МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Е.В. Глушак

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

к практическим занятиям

по дисциплине

«Моделирование сетей и систем инфокоммуникаций»

Анализ параметров функционирования

беспроводной сенсорной сети

Учебно-методическое пособие

Самара, 2024

УДК 004.724.4
ББК 3288
Г555

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ Протокол №__ от __.__.2024 г.

Рецензент:
Доцент кафедры ИСТ ФГБОУ ВО ПГУТИ,
к.т.н., доцент Пальмов С.В.

Глушак Е.В.
Г555 Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине «Технологии обеспечения QoS в пакетных сетях»: учебно-методическое пособие / Е.В. Глушак, А.А. Вороной – Самара: ПГУТИ, 2024. – 37 с.

Учебно-методическое пособие содержит методические указания для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Технологии обеспечения QoS в пакетных сетях». Разработано в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.02 *«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»* и предназначено для студентов магистратуры очной и заочной форм обучения для подготовки к практической работе по дисциплине «Технологии обеспечения QoS в пакетных сетях». Также может быть рекомендовано в качестве дополнительной литературы студентам очной формы обучения направления 10.05.02 *«Информационная безопасность телекоммуникационных систем», профиль «Управление безопасностью телекоммуникационных систем и сетей»* по дисциплине «Защита цепей электропитания инфокоммуникационных систем».

ISBN

© Глушак, Е.В. 2024
© Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024

Содержание

Введение ……. 4
Практическая работа №1 «Анализ передачи данных в пакетных сетях»…… 5
Практическая работа №2 «Расчет задержек передачи данных в пакетных сетях»…….. 18
Практическая работа №3 «Расчет влияния «скрытого узла» на параметры пакетной сети»……..... 29
Практическая работа №4 «Определение зависимостей данных объединённых сенсоров»……. 33

Введение

Целью цикла практических занятий по дисциплине «Технологии обеспечения QoS в пакетных сетях» по направлению подготовки бакалавров 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Системы, сети и устройства телекоммуникаций») является привитие умений и навыков практической деятельности определения показателей QoS в пакетных сетях.

Задачи практических занятий:

– закрепление, углубление, расширение знаний студентов при решении конкретных практических задач;

– овладение новыми методами и методиками расчета характеристик функционирования пакетных сетей;

– выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения практических заданий;

– обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

По характеру выполняемых студентами заданий практические занятия относятся к аналитическим, которые состоят из методов расчета характеристик функционирования сенсорных сетей.

В результате выполнения практических занятий обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1. Знать существующие методы расчетов характеристик пакетных сетей (ПК – 1), методы и подходы к формированию планов исследования пакетной сети (ПК-3).

2. Уметь осуществлять поиск, анализировать и оценивать полученные данные (ПК – 1), анализировать и систематизировать полученные результаты (ПК – 3).

3. Владеть способностью выбирать методы экспериментальной работы с пакетными сетями (ПК – 1), владеть навыками по выработке и внедрению научно-обоснованных решений по оптимизации сети связи на основе полученных данных (ПК-3).

Контроль знаний осуществляется с помощью контрольных вопросов, приведенных в методических указаниях, и проверки содержания отчета с выполненными индивидуальными заданиями по каждому практическому занятию.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

АНАЛИЗ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПАКЕТНЫХ СЕТЯХ

1 ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

Изучение принципов передачи данных в пакетных сетях

2 ФОРМА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Практическое занятие по месту проводится в аудиторной или дистанционной форме, по форме выполнения в виде индивидуального контрольного задания. Занятие проводится в течение 4 акад. часов.

3 ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ

1. Изучить рекомендованную литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

4 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков А.В. Интернет вещей [Электронный ресурс]: учеб. пособие по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» 11.03.02 - бакалавриат и 11.04.02 - магистратура / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков; ПГУТИ, Каф. АЭС. Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2015. - 135 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Roslyakov_Vanyashin_Grebeshkov_Internet_veschej.pdf

2. Ермолаев, С.Ю. Беспроводные сенсорные сети [Электронный ресурс]: метод. указания по выполнению лаб. работ / С. Ю. Ермолаев; ПГУТИ, Кафедра МСИБ). - Самара: ПГУТИ, 2018. - 84 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Ermolaev_Besprovodnye_sensornye_seti_metod_ukazaniya_po_vypolneniyu_lab_rabot_2018.pdf

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сенсорная сеть?
2. Что такое беспроводная сенсорная сеть?
3. Что показывает QoS в сенсорной сети?
4. Перечислите примеры практического применения беспроводных сенсорных сетей.
5. Что такое потери пакетов?
6. От чего зависят потери пакетов в сети?

7. Что такое задержка в сети?

8. От чего зависит время задержки в сети?

9. Что такое пропускная способность?

10. От чего зависит пропускная способность сети?

11. Что такое работоспособность узла в сети?

12. Как определить вероятность работоспособности *j* -го узла на заданный момент времени *t*.

13. Как определить вероятность работоспособности источника питания (батареи) узла.

14. Что такое безуспешная передача пакетов в сети?

15. Как определить интенсивность потока событий безуспешных передач пакета *q* -ым узлом в адрес *j* -го узла.

16. Что показывает параметр $P_{dj}^{(bat)}(t)$?

17. Как рассчитать величину $P_{dj}^{(bat)}(t)$?

18. От каких параметров зависит величина $P_{dj}^{(bat)}(t)$ и в каких единицах измеряется?

6 ЗАДАНИЯ

6.1 Задание 1

Изучить принципы передачи данных в сенсорных сетях, произвести расчеты характеристик сенсорной сети. В таблицах 1 и 2 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Требуется:

1. Определить интенсивность потока событий λ_i, соответствующих безуспешным попыткам передачи пакета *i*-ым узлом.

2. Рассчитать математическое ожидание количества попыток передачи пакета от *i* -го узла *j* -му для успешного приема.

3. Рассчитать вероятность передачи пакета с первой попытки.

4. Рассчитать вероятность передачи пакета с *k* -ой попытки.

5. Рассчитать вероятность непередачи *i* -ым узлом пакета тем узлам, которые находятся выше *j* -го в его таблице маршрутизации.

6. Определить время, затрачиваемое узлом непосредственно на процесс передачи (приема) пакета фиксированной длинны.

7. Определить период времени, в течение которого возможна передача очередного пакета *i* –ым узлом в адрес *j* –го.

Таблица 1

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	P_{dj}	λ_{ij}	N_a	P_{cij}	$P_w^{(k)}(\tau_j)$	p_{iz}	k
1	0,76	180	4	0,81	0,84	0,76	1
2	0,77	178	4	0,82	0,75	0,77	2
3	0,87	156	4	0,83	0,90	0,87	3
4	0,81	144	4	0,84	0,93	0,90	4
5	0,82	198	4	0,75	0,92	0,93	1
6	0,83	196	4	0,90	0,91	0,92	2
7	0,84	180	4	0,93	0,76	0,91	3
8	0,75	178	4	0,92	0,77	0,76	4
9	0,90	156	4	0,91	0,87	0,77	1
10	0,93	144	4	0,76	0,90	0,87	2
11	0,92	198	4	0,77	0,93	0,81	3
12	0,91	196	4	0,87	0,92	0,82	4
13	0,76	180	4	0,81	0,91	0,76	1
14	0,77	178	4	0,82	0,76	0,77	2
15	0,87	156	4	0,76	0,77	0,87	3
16	0,81	144	4	0,77	0,87	0,76	4
17	0,82	198	4	0,87	0,81	0,77	1
18	0,83	196	4	0,81	0,82	0,87	2
19	0,84	180	4	0,82	0,76	0,91	3
20	0,75	178	4	0,83	0,77	0,76	4
21	0,90	156	4	0,84	0,87	0,77	1
22	0,93	144	4	0,75	0,81	0,87	2
23	0,92	198	4	0,76	0,82	0,90	3
24	0,91	196	4	0,77	0,90	0,93	4
25	0,76	156	4	0,87	0,93	0,92	1
26	0,77	144	4	0,81	0,92	0,91	2
27	0,87	198	4	0,82	0,91	0,87	3
28	0,81	196	4	0,83	0,76	0,81	4
29	0,82	180	4	0,84	0,77	0,82	1
30	0,83	178	4	0,75	0,87	0,90	2
31	0,84	180	4	0,82	0,76	0,91	3
32	0,75	178	4	0,83	0,77	0,76	4
33	0,90	156	4	0,84	0,87	0,77	1
34	0,93	144	4	0,75	0,81	0,87	2
35	0,84	180	4	0,82	0,76	0,91	3

