроллера, батареи и антенны с фиксированным радиусом передачи и приема данных. Сенсорный узел может генерировать пакеты для отправления получателю или может пересылать пакеты из других узлов получателю.

В качестве математической модели БСС используется открытая сеть массового обслуживания (СеМО). Каждая система массового обслуживания (СМО) в СеМО является сенсорным узлом в БСС; случайные связи между СМО — беспроводными линиями связи между сенсорными узлами; поток требований из источника в СМО — данными, обнаруженными датчиком сенсорного узла; потоки требований внутри СеМО — пакетами, которые сенсорному узлу необходимо пересылать; требования, уходящие в источник, — пакетами, поступившими в нужный сенсорный узел (узел стока); очередь СМО — памятью сенсорного узла. Прерывания потоков требований, которые влияют на передачу требований между СМО, соответствуют мобильности сенсорных узлов, которая вызывает прерывание беспроводного соединения между сенсорными узлами; маршрутная матрица открытой СеМО соответствует алгоритму (протоколу) маршрутизации в БСС.

В *подразделе «Математическая модель беспроводной сенсорной сети»* описываются открытые сети массового обслуживания, которые состоят из L систем массового обслуживания типа GI/G/1 (или GI/G/1/B). Требования не теряются в процессе перехода от одной СМО к другой. Обслуживающий прибор каждой СМО обслуживает требования согласно дисциплине FIFO и может обслуживать только одно требование в единицу времени.

Приводятся формулы для вычисления основных характеристик данных СеМО для случая, когда входящий в СеМО поток требований является пуассоновским, а длительности обслуживания требований приборами систем данной СеМО имеют экспоненциальное распределение [5, 6]. Также описан алгоритм «The Queueing Network Analyzer», предназначенный для анализа СеМО, состоящих из систем типа GI/G/1.

Приведены три варианта рассмотренной математической модели, учитывающие следующие типы помех в БСС:

1. **Помехи приема.** Рассматривается СеМО с системами массового обслуживания, способными прекратить прием требований на случайный промежуток времени. При этом обслуживание требований обслуживающим прибором системы не прекращается. В данном случае требования, переданные другими системами в системы, которые прекратили прием, будут потеряны.
2. **Помехи приема и/или передачи.** Рассматривается СеМО с системами массового обслуживания, способными прекратить как прием требований от некоторых СМО, так и передачу требований некоторым СМО. В случае прекращения приема требования, переданные другими СМО в систему, прекратившую прием, будут потеряны. Соответственно, при прекращении передачи системой, требования, переходящие из неё в другие системы, будут потеряны.
3. **Помехи передачи.** Это случай, противоположный случаю 1. Рассматривается СеМО с СМО с прерываниями обслуживания требований и без прерываний входящего потока.

Вводится в рассмотрение полумарковский процесс ξ с непрерывным временем, множеством состояний $S = \{0, 1, 2, \dots, K\}$ и вероятностями перехода t_{km} , $k, m \in S$. Длительность пребывания этого процесса в состоянии k – случайная величина s_k с произвольной функцией распределения.

Предполагается, что

$$p_k = \frac{k}{K}, \quad k \in S,$$

$$t_{km} = \frac{1}{K}, \quad \forall k, m \in S,$$

$$s_k = s, \quad k \in S,$$

где p_k – это вероятность удачной передачи требований в случае уровня прерываний k .

Второй раздел «Методы анализа моделей беспроводных сенсорных сетей» посвящен описанию методов анализа открытых сетей массового обслуживания с прерываниями и с системами типа GI/G/1 (или GI/G/1/B).

В подразделе «Методы анализа открытых сетей массового обслуживания с системами типа GI/G/1 и прерываниями двух уровней» приведены формулы для вычисления основных характеристик открытых сетей массового обслуживания данного класса.

Рассматривается СеМО, в которой входящий поток требований в каждую СМО включается и выключается с интенсивностями α и β и дисперсиями u_{on} и u_{off} . Когда входящий поток включен, СМО принимает требования из других систем, в противном случае все требования будут потеряны. Обозначим λ_j и λ'_j – интенсивность поступления требований в СМО j , $j=1, \dots, L$, без учета прерываний входящего потока и с учетом прерываний соответственно, c_{aj}^2 и $c'_{aj}{}^2$ – квадрат коэффициента вариации длительности интервала времени между поступлениями требований из других систем в СМО j , $j=1, \dots, L$, без учета прерываний входящего потока и с учетом прерываний соответственно.

