



基于潜在博弈的多源多跳无线传感器网络流量分配算法

张 伟¹, 张玲华^{1,2}

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003;

2. 江苏省通信与网络技术工程研究中心 南京 210003)

摘 要: 无线传感器网络中存在大量数据, 数据融合及网络优化可以有效降低网络能耗, 提升网络吞吐量。由于无线传感器网络自身的广播特性, 在无线网络中应用网络编码可以带来吞吐量提升等性能增益。考虑将 N 个源节点的 K 个数据发送到 D 个不同目的节点的情况, 源节点在自身可用路径上分配流量, 利用博弈论研究无线传感器网络流量分配问题, 提出了一种动态控制方案, 源节点根据效用函数调整路径流量分配, 以增加网络编码机会, 从而降低网络能耗。理论分析和仿真结果表明, 该方案是稳定、有效的。

关键词: 无线传感器网络; 网络编码; 潜在博弈; 数据共享

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015032

Flow Allocation Algorithm Based on Potential Game in Multi-Source Multi-Hop Wireless Sensor Network

Zhang Wei¹, Zhang Linghua^{1,2}

(1. College of Communication and Information Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. Jiangsu Provincial Engineering Research Center of Telecommunications and Network Technology, Nanjing 210003, China)

Abstract: Data integration and network optimization play an important role in wireless sensor network which is data-centric. Network coding has been used as an efficient method to improve network throughput over wireless environments. The problem of broadcasting K different contents to D destinations from N sources in wireless network was considered. A dynamic control scheme that allows sources split traffic was proposed. The scheme adjusts the traffic based on the utility function to increase the number of coding opportunities. The theoretical analysis and simulation results show that the proposed scheme is stable and effective.

Key words: wireless sensor network, network coding, potential game, data integration

1 引言

无线传感器能够利用自组织能力形成网络, 协作地感知、采集、处理和传输网络覆盖地理区域内被感知对象的

信息, 并将这些信息发送给网络所有者。因而可以说, 传感器网络的出现弥补了人类无法涉足的区域信息获取困难的遗憾, 具有广阔的应用前景。它将现代社会三大信息技术(即传感器技术、计算机技术和通信技术)有效地应用于

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2015-01-06

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划基金资助项目 (No.CXLX13_456)

Foundation Item: The Jiangsu Province Ordinary University Graduate Research and Innovation Program (No.CXLX13_456)



一体。无线传感器网络中,节点数目往往很大,节点只能获取局部拓扑结构信息,路由解决方案要能在局部网络信息的基础上选择合适的路径,同时,传感器网络节点能量有限且一般没有能量补充,因此路由解决方案是否能高效地利用能量就成为衡量传感器网络系统的重要性能指标。传统路由策略往往需要知道整个网络的全局信息,难以应用。其根本问题在于以往的无线传感器网络解决方案中,传感器节点传送数据的方式是存储转发,即除了数据发送节点和接收节点以外的中间节点只负责路由,而不对数据内容做任何处理,中间节点扮演转发器的角色。

网络编码是一种融合了路由和编码的信息交换技术,它的核心思想是网络中的各个节点对各条信道上收到的信息进行线性或者非线性处理,然后转发给下游节点,中间节点扮演编码器或信号处理器的角色。无线传感器网络链路的不可靠性和物理层广播特性非常适合使用编码的方法。应用网络编码,可以解决传统路由解决方案、跨层路由设计等技术无法解决的问题,提高网络性能。

