

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДОСТАВКИ ПРИОРИТЕТНЫХ ПАКЕТОВ ДАННЫХ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Е. В. Тараканов

Институт кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета, 634034, Томск, Россия

УДК 004.75

Показана возможность применения отношений консенсуса для назначения приоритетов передачи данных в сенсорных сетях. Выбран оптимальный для использования в мобильных устройствах алгоритм определения консенсуса и разработан механизм предотвращения перегрузки сети. Результаты моделирования показывают возрастание надежности доставки приоритетных пакетов данных.

Ключевые слова: отношения консенсуса, переменная скорость передачи, очередь передачи сообщений по приоритету, беспроводная сенсорная сеть.

The paper describes application consensus relation to assign packet's priority in wireless sensor networks. We choose optimal consensus relation algorithm for motes, describe congestion avoiding scheme. Simulation results show that the proposed scheme can effectively increase the delivery rate of critical packets.

Key words: converge-cast, consensus relation, adaptive rate, preemptive queuing, wireless sensor network.

Введение. В системах с недостаточной скоростью передачи данных может возникать необходимость срочно передать приоритетный пакет с минимальной задержкой. Традиционным способом решения этой проблемы является разделение пакетов по приоритету на основе заранее определенных правил. Однако подобная система имеет недостатки, такие как необходимость формировать и рассылать новые правила назначения приоритета в случае изменения типов передаваемых данных, вероятность конфликтов в случае появления пакетов с одинаковым приоритетом. В данной работе описываются способ назначения приоритетов передаваемым данным на основе отношений консенсуса и система передачи данных с использованием очереди отсортированных по приоритету пакетов.

В качестве способа нахождения консенсуса была выбрана медиана Кемени. Однако медиана Кемени не всегда дает однозначное решение. Поэтому в качестве метода поиска отношений консенсуса использован метод Борда, позволяющий гарантированно находить единственное решение за линейное время.

На основе назначения приоритетов методом поиска отношения консенсуса разработана система передачи данных в беспроводной сенсорной сети Pritrans, где приоритеты пакетов используются для формирования очереди передачи данных.

1. Определение отношений консенсуса. Одна из основных идей в теории социального консенсуса заключается в том, что отношение консенсуса в группе может быть найдено путем поиска дистанции между ранжированиями.

Предположим, что имеется m ранжирований на наборе $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ из n объектов. Тогда получаем набор отношений $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, где каждое из m ранжирований $\lambda = \{a_1 \succ a_2 \succ \dots \sim a_s \sim a_t \sim a_n\}$ может включать строгое отношение " $\succ$ " или эквивалентность " $\sim$ ".

Ранжирование λ называется слабым порядком, если включает как отношения строгого порядка, так и эквивалентности. Набор отношений Λ называется профилем предпочтений для заданных m ранжирований. Можно определить одно решение, дающее интегральную характеристику набору объектов. Пусть подпространство Π состоит из всех $n!$ строгих отношений " $\succ$ " на наборе A . Каждый строгий порядок можно описать как перестановку из первых n натуральных чисел. Используем перестановку $\beta \in \Pi$ для представления профиля предпочтений, называя ее отношением консенсуса [1].

Пусть λ представляет собой матрицу отношений $R = [r_{ij}]$, где

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & a_i \succ a_j, \\ 0, & a_i \sim a_j, \\ -1, & a_i \prec a_j. \end{cases}$$

Расстояние между отношениями λ_k и λ_l выражается формулой

$$d(\lambda_k, \lambda_l) = \sum_{i < j} |r_{ij}^k - r_{ij}^l|.$$

Данное расстояние называется дистанцией Кемени. Соответственно медианой Кемени называется отношение консенсуса β , заданное формулой

$$\beta = \arg \min \sum_{k=1}^m d(\lambda, \lambda_k) \quad (1)$$

Отношение β соответствует перестановке строк и столбцов матрицы профиля $P = [p_{ij}]$

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^m d_{ij}^k,$$

где

$$d_{ij}^k = \begin{cases} 0, & a_i^k \succ a_j^k, \\ 1, & a_i^k \sim a_j^k, \\ 2, & a_i^k \prec a_j^k. \end{cases}$$

Из выражения (1) следует, что для отношения β сумма верхних треугольных элементов матрицы P минимальна. Иными словами, β находится на наименьшем расстоянии от всех остальных возможных строгих порядков.