Таблица 2

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	L_p	R	Λ_{o_i}	j	$\overline{T}_w$	T_{wz}
1	140	36	135	1	1	2
2	142	40	260	2	1	3
3	140	34	160	3	2	3
4	142	32	180	4	3	2
5	140	44	182	1	3	3
6	142	36	134	2	2	1
7	140	40	135	3	3	1
8	142	34	260	4	1	1
9	140	32	160	1	1	1
10	142	44	180	2	1	2
11	140	36	182	3	1	3
12	142	40	134	4	2	3
13	140	34	135	1	3	2
14	142	32	260	2	3	2
15	140	44	160	3	2	3
16	142	36	180	4	3	3
17	140	40	182	1	1	2
18	142	34	134	2	1	3
19	140	32	135	3	1	1
20	142	44	260	4	1	1
21	140	36	160	1	2	1
22	142	40	180	2	3	1
23	140	34	182	3	3	2
24	142	32	134	4	2	3
25	140	44	135	1	3	3
26	142	36	260	2	1	2
27	140	40	160	3	1	2
28	142	34	180	4	1	3
29	140	32	182	1	1	3
30	142	44	134	2	2	2
31	140	34	135	1	3	2
32	142	32	260	2	3	2
33	140	44	160	3	2	3
34	140	34	135	1	3	2
35	142	32	260	2	3	2

6.2 Задание 2

Произвести расчеты параметров работоспособности сенсорной сети. В таблице 3 приведены варианты заданий.

Таблица 3

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	λ_f	a	b	$\overline{T}_{dc}^{(nom)}$	T_L	$\overline{n}_{qj}$	λ_{qj}	$\overline{\lambda}_j$	Λ_{I_j}	T_{serv}	Λ_{o_j}
1	0,24	5	10	240	2	0,43	5	0,5	0,3	5	0,3
2	0,36	3	7	234	3	0,14	6	0,3	0,4	6	0,4
3	0,34	4	8	256	4	0,25	3	0,4	0,2	3	0,2
4	0,13	2	10	276	5	0,24	4	0,2	0,5	4	0,5
5	0,28	3	8	260	3	0,36	6	0,5	0,3	6	0,3
6	0,43	4	6	278	4	0,34	7	0,3	0,4	7	0,4
7	0,14	5	10	245	2	0,13	4	0,4	0,2	4	0,2
8	0,25	3	7	273	3	0,28	5	0,2	0,5	5	0,5
9	0,24	4	8	240	4	0,43	5	0,5	0,3	5	0,3
10	0,36	2	10	234	5	0,14	6	0,3	0,4	6	0,4
11	0,34	3	8	256	3	0,25	3	0,4	0,2	3	0,2
12	0,13	4	6	276	4	0,24	4	0,2	0,5	4	0,5
13	0,28	5	10	260	2	0,36	6	0,5	0,3	6	0,3
14	0,43	3	7	278	3	0,43	7	0,3	0,4	7	0,4
15	0,14	4	8	245	2	0,14	4	0,4	0,2	4	0,2
16	0,25	2	10	273	3	0,25	5	0,2	0,5	5	0,5
17	0,24	3	8	240	4	0,24	5	0,5	0,3	5	0,3
18	0,36	4	6	234	5	0,36	6	0,3	0,4	6	0,4
19	0,34	5	10	256	3	0,34	3	0,4	0,2	3	0,3
20	0,13	3	7	276	4	0,13	4	0,2	0,5	4	0,4
21	0,28	4	8	260	2	0,28	6	0,5	0,3	6	0,2
22	0,43	2	10	278	3	0,43	7	0,3	0,4	7	0,5
23	0,14	3	8	245	4	0,14	4	0,4	0,2	4	0,3
24	0,25	4	6	273	5	0,25	5	0,2	0,5	5	0,4
25	0,24	5	10	240	3	0,24	5	0,5	0,3	5	0,2
26	0,36	3	7	234	4	0,36	6	0,3	0,4	6	0,5
27	0,34	4	8	256	2	0,43	3	0,4	0,2	3	0,3
28	0,13	2	10	276	3	0,14	4	0,2	0,5	4	0,4
29	0,28	3	8	260	2	0,43	6	0,4	0,2	6	0,3
30	0,43	4	6	278	3	0,14	7	0,2	0,5	7	0,4
31	0,28	4	8	260	2	0,28	6	0,5	0,3	6	0,2
32	0,43	2	10	278	3	0,43	7	0,3	0,4	7	0,5
33	0,14	3	8	245	4	0,14	4	0,4	0,2	4	0,3
34	0,25	4	6	273	5	0,25	5	0,2	0,5	5	0,4
35	0,24	5	10	240	3	0,24	5	0,5	0,3	5	0,2

Необходимо:

1. Определить вероятность работоспособности j -го узла на заданный момент времени t.

2. Определить вероятность работоспособности источника питания (батареи) узла.

3. Определить интенсивность потока событий безуспешных передач пакета q -ым узлом в адрес j -го узла.

7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1 Содержание отчета по заданию 1

1. Расчет интенсивности потока событий λ_i, соответствующих безуспешным попыткам передачи пакета i-ым узлом.

2. Расчет математического ожидания количества попыток передачи пакета от i -го узла j -му для успешного приема.

3. Расчет вероятности передачи пакета с первой попытки.

4. Расчет вероятности передачи пакета с k -ой попытки.

5. Расчет вероятности непередачи i-ым узлом пакета тем узлам, которые находятся выше j -го в его таблице маршрутизации.

6. Расчет времени, которое затрачивается узлом непосредственно на процесс передачи (приема) пакета фиксированной длинны.

7.2 Содержание отчета по заданию 2

1. Расчет вероятности работоспособности j -го узла на заданный момент времени t.

2. Расчет вероятности работоспособности источника питания (батареи) узла.

3. Расчет интенсивности потока событий безуспешных передач пакета q -ым узлом в адрес j -го узла.

8 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

8.1 Определения и понятия сенсорной сети

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой локальные вычислительные сети, предназначенные для решения задач мониторинга, управления ресурсами и процессами. БСС состоят из миниатюрных

вычислительных устройств – узлов, снабженных сенсорами (датчиками температуры, давления, освещенности, уровня вибрации, местоположения и т.п.), приемопередатчиками сигналов, работающими в заданном радиодиапазоне, и автономным источником питания.

Беспроводные сенсорные сети можно определить, как самонастраивающиеся и не требующие инфраструктуры беспроводные сети для мониторинга физических условий или условий окружающей среды, таких как температура, звук, вибрация, давление, движение или загрязняющие вещества, и совместной передачи своих данных через сеть в основное местоположение или приемник, где данные можно наблюдать и проанализирован.

Можно получить необходимую информацию из сети, вводя запросы и собирая результаты. Беспроводной сенсорный узел оснащен чувствительными и вычислительными устройствами, радиопередатчиками и силовыми компонентами. Отдельные узлы в беспроводной сенсорной сети по своей сути ограничены в ресурсах: они имеют ограниченную скорость обработки, емкость хранилища и пропускную способность связи. После развертывания сенсорных узлов они отвечают за самоорганизующуюся соответствующую сетевую инфраструктуру часто с многопереходной связью с ними. Затем бортовые датчики начинают собирать интересующую информацию. Беспроводные сенсорные устройства также отвечают на запросы, отправляемые с «контрольного узла», для выполнения конкретных инструкций или предоставления образцов датчиков. Режим работы сенсорных узлов может быть либо непрерывным, либо управляемым событиями.

Беспроводные сенсорные сети позволяют создавать новые приложения и требуют нетрадиционных парадигм для разработки протоколов из-за ряда ограничений. В связи с требованием низкой сложности устройства в сочетании с низким энергопотреблением (т.е. длительным сроком службы сети) необходимо найти надлежащий баланс между возможностями связи и обработки сигналов/данных.

Это мотивирует огромные усилия в исследовательской деятельности, процессе стандартизации и промышленных инвестициях в эту область, начиная с последнего десятилетия. В настоящее время со временем большая часть исследований по БСС была сосредоточена на разработке энергоэффективных и вычислительно эффективных алгоритмов и

протоколов, а область применения была ограничена простыми приложениями мониторинга и отчетности, ориентированными на данные.

8.2 Надежность сенсорной сети

Надежность БСС определяется многими факторами, наиболее существенными из которых являются: надежность аппаратного и программного обеспечения узлов, область развертывания сети, взаимное расположение узлов, период регламентного обслуживания сети, интенсивность сбора и передачи информации, размер передаваемых пакетов информации.

