

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Е.В. ГЛУШАК, А.В. КУПРИЯНОВ

ВВЕДЕНИЕ В ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ (ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ)

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств

С А М А Р А

Издательство Самарского университета

2023

УДК 004.7(075)+004.9(075)

ББК 381я7

Г555

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Н. Н. В а с и н,
канд. техн. наук, доц. С. В. П а л ь м о в

Глушак, Елена Владимировна

Г555 **Введение в Интернет вещей (практические работы):** практикум /
Е.В. Глушак, А.В. Курьянов. – Самара: Издательство Самарского
университета, 2023. – 72 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-2016-8

Практикум содержит обучающий материал для выполнения практических работ по курсу «Введение в Интернет вещей». Каждая работа сопровождается пояснениями и контрольными вопросами, направленными на повышение качества усвоения материала.

Дисциплина входит в раздел технических дисциплин по направлению 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», рекомендована для специальностей 2.3.8 «Информатика и информационные процессы», а также предназначена для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств.

Подготовлено на кафедре технической кибернетики.

УДК 004.7(075)+004.9(075)

ББК 381я7

ISBN 978-5-7883-2016-8

© Самарский университет, 2023

Оглавление

Введение.....	4
<i>Практическое занятие №1. Расчет задержек передачи данных между устройствами IoT и в сенсорных сетях.....</i>	5
<i>Практическое занятие №2. Расчет коммуникационных характеристик устройств IoT и сенсорных сетей.....</i>	17
<i>Практическое занятие №3. Расчет срока службы аккумулятора источника питания устройств IoT.....</i>	25
<i>Практическое занятие №4. Выбор координат размещения шлюзов.....</i>	36
<i>Практическое занятие №5. Расчет модели надежности передачи пакета данных между двумя узлами в сенсорной сети.....</i>	41
<i>Практическое занятие №6. Расчет модели надежности узла.....</i>	52
<i>Практическое занятие №7. Определение зависимостей данных объединённых сенсоров.....</i>	58
<i>Практическое занятие №8. Расчет модели влияния эффекта «скрытого узла» в сенсорной сети.....</i>	63
Список литературы.....	71

ВВЕДЕНИЕ

Концепция Интернета вещей (IoT) играет определяющую роль в дальнейшем развитии не только инфокоммуникационной отрасли, но и других отраслей. И хотя данная концепция уже обретает черты сформировавшейся технологии, для нее ведутся активные работы в области стандартизации архитектуры, технических компонентов, приложений, но одновременно столь же велико количество мнений о том, как именно в дальнейшем будет функционировать IoT. Разработка и введение сенсорных сетей во все сферы жизни также предоставит огромное количество преимуществ человечеству. Тематика сенсорных беспроводных сетей, как и IoT, еще не достаточно изучена, имеются на данный момент ряд нерешенных проблем и ограничений. Авторы полагают, что для будущих специалистов необходимо будет знать принципы IoT и сенсорных сетей, а также уметь выполнять расчеты различных параметров функционирования IoT и сенсорных сетей.

Практикум содержит обучающий материал для выполнения практических работ по курсу «Введение в Интернет вещей». Каждая работа сопровождается пояснениями и контрольными вопросами, направленными на повышение качества усвоения материала.

Дисциплина входит в раздел технических дисциплин по направлению 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», рекомендована для специальностей 2.3.8 «Информатика и информационные процессы», а также предназначена для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

Практическое занятие №1

РАСЧЕТ ЗАДЕРЖЕК ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ УСТРОЙСТВАМИ ИОТ И В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Сенсорная сеть – система распределенных сенсорных узлов, взаимодействующих между собой, а также с другими сетями для запросов, обработки, передачи и предоставления информации, полученной от объектов реального физического мира с целью выработки ответной реакции на данную информацию [1]. Таким образом, сенсорная сеть включает в себя как минимум сенсоры, актуаторы и коммуникационные узлы. Основной областью применения сенсорной сети является контроль и мониторинг измеряемых параметров физических сред и объектов и в некоторых случаях — управление этими объектами (активация в них определенных процессов). Примеры сенсорных сетей: всепроникающие сенсорные сети, сети транспортных средств, транспортные сети и др.

Самоорганизующаяся сеть связи – сеть, в которой число узлов является случайной величиной во времени и может изменяться от 0 до некоторого максимального значения. Взаимосвязи между узлами в такой сети также случайны во времени и образуются для передачи информации между подобными узлами и во внешнюю сеть связи.

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – распределённая, самоорганизующаяся сенсорная сеть множества сенсоров и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканалов.

Достоинства беспроводных сенсорных сетей:

- способность к самовосстановлению и самоорганизации;
- способность передавать информацию на значительные расстояния при малой мощности передатчиков (путем ретрансляции);
- низкая стоимость узлов и их малый размер;

- низкое энергопотребление и возможность электропитания от автономных источников;

- простота установки, отсутствие необходимости в прокладке кабелей (благодаря беспроводной технологии и питанию от батарей);

- возможность установки таких сетей на уже существующий и эксплуатирующийся объект без проведения дополнительных работ;

- низкая стоимость технического обслуживания.

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].

Беспроводные сенсорные сети 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 [1].

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 проанализировать.

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.

Выделяют несколько различных типов узлов: конечные устройства (КУ), оснащаемые сенсорами и осуществляющие измерения, маршрутизаторы, передающие информационные сообщения от КУ, координатор, осуществляющий управление БСС, а также шлюзы и мосты, связывающие БСС с другими сетями [2].

Такие узлы, объединенные в сеть, образуют территориально-распределенную самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации и находят все более широкое применение в таких областях, как;

1) своевременное выявление возможных отказов исполнительных механизмов по контролю таких параметров, как вибрация, температура, давление и т. п.;

2) контроль доступа в режиме реального времени к удаленным системам объекта мониторинга;

3) автоматизация инспекции и технического обслуживания промышленных активов;

4) энерго- и ресурсосберегающие технологии;

5) контроль экологических параметров окружающей среды.

Наибольшее распространение в последнее время получили БСС, параметры которых регламентируются стандартом IEEE 802.15.4, а также спецификацией стека протоколов ZigBee [1]. Далее будем вести речь именно о таких сетях.

Для беспроводных сенсорных сетей было предложено множество протоколов маршрутизации. Эти протоколы маршрутизации почти всегда основаны на энергоэффективности. Для передачи изображений и видеоданных необходимы протоколы маршрутизации с характеристиками энергоэффективности и качества обслуживания (QoS), чтобы гарантировать эффективное использование сенсорных узлов и эффективный доступ к собранным данным. Кроме того, с интеграцией приложений реального времени в БСС использование протоколов маршрутизации QoS не только стано-

вится важной темой, но и привлекает внимание исследователей. Технологии построения БСС определяют их преимущества перед другими решениями в области мониторинга: автономность узлов, возможность их размещения в труднодоступных местах, малое энергопотребление, способность к самоорганизации. К недостаткам БСС можно отнести их меньшую надежность, под которой понимается вероятность безошибочной и своевременной доставки результатов измерений на сетевые шлюзы для дальнейшей обработки.

Алгоритмы, основанные на оптимизации, позволяют определить оптимальное местоположение приемника по отношению к этим узлам ретрансляции, чтобы преодолеть проблему срока службы. В настоящее время исследователи сосредоточились на гетерогенные сенсорные сети, в которых сенсорные узлы непохожи друг на друга с точки зрения их энергии. На рис. 1 показана сенсорная сеть.

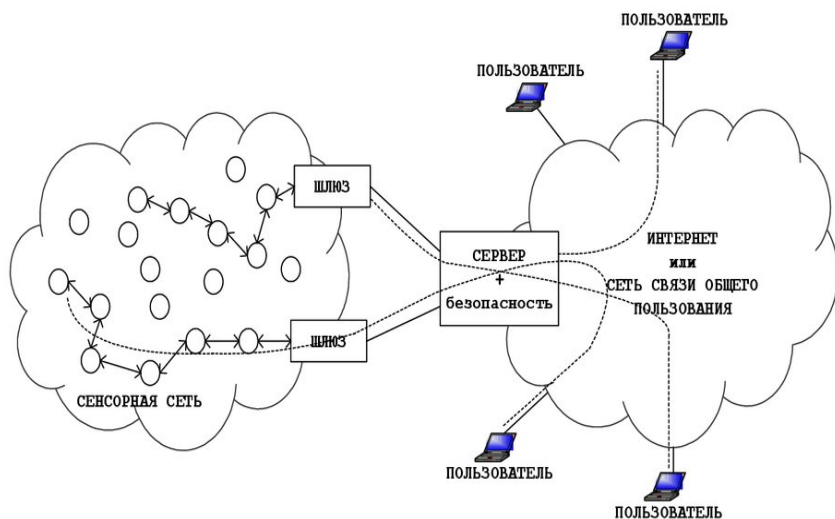


Рис. 1. Беспроводная сенсорная сеть

Беспроводные сенсорные сети завоевали значительную популярность благодаря своей гибкости в решении проблем в различных областях применения и обладают потенциалом изменить нашу жизнь самыми разными способами. БСС были успешно применены в различных областях применения [1], перечисленные ниже.

1. Военное применение: беспроводные сенсорные сети, вероятно, станут неотъемлемой частью военных системы командования, управления, связи, вычислительной техники, разведки, наблюдения за полем боя, разведки и целеуказания.

