

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТИ РАДИОДАТЧИКОВ С МОБИЛЬНЫМИ АГЕНТАМИ

Решается задача сбора данных в сенсорных сетях с плотным покрытием территории и оптимизации трафика путем декорреляции, т.е. устранения избыточности. В процессе управления поддерживается оптимальная скорость передачи с ограничениями на энергопотребление датчиков.

Проведен анализ энергосберегающих технологий доставки данных в беспроводных сенсорных сетях с применением детерминированных методов и стохастических мобильных агентов. Показано, что при этом требования к сети значительно ограничивают область применения данной технологии. Для устранения ограничений детерминистского подхода предлагается применять метод управляемой направленной диффузии, основанный на теории управляемых марковских процессов. Разработан усовершенствованный комбинированный метод управления сетью радиодатчиков. Применено сочетание детерминированного и стохастического методов. Выполнен сравнительный анализ корреляционных функций потоков данных от пространственно распределенных датчиков. Предложены статистические модели процессов управляемой пространственной диффузии потоков коррелированных данных.

Разработан общий метод минимизации объема пучка маршрутов по критериям скорости доставки с ограничением на энергопотребление.

Ключевые слова: сенсорная сеть, управления сетью радиодатчиков, мобильный агент, поток данных, корреляционная функция, направленная диффузия, коррелированные данные.

Актуальность и анализ исследований. В работе [1] рассмотрена сеть радиодатчиков с низкой скоростью передачи данных и малым энергопотреблением. При этом необходимо учитывать, что скорость передачи и энергопотребление связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью, а сетевые элементы после развертывания не обслуживаются и не имеют возобновляемых источников питания. Кроме того, полоса пропускания радиоканала (канала сети радиодатчиков) изначально является достаточно узкой. Поэтому для расширения диапазона скоростей передачи данных с учетом наложения ограничений на расход энергии необходимо, с одной стороны, распараллеливать поток данных, а, с другой стороны – минимизировать число параллельных маршрутов передачи от узлов-источников к точке сбора информации. В работе [2] предложен метод доставки данных в беспроводных сенсорных сетях с применением технологии так называемых стохастических мобильных агентов – программного кода, при передаче которого исходный объем данных может быть уменьшен. Показано, что при управлении с помощью мобильных агентов снижаются энергетические расходы на доставку данных, что особенно актуально для сенсорных сетей с невозобновляемыми источниками энергии.

В большинстве сетей с энергосбережением применяется традиционная клиент-серверная технология, когда каждый сетевой узел (радиодатчик) отправляет собранные данные в центр сбора и обработки. Очевидно, потоки данных двух близкорасположенных узлов могут быть коррелированы, причем степень корреляции убывает с увеличением расстояния между узлами. Поэтому актуальной задачей сбора данных сенсорных сетей с плотным покрытием территории является оптимизация трафика путем декорреляции, т.е. устранения избыточности.

В работах [3, 4] рассмотрено применение технологии мобильных агентов, когда уменьшение исходного объема данных осуществляется посредством ликвидации избыточности детерминированными методами. Однако 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.

Эти требования значительно ограничивают область применения данной технологии.

Можно частично смягчить эти требования путем применения плоской архитектуры сенсорной сети, которая подходит для большого числа задач. Таким образом, мобильный агент реализуется в многошаговых средах без ядра кластера. В этом случае необходимо дать ответ на следующие вопросы.

1) Как эффективно осуществлять маршрутизацию мобильных агентов от точки сбора к источнику, от источника к источнику, и от источника к точке сбора?

2) Как мобильный агент определяет последовательность опроса нескольких узлов-источников?

3) Если данные всех узлов-источников невозможно поместить в один пакет данных с фиксированным размером, будет ли сложная технология мобильных агентов эффективнее значительно более простой клиент-серверной модели?

Например, в случае среды, в которой узлы расположены далеко друг от друга, и данные сенсоров не обладают достаточной избыточностью, могут иметь место проблемы медленной сходимости или даже заикливания алгоритма устранения избыточности (так называемая проблема "счета до бесконечности").

Для ответа на эти вопросы и устранения ограничений детерминистского подхода предлагается применять метод управляемой направленной диффузии, основанный на теории управляемых марковских процессов [5, 6].