2. Задача динамического определения приоритета передачи данных. Рассмотрим задачу динамического определения приоритета передачи данных на примере автоматической системы пожарного оповещения. Каждый датчик системы представляет собой мультисенсор, измеряющий несколько параметров – температуру, ее изменение, степень задымленности, присутствие людей, работу системы пожаротушения. Для каждого помещения существует дополнительная

переменная "приоритет", задаваемая при наличии в помещении ценного оборудования. Таким образом, состояние каждого помещения описывается набором из шести переменных.

В случае пожара при одноуровневой системе может произойти перегрузка каналов связи датчиков с диспетчерским центром. Решить эту проблему можно двумя путями: либо увеличивая пропускную способность каналов (что приводит к удорожанию системы), либо построив многоуровневую систему сбора данных, на каждом уровне которой будут выделяться наиболее важные пакеты для передачи на следующий уровень.

Для выделения наиболее важных пакетов возникает задача назначения приоритета пакетам. Для этого на каждом узле системы с подключенными к нему n датчиками на основе полученных от датчиков данных строится профиль предпочтений Λ из шести ранжирований по n элементов. Построив отношение консенсуса β , можно отсортировать пакеты в порядке убывания приоритета и выбрать заранее заданное число наиболее важных пакетов для передачи на следующий уровень. Отношение консенсуса вычисляется различными способами, например с помощью медианы Кемени.

3. Использование медианы Кемени для поиска отношений консенсуса. Если на некоторый узел сети поступает измерительная информация с семи датчиков, то профиль предпочтений может иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\lambda_1 : a_5 \succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \sim a_7 \succ a_4 \succ a_1, \\ \lambda_2 : a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_4 \succ a_6 \succ a_1 \succ a_7, \\ \lambda_3 : a_3 \succ a_6 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_7 \succ a_4 \succ a_1, \\ \lambda_4 : a_5 \succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7, \\ \lambda_5 : a_2 \sim a_3 \sim a_4 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_5 \sim a_7, \\ \lambda_6 : a_3 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_2 \sim a_4 \sim a_5 \sim a_7.\end{aligned}\tag{2}$$

Профиль предпочтений (2) является входным параметром для алгоритма, осуществляющего поиск медианы Кемени методом ветвей и границ.

Медиана Кемени имеет два существенных недостатка. Во-первых, задача нахождения медианы Кемени является NP-полной и время, затрачиваемое на ее решение, экспоненциально возрастает, что критично в условиях ограниченных ресурсов узлов беспроводной сети. Во-вторых, как показано в [2], медиан Кемени может быть несколько. Например, в данном профиле предпочтений имеется четыре медианы Кемени:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \{a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_7 \succ a_1\}, \\ \beta_2 &= \{a_3 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_7 \succ a_1\}, \\ \beta_3 &= \{a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\}, \\ \beta_4 &= \{a_3 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\}.\end{aligned}$$

Проблему неоднозначности можно попытаться решить с помощью ослабления порядка. В данном случае, полагая $a_5 \sim a_3$, $a_7 \sim a_1$, получим единственное решение. Однако, во-первых, не всегда можно свести решение к единственному, а во-вторых, для задачи выделения высокоприоритетных пакетов необходим строгий порядок.

Таким образом, для поиска отношения консенсуса необходимо использовать другой метод.

4. Поиск отношения консенсуса методом Борда. В качестве альтернативы медиане Кемени можно использовать счет Борда. При использовании данного метода решение всегда существует и единственно.

Счет Борда основывается на следующем расположении элементов ранжирования: последний элемент получает 0 баллов, предпоследний – 1 балл, первый – $n-1$ баллов. В итоговом ранжировании элементы распределяются в порядке убывания суммы баллов, набранных путем подсчета всех ранжирований профиля предпочтений.

Алгоритм 1. Счет Борда

1. Пусть S – таблица предпочтений из m ранжирований по n пакетов.
2. Пусть $RowSum_i$ – сумма i -го столбца, где $i \in [1, n]$.
3. Пусть $CR = \{cr_1, cr_2, \dots, cr_n\}$ – искомое отношение консенсуса.
4. for $i \leftarrow 1, n$ do
5. $cr_i \leftarrow i + +$; $RowSum_i \leftarrow 0$;
6. end for
7. for $i \leftarrow 1, n$ do
8. for $j \leftarrow 1, n$ do
9. $RowSum_i += s_{ij}$;
10. end for
11. end for
12. Сортируем $RowSum_i$ и cr_i в порядке убывания.