2. Мониторинг местности: при мониторинге местности сенсорные узлы развертываются над областью, где необходимо отслеживать какое-либо явление.

3. Транспорт: БСС собирает информацию о дорожном движении в режиме реального времени, чтобы впоследствии использовать транспортные модели и предупреждать водителей о заторах и проблемах с движением.

4. Приложения для здравоохранения: некоторые приложения для здравоохранения для сенсорных сетей поддерживают интерфейсы для инвалидов, интегрированное наблюдение за пациентами, диагностику и введение лекарств в больницах, телемониторинг физиологических данных человека, а также отслеживание и мониторинг врачей или пациентов внутри больницы.

5. Экологическое зондирование: термин «сети датчиков окружающей среды» был разработан для охвата многих применений БСС в исследованиях в области наук о земле. Это включает в себя зондирование вулканов, океанов, ледников, лесов и т.д. Ниже перечислены некоторые другие основные области:

- мониторинг загрязнения воздуха;
- обнаружение лесных пожаров;
- мониторинг парниковых газов;
- обнаружение оползней.

6. Сельскохозяйственный сектор: использование беспроводной сети освобождает фермера от необходимости обслуживания электропроводки в сложных условиях. Автоматизация орошения позволяет более эффективно использовать воду и сокращает количество отходов.

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.

Сенсорная сеть состоит из сенсорного узла, ретранслятора и базового устройства (рис. 2).

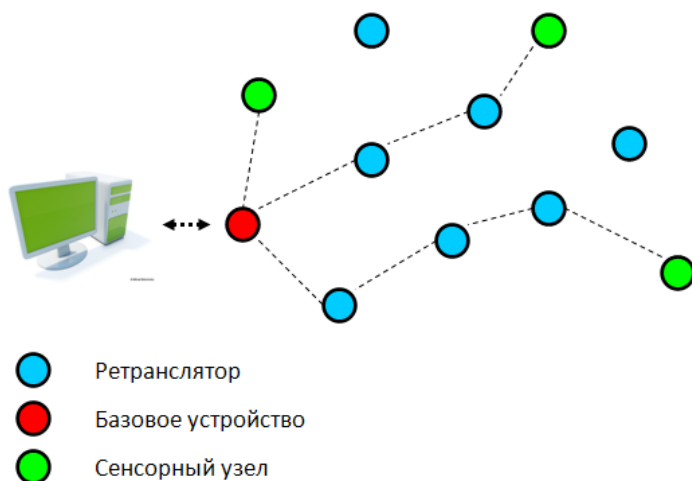


Рис. 2. Пример топологии сенсорной сети

Подход к оцениванию надежности основан на представлении функционирования БСС как марковского процесса, и предполагает использование математической модели надежности передачи данных между двумя узлами БСС, которая, в свою очередь, представ-

ляет собой композицию моделей надежности узлов, коммуникаций между ними и механизма их доступа к среде.

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 [1, 3].

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:

$$\Delta t_z = \Delta t_o + \Delta t_m + \sum_n (\Delta t_{ож} + \Delta t_{обр} + \Delta t_{пер}), \quad (1)$$

где Δt_o – время, требуемое на детектирование события (сек);

Δt_m – 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 [1]:

$$B = n \cdot \langle S \rangle \quad (\text{пак/сек}), \quad (2)$$

где n – максимальное количество пакетов, обрабатываемых на узле за 1 с;

$\langle S \rangle$ – 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:

$$\eta = \frac{N_{\text{пот}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{пот}}$ – количество потерянных пакетов;

$N_{\text{общ}}$ – 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 маршру-

та, 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).

Задания для выполнения практической работы:

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 1 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Необходимо рассчитать:

1. Общее время задержки в сети,
2. Общую пропускную способность сети,
3. Общие потери пакетов в сети.

Отчет должен содержать краткую теорию, необходимые расчеты по варианту, выводы о функционировании сенсорной сети в целом, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое сенсорная сеть?
2. Что такое самоорганизующаяся сеть связи?
3. Что такое беспроводная сенсорная сеть?
4. Какие интерфейсы входят в состав архитектуры беспроводных сенсорных сетей?
5. Перечислите примеры практического применения беспроводных сенсорных сетей.
6. Что такое потери пакетов?
7. От чего зависят потери пакетов в сети?
8. Что такое задержка в сети?
9. От чего зависит время задержки в сети?
10. Что такое пропускная способность?
11. От чего зависит пропускная способность сети?
12. Нарисуйте топологию БСС.
13. Поясните, из чего состоит топология БСС.
14. Что такое узел БСС?
15. Что такое ретрансляция в БСС?
16. Что показывает время ожидания свободного канала связи?
17. Как рассчитать время ожидания свободного канала связи?
18. Как рассчитать количество потерянных пакетов?
19. Какие выводы можно сделать о БСС, основываясь на выполненных расчетах?

Таблица 1. Характеристики сенсорной сети

№ варианта	Δt_o	Δt_m	$\Delta t_{ож}$	$\Delta t_{обр}$	$\Delta t_{пер}$	$\langle S \rangle$	n	$N_{ном}$	$N_{общ}$
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

Практическое занятие №2.

РАСЧЕТ КОММУНИКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ИОТ И СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

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 проанализировать. 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.

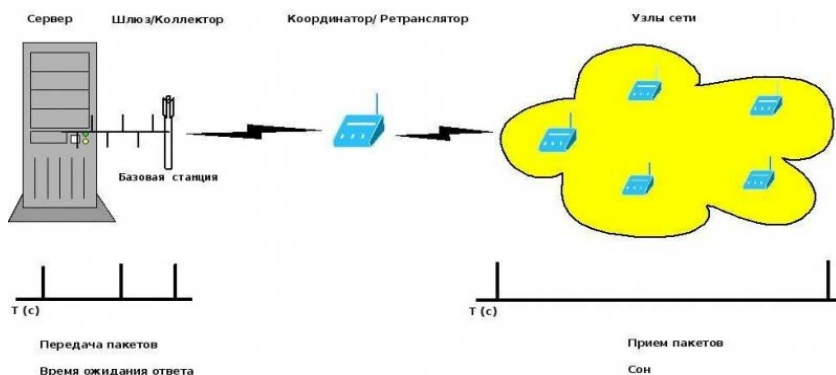


Рис. 3. Схема работы БСС

Однако во многих случаях приемник может быть напрямую подключен к конечным пользователям. Стоит обратить внимание, что в архитектуре может быть несколько приемников/шлюзов и несколько конечных пользователей.

Достоинства беспроводных сенсорных сетей:

- способность к самовосстановлению и самоорганизации;
- способность передавать информацию на значительные расстояния при малой мощности передатчиков (путем ретрансляции);
- низкая стоимость узлов и их малый размер;
- низкое энергопотребление и возможность электропитания от автономных источников;
- простота установки, отсутствие необходимости в прокладке кабелей (благодаря беспроводной технологии и питанию от батарей);
- возможность установки таких сетей на уже существующий и эксплуатирующийся объект без проведения дополнительных работ;
- низкая стоимость технического обслуживания.

Сенсорный узел состоит из:

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

Показатели качества функционирования БСС, такие как вероятность потерь, пропускная способность, задержка взаимозависимы и показывают насколько эффективно функционирует сеть. Следовательно, при изменении одного из показателей качества функционирования оно отражается и на других показателях.

Рассмотрим зависимость качества функционирования БСС от связности сети [2]. Связность является мерой взаимосвязи между любым сенсорным узлом и центром обработки и хранения данных. Эта мера может быть описана вероятностью суще-

ствования 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) [2]. 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.

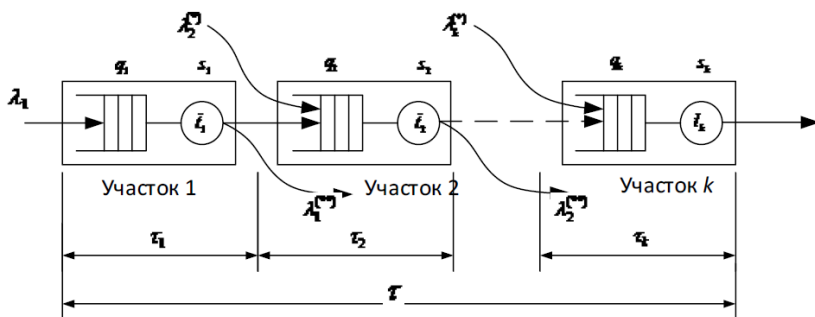


Рис. 4. Модель маршрута в БСС

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 допус-

туть, 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):

$$\tau = \sum_{i=1}^k \tau_i \quad (4)$$

где k – количество участков маршрута.

Задержка на каждом из участков маршрута, в такой модели может быть оценена известной математической моделью [1] (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 [2].

