

И.М. Никольский¹, К.К. Фурманов²

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУБЛИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Введение

В настоящее время автоматизация процессов управления проникает во многие сферы человеческой деятельности. Автоматизированное управление опирается на постоянный сбор большого объёма данных о контролируемом процессе с помощью набора датчиков. Так, например, в высокотехнологичных теплицах постоянно отслеживаются такие характеристики как температура, влажность, уровень освещённости, кислотность почвы (рН) и т.д.[1].

Системы мониторинга, ведущие сбор необходимых данных о характеристиках контролируемого процесса, часто строятся на основе беспроводных сенсорных сетей (БСС)[2]. Такие сети представляет собой совокупность устройств, состоящих из микроконтроллера, датчика, трансивера и элемента питания. Каждое такое устройство способно замерять одну или несколько физических величин (температуру, давление, освещённость и т.д.) и пересылать её по радиоканалу. Для уменьшения количества дальних передач каждый узел может использовать соседние узлы сети для ретрансляции сообщений. Основное применение таких сетей - мониторинг в таких сферах как сельское хозяйство, нефтегазодобыча и т.д.

Одной из главных проблем сенсорных сетей является ненадёжность радиоканала. Помехи, интерференция, коллизии сигналов от разных узлов сети приводят к потере части данных, полученных сенсорами. Один из способов уменьшения потери информации - дублирование сообщений. В литературе были предложены различные методы для оптимизации количества дублей. Так, например, в работе [3] был предложен способ на основе нечёткой логики, а в [4] — распределённый алгоритм, использующий динамическое программирование.

В данной работе предложен метод определения количества дублей, основанный на статистическом анализе уровня потерь информации. Основным его преимуществом является простота реализации. Предложенный метод реализован в виде протокола сбора информации на

1 МГУ им. М.В.Ломоносова, факультет ВМК, кафедра СКИ, nikolsky@cs.msu.ru

2 Национальный Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики, департамент прикладной экономики, kfurmanov@hse.ru

центральный узел сети. Протокол опробован на стендовой модели сенсорной сети. Узлы данной тестовой сети включают плату Arduino Nano (основана на микроконтроллере Atmel ATmega328), радиомодуль NRF24L01 и датчик влажности и температуры DHT11. Проведённые эксперименты показали, что предложенный протокол действительно позволяет эффективно снижать потери данных.

1. Постановка задачи

Рассмотрим беспроводную сенсорную сеть, предназначенную для периодического сбора информации с сенсоров. Сеть имеет топологию «звезда». Один из узлов является выделенным (назовём его *стоком*), он предназначен для сбора информации со всех остальных узлов. Будем называть подчинённые узлы *сенсорами*.

Каждый сенсор периодически производит замер некоторой физической величины и отправляет полученную информацию на сток. Сток аккумулирует информацию со всех остальных узлов сети и время от времени передаёт данные на ПК (см. рис. 1).

Предполагается, что канал связи ненадёжен, часть сообщений теряется. В связи с этим будем дублировать каждое сообщение. Возникает вопрос, как определить количество дублей N_d . Представляется разумным, что N_d должно зависеть от фактического уровня потерь сообщений в канале. Установка количества дублей «с запасом» является контрпродуктивным, так как приводит к лишнему расходу энергии, а следовательно — уменьшению времени работы узла.

Для оценки свойств радиоканала при запуске БСС мы можем выполнить посылку ряда тестовых (не несущих информации об отслеживаемой величине) сообщений с одного из сенсоров на сток. Количество сообщений в тестовом потоке должно быть выбрано так, чтобы вероятность отклонения определённой нами выборочной доли полученных сообщений от реальной была бы не меньше заданного критического уровня.

2. Определение количества сообщений в тестовом потоке

Поставим задачу выбрать количество сообщений в тестовом потоке так, чтобы разница между точной долей входящих сообщений p и соответствующей выборочной долей $p_{выб}$ превышала допустимую погрешность b процентов с вероятностью не большей α :

$$P(|p_{выб} - p| > b) \leq \alpha.$$

Предположим, что потери происходят в соответствии со схемой Бернулли: вероятность успешной передачи постоянна и успех каждой передачи не зависит от прочих. Согласно [5] минимальный объём

выборки, гарантирующий требуемую точность при оценивании доли доходящих сообщений (вероятности успеха), определяется по формуле:

$$n_{tst} = \left\lceil \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{4b^2} \right\rceil, \quad (1)$$

где $z_{1-\alpha/2}$ — квантиль уровня $1-\alpha/2$ стандартного нормального распределения. Для заданных значений допустимой погрешности b и вероятности её превышения α по формуле (1) определяется число сообщений n_{tst} , которые посылаются для оценивания доли потерь с требуемой точностью. Это число может быть неизвестно стоку — он лишь сообщает сенсору количество дошедших сообщений n_{rcv} , так что сенсор может рассчитать долю успешных передач $p_{\text{выб}} = n_{rcv}/n_{tst}$.