Результатом работы алгоритма является следующее отношение консенсуса:

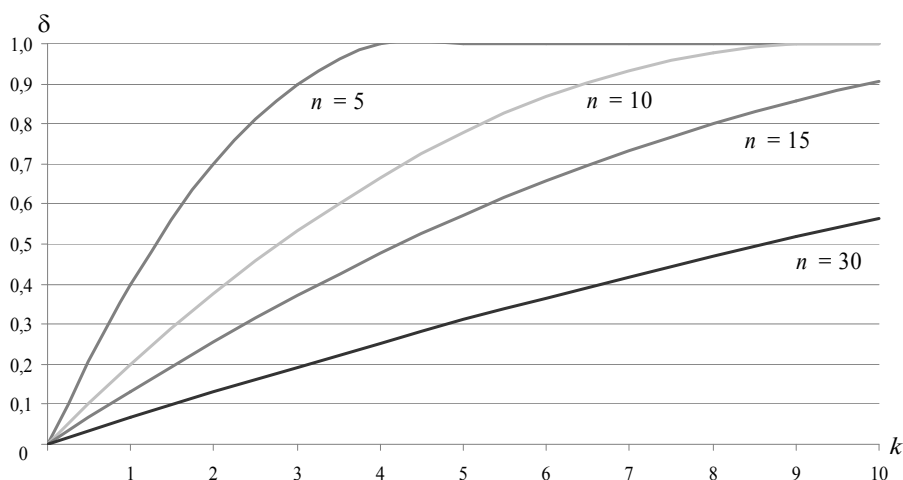
$$\beta = \{a_3 \succ a_2 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\}.$$

Затраты времени на поиск отношения консенсуса с помощью счета Борда возрастают полиномиально, что позволяет управлять частотой пересчета отношения консенсуса в зависимости от вычислительной мощности узла сети и количества передаваемых через узел пакетов n .

5. Использование отношения консенсуса для создания очереди передачи. Найденное отношение консенсуса позволяет назначать приоритеты передаваемым пакетам данных. В отношении β наивысший приоритет получает пакет α_3 , наименьший приоритет получает пакет α_7 . При формировании очереди сообщений для передачи на узел-приемник данных пакеты сортируются в порядке убывания приоритета. Добавление пакета в заполненную очередь сообщений приведет к отбрасыванию пакета с наименьшим приоритетом.

Отбрасывание пакетов может привести к утере части измерительной информации. Предположим, что существуют отношение β размером n и отношение β' , полученное путем отбрасывания последних k пакетов из отношения β . Как показано в [2], зная n и k , можно вычислить относительное расстояние δ между отношениями β и β' . Относительное расстояние δ является численной характеристикой различия двух отношений. На рис. 1 показана зависимость относительного расстояния δ от k при некотором заранее заданном числе пакетов n .

Зная некоторое заранее заданное значение δ , можно выбирать количество отбрасываемых пакетов для соответствующих значений n .

Рис. 1. Зависимость относительного расстояния δ от n и k

6. Система Pritrans. Описанный способ формирования очереди сообщений используется в системе Pritrans, разработанной Сингапурским национальным университетом совместно с Томским политехническим университетом. В основу системы положены принципы динамического назначения приоритетов с использованием отношений консенсуса, управляемого интервала между пакетами для избежания коллизий и отбрасывания пакетов. Для оценки эффективности Pritrans была встроена в TinyOS 2.1 и с помощью среды TOSSIM проведено моделирование сети из 241 узла в 15 кластерах. В качестве протокола передачи использовалась эмуляция CC2420 с максимальной скоростью 256 кб/с.

Сенсоры сети получали данные, соответствующие пожару в районе узла 26, распространяющемуся со скоростью 1 узел/с. По мере распространения пакеты с горячих узлов получали больший приоритет, вследствие чего интервал передачи пакетов с остальных узлов возрастал, что позволяло предоставлять важным пакетам большую ширину канала. За счет уменьшения интервала между пакетами данных с горячих узлов и немедленной передачи по цепи важных пакетов частота получения важных пакетов центральным узлом увеличилась с 0,067 до 0,250 пакет/с.