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

$$p = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i), \quad (5)$$

где p_i – вероятность потери пакета на участке маршрута (%), которая может быть рассчитана, согласно [2], как

$$p_i = \frac{1 - \rho}{1 - \rho \frac{2}{C_a^2 + C_s^2} (n_b + 1)} \cdot \rho \frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b \quad (6)$$

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 [2]:

$$\tau_i = \frac{\rho_i \bar{t}_i}{2(1-\rho_i)} \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}^2 + \sigma_{si}^2}{\bar{t}_i^2} \right) \left(\frac{\bar{t}_i^2 + \sigma_{si}^2}{\bar{a}_i^2 + \sigma_{si}^2} \right) + \bar{t}_i \quad (7)$$

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 (6) и (7) 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.

$$\bar{t}_i = \frac{\bar{L}}{br_i} \quad (8)$$

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

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

Как видно из выражений (4) и (5) 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 (4) и (5) 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:

$$\{p_{ce}, \bar{p}, \bar{\tau}\} = f(V) \quad (9)$$

где $f(V)$ – 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 требованиями, имеющимися при решении прикладной задачи.

Задания для выполнения практической работы:

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 2 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Необходимо рассчитать:

1. Задержку при передаче данных на всем маршруте сети,
2. Вероятность потери пакета для маршрута доставки,
3. Среднее время доставки пакета.

Отчет должен содержать краткую теорию, необходимые расчеты по варианту, выводы о функционировании сенсорной сети в целом, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Таблица 2. 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
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

Вопросы для самоконтроля

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 сенсорная сеть?
5. Какие интерфейсы входят в состав архитектуры беспроводных сенсорных сетей?
6. Перечислите примеры практического применения беспроводных сенсорных сетей.
7. Что такое потери пакетов?
8. От чего зависят потери пакетов в сети?
9. От чего зависит время задержки в сети?
10. Что такое пропускная способность?
11. От чего зависит пропускная способность сети?
12. Нарисуйте топологию БСС.
13. Поясните из чего состоит топология БСС.
14. Что такое узел БСС?
15. Что такое ретрансляция в БСС?
16. Что показывает время ожидания свободного канала связи?
17. Как рассчитать время ожидания свободного канала связи?
18. Как рассчитать количество потерянных пакетов?
19. Какие выводы можно сделать о БСС, основываясь на выполненных расчетах?

Практическое занятие №3.

РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ АККУМУЛЯТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ ИОТ

Для минимизации энергопотребления в БСС применяются маломощные радиочастотные приемопередатчики и специализированные сетевые протоколы, поэтому они могут быть эффективно использованы для решения различных прикладных задач сбора данных в таких областях, как автоматизация зданий, промышленная автоматика, безопасность и оборона, мониторинг окружающей среды, здравоохранение и т. п.

Беспроводная сенсорная сеть может быть создана как на базе стандартных технологий ZigBee, WirelessHART и ISA SP100.11a, так и с помощью проприетарных решений, среди которых есть и российская разработка – платформа MeshLogic, обладающая следующими основными преимуществами относительно аналогов:

1. Полностью многочейковая топология сети.
2. Все узлы равноправны и являются маршрутизаторами.
3. Самоорганизация и автоматический поиск маршрутов.
4. Устойчивость к соканальной интерференции.
5. Высокая масштабируемость системы.
6. Возможность работы всех узлов от автономных источников питания.

В целом понятно, что узел беспроводной сети сбора данных можно считать работающим, пока он может безошибочно считывать показания с датчиков, производить необходимые вычисления и передавать данные в сеть. При разработке и установке сети важно заранее оценить приблизительное время работы каждого узла до момента, когда будет необходима замена его батарей. Для этого важно понимать, какие факторы влияют на продолжительность времени его автономной работы.

В частности, хорошо известно, что энергопотребление отдельных элементов сети зависит от следующих факторов, которые необходимо принимать во внимание при моделировании БСС:

1. Характеристики аппаратных средств (емкость батарей, потребляемая мощность микроконтроллера, приемопередатчика, датчиков и прочих электронных компонентов).

2. Частота сбора и передачи данных, зависящая от приложения. Например, в широко распространенных системах климат-контроля, экологического мониторинга достаточно собирать информацию раз в несколько секунд или даже десятков секунд, поскольку такие параметры как температура или влажность меняются плавно. Как следствие, большую часть времени сенсор может находиться в режиме сна. В то же время передача звука требует высокой частоты сбора данных (8 кГц, 16 кГц, 32 кГц и более), что фактически исключает возможность нахождения элемента сети в режиме пониженного энергопотребления.

3. Протоколы физического и канального уровней, определяющие, прежде всего, механизмы контроля доступа к среде. В асинхронном режиме доступа к среде, например, CSMA/CA [4], ретрансляторы не могут находиться в режиме сна, в противном случае оконечные устройства не смогут передать свои данные. Синхронный режим доступа к среде характеризуется тем, что все элементы могут на некоторое время уходить в режим пониженного энергопотребления, так как функционирование всей сети координируется специальными синхрофреймами (все элементы сети знают время передачи следующего такого кадра). Однако данный режим сложно реализовать в распределенных сетях, в которых используются десятки или сотни маршрутизаторов.

4. Топология сети, определяющая объем информации, проходящий через каждый элемент (с учетом ретрансляции сообщений).

В сенсорных сетях применяются как простые топологии (звезда, кольцо, дерево), так и более сложные ячеистые структуры.

5. Используемый протокол маршрутизации, добавляющий в сеть дополнительный служебный трафик. В области сенсорных сетей наибольшее распространение получили протоколы класса AODV (ad-hoc on-demand distance vector) [4], отличающиеся тем, что информация о маршрутизации не сохраняется в памяти элементов длительное время и не обновляется регулярно. При необходимости передать сообщение предварительно делается запрос маршрута. Только после этого отправляется само сообщение. Для уменьшения объема трафика, передаваемого по сети, были предложены методы сетевого кодирования [5].

Формализуем приведенные выше утверждения в виде методики расчета времени жизни. В любой сенсорной сети есть три типа узлов – оконечные устройства, маршрутизаторы (ретрансляторы) и стоки. Стоки не представляют интерес с точки зрения времени автономной работы: как уже было отмечено, обычно они подключены к источникам питания, имеющим на порядок большую емкость. Рассмотрим более подробно методику расчета времени жизни оконечных устройств и ретрансляторов.

Для анализа модели энергопотребления узла беспроводной сенсорной сети, входящей в состав IoT, рассмотрим его структуру. Он содержит датчик, воспринимающий данные от внешней среды, микроконтроллер, память, радио-приемопередатчик, автономный источник питания (рис. 5). Как видно из рисунка, энергия источника питания (узла БСС) тратится на питание датчика (датчиков), микроконтроллера с памятью, который осуществляет обработку полученной информации от датчика (сенсора), а также на радио-приемопередатчик. Можно предположить, что основными ресурсами, которые требуется беречь в БСС, являются энергия источника питания, и пропускная способность узла БСС [3].

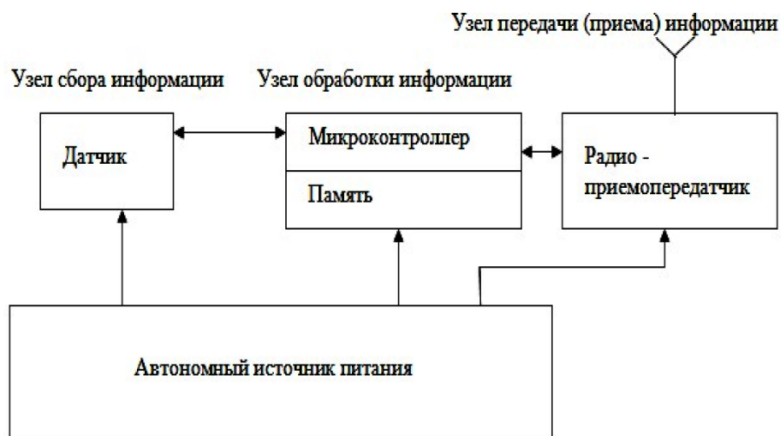


Рис. 5. Обобщенная схема узла беспроводной сенсорной сети

Проанализировав энергопотребление узла, приведённого на рис. 6, в момент установки адреса и поиска координатора можно увидеть что, основная часть энергии тратится на коммуникацию (прием, прослушивание и передачу данных), а не на обработку или сохранение данных.

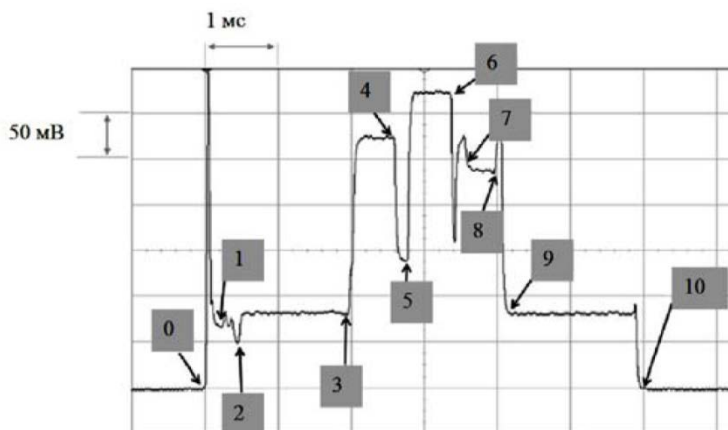


Рис. 6. Энергопотребление узла БСС, построенного на основе приемопередатчика CC2530

Рассмотрим более подробно рис. 6, на котором показано энергопотребление узла БСС, построенного на основе приемопередатчика CC2530.

