УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

Дрововозов В.И., к.т.н.,
Заруцкий В.А.,
Толстикова Е.В., к.т.н.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТИ РАДИОДАТЧИКОВ С МОБИЛЬНЫМИ АГЕНТАМИ

Национальный авиационный университет

drovvlad47@gmail.com
vzaruc@mail.ru
ovtolst21@gmail.com

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: мобильный агент, оптимизация избыточности передачи данных, модель механизма стохастической оптимизации избыточности передачи данных, управляемая направленная диффузия, модель корреляции данных

Актуальность темы

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 большинстве сетей с энергосбережением применяется традиционная клиент-серверная технология, когда каждый сетевой узел (радиодатчик) отсылает собранные данные в центр сбора и обработки. Очевидно, потоки данных двух близкорасположенных узлов могут быть коррелированны, 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] предлагается технология так называемых «мобильных агентов» – программного кода, при передаче которого исходный объем данных может быть уменьшен 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 зацикливания 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].

Научная новизна

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]:

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

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:

$$\left|a_i(x)-a_i(y)\right|\le C_1\left|x-y\right|,$$
$$\left|b_{ij}(x)-b_{ij}(y)\right|\le C_2\left|x-y\right|,$$

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

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

где

$$\eta(t)=\frac{\xi(t)-\xi(t)-\left[\mathbf{A}(t)-\mathbf{A}(t_0)\right]}{\sqrt{\left|D(t)-D(t_0)\right|}},\quad \left|D(t)-D(t_0)\right|=\int_{t_0}^{t}\left\|\mathbf{B}(\tau)\right\|d\tau$$

– 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);

$$-\|\mathbf{A}\|_l = \sqrt{\sum_{i,j} |a_{ij}|^2}$$

(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 выберем спектральный радиус. (Если $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – собственные значения матрицы **A**, то $\lambda_A = \max_j |\lambda_j|$ ($1 \le j \le n$) есть спектральный радиус **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 $\lambda_A = \max_j |\lambda_j|$ ($1 \le j \le n$).

Цель работы

В качестве моделей корреляции данных в зависимости от удаления датчиков друг от друга выберем следующие функции [1, 2].

1. Экспоненциальная функция вида

$$\mathbf{R}(x) = \sigma_{ij}^2 \exp\left(-\left|x_i - x_j\right|\right),$$

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:

$$\mathbf{R}(x) = k_g \sigma_{ij}^2 \exp\left[-\left(x_i - x_j\right)^2\right],$$

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 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 $|x|$ $l_b<l_a$ 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

$$r'(0)=0,\ \text{а}\ r''(0)=-\frac{2}{l_a l_b}.$$

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 процесс 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.

Список литературы

1. Толстикова Е.В. Минимизация избыточности объема передачи данных в сети радиодатчиков // Зб. наук. праць “Проблеми інформатизації та управління”. – К.: НАУ, 2010. Вип. 1(29). – С. 168-171.

2. Заруцкий В.А. Обеспечение качества связи в специализированной беспроводной сети в условиях помех- Наукові записки УНДІЗ, №3(19), 2011. – С. 80 – 83. H. 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.Min Chen, Taekyoung Kwon, Yong Yuan, Yanghee Choi, andVictor C. M. Leung. – Mobile Agent-Based Directed Diffusion inWireless Sensor Networks // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2007, Article ID 36871, 13 pp. doi:10.1155/2007/36871.

5. Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. Управляемые марковские процессы и их приложения. – М.: Наука, 1975. – 338 с.

6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1966. – 576 с.

7. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. – М.: Физматгиз, 1963. – 656 с.

8. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966. – 664 с.

9. Ланкастер П. Теория матриц. Пер. с англ. – М.: Наука, – 1978. – 280 с.

10. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Наука, 1967. – 495 с.

Статтю подано до редакції 07.04.2017