Постановка задачи. 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 $b_{ij}(x) > 0$. Эти коэффициенты удовлетворяют условию Липшица

$$|a_i(x) - a_i(y)| \leq C_1 |x - y|,$$

$$|b_{ij}(x) - b_{ij}(y)| \leq C_2 |x - y|,$$

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:

$$d\xi(t) = \mathbf{A}[\xi(t)] dt + \mathbf{R}[\xi(t)] d\eta(t), \quad (2)$$

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.

В работе [1] понятие нормы матрицы не конкретизировано. В данной работе сделана попытка восполнить этот пробел.

Как известно из теории матриц [7-10], в качестве наиболее распространенных норм матрицы используют следующие виды норм:

- $\|\mathbf{A}\|_m = \max_i \sum_j |a_{ij}|$ – m -норма; суммирование по строкам и выбор максимального значения суммы;
- $\|\mathbf{A}\|_l = \max_j \sum_i |a_{ij}|$ – l -норма; суммирование по столбцам и выбор максимального значения суммы;
- $\|\mathbf{A}\|_k = \sqrt{\sum_{i,j} |a_{ij}|^2}$ – k -норма или Евклидова норма (иногда называемая также нормой Фробениуса).

Поскольку суть рассматриваемой задачи составляет анализ собственных значений, в работе [1] в качестве нормы матрицы выбран спектральный радиус. Если $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – собственные значения матрицы \mathbf{A} , то $\lambda_A = \max_j |\lambda_j|$ ($1 \leq j \leq n$) есть спектральный радиус \mathbf{A} .

Строго говоря, спектральный радиус не всегда удовлетворяет аксиомам матричных норм, в частности, когда матрица является не нулевой, а все ее собственные значения при этом равными нулю. Однако он тесно связан с величиной матричной нормы как верхней границы спектрального радиуса [7].

Таким образом, рассматриваемый процесс передачи, по существу, представляет собой процесс направленной диффузии, управляемой стохастическими мобильными агентами, с помощью которых формируется матрица $\|\mathbf{B}(\tau)\|$ со спектральным радиусом $\lambda_A = \max_j |\lambda_j|$ ($1 \leq j \leq n$).

Метод управления доставкой пакетов данных. В качестве моделей корреляции данных в зависимости от удаления датчиков друг от друга выберем следующие функции [1, 11, 12]:

1. Экспоненциальная функция вида $\mathbf{R}(x) = \sigma_{ij}^2 \exp(-|x_i - x_j|)$, где x_i, x_j – координаты точек расположения датчиков.

Достоинством применения такой модели является простота и возможность получения решений в замкнутой форме, недостатком – недифференцируемость в нуле. Вторая производная $r''(0)$ этой функции имеет разрыв второго порядка при нулевом пространственном сдвиге. Величина $r''(0)$ входит как в выражения для оценки дисперсии процесса направленной диффузии, так и в выражения для коэффициентов сноса и диффузии. Этой величиной определяется связь между дисперсиями процессов $\xi(t)$ и $\eta(t)$:

$$\sigma_\eta^2 = -\sigma_\xi^2 r''(0).$$

Вследствие этого невозможно корректно вычислять энергетические характеристики процесса в исходных точках.

2. Гауссовская функция вида $\mathbf{R}(x) = k_g \sigma_{ij}^2 \exp\left[-(x_i - x_j)^2\right]$, где k_g – нормирующий коэффициент.

Данная функция свободна от недостатка, присущего экспоненциальной функции, однако при ее использовании полученное решение не чувствительно к изменениям скорости передачи данных, следовательно, адекватность модели не вполне удовлетворительна.

3. Исходя из физических соображений, корреляционная функция реальных потоков данных имеет нулевую первую производную при нулевом пространственном сдвиге. Используем этот вывод для обоснования вида корреляционной функции на основе феноменологического подхода. В рамках этого подхода для однородного и изотропного пространственного распределения датчиков используем корреляционную функцию вида

$$\mathbf{R}(x) = \sigma_{\xi}^2 \exp \left[-\frac{|x|}{l_a} + \frac{|x|}{l_a} \exp \left(-\frac{|x|}{l_b} \right) \right], \quad (3)$$

где l_a и l_b – так называемые характеристические интервалы между датчиками поверхности.