Переход от точки 0 до точки 1 показывает start-up режим трансивера, при этом затрачивается энергия в 12 мА на протяжении 0,2 мс. Далее от точки 1 до точки 2 микроконтроллер работает на частоте 16 МГц на внешнем кварцевом резонаторе на протяжении 0,25 мкс с затратой энергии 6 мА, при переходе на 32 МГц внешний кварцевый резонатор (точки 2-3) потребления энергии возрастает до 7,5 мА на протяжении 1,7 мс. После того, как микроконтроллер входит в рабочий режим, происходит прослушивание эфира (RX mode) для поиска сигнала координатора БСС на протяжении 1,2 мс со значительно большей затратой энергии 27 мА. Далее узлу необходимо связаться с координатором сети и он переходит в режим передачи, но не мгновенно, а через некоторое время, равное 0,2 мс с затратой энергии в 14 мА (точки 4-5 на рис. 2.4). При передаче сообщений тратится больше всего энергии источника питания, а именно 32 мА на протяжении 0,5 мс. После передачи происходит переключение из режима передачи на режим прослушивания эфира (точки 6-7) за 0,2 мс с затратой энергии равной 25 мА. Далее происходит снова прослушивание эфира с затратой энергии, равной 23 мА в течение 0,35 мс. Точки с 8 по 9 показывают процесс окончания прослушивания эфира и установления адреса узла. При переходе с точки 9 в точку 10 узел переходит в спящий режим. В спящем режиме CC2530 тратит 1 мкА в 1 с. Таким образом, видно, что основная часть энергии тратится на прием, прослушивание и передачу данных, а не на обработку или сохранение данных.

Пример осциллограммы потребления тока сенсорным узлом при длительном режиме работы, что возможно при больших объемах передаваемых данных, приведен на рис. 7.

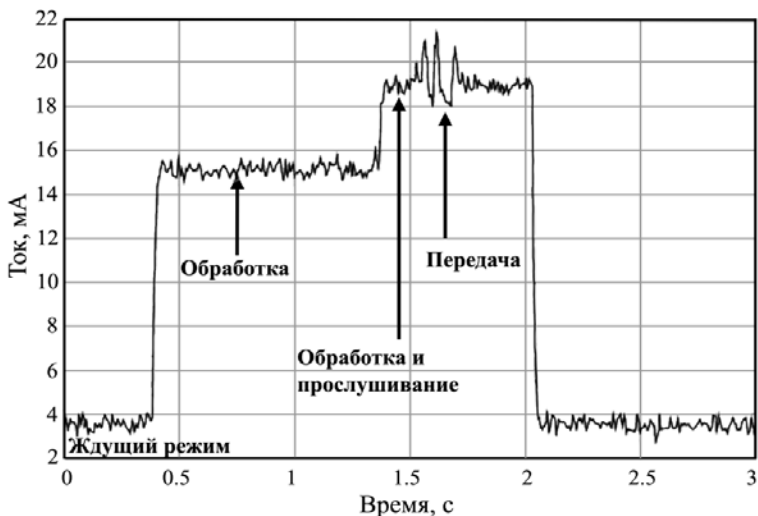


Рис. 7. Пример осциллограммы потребления тока сенсорным узлом в зависимости от фазы обработки запроса

Из рисунка видно, что потребление тока сенсорным узлом, в зависимости от фазы обработки запроса, неравномерное на длительном промежутке времени. Как видно из осциллограммы, во время внутренней обработки узел потребляет около 15 мА.

При прослушивании эфира потребление возрастает до 20 мА, а при передаче сообщения – до 22 мА. Все зависит от внутренней архитектуры самого узла. Как было отмечено и показано на рис. 5, узел БСС состоит из 5 основных компонентов. При этом микроконтроллер, трансивер и память могут изготавливаться и на одном кристалле, что способствует как миниатюризации самого узла БСС, так и снижению его энергопотребления [3].

Чтобы однозначно ответить, какие режимы работы нужно свести к минимуму, рассмотрим номинальное энергопотребление трансивера CC2530 [3], который представляет собой приемопередатчик и микроконтроллер (ядро MCS-51) на одном кристалле, табл. 3.

Таблица 3. Номинальное энергопотребление в разных режимах

Тип режима работы	Прослушивание (Mode RX) E_{rcv}	Отправка сообщений (Mode RX на 1 dBm) E_{trans}	Работа микроконтроллера E_{MCU}	Режим пробуждения (на протяжении 4 мкс) E_{ather}	Спящие режимы E_{sleep}
Потребление, мА	24	29	9	0,2	От 0,0004 до 0,001

Энергопотребление узла E_e (Дж) за один цикл, исходя из проведённого анализа, можно определить как сумму энергий потребления:

$$E_e = E_{sleep} + E_{MCU} + E_{rcv} + E_{trans} + E_{ather} \quad (10)$$

где E_{sleep} – энергия, потребляемая узлом в фазе сна;

E_{MCU} – энергия, потребляемая узлом во время работы микроконтроллера или вычислительного ядра приемопередатчика при его отсутствии;

E_{rcv} – энергия, потребляемая узлом во время приема;

E_{trans} – энергия, потребляемая узлом во время передачи;

E_{ather} – энергия, потребляемая узлом в других режимах (режим пробуждения и др.)

Чтобы узнать энергопотребление маршрутизатора беспроводной сенсорной сети, необходимо определить, чем он отличается от оконечного узла БСС. Маршрутизатор БСС выполняет роль «мини координатора» в пределах доверенной ему области R, рис. 8.

Из рис. 8 видно, что маршрутизатор может напрямую или через промежуточные узлы собирать информацию, а также координировать ее передачу. Следовательно, принцип его энергопотребления такой, как и у ОУ, но больше в результате более активного взаимодействия с узлами БСС.

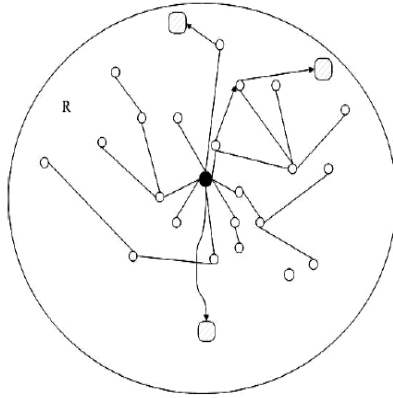


Рис. 8. Область сети R в которой работу узлов координирует маршрутизатор

□ – агрегатор сети; ● – маршрутизатор; ○ – узел сети БСС

Энергопотребление маршрутизатора за один цикл можно определить из выражения (2.8):

$$E_r = E_e^k + \sum_{m=1}^m E_m + \sum_{a=1}^a E_a \quad (11)$$

где E_e^k – энергия, потребляемая маршрутизатором для связи с координатором;

E_m – энергия, потребляемая маршрутизатором для связи с подчиненными ему узлами БСС в количестве m ;

E_a – энергия, потребляемая маршрутизатором для связи с агрегатором сети.

В выражении (11) величина значения R будет влиять, в основном, на E_m . Чем больше R тем больше E_m будет тратиться для связи удалённого узла с маршрутизатором.

Для минимизации энергопотребления в БСС может быть использован метод агрегации данных. Из рис. 8 видно, что кроме

маршрутизатора и окончных узлов возможно наличие агрегатора сети в области R . В том случае, когда координатору требуется определить интегральную характеристику для какого-либо участка сети, один из узлов этого участка назначается агрегатором. Агрегатор собирает с остальных узлов участка частные значения определяемой характеристики, вычисляет агрегатную функцию и передает это значение координатору сети. При этом общие затраты на передачу информации существенно ниже, чем при отсутствии агрегатора. Из рис. 8 видно, что некоторым узлам БСС проще передать сообщение агрегатору сети, чем передавать его своему маршрутизатору.

Задания для выполнения практической работы:

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблицах 3 и 4 приведены варианты для расчета сенсорной сети.

Необходимо рассчитать:

1. Энергопотребление узла E_e за один цикл,
2. Энергопотребление маршрутизатора за один цикл.

Отчет должен содержать краткую теорию, необходимые расчеты по варианту, выводы о функционировании сенсорной сети в целом, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля:

1. От чего зависит энергопотребление узла в сети?
2. От чего зависит энергопотребление маршрутизатора?
3. Что такое агрегатор?
4. Что такое доверенная область R ?
5. Что показывает пример осциллограммы потребления тока сенсорным узлом в зависимости от фазы обработки запроса на рисунке 4?
6. Какие функции выполняет маршрутизатор в сети?

Таблица 4. Характеристики сенсорной сети

№ варианта	E_e^k	E_m	E_a	m	a
1	24	13	17	14	3
2	24	15	33	12	4
3	27	45	23	33	5
4	45	12	11	23	4
5	34	55	23	23	5
6	34	32	24	11	6
7	22	12	22	32	7
8	46	33	36	54	8
9	34	45	11	33	1
10	12	13	12	11	3
11	23	15	10	12	4
12	24	45	17	14	5
13	24	12	33	12	3
14	27	55	23	33	4
15	45	32	11	23	5
16	34	12	23	23	4
17	34	33	24	11	5
18	22	45	22	32	6
19	46	13	36	54	7
20	34	15	11	33	8
21	12	45	12	11	1
22	23	12	10	12	3
23	24	55	17	14	4
24	24	32	33	12	5
25	27	12	23	33	3
26	45	33	11	23	4
27	34	45	23	23	5
28	34	13	24	11	4
29	22	15	22	32	5
30	46	45	36	54	6

7. Какие функции выполняет агрегатор в сети?

