

无线网络中网络编码子图优化问题的研究

杨叶舒, 梅中辉

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:文中主要针对存在链路时延且节点缓存受限的无线网络来考虑网络编码子图优化问题。提出所研究问题的连续时间模型,进而又推导出离散时间模型。为简化所研究问题,引入时间扩展网络拓扑模型,基于该模型提出网络编码子图分布式优化算法,并通过仿真评估节点缓存大小对系统性能的影响。仿真结果表明,节点缓存越长,最优子图的总能耗越少。最后,对比网络编码技术和路由技术对系统性能的影响,仿真结果表明有网络编码的系统性能优于传统的无网络编码系统。

关键词:网络编码;组播;无线网络;子图

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)03-0086-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.03.022

Research on Optimal Sub-graph Selection with Network Coding in Wireless Networks

YANG Ye-shu, MEI Zhong-hui

(College of Telecommunication & Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Consider the problem of finding a minimum cost multicast sub-graph over wireless networks based on network coding, where delay values associated with each link, limited buffer-size of the nodes are taken into account. For such networks, the continuous-time model is formulated, and the discrete-time model is derived. To simplify the problem, introduce the time-expanded network topology model. Then, a distributed optimized algorithm of network coding sub-graph based on this model is proposed. As shown by the simulation results, larger buffer-size of the nodes may lead to cost reduction, and the performance of the system with network coding outperforms the traditional system.

Key words: network coding; multicast; wireless network; sub-graph

0 引言

相对于传统的直接路由转发数据包方法,在节点中考虑网络编码^[1]可以极大地提高网络吞吐量。由于无线链路的广播特性,非常适合应用网络编码技术,但无线网络的吞吐量受网络资源所限制,因而基于无线网络和网络编码技术来优化网络资源,具有十分重要的研究意义。该问题可分解为两个子问题:网络编码子图优化问题和基于网络编码子图确定具体网络编码方法问题。对于第一个问题, Lun 等人给出了网络编码条件下的无线网络信息流优化模型,基于该模型利用线性规划或凸优化理论^[2]来求解网络编码条件下的

链路开销优化问题^[3]。文献[4]基于网络编码技术考虑固定组播速率条件下的网络资源优化问题。文献[5-6]研究了在不同形式的目标函数下的网络资源优化问题的求解。文献[7]在无线网络中基于网络编码技术利用凸优化知识研究了最小能量多播问题。文献[8]研究了节点缓存受限条件下的实用网络编码方法。文献[9]研究了链路存在时延的有线网络中最优子图的问题。

文中针对无线组播网络,考虑链路时延和中间节点缓存受限条件下的网络编码子图优化问题。

收稿日期:2013-05-12

修回日期:2013-09-05

网络出版时间:2014-01-07

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2011CB302903)

作者简介:杨叶舒(1989-),女,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为网络编码技术、资源优化等;梅中辉,副教授,研究生导师,研究方向为网络编码技术、协作通信技术等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140107.1726.048.html>

1 系统模型

1.1 连续时间模型

在考虑链路时延的情况下,用 $G = (N, A, D)$ 表示无线通信网络, N 表示无线网络节点集合, A 表示无线网络广播链路集合, D 表示对于整个网络的观察时间段,一般选取为大于等于 M 的整数,其中, M 表示信源发出的信息全部传送至目的节点所需的时间长度。超弧 $(i, J) \in A$ 表示无线广播链路,其中, $i \in N$ 表示超弧的始点, $J \subset N$ 表示超弧终点的集合。设无线网络中存在一个组播会话,信源节点为 $S \in N$,目的节点集合为 $T \in N$ 。

