第 25 卷　第 4 期
2015 年 4 月

计 算 机 技 术 与 发 展
COMPUTER TECHNOLOGY AND DEVELOPMENT

Vol. 25　No. 4
Apr.　2015

基于多组播无线网络编码子图优化问题的研究

宣礼梅,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耗损的无线多组播网络模型,考虑存在链路时延且中间节点缓存受限情况下的基于网络编码技术的最小费用优化问题。为解决该优化问题,首先构造它的连续时间模型,然后进一步得到它的离散时间模型,为了方便问题解决,引入时间扩展网络模型将问题转化为无时延问题,最后提出该优化问题的分布式求解算法,并通过仿真研究了节点缓存大小分配,以及链路耗损情况对系统总费用的影响。仿真结果显示,链路耗损会大大增加系统的总能耗,同时缓存器的大小也直接影响系统的能耗,可通过增大缓冲器的大小来减少系统能耗。

关键词:网络编码;无线网络;多组播;优化

中图分类号:TP31　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1673-629X(2015)04-0075-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.04.018

Research on Subgraph Optimization Based on Multiple Multicast with Network Coding in Wireless Network

XUAN Li-mei, MEI Zhong-hui

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

Abstract: In this paper, in view of the wireless multiple multicast model with link lossy, the minimum cost optiminization problem is considered based on network coding under the condition of being link delay and limited buffer-size of intermediate nodes. To solve the problem, introduce the time-expanded network model to turn the problem into the continuous-time problem. Finally, a distributed solving algorithm for this optimization is proposed, and study the node memory by simulation and the influence of link lossy on total cost of system. Simulation results show that the lossy can increase the overall energy consumption of the system, and the size of cache also directly influences the system energy consumption which can be reduced by adding the cache size.

Key words: network coding; wireless network; multiple multicast; optimization

0　引　言

相对于传统的直接存储转发的路由方法,网络编码允许网络的中间节点参与编码,从而极大地提高了网络的吞吐量[1-2]。网络编码可以提高网络的吞吐量、鲁棒性、安全性等[3-4],因而近年来受到了国内外研究学者的广泛关注。

在无线网络中,无线链路的广播特性为网络编码的应用创造了条件[5],能够在同一时间将编码信息发送到多个相邻节点,然而无线网络具有连路不可靠性,网络频谱资源有限,及节点功率受限等缺点,因此,基于网络编码技术,如何合理地优化无线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:

(1)确定网络编码的最优子图问题;

(2)基于网络编码子图确定具体网络编码方法问题。

由于第二个问题可以利用相对成熟的随机网络编码技术[6-11]等来解决,因此文中主要研究第一个问题。文献[12]中,Lun 在网络编码的框架下考虑了固定组播速率情况下的最小花费组播。文献[13-15]详细讨论了目标函数在各种不同形式下问题的求解,提出了最小花费子图的线性优化和凸优化模型,并给出了其分布式的求解算法。文献[16]考虑节点缓存受

收稿日期:2014-06-12　　**修回日期**:2014-09-18　　**网络出版时间**:2015-02-23

基金项目:国家科技重大专项(2010zx03003-003)

作者简介:宣礼梅(1987-),女,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、协助通信技术等。

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150223.1241.045.html

限情况下的实用网络编码问题。文献[17-18]针对存在链路时延、中间节点缓存受限的有线组播网络,提出了最小花费子图的优化模型及其分布式求解算法。文献[19]考虑存在链路时延、中间节点缓存受限的无线单组播网络,提出了其优化模型和分布式求解算法。

文中在文献[19]的基础上进一步针对有损无线多组播网络,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。