8. Что включает в себя обобщенная схема узла беспроводной сенсорной сети на рисунке 5?

9. Как рассчитать энергопотребление узла E_e за один цикл?

10. Что показывает E_m ?
11. В чем измеряется E_m ?
12. Что показывает E_a ?
13. В чем измеряется E_a ?
12. Что показывает E_e^k ?
13. В чем измеряется E_e^k ?
14. Что такое энергопотребление?
15. От чего зависят задержка при передаче данных в сети?
16. От чего зависит вероятность потери пакета?
17. От чего зависит среднее время доставки пакета?
18. Что такое сенсорная сеть?
19. Что такое маршрутизатор?
20. Как осуществляется маршрутизация в БСС?
21. Что такое узел сети?
22. Из каких элементов состоит узел БСС?
23. Что такое координатор сети?
24. Что такое жизненный цикл?
25. Какие виды узлов БСС существуют?
26. Какой стандарт описывает контроль доступа к сети?

Практическое занятие №4.

ВЫБОР КООРДИНАТ РАЗМЕЩЕНИЯ ШЛЮЗОВ

Для постановки задачи кластерного анализа (КА) необходимо определить [4]:

1. Множество узлов БСС, подлежащих кластеризации $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$.

2. Цель кластерного анализа, которая служит для выбора или построения правила, согласно которому необходимо получить уровни желательности различных разбиений.

3. Перечень характеристик узлов БСС, которыми могут выступать различные параметры, но в случае выбора структуры сети, они должны характеризовать позиции локализации узлов, которые необходимо учитывать при решении задачи кластеризации $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$.

4. Руководствуясь целью задачи необходимо выбрать или определить принцип выбора кластеров.

В данном случае множеством объектов кластеризации является множество узлов БСС, они же могут рассматриваться как источники трафика. Целью практической работы является определение структуры сети доступа, т.е. выбор координат размещения шлюзов. Численными характеристиками объектов, в данном случае, являются их координаты в двумерном или трехмерном пространстве. Задача определения принципа формирования кластеров, достаточно сложна и в конечном итоге определяет потенциальную возможность или невозможность решения поставленной задачи кластеризации. Без предварительных требований или перечня условий, предъявляемых к разбиению исходного множества узлов сети, критерии кластеризации сформулировать невозможно. Используемый принцип выделения кластеров должен содержать или

позволять формулировать критерии, согласно которым оценивается близость свойств (в данном случае позиций) узлов в рамках формируемых кластеров. Рассмотрим два способа выделения кластеров [4]:

- выделение заданного количества групп узлов;
- выделение групп узлов заданного «размера».

Дополнительные требования и ограничения к решению данной задачи могут быть установлены в соответствии с конкретной решаемой задачей. Например, требования к максимальному количеству кластеров, к размеру кластера, количеству узлов в кластере и др. Далее рассмотрим подход, реализуемый методами кластерного анализа – k -средних (k -means), рассмотрим возможности его использования в задачах проектирования, эксплуатации и управления БСС.

Наиболее распространенная версия алгоритма k -средних решает задачу с помощью минимизации расстояния узлов кластеров от их «центров». Целевая функция может быть сформулирована следующим образом [4]:

$$M = \sum_{i=1}^k (x_j - \mu_i)^2 \quad (12)$$

где k – количество групп;

x_j – координаты j -го узла кластера.

μ_i – координаты центра i -го кластера;

$x_j - \mu_i$ – представляет собой расстояние между узлом сети и центром кластера;

S_i – множество элементов i -го кластера.

Далее рассмотрим алгоритм кластеризации для некоторого пространства, которое, в общем случае, может быть многомерным. В данном случае, рассмотрим вариант для плоскости. Позиции уз-

лов сети рассматриваются на плоскости или в пространстве и характеризуются двумя или тремя координатами: (x_j, y_j) или (x_j, y_j, z_j) .

Позиция центра i -го кластера определяется выражениями:

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j, y_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j, z_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_j \quad (13)$$

Алгоритм КА состоит из следующих основных шагов:

1. Определение характеристик области, координат узлов сети $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ и необходимого количества кластеров (k);

2. Генерация координат k -узлов m_1, m_2, \dots, m_k в границах области обслуживания. На этом этапе эти позиции рассматриваются как центры масс искомых кластеров. Генерации начальных координат узлов может производиться случайно с использованием генератора случайных чисел.

3. Все узлы в области обслуживания $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ распределяются по группам в соответствии с наибольшей близостью каждого из узлов к центрам масс кластеров. Каждый из узлов закрепляется за ближайшим центром кластера. Для задачи на плоскости или в трехмерном пространстве, близость оценивается расстоянием. (В качестве метрики может быть выбрана и другая характеристика, например, затухание, пропускная способность и т.д.).

4. Для полученных групп узлов вычисляются координаты их центров (центров «масс») по соответствующим формулам (13) или (14) $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_k$. Далее результаты вычисления сравниваются с позициями точек m_1, m_2, \dots, m_k . Если они отличаются, то процесс продолжается (к п.5). Если они совпадают, то предполагается, что кластеры определены, и поиск завершается (к п.6).

5. Выбираются новые, найденные, центры групп узлов $m_1 = \hat{m}_1, m_2 = \hat{m}_2, \dots, m_k = \hat{m}_k$. Переходим к п.3.

6. Вывод результатов поиска координат центров групп узлов (кластеров), а также данных о принадлежности узлов к найденным кластерам.

В процессе работы алгоритма один или несколько кластеров могут оказаться без узлов связи, в таком случае можно начать решение задачи сначала с новой стартовой позиции, или заменить координаты центров «пустых» групп узлов на случайно выбранные координаты из допустимой области [4]. Результатом является то, что заданное множество узлов БСС будет разделено на k -групп (кластеров) и будут определены координаты центров этих групп.

Задания для выполнения практической работы:

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 5 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Необходимо:

1. Минимизировать расстояния узлов кластеров от их «центров»,
2. Найти позицию центра i -го кластера.

Отчет должен содержать краткую теорию, расчеты по варианту, выводы о функционировании БСС, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля:

1. Как осуществить выбор координат размещения шлюзов
2. Назовите цель кластерного анализа (КА).
3. Что показывает параметр m_j ?
4. Какие шаги включает в себя алгоритм КА?

Таблица 5. Характеристики сенсорной сети

№ варианта	k	x_j	μ_i	m_j	n_i	y_i	z_i
1	10	150	114	77	156	123	45
2	11	133	116	88	123	66	56
3	12	145	111	57	120	89	75
4	9	134	123	45	145	98	45
5	8	167	112	56	134	78	88
6	11	156	98	75	156	78	88
7	13	123	78	57	176	98	57
8	14	120	78	45	123	78	45
9	8	145	45	56	124	78	56
10	9	134	123	75	143	45	75
11	10	156	66	45	150	123	34
12	10	176	89	88	133	66	45
13	11	123	98	57	145	89	56
14	12	124	78	45	134	114	75
15	9	143	78	56	167	116	45
16	8	150	98	75	145	111	88
17	11	133	78	45	134	123	77
18	13	145	78	88	167	112	88
19	14	134	45	88	156	98	57
20	8	167	123	57	123	78	45
21	9	156	66	45	120	78	56
22	10	123	89	56	145	45	75
23	10	120	98	75	134	123	57
24	11	145	114	34	156	66	45
25	12	134	116	78	176	89	56
26	9	156	111	100	123	98	75
27	8	176	123	88	124	78	45
28	11	123	112	56	143	114	77
29	13	124	98	45	145	116	88
30	14	143	78	67	134	111	57

Практическое занятие №5.
РАСЧЕТ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ
ПАКЕТА ДАННЫХ МЕЖДУ ДВУМЯ УЗЛАМИ
В 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.

Сенсоры-источники данных в сенсорной сети; служат посредником между физическими процессами, происходящими в окружающей среде и представлением этих процессов в цифровом виде показаний сенсоров.

Узлы передачи данных – микроконтроллеры, оснащенные приемопередатчиком, аккумулятором, процессором, памятью.

Задача узлов – передавать данные друг другу последовательно, причем каждая следующая итерация передачи должна быть наименее энергозатратна и являться шагом, на пути к базовой станции. Для того чтобы максимально эффективно выбрать путь от узла до базовой станции, разрабатываются специальные протоколы маршрутизации для сенсорных сетей.

Сток является накопителем данных. Это специализированный тип компонента сети, которые получает данные от сенсоров и занимается агрегированием. От расположения стока, в большей степени, зависят основные параметры сенсорной сети, такие как расход энергии сети, время ее жизни, количество неработоспособных узлов. При передаче данных базовой станции, могут быть задейст-

вовано различное количество узлов. Определением маршрута передачи занимается протокол, на основе которого работает сенсорная сеть. Аналогичный подход используется для маршрутизации в компьютерных сетях. Сейчас, наибольшая часть исследований в области сенсорных сетей направлена на разработку протоколов, которые смогут выбирать маршруты передачи, оптимальные по энергопотреблению, времени жизни и другим критериям, необходимым для конкретной задачи.