许多现有的研究^[1-4]已经论证了无线网络中网络编码的益处。但是这些研究都是假定了所有节点是相互合作的。实际上,无线传感器网络是通过自组织而形成的网络,网络节点有一个重要特性——自利。当传输机制用于由自利节点组成的分布式网络时,必须分析动态系统的均衡点,平衡各用户收益,设计有效的策略促使稳定、高效的传输机制能够实现。参考文献[5]基于非合作潜在博弈,提出了动态数据流分割算法,在平衡各用户效用的基础上,最大化网络编码机会。随着无线传感器网络的快速发展,如何对分布式系统中参与网络编码的用户增益和代价分析,设计动态算法,平衡用户收益,得到较高系统效率,将是业界面临的关键性挑战问题。参考文献[6]研究了网络编码中继能量消耗与传输时延的折中关系,在每个源节点都试图最优其折中关系的条件下,建立非合作博弈模型,提出一种分布式激励策略,得到和中心式算法相同的性能。这些研究成果初步说明了使用博弈论分析网络编码中合作行为的可行性和重要性。由于无线传输的广播性质,当一个节点传送数据分组时,在一定范围内的所有节点都能接收这个数据分组,如何有效利用这样的广播增益也是本文的研究点之一。本文在研究无线网络编码的基础上,结合节点的广播特性,将多个源、多个目的流量分割问题建立为博弈模型,分析在具有网络编码增益及广播增益情况下的网络代价问题,提出分布式控制方案,使得节点间的计算

彼此独立,不依赖于全局信息。经论证,该控制方案可以收敛到纳什均衡这一最优解决方案,使得系统代价收敛到最小代价的稳态。

2 流量分配算法

本文将无线传感器网络建成一个 $G(V, E)$ 有向图模型,有 $|V| = N$ 个节点,边缘集合为 E 。两个节点之间的线段代表它们之间的无线连接。对于每条链路 $(n_i, n_j) \in E, n_i, n_j \in V$, 存在一个无线信道使得节点 n_i 可以传输信息到节点 n_j 。每条链路 (n_i, n_j) 有相应的传输代价 α_{ij} 。 α_{ij} 的大小代表从节点 n_i 到节点 n_j 发送单位信息的传输耗费(传递次数)。由于无线信道的广播特性, n_i 节点可以将信息同时传输到其邻居节点 n_j 和 n_k , 这个传输的最大耗费为 $\max\{\alpha_{ij}, \alpha_{ik}\}$ 。

在无线传感器网络中,数据由不同的源节点提供^[7]。有些源节点的内容不同,有些源节点的内容相同。本文研究将 N 个源节点提供的 K 个内容发送到 D 个目的节点的问题。为了完成传输任务,网络需要支持的数据流数量为 1、2 或更多,每个数据流都有相关的源节点和目的节点。将传输网络总流量所需的传输次数定义为 $C(X)$ 。本文的目标是提出一个分布式流量控制方案,使得每条数据流都可以把流量分配到不同的路径上,在这些路径中可能存在网络编码增益及多播传输增益。

如图 1 所示,网络结构中有 4 个源节点,其中 S_1 和 S_1' 有相同的内容。目的节点 n_3 和 n_5 对 S_1, S_2 和 S_3 的内容感兴趣,而目的节点 n_9 对 S_1 和 S_3 的内容感兴趣。网络存在 6 条网络传输流:第 1 条流从 n_3 节点到 n_5 节点;第 2 条流从 n_5 节点到 n_3 节点;第 3 条流从 n_8 节点到 n_5 节点;第 4 条流从 n_8 节点到 n_9 节点;第 5 条流从 n_7 节点到 n_5 节点;第 6 条流从 n_7 节点到 n_9 节点。将 x_i 定义为第 i 条路径上传输的流量。从图 1 可以看出,第 1 条流的数据分组可以通过路径 $P_{11}=(n_3, n_4, n_5)$ 和 $P_{12}=(n_3, n_1, n_2, n_5)$ 传输。路径 P_{11} 和 P_{12} 上分配的流量分别为 x_1^1 和 x_1^2 , 则有 $x_1^1 + x_1^2 = x_1$ 。相似地,第 6 条流的数据分组通过路径 $P_{61}=(n_7, n_6, n_9)$ 和 $P_{62}=(n_7, n_10, n_9)$ 传输。