При $l_a \gg l_b$ корреляционная функция на интервале $|x| \approx (2...3)l_b$ достаточно точно аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$r_h(x) \approx \exp \left[-|x|/l_a \right].$$

При $|x| \ll l_b < l_a$ функция $r(x) = r''(0) \frac{x^2}{2}$, что соответствует гауссовской функции, разложенной в ряд Маклорена с удержанием членов до квадратичного включительно. Легко показать, что $r'(0) = 0$, а $r''(0) = -\frac{2}{l_a l_b}$.

Наконец, весьма привлекательным свойством данной корреляционной функции является именно её двухмасштабность – наличие двух формально независимых параметров l_a и l_b , которые можно варьировать в широких пределах. Это позволяет использовать корреляционную функцию для широкого диапазона пространственных распределений датчиков со сгущениями и крупными разрывами, в том числе и искусственного происхождения (например, некоторые датчики специально отключены, их энергетический ресурс исчерпан или они физически повреждены).

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 первоначального конфигурирования сети (обнаружение, обмен данными о географических координатах соседей и т.п.) все узлы начинают периодическую передачу пакетов данных в точку сбора. В точке сбора вычисляются оценки коэффициентов корреляции между пакетами, пришедшими по разным маршрутам, и рассчитываются постоянные l_a и l_b . Результаты расчетов подставляются в модель (3), которая используется в задаче управления диффузионным процессом (2).

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 точкой 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.

Выводы. В работе усовершенствован комбинированный метод управления доставкой пакетов данных в сети радиодатчиков со статистически неоднородным и нестационарным пространственным распределением. В процессе управления поддерживается оптимальная скорость передачи с ограничениями на энергопотребление датчиков.

В дальнейшем планируется разработать методы учета корреляции потоков данных, оценки и прогноза времени функционирования сети радиодатчиков с автономными не возобновляемыми источниками питания при качестве сервиса не ниже заданного.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Толстикова О.В. Минимизация избыточности объема передачи данных в сети радиодатчиков / О. В. Толстикова // 36. наук. праць "Проблеми інформатизації та управління". – Київ : НАУ, 2010. – Вип. 1(29). – С. 168-171.
2. Торошанко А.С. Метод управления передачей данных в сетях радиодатчиков с помощью мобильных агентов / А. С. Торошанко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – №3(19). – С. 46-50.
3. Waseem A. Secured directed diffusion using mobile agents // A. Waseem, P. Sethi, N. Chauhan // International journal of computer applications. – July 2013. – Vol. 73. – No. 21. – P. 32-36.
4. M. El-Fissaoui. Mobile agent protocol based energy aware data aggregation for wireless sensor networks / Mohamed El-Fissaoui, Abderrahim Beni-Hssane, Mostafa Saadi // 8th International conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN 2017) proceedings. – 18-20 September 2017, Lund, Sweden. – Elsevier B.V. Radarweg 29 Amsterdam 1043 NX The Netherlands – 664 p.
5. Кельберт М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2 / М. Кельберт, Ю. Сухов. – Москва : МЦНМО, 2017. – 560 с.
6. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – Москва : Наука, 1966. – 576 с.
7. Erdman J. M. Exercises and problems in linear algebra / J. M. Erdman // Portland State University. – July 13, 2014. – 196 p. – http://web.pdx.edu/~erdman/LINALG/Linalg_pdf.pdf.
8. Демидович Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – Москва : Наука, 1966. – 664 с.
9. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – Москва : Наука, – 1978. – 280 с.
10. Семенов В. А. Теория вероятностей и математическая статистика / В. А. Семенов. – Санкт-Петербург: Питер, 2013. – 192 с.
11. Заруцкий В. А. Обеспечение качества связи в специализированной беспроводной сети в условиях помех / В. А. Заруцкий // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – №3(19). – С. 80-83.
12. Vinogradov N. A. Energy-efficient routing in delay/disruption-tolerant networks / N. A. Vinogradov, V. V. Lukashenko // – Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – №3(37). – С. 18-27.