设在 $\forall p \in [0, D]$ 的时间点,超弧 (i, J) 发送的数据速率为 $z_{ij}(p)$,目的节点为 t 且经过链路 (i, j) 的信息流速率为 $x_{ij}^{(t)}(p)$,其中 $j \in J$ 。取 d_{ij} 为链路 (i, j) 所需的传播整数时延。取 b_i 表示节点 i 的缓存器的长度。因此,在考虑时延和节点缓存受限的无线网络中,网络编码子图优化问题可表述为:

$$\begin{aligned} \min f(z) &= \sum_{(i, J) \in A} a_{ij} \int_0^D z_{ij}(\xi) d\xi \\ \text{s. t. } z_{ij}(p) &\geq \sum_{j \in J} x_{ij}^{(t)}(p), \quad \forall (i, J) \in A, t \in T, \\ &\quad \forall p \in [0, D] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\int_0^p \left[\sum_{|J|(i, J) \in A} \sum_{j \in J} x_{ij}^{(t)}(\xi) - \sum_{|J|(j, I) \in A, i \in I} x_{ji}^{(t)}(\xi - d_{ij}) \right] d\xi \leq \delta_i^{(t)}, \quad \forall i \in N, t \in T, \forall p \in [0, D]$$

$$\int_0^D \left[\sum_{|J|(i, J) \in A} \sum_{j \in J} x_{ij}^{(t)}(\xi) - \sum_{|J|(j, I) \in A, i \in I} x_{ji}^{(t)}(\xi - d_{ij}) \right] d\xi = \delta_i^{(t)}, \quad \forall i \in N, t \in T$$

$$x_{ij}^{(t)}(p) \geq 0, \quad \forall (i, J) \in A, t \in T, \forall p \in [0, D]$$

$$\text{其中 } \delta_i^{(t)} = \begin{cases} R, & i = s \\ -R, & i = t \\ b_i, & \text{otherwise} \end{cases}$$

1.2 离散时间模型

在连续时间模型中, p 可以在区间 $[0, D]$ 中取任意值,然而,在离散时间模型中, p 只取值为 $0, 1, 2, \dots, D-1$ 。为简化所研究问题,假设所有链路时延相等,即 $d_{ij} = d, \forall (i, j) \in A$, 则相应优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \min f(z) &= \sum_{(i, J) \in A} \sum_{p=0}^{D-1} a_{ij} z_{ij}(p) \\ \text{s. t. } z_{ij}(p) &\geq \sum_{j \in J} x_{ij}^{(t)}(p), \quad \forall (i, J) \in A, t \in T, \\ &\quad \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{|J|(i, J) \in A} \sum_{j \in J} \sum_{p=0}^{\vartheta} x_{ij}^{(t)}(p) - \sum_{|J|(j, I) \in A, i \in I} \sum_{p=0}^{\vartheta} x_{ji}^{(t)}(p - d) \leq \delta_i^{(t)}, \quad \forall i \in N, t \in T, \forall \vartheta \in \{0, 1, \dots, D-2\}$$

$$\sum_{|J|(i, J) \in A} \sum_{j \in J} \sum_{p=0}^{D-1} x_{ij}^{(t)}(p) - \sum_{|J|(j, I) \in A, i \in I} \sum_{p=0}^{D-1} x_{ji}^{(t)}(p - d) =$$

$$\delta_i^{(t)}, \quad \forall i \in N, t \in T$$

$$x_{ij}^{(t)}(p) \geq 0, \quad \forall (i, J) \in A, t \in T, \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\}$$

其中, $x_{ij}^{(t)}(p)$ 表示在 $[p, p+1]$ 时间段中,由节点 i 发送到节点 j 且目的节点为 t 的信息速率,即 $x_{ij}^{(t)}(p) = \int_p^{p+1} x_{ij}^{(t)}(\xi) d\xi$ 。同样, $z_{ij}(p) = \int_p^{p+1} z_{ij}(\xi) d\xi$ 。可见,离散时间模型和连续时间模型是等价的。然而,离散时间模型不是一个静态的模型,不能在多项式时间内求解。为此,采用时间扩展模型将时延网络模型^[10]转化成静态的,以便在多项式时间内求解。

1.3 时间扩展模型

将上文提出的无线网络 $G = (N, A, D)$ 进行时延拓展转化成 $G^D = (N^D, A^D)$, 在 G^D 中,每个节点在不同时间点 $\{0, 1, 2, \dots, D-1\}$ 都有一个复制点,即 $N^D = \{i_p \mid i \in N; p = 0, 1, \dots, D\}$ 。在时间扩展图中有如下定义:

$$\begin{aligned} A' &= \{ (i_p, j_{p+d}) \mid (i, j) \in A; p = 0, 1, \dots, D-d; \\ &\quad i_p, j_{p+d} \in N^D \} \\ A'' &= \{ (i_p, i_{p+1}) \mid p = 0, 1, \dots, D-1; i_p, i_{p+1} \in N^D \} \\ A^D &= A' \cup A'' \end{aligned}$$