Для данной модели [1]:

$$\lambda'_j = p_{on} \lambda_j, \tag{1}$$

$$c'_{aj}{}^2 = c_{aj}^2 + k \lambda_j, \quad (2)$$

где вероятность того, что в СМО j поступают требования из других систем,

$$p_{on} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}, \quad (3)$$

$$k = \frac{\alpha (v_{on} \alpha^2 + v_{off} \beta^2)}{(\alpha + \beta)^2}. \quad (4)$$

Далее рассматривается СеМО, в которой входящий и/или выходящий поток требований в каждую СМО включается и выключается с интенсивностями α и β и с дисперсиями v_{on} и v_{off} . Когда в систему j , $j=1, \dots, L$, поступают требования из системы i , $i=1, \dots, L$, говорят, что связь между системами i и j существует, поэтому требования переходят из СМО i в СМО j с вероятностью θ_{ij} . В противном случае говорят, что связь между системами i и j отсутствует. Когда связь между СМО отсутствует, все переходящие между ними требования будут потеряны.

Для данной модели [1]:

$$\lambda_j'{}^2 = \lambda_{0j} + p_{on} \sum_{i=1}^L \lambda_{ij}, \quad c'_{aj}{}^2 = 1 - \gamma_j \left(1 - \sum_{i=1}^L c_{ij}^2 - k \sum_{i=1}^L \lambda_{ij} \right),$$

где λ_{0j} и λ_{ij} – это интенсивность потока требований, поступающих в систему j , $j=1, \dots, L$, из источника или из системы i , $i=1, \dots, L$, соответственно. Здесь вероятность p_{on} того, что связь между любыми двумя системами существует, вычисляется по формуле (3), k вычисляется по формуле (4), а c_{ij}^2 и γ_j вычисляются по формулам, приведенным в алгоритме «The Queueing Network Analyzer» [13].

Далее рассматривается случай, когда обслуживание требований в каждой системе включается и выключается с интенсивностями α и β соответственно. Вне зависимости от того, обслуживаются требования или нет, входящий поток

требований в СМО не прерывается. Обозначим μ_j и μ'_j – интенсивность обслуживания требований прибором СМО j , $j=1, \dots, L$, без учета возможных прерываний обслуживания и с учетом соответственно, c_{sj}^2 и $c'_{sj}{}^2$ – квадрат коэффициента вариации времени обслуживания требований прибором СМО j без учета возможных прерываний обслуживания и с учетом соответственно.

Для данной модели [1]:

$$\mu'_j = p_{on} \mu_j, \quad c'_{sj}{}^2 = c_{sj}^2 + k \mu_j,$$

где p_{on} – это вероятность того, что обслуживающий прибор СМО j работает, вычисляется по формуле (3), а

$$k = \alpha p_{on}^2 \frac{(1 + c_{off}^2)}{\beta^2},$$

где c_{off}^2 – квадрат коэффициента вариации времени выключения обслуживающего прибора.

В подразделе «Методы анализа открытых сетей массового обслуживания с системами типа GI/G/1/B и прерываниями двух уровней» изложен алгоритм метода расширения, предназначенного для анализа СеМО, состоящих из систем типа GI/G/1/B, без прерываний потоков требований [14], и приведены формулы для вычисления некоторых характеристик открытых сетей массового обслуживания с системами типа GI/G/1/B и прерываниями двух уровней.

Рассматривается СеМО, в которой входящий поток требований в каждую СМО включается и выключается с интенсивностями α и β и дисперсиями U_{on} и U_{off} . Каждая СМО имеет конечную очередь размера B . Обозначим λ'_j – интенсивность входящего потока требований в СМО j , $j=1, \dots, L$, с конечной очередью и с учетом возможных прерываний входящего потока, $c'_{aj}{}^2$

– квадрат коэффициента вариации длительности интервала времени между поступлениями требований из других систем в СМО j , $j=1, \dots, L$, с конечной очередью и с учетом прерываний входящего потока.