REFERENCES:

1. Tolstikova O. V. "Minimization of redundancy of transmission data in the radiosensors network." *Collected scientific articles "Problems of informatization and management"*. – Kyiv : NAU 1(29) (2010): 168-171.
2. Toroshanko O. S. "A method of data transfer control by mobile agents in mesh sensor networks." *Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviyazku* 3(19) (2011): 46-50.
3. Waseem A., Sethi P., Chauhan N. "Secured directed diffusion using mobile agents." *International journal of computer applications* 73(21) (July 2013): 32-36.
4. Mohamed El-Fissaoui, Abderrahim Beni-Hssane, Mostafa Saadi. "Mobile agent protocol based energy aware data aggregation for wireless sensor networks." *8th International conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN 2017) proceedings. Lund, Sweden. Elsevier B.V. Radarweg 29 Amsterdam 1043 NX The Netherlands* (18-20 September 2017): 664.
5. Kelbert M., Sukhov Yu. "Probability and statistics in examples and problems. V.2." *Moskva: MTsNMO* (2017): 560.
6. Hantmakher F. R. "Theory of matrices". *Moskva : Nauka* (1966): 576.
7. Erdman J. M. "Exercises and problems in linear algebra." *Portland State University* http://web.pdx.edu/~erdman/LINALG/Linalg_pdf.pdf (July 13, 2014): 196.
8. Demydovych B. P., Maron I. A. "Bases of calculable mathematics." *Moskva : Nauka* (1966): 664.
9. Lankaster P. "Theory of matrices." *Moskva : Nauka* (1975): 280.
10. Semenov V. A. "Probability theory and mathematical statistics." *Sankt-Petersburg: Piter* (2013): 192.
11. Zarutskyi V. A. "Providing of communication quality in the specialized wireless network in the conditions of hindrances". *Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviyazku* 3(19) (2011): 80-83.
12. Vinogradov N. A., Lukashenko V. V. "Energy-efficient routing in delay/disruption-tolerant networks." *Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviyazku* 3(37) (2015):18-27.

Рецензент: д.т.н., проф. Барабаш О.В., завідувач кафедри вищої математики Державного університету телекомунікацій.

**Заруцький В. О., к.т.н., доц. Толстикова О.В., Торощанко О.С.
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В МЕРЕЖІ
РАДІОДАТЧИКІВ З МОБІЛЬНИМИ АГЕНТАМИ**

Вирішується задача збору даних в сенсорних мережах і щільним покриттям території і оптимізації трафіку шляхом декореляції, тобто усунення надмірності. В процесі управління підтримується оптимальна швидкість передачі з обмеженнями на енергоспоживання датчиків.

Проведений аналіз енергозберігаючих технологій доставки даних в безпроводових сенсорних мережах із застосуванням детермінованих методів і стохастичних мобільних агентів. Показано, що при цьому вимоги до мережі значно обмежують сферу застосування даної технології. Для усунення обмежень детерміністського підходу пропонується застосовувати метод керованої спрямованої дифузії, заснований на теорії керованих марківських процесів. Розроблений вдосконалений комбінований метод управління мережею радіодатчиків. Застосовано поєднання детермінованого і стохастичного методів. Виконаний порівняльний аналіз кореляційних функцій потоків даних від просторово розподілених датчиків. Запропоновані статистичні моделі процесів керованої просторової дифузії потоків корельованих даних.

Розроблений узагальнений метод мінімізації об'єму пучка маршрутів по критеріях швидкості доставки обмеженням на енергоспоживання.

Ключові слова: сенсорна мережа, управління мережею радіодатчиків, мобільний агент, потік даних, кореляційна функція, спрямована дифузія, корельовані дані

Zaruckiy V.O., Ph.D. Tolstikova O.V., Toroshanko O.S.
**ENERGY SAVING TECHNOLOGY OF DATA TRANSMISSION IN THE RADIOSENSORS
NETWORK WITH MOBILE AGENTS**

It is decided the task of collection of the data of sensory networks with dense coverage of territory and optimization of traffic at the way of decorrelation, i.e. removals of redundancy. In the process of management optimum speed of transmission is supported with limits on the energy consumption of sensors.

The analysis of energy-saving technologies of data delivery in wireless sensory networks using the deterministic methods and stochastic mobile agents is conducted. It is shown, that here requirements to the network considerably limit a domain application of this technology. For the removal of limitation of deterministic approach it is suggested to apply the method of the guided directed diffusion, based on the theory of the guided Markovian process. The enhanced combined method of management the network of radiosensors is developed. Combination of the determined and stochastic methods is applied. The comparative analysis of cross-correlation functions of data stream from the spatially up-diffused sensors is executed. The statistical processes models of the guided spatial diffusion of the correlated data stream are offered.

The general method of minimization of routes beam volume on the criteria of delivery speed with a limit on energy consumption is developed.

Keywords: sensory networks, radiosensors network management, mobile agent, data stream, cross-correlation function, directed diffusion, correlated data