现举例说明,图1为一个典型的蝶形网络,图2即为图1相应的时间扩展图。

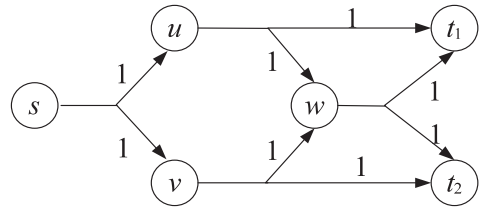


图1 S到 t_1, t_2 的组播网络
(每个超弧上都标注了整数的时延)

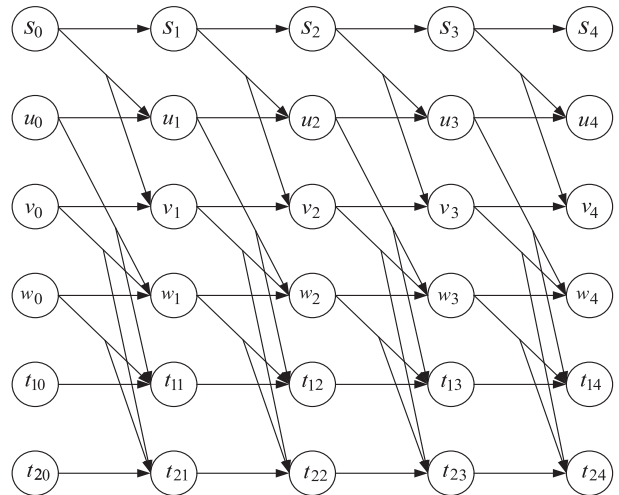


图2 图1网络对应的的时间扩展图

由时间扩展图可以看出, G 图中从源节点 S 到目的节点集合 T 的通信等价于在 G^D 图中从源节点集合

$S^D = \{S_p | p = 0, 1, \dots, D-1\}$ 到目的节点集 $T^D = \{T_p | p = 0, 1, \dots, D-1\}$ 的通信。则式(2)所描述的问题可相应转化为:

$$\min f(z) = \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} z_{ij} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } z_{ij} \geq \sum_{j_p \in J_p} x_{ijj_p}^{(t)}, \forall (i_p, J_p) \in A^D, t \in T, \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\} \quad (4)$$

$$\sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^+} \sum_{j_p \in J_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)} - \sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^-, i_p \in I_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)} = \delta_i^{(t)}, \quad \forall i_p \in N^D, t \in T, \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\}$$

$$x_{ijj_p}^{(t)} \geq 0, \forall (i_p, J_p) \in A^D, t \in T, \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\}$$

对比模型(2)和(3),令 $x_{ijj_p}^{(t)} = x_{ij}^{(t)}(p)$, $z_{ij} = z_{ij}(p)$ 可证明这两个模型是等价的。模型(3)可采用 Lun 提出的原始对偶算法进行分布式求解。

2 原始对偶算法

对于约束条件(4),由于 $f(z)$ 是关于 z_{ij} 单调递增的, $z_{ij} \geq \sum_{j_p \in J_p} x_{ijj_p}^{(t)}$ 这个约束条件可以看成

$$z_{ij} = \max_{t \in T} \left\{ \sum_{j_p \in J_p} x_{ijj_p}^{(t)} \right\} \quad (5)$$

一般情况下,这个约束条件不可微,不便于处理。因此采用一种近似的 z'_{ij} 来代替 z_{ij} 。

$$z'_{ij} = \left(\sum_{t \in T} \left(\sum_{j_p \in J_p} x_{ijj_p}^{(t)} \right)^m \right)^{1/m} \quad (6)$$

当 $m \rightarrow \infty$, $z'_{ij} \rightarrow z_{ij}$ 。则(3)可相应表示为:

$$\min f(z') = \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} z'_{ij} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^+} \sum_{j_p \in J_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)} - \sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^-, i_p \in I_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)} = \delta_i^{(t)}, \quad \forall i_p \in N^D, t \in T, \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\}$$

$$x_{ijj_p}^{(t)} \geq 0, \forall (i_p, J_p) \in A^D, t \in T, \forall p \in \{0, 1, \dots, D-1\}$$