1 存在链路时延且缓存受限情况下的无线多组播网络模型

1.1 连续时间模型

用有向超图 $H=(N,A,D)$ 来表示无线网络,N 表示无线网络中所有节点集合,A 表示所有超弧的集合,超弧 $(i,J)\in A$ 表示存在链路耗损的无线广播信道,$i\in N$ 表示超弧的开始节点,$J\subset N$ 表示超弧的终点集合,D 表示对于整个网络的观察时间段,一般选择为从信源节点发出的信息传输到信宿节点端所需的整数时间长度。考虑无线网络中存在多个组播会话,用 $(s,T,\{R_t\}_{t\in T})$ 表示一个组播连接,$s\in N$ 表示该组播的信源节点,$T\subset N$ 表示该组播的信宿节点集合,$\{R_t\}_{t\in T}$ 表示信源到各信宿的信息速率。假设无线网络中有 $|M|$ 个组播,M 表示多个组播的集合,则这 $|M|$ 个组播会话可分别表示为 $(s^1,T^1,\{R_t^1\}),\cdots,(s^{|M|},T^{|M|},\{R_t^{|M|}\})$。

用 $z_{iJ}(p),p\in(0,D)$ 表示编码数据包在时间 p 时在超弧 (i,J) 上的发送速率,z 表示由 $z_{iJ}(p)$ 构成的矢量。由于无线广播链路 (i,J) 存在链路耗损,用 z_{iJK} 表示在超弧 (i,J) 上发送的数据包被相邻节点集合 $K\subset J$ 中的节点成功接收的信息速率。因此 $z_{iJ}=\sum_{K\subset J}z_{iK}$,故 $b_{iJK}=\frac{\sum_{\{L\subset J|L\cap K\neq\varnothing\}}z_{iJL}}{z_{iJ}}$,表示相邻接收节点集合 K 中至少一个节点成功接收的概率。当 $K\subset J$ 是任意非空集合且 $b_{iJK}=1$,则表示链路上无耗损。文中设 $\{b_{iJK}\}$ 为常量。对于各组播会话内部,用 $y_{iJ}^c(p),p\in(0,D)$ 表示 c 会话内的编码数据包在时间 p 时在超弧 (i,J) 上的发送速率,其中 c 会话内信宿节点为 t 且经过链路 (i,j),$j\in J$ 在时间 p 的信息流速率为 $x_{iJj}^{(t,c)}(p)$,取 d_{ij} 为每条 (i,j) 所需的传播整数时间时延,设节点 i 的缓存器大小为 b_i,用 b_i^c 表示 c 会话所占用的缓存器长度。h_{iJ} 表示在超弧 (i,J) 上传输单位速率编码数据包 $z_{iJ}(p)$ 所需要的费用。因此,在考虑时延和节点缓存受限的无线多组播网络中,基于会话内网络编码子图优化问题可表述为:

$$
\begin{aligned}
&\min f(z)=\sum_{(i,J)\in A}h_{iJ}\int_0^D z_{iJ}(\xi)\,\mathrm{d}\xi\\
&\text{s.t.}\quad z_{iJ}(p)=\sum_{c=1}^{M}y_{iJ}^c(p),\ \forall(i,J)\in A,\forall p\in[0,D]\\
&y_{iJ}^c(p)b_{iJK}\geqslant\sum_{j\in K}x_{iJj}^{(t,c)}(p),\ \forall(i,J)\in A,t\in T_c,K\subset J,c\in M,\forall p\in[0,D]\\
&\int_0^p\Big[\sum_{\{J|(i,J)\in A\}}\sum_{j\in J}x_{iJj}^{(t,c)}(\xi)-\sum_{\{j|(j,I)\in A,i\in I\}}x_{jIi}^{(t,c)}(\xi-d_{ij})\Big]\mathrm{d}\xi\leqslant\delta_i^{(t,c)},i\in V,t\in T_c,c\in M,\forall p\in[0,D]\\
&\int_0^D\Big[\sum_{\{J|(i,J)\in A\}}\sum_{j\in J}x_{iJj}^{(t,c)}(\xi)-\sum_{\{j|(j,I)\in A,i\in I\}}x_{jIi}^{(t,c)}(\xi-d_{ij})\Big]\mathrm{d}\xi=\delta_i^{(t,c)},i\in V,t\in T_c,c\in M\\
&x_{iJj}^{(t,c)}(p)\geqslant 0,\ \forall(i,J)\in A,t\in T_c,c\in M,\forall p\in[0,D]
\end{aligned}
\tag{1}
$$