Следует отметить, что в настоящее время исследования в области БСС производятся в основном коммерческими организациями и носят закрытый характер. В данной практической работе изучим доступную теоретическую базу для подобных решений, рассмотрим и рассчитаем параметры, предназначенные для использования их в алгоритме оценивания надежности БСС и обеспечивающие учет перечисленных выше факторов.

Сенсорная сеть состоит из сенсорного узла, ретранслятора и базового устройства (рис. 1).

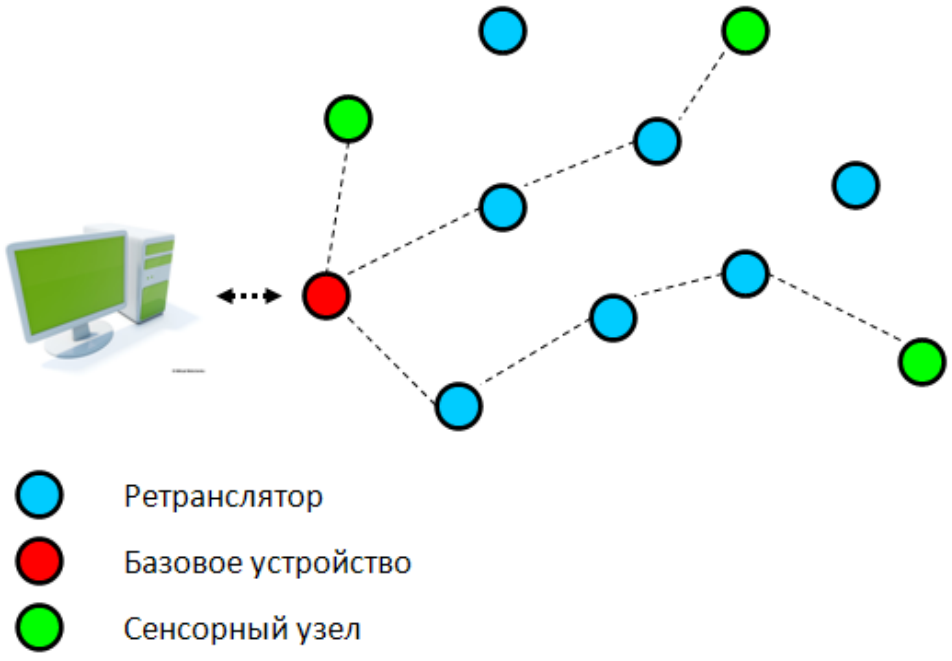

Рис. 1 – Пример топологии сенсорной сети

Данная модель может быть описана выражением, количественно определяющим вероятность p_{ij} успешной передачи пакета от i -го узла БСС j -му. Предполагается, что отправка пакетов i-ым узлом в процессе работы сети образует простейший поток событий с интенсивностью ΛI_i, где I_i –

множество узлов, которые могут передать пакет в адрес i -го узла; O_i – множество узлов, которым может быть передан пакет от i -го узла (рис. 1).

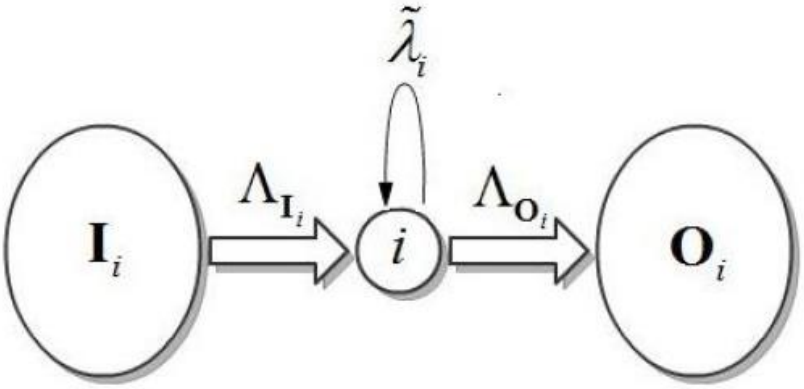

Рис. 2 - Потоки событий на i -ом узле БСС

Величиной λ_i на рис. 1 обозначена интенсивность потока событий, соответствующих безуспешным попыткам передачи пакета i-ым узлом. Эту величину можно определить следующим образом:

$$\tilde{\lambda}_i = \sum_{j \in O_i} (\bar{n}_{ij} - 1)\lambda_{ij} \qquad (1)$$

где $\bar{n}_{ij}$ - математическое ожидание количества попыток передачи пакета от i -го узла j -му, необходимое для успешного его приема:

$$\bar{n}_{ij} = \sum_{x=1}^{+\infty} \left(x \cdot P_{ij}^{(1)} \left(1 - P_{ij}^{(1)}\right)^{x-1} \right) = \frac{1}{P_{ij}^{(1)}} \qquad (2)$$

где $P_{ij}^{(1)}$ - вероятность передачи пакета с первой попытки от i -го узла j –му (%);

λ_{ij} - интенсивность передачи пакетов от i -го узла сети j -му.

Таким образом, из (1) и (2) можно записать:

$$\tilde{\lambda}_i = \sum_{j \in O_i} \frac{\lambda_{ij}}{P_{ij}^{(1)}} \qquad (3)$$

Алгоритм расчета вероятности p_{ij} основан на одном из возможных принципов работы механизма маршрутизации в БСС. Пусть на каждом i -ом узле имеется ограниченная таблица маршрутизации (определяющая множество O_i соседних с i -ым узлов, которым им может быть передан пакет данных). Записи в этой таблице ранжированы по предпочтительности использования каждого направления при передаче пакета.

Для каждого нового пакета, поступающего на *i*-ый узел и нуждающегося в дальнейшей ретрансляции, делается максимум N_a попыток его передачи *j*-му узлу из множества O_j , указанному первым в таблице маршрутизации *i*-го. Если все попытки оказались неудачными, то из множества O_i выбирается *j*+1 узел, соответствующий следующей записи в таблице маршрутизации, и *i*-ый узел пытается передать пакет ему, и т.д.

Пакет, который до поступления на *i*-ый узел следующего пакета не удалось передать ни одному из узлов, указанных в таблице, удаляется из системы (теряется).

Ёмкость таблицы маршрутизации, определяющая мощность множества O_j для *i* -го узла, как и максимальное количество повторных попыток передачи N_a не регламентируются стандартами и при построении сети могут быть выбраны произвольно.

Таким образом, выражение для расчета p_{ij} может быть записано следующим образом:

$$p_{ij} = Q_j \sum_{k=1}^{N_a} P^{(k)} P_w^{(k)} \left(\tau_j \right) \tag{4}$$

где Q_j - вероятность (%) непередачи *i* -ым узлом пакета тем узлам, которые находятся выше *j* -го в его таблице маршрутизации:

$$Q_j = \begin{cases} 1, j = 1 \\ \prod_{z=1}^{j-1} \left(1 - p_{iz}\right), j > 1 \end{cases}, j = 1...\left|O_i\right| \tag{5}$$

N_a – максимальное количество неудачных попыток передачи пакета одному узлу;

$P^{(k)}$ - вероятность передачи пакета с *k* -ой попытки (%):

$$P^{(k)} = \left(1 - P^{(1)}\right)^{k-1} P^{(1)}, k = 1...N_a \tag{6}$$

где $P^{(1)}$ - вероятность передачи пакета с первой попытки:

$$P^{(1)} = P_{dj} P_{cij} (1 - P_{hj}) \tag{7}$$

P_{dj} - вероятность работоспособности (надежность) *j* -го узла БСС;

P_{cij} - надежность коммуникации между узлами, определяемая параметрами радиоканала;

$P_w^{(k)}(\tau_j)$ - вероятность того, что узел сможет осуществить k попыток передачи пакета за время (τ_j).

Эта вероятность определяется механизмом конкурентного доступа к среде, используемым в БСС и регламентированным стандартом IEEE 802.15.4.

Очевидно, что успешная передача пакета может быть осуществлена только при выполнении условия:

$$\sum_{z=1}^{k} T_{wz} + kT_L \le \tau_j \qquad (8)$$

T_{wz} - время ожидания узлом начала передачи перед осуществлением z -ой попытки из k возможных, обусловленное конкурентным доступом к среде (сек);

T_L - время, затрачиваемое узлом непосредственно на процесс передачи (приема) пакета фиксированной длинны L_p байт, $T_L = \frac{L_p}{R}$, где R - скорость передачи данных, байт/сек;

τ_j - период времени, в течение которого возможна передача очередного пакета i –ым узлом в адрес j -го.

