

УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

Толстикова Е. В.

ЭФФЕКТИВНАЯ ДОСТАВКА ДАННЫХ В НЕОБСЛУЖИВАЕМЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Толстикова О. В. Эффективна доставка даних в необслуговуваних безпроводових сенсорних мережах. На основі теорії керованих марківських процесів розроблений метод доставки даних в бездротових сенсорних мережах із застосуванням стохастичних мобільних агентів. Досліджені характеристики затримок і енергоспоживання в типовій бездротовій сенсорній мережі, що складається із ста сенсорів і має один пункт збору даних. Завдяки керованій маршрутизації за допомогою мобільних агентів вдається істотно понизити енергетичні витрати на доставку даних, що особливо актуальне для мереж сенсорів з не відновлюваними джерелами енергії.

Ключові слова: СЕНСОРНА МЕРЕЖА, ДОСТАВКА ДАНИХ, МАРКІВСЬКИЙ ПРОЦЕС, СТОХАСТИЧНИЙ МОБІЛЬНИЙ АГЕНТ, КЕРОВАНА МАРШРУТИЗАЦІЯ

Толстикова Е. В. Эффективная доставка данных в необслуживаемых беспроводных сенсорных сетях. На основе теории управляемых марковских процессов разработан метод доставки данных в беспроводных сенсорных сетях с применением стохастических мобильных агентов. Исследованы характеристики задержек и энергопотребления в типичной беспроводной сенсорной сети, состоящей из ста сенсоров и имеющей один пункт сбора данных. Благодаря управляемой маршрутизации с помощью мобильных агентов удастся существенно снизить энергетические затраты на доставку данных, что особенно актуально для сетей сенсоров с не возобновляемыми источниками энергии.

Ключевые слова: СЕНСОРНАЯ СЕТЬ, ДОСТАВКА ДАННЫХ, МАРКОВСКИЙ ПРОЦЕСС, СТОХАСТИЧЕСКИЙ МОБильный АГЕНТ, УПРАВЛЯЕМАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ

Tolstikova O. V. Effective data delivery in the unattended wireless sensor networks. Based on theory of the guided Markov processes the method of delivery of information in wireless sensory networks with the use of stochastic mobile agents is developed. Descriptions of delays and energy consumption in a typical wireless sensory network consisting of one hundred of sensors and having one assembly point of information are explored. Due to guided routing by mobile agents it is succeeded substantially to reduce power expenses on delivery of information that is especially actual for the sensor networks of with not renewable energy sources.

Key words: SENSOR NETWORKS, DATA DELIVERY, MARKOV PROCESS, STOCHASTIC MOBILE AGENT, GUIDED ROUTING

В отличие от обычных IP-сетей, базирующихся на глобальной адресации и динамической маршрутизации с использованием метрик, в беспроводных сенсорных сетях (БСС) глобальные адреса сенсорных узлов отсутствуют. Кроме того, сенсоры в сети замене и восстановлению не подлежат, работают с автономными невозобновляемыми источниками питания, поэтому устанавливаются жесткие ограничения на энергопотребление. Часто технологии БСС базируются на традиционных клиент-серверных технологиях, когда каждый сенсорный узел отправляет данные в центр конечного сбора и обработки данных по всем доступным маршрутам. При этом энергоэффективность сети является крайне низкой, а интенсивность трафика может значительно превышать пропускную способность БСС.

Для решения этих проблем разработана модель распределенной сенсорной сети с так называемыми “мобильными агентами” [1]. Наиболее часто под агентом, в том числе и под мобильным агентом (МА), понимают некую самостоятельную систему, имеющую возможность принимать воздействие от внешнего мира, определять свою реакцию на это воздействие и осуществлять эту реакцию. Стохастические МА – программный код, при передаче которого исходный объем данных может быть уменьшен посредством ликвидации избыточности не только детерминированными методами, но и методами стохастической оптимизации. Здесь должны быть выполнены следующие требования: *архитектура* сенсорной сети основана на кластеризации; *узлы-источники* данных расположены на расстоянии одного перехода от ядра кластера; *большая часть* избыточности возникает в данных, которые могут быть объединены в один пакет данных с фиксированным размером.

Можно смягчить эти требования путем применения плоской архитектуры сенсорной сети, которая подходит для большого числа задач. Таким образом, МА реализуется в многошаговых средах со статистическим мультиплексированием без ядра кластера.

