

无线网络中基于网络编码的最小能量多播

王庆斌,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:在无线网络中,降低能量消耗是十分重要的问题。然而,传统的路由算法仅能近似的构建最小能量多播树,这是因为该问题在不使用网络编码的网络中是 NP 的。通过使用网络编码可以将该问题转化为线性或凸规划问题。文中采用编码分组网络中的 Lun 提出的分布式网络资源分配方法,将该算法应用到无线网络和随机网络中以构建最小能量多播树。仿真表明,在无线网络中,该算法所耗费的能量远低于集中式算法,且对于网络的动态变化有较好的鲁棒性。

关键词:能量有效性;多播;会话内网络编码;无线网络

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)01-0150-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.037

Minimum-energy Multicast over Wireless Networks Based on Network Coding

WANG Qing-bin, MEI Zhong-hui

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: In wireless network, reducing energy consumption is a crucial problem. However, conventional routing algorithms used in network only can provide approximate construction of minimum-energy multicast tree, as this problem in wireless network without network coding is well-known to be NP-hard. By using network coding, this NP-hard problem becomes a linear or convex programming problem. In this paper, adopt the decentralized network resource allocation scheme over coded packet networks proposed by Lun, and apply it in the grid wireless networks and random wireless network respectively to construct minimum-energy multicast tree. Simulation results show that this algorithm outperforms centralized algorithm in wireless networks.

Key words: energy efficiency; multicast; intra-session network coding; wireless network

0 引言

在传统网络中,中继节点只是转发其所接收的消息,构建最小能量多播树是 NP 的^[1]。尽管很多近似的算法已经提出,但这些算法一般是次优的且是集中式的,无法应用到大型的无线动态网络中。

如文献[2]中所述,网络编码通过允许中继节点对接收的信息进行代数运算,推广了仅允许节点进行存储转发的传统路由算法。当使用网络编码时,网络的性能^[3]会得到提升,如网络吞吐量^[4]等。最小能量多播的问题可以分解为如下两个问题:找到可以应用编码的最优的子图;在找到的编码子图上进行编码^[3]。对于如何编码,已经存在很多种方法,如线性

网络编码^[5]、随机网络编码^[6]。

找寻编码子图的问题也在很多文献中进行了研究。Lun 等人^[7]提出了一种编码分组网络中分布式网络资源分配策略。Ho 等人^[8]提出了结合会话内网络编码的背压路由方法,用于解决时变网络中多个多播会话传输问题。H. Ghasvari 等人^[9]对存在延迟及缓存受限的有线编码网络提出了最优的子图选择方法。

在文中,主要研究前者,即在编码分组网络中找到最优子图问题。在文献[10]中,Lun 结合网络编码提出了分布式的次梯度算法,用于找寻最小花费的子图。然而,他只是给出了理论的分析,而没有将其算法应用到具体的网络中。将该算法应用到具体的无线网络中以解决最小能量多播问题。

1 网络模型

1.1 无线网络模型

文中,主要考虑无线多播问题,即信源 s 通过网络

收稿日期:2012-05-08;修回日期:2012-08-12

基金项目:国家科技重大专项(2010ZX03003-003)

作者简介:王庆斌(1988-),男,山东聊城人,硕士研究生,研究方向为网络编码技术等;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。

$G = (N, A)$ 向信宿节点集合 T 发送信息。 N 为通信网络的节点集合, A 为无线信道 (i, j) 集合。信源 s 通过蝶形网络向 t_1 和 t_2 发送信息的无线多播, 如图1所示。

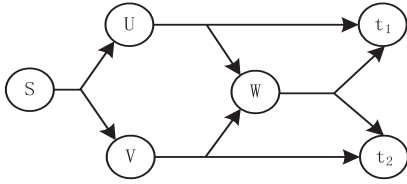


图1 由 s 发送信息到 t_1 和 t_2 的无线多播

1.2 能量模型

在无线网络中, 当节点 i 发送一个信息至节点 j 时, 到节点 i 的距离小于节点 i 和 j 之间距离的所有节点 k , 在不产生额外花费的情况下都会接收到该信息, 这种性质称为“无线多播优势”^[11]。