Если истинная доля доходящих сообщений p известна, то вероятность π того, что из N_d пересылаемых дублей дойдет хотя бы один, может быть рассчитана по формуле:

$$\pi = 1 - (1 - p)^{N_d}. \quad (2)$$

Оценив с нужной точностью долю p , можно выбрать число пересылаемых дублей N_d так, чтобы оно гарантировало допустимую вероятность успешной в конечном счёте передачи π :

$$N_d = \left\lceil \log_{1-p}(1 - \pi) \right\rceil. \quad (3)$$

3. Протокол взаимодействия сенсора и стока

Формула (1) даёт нам возможность определить количество тестовых сообщений, которые будут переданы с сенсора на сток перед началом основного этапа работы БСС — сбора информации с датчиков. После окончания тестового потока сток должен передать количество дошедших сообщений n_{rcv} сенсору, чтоб тот мог вычислить необходимое количество дублей согласно (3). Однако сток самостоятельно не может определить момент окончания тестового потока, даже если ему известно общее количество тестовых сообщений. Сенсор должен обозначить конец потока с помощью специального сообщения-маркера FIN. Однако оно может быть утеряно.

Для решения данной проблемы предлагается, чтобы сенсор после передачи всех тестовых сообщений начинал циклическую посылку сообщений FIN. Со своей стороны сток ведёт подсчет дошедших тестовых сообщений до получения FIN, после чего начинает циклическую передачу сообщения STAT, в которое вложено n_{rcv} . Сенсор, получив STAT, завершает передачу сообщений FIN, подсчитывает количество дублей N_d согласно (2). После этого он начинает передачу сообщений DATA, несущих информацию с датчика. Каждое измерение дублируется N_d раз. Сток завершает передачу STAT, получив первое сообщение с

данными мониторинга. Ниже приводится формальное описание предложенных алгоритмов работы сенсора и стока.

Алгоритм работы стока

1. Сток циклически шлёт сообщение START, сигнализирующее сенсору, что необходимо начинать тестовый поток; передача сообщений START заканчивается, когда будет получено тестовое сообщение.
2. После приёма первого тестового сообщения сток начинает подсчёт дошедших тестовых сообщений.
3. После получения маркера конца тестового потока сток циклически шлёт сообщение STAT, содержащее количество дошедших тестовых сообщений. Это происходит до получения от сенсора сообщения DATA, содержащего данные с датчика.
4. После получения первого сообщения с данными, сток переходит в режим приёма информации с датчика

Алгоритм работы сенсора

1. Сенсор ожидает сообщения START
2. Начинает передачу тестового потока сообщений. Количество сообщений в этом потоке определяется согласно формуле (1)
3. По окончании передачи тестового потока сенсор циклически шлёт маркер конца потока (сообщение FIN). Это происходит до получения сообщения STAT
4. Используя информацию из сообщения STAT, сенсор вычисляет необходимое количество дублей N_d согласно (3)
5. Сенсор переходит в режим периодической посылки информации о наблюдаемой величине. Замеры с датчика вкладываются в сообщения DATA. Каждое такое сообщение дублируется N_d раз

4. Стендовая модель БСС

Предложенный протокол был опробован на модельной сенсорной сети. При построении этой сети были поставлены две задачи: 1) цена электронных компонентов должна быть невысокой; 2) использование этих компонентов должно быть доступно лицам, не обладающим специальными знаниями в электронике. В итоге для управления работой узла была выбрана микроконтроллерная плата Arduino Nano 3.0, а для обмена информацией по беспроводному каналу - радиомодуль NRF24L01.

Плата Arduino Nano 3.0 является одной из самых бюджетных и компактных моделей в семействе Arduino. Она построена на микроконтроллере Atmel ATmega328 частотой 16МГц. Объём флэш-памяти составляет 32Кб, что вполне достаточно для задач, стоящих перед узлами БСС. Отметим также простоту и удобство программирования

Arduino, наличие большого количества библиотек для работы со всевозможными датчиками. Это позволяет экспериментатору сосредоточиться на построении БСС для своей задачи, без необходимости вникать в тонкости работы с микроконтроллером.