Величина τ_j различна для каждого j -го узла из множества O_j (таблицы маршрутизации i -го узла) и определяется на основе интенсивности потоков приема и передачи пакетов на i-ом узле, длины пакетов, допустимого количества попыток передачи и среднего времени ожидания узлом возможности выхода в эфир:

$$\tau_j = T_s - (j-1)\left(\overline{T}_w + T_L\right) N_a,\ j \in O_i \qquad (9)$$

T_s - среднее значение времени, которое может быть затрачено i -ым узлом на передачу одного из пакетов ретранслируемого им потока:

$$T_s = \frac{1}{\Lambda_{o_i}} - T_L \qquad (10)$$

Λ_{o_i} - интенсивность передачи пакетов i -ым узлом в адрес узлов из множества O_i;

$\overline{T}_w$ - среднее значение времени ожидания узлом начала передачи пакета.

Таким образом, учитывая (10), выражение для определения вероятности $P_w^{(k)}\left(\tau_j\right)$ можно записать в виде:

$$P_w^{(k)}\left(\tau_j\right) = P^{(k)}\left(\sum_{z=1}^{k} T_{wz} \le \tau_j - kT_L\right) \tag{11}$$

где правая часть представляет собой функцию распределения суммарного времени ожидания узлом начала передачи, обусловленного конкурентным доступом к среде, для *k* попыток.

8.3 Работоспособность сети

Определим регламент обслуживания БСС как регулярный с периодом T_{serv} контроль и замену неисправных узлов. Ограничение на надежность узлов БСС обусловлено разрядом их батареи в процессе работы сети, а также возможностью случайного выхода их из строя, вызванного отказом аппаратного или программного обеспечения, внешними воздействиями и т.д.

Запишем выражение для определения вероятности работоспособности *j* -го узла на заданный момент времени *t* в виде:

$$P_{dj}(t) = \left(1 - Q_{dj}^{(rnd)}\left(t\right)\right) P_{dj}^{(bat)}\left(t\right) \tag{12}$$

$Q_{dj}^{(rnd)}$ - вероятность случайных отказов *j* -го узла, закон распределения которых можно в первом приближении принять экспоненциальным [4]:

$$Q_{dj}^{(rnd)} = 1 - e^{-\lambda_f} \tag{13}$$

где λ_f - интенсивность случайных отказов. Данная величина выбирается исходя из эмпирических соображений на основе статистики отказов узлов в функционирующих БСС.

$P_{dj}^{(bat)}\left(t\right)$ - вероятность работоспособности источника питания (батареи) узла. Для описания надежности источника питания примем упрощенную модель, подразумевающую его равномерный разряд в течение времени T_{dcj} . Основное потребление энергии узлом происходит при активной работе его приемника или передатчика, поэтому время разряда батареи будет обратно пропорционально длине пакетов и совокупной интенсивности их приема/передачи Λ_{Σ_j} , рассчитанной с учетом неудачных попыток:

$$T_{dcj} = \frac{\overline{T}_{dc}^{(nom)}}{\Lambda_{\sum_j} T_L} \tag{14}$$

$\overline{T}_{dc}^{(nom)}$ - среднее время непрерывной работы узла до разряда батареи при приеме/передаче данных с максимально возможной плотностью (суток),

T_L – время трансляции пакета;

$$\Lambda_{\sum_j} = \Lambda_{I_j} + \Lambda_{o_j} + \overline{\lambda}_j + \sum_{q \in I_j} \tilde{\lambda}_q^{(j)} \tag{15}$$

$\tilde{\lambda}_q^{(j)}$ - интенсивность потока событий безуспешных передач пакета q -ым узлом в адрес j -го узла, ее величина может быть получена из (16):

$$\tilde{\lambda}_q^{(j)} = \left(\overline{n}_{qj} - 1\right)\lambda_{qj} \tag{16}$$

Будем полагать, что по истечении времени T_{dcj} с момента замены батареи узел теряет работоспособность с вероятностью 1. Замена разряженных батарей узлов осуществляется с периодичностью T_{serv} (одновременно для всех узлов). Таким образом, для величины $P_{dj}^{(bat)}\left(t\right)$ можно записать:

$$P_{dj}^{(bat)}\left(t\right) = \begin{cases} 1 \,|\, T_{serv} a \le t < \left(T_{serv} \cdot a + T_{dcj}\right) \\ 0 \,|\, \left(T_{serv} \cdot a + T_{dcj}\right) \le t < T_{serv}\left(a + b + 1\right) \end{cases} \tag{17}$$

где a - количество прошедших периодов регламентных работ с начала работы сети до последней замены источника питания,

b – количество полных периодов регламентных работ, прошедших с момента замены источника питания до отказа узла.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2
РАСЧЕТ ЗАДЕРЖЕК ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПАКЕТНЫХ СЕТЯХ

1 ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

Изучение принципов передачи данных в пакетных сетях, расчет задержек при передаче данных

2 ФОРМА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Практическое занятие по месту проводится в аудиторной или дистанционной форме, по форме выполнения в виде индивидуального контрольного задания. Занятие проводится в течение 4 акад. часов.

3 ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ

1. Изучить рекомендованную литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

4 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков А.В. Интернет вещей [Электронный ресурс]: учеб. пособие по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» 11.03.02 - бакалавриат и 11.04.02 - магистратура / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков; ПГУТИ, Каф. АЭС. Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2015. - 135 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Roslyakov_Vanyashin_Grebeshkov_Internet_veschej.pdf

2. Ермолаев, С.Ю. Беспроводные сенсорные сети [Электронный ресурс]: метод. указания по выполнению лаб. работ / С. Ю. Ермолаев; ПГУТИ, Кафедра МСИБ). - Самара: ПГУТИ, 2018. - 84 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Ermolaev_Besprovodnye_sensornye_seti_metod_ukazaniya_po_vypolneniyu_lab_rabot_2018.pdf

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависят задержка при передаче данных в сети?
2. От чего зависит вероятность потери пакета?
3. От чего зависит среднее время доставки пакета?
4. Что такое работоспособность узла в сети?
5. Что такое пропускная способность?
6. Как оценить QoS в сенсорной сети?
7. Как рассчитать пропускную способность сети БСС?

6 ЗАДАНИЯ

6.1 Задание 1

Изучить принципы передачи данных в сенсорных сетях, произвести расчеты задержек и пропускной способности сети. В таблице 4 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Таблица 4

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	$\Delta t_д$	$\Delta t_м$	$\Delta t_{ож}$	$\Delta t_{обр}$	$\Delta t_{пер}$	<S>	n	$N_{пот}$	$N_{общ}$
1	0,1	0,2	0,23	0,1	0,1	12	15	2	20
2	0,2	0,3	0,31	0,2	0,2	13	11	1	30
3	0,3	0,1	0,54	0,3	0,3	15	10	2	35
4	0,4	0,9	0,82	0,1	0,1	10	13	1	20
5	0,5	0,8	0,32	0,9	0,9	11	16	1	20
6	0,1	0,5	0,54	0,8	0,8	9	15	1	30
7	0,2	0,2	0,23	0,2	0,2	14	17	1	20
8	0,3	0,3	0,31	0,3	0,3	16	13	2	30
9	0,4	0,1	0,54	0,1	0,4	16	14	1	35
10	0,5	0,9	0,82	0,9	0,5	17	12	1	20
11	0,2	0,8	0,32	0,8	0,2	12	13	1	20
12	0,1	0,5	0,54	0,5	0,3	33	13	2	30
13	0,2	0,2	0,23	0,2	0,4	13	15	3	20
14	0,3	0,3	0,31	0,3	0,5	13	13	4	30
15	0,4	0,1	0,54	0,1	0,2	15	10	1	35
16	0,5	0,9	0,82	0,9	0,2	13	11	2	20
17	0,2	0,8	0,32	0,8	0,3	10	13	3	20
18	0,3	0,5	0,54	0,5	0,4	11	13	1	30
19	0,4	0,2	0,23	0,2	0,5	13	13	1	35
20	0,5	0,3	0,31	0,3	0,2	15	15	1	20
21	0,2	0,1	0,54	0,1	0,5	10	13	1	20
22	0,2	0,9	0,82	0,9	0,2	11	10	2	30
23	0,3	0,8	0,32	0,8	0,3	9	11	3	20
24	0,4	0,5	0,54	0,5	0,1	13	10	4	30
25	0,5	0,2	0,23	0,2	0,9	23	9	1	35
26	0,2	0,3	0,31	0,3	0,8	11	8	2	20
27	0,3	0,1	0,54	0,1	0,5	23	6	3	20
28	0,4	0,9	0,82	0,9	0,2	4	12	1	30
29	0,3	0,8	0,32	0,8	0,3	12	11	1	20
30	0,4	0,5	0,54	0,5	0,1	11	10	1	30
31	0,5	0,3	0,31	0,3	0,2	15	15	1	20

Продолжение таблицы 4

№ варианта	$\Delta t_д$	$\Delta t_м$	$\Delta t_{ож}$	$\Delta t_{обр}$	$\Delta t_{пер}$	<S>	n	$N_{пот}$	$N_{общ}$
32	0,2	0,1	0,54	0,1	0,5	10	13	1	20
33	0,2	0,9	0,82	0,9	0,2	11	10	2	30
34	0,3	0,8	0,32	0,8	0,3	9	11	3	20
35	0,5	0,3	0,31	0,3	0,2	15	15	1	20

Требуется:

1. Рассчитать общее время задержки в сети,
2. Рассчитать общую пропускную способность сети,
3. Рассчитать общие потери пакетов в сети.