问题(7)作为原始问题,由于目标函数为严格凸函数,它有唯一最小值。通过引入拉格朗日系数 p 和 λ ,将(7)中的约束条件转化到拉格朗日函数中,通过求解拉格朗日函数的极值来得到最优解。首先得到的对偶的拉格朗日函数如下:

$$L(x, p, \lambda) = \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} z'_{ij} + \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i_p \in N^D} p_{i_p}^{(t)} \left(\sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^+} \sum_{j_p \in J_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)} - \sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^-, i_p \in I_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)} - \delta_i^{(t)} \right) - \sum_{(i_p, J_p) \in A^D, i_p \in I_p} \sum_{j_p \in J_p} \lambda_{ijj_p}^{(t)} x_{ijj_p}^{(t)} \right\} \quad (8)$$

定义函数 $(y)_x^+$ 为:

$$(y)_x^+ = \begin{cases} y & x > 0 \\ \max(y, 0) & x \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

求对偶问题(8)最优解时,由 KKT 条件可以得到以下迭代公式:

$$x_{ijj_p}^{(t)}[n+1] = x_{ijj_p}^{(t)}[n] - \alpha_{ijj_p}^{(t)}[n] \left(\frac{\partial f(z'_{ijj_p}[n])}{\partial x_{ijj_p}^{(t)}[n]} + q_{ijj_p}^{(t)}[n] - \lambda_{ijj_p}^{(t)}[n] \right) \quad (10)$$

$$p_{i_p}^{(t)}[n+1] = p_{i_p}^{(t)}[n] + \beta_{i_p}^{(t)}[n] (y_{i_p}^{(t)}[n] - \delta_i^{(t)}) \quad (11)$$

$$\lambda_{ijj_p}^{(t)}[n+1] = \lambda_{ijj_p}^{(t)}[n] + \gamma_{ijj_p}^{(t)}[n] (-x_{ijj_p}^{(t)}[n])_{\lambda_{ijj_p}^{(t)}[n]}^+ \quad (12)$$

$$\text{其中, } \frac{\partial f(z'_{ijj_p}[n])}{\partial x_{ijj_p}^{(t)}[n]} = a_{ijj_p} \left(\frac{x_{ijj_p}^{(t)}[n]}{z'_{ijj_p}[n]} \right)^{m-1},$$

$$q_{ijj_p}^{(t)}[n] = p_{i_p}^{(t)}[n] - p_{j_p}^{(t)}[n],$$

$$y_{i_p}^{(t)}[n] = \sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^+} \sum_{j_p \in J_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)}[n] - \sum_{[j_p] (i_p, J_p) \in A^-, i_p \in I_p} \sum_{p=0}^{\theta} x_{ijj_p}^{(t)}[n]$$

步长分别为 $\alpha_{ijj_p}^{(t)}[n] > 0$, $\beta_{i_p}^{(t)}[n] > 0$, $\gamma_{ijj_p}^{(t)}[n] > 0$ 。在文献[11]中, Lun 论证了(10)~(12)是全局渐进稳定的。

在实际网络中可以分别为每条超弧和每个节点设置存储器,每个节点存储器用来记录每次迭代计算出的 $p_{i_p}^{(t)}[n]$, 每个超弧的存储器记录迭代出的 $x_{ijj_p}^{(t)}[n]$ 、 $\lambda_{ijj_p}^{(t)}[n]$ 。这样,可得出分布式算法如下:

(i) 每个节点先初始化 $p_{i_p}^{(t)}[0]$, $x_{ijj_p}^{(t)}[0]$ 、 $\lambda_{ijj_p}^{(t)}[0]$, 并通过超弧 (i, J) 发送。

(ii) 在第 n 次迭代中, 每个节点 i 利用(10)~(12)计算出 $p_{i_p}^{(t)}[n+1]$ 、 $x_{ijj_p}^{(t)}[n+1]$ 、 $\lambda_{ijj_p}^{(t)}[n+1]$ 并通过超弧发送到相邻节点。