其中,$\delta_i^{(t,c)}=\begin{cases}R^{(t,c)},i=s_c\\-R^{(t,c)},i=t_c\\b_i^c,\text{其他}\end{cases}$,且 $\sum_{c=1}^{M}b_i^c=b_i$。

1.2 离散时间模型

在连续时间模型中,p 可以取 $[0,D]$ 中的任意连续值。但是,在离散时间模型中,只观察网络在瞬时时间点 $p=0,1,\cdots,D$ 中的值。因此,和连续时间模型一样考虑相同的网络参数,同时为简化模型,取各条 $(i,j)\in A$ 所需的传播整数时间时延 d_{ij} 为常数 d,则离散时间模型可表示为:

$$
\begin{aligned}
&\min f(z)=\sum_{(i,J)\in A}h_{iJ}\sum_{p=0}^{D-1}z_{iJ}(p)\\
&\text{s.t.}\quad z_{iJ}(p)=\sum_{c=1}^{M}y_{iJ}^c(p),\ \forall(i,J)\in A,\forall p\in\{0,1,\cdots,D-1\}\\
&y_{iJ}^c(p)b_{iJK}\geqslant\sum_{j\in K}x_{iJj}^{(t,c)}(p),\ \forall(i,J)\in A,t\in T_c,K\subset J,c\in M,\forall p\in\{0,1,\cdots,D-1\}\\
&\sum_{\{J|(i,J)\in A\}}\sum_{j\in J}\sum_{p=0}^{v}x_{iJj}^{(t,c)}(p)-\sum_{\{j|(j,I)\in A,i\in I\}}\sum_{p=0}^{v}x_{jIi}^{(t,c)}(p-d)\leqslant\delta_i^{(t,c)},i\in V,t\in T_c,c\in M,\forall v\in\{0,1,\cdots,D-1\}\\
&\sum_{\{J|(i,J)\in A\}}\sum_{j\in J}\sum_{p=0}^{D-1}x_{iJj}^{(t,c)}(p)-\sum_{\{j|(j,I)\in A,i\in I\}}\sum_{p=0}^{D-1}x_{jIi}^{(t,c)}(\xi-d)=\delta_i^{(t,c)},i\in V,t\in T_c,c\in M\\
&x_{iJj}^{(t,c)}(p)\geqslant 0,\ \forall(i,J)\in A,t\in T_c,c\in M,\forall p\in\{0,1,\cdots,D-1\}
\end{aligned}
\tag{2}
$$

在离散时间模型中,用 $x_{iJj}^{(t,c)}(p)$ 表示在时间间隔 $[p,p+1]$,任一组播会话 c 且信宿节点为 t,经过节点

i 和节点 j 之间链路上的信息率,即:$x_{iJj}^{(t,c)}(p)=\int_{p}^{p+1}x_{iJj}^{(t,c)}(\xi)\mathrm{d}\xi,\forall p\in\{0,1,\cdots,D-1\}$,另外,各会话内的编码数据包信息速率可定义为 $y_{iJ}^{c}(p)=\int_{p}^{p+1}y_{iJ}^{c}(\xi)\mathrm{d}\xi$。

由文献[15]可知,任意一个连续时间问题,都可以转换成其相关的离散时间问题,并且二者是等价的。尽管离散时间模型可以简化问题的解决,但是它依然不是一个静态模型。因此还需要将问题进一步转化为静态的时间扩展模型,从而可以在多项式时间内解决。下面将进一步推出问题的时间扩展模型。