В условиях беспроводных сенсорных сетей МА могут динамически адаптироваться к меняющейся информационной среде, работают автономно, в случае обрыва связи с координатором сети, а при восстановлении соединения передавать ему всю накопленную информацию. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) может состоять из десятков и сотен беспроводных узлов, оснащенных датчиками.

На первом уровне иерархии располагаются сенсорные узлы БСС, основная задача которых заключается в сборе локальной информации о контролируемом процессе в зоне размещения агента. Кроме того, они способны выполнять следующие функции: *передача данных* в исходном виде узлам второго уровня иерархии для анализа состояния контролируемого объекта и обучения системы распознавания; *сбор данных* о собственных доступных ресурсах и, при необходимости, отправка их узлам второго уровня (самодиагностика); *при потере связи* с координатором сети, в порядке приоритета, самостоятельное выполнение функций временного координатора и создание сети, в которой накапливаются данные мониторинга; *по запросу* из центра мониторинга отслеживание аномальных событий и сигнализация об их появлении; *принимать данные* от узлов второго уровня иерархии (мобильный агент обучения).

Второй уровень иерархии представлен координатором сети, основой которого является агент управления. Он выполняет следующие функции: *поддержание* работы субсети; *создание* некоторых эталонных моделей состояния на основе собранных с датчиков данных и отправка их на сенсорные узлы по запросу из центра мониторинга; *при отсутствии* собственной субсети, в порядке приоритета, замена вышедшего из строя координатора; *изменение* приоритетов сенсорных узлов в зависимости от доступных им внутренних ресурсов, что предотвращает появление ситуаций, в которых при потере связи координатора с субсетью функции временного управления на себя возьмет узел с недостаточными внутренними ресурсами; *активизация* агентов контроля сенсорных узлов по условию, поступившему из центра мониторинга.

Агенты самого верхнего уровня решают задачи, связанные с непосредственным принятием диагностических и управленческих решений.

Организация мультиагентного взаимодействия в группах сенсоров базируется на принципах коллективного управления

Основные принципы коллективного управления: *каждый член* коллектива группы самостоятельно формирует свое управление (определяет свои действия) в текущей ситуации; *формирование управлений* (выбор действий) каждым членом коллектива осуществляется только на основе информации о коллективной цели, стоящей перед группой, ситуации в среде в предыдущей отрезок и в текущий момент времени, своем текущем состоянии и текущих действиях других членов коллектива; *в качестве оптимального* управления (действия) каждого члена коллектива в текущей ситуации понимается такое управление (действие), которое вносит максимально возможный вклад в достижение общей (коллективной) цели или, иными словами, дает максимально возможное приращение целевого функционала при переходе системы “коллектив – среда” из текущего состояния в конечное; *оптимальное управление* реализуется членами коллектива в течение ближайшего отрезка времени в будущем, а затем определяется новое управление; *допускается принятие* компромиссных решений, удовлетворяющих всех членов коллектива, то есть каждый член коллектива может отказываться от действий, приносящих ему максимальную выгоду, если эти действия приносят малые выгоды или даже ущерб коллективу в целом.

Коллективное управление всегда децентрализованное по своей сути. Поэтому предложенный метод коллективного управления роботами наиболее эффективен при реализации в распределенных мультиагентных системах. Метод коллективного управления и итерационная процедура оптимизации коллективных действий являются основой большого числа алгоритмов, предназначенных для решения широкого класса задач мультиагентного управления сложными техническими системами.

Основным отличием подхода, базирующегося на принципах коллективного мультиагентного управления, является относительно низкая вычислительная сложность алгоритмов. Это позволяет быстро принимать решения, близкие к оптимальным, в условиях априорной неопределенности и случайно изменяющейся ситуации.

В качестве модели механизма стохастической оптимизации избыточности передачи данных в плотной сети радиодатчиков применяется управляемый диффузионный марковский процесс $\xi = \xi(t)$, переходная плотность вероятности $p(t, x, y)$ которого в ε -окрестности каждой внутренней точки x удовлетворяет обратному уравнению Колмогорова [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} = Lp, \quad L = \mathbf{A}(x) \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{B}(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad \mathbf{B}(x) = \frac{1}{2} \mathbf{R}(x), \quad (1)$$

где $\mathbf{A}(x)$ – вектор коэффициентов сноса размерностью N ; $\mathbf{B}(x)$ – матрица коэффициентов диффузии размерностью $N \times N$; $\mathbf{R}(x)$ – корреляционная матрица размерностью $N \times N$. Коэффициенты $a_i(x)$ и $b_{ij}(x)$, $i, j = \overline{1, N}$, непрерывны, причем $b_{ij}(x) > 0$, удовлетворяют условию Липшица

$$\begin{aligned} |a_i(x) - a_i(y)| &\leq C_1 |x - y|, \\ |b_{ij}(x) - b_{ij}(y)| &\leq C_2 |x - y|, \end{aligned}$$

где C_1 и C_2 – константы.