(iii) 计算出当前的子图 $z'_{ijj_p}[n] = \left(\sum_{t \in T} \left(\sum_{j_p \in J_p} x_{ijj_p}^{(t)}[n] \right)^m \right)^{1/m}$

(iv) 重复(ii)、(iii)直至 $z'_{ijj_p}[n]$ 收敛。

3 仿真与分析

以图1所示蝶形网络为例对所提算法进行性能仿真。仿真中无线链路发送单位数据包所需能量的大小取值如图3所示。

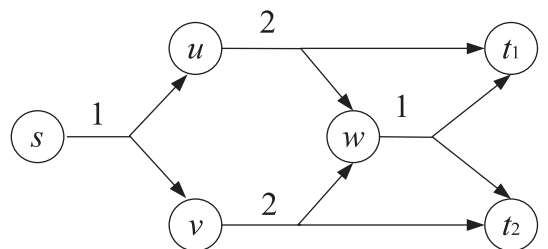


图3 S到 t_1 、 t_2 的组播网络
(每个超弧上标注了该链路的花费)

1) 不同缓存器长度下的系统性能。根据文献[4],选择步长如下: $\alpha_{i,j_p}^{(i)}[n] = \alpha, \beta_{i_p}^{(i)}[n] = 20\alpha, \gamma_{i,j_p}^{(i)}[n] = 20\alpha$ 。在不同缓存器的长度下进行仿真,结果如图4所示,其中图4(a)表示在观察时间 $D = 4$,信源发送速率 R 分别取2、3时系统能耗的比较;图4(b)表示在信源发送速率 $R = 3$,观察时间 $D = 4、5$ 时系统能耗的比较。

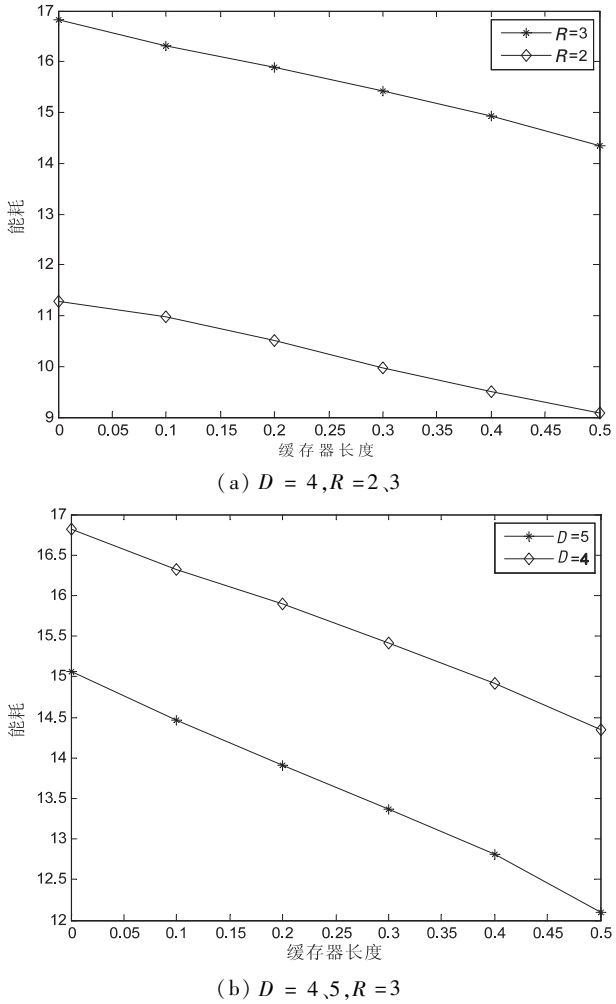


图4 不同缓存器长度下的系统能耗

由图可以得出以下结论:

(1) 缓存器长度越长,传输所需总费用越小。原因是当中间节点输出链路中费用较少的链路被占用时,缓存器长度越长,节点可以更灵活地存储数据包。这样的节点可以把收到的数据包先存储起来,等到费用较少的链路空闲时再发送。

(2) 当时间扩展图的观察时间 D 较小时,只能通过时延较小的链路来发送数据,这样可能会导致更高的总花费。当时间扩展图的观察时间 D 增大时,可以得到总费用较少的子图,因为 D 增大时,源节点到目的节点的链路数量增加,数据包可以更灵活地选择费用较小的链路来发送。