无线网络的能量模型在文献[12]中进行了讨论。当节点发送单位信息到另一节点时, 所消耗的能量与其间的距离的 α ($\alpha \geq 2$) 次方成正比。假设节点 i 有 M_i 条输出超弧, 分别为 $(i, J_1^{(i)})$, $(i, J_2^{(i)})$, \dots , $(i, J_{M_i}^{(i)})$ 且 $J_1^{(i)} \subsetneq J_2^{(i)} \subsetneq \dots \subsetneq J_{M_i}^{(i)}$ 。那么节点 i 节点消耗的能量为:

$$E_{ij} = \sum_{m=1}^{M_i} \beta_m (\max_{j \in J_m^{(i)}} d(i, j))^\alpha \quad (1)$$

其中 β_m 表示节点 i 在超弧 $(i, J_m^{(i)})$ 发送 β_m 单位的信息, 表示节点 i 和节点 j 之间的距离。为了简化, 设定 $M_i = 1, \alpha = 2$ 。

2 最小能量多播算法

在文献[10]中, Lun 提出了一种结合会话内网络编码的最优子图选择方法。因为线性网络编码无法达到编码子图的会话内网络编码容量, 仅考虑会话内的网络编码, 这种网络编码仅允许属于同一个会话的数据包进行编码。

用 $(s, T, \{R_t, t \in T\})$ 来对无线多播建模, 其中 s 为信源节点, T 为信宿节点集合, R_t 为从信源到信宿节点 t 的速率。变量 $\tilde{x}_{ik}^{(t)}$ 表示从节点 i 到其邻居节点 j 的信息中目的节点为 $t \in T$ 的流量。 $z_{ij^{(t)}}$ 表示节点 i 将数据包沿着输出超弧 $(i, J^{(i)})$ 发送的数据速率。那么, 得到了在 $G = (N, A)$ 有向超图上的最小能量子图选择问题。

2.1 原问题

$$\text{minimize } \sum_{(i, j) \in A} E_{ij} z_{ij}, E_{ij} \geq 0 \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in J^{(i)}} \tilde{x}_{ik}^{(t)} \leq z_{ij^{(t)}}, \forall i \in N, t \in T \quad (3)$$

$$\tilde{x}^{(t)} \in \tilde{F}^{(t)}, \forall t \in T \quad (4)$$

其中 z_{ij} 表示在超弧 (i, J) 的子图, $\tilde{F}^{(t)}$ 满足条件的

$\tilde{x}_{ij}^{(t)}$ 的集合, 且 $\tilde{x}_{ij}^{(t)}$ 满足如下流量守恒约束限制:

$$\sum_{|j| (i, j) \in A'} \tilde{x}_{ij}^{(t)} - \sum_{|j| (j, i) \in A'} \tilde{x}_{ji}^{(t)} = \sigma_i^{(t)}, \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sigma_i^{(t)} = \begin{cases} R_t & \text{if } i = s, \\ -R_t & \text{if } i = t, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

$$\tilde{x}_{ij}^{(t)} \geq 0, \forall (i, j) \in A' \quad (7)$$

其中

$$A' = \{(i, j) \mid (i, J) \in A, j \in J\} \quad (8)$$

节点 i 在其输出超弧 (i, J) 上发送一个单位信息时, 将消耗 E_{ij} 个单位能量。

2.2 拉格朗日对偶问题

为了解决原问题, 得到拉格朗日对偶问题如下:

$$\text{maximize } \sum_{t \in T} \tilde{q}^{(t)}(p^{(t)}) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{t \in T} p_{ij^{(t)}}^{(t)} = E_{ij^{(t)}}, \forall i \in N, (i, J) \in A \quad (10)$$

$$p_{ij^{(t)}}^{(t)} \geq 0, \forall (i, J) \in A, t \in T \quad (11)$$

其中

$$\tilde{q}^{(t)}(p^{(t)}) = \min_{\tilde{x}^{(t)} \in \tilde{F}^{(t)}(i, j) \in A'} \sum (p_{ij^{(t)}}^{(t)}) \tilde{x}_{ij}^{(t)} \quad (12)$$