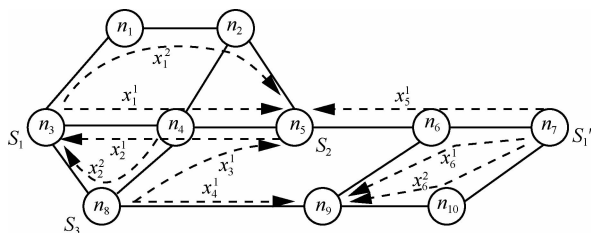


图 1 不同路径流量的竞争关系

(n_7, n_{10}, n_9) 传输, x_6 为 x_6^1 和 x_6^2 的总和。值得注意的是, 第 5 条流的路径 $P_{51}=(n_7, n_6, n_5)$ 和第 6 条流的路径 $P_{61}=(n_7, n_6, n_9)$ 共享同一个链接 (n_7, n_6) 。因此, 通过这两条路径发送的数据分组可以通过多播减少传输代价, 这里 n_6 被称为多播传输节点, 链路 (n_7, n_6) 被定义为多播传输链接, 记为 MC 链接。

n_6 节点多播传输时的消耗如式(1)所示。

$$C_{n_6}(x_5^1, x_6^1) = \max\{\alpha_{65}, \alpha_{69}\} \min\{x_5^1, x_6^1\} + \alpha_{65}(x_5^1 - \min\{x_5^1, x_6^1\}) + \alpha_{69}(x_6^1 - \min\{x_5^1, x_6^1\}) \quad (1)$$

式(1)中, 右边的第一项为多播传输的代价, 由于从 n_7 传来的数据分组通过多播传输, 到达目的节点 n_5 和 n_9 , 所以发送单位数据的消耗是 $\max\{\alpha_{65}, \alpha_{69}\}$; 第二项和第三项是流量“溢出”消耗。当两条路径上的流量不相等时, 会产生需要传输的额外流量。

如图 1 所示, n_4 节点有两对反向流量, n_3 节点和 n_5 节点之间的一对流量与 n_5 节点和 n_8 节点之间的一对流量相互竞争。值得注意的是, 由于无线网络的广播特性, n_3 节点和 n_8 节点都可以从 n_4 节点接收数据分组进行解码, 并相互交换信息。将多播链接 (n_3, n_4, n_8) 定义为网络编码多播 (network coding and multicast, NCMC) 传输链接, 记为 NCMC 链接。将 n_4 节点定义为网络编码多播传输节点。

n_4 节点进行网络编码时的消耗如式(2)所示。

$$\begin{cases} C_{n_4}(x_1^1, x_2^1) = \max\{\alpha_{34}, \alpha_{45}\} \min\{x_1^1, x_2^1\} + \alpha_{45}(x_1^1 - \min\{x_1^1, x_2^1\}) + \alpha_{34}(x_2^1 - \min\{x_1^1, x_2^1\}) \\ C_{n_4}(x_3^1, x_2^2) = \max\{\alpha_{45}, \alpha_{48}\} \min\{x_3^1, x_2^2\} + \alpha_{45}(x_3^1 - \min\{x_3^1, x_2^2\}) + \alpha_{48}(x_2^2 - \min\{x_3^1, x_2^2\}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中两个等式右边的第一项是通过 n_4 节点进行网络编码传输产生的消耗, 第二项和第三项表示流量“溢出”消耗, 这是由于 x_1^1 可能不等于 x_2^1 , x_3^1 也可能不等于 x_2^2 , 剩下的流量将不会进行网络编码, 而是被直接传输。

此外, S_1 和 S_1' 有相同的内容, 目的节点可以从这两个源节点中的任意一个节点获取内容。例如节点 n_5 可以从源 S_1 (节点 n_3) 和源 S_1' (节点 n_7) 获得内容, 即 S_1 和 S_1' 同时为节点 n_5 服务。对于节点 n_5 , $x_1^1 + x_1^2 + x_1^3 = x_1$, 可以发现多播传输链接和网络编码多播传输链接之间也存在竞争。如果通过网络编码多播传输链路 (n_3, n_4, n_5) 传递数据, n_3 节点可以获得更多逆向流信息。但是对于 n_9 节点, 则更希望在多播传输链接 (n_7, n_6) 上分配较多的流量。因此, 面临的挑战在于如何设计一种有效的分布式机制, 在路径上分配流量, 从