2) 网络编码与传统路由方法间的性能比较。对

比网络编码技术和路由技术对系统性能的影响。在传统路由方式中,最小花费组播问题等价于解决 Steiner 树问题,文献[12]提出了解决这个问题的 MIP (Multicast Incremental Power) 启发式算法。对 MIP 算法及文中的原始对偶算法进行仿真,结果如图5所示。

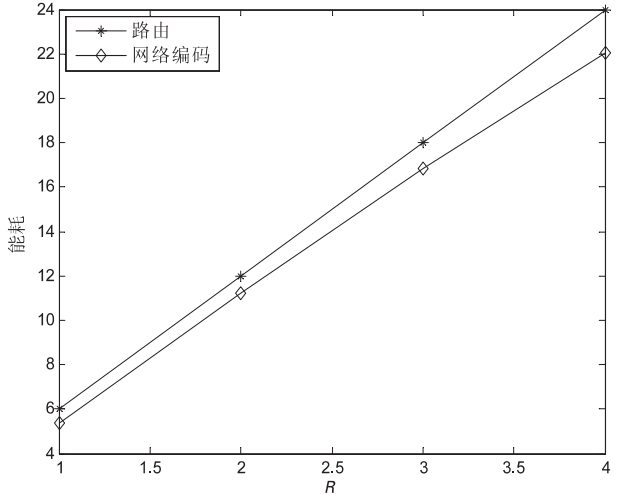


图5 路由和网络编码的性能比较

通过对比,可以发现在无线网络中,基于原始对偶算法的最小花费组播比基于 MIP 算法得到的总花费下降 6% ~ 10%。这是由于前者通过不断的迭代运算,将信息流分配到最优的编码子图中,同时会话内的网络编码利用无线网络的组播优势,降低了系统的总能耗。由此可得网络编码技术优于传统的路由技术。另外,在实际应用中,分布式的原始对偶算法通过不断地和邻居节点交换信息获得最终的编码子图,比集中式的 MIP 算法更具实用性。

4 结束语

文中主要考虑链路时延和节点缓存器受限的无线组播网络中的网络编码子图优化问题。首先将此问题从连续时间模型延伸到离散时间模型,接着,通过时间扩展图将网络模型转换成无时延网络,从而利用原始对偶算法得到所研究问题的分布式求解算法。仿真结果显示,增加节点的缓存器长度可以减小系统总能耗。另外文中还对比了网络编码技术和路由技术对系统性能的影响,可以看出网络编码技术优于传统路由技术。

参考文献:

[1] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE transaction on information theory, 2000, 46: 1204-1216.

[2] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. New York; Cambridge University Press, 2004.

[3] 黄 政, 王 新. 网络编码中的优化问题研究[J]. 软件学

算法能够更好地检测到运动数据片段之间的全局时间对应关系,因此能够得到更加准确的检索结果。EMD 能检索全局范围,相比于其他算法有着更小的波动幅度。

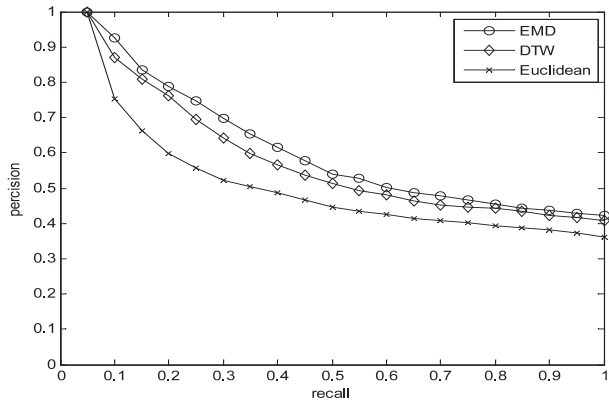


图5 PR 曲线

4 结束语

提出一种新的基于四元数和 EMD 度量的人体运动分析及识别技术,其贡献主要不依赖于预先设定的参数,且相对于现有运动数据检索方法而言,其能够获得更好的索引技术,且该索引的时间效率与检索效果优于欧氏距离和 DTW。今后的主要工作是:

- 1) 研究基于关节旋转信息的运动数据能够随着新数据的加入而频繁更新,不影响检索效率。
- 2) 在运动检索过程中考虑用户反馈信息,引入相关反馈机制,以提高检索结果的查准率与查全率。

参考文献:

[1] Haritaoglu I, Harwood D, Davis L S. W⁴: Real-time surveillance of people and their activities[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(8): 809-830.

