基于网络编码的分布式无线光网络在线优化

刘元君[1,2]
(1. 湖南商务职业技术学院 电子信息技术系, 长沙 410205; 2. 湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082)

摘　要: 最近,一种集成骨干光传输网络、无源光网络和无线接入网的混合宽带无线光网络被提出。这种网络具有大带宽、低费用和无处不在的信息接入等特点。考虑在这种网络中的基于网络编码的多播会话的设计问题,使得网络效用最大化,而布网的费用最小化。这个问题被转换为一个混合的整数非线性规划问题,精确求解极其困难。为了使得问题简化,采用了一种两步优化方法进行求解,交替地为多播会话选择光网络单元和网关。在每一次迭代过程中需要解决两个问题:光网络的网络编码设计问题和无线网络的用户和带宽分配问题。前者通过基于拉格朗日对偶分解的分布式方法实现;后者通过广义 Benders 分解实现。通过仿真验证了所采用的方法的有效性。

关键词: 广义 Benders 分解;拉格朗日对偶分解;网络编码;无线光网络
中图分类号: TP393　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1001-3695(2013)10-3075-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.10.048

Distributed wireless optical network online optimization based on network coding

LIU Yuan-jun[1,2]
(1. *Dept. of Information Technology*, *Hunan Vocational College of Commerce*, *Changsha* 410205, *China*; 2. *School of Computer & Communication*, *Hunan University*, *Changsha* 410082, *China*)

Abstract: Recently, the hybrid wireless-optical broadband network integrating optical backbone networks, passive optical networks, and wireless access networks have been proposed to provide the high-bandwidth, low-cost, and ubiquitous communication connections. This paper considered the design of network coding-based multicast applications in such networks with the objective of maximizing the total network utility and minimizing the deployment cost. The problem was formulated as a mixed integer nonlinear programming problem and the exact solution is prohibitively complex. In order to make the problem more tractable, it developed a two-step optimization procedure that iteratively selected the optical network unit and gateways for the multicast sessions. During each iteration, it solved two subproblems: a network coding design problem for the optical network and a user assignment and bandwidth allocation problem for the wireless network. The former was solved in a distributed way based on the Lagrangian-dual decomposition; the latter was solved based on the generalized bender decomposition. Simulation results illustrate the effectiveness of the proposed solutions.

Key words: generalized bender decomposition; Lagrangian-dual decomposition; network coding; wireless optical network

0　引言

无线网络和光网络最初被用在不同的通信模式中。使用光网络的目的在于大带宽长距离通信,而无线网络的目的在于局部范围的灵活通信。为了综合利用这两种网络的优点,在 IEEE802.11 标准下,人们提出了综合骨干光传输网络、无源光网络和无线接入网的混合宽带无线光网络[1~3]。这种网络能够在 IEEE802.16 标准下扩展为多跳无线网络[4]。

多点通信是一种群通信模式,能够将信息由一个源点传送到多个目的地。这种应用包括实时通信,如网络直播、P2P 网络等;以及交互式通信,如在线游戏、多媒体会议等。在商业网络中,网络节点扮演数据存储和传输的角色。一些节点不仅仅只转发接收到的数据,还会综合接收到的数据然后将其下发——这就是一种网络编码的范例[5]。在本文中,考虑基于网络编码的高效多点通信的无线光网络的设计问题。

图 1 所示为一种无线光网络结构,在底层包含一个无线网络,在顶层包含一个光网络结构。现在应用最广泛的光通信接入技术是 EPON。EPON 包含了中心光纤线路终端(OLT)和多个通过光纤连接在 OLN 上的光网络单元(ONU)。在文献[6]中,OLT 具有网络编码的功能,因此,在编码的意义上,OLT 和光网络核心节点没有多大区别。为了更清楚地描述系统,在这里略掉了 OLT。EPON ONU 和无线网络网关能够集成在一个设备(ONU-GW)中,如图 1 中具有无线通信功能的节点。ONU-GW 能够将无线网络与光网络连接在一起。由于 ONU-GW 具有所需带宽上的全部信息和分组调度 ONU 和网关的功能,是一个极其复杂的设备。因此,配置 ONU-GW 的成本是一个很重要的因素。通常在网络效用和总费用之间有一个折中。在本文中,为了设计能够用于多点通信的无线光网络,其目的在于尽量减少 ONU-GW 的数量使得费用降低,同时使得网络效用最大化,从而满足 QoS 的要求和网络接入能力。