而使得网络传输代价最小。

众所周知, $\max\{x_i, x_j\} + \min\{x_i, x_j\} = x_i + x_j$, 式(1)和式(2)的消耗可以重写为式(3)。

$$C_{n_4}(x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_2^2) = \alpha_{45}x_1^1 + \alpha_{34}x_2^1 + \alpha_{45}x_3^1 + \alpha_{48}x_2^2 + \min\{\alpha_{34}, \alpha_{45}\} \min\{x_1^1, x_2^1\} + \min\{\alpha_{45}, \alpha_{48}\} \min\{x_3^1, x_2^2\} \quad (3)$$

$$C_{n_6}(x_5^1, x_6^1) = \alpha_{65}x_5^1 + \alpha_{69}x_6^1 - \min\{\alpha_{65}, \alpha_{69}\} \min\{x_5^1, x_6^1\} \quad (4)$$

式(3)可以解释为 n_4 节点不使用网络编码时的消耗减去使用网络编码的增益。同理, 在 n_6 节点, 将多播产生的增益定义为多播传输增益。总的网络消耗可以表示为式(5)。

$$C(X) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 c_i^j x_i^j - \min\{\alpha_{34}, \alpha_{45}\} \min\{x_1^1, x_2^1\} - \min\{\alpha_{45}, \alpha_{48}\} \min\{x_3^1, x_2^2\} - \min\{\alpha_{65}, \alpha_{69}\} \min\{x_5^1, x_6^1\} \quad (5)$$

其中, $X = \{x_1^1, x_2^1, x_2^2, x_3^1, x_3^2, x_4^1, x_4^2, x_5^1, x_5^2, x_6^1, x_6^2\}$ 是系统状态, c_i^j 是未编码消耗。例如, 对于路径 $P_{11}=(n_3, n_4, n_5)$, $c_{11}=\alpha_{34}+\alpha_{45}$ 。因此, 式(5)右边第一项是未经任何编码的网络总消耗, 其他项分别是 n_4 节点的网络编码增益及 n_6 节点的多播传输增益。本文研究在给定流量下, 最小化网络消耗的问题。解决问题的难点在于, 网络编码多播传输链接中流量的分配及两种链路 (NCMC 链接和 MC 链接) 之间的博弈。

为了解决这个问题, 引入一个新的决策变量 y_k , 表示网络编码多播传输链接和多播传输链接的容量。限制节点 n_k 上两个流之间的总编码 (或多播传播) 流量大约等于链路最大负载能力 y_k , “溢出”流量不进行编码, 直接发送。图 2 中, 网络编码多播传输链接 (n_3, n_4, n_5) 和 (n_8, n_4, n_5) 的容量定义为 y_{41} 和 y_{42} , 相应的多播传输链接的容量定义为 y_6 。在容量为 y_4 的网络编码多播传输链接上传输的总消耗如式(6)所示。

$$C(\text{NCMC}_1) = \max\{\alpha_{34}, \alpha_{45}\} y_4 + \max\{\alpha_{45}, \alpha_{48}\} y_4^2 + \alpha_{45}(x_1^1 - \min\{x_1^1, y_4^1\}) + \alpha_{34}(x_2^1 - \min\{x_1^1, y_4^1\}) + \alpha_{45}(x_3^1 - \min\{x_3^1, y_4^2\}) + \alpha_{48}(x_2^2 - \min\{x_3^1, y_4^2\}) \quad (6)$$