Для данной модели:

$$\lambda_j'' = \left(1 - p_B^{(j)}\right) \lambda_j', \quad c_{aj}''^2 = y_j \left[\left(1 - p_B^{(j)}\right) c_{aj}'^2 + p_B^{(j)} \right] + 1 - y_j,$$

где λ_j' вычисляется с помощью (1), $c_{aj}'^2$ вычисляется с помощью (2), и выражения для $p_B^{(j)}$ и y_j даны в методе расширения [14].

Далее рассматривается СеМО, в которой входящий и/или выходящий поток требований в каждую СМО включается и выключается с интенсивностями α и β и с дисперсиями U_{on} и U_{off} . Каждая СМО имеет конечную очередь размера B .

Для данной модели:

$$\lambda_j'' = \left(1 - p_B^{(j)}\right) \left(\lambda_{0j} + \sum_{i=1}^L \lambda_{ij}' \right),$$

$$c_{aj}''^2 = y_j'' \left(1 - p_B^{(j)}\right) \left[y_j' \sum_{i=1}^L \left\{ \frac{\lambda_{ij}'}{\sum_{k=1}^L \lambda_{kj}'} \right\} c_{ij}'^2 + 1 - y_j' \right] + y_j'' p_B^{(j)} + 1 - y_j'',$$

где

$$\lambda_{ij}' = p_{on} \lambda_{ij}, \quad c_{ij}'^2 = c_{ij}^2 + k \lambda_{ij}.$$

Здесь p_{on} и k вычисляются с помощью (3) и (4) соответственно, c_{ij}^2 – по формуле, приведенной в алгоритме метода расширения [14], а y_j' и y_j'' – с использованием формул из алгоритма метода расширения при замене λ_j на λ_j' или λ_j'' соответственно.

В подразделе «Метод анализа открытых сетей массового обслуживания с прерываниями нескольких уровней» приведены формулы для вычисления основных характеристик открытых сетей массового обслуживания с прерываниями нескольких уровней и с системами типа GI/G/1 (или GI/G/1/B).

Отличие рассматриваемой математической модели состоит в том, что процесс изменения уровней помех моделируется полумарковским процессом $\hat{\xi}$, имеющим K состояний, в каждом из которых процесс проводит случайное время s_k и переходит в другое состояние $m \in S$ согласно вероятностям

перехода t_0, t_1, \dots, t_K таким, что $0 \leq t_k \leq 1$ и $\sum_{k=0}^K t_k = 1$.

Для модели беспроводных сенсорных сетей с $K+1$ уровнями помех, описываемых полумарковским процессом $\hat{\xi}$, имеем [1]:

$$\lambda'_j = p_{succ} \lambda_j, \quad c'^2_{aj} = p_{succ} c^2_{aj},$$

где

$$p_{succ} = \frac{\sum_{k=0}^K p_k s_k}{\sum_{k=0}^K s_k}.$$

Третий раздел «Алгоритмы методов анализа моделей беспроводных сенсорных сетей» содержит подробное описание разработанных алгоритмов метода анализа СеМО с системами типа GI/G/1 с прерываниями нескольких уровней и метода анализа СеМО с системами типа GI/G/1/B с прерываниями нескольких уровней. Первый алгоритм состоит из 9 блоков, второй – из 11 блоков. Структурные схемы взаимосвязи блоков и подробное описание блоков каждого из разработанных алгоритмов представлены в работе.

В четвертом разделе «Описание программы для анализа моделей беспроводных сенсорных сетей» приводится подробное описание программы

для вычисления стационарных характеристик открытых CeMO, которые являются математическими моделями беспроводных сенсорных сетей.

Описываются назначение и структура программы, используемые идентификаторы переменных, подпрограммы, интерфейс и правила использования программы.

Программа реализована на языке программирования «Python» версии 3.7 [16–18]. Программа разделена на два модуля. Реализация алгоритмов методов анализа моделей беспроводных сенсорных сетей вынесена в отдельный Python-пакет. На основе данного Python-пакета построено веб-приложение, являющееся вторым модулем программы, предоставляющее графический интерфейс для ввода исходных данных и представления результатов работы программы. Основой для создания веб-приложения послужил web-фреймворк Django.