现有文献只分别研究了光网络中基于网络编码的多点通信和在无线网络中网关配置问题。本文将基于网络编码的无线光网络多点通信问题转换为一个完全的数学规划问题。本文的主要创新点在于:考虑了一种将无线光纤接入网络和光通

收稿日期: 2013-01-26; **修回日期**: 2013-03-22
作者简介:刘元君(1978-),男,讲师,硕士,主要研究方向为网络安全和系统集成(yuanjunliu7802@163.com).

信网络结合在一起的网络模型,并且将基于网络编码的多点通信技术应用于其中,将其转换为一个非线性规划问题;采用一种分布式两步在线优化方法求解问题,从而使得问题的求解简单化;在问题的求解过程中引入了对偶分解的方法,从而能够动态地调整信息源的速率,防止阻塞。

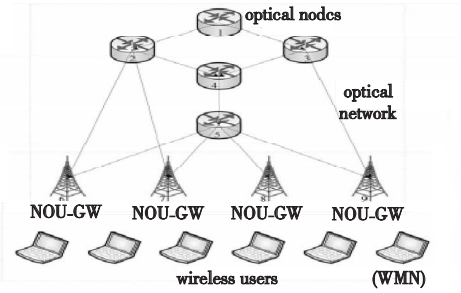

图1 具有4个ONU网关和6个用户的宽带无线光网络模型

1　系统描述和问题建模

1.1　系统描述

假设一个无线光网络由 $C=\{1,2,\cdots,N_C\}$ 个光纤核心节点、$O=\{1,2,\cdots,N_O\}$ 个 ONU-GW 和 $U=\{1,2,\cdots,N_U\}$ 个用户构成。在光网络中的集合可以表示为 $N=C\cup O$,相应的光网络可以表示为 $G=(N,L)$,其中 L 表示直接连接的节点。本文用 l 或者 (i,j) 来表示节点 i 到 j 的连接。连接 $l=(i,j)$ 包含了不同波长的信道 $(i,j)_w, w\in W_l=\{l,\cdots,k_l\}$,其中 k_l 表示连接 l 的波长数。

假设 M 表示多点会话,第 m 个会话的速率为 R_m。第 m 个会话具有一个源节点 $S_m\in C$ 和 $D_m\subseteq U$ 个目标点。一个 ONU-GW 将多个无线用户与光网络连接。在这里,假设每一个无线用户有多个可供选择的 ONU-GW,但是在同一时间只能选择其中的一个。第 m 个会话的可供选择的 ONU-GW 表示为 $T_m\subseteq O$。

1.2　基于编码的光网络多点通信

网络编码通过将同一个多播会话中不同目的地的数据流编码在一起能够使其共享一些同连接。通常,网络编码的设计包含两个解耦的子问题[7]:确定编码路径和确定路径的编码方法。其中第一个问题可以转换为一个线性规划问题。一旦编码路径确定以后,多播会话的网络编码的存在性就得到了保障[8],从而可以利用线性网络编码或者随机线性网络编码等方法进行编码[9,10],因此编码路径的选择具有主要作用。