В случае плотного распределения датчиков на поверхности или в пространстве ε -окрестность внутренней точки x достаточно мала. Тогда можно рассматривать случайный процесс $\xi(t)$ как процесс, управляемый векторным стохастическим дифференциальным уравнением вида

$$d\xi(t) = \mathbf{A}[\xi(t)]dt + \mathbf{R}[\xi(t)]d\eta(t),$$

(2)

где $\eta(t) = \frac{\xi(t) - \xi(t_0) - [\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}(t_0)]}{\sqrt{|D(t) - D(t_0)|}}$, $|D(t) - D(t_0)| = \int_{t_0}^t \|\mathbf{B}(\tau)\| d\tau$ – процесс броуновского

движения; $\|\cdot\|$ – норма матрицы.

Таким образом, рассматриваемый процесс передачи, по существу, представляет собой процесс направленной диффузии, управляемой (стохастическими) мобильными агентами.

Задача управления заключается в оптимальном выборе величин $\mathbf{A}(x)$ и $\mathbf{B}(x)$, при котором минимизируется объем трафика для простого поиска оптимального числа маршрутов с ограничением на энергопотребление и с учетом асимметрии качества связи между последовательными узлами.

После первоначальной конфигурации сети (обнаружение соседей и т.п.) все узлы начинают периодическую передачу пакетов данных в точку сбора. В точке сбора вычисляются оценки коэффициентов корреляции между задержками пакетов, пришедших по разным маршрутам, и рассчитываются постоянные l_a и l_b . Результаты расчетов

подставляются в корреляционную матрицу $\mathbf{R}(x)$, которая используется в задаче управления диффузионным процессом (2).

Коэффициент сноса в данной задаче играет роль среднего уклонения процесса от желаемой траектории распространения данных от источника до пункта сбора и обработки. Простейшей такой траекторией является прямая линия T_{rs} (см. рис.1).

Управляемый диффузионный процесс (2), по существу, представляет собой набор маршрутов с многокритериальной стохастической оптимизацией. Выбраны следующие критерии оптимизации: *эффективность использования сети* η_T – отношение объема полезного трафика к общему объему трафика в сети; *эффективность использования датчиков* η_E – общее число принятых точек

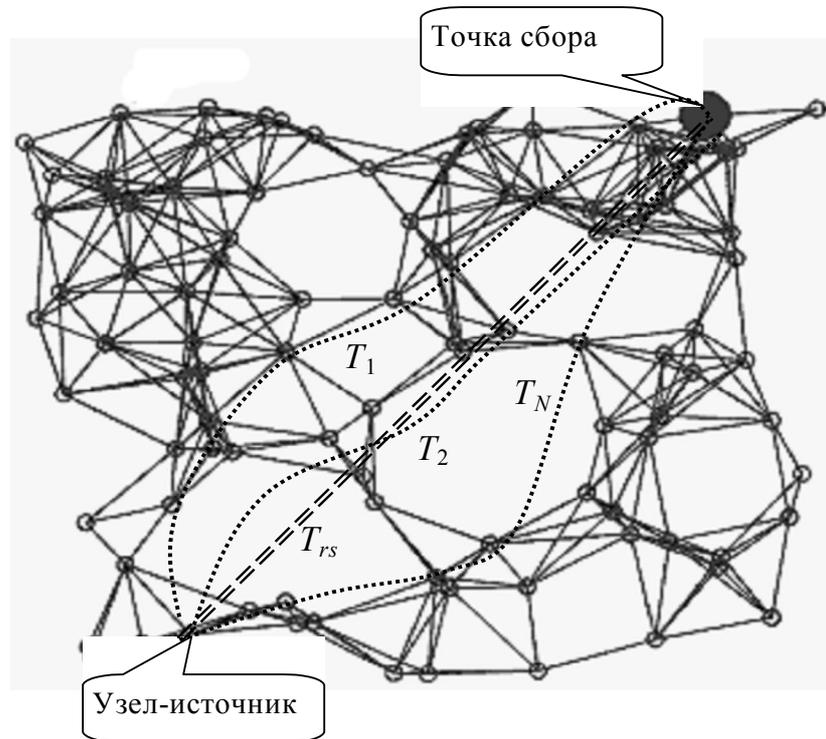


Рис. 1. Конфигурация БСС. T_{rs} – оптимальная траектория доставки данных; T_1, T_2, \dots, T_N – возможные траектории.