1.3　时间扩展网络

为了解决上面的问题,使用一种方法即时间扩展网络模型[16]将上述问题转换成无时延的静态模型。

将上文提出的无线链路有时延的网络模型 $H=(V,A,D)$ 进行时间拓展,得到时间扩展网络模型 $H^D=(V^D,A^D)$。H^D 是 H 的时间扩展版本,H 中的节点在时间域 $\{0,1,\cdots,D\}$ 上的每个时间点都有相应的复制点,即 $V^D=\{i_p\mid i\in V;p\in 0,1,\cdots,D\}$。定义如下:

$$A'=\{(i_p,J_{p+d})\mid(i,J)\in A,p=0,1,\cdots,D-d,i_p\in V^D,J_{p+d}\subset V^D\}$$

$$A''=\{i_pi_{p+1}\mid i_pi_{p+1}\in V^D,p=0,1,\cdots,D-1,i\in V\}$$

$$A^D=A'\cup A''$$

对于网络 H^D,$|V^D|=D|V|$ 且

$$|A^D|\sum_{(i,J)\in A}(D-d+1)+D|V|=(|V|+|A|)D+|A|-\sum_{(i,J)\in A}d$$

如下图所示,图 1 为一个具有两个信源和两个信宿的多组播网络,分别是信源 s_1,s_2 到信宿 t_1 和 t_2,图 2 为图 1 的时间扩展网络。

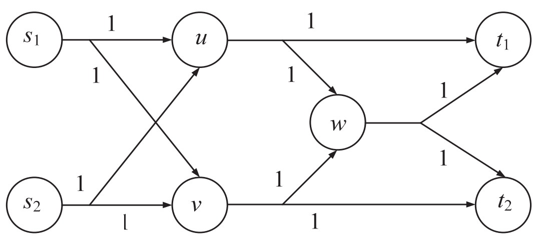

图 1　双组播网络(各个超弧上都标注其相应的整数时延)

从时间扩展图容易看出,网络 H 中从源节点 $s\in\{s_1,s_2\}$ 到信宿节点 $t\in\{t_1,t_2\}$ 通信与网络 H^D 中的源节点集 $S^D=\{s_{i_p}\mid i\in\{1,2\};p\in 0,1,\cdots,D\}$ 到信宿节点集 $T^D=\{t_{i_p}\mid i\in\{1,2\};p\in 0,1,\cdots,D\}$ 的通信等价。因此在具有时延的网络寻找最优子图的问题可以通过在无时延的时间扩展网络中寻找最有子图来解决。则问题(2)的时间扩展模型可以表示为:

$$\min f(z)=\sum_{(i_p,J_p)\in A^D}\sum_{p=0}^{D-d}h_{iJ}z_{i_pJ_p}\tag{3}$$

s. t.

$$z_{i_pJ_p}=\sum_{c=1}^{M}y_{i_pJ_{j_p}}^{c},\forall(i_p,J_p)\in A^D\tag{4}$$

$$y_{i_pJ_{j_p}}^{c}b_{iJK}\geq\sum_{j_p\in K_p}x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)},\forall(i_p,J_p)\in A^D,K_p\subset J_p,c\in M,t\in T_c\tag{5}$$

$$\sum_{\{J_p\mid(i_p,J_p)\in A^D\}}\sum_{j_p\in J_p}x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}-\sum_{\{j_p\mid(j_p,I_p)\in A^D,i_p\in I_p\}}x_{j_pI_pi_p}^{(t,c)}=\delta_i^{(t,c)},i_p\in V^D,c\in M,t\in T_c,\forall p\in\{0,1,\cdots,D-1\}\tag{6}$$

$$x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}\geq 0,\forall(i_p,J_p)\in A^D,c\in M,t\in T_c,\forall p\in\{0,1,\cdots,D-1\}\tag{7}$$