6.2 Задание 2

Изучить принципы передачи данных в сенсорных сетях, произвести расчеты потерь пакетов, задержек при передаче данных, а также времени доставки пакетов. В таблице 5 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Таблица 5

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	$\bar{L}$	br_i	$\bar{a}_i$	σ_{ai}^2	σ_{si}^2	ρ	n_b	C_a^2	C_s^2	k
1	120	15	2	2	4	0,98	4	3	5	1
2	122	16	1	4	2	0,95	2	5	3	1
3	132	17	1	2	4	0,93	3	2	3	1
4	114	14	2	4	2	0,91	1	3	2	2
5	116	15	2	2	4	0,96	1	2	1	2
6	118	14	2	4	2	0,97	2	1	2	1
7	120	13	2	2	4	0,98	3	3	2	2
8	120	16	1	4	2	0,89	4	2	2	3
9	122	18	1	2	4	0,98	3	1	3	3
10	132	15	1	4	2	0,95	2	3	1	1
11	114	16	2	2	4	0,93	3	3	5	1
12	116	17	1	4	2	0,91	4	5	3	1
13	118	14	1	2	4	0,96	4	2	3	2
14	120	15	2	4	2	0,97	4	3	2	2
15	120	14	2	2	4	0,98	2	2	1	1
16	122	13	2	4	2	0,89	3	1	2	2
17	132	16	2	2	4	0,98	1	3	2	3

Продолжение таблицы 5

№ варианта	$\bar{L}$	br_i	$\bar{a}_i$	σ_{ai}^2	σ_{si}^2	ρ	n_b	C_a^2	C_s^2	k
18	114	18	1	4	2	0,95	1	2	2	3
19	116	15	1	2	4	0,93	2	1	3	1
20	118	16	1	4	2	0,91	3	3	1	1
21	120	17	2	2	4	0,96	4	3	5	1
22	120	14	1	4	2	0,97	3	5	3	2
23	122	15	1	2	4	0,98	2	2	3	2
24	132	14	2	4	2	0,89	3	3	2	1
25	114	13	2	2	4	0,98	4	2	1	2
26	116	16	2	4	2	0,95	4	1	2	3
27	118	18	2	2	4	0,93	4	3	2	3
28	120	15	1	4	2	0,91	2	2	2	1
29	120	16	1	2	4	0,96	3	1	3	1
30	122	17	1	4	2	0,97	1	3	1	1
31	122	15	1	2	4	0,98	2	2	3	2
32	132	14	2	4	2	0,89	3	3	2	1
33	114	13	2	2	4	0,98	4	2	1	2
34	116	16	2	4	2	0,95	4	1	2	3
35	122	15	1	2	4	0,98	2	2	3	2

Требуется:

1. Рассчитать задержку при передаче данных на всем маршруте сети,
2. Рассчитать вероятность потери пакета для маршрута доставки,
3. Рассчитать среднее время доставки пакета.

7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1 Содержание отчета по заданию 1

1. Расчет общего времени задержки в сети,
2. Расчет общей пропускной способности сети,
3. Расчет общих потерь пакетов в сети.

7.2 Содержание отчета по заданию 2

1. Расчет задержки при передаче данных на всем маршруте сети,
2. Расчет вероятности потери пакета для маршрута доставки,
3. Расчет среднего времени доставки пакета.

8 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

8.1 Расчет задержек в сенсорной сети

Беспроводные сенсорные сети можно определить, как самонастраивающиеся и не требующие инфраструктуры беспроводные сети для мониторинга физических условий или условий окружающей среды, таких как температура, звук, вибрация, давление, движение или загрязняющие вещества, и совместной передачи своих данных через сеть в основное местоположение или приемник, где данные можно наблюдать и проанализирован. Беспроводные сенсорные сети позволяют создавать новые приложения и требуют нетрадиционных парадигм для разработки протоколов из-за ряда ограничений. В связи с требованием низкой сложности устройства в сочетании с низким энергопотреблением (т.е. длительным сроком службы сети) необходимо найти надлежащий баланс между возможностями связи и обработки сигналов/данных.

БСС, как показано на рис. 3, состоят из ряда сенсорных узлов, которые плотно расположены либо внутри физического явления, либо очень близко к нему.

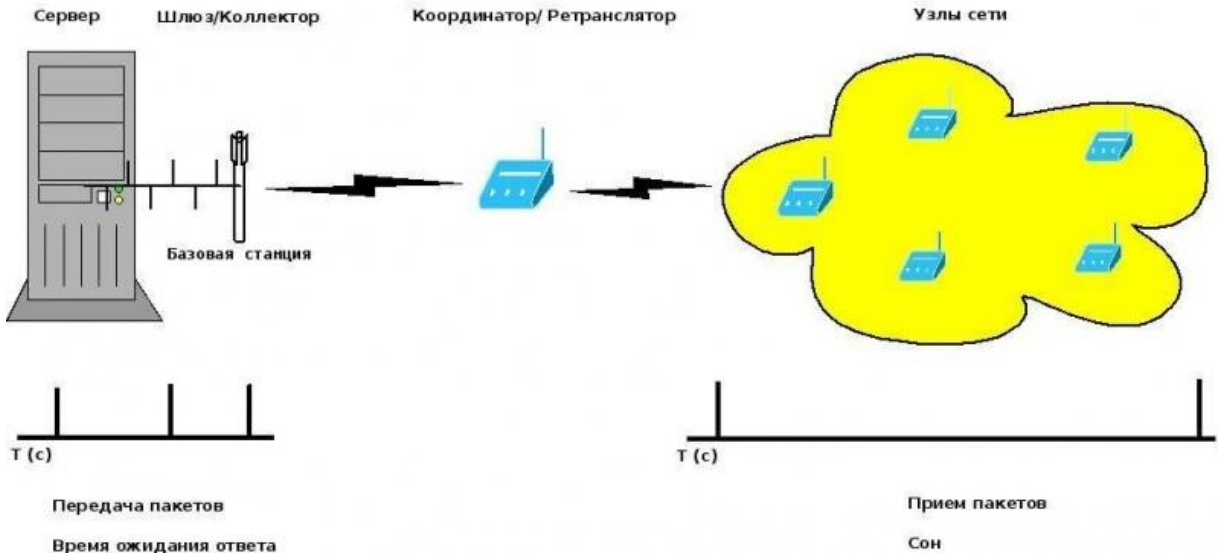

Рис. 3 – Схема работы БСС

Сенсорный узел состоит из:

- аппаратного обеспечения;
- базового программного обеспечения;
- прикладного программного обеспечения.

Выделим критерии, относящиеся к передаче данных в беспроводных сенсорных сетях, по которым можно оценивать качество обслуживания.