сбора пакетов данных до выхода из строя какого-либо узла из-за разряда источника питания.

Эффективность использования сети рассчитывается по формуле

$$\eta_T = \frac{V_d N_{res}}{V_d N_d^\Sigma + V_s N_s^\Sigma},$$

где V_d и V_s – интегральные объемы пользовательской и служебной информации соответственно; N_{res} – общее число нормализованных пакетов данных в точке сбора; N_d^Σ и N_s^Σ – общее число нормализованных пакетов данных и сигнальных пакетов, соответственно. Каждый пакет, переданный через транзитный узел, считается отдельно. Так, если пакет передается в точку сбора данных через один транзитный узел (два пролета), считаем, что в сети передано два пакета данных – "полезный" пакет и пакет ретрансляции.

Поэтому чем больше значение η_T , тем более эффективно протокол маршрутизации использует пропускную способность канала связи. Для простоты полагаем, что все пакеты данных и сигнальные пакеты имеют фиксированные размеры, которые задаются в параметрах модели сети. При идеальном канале связи величины N_d^Σ и N_s^Σ включают только "полезные" пакеты данных и пакеты ретрансляции. При реальном канале связи в N_d^Σ и N_s^Σ входят пакеты, передаваемые повторно из-за потерь при доставке.

Формат пакета мобильного агента следующий (рис. 2).

Данные *SinkID* и *MA_SeqNum* используются для идентификации пакета. При запросе нового пакета данные *MA_SeqNum* увеличиваются на единицу. *FirstSrc* и *LastSrc* – узлы-источники, посещение которых мобильным агентом запланировано в первую и последнюю

очередь соответственно. *RoundIdx* – индекс текущего цикла опроса. *LastRoundFlag* – признак того, что текущий цикл является последним в задании. *NextSrc*, *NextHop*, *ToSinkFlag*, *SrcList* – динамические параметры маршрута миграции мобильного агента. В ячейке *Processing code* содержатся правила обработки данных, в ячейке *Data* – накапливаемый результат, который увеличивается в процессе миграции мобильного агента от узла к узлу.

| Фиксированные атрибуты | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------|----------------------|
| <i>SinkID</i> | <i>MA_SeqNum</i> | <i>FirstSrc</i> | <i>LastSrc</i> | <i>RoundIdx</i> | <i>LastRoundFlag</i> |
| Переменные атрибуты | | | | | |
| <i>NextSrc</i> | | <i>NextHop</i> | | <i>ToSinkFlag</i> | |
| <i>Processing code</i> | | | <i>Data</i> | | |

Рис. 2. Формат пакета мобильного агента.

Маршрут миграции выбирается следующим образом. Выбираются узлы-источники *FirstSrc* и *LastSrc*. Последовательно генерируются номера посещения каждого из очередных узлов. Затем отыскивается маршрут перехода от источника к пункту сбора и обработки.

Определим среднюю задержку доставки от источника до пункта сбора для случаев обычной направленной диффузии (НД) τ_{dd} и направленной диффузии с мобильными агентами (НДМА) τ_{ma} . С учетом всех возможных задержек распространения данных до пункта сбора

$$\tau_{dd} = \frac{\tau_e}{n_p} + \left(\frac{s_d + s_h}{d_{MAC}} + \tau_c + \tau_a \right) (N_h + n_h), \quad (3)$$

где τ_e – среднее время генерации траектории доставки; n_p – число доставляемых пакетов; s_d и s_h – размер данных в пакете и размер заголовка пакета соответственно; d_{MAC} – задержка данных на уровне доступа к среде; τ_c и τ_a – средние задержки управления и доступа соответственно; N_h – число переходов вдоль оптимальной траектории с минимальным числом узлов; $N_h + n_h$ – среднее число переходов по всем допустимым траекториям.