设 $z_{i_pJ_p}=z_{iJ}(p),y_{i_pJ_p}^{c}=y_{iJ}^{c}(p),x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}=x_{iJj}^{(t,c)}(p)$,容易验证(2)、(3)是等价的。对于问题(3)可以用原始对偶算法[11]来进行解决。

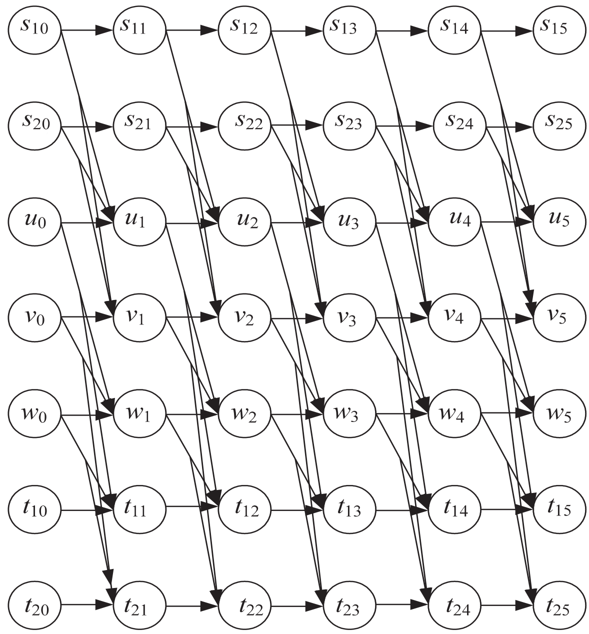

图 2　与图 1 相对应的时间扩展图

2　原始对偶算法

文中假设只存在会话内编码,各个会话之间不存在编码,各个组播之间的传播是相互独立的,故可分别对各个会话内部先求得各自最优解 $y_{i_pJ_p}^{c^*}$,再对各会话内的最优解进行叠加,求得整个网络的最优解 $z_{i_pJ_p}^{*}$,即:$z_{i_pJ_p}^{*}=\sum_{c=1}^{M}y_{i_pJ_p}^{c^*}$。对于 $\sum_{c=1}^{M}b_i^c=b_i$,文中设 $b_i^c=b_i/|M|$。

目标函数 $f(z)$ 是单调递增的线性函数,由约束(5)可以看出 $y_{i_pJ_p}^{c}=\max_{t\in T_c,K_p\subset J_p}\{\sum_{j_p\in K_p}x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}/b_{iJK}\}$,由于 max 函数不是一个处处可微的函数,不易于运算,因此在这里可以用

$$y_{i_pJ_p}^{c'} = \Big(\sum_{t\in T_c,K_p\subset J_p}\big(\sum_{j_p\in K_p} x_{i_pJ_pj_p}^{c}/b_{iJK}\big)^m\Big)^{1/m}$$

近似代替 $y_{i_pJ_p}^{c}$。对任意 $m>0$，$y_{i_pJ_p}^{c'} \geqslant y_{i_pJ_p}^{c}$ 并且当 $m\to\infty$，$y_{i_pJ_p}^{c'} \to y_{i_pJ_p}^{c}$。相应的 $z_{i_pJ_p}' = \sum_{c=1}^{M} y_{i_pJ_p}^{c'}$，则经过变换之后优化问题可以表示为：

$$\min f(z) = \sum_{c=1}^{M} \min f(y^{c'}) \quad c\in M \tag{8}$$

$$\min f(y^{c'}) = \sum_{(i_p,J_p)\in A^D}\sum_{p=0}^{D-d} h_{iJ} y_{i_pJ_p}^{c'} \tag{9}$$

s. t.