式(6)的前两项表示多播传输消耗。值得注意的是, 无论在网络编码多播传输链接上有没有足够的逆向流进行编码发送, 都必须承担相应的消耗。之后使用共轭梯度下降法调整链接的容量, 使网络得到优化。

n_4 节点的消耗可以重写为式(7)。



$$\begin{aligned}
C(\text{NMC}_1) &= \alpha_{45}x_1^1 + \alpha_{34}x_2^1 + \alpha_{45}x_3^1 + \alpha_{48}x_2^2 + T(\text{NMC}_1) \\
T(\text{NMC}_1) &= \alpha_{45} \min\{x_1^1, y_4^1\} + \alpha_{34} \min\{x_1^1, y_4^1\} + \\
&\quad \alpha_{45} \min\{x_3^1, y_4^2\} + \alpha_{48} \min\{x_3^1, y_4^2\} \\
&\quad - \max\{\alpha_{34}, \alpha_{45}\}y_4^1 - \max\{\alpha_{45}, \alpha_{48}\}y_4^2 \quad (7)
\end{aligned}$$

因此,当系统状态为 (X, Y) 时,修改后的效用函数(网络总消耗)如式(8)所示。

$$C(X, Y) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 c_i^j x_i^j - (T_{\text{NMC}_1} + T_{\text{MC}_1}) \quad (8)$$

其中, $X = \{x_1^1, x_1^2, x_2^1, x_2^2, x_3^1, x_3^2, x_4^1, x_4^2, x_5^1, x_5^2, x_6^1, x_6^2\}$, $Y = \{y_4^1, y_4^2, y_6\}$ 。 T_{NMC} 和 T_{MC} 是分别使用 NCMC 链接和 MC 链接得到的增益。当系统的状态为 (X, Y) 时,式(8)表示在给定传输流量条件下总的网络消耗,本文提出的控制算法就是要尽量减少这个总的网络消耗。

可以看到,效用函数里包含“min”函数,这使得函数不连续、不可微。为了得到一个连续可微的效用函数,用“min”函数的广义平均值函数替代,利用夹逼定理可证。

设 $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 是正实数集, r 为非零实数。集合 a 的广义平均函数可表示为:

$$M_r(a) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^r \right)^{\frac{1}{r}} \quad (9)$$

用 M_r 代替 min 函数,得到一个近似的网络总消耗方程,如式(10)所示。

$$\begin{aligned}
C(X, Y_{\text{NMC}}, Y_{\text{MC}}) &= \sum_{i=1}^F \sum_{p=1}^{S_i} c_i^p - \\
&\quad \sum_{h_{\text{NMC}}=1}^{H_{\text{NMC}}} T_{\text{NMC}}(h_{\text{NMC}}) - \sum_{h_{\text{MC}}=1}^{H_{\text{MC}}} T_{\text{MC}}(h_{\text{MC}}) \\
T_{\text{NMC}}(h) &= \alpha_{kd} \left(\frac{(x_i^p)^r + (y_{\text{NMC}}^h)^r}{2} \right) + \\
&\quad \alpha_{kd} \left(\frac{(x_i^q)^r + (y_{\text{NMC}}^h)^r}{2} \right) - \alpha_{kd} y_{\text{NMC}}^h \\
T_{\text{MC}}(h) &= \alpha_{kd} \left(\frac{(x_i^p)^r + (y_{\text{MC}}^h)^r}{2} \right) + \\
&\quad \alpha_{kd} \left(\frac{(x_j^q)^r + (y_{\text{MC}}^h)^r}{2} \right) - \max\{\alpha_{ki}, \alpha_{kj}\} y_{\text{MC}}^h \quad (10)
\end{aligned}$$

其中, F 是网络中的流量数, S_i 是可选择的策略,即一条备选路径, α_{kd} 是两个相邻节点间的通信代价。近似的效用函数 $C(X, Y_{\text{NMC}}, Y_{\text{MC}})$ 是连续、可微的,因此使用该近似效用函数作为势函数,遵循潜在博弈的定义^[8]。本文的目标是在给定网络负载的情况下,最小化系统代价 $C(X, Y)$,如