Если число пакетов, доставляемых к пункту сбора, много больше единицы, выражение (3) упрощается:

$$\tau_{dd} \approx \left(\frac{s_d + s_h}{d_{MAC}} + \tau_c + \tau_a \right) (N_h + n_h). \quad (4)$$

При доставке данных с использованием мобильных агентов соответствующее выражение для задержки доставки имеет вид

$$\tau_{ma} = \sum_{k=1}^K \left(\tau_{ama} + \frac{s_d}{\tau_p} + \frac{s_{ma,k} + s_{pc} + s_h}{d_{MAC}} + \tau_c \right), \quad (5)$$

где K – число узлов-источников; τ_{ama} – задержка доступа мобильного агента, т.е. доставки данных на пункт сбора; τ_p – коэффициент расхода времени на обработку; s_{pc} – общий объем доставленных данных; $s_{ma,i}$ – размер данных мобильного агента на k -м узле.

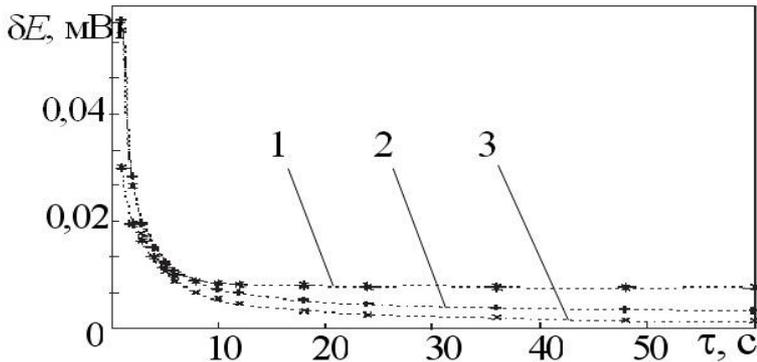


Рис. 3. Средний расход энергии при передаче:

1 – архитектура “клиент-сервер”.

Мобильные агенты:

2 – коэффициент корреляции данных от разных сенсоров 0,8;

3 – коэффициент корреляции данных от разных сенсоров 0,9.

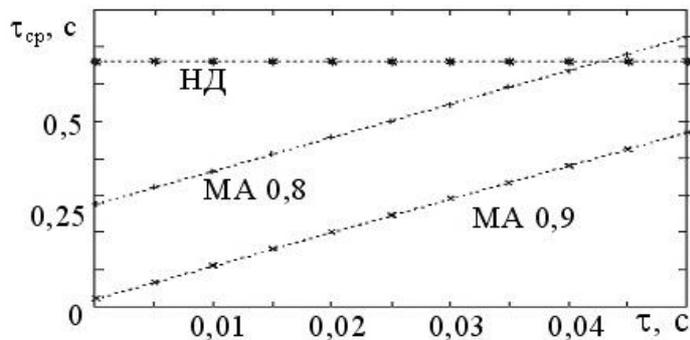


Рис. 4. Зависимость задержки доставки от задержки доступа МА

С использованием выражений (3)...(5) были выполнены расчеты среднего расхода энергии на доставку и задержки доставки данных с разными общими объемами (рис. 3, 4) в БСС, состоящей из 100 сенсоров. Использовалось 10 мобильных агентов с объемом программного кода, примерно на порядок меньше объема передаваемых данных.

На рис. 4 показана зависимость задержки доставки от задержки доступа мобильных абонентов при разных коэффициентах корреляции данных на сенсорах (для сравнения приведен график задержки для клиент-серверной доставки)

Выводы. Для многих применений беспроводных сенсорных сетей методы доставки данных с помощью мобильных агентов оказываются более эффективными, чем традиционные методы с архитектурой клиент-сервер.

Можно оптимизировать скорость доставки при ограничениях на потребный расход энергии сенсоров путем применения управляемых марковских процессов для формирования пучка маршрутов. Это особенно актуально для специализированных сенсорных сетей, которые не подлежат обслуживанию и текущему контролю.

Литература

1. Н. Qi, Y. Xu, and X.Wang, “Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1172–1183, 2003.
2. Каляев И. А. Распределенные системы планирования действий коллективов роботов монография / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
3. Каляев И.А. Использование принципов коллективного принятия решений при распределении потока задач в компьютерных сетях / И. А. Каляев // *Информационные технологии*. – 2002. – №6. – С.82-85.
4. Дынкин Е.Б. Управляемые марковские процессы и их приложения / Е. Б. Дынкин, А. А. Юшкевич. – М.: Наука, 1975. – 338 с.
5. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы / Ю. В. Прохоров, Ю. А. Розанов. – М.: Наука, 1967. – 495 с.