$$\sum_{\{J_p|(i_p,J_p)\in A^D\}}\sum_{j_p\in J_p} x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)} - \sum_{\{j_p|(j_p,I_p)\in A^D,i_p\in I_p\}} x_{j_pI_pi_p}^{(t,c)} = \delta_i^{(t,c)},$$

$$i_p\in V^D, t\in T_c, p\in 0,1,\cdots,D \tag{10}$$

$$x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)} \geqslant 0, \forall (i_p,J_p)\in A^D, t\in T_c, p\in 0,1,\cdots,D \tag{11}$$

下面对(9)用原始对偶方法进行求解，问题(9)作为原始问题，它是严格的凸函数，具有唯一极小值。通过引入拉格朗日乘子 p 和 λ，得到如下拉格朗日问题：

$$L(x^c,p^c,\lambda^c) = \sum_{(i_p,J_p)\in A^D}\sum_{p=0}^{D-d} h_{iJ} y_{i_pJ_p}^{c'} + \sum_{t\in T}\Big\{\sum_{i_p\in V^D} p_{i_p}^{(t,c)}\Big(\sum_{\{J_p|(i_p,J_p)\in A^D\}}\sum_{j_p\in J_p} x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)} - \sum_{\{j_p|(j_p,I_p)\in A^D,i_p\in I_p\}} x_{j_pI_pi_p}^{(t,c)} - \delta_i^{(t)}\Big) - \sum_{(i_p,J_p)\in A^D}\sum_{j_p\in J_p} \lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)} x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}\Big\} \tag{12}$$

定义关于 y 的函数 $(y)_x^+$ 为：

$$(y)_x^+ = \begin{cases} y, x>0 \\ \max(y,0), x\leqslant 0 \end{cases} \tag{13}$$

由 KKT 条件可以得到以下迭代公式：

$$x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n+1] = x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n] - \alpha_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]\Big(\frac{\partial f(y^{c'}[n])}{\partial x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]} + q_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n] - \lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]\Big) \tag{14}$$

$$p_{i_p}^{(t,c)}[n+1] = p_{i_p}^{(t,c)}[n] + \beta_{i_p}^{(t,c)}[n]\big(y_{i_p}^{(t,c)}[n] - \delta_i^{(t,c)}\big) \tag{15}$$

$$\lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n+1] = \lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n] + \gamma_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]\big(-x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]\big)^+_{\lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]} \tag{16}$$

其中，$q_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n] = p_{i_p}^{(t,c)}[n] - p_{j_p}^{(t,c)}[n]$，$y_{i_p}^{(t,c)}[n] = \sum_{\{J_p|(i_p,J_p)\in A^D\}}\sum_{j_p\in J_p} x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n] - \sum_{\{j_p|(j_p,I_p)\in A^D,i_p\in I_p\}} x_{j_pI_pi_p}^{(t,c)}[n]$，$\alpha_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]>0$，$\beta_{i_p}^{(t,c)}[n]>0$，$\gamma_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n]>0$ 为步长。由文献[5]可知式(14)～(16)是全局渐进收敛的。

由此通过对问题(9)的求解可分别得出网络中各个组播会话的最小费用函数的最优解 y^{c*}，$f(y^{c*})$，最后对所求结果进行叠加即对(8)进行求解：

$$z^* = \sum_{c=1}^{M} y^{c*}$$

$$\min f(z) = f(z^*) = \sum_{c=1}^{M} f(y^*)$$

得到整个网络的最优解。将问题(9)求解的原始对偶算法总结如下：

(1)每个节点 i_p 先初始化 $p_{i_p}^{(t,c)}[0]$，$x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[0]$，$\lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[0]$；

(2)在第 n 次迭代中，利用式(14)～(16)计算出 $p_{i_p}^{(t,c)}[n+1]$，$x_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n+1]$，$\lambda_{i_pJ_pj_p}^{(t,c)}[n+1]$；

(3)计算出 $y_{i_pJ_p}^{c'}[n] = \Big(\sum_{t\in T_c,K_p\subset J_p}\big(\sum_{j_p\in K_p} x_{i_pJ_pj_p}^{c}[n]/b_{iJK}\big)^m\Big)^{1/m}$