1. Задержка. Анализируя задержку в беспроводных сенсорных сетях, необходимо учитывать используемую в сети модель передачи данных. При периодической трансляции данных на базовую станцию задержка будет состоять из времени передачи пакета от узла к узлу, построения маршрута, ожидания узлом свободного канала передачи и, возможно, времени предварительной обработки, осуществляемой на узлах. Когда на узел поступает запрос со станции, задержка равна времени, которое прошло с момента отправки запроса и до получения пакета данных. При событийной модели задержка будет состоять из времени, прошедшего от наступления события, до его получения базовой станцией. Задержка в беспроводных сенсорных сетях зависит от времени передачи и обработки данных на узлах, а также от алгоритма маршрутизации и механизма доступа к среде. В общем виде время задержки можно выразить следующим образом:

$$\Delta t_з = \Delta t_д + \Delta t_м + \sum_n \left(\Delta t_{ож} + \Delta t_{обр} + \Delta t_{пер} \right), \qquad (18)$$

где $\Delta t_д$ - время, требуемое на детектирование события (сек);

$\Delta t_м$ – время построения маршрута (сек);

$\Delta t_{ож}$ – время ожидания свободного канала связи (сек);

$\Delta t_{обр}$ – время обработки пакета на узле (сек);

$\Delta t_{пер}$ – время передачи пакета между узлами (сек);

2. Пропускная способность. Пропускная способность сети определяет количество данных, которые могут быть переданы в единицу времени, и измеряется в битах в секунду. Скорость передачи данных, как и задержка, зависит от выбора маршрута, ресурсов отдельных датчиков и сети в целом. В беспроводных сенсорных сетях количество передаваемых пакетов зависит от специфики задачи. Оно может варьироваться от нескольких пакетов в час до сотен пакетов в секунду. Пропускная способность выражается через количество пакетов, которые узел способен обработать за единицу времени:

$$B = n \cdot \langle S \rangle \ \text{(пак/сек)}, \qquad (19)$$

где n – максимальное количество пакетов, обрабатываемых на узле за 1 с;
$< S >$ – средний размер пакета.

3. Потери. Потери пакетов данных в беспроводных сенсорных сетях на канальном уровне могут возникать из-за коллизий, а на уровне маршрутизации – из-за неправильно построенного маршрута или при выходе

из строя какого-либо узла. Потери выражаются через отношение потерянных пакетов к общему количеству:

$$\eta = \frac{N_{пот}}{N_{общ}}, \qquad (20)$$

где $N_{пот}$ - количество потерянных пакетов;

$N_{общ}$ - общее количество.

4. Время жизни сети. Один из параметров качества обслуживания для беспроводных сенсорных сетей – время, в течение которого сеть сможет обеспечивать передачу данных. Поскольку время работы датчиков ограничено, необходимо минимизировать затраты при установке сети, обработке и, что особенно важно, при передаче данных. На энергетические затраты влияют выбор маршрута, режим прослушивания канала (спящий или активный режим работы сенсора), объем передаваемых данных и др.

5. Покрытие заданной области. Качество обслуживания беспроводной сенсорной сети оценивается относительно того, какая часть области, с которой собираются данные или ведется контроль, находится в радиусе действия сенсоров. Таким образом, определяется полнота информации, которой потенциально располагает система. Этот параметр может быть выражен в количестве *n* сенсоров, необходимых для покрытия области площадью S с минимально допустимым уровнем сигнала.

6. Устойчивость к изменению топологии. Как уже упоминалось, беспроводная сенсорная сеть должна функционировать в условиях изменения топологии: при выходе узла из строя, по истечении срока его действия, при добавлении новых или перемещении существующих узлов. Для беспроводных сенсорных сетей устойчивость является одним из основных критериев качества обслуживания, поскольку они могут быть распределены таким образом, что контроль каждого узла, замена батареи или починка невозможны или сильно затруднены. Количественно эта характеристика может выражаться во времени, которое прошло с момента изменения топологии сети до восстановления ее функционирования. На характеристику устойчивости в первую очередь влияет то, как организована маршрутизация в сети, а также способ получения узлами сети информации друг о друге (таблицы маршрутизации, периодическая нотификация соседних узлов).

8.2 Пропускная способность сети

Подход к оцениванию QoS основан на представлении функционирования БСС как марковского процесса, и предполагает использование модели надежности передачи данных между двумя узлами БСС, которая, в свою очередь, представляет собой композицию моделей надежности узлов, коммуникаций между ними и механизма их доступа к среде. Расчетная модель надежности передачи количественно определяет вероятность успешной передачи пакета, а также расчета задержек при передаче.

Показатели качества функционирования БСС, такие как вероятность потерь, пропускной способность, задержка взаимозависимы и показывают насколько эффективно функционирует сеть. Следовательно, при изменении одного из показателей качества функционирования оно отражается и на других показателях. Беспроводной сенсорный узел оснащен чувствительными и вычислительными устройствами, радиопередатчиками и силовыми компонентами.

Рассмотрим зависимость качества функционирования БСС от связности сети. Связность является мерой взаимосвязи между любым сенсорным узлом и центром обработки и хранения данных. Эта мера может быть описана вероятностью существования маршрута для любого узла сети и ее зависимостью от параметров сети.

Сделаем допущение в том, что маршрут в сети может быть описан как многофазная система массового обслуживания (СМО). Усилим данное допущение тем, что будем полагать, что трафик на каждом из участков маршрута может быть описан моделью простейшего потока. Тогда каждый из участков маршрута можно рассматривать как независимую СМО вида M/G/1.

Тогда время доставки данных через маршрут будет определяться суммой задержек на каждом из его участков. Естественно, что общая величина задержки будет существенно зависеть от длины маршрута.

Таким образом, одним из наиболее значимых факторов, влияющих на показатели обслуживания трафика в БСС, является длина маршрута (количество транзитов или скачков). Модель маршрута с учетом сказанного приведена на рис. 4.

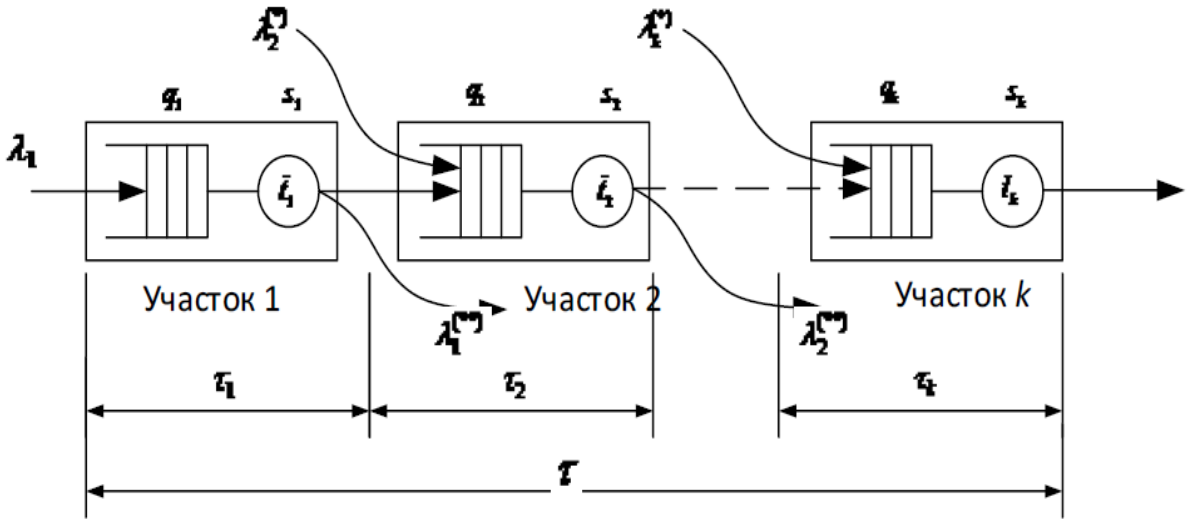

Рис. 4 - Модель маршрута в БСС

Каждый из участков маршрута рассматривается как СМО с одним обслуживающим устройством q_i, (которое имитирует передачу данных по каналу) и одной очередью s. На вход каждой СМО поступает множество потоков трафика от соседних узлов сети, при условии, что интенсивность суммарного трафика на участке существенно меньше пропускной способности канала, можно допустить, что объединение нескольких потоков на входе приводит к тому, что свойства результирующего потока близки к свойствам простейшего потока.

Если задержка доставки данных на одном из участков (на i-м участке) маршрута равна τ_i, то задержка для всего маршрута будет равна (сек):

$$\tau = \sum_{i=1}^{k} \tau_i \qquad (21)$$

где k – количество участков маршрута.

Задержка на каждом из участков маршрута, в такой модели может быть оценена известной математической моделью (формула Полячека- Хинчина).

В общем случае, наряду с указанной моделью могут быть использованы и иные, известные из теории телетрафика аналитические модели, позволяющие, например, оценить вероятность потерь.