Сенсорные сети по типу архитектуры можно разделить на: слоистую архитектуру; кластерную архитектуру; сенсорные узлы с мобильным стоком; Общий принцип работы беспроводной сенсорной сети схож с алгоритмом работы локальной сети.

Сток или базовая станция рассылает всей сети широковещательный пакет. Каждый узел добавляет адрес, от которого получено широковещательное сообщение, в свою таблицу маршрутизации. Также в таблицу добавляются поля ID, уровень заряда аккумулятора, число промежуточных узлов (хопов) [2]. Важным параметром, который узлы передают своим соседям, является уровень заряда аккумулятора, поскольку от этого значения зависит балансировка энергии всей сети.

Каждый узел широковещательно передает информацию о заряде аккумулятора своим соседям. Таким образом, все узлы знают о количестве хопов и расходе энергии своих соседей. Сток занимается обновлением таблиц узлов с помощью повторной широковещательной рассылки, при добавлении или исчезновении элементов сети.

На сегодняшний день узлы беспроводных сенсорных сетей используются только лишь для сбора данных об окружающей среде и передачи их на централизованное вычислительное устройство, которое занимается обработкой этих данных. Существуют готовые интеллектуальные системы на базе беспроводных сенсор-

ных сетей, такие как: система технологического учета электроэнергии, система управления центральным тепловым пунктом, система технологического учета водоснабжения, система охраны труда на вредном производстве и прочие системы, контролирующие деятельность предприятий.

Беспроводная сенсорная сеть для промышленного мониторинга строится на основе узлов передачи данных, которые могут быть подключены к датчикам, измеряющим различные типы показаний. Узлы передачи данных получают показания от датчиков и отправляют их в централизованную систему для последующей обработки, то есть являются промежуточным звеном между данными, которые отражают состояние окружающей среды и централизованной системой, которая это состояние может изменить, например, повысить температуру в помещении. В стандартный набор компонентов сети входят: координатор, сервер, узел передачи данных.

Выделяют несколько различных типов узлов: конечные устройства (КУ), оснащаемые сенсорами и осуществляющие измерения, маршрутизаторы, передающие информационные сообщения от КУ, координатор, осуществляющий управление БСС, а также шлюзы и мосты, связывающие БСС с другими сетями [5].

Такие узлы, объединенные в сеть, образуют территориально-распределенную самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации и находят все более широкое применение в таких областях, как;

- 1) своевременное выявление возможных отказов исполнительных механизмов по контролю таких параметров, как вибрация, температура, давление и т. п.;

- 2) контроль доступа в режиме реального времени к удаленным системам объекта мониторинга;

- 3) автоматизация инспекции и технического обслуживания промышленных активов;
- 4) энерго- и ресурсосберегающие технологии;
- 5) контроль экологических параметров окружающей среды.

Наибольшее распространение в последнее время получили БСС, параметры которых регламентируются стандартом IEEE 802.15.4, а также спецификацией стека протоколов ZigBee [5]. Далее будем вести речь именно о таких сетях.

Технологии построения БСС определяют их преимущества перед другими решениями в области мониторинга: автономность узлов, возможность их размещения в труднодоступных местах, малое энергопотребление, способность к самоорганизации. К недостаткам БСС можно отнести их меньшую надежность, под которой понимается вероятность безошибочной и своевременной доставки результатов измерений на сетевые шлюзы для дальнейшей обработки,

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 КУ, размер передаваемых пакетов информации.

Следует отметить, что в настоящее время исследования в области БСС производятся в основном коммерческими организациями и носят закрытый характер. Разработаем доступную теоретическую базу для подобных исследований, рассмотрим математические модели, предназначенные для использования их в алгоритме оценивания надежности БСС и обеспечивающие учет перечисленных выше факторов.

Подход к оцениванию надежности основан на представлении функционирования БСС как марковского процесса, и предполагает

использование математической 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. Разработанная модель надежности передачи количественно определяет вероятность успешной передачи пакета.

Данная модель может быть описана выражением, количественно определяющим вероятность p_{ij} успешной передачи пакета от i -го узла БСС j -му. Здесь и далее предполагается, что отправка пакетов i -ым узлом в процессе работы сети образует простейший поток событий с интенсивностью Λ_{I_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. 9).

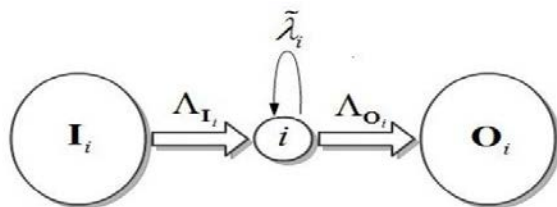


Рис. 9. Потоки событий на i -ом узле БСС

Величиной λ_i на рис. 9 обозначена интенсивность потока событий, соответствующих безуспешным попыткам передачи пакета i -ым узлом. Эту величину можно определить следующим образом:

$$\tilde{\lambda}_i = \sum_{j \in O_i} (\bar{n}_{ij} - 1) \lambda_{ij} \quad (14)$$

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

$$\bar{n}_{ij} = \sum_{x=1}^{+\infty} \left(x \cdot P_{ij}^{(1)} (1 - P_{ij}^{(1)})^{x-1} \right) = \frac{1}{P_{ij}^{(1)}} \quad (15)$$

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 (14) и (15) можно записать:

$$\tilde{\lambda}_i = \sum_{j \in O_i} \frac{\lambda_{ij}}{P_{ij}^{(1)}} \quad (16)$$

Алгоритм расчета вероятности p_{ij} основан на одном из возможных принципов работы механизма маршрутизации в БСС [5]. 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:

$$p_{ij} = Q_j \sum_{k=1}^{N_a} P^{(k)} P_w^{(k)} (\tau_j) \quad (17)$$

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

$$Q_j = \begin{cases} 1, j = 1 \\ \prod_{z=1}^{j-1} (1 - p_{iz}), j > 1, j = 1 \dots |O_i| \end{cases} \quad (18)$$

N_a – максимальное количество неудачных попыток передачи пакета одному узлу;

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

$$P^{(k)} = (1 - P^{(1)})^{k-1} P^{(1)}, k = 1 \dots N_a \quad (19)$$

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

$$P^{(1)} = P_{dj} P_{cij} (1 - P_{hj}) \quad (20)$$

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 [5].

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

$$\sum_{z=1}^k T_{wz} + kT_L \leq \tau_j \quad (21)$$

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 длины 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:

$$\tau_j = T_s - (j-1)(\bar{T}_w + T_L) N_a, j \in O_i \quad (22)$$

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

$$T_s = \frac{1}{\Lambda_{o_i}} - T_L \quad (23)$$

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

\bar{T}_w – среднее значение времени ожидания узлом начала передачи пакета.

Таким образом, учитывая (23), выражение для определения вероятности $P_w^{(k)}(\tau_j)$ можно записать в виде:

$$P_w^{(k)}(\tau_j) = P^{(k)}\left(\sum_{z=1}^k T_{wz} \leq \tau_j - kT_L\right), \quad (24)$$

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

Задания для выполнения практической работы

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблицах 6 и 7 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Необходимо:

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 -й попытки.
5. Рассчитать вероятность непердачи i -ым узлом пакета тем узлам, которые находятся выше j -го в таблице маршрутизации.
6. Определить время, затрачиваемое узлом непосредственно на процесс передачи (приема) пакета фиксированной длины.
7. Определить период времени, в течение которого возможна передача очередного пакета i -ым узлом в адрес j -го.
8. Какие выводы можно сделать после выполнения данной работы?

Таблица 6. Характеристики сенсорной сети

№ вариан- та	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

Таблица 7. Характеристики сенсорной сети

№ варианта	L_p	R	Λ_{o_i}	j	\bar{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

Практическое занятие №6.

РАСЧЕТ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА

Надежность сенсорного узла является мерой его способности работать безотказно и точно в течение заданного периода времени. Сенсорный узел представляет собой устройство, предназначенное для сбора, обработки и передачи информации от окружающей среды. Надежность сенсорного узла включает в себя:

1. Долговечность: это связано с тем, как долго сенсорный узел может работать без потери производительности. Важно, чтобы он сохранял свои функции в течение длительного времени.

2. Устойчивость к внешним воздействиям: сенсорные узлы могут быть подвержены различным внешним факторам, таким как влага, пыль, вибрация и температурные изменения. Надежный сенсорный узел должен быть способен работать надежно в различных условиях.

3. Точность измерений: сенсорный узел должен предоставлять точные данные об окружающей среде, с которой он взаимодействует. Это особенно важно для сенсорных узлов, используемых в научных и промышленных целях.

4. Управление ошибками: надежный сенсорный узел должен быть способен обнаруживать и обрабатывать ошибки, возникающие во время работы. Это может включать в себя механизмы исправления ошибок и резервное копирование данных.

5. Бесперебойность работы: если сенсорный узел собирает данные в режиме реального времени или используется для мониторинга, необходимо, чтобы он работал без простоев или потери связи с другими устройствами.

Все эти аспекты влияют на надежность сенсорного узла и его способность предоставлять точные и непрерывные данные. Повышение надежности сенсорных узлов является важной задачей в разработке систем сбора информации. Надежность сенсорного узла

ла является мерой его способности работать безотказно и точно в течение заданного периода времени. Сенсорный узел представляет собой устройство, предназначенное для сбора, обработки и передачи информации от окружающей среды.