等式(12)实际上是个最短路径问题, 可通过最短路径算法来解决, 如 Dijkstra 算法、Bellman-Ford 算法等。Dijkstra 算法是静态的集中式算法, 需已知网络的全局信息, 不适用于大型动态网络, 而 Bellman-Ford 为分布式的算法, 每个节点仅需要其邻居节点的局部信息即可做出判断。优化算法为分布式的, 因而采用分布式的 Bellman-Ford 算法。对偶问题可以通过次梯度方法解决。

2.3 次梯度优化算法

针对前文所提出的优化算法, 次梯度优化算法的步骤如下:

(1) 每个节点 i 计算出 E_{ij} 并初始化 $p_{ij}^{(t)}[0] = E_{ij}/|T|$, 然后在输出超弧 (i, J) 上发送 E_{ij} 和 $p_{ij}^{(t)}[0]$ 。

(2) 在第 n 次迭代中, 将 $\{p_{ij}^{(t)}[n]\}$ 作为信道成本集合点使用最短路径算法解决等式(12), 获得相应的 $\{\tilde{x}_{ij}^{(t)}[n]\}$ 。对于每个 $t \in T$, 使用分布式 Bellman-Ford 算法。

(3) 每个节点使用文献[10]中的 Proposition 3.3 计算出 $p_{ij}^{(t)}[n+1]$ 并在输出超弧 (i, J) 上发送 $p_{ij}^{(t)}[n+1]$ 。

(4) 每个节点通过式(3)计算出原始 $\{x_{ij}[n]\}$ 。

$$x_{ij}[n] := \sum_{l=1}^n \tilde{x}_{ij}^{(t)}[l]/n \quad (13)$$

(5) 重复步骤(2)~(4)直至 $\{x_{ij}[n]\}$ 收敛, 假定最大的迭代次数为 M 。

(6)通过式(4)计算出最优编码子图 $\{z_{ij}[M]\}$ 。

$$z_{ij}[M] = \max_{i \in T} \left\{ \sum_{k \in J} x_{ik}^{(i)}[M] \right\} \tag{14}$$

3 仿真与分析

在本部分中,分别在无线网络和无线随机网络中对算法使用 Matlab 软件进行了仿真。

3.1 无线网络网络

考虑在无线网络网络中的仿真。在无线网络网络中,每个节点到其各邻居节点的距离是相等的,且只有其邻居节点可以获得该节点所发送的信息。为了便于仿真,固定地选取位于网格网络左上角的节点作为信源节点,信宿节点则是在其他网络节点中随机选取。

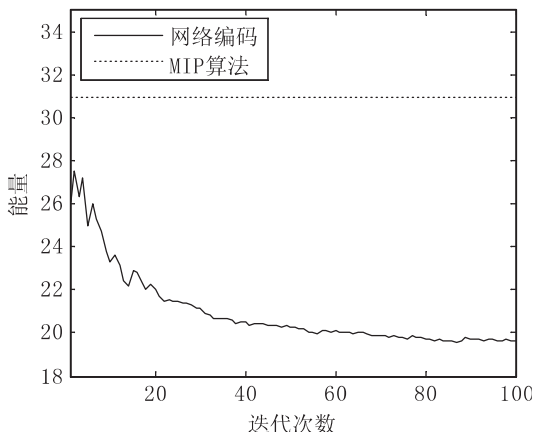


图 2 在 11×11 无线网络网络有 3 个信宿节点的多播中,两种算法性能比较

为了比较结合网络编码的分布式算法的性能和无线网络编码的集中式策略的性能,使用文献[11]中提出的启发式的 MIP 算法,该算法一般用于无线网络中的最小能量多播。考虑单位速率的多播。图 2 给出了在一个 11×11 无线网络网络中的单信源,3 个信宿节点的多播中应用提出的算法的收敛性能,同时 MIP 算法的性能也在图中给出。由图 2 中仿真结果可知,分布式的结合网络编码的算法比 MIP 算法得到的能量要