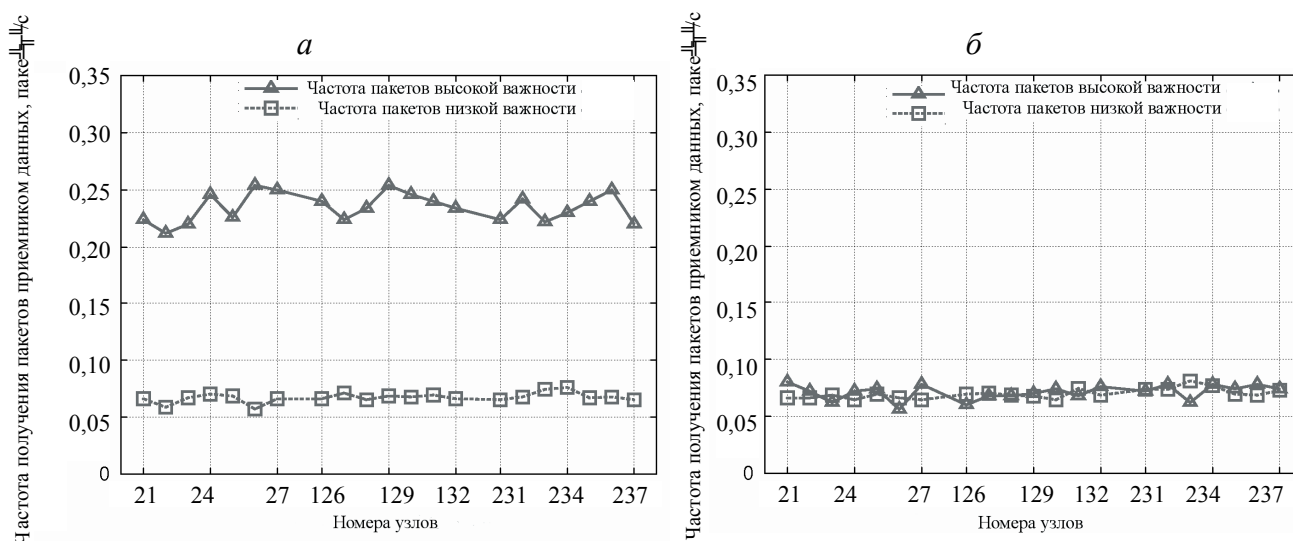


Рис. 2. Частота пакетов на источнике данных при использовании (а) и без использования (б) Pritrans

Подробное описание Pritrans и процесса моделирования приведено в [3].

Заключение. Предложен способ динамического назначения приоритетов передаваемым пакетам данных методом поиска отношений консенсуса. Проанализированы различные методы поиска отношений консенсуса, в результате чего выбран оптимальный метод для использования в узлах беспроводной сенсорной сети. Разработанный метод применен в системе Pritrans (совместная разработка с Сингапурским национальным университетом). Проведенное моделирование показало эффективность работы системы Pritrans при превышении максимальной нагрузки на сеть, что позволило повысить надежность доставки приоритетных пакетов данных.

Список литературы

1. MURAVYOV S. V. Rankings as ordinal scale measurement results // Metrology Measurement Syst. 2007. V. 13, N 1. P. 9–24.
2. MURAVYOV S. V., CHAN M. Ch., KHOMYAKOVA M. Prioritizing sensed data transmission by consensus relation in wireless sensor network // Proc. of the 12th Joint Intern. measurement confederation education and training in measurement and instrumentation and measurement science (IMEKO TC1 & TC7) symp. "Man, science and measurement", Annecy (France), Sept. 3–5, 2008. S. 1.: Univ. de Savoie, 2008. P. 277–282.
3. SHAO TAO, CHAN M. CH., MURAVYOV S. V., TARAKANOV E. V. Pritrans: A prioritized converge-cast scheme using consensus ranking in wireless sensor networks // Proc. of the IEEE Sensors applications symp. (SAS-2010), Limerick (Ireland), 23–25 Feb. 2010. Limerick: IEEE, 2010. P. 251–256.

*Тараканов Евгений Владимирович – ассист. Института кибернетики
Томского политехнического университета; тел. (382-2)41-75-27; e-mail: tark@tpu.ru*

Дата поступления – 04.11.11