(4)重复(2)、(3)直至 $y_{i_pJ_p}^{c'}[n]$ 收敛。

3 仿真结果与性能分析

以图3的无线多播网络为例对上述算法进行仿真，分析节点缓存大小分配，以及链路耗损情况对子图总费用的影响。

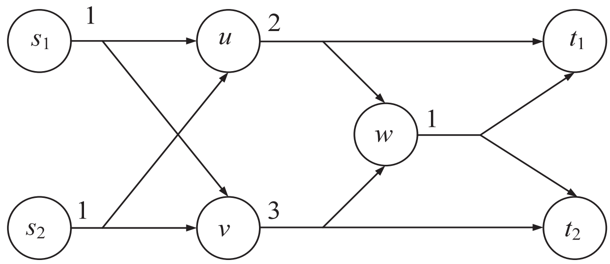

图3 双组播网络(每个超弧上标注了链路的花费)

(1)首先比较在无链路耗损情况和有链路耗损情况下的系统能耗：对无链路耗损的情况，$b_{iJK}=1, \forall K \subset J$ 且 $K\neq\varnothing$；$b_{iJK}=0, K=\varnothing$。对存在链路耗损的链路取 $\{b_{iJK}\}$ 为常量，$0<b_{iJK}<1, \forall K\subset J$ 且 $K\neq\varnothing$；$b_{iJK}=0, K=\varnothing$。假定在存在多个组播的无线网络中，节点上的缓存器容量平均分配给各个会话，即 $b_i^c = b_i/M$，在本例中 $b_i^c = b_i/2$。在缓存器长度给定的情况下，观察时间 $D=4$，$R_{c_1}=5$，$R_{c_2}=5$，对 $b_{iJK}=1$，$b_{iJK}=0.7$，$b_{iJK}=0.5$ 三种不同的情况进行系统能耗比较，仿真结果如图4所示。

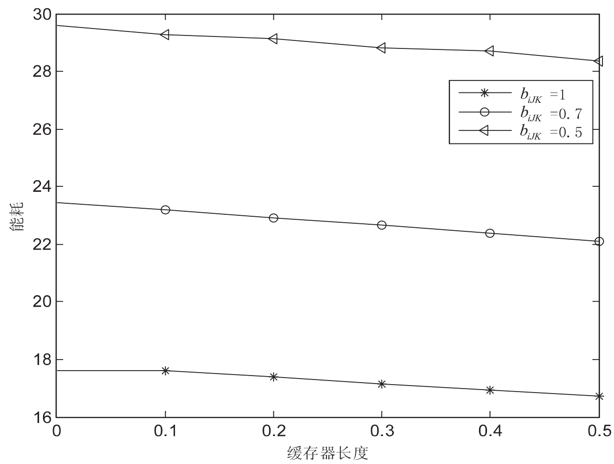

图4 无链路耗损情况和有链路耗损情况下的系统能耗比较

(2)比较在不同缓存器长度下对系统能耗的影响:在观察时间 $D=4$,$b_{iJK}=0.5$,两个组播信源速率分别取 $R_{c_1}=5$,$R_{c_2}=5$, $R_{c_1}=4$,$R_{c_2}=4$ 和 $R_{c_1}=4$,$R_{c_2}=5$ 时的能耗进行比较,仿真结果见图 5。