Оценка надежности развертывания беспроводной сенсорной сети является чрезвычайно важной задачей, особенно когда БСС используется для критически важных приложений Интернета вещей (IoT).

Технологии построения беспроводных сенсорных сетей определяют их преимущества перед другими решениями в области мониторинга: автономность узлов, возможность их размещения в труднодоступных местах, малое энергопотребление, способность к самоорганизации. К недостаткам можно отнести их меньшую надежность, под которой понимается вероятность безошибочной и своевременной доставки результатов измерений на сетевые шлюзы для дальнейшей обработки.

Надежность беспроводных сенсорных сетей 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 конечными узлами (узлы, оснащенные сенсорами и осуществляющие измерения), размер передаваемых пакетов информации.

Подход к оцениванию надежности основан на представлении функционирования беспроводной сенсорной сети как марковского процесса [2], и предполагает использование математической модели надежности передачи данных между двумя узлами такой сети, которая, в свою очередь, представляет собой композицию моделей надежности узлов, коммуникаций между ними и механизма их доступа к среде.

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:

$$P_{dj}(t) = (1 - Q_{dj}^{(rnd)}(t)) P_{dj}^{(bat)}(t), \quad (25)$$

где $Q_{dj}^{(rnd)}$ – вероятность случайных отказов j -го узла, закон распределения которых можно в первом приближении принять экспоненциальным [6]:

$$Q_{dj}^{(rnd)} = 1 - e^{-\lambda_f t} \quad (26)$$

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

$P_{dj}^{(bat)}(t)$ – 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:

$$T_{dcj} = \frac{\bar{T}_{dc}^{(nom)}}{\Lambda_{\Sigma_j} T_L}, \quad (27)$$

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

T_L – время трансляции пакета;

$$\Lambda_{\Sigma_j} = \Lambda_{I_j} + \Lambda_{o_j} + \bar{\lambda}_j + \sum_{q \in I_j} \tilde{\lambda}_q^{(j)}, \quad (28)$$

$\tilde{\lambda}_q^{(j)}$ – интенсивность потока событий безуспешных передач пакета q -ым узлом в адрес j -го узла, ее величина может быть получена из (29):

$$\tilde{\lambda}_q^{(j)} = (\bar{n}_{qj} - 1) \lambda_{qj}. \quad (29)$$

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 $P_{dj}^{(bat)}(t)$ можно записать:

$$P_{dj}^{(bat)}(t) = \begin{cases} 1 & | T_{serv} a \leq t < (T_{serv} \cdot a + T_{dcj}) \\ 0 & | (T_{serv} \cdot a + T_{dcj}) \leq t < T_{serv} (a + b + 1) \end{cases}, \quad (30)$$

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.

Задания для выполнения практической работы

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 8 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

Необходимо выполнить следующие пункты:

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.

Отчет должен содержать краткую теорию, необходимые расчеты по варианту, выводы о функционировании сенсорной сети в целом, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое работоспособность узла в сети?
2. От чего зависит надежность БСС?
3. Что такое надежность сети?
4. В какие приложения IoT выходят БСС?
5. Как определить вероятность работоспособности j -го узла на заданный момент времени t .
6. Как определить вероятность работоспособности источника питания (батареи) узла.
7. Что такое безуспешная передача пакетов в сети?
8. Как определить интенсивность потока событий безуспешных передач пакета q -ым узлом в адрес j -го узла.
9. Что такое $P_{dj}^{(bat)}(t)$?
10. Как рассчитать величину $P_{dj}^{(bat)}(t)$?
11. От каких параметров зависит величина $P_{dj}^{(bat)}(t)$ и в каких единицах измеряется?
12. В чем измеряется вероятность работоспособности источника питания (батареи) узла?

Таблица 8. Характеристики сенсорной сети

№ варианта	λ_f	a	b	$\bar{T}_{dc}^{(non)}$	T_L	\bar{n}_{qj}	λ_{qj}	$\bar{\lambda}_j$	Λ_{I_j}	T_s	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

Практическое занятие №7.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДАННЫХ ОБЪЕДИНЁННЫХ СЕНСОРОВ

Объединенные сенсоры, также известные как мультисенсорные системы, представляют собой технологии, которые используют несколько датчиков или сенсоров для сбора и обработки данных. Эти системы могут включать в себя различные типы сенсоров, такие как акселерометры, гироскопы, магнитометры, камеры и другие устройства, которые собирают и анализируют информацию из окружающей среды.

Мультисенсорные системы используются во многих областях, включая робототехнику, медицину, автомобильную промышленность, навигацию и потребительские устройства, такие как смартфоны и фитнес-трекеры. Они позволяют получать более точные и комплексные данные, а также улучшать производительность и функциональность устройств, использующих эти системы.

Одними из основных функций объединенных сенсоров являются:

- измерение физических параметров, таких как ускорение, скорость, давление, температура и другие;
- определение положения и ориентации объекта в пространстве;
- распознавание жестов, мимики и других видов движений;
- обнаружение и классификация объектов с помощью камер и других устройств;
- сбор и анализ данных о здоровье и физической активности с использованием фитнес-трекеров и других медицинских устройств;
- навигация и определение местоположения с использованием GPS, ГЛОНАСС и других систем;

– взаимодействие с окружающей средой и управление устройствами через сенсорные сети;

– обеспечение безопасности и предотвращения вторжений путем обнаружения движений, звуков и других сигналов.

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:

$$P_{cij} = (P_{sij})^{2L_p} \quad (31)$$

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 [6]:

$$P_{sij} = \begin{cases} 1 - 0,008888 \cdot P_{bij}, & P_{bij} \leq 0,14 \\ 0,1405 \cdot \sin(13,08 \cdot P_{bij} - 1,458) + \\ + 6,65 \cdot \sin(0,1261 \cdot P_{bij} + 3,067) P_{bij}, & P_{bij} > 0,14 \end{cases} \quad (32)$$

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

$$P_{bij} = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \right] \quad (33)$$

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 [7];

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:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (34)$$

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

$$\frac{E_b}{N_0} = T_b W \frac{E_{RX}}{E_N} = \frac{E_{RX}}{E_N} \cdot \frac{W}{R} \quad (35)$$

где E_{RX} – амплитуда принимаемого сигнала,

E_N – амплитуда шума,

W – ширина частотной полосы,

R – скорость передачи данных.

При $W=5$ МГц и $R=250$ кб/с $W/R=20$ [6].

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

$$E_{RX} = \sqrt{P_{RX} \cdot R_{ant}} \quad (36)$$

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:

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{\lambda^2 K}{16\pi^2 d^2} \quad (37)$$

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

d – расстояние между узлами (м),

λ – длина волны ($\approx 0,125\text{м}$),

K – коэффициент усиления канала связи ($\approx 0,8$).

Задания для выполнения практической работы

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 9 приведены варианты заданий для расчета характеристик сенсорной сети.

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.

Отчет должен содержать краткую теорию, необходимые расчеты по варианту, выводы о функционировании сенсорной сети в целом, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля

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.

Таблица 9. 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

Практическое занятие №8.

РАСЧЕТ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА «СКРЫТОГО УЗЛА» В СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Задача БСС определяет типичные роли узлов. Узлы измерители (или просто измерители) выполняют измерения при помощи своих датчиков, они служат источниками информации. Узел-шлюз (или просто «шлюз», gateway; в литературе также используются термины «сток», sink, и «базовая станция», base station) принимает результаты измерений и передаёт их потребителю информации. Шлюзов в сети может быть несколько. Если вследствие больших географических размеров БСС, наличия помех и препятствий одни измерители и шлюзы не в состоянии обеспечить связность сети, в её состав вводят дополнительные узлы-маршрутизаторы (или просто маршрутизаторы).

Также в сети могут находиться узлы-обработчики, выполняющие некоторую предварительную обработку результатов измерений. Некоторые узлы могут исполнять несколько ролей. Указанное разделение узлов БСС по ролям имеет важное следствие: произвольные узлы в БСС друг с другом сообщениями не обмениваются. Потоки данных направлены от измерителей к шлюзам: измерители пересылают свои данные не произвольным узлам, а шлюзам, возможно, через маршрутизаторы и обработчики. В обратном направлении могут передаваться команды и иная директивная информация. Других направлений потоков данных в БСС нет.

Подвижность узлов БСС может рассматриваться в трёх аспектах. Пространственная подвижность определяется перемещением узлов в пространстве. При этом могут нарушаться существовавшие ранее маршруты передачи данных, но могут появиться и новые. Анализу различных моделей пространственной подвижности

(детерминированных, вероятностных, с различными ограничениями области, скорости, ускорения и т. п.) посвящены, например, работы [3–5].

Временная подвижность связана с тем, что узлы вследствие перемещений могут покидать сеть, могут появляться новые узлы, для экономии энергии источника питания узлы могут переходить в режим сна, в котором выполнение их обычных функций невозможно. Функциональная подвижность определяется тем, что узлы при определённых условиях могут менять свою роль в сети. Например, узел-маршрутизатор, изначально добавленный в сеть для обеспечения связности, при необходимости может стать источником информации.