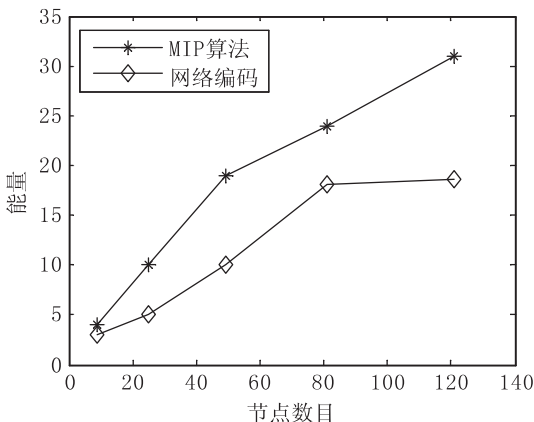


图 3 无线网络网络中不同节点个数的 3 个信宿节点的多播,两种性能比较

小。即使是在最初迭代时,分布式的算法得到的最小能量也比集中式算法低。这是由于网络编码可以发现具有更多编码机会的路径并在一次传输中发送更多的信息至其邻居节点。

在图 3 中,给出了两种算法分别在 3×3,5×5,7×7,9×9 和 11×11 无线网络网络中应用得到的能量。如图 3 所示,与 MIP 算法相比较,网络编码可以明显的降低能量消耗,不同规模的网络性能的提升有所差距,降低的程度约为 23% ~ 50%。而且随着节点个数的增加,网络编码算法相对于 MIP 算法的性能的提升越明显。

3.2 随机无线网络

N 个节点随机分布在边长为 L 的正方区域内。每个节点 i 的有相同的发射覆盖范围 R ,与节点 i 的距离小于 R 的节点有一条从 i 到该节点的有向链。在随机网络中,信源和信宿节点都是随机选取的。

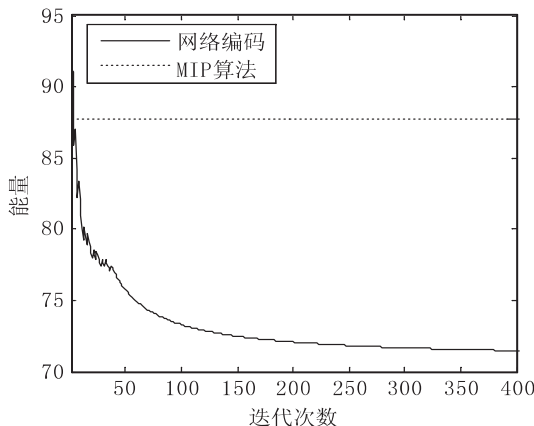


图 4 20 个节点的随机网络中,两种算法性能比较

图 4 显示了在 $N = 20, L = 10, R = 5, |T| = 3$ 的随机无线网络中应用的算法和 MIP 算法得到的最小能量值。与图 2 中的结果类似,除最初的迭代时外,由分布式的结合网络编码算法得到的能量要小于 MIP 算法得到的能量。

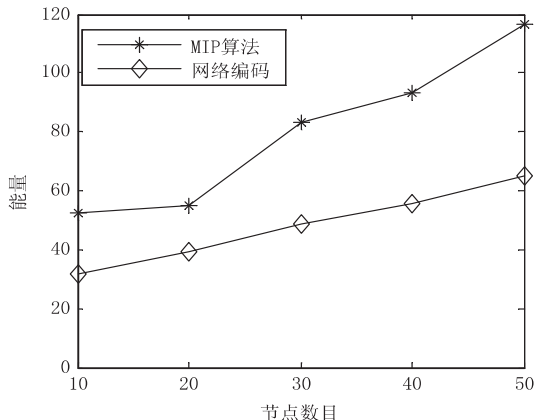


图 5 不同节点个数随机无线网络中的算法比较

在图 5 中,给出了在 $L = 10, R = 5, |T| = 3$ 的随机网络中两种算法的性能比较。在这种情况下,考虑节点个数对最小能量多播算法的影。很明显,本算法得