Платы семейства Arduino достаточно часто используются при построении БСС. Методика построения сенсорных сетей на основе этих плат изложена в [6]. В качестве приемопередатчика в этой и многих других работах используют трансиверы Xbee, реализующие протокол ZigBee, популярный в области интернета вещей.

К сожалению, эти радиомодули весьма дороги. В нашей сети используется более дешёвый NRF24L01 (в некоторых магазинах цена на эти радиомодули на порядок ниже, чем у Xbee). Трансивер NRF24L01 обладает и другими достоинствами, такими как высокая пропускная способность, наличие высокоуровневых библиотек для работы с этим модулем (например, RadioHead, которая использовалась в данном проекте), что позволяет избежать сложной настройки через регистры. Модуль работает на частоте 2,4 ГГц, не требующей специальных разрешений.

Исследованию эффективности NRF24L01 при использовании в узлах БСС посвящен целый ряд работ. В [7] отмечается меньшая энергоэффективность модуля NRF24L01 по сравнению с Xbee. В другом исследовании ([8]) было показано, что в БСС с топологией «звезда» протокол радиопередачи модуль NRF24L01 превосходит протоколы ESP-Now (специальная реализация Wi-Fi) и Bluetooth Low Energy (BLE) по пропускной способности и потребляемому току. Несмотря на критику уровня энергоэффективности NRF24L01 со стороны некоторых исследователей, данный трансивер применяется в реальных БСС (см. напр. [9]).

Модельная БСС, построенная в рамках предлагаемой работы, состоит из двух узлов. Рабочий узел (сенсор) оснащён датчиком температуры DHT11. Сенсор периодически передаёт замеры температуры на сток — узел БСС, соединённый с ПК. По ряду технических причин часть сообщений теряется, в связи с чем появляется возможность протестировать изложенную выше схему дублирования сообщений. Результаты экспериментов представлены в следующем разделе.

5. Результаты экспериментов на стендовой модели

Эксперименты проводились на сети в минимальной конфигурации — один стоковый узел и один сенсор, оснащённый температурным датчиком DHT11.

Значения параметров в формуле (1) были взяты следующие: $b = 0,06$, $\alpha = 0,05$. Таким образом минимальный объём тестового потока, необходимый для определения уровня потерь, согласно (1) составил 277 сообщений. В целях повышения надёжности оценки объём тестового потока был взят равным 300 сообщений.

Для определения уровня потерь была проведена серия экспериментов по передаче последовательности тестовых сообщений с сенсора на сток. Серия состояла из 10 потоков по 300 сообщений. Доля потерянных сообщений составила от 50 до 87 процентов. Можно заключить, что наша БСС функционирует в условиях очень ненадёжной связи между узлами. Большой разброс доли потерь по сравнению с величиной допустимой погрешности b свидетельствует, что вероятность потерь менялась от опыта к опыту. В единичном случае, не входившем в запланированную серию экспериментов, лишь 2 сообщения из 300 были успешно переданы, что соответствует доле успехов $P_{\text{выб}} = 0,67\%$.

Следующий эксперимент состоял в передаче 19 сообщений с дублированием, каждое сообщение дублировалось 213 раз. По формуле (2) это число дублей гарантирует успешную в итоге передачу сообщения с вероятностью, не отличимой от единицы в «типичных» условиях (наблюдавшихся в первом эксперименте, где доля доходящих сообщений не опускалась ниже 13%). В «нетипичном» худшем случае с долей успешных передач 0,67% отправление 213 дублей соответствует вероятности дохождения хотя бы одного сообщения равной 76%.

На рис. 1 представлены номера первых полученных дублей для каждого сообщения. По горизонтальной оси отложен номер сообщения, по вертикальной оси — номер первого полученного стоком дубля для данного сообщения. Видно, что использование дублирования вполне обосновано, поскольку первый дубль сообщения не был получен ни разу. В некоторых случаях было потеряно более ста первых дублей. Для приёма более 70% сообщений понадобилось 20 и более дублей. На рис. 2 представлены результаты работы протокола с дублированием в несколько другом разрезе. По горизонтали отложен номер сообщения, по вертикали — количество дублей данного сообщения, дошедших до стока. График показывает, что потерь информации удалось избежать — по крайней мере один дубль доходил для каждого сообщения. Кроме того, невысоким оказалось и количество избыточных дублей (избыточными дублями сообщения *msg* будем считать все полученные стоком дубли *msg*, кроме дубля, пришедшего первым). Среднее количество дошедших дублей составило 4,75. Этот результат является положительным, т. к. передача каждого избыточного дубля уменьшает эффективность энергопотребления сети.