Вероятность потери пакета для маршрута доставки, может быть определена следующим образом (%):

$$p = 1 - \prod_{i=1}^{k} (1 - p_i), \qquad (22)$$

где p_i - вероятность потери пакета на участке маршрута (%), которая может быть рассчитана, как:

$$p_i = \frac{1-\rho}{1-\rho^{\frac{2}{C_a^2+C_s^2}(n_b+1)}} \cdot \rho^{\frac{2}{C_a^2+C_s^2}n_b} \qquad (23)$$

где C_a^2 и C_s^2 – квадратичные коэффициенты вариации распределений для входящего потока и времени обслуживания, для *i*-го узла,

n_b – размер буфера,

ρ - загрузка *i*-го узла.

Приближенная оценка среднего времени доставки пакета (сек), если свойства потока на входе участка отличны от свойств простейшего потока может быть получена с помощью выражения:

$$\tau_i = \frac{\rho_i \bar{t}_i}{2(1-\rho_i)} \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}^2 + \sigma_{si}^2}{\bar{t}_i^{\,2}} \right) \left(\frac{\bar{t}_i^{\,2} + \sigma_{si}^2}{\bar{a}_i^2 + \sigma_{si}^2} \right) + \bar{t}_i \qquad (24)$$

где σ_{ai}^2 и σ_{si}^2 - дисперсии интервалов времени между пакетами и времени обслуживания *i*-го узла, соответственно;

$\bar{a}_i$ - среднее значение интервала между пакетами *i*-го узла;

$\bar{t}_i$ - среднее время обслуживания *i*-го узла.

Выражения (23) и (24) позволяют получить лишь приближенную оценку вероятности потерь и среднего времени доставки. Для использования данных выражений должно быть известно среднее время передачи пакета на каждом из участков маршрута $\bar{t}_i$ (сек). Эти оценки зависят от скорости передачи данных на различных участках маршрута и от размера пакетов. Пропускная способность на участках маршрута зависит от различных факторов, в том числе, от условий передачи сигнала, и может быть описана, например, одной из известных моделей затухания.

$$\bar{t}_i = \frac{\bar{L}}{br_i} \qquad (25)$$

где br_i - скорость передачи данных на i-м участке (бит/с);

$\bar{L}$ - среднее значение размера пакета (бит).

Как видно из выражений (21) и (22) показатели качества БСС одним из наиболее существенных факторов является количество участков в маршруте *k*.

Разумеется, если сеть построена по радиальному принципу и все ее узлы находятся в зоне связи друг друга или в зоне связи шлюза, то количество участков будет равно единице и выражения (21) и (22) вырождаются в равенства с учетом выбранной модели задержки или вероятности потерь. Однако в сети, построенной с возможностью транзита трафика, при наличии маршрутов различной протяженности, качество обслуживания будет существенно зависеть от их длины.

Как будет показано ниже, протяженность маршрута зависит от параметров сетевых элементов, плотности узлов сети, обслуживаемой территории. От этих же параметров зависит и связность сети, поэтому традиционные вероятностные и временные показатели качества обслуживания в БСС и связность являются функциями одних и тех же параметров сети связи, что символически можно записать как:

$$\left\{ p_{св}, \bar{p}, \bar{\tau} \right\} = f\left(V\right) \tag{26}$$

где $f\left(V\right)$ - некие функциональные зависимости от вектора параметров сети **V.**

Таким образом, перечень параметров качества функционирования БСС схож с перечнем параметров, традиционно, применяемых для сетей связи общего пользования, с той разницей, что диапазон значений этих параметров может быть существенно шире и определяется конкретными требования, имеющимися при решении прикладной задачи.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ «СКРЫТОГО УЗЛА» НА ПАРАМЕТРЫ ПАКЕТНОЙ СЕТИ

1 ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

Изучение принципов передачи данных в пакетных сетях

2 ФОРМА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Практическое занятие по месту проводится в аудиторной или дистанционной форме, по форме выполнения в виде индивидуального контрольного задания. Занятие проводится в течение 4 акад. часов.

3 ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ

1. Изучить рекомендованную литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

4 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков А.В. Интернет вещей [Электронный ресурс]: учеб. пособие по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» 11.03.02 - бакалавриат и 11.04.02 - магистратура / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков; ПГУТИ, Каф. АЭС. Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2015. - 135 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Roslyakov_Vanyashin_Grebeshkov_Internet_veschej.pdf

2. Ермолаев, С.Ю. Беспроводные сенсорные сети [Электронный ресурс]: метод. указания по выполнению лаб. работ / С. Ю. Ермолаев; ПГУТИ, Кафедра МСИБ). - Самара: ПГУТИ, 2018. - 84 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Ermolaev_Besprovodnye_sensornye_seti_metod_ukazaniya_po_vypolneniyu_lab_rabot_2018.pdf

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить вероятность возникновения коллизий с z «скрытыми» узлами.

2. Как определить вероятности того, что в момент начала передачи пакета i - ым узлом в адрес j -го передача уже осуществляется каким-либо узлом из множества $A_j \setminus A_i$.

3. Как определить вероятности того, что передача начнется за время трансляции пакета.

4. Как определить итоговое соотношение для определения вероятности коллизий?

5. Запишите алгоритм расчета для P_h.

6 ЗАДАНИЯ

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 6 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Необходимо:

1. Определить вероятность возникновения коллизий с z «скрытыми» узлами.

2. Определить вероятности того, что в момент начала передачи пакета i - ым узлом в адрес j -го передача уже осуществляется каким-либо узлом из множества $A_j \setminus A_i$.

3. Определить вероятности того, что передача начнется за время трансляции пакета.

Таблица 6

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	$\tilde{\lambda}_k$	Λ_{O_k}	T_L
1, 15	0,24	0,3	2
2, 16	0,11	0,4	3
3, 17	0,13	0,2	4
4, 18	0,12	0,5	5
5, 19	0,09	0,3	3
6, 20	0,08	0,4	4
7, 21	0,04	0,2	2
8, 22	0,01	0,5	3
9, 23	0,24	0,3	4
10, 24	0,11	0,4	5
11, 25	0,13	0,2	3
12, 26	0,12	0,5	4
13, 27	0,09	0,3	2
14, 28	0,08	0,4	3
15, 29	0,04	0,2	2
16, 30	0,01	0,5	3

7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Расчет вероятности возникновения коллизий с *z* «скрытыми» узлами.

2. Расчет вероятности того, что в момент начала передачи пакета *i* - ым узлом в адрес *j* -го передача уже осуществляется каким-либо узлом из множества $A_j \setminus A_i$.

3. Расчет вероятности того, что передача начнется за время трансляции пакета.

8 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Проблема «скрытых узлов» в сенсорных сетях характерна для распределенных беспроводных сетей необладающих полной связностью. Её проявление состоит в следующем: в процессе передачи пакета *i* -ым узлом в адрес *j* -го узла может также происходить передача пакета узлом, находящимся в радиусе слышимости *j* -го, но за пределами радиуса слышимости *i* -го узла, что приводит к коллизии на *j* -ом узле. Это вызывает задержку передачи, что снижает вероятность успешной доставки пакета.

В связи с особенностями топологии БСС подобные ситуации могут возникать довольно часто, их влияние на надежность БСС усиливается при увеличении сетевого трафика. Обозначим вероятность возникновения описанной коллизии P_h. Соотношение для ее расчета выглядит аналогично формуле сложения вероятностей для совместных событий, каждое из которых состоит в возникновении коллизии передачи пакета *i* -ым узлом и одним из множества $A_j \setminus A_i$:

$$P_h = \sum_{k_1 \in A_j / A_i} P_{h_{k1}} - \sum_{k_1, k_2 \in A_j / A_i} P_{h_{k1,k2}} + \\ + \sum_{k_1, k_2, k_3 \in A_j / A_i} P_{h_{k1,k2,k3}} - \ldots + (-1)^{n-1} P_{h_{k1,k2,k3\ldots kn}} \qquad (27)$$

$P_{h_{k1,k2,k3\ldots kn}}$ - вероятность возникновения коллизий с *z* «скрытыми» узлами (%).

Для определения вероятности коллизий (27) используем подход, описанный в выше приведенной литературе. В соответствии с этим подходом, вероятность наступления коллизии складывается из двухсоставляющих:

а) вероятности того, что в момент начала передачи пакета i - ым узлом в адрес j -го передача уже осуществляется каким-либо узлом из множества $A_j \setminus A_i$: $P_{hk}^{(a)} = \left(\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k\right) \cdot T_L$;

б) вероятности того, что передача начнется за время трансляции пакета:

$P_{hk}^{(b)} = 1 - e^{-\left(\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k\right) \cdot T_L}$, где $\tilde{\lambda}_k$ дано в таблице.