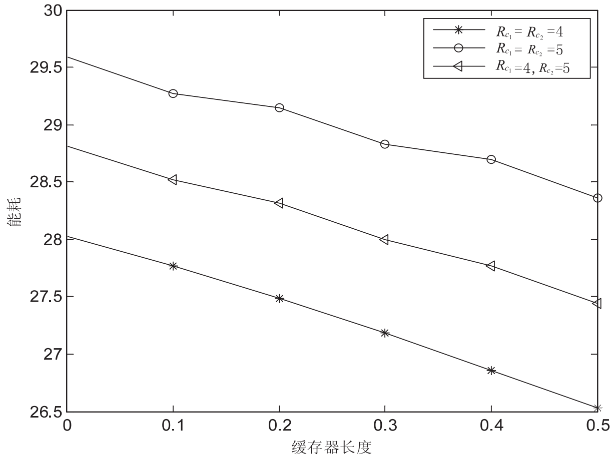

图 5 比较在不同缓存器长度下对系统能耗的影响

由图 4、图 5 的仿真结果可以看出:

(1)在系统无链路耗损的情况下即 $b_{iJK}=1$ 时,系统的能耗最小,且随着链路的耗损不断增加即 b_{iJK} 不断减小,系统的能耗不断增大。容易看出当链路出现耗损时,数据在链路中传送被成功接收的概率减小,一方面增加了丢包的可能性,从而导致需要重传数据,另一方面,数据包需要选择可靠性较高且费用也较高的链路来发送数据,这些都会使得整个系统的能耗增加。

(2)缓存器越大,传输的总能耗越小。缓存器越大时,各个组播在网络中被分配的缓存也越大,当节点的输出链路中的费用较低的链路被占用时,中间节点可以更灵活地将接收到的数据存储到缓存器中。当链路被释放时,再将数据传送出去。

4 结束语

文中主要针对无线多组播网络,考虑链路耗损且存在链路时延和缓存器受限的情况下的最小编码子图优化问题。首先建立该问题的连续时间系统优化模型,然后转化其等价的离散时间模型,再通过时间扩展网络方法将问题进一步转化为无时延的静态模型,最后利用原始对偶算法来对问题进行优化求解。仿真结果显示,链路耗损会大大增加系统的总能耗,同时缓存器的大小也直接影响系统的能耗,可通过增大缓冲器的大小来减少系统能耗。

参考文献:

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

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

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

[4] 康巧燕,孟相如,王建峰. 网络编码对组播通信的性能改善[J]. 计算机工程与应用,2007,43(3):150-152.

[5] 俞智敏,汪莉君,池凯凯. 无线网络编码技术的探讨[J]. 移动通信,2010,34(18):46-50.

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

[7] Koetter R,Médard M. An algebraic approach to network coding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2003,11(5):782-795.

[8] 王 静,刘景美,王新梅,等. 一种网络编码的多播路由算法[J]. 西安电子科技大学学报,2008,35(1):71-75.

[9] 陶少国,黄佳庆,杨宗凯,等. 一种改进的最小代价网络编码算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(5):1-4.

[10] 徐 奎,戴 彬,黄本雄,等. 无线网络编码的块时延控制[J]. 计算机工程与科学,2010,32(1):1-4.

[11] 杨 军,戴 彬,黄本雄,等. 基于网络编码的分层 P2P 网络的拓扑感知算法研究[J]. 计算机工程与科学,2011,33(2):1-6.

[12] Lun D S,Medard M,Ho T,et al. Network coding with a cost criterion[C]//Proceeding of the international symposium on information theory and its applications. Parma:[s. n.],2004:1232-1237.

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

[14] 黄 政,王 新. 网络编码中的优化问题的研究[J]. 软件学报,2009,20(5):1349-1361.

[15] 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.

[16] Chou P A,Wu Y,Jain K. Practical network coding[C]//Proc of Allerton conference on communication,control and computing. [s. l.]:[s. n.],2003:40-49.

[17] 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.

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

[19] 杨叶舒,梅中辉. 无线网络中网络编码子图优化问题的研究[J]. 计算机技术与发展,2014,24(3):86-89.

基于多组播无线网络编码子图优化问题的研究

作者： 宣礼梅， 梅中辉， XUAN Li-mei， 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ISTIC
英文刊名： Computer Technology and Development
年，卷(期)： 2015(4)