С помощью разработанной программы было проведено исследование гипотетической беспроводной сенсорной сети, состоящей из 10 сенсорных узлов, с помехами нескольких уровней. Изучались зависимости основных характеристик качества функционирования БСС таких, как вероятность потери пакета, математические ожидания (м. о.) длительностей пребывания пакетов в узлах БСС и математическое ожидание времени реакции сети, от количества уровней помех.

По результатам исследования были сделаны следующие основные выводы:

- при увеличении количества K уровней помех вероятность потери пакета уменьшается, что приводит к увеличению математических ожиданий длительностей пребывания требований в узлах БСС и в сети в целом;
- из-за уменьшения вероятности потери пакетов вследствие помех при увеличении количества K уровней помех, вероятность потери пакетов вследствие заполненности памяти узлов увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В моделируемых в данной работе БСС не учитываются такие детали, как устройство микроконтроллера и антенны, время работы сенсорного узла от заряда батареи, коллизии требований и перенаправление требований. Основное внимание уделяется помехам связи между сенсорными узлами, вызванными мобильностью узлов.

В выпускной квалификационной работе были рассмотрены математические модели БСС с помехами. Изучены методы анализа открытых сетей массового обслуживания, которые являются математическими моделями БСС. Разработаны алгоритмы методов анализа открытых сетей массового обслуживания с системами типа GI/G/1 и сетей с системами типа GI/G/1/B с прерываниями потоков требований. На основе разработанных алгоритмов была написана программа для анализа БСС. Приведен пример исследования гипотетической беспроводной сенсорной сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Lenin, R. B. Performance analysis of wireless sensor networks using queuing networks / R. B. Lenin, S. Ramaswamy // *Ann. Oper. Res.* – 2013, 233(1). – P. 1–25.
- 2 Hayes, J. Modeling and analysis of telecommunications networks / J. Hayes, T. Ganesh Babu Hoboken // Wiley-Interscience, 2004. 290 p.
- 3 Basagni, S. Algorithms and protocols for wireless sensor networks. / S. Basagni, S. Carosi, C. Petrioli // Wiley-Interscience, 2009. 600 p.
- 4 Вишнеvский, В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В. М. Вишнеvский, М.: Техносфера, 2003. 512 с.
- 5 Gross, D. Fundamentals of queueing theory (4th ed.) / D. Gross, J. Shortle, J. Thompson, C. Harris. // Wiley-Interscience, 2008.
- 6 Bhat, V. N. Renewal approximations of the switched Poisson processes and their applications to queueing systems / V. N. Bhat. // *Journal of the Operational Research Society.* – 1994. – P. 345–353.

- 7 Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. М.: Высшая школа, 1988. 208 с.
- 8 Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. М.: Высшая школа, 1999, 576 с.
- 9 Гихман, И. И. Теория вероятностей и математическая статистика / И. И. Гихман, А. В. Скороход, М. И. Ядренко. К.: Высшая школа, 1979, 408 с.
- 10 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. М.: Высшая школа, 1972. 368 с.
- 11 Митрофанов, Ю. И. Основы теории сетей массового обслуживания / Ю. И. Митрофанов. С.: Издательство Саратовского университета, 1993, 116 с.
- 12 Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. М.: Машиностроение, 1979. 426 с.
- 13 Caldentey, R. Approximations for multi-class departure processes. / R. Caldentey // Queueing Systems. – 2001. – P. 205–212.
- 14 Kerbache, L. The generalized expansion method for open finite queueing networks / L. Kerbache, J. MacGregor Smith // European Journal of Operational Research. – 1987. – P. 448-461.
- 15 Labetoulle, J. Isolation Method in a Network of Queues / J. Labetoulle, G. Pujolle // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1980. – P. 373-381.
- 16 Shaw, Z. Learn Python The Hard Way / Z. Shaw, G. Newman // Addison-Wesley, 2010. 328 p.
- 17 Slatkin, B. Effective Python: 59 Ways To Write Better Python / B. Slatkin // Addison-Wesley, 2015. 227 p.
- 18 Rubio, D. Beginning Django: Web Application Development and Deployment with Python / D. Rubio, 2017. 593 p.
- 19 Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями. В 2 ч. Ч. 2. / под редакцией Б.Г.Цыбакова. М.: Издательство «Мир», 1979. 600 с.
- 20 Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М.Вишневский. М.: Изд-во «Техносфера», 2003. 506 с.