到的能量值远远小于 MIP 算法。根据不同的节点个数,其性能的提升程度为 28% ~ 44%。

随着网络中节点个数的增加,和 MIP 算法相比,本算法可以降低更多的能量。因为随着节点个数的增加,在信源和信宿之间的可行路径的数量也会增加,而本算法会选择能量消耗较少的最优路径。可以总结,此算法对信息流和网络拓扑的动态变化具有鲁棒性。

4 结束语

文中研究了在无线网络中结合网络编码选取最优子图的问题,给出了在无线网格网络和随机无线网络中的仿真结果。该算法同样适用于任意无线的静态或动态网络中,且为分布式的,与集中式的算法比较,在应用到大型无线网络中时,可以消耗较少的能量。

参考文献:

[1] Zosin L, Khuller S. On directed Steiner trees[C]//Proceedings of 13th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2002). San Francisco: [s. n.], 2002: 59-63.

[2] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R. et al. Network information flow [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.

[3] Lun D S, Medard M, Ho T, et al. Network coding with a cost criterion[C]//Proceedings of 2004 International Symposium on Information Theory and Its Applications(ISITA 2004). Parma: [s. n.], 2004.

(上接第 149 页)

3 结束语

Extjs + Spring MVC 搭建 Web 系统的开发框架,是当今基于 Java 的开发框架中流行的模式,作者结合自身的开发经验,提出了一种简洁高效的整合二者的方法,并在开发过程中得到验证,让本来相对繁琐的开发模式得以简化,提高了代码的复用率,并且可以避免过多分层引起的繁琐修改问题,具有较高的实用性。

参考文献:

[1] 张鹏伟,陈景霞,张文平,等. 基于 ExtJS 和 SSH 的 Web 应用架构的研究与实现[J]. 陕西科技大学学报, 2010, 12(6): 65-67.

[2] 史学梅. Ajax 技术在 EXT 框架与 MVC 模式下整合中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2010(24): 105-107.

[3] 卫 军,夏慧军,孟腊春. ExtJS Web 应用程序开发指南[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社, 2011.

[4] Wu Yunnan, Li Baochun. Network coding[J]. Proceedings of IEEE, 2010, 98(5): 1-2.

[5] Li S Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381.

[6] Ho T, Koetter R, Medard M, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006, 52(10): 4413-4430.

[7] Lun D S, Ratnakar N, Koetter R, et al. Achieving minimum-cost multicast: a decentralized approach based on network coding[C]//Proceedings of INFOCOM 2005. Miami: [s. n.], 2005: 1607-1617.

[8] Ho T, Viswanathan H. Dynamic algorithms for multicast with intra-session network coding[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2009, 55(2): 797-815.

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

[10] Lun D S. Efficient operation of coded packet networks[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.

[11] 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.

[12] Cartigny J, Simplot D, Stojmenovic I. Localized minimum-energy broadcasting in ad-hoc networks[C]//Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. San Francisco: [s. n.], 2003: 2210-2217.

[4] 鞠凤娟,吴志峰. Ext 技术在 Web 界面设计与实现中的应用研究[J]. 计算机与现代化, 2008(11): 60-62.

[5] 符培炯,杜忠军. Spring 在实现 MVC 构架中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(6): 236-238.

[6] 林信良. Spring 技术手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.

[7] 郭 峰. Spring 从入门到精通[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.

[8] 黄灯桥,徐会生. ExtJS 高级程序设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.

[9] 张 鑫,黄灯桥,杨彦强. Javascript 凌厉开发-ext 详解与实践[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

[10] Johnson R. J2EE Development without EJB[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.

[11] Vinoski S. Java Business Integration[M]. [s. l.]; IEEE Internet Computing, 2005.

[12] Geary D, Horstmann C. Core JavaServer Faces[M]. [s. l.]; Addison Wesley, 2004.

无线网络中基于网络编码的最小能量多播

作者: [王庆斌, 梅中辉](#)
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): 2013(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201301039.aspx