式(11)所示,可以将其视为一个最优化问题解决。

$$\begin{aligned}
&\min C(X, Y) \\
&\text{s.t.} \quad \sum_{p=1}^{S_i} x_i^p = x_i, \forall i \in F \\
&\quad \quad x_i^p \geq 0
\end{aligned} \quad (11)$$

值得注意的是,博弈论中每一个参与者(即数据流)都会试图减少所消耗的代价。第 i 条数据流选定合适的路径后,会通过调整流量分配的多少达到 Wardrop 平衡^[9,10]。

在网络构建初期,将网络编码和多播传输的链接分别申明为 NCMC 链接和 MC 链接,并给定其容量分别为 Y_{NMC} 和 Y_{MC} 。 NCMC 链接是具有逆向编码及多播传输能力的链接,将逆向数据流进行编码后以多播方式发送给周边节点;MC 链接为只具有多播传输能力的链接,将相同的数据流以多播方式发送给多个目的节点。在网络构建时,将 NCMC 链接和 MC 链接的容量及代价进行广播。

在网络运行阶段,网络节点收到 NCMC 链接和 MC 链接广播的链接容量,即 Y_{NMC} 、 Y_{MC} 及代价,根据两种链接代价的计算方法计算链接总传输代价,节点利用拉格朗日乘子法分布式地求出最优路径分配流量。

根据拉格朗日乘子法得到的最优解,即当前网络流量分配状态 X ,利用最速梯度下降法求新的链接容量,即 Y_{NMC} 、 Y_{MC} ,在新的链接容量下重复上述操作,最终得到最小网络传输代价时的路径分配流量。

本文已经设计了一个分布式方案,该方案可以在给定网络流量与传输链接及其容量 Y 时,实现网络代价局部最小。之后将基于当前系统状态,调整链接容量 Y ,使得在给定负载流量 X 的情况下,网络代价进一步减小。在链接容量 Y 的微小改变前后,系统始终处于 Wardrop 平衡状态。

3 仿真与分析

通过 MATLAB 仿真评估系统的性能。根据图 1 所示的网络模型,源节点 S_1 、 S_1' 、 S_2 和 S_3 给定的负荷量分别为 2.32、2.32、4.27 和 3.19。对各个链接的路径代价定义为: $\alpha_{12}=1.3$ 、 $\alpha_{13}=1.7$ 、 $\alpha_{25}=1.6$ 、 $\alpha_{34}=1.7$ 、 $\alpha_{38}=1.5$ 、 $\alpha_{45}=1.8$ 、 $\alpha_{48}=1.6$ 、 $\alpha_{56}=2.1$ 、 $\alpha_{67}=1.6$ 、 $\alpha_{69}=1.8$ 、 $\alpha_{710}=1.6$ 、 $\alpha_{89}=2.2$ 、 $\alpha_{910}=1.6$ 。假设链路路上的消耗是对称的,令 $r=-100$,使用式(10)所示的近似效用函数进行仿真。

如图 2 所示,比较了多播传输无网络编码算法、集中控制流量分配算法、无网络编码无多播传输算法和动态流量分配算法的网络总代价。多播传输无网络编码算法是指

网络中没用到网络编码,但存在多播传输;无网络编码无多播算法是一种无网络编码的单一传播算法;动态流量分配算法是本文提出的算法,通过分配流量增加编码机会。为了衡量动态流量分配算法的性能,仿真了集中控制流量分配算法的网络代价,该算法是一个 LP(linear program,线性规划)方法,需要完整的网络信息。本文提出的控制方案中节点间的计算彼此独立,不依赖于全局信息。仿真结果表明,动态流量分配算法的总消耗比无网络编码的方法小,与最佳解决方法十分相近。另外,流量分配控制算法具有良好的收敛性。