Так как события (а) и (б) несовместны, то итоговое соотношение для определения вероятности коллизий будет иметь вид:

$$P_{hk} = P_{hk}^{(a)} + P_{hk}^{(b)}(1 - P_{hk}^{(a)}) =$$
$$= 1 - e^{-\left(\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k\right) \cdot T_L} \cdot \left(1 - (\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k\right) \cdot T_L \qquad (28)$$

Размещение узлов и зоны радиовидимости при проявлении эффекта «скрытого узла» показано на рис. 6.

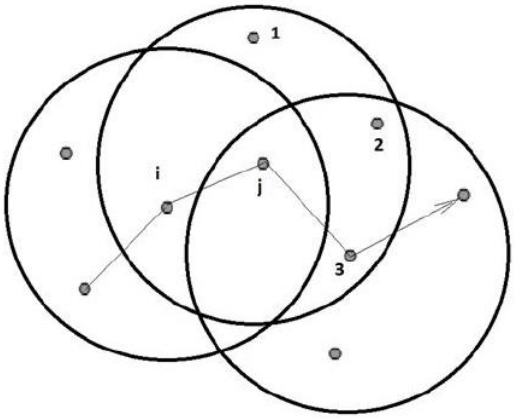

Рис. 5 - Размещение узлов и зоны радиовидимости при проявлении эффекта «скрытого узла»

На основе топологии, изображенной на рис. 5, приведем алгоритм расчета для P_h .

$$P_h = P_{h1} + P_{h2} + P_{h3} - P_{h12} - P_{h13} - P_{h23} + P_{h23},$$

где P_{h1} - коллизия, вызванная 1-ым узлом,

P_{h2} - коллизия, вызванная 1-ым и 2-ым узлами, и т.д.

Вероятности $P_{h12} = P_{h23} = P_{h123} = 0$, так как соответствующие группы узлов находятся в общих зонах радиовидимости и не могут вызывать коллизии одновременно. Узлы же 1 и 3 не находятся в зоне радиовидимости друг друга, поэтому $P_{h13} = P_{h1} \cdot P_{h3}$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДАННЫХ ОБЪЕДИНЁННЫХ СЕНСОРОВ

1 ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

Изучение принципов передачи данных в пакетных сетях

2 ФОРМА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Практическое занятие по месту проводится в аудиторной или дистанционной форме, по форме выполнения в виде индивидуального контрольного задания. Занятие проводится в течение 4 акад. часов.

3 ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ

1. Изучить рекомендованную литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

4 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков А.В. Интернет вещей [Электронный ресурс]: учеб. пособие по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» 11.03.02 - бакалавриат и 11.04.02 - магистратура / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков; ПГУТИ, Каф. АЭС. Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2015. - 135 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Roslyakov_Vanyashin_Grebeshkov_Internet_veschej.pdf

2. Ермолаев, С.Ю. Беспроводные сенсорные сети [Электронный ресурс]: метод. указания по выполнению лаб. работ / С. Ю. Ермолаев; ПГУТИ, Кафедра МСИБ). - Самара: ПГУТИ, 2018. - 84 с. Режим доступа: http://elib.psuti.ru/Ermolaev_Besprovodnye_sensornye_seti_metod_ukazaniya_po_vypolneniyu_lab_rabot_2018.pdf

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое вероятность битовой ошибки.
2. Как определить вероятность битовой ошибки.
3. Как определить гауссов интеграл ошибок.
4. Что такое амплитуда принимаемого сигнала.
5. Как определить амплитуду принимаемого сигнала.
6. Как определить мощности принимаемого и излучаемого сигнала.

7. Как определить вероятность успешной передачи сообщения длиной L_p байт от i –го узла j -му.

6 ЗАДАНИЯ

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 7 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Таблица 7

Характеристики сенсорной сети

№ варианта	L_p	E_b	N_0	u	d	P_{TX}	E_N
1	140	240	250	1	1	50	40
2	120	230	240	1	2	50	40
3	130	220	230	1	3	50	40
4	120	210	220	1	1	50	40
5	140	200	210	1	2	50	40
6	145	240	200	1	3	50	40
7	135	230	250	1	1	50	40
8	125	220	240	1	2	50	40
9	140	210	230	1	3	50	40
10	120	200	220	1	1	50	40
11	130	240	210	1	2	50	40
12	120	230	200	1	3	50	40
13	140	220	250	1	1	50	40
14	145	210	240	1	2	50	40
15	135	200	230	1	3	50	40
16	125	240	220	1	1	50	40
17	140	230	210	1	2	50	40
18	120	220	200	1	3	50	40
19	130	210	250	1	1	50	40
20	120	200	240	1	2	50	40
21	140	240	230	1	3	50	40
22	145	230	220	1	1	50	40
23	135	220	210	1	2	50	40
24	125	210	200	1	3	50	40
25	140	200	250	1	1	50	40
26	120	240	240	1	2	50	40
27	130	230	230	1	3	50	40
28	120	220	220	1	1	50	40
29	140	210	210	1	2	50	40
30	145	200	200	1	3	50	40

Необходимо:

1. Определить вероятность успешной передачи сообщения длиной L_p байт от i –го узла j -му.

2. Определить вероятность битовой ошибки.

3. Определить гауссов интеграл ошибок.

4. Определить амплитуду принимаемого сигнала.

5. Определить мощности принимаемого и излучаемого сигнала.

7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Расчет вероятности успешной передачи сообщения длиной L_p байт от i –го узла j -му.

2. Расчет вероятности битовой ошибки.

3. Расчет гауссова интеграла ошибок.

4. Расчет амплитуды принимаемого сигнала.

5. Расчет мощностей принимаемого и излучаемого сигнала.

8 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В связи с особенностями эксплуатации БСС имеют место потери пакетов из-за наличия шумов, вызванных как другими устройствами в конкурирующем диапазоне, так и наличием собственных эхо-сигналов. Вероятность успешной передачи сообщения длиной L_p байт от i –го узла j -му можно определить из соотношения:

$$P_{cij} = \left(P_{sij} \right)^{2L_p} \tag{29}$$

где P_{sij} - вероятность безошибочного приема символа данных.

Зависимость P_{sij} от вероятности битовой ошибки может быть получена путем интерполирования расчетных значений для диапазона частот в 2,45 ГГц, где используется избыточное кодирование в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4:

$$P_{sij} = \begin{cases} 1 - 0,008888 \cdot P_{bij}, P_{bij} \le 0,14 \\ 0,1405 \cdot \sin(13,08 \cdot P_{bij} - 1,458) + \\ +6,65 \cdot \sin(0,1261 \cdot P_{bij} + 3,067) P_{bij} > 0,14 \end{cases} \tag{30}$$

где P_{bij} - вероятность битовой ошибки, которая может быть определена из следующего соотношения:

$$P_{bij} = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\left[1-Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right] \qquad (31)$$

где E_b - энергия бита трансляции, равна произведению мощности на приемной антенне j -го узла P_{RX} и продолжительности трансляции бита T_b , что определяется скоростью передачи данных;

N_0 – спектральная плотность шумов (ее положительная часть) на приемной антенне j–го узла, складывается не только из собственных тепловых шумов приемника и шумов других источников излучения (BlueTooth, Wi-Fi, GSM и др.), но еще и суммы эхо-сигналов;

Q_x - гауссов интеграл ошибок:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}}\,du \qquad (32)$$

Отношение $\frac{E_b}{N_0}$ можно представить как:

$$\frac{E_b}{N_0} = T_b W\,\frac{E_{RX}}{E_N} = \frac{E_{RX}}{E_N}\cdot\frac{W}{R} \qquad (33)$$

где E_{RX} - амплитуда принимаемого сигнала,

E_N – амплитуда шума,

W – ширина частотной полосы,

R – скорость передачи данных.

При W =5Мгц и R =250кб/с W/R=20.

Амплитуда принимаемого сигнала E_{RX} определяется из следующего соотношения:

$$E_{RX} = \sqrt{P_{RX}\cdot R_{ant}} \qquad (34)$$

R_{ant} - сопротивление антенны (50 Ом).

Так как сигнал, с которым синхронизируется узел – это, как правило, прямой (наиболее мощный) сигнал для условия прямой видимости и квази-сферичности диаграммы направленности антенны, его мощность можно определить из известного соотношения:

$$P_{RX} = P_{TX}\,\frac{\lambda^2 K}{16\pi^2 d^2} \qquad (35)$$

где P_{TX} и P_{RX} - мощности принимаемого и излучаемого сигнала соответственно,

d – расстояние между узлами (м),

λ – длина волны ($\approx 0{,}125м$),

K – коэффициент усиления канала связи (≈ 0.8).