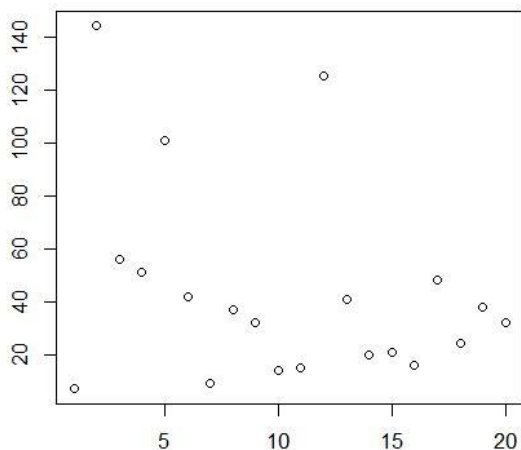


Рис.1. Номера первых дошедших дублей

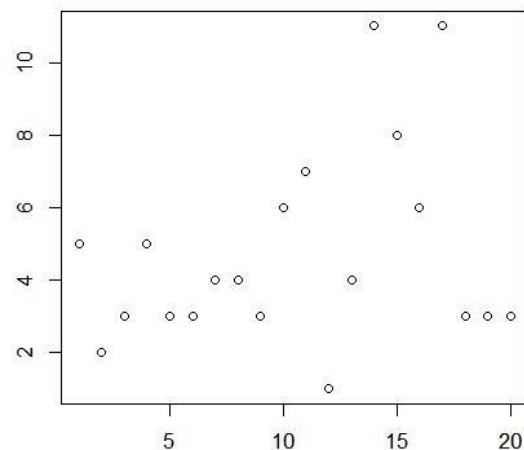


Рис.2. Количество дошедших дублей

Заключение

В данной работе предложен способ определения количества повторов сообщений, необходимого для того, чтобы сообщение дошло до получателя в условиях ненадёжного радиоканала. В нашем случае получателем является сток БСС - центральный узел, ведущий сбор информации с рабочих узлов (сенсоров).

Предложенный способ реализован в виде протокола взаимодействия сенсора и стока. Данный протокол состоит из двух фаз: потока тестовых сообщений, позволяющего статистически определить уровень потерь информации в канале и собственно сбора данных с дублированием сообщений. Протокол протестирован в сети с минимальной конфигурацией — один сток и один сенсор. Проведенные испытания показали, что потери информации действительно удаётся значительно сократить. Описанный в работе протокол рассчитан на взаимодействие между стоком и одним сенсором, однако может быть обобщён на случай нескольких сенсоров.

Литература

1. A. Pawlowski, J. L. Guzman et al. Simulation of Greenhouse Climate Monitoring and Control with Wireless Sensor Network and Event-Based Control // Sensors 2009, 9(1), pp. 232-252

2. *W. Dargie, C. Poellabaue. Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice Wireless Communications and Mobile Computing John Wiley & Sons, 2010, 336 p.*
3. *I. Umoren, D. Asuquo, O. Gilean, M. Esang. Performability of Retransmission of Loss Packets in Wireless Sensor Networks // Computer and Information Science, Vol. 12, No. 2, 2019, pp 71-86*
4. *R. Bi, Y. Li, G. Tan, L. Sun. Optimizing Retransmission Threshold in Wireless Sensor Networks // Sensors 2016, 16, 665.*
5. *J.L. Devore, K. N. Berk. Modern Mathematical Statistics with Applications Thomson Brooks/Cole, 2007, 838 p.*
6. *R. Faludi. Building Wireless Sensor Networks with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing. O'Reilly Media, 2010, 322 p.*
7. *H. Saha, S. Mandal, S. Mitra, S. Banerjee, U. Saha. Comparative Performance Analysis between nRF24L01+ and XBEE ZB Module Based Wireless Ad-hoc Networks// International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS), Vol.9, No.7, pp.36-44,*
8. *N. Sizen. A Comparative study of Wireless Star Networks Implemented with Current Wireless Protocols // Masters Theses, 2019, 920 p.*
9. *A. Rahman, N. Athilah, A. Jambek. Wireless sensor node design //3rd International Conference on Electronic Design (ICED), August 11-12, 2016, Phuket, Thailand, pp. 332-336.*