В качестве показателей работы БСС обычно рассматривают масштабируемость, долговечность, надёжность и скорость доставки сообщений.

Масштабируемость означает обеспечение требуемого количества узлов в сети при линейном (в худшем случае) росте потребности в ресурсах (в данном случае критическими ресурсами являются радиоканал и источник питания). Масштабируемость может рассматриваться как интегральная мера качества взаимодействия различных протоколов и подходов. Значение этого критерия ограничивает количество узлов в БСС.

Долговечность означает обеспечение заданного периода функционирования БСС. При этом на некоторых узлах могут происходить программные и/или аппаратные сбои, некоторое количество узлов может выйти из строя навсегда, но БСС в целом должна выполнять свои функции. Для достижения заданной долговечности приходится жертвовать другими характеристиками БСС: уменьшать мощность передатчика (следовательно, и связанное с мощностью передатчика расстояние связи между узлами), периодически переводить узлы в состояние сна и т. п.

Надёжность означает способность БСС предоставлять потребителю информации результаты измерений датчиков узлов. Результаты измерений могут быть не доставлены вследствие высокой конкуренции узлов за доступ к радиоканалу, из-за перевода узлов в режим сна, из-за выхода узлов из строя, нарушения связности сети и т. п. Надёжность БСС может быть определена как отношение количества успешно доставленных результатов измерений к общему количеству измерений.

Скорость доставки сообщений может рассматриваться как показатель оптимальности маршрута и согласованности работы узлов – даже при выборе оптимального маршрута сообщение на передающем узле может ожидать включения приёмного узла. Значение скорости доставки может быть выражено как отношение фактической длительности пересылки сообщения по маршруту к длине кратчайшего допустимого с точки зрения текущей топологии маршрута.

Приведённый перечень показателей работы БСС противоречив, повышение значения одного из них влечёт снижение значений других показателей.

Задачей самоорганизации БСС на канальном уровне является обеспечение множественного доступа к каналу. В беспроводных сетях затухание сигнала по мере удаления от передатчика приводит к двум возможным проблемам, которые должны быть решены средствами самоорганизации.

На рис. 10 показаны три узла А, В и С и области приёма их сообщений. Узлы А и С не в состоянии обнаружить передачу друг друга, но на узле В при одновременной передаче узлов А и С произойдёт коллизия. Эта проблема известна как «проблема скрытого узла» (hidden node) [8].

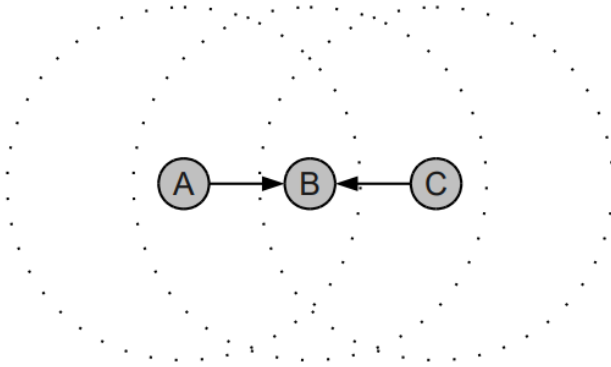


Рис. 10. Проблема скрытого узла

На рис. 11 показаны четыре узла A, B, C и D и области приёма их сообщений. Во время передачи узла B, адресованной узлу A, узел C принимает это сообщение и решая, что канал занят, не начинает свою передачу, адресованную узлу D. В результате сообщение, которое могло бы быть передано одновременно с работой узла B, будет доставлено позже. Эта проблема известна как «проблема незащищённого узла» (exposed node) [3].

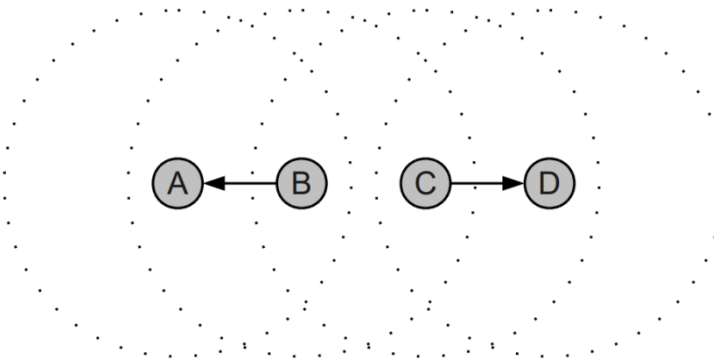


Рис. 11. Проблема незащищённого узла

Проблема «скрытых узлов» в сенсорных сетях характерна для распределенных беспроводных сетей необладающих полной связностью [1]. Её проявление состоит в следующем: в процессе передачи пакета i -м 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 -м 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 -м узлом и одним из множества $A_j \setminus A_i$:

$$\begin{aligned}
 P_h = & \sum_{k_1 \in A_j / A_i} P_{h_{k_1}} - \sum_{k_1, k_2 \in A_j / A_i} P_{h_{k_1, k_2}} + \\
 & + \sum_{k_1, k_2, k_3 \in A_j / A_i} P_{h_{k_1, k_2, k_3}} - \dots + (-1)^{n-1} P_{h_{k_1, k_2, k_3, \dots, k_n}} \quad (38)
 \end{aligned}$$

$P_{h_{k_1, k_2, k_3, \dots, k_n}}$ – вероятность возникновения коллизий с z «скрытыми» узлами (%).

Для определения вероятности коллизий (38) используем подход, описанный в [2]. 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 $A_j \setminus A_i$: $P_{hk}^{(a)} = (\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k) \cdot T_L$;

б) вероятности того, что передача начнется за время трансляции пакета: $P_{hk}^{(b)} = 1 - e^{-(\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k) \cdot T_L}$, где $\tilde{\lambda}_k$ дано в таблице.

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

$$\begin{aligned} P_{hk} &= P_{hk}^{(a)} + P_{hk}^{(b)} (1 - P_{hk}^{(a)}) = \\ &= 1 - e^{-(\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k) \cdot T_L} \cdot (1 - (\Lambda_{O_k} + \tilde{\lambda}_k) \cdot T_L) \end{aligned} \quad (39)$$

Размещение узлов и зоны радиовидимости при проявлении эффекта «скрытого узла» показано на рис. 12.

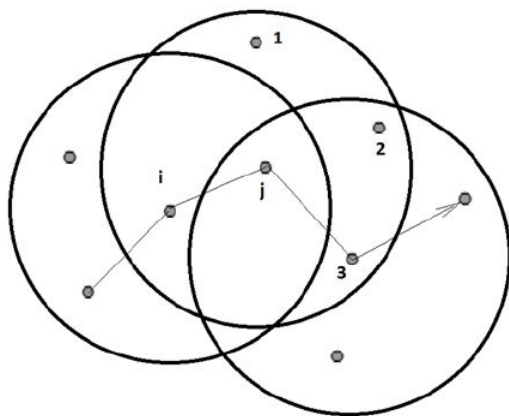


Рис. 12. Размещение узлов и зоны радиовидимости при проявлении эффекта «скрытого узла»

На основе топологии, изображенной на рис. 6, 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 $P_{h13} = P_{h1} \cdot P_{h3}$.

Задания для выполнения практической работы

Вариант выбирается по номеру человека в группе. В таблице 10 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.

Отчет должен содержать краткую теорию, необходимые расчеты по варианту, выводы о функционировании сенсорной сети в целом, а также ответы на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля

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 .

Таблица 10. Характеристики сенсорной сети

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков, А.В. Интернет вещей [Текст] / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков // Учебное пособие. – ПГУТИ, 2015. – 285 с.

2. Баскаков, С. Оценка энергопотребления беспроводных узлов в сетях MeshLogic [Текст] / С. Баскаков // Беспроводные технологии. – 2010. – № 1. – С. 28–31.

3. Акимов, Е.В. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей [Текст] / Е.В. Акимов, М.Н. Кузнецов // Электронный журнал «Труды МАИ». – Выпуск № 40. – 2018. – С. 1–13.

4. Галкин, П.В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей / П.В. Галкин // Scientific Journal «ScienceRise» №2 (2) 2014. С. 55 – 61.

5. Глушак Е.В. Модель беспроводной сенсорной сети как система массового обслуживания [Текст] /А.В. Журкин, Е.В. Глушак // Тез. докл. на МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Уфа, 2018. – С. 156–157.

6. Глушак Е.В. Методы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях [Текст] /А.В. Журкин, Е.В. Глушак // Тез. докл. на Внеочередной XIX Международной НТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уральск, 2018. – С. 129–131.

7. Глушак Е.В. Расчет энергопотребления и времени работы узлов в беспроводной сенсорной сети [Текст] / А.В. Журкин, Е.В. Глушак // Тез. докл. на XXVI РНК ППС ПГУТИ. – Самара, 2019. – С. 35–36.

8. Глушак Е.В. Модель надежности коммуникации между узлами в БСС [Текст] /А.В. Журкин, Е.В. Глушак // Тез. докл. на Международной НТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Казань, 2019. – С. 108–110.

Учебное издание

*Глушак Елена Владимировна
Куприянов Александр Викторович*

**Введение в Интернет вещей
(практические работы)**

Практикум

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 28.12.2023. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,5.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-27 экз.).

Заказ № . Арт. – 9(Р2ДПР)/2023.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.