[2] Liu Ling, Pu Calton, Han Wei. An XML-enabled data extraction tool kit for web[J]. Information systems, 2001, 26(8): 563-583.

[3] 向坚, 朱红丽. 基于三维特征提取的人体运动数据分析和检索[J]. 计算机应用, 2008, 28(5): 1344-1346.

[4] 潘红, 肖俊, 吴飞, 等. 基于关键帧的三维人体运动检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(2): 214-222.

[5] Muller M, Roder T, Clausen M. Efficient content-based retrieval of motion capture data[J]. ACM transactions on graphics, 2005, 24(3): 677-685.

[6] Vlachos M, Gunopulos D, Keogh E. Indexing multidimensional time-series[J]. The VLDB journal, 2006, 15(1): 1-20.

[7] Keogh E, Palpanas T, Zordan V B. Indexing large human-motion databases[C]//Proc of VLDB. [s.l.]: [s.n.], 2004: 780-791.

[8] CMU, Carnegie-Mellon MoCap Database [EB/OL]. 2003. <http://mocap.cs.cmu.edu>.

[9] 连德忠. 四元数向量和矩阵的实表示[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, 42(6): 704-708.

[10] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 48-61.

[11] Rubner Y, Tomasi C, Guibas L J. Metric for distributions with applications to image databases[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. [s.l.]: [s.n.], 1988: 59-66.

[12] Xu Jia, Zhang Zhenjie. Efficient and effective similarity search over probabilistic data based on earth mover's distance[C]//Proceedings of the VLDB Endowment. [s.l.]: [s.n.], 2010: 758-769.

[13] Rubner Y, Guibas L J, Tomasi C. The earth mover's distance as a metric for image retrieval[J]. International journal of computer vision, 2000, 40(2): 99-121.

(上接第 89 页)

报, 2009, 20(5): 1349-1361.

[4] Lun D S, Medard M, Ho T, et al. Network coding with a cost criterion[C]//Proceeding of the 2004 int'l symposium on information theory and its applications. [s.l.]: [s.n.], 2004: 1232-1237.

[5] Lun D S, Ratnakar N, Koetter R, et al. Achieving minimum-cost multicast: A decentralized approach based on network coding[C]//Proceeding of the IEEE INFOCOM 2005. [s.l.]: [s.n.], 2005: 1607-1617.

[6] Lun D S, Ratnakar N, Medard M, et al. Minimum-cost multicast over coded packet networks[J]. IEEE transaction on information theory, 2006, 52(6): 2608-2623.

[7] 王庆斌, 梅中辉. 无线网络中基于网络编码的最小能量多播[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(1): 150-153.

[8] Chou P A, Wu Y, Jain K. Practical network coding[C]//Proc of allerton conf comm cont comp. [s.l.]: [s.n.], 2003.

[9] Ghasvari H, Raayatpanah M A, Khalaj B H, et al. Optimal sub-graph selection over coded networks with delay and limited-size buffering[J]. IET communications, 2011, 5(11): 1497-1505.

[10] Wu Y. A trellis connectivity analysis of random linear network coding with buffering[C]//Proceeding of IEEE international symposium on information theory. [s.l.]: [s.n.], 2006: 768-772.

[11] Ho T, Lun D S. Network coding: An introduction[M]. New York: Cambridge University Press, 2008.

[12] Wieselthier J E, Nguyen G D, Ephremides A. Energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks[J]. Mobile networks and applications, 2002, 7(6): 481-492.

无线网络中网络编码子图优化问题的研究

作者：[杨叶舒](#)，[梅中辉](#)，[YANG Ye-shu](#)，[MEI Zhong-hui](#)
作者单位：[南京邮电大学 通信与信息工程学院](#)，[江苏 南京](#)，[210003](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(3)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201403022.aspx