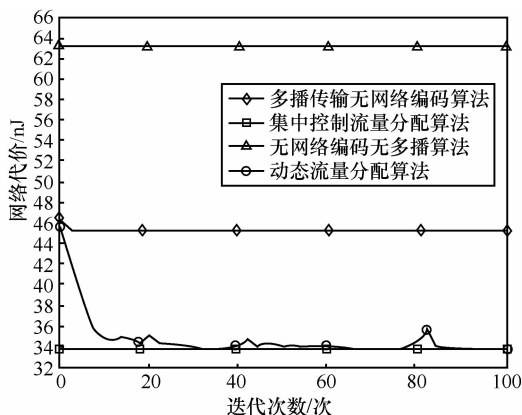


图2 不同算法网络总代价比较

图3仿真了每条路径所分配流量的动态变化及其收敛情况。可以看出,动态流量分配算法可以驱使每条路径的流量到达一个最佳状态,从而减少网络代价,使得网络吞吐量显著增加。根据潜在博弈论的性质,动态流量分配算法可以使网络达到纳什平衡。

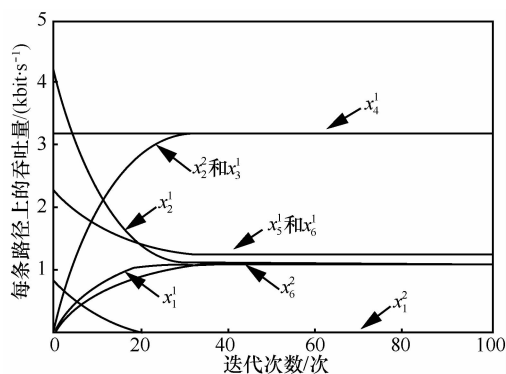


图3 不同路径的流量变化情况

4 结束语

本文研究了无线传感器网络中, N 个源节点通过多径传递 K 个不同内容到 D 个目的节点的问题,源节点根据效用函数拆分流量,并分配到不同路径上,增加网络编码

的机会,从而减少网络传输代价。利用博弈论的方法解决了多源、多径的流量分配问题,提出了可以达到纳什均衡的动态流量分配算法,并证明这个过程是渐进收敛的。数值仿真结果表明,动态流量分配算法是有效的,并且可以快速收敛到最优解,在网络节点利己的情况下,分布式动态控制方案可以达到最优解。

参考文献

- 1 Ahswede R, Cai N, Li S, *et al.* Network information flow. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204~1216
- 2 Marden J, Effros M. The price of selfishness in network coding. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(4): 2349~2361
- 3 Li W, Chen J, Zhou B. Game theory analysis for graded punishment mechanism restraining free-riding in P2P networks. Proceedings of International Symposium on Computer Science and Society, Kota Kinabalu, Malaysia, 2011: 262~266
- 4 Zhao F, Medard M. On analyzing and improving COPE performance. Proceedings of Information Theory and Applications Workshop, San Diego, CA, USA, 2010: 1~6
- 5 Reddy V, Shakkottai S, Sprintson A, *et al.* Multipath wireless network coding: a population game perspective. Proceedings of IEEE INFOCOM, San Diego, CA, USA, 2010: 1~9
- 6 Ciftcioglu E, Sagduyu Y E, Berry R, *et al.* Cost-delay tradeoffs for two-way relay networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(12): 4100~4109
- 7 Aperijs C, Johari R, Freedman M J. Bilateral and multilateral exchanges for peer-assisted content distribution. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(5): 1290~1303
- 8 Han Z, Niyato D, Saad W, *et al.* Game Theory in Wireless and Communication Networks. Oxford: Cambridge University Press, 2012
- 9 Neely M J, Golubchik L. Utility optimization for dynamic peer-to-peer networks with tit-for-tat constraints. Proceedings of IEEE INFOCOM, Shanghai, China, 2011: 1458~1466
- 10 Zhao J, Zhang P, Cao G. On cooperative caching in wireless P2P networks. Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems, Beijing, China, 2008: 731~739

[作者简介]



张伟,男,南京邮电大学硕士生,主要研究方向为信号处理及其应用。

张玲华,女,博士,南京邮电大学信息与通信工程学院教授、党总支书记兼副院长,主要研究方向为语音处理与现代语音通信、新一代无线通信网络中的通信与信号处理技术等。