假设 $f^m_{(i,j)}$ 为一个 0-1 指示变量,表明连接 (i,j) 中的波长 w 是否被用在会话 m 中的路径编码。在光网络中,一个波长通道的容量是恒定的。因此,如果波长通道 $(i,j)_w$ 被使用以后,信道中信息流的速率就与波长通道的容量一致。此外,还需要对目标 $t\in T_m$ 定义一个辅助指示变量 $g^{m,t}_{(i,j)}$,表示连接 (i,j) 中的波长 w 是否被用在从信息源 S_m 到目标 t 的通路上。对单一的速率为 R_m 的多播会话 m,到达目标的信息流的速率应该是 R_m。通过编码,每一个连接上的实际流量只需要与单独目标的最大流量一致。这个限制可以表示为

$$\sum_{i:(i,j)\in L} g^{m,t}_{(i,j)_w} - \sum_{i:(i,j)\in L} g^{m,t}_{(i,j)_w} = \begin{cases} R_m & i=S_m \\ -R_m & i\in T_m \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

$$g^{m,t}_{(i,j)_w} \leqslant f^m_{(i,j)_w}, \forall (i,j)_w\in L, w\in W \tag{2}$$

$$g^{m,t}_{(i,j)_w}\in(0,1), f^m_{(i,j)_w}\in(0,1), \forall (i,j)_w\in L, w\in W \tag{3}$$

式(1)限制了信息源和目标之间的速率平衡,使得信息源 S_m 的输出速率为 R_m,目标节点 $i\in T_m$ 的输入速率为 R_m,其他所有节点的输入速率和输出速率相同。如果只关注第 m 个会话,则可以省略掉下标。式(2)限制了实际流量 $g^{m,t}_{(i,j)}$ 不应该大于理论流量 $f(i,j)_w$。

考虑如下三种中间节点的数据流量的情况:

a)如果在节点 i 采用常规路径选择方法,则

$$\sum_{i:(i,j)\in L} f(i,j)_w = \sum_{i:(j,i)\in L} f(j,i)_w \tag{4}$$

b)如果节点 i 是普通多播节点,能够将同时相同的信息前向传播给多个输出节点,则

$$\sum_{i:(i,j)\in L} f(i,j)_w < \sum_{i:(j,i)\in L} f(j,i)_w \tag{5}$$

c)如果在节点 i 采用网络编码的方法,则

$$\sum_{i:(i,j)\in L} f(i,j)_w > \sum_{i:(j,i)\in L} f(j,i)_w \tag{6}$$

图 2 所示为一个具有一个信息源节点 s 和两个目标节点 d_n 和 d_2 的多点通信网络的示例。在图 2(a)中,每一个连接都由其连接的波长数量标注,每一个波长有三个连接,两个波长总共有六个连接。在一个波长的连接中,数据流变量可以表示为 $(f(i,j)_1:\ g^{d_1}_{(i,j)}, g^{d_2}_{(i,j)})$。对于多个不同波长的连接,其数据流变量可以表示为

$$\begin{cases} w=1, (f(i,j)_w:\ g^{d_1}_{(i,j)_w}, g^{d_2}_{(i,j)_w}) \\ \vdots \\ w=W, (f(i,j)_w:\ g^{d_1}_{(i,j)_w}, g^{d_2}_{(i,j)_w}) \end{cases} \tag{7}$$

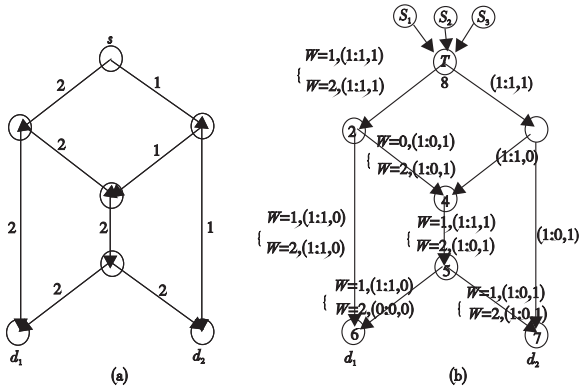

图2　网络编码中具有一个信息源和两个目标节点的子图示例

图 2 中波长的最大数目为 2。通过前面的标注知道,节点 2、3、5 为普通多播节点,节点 4 具有网络编码的功能。

对于具有多个多播会话的情况,不考虑交叉编码的问题,因为这是一个公开的复杂问题,但是考虑了重叠编码的问题。例如,实际流量变量 f 和理论流量变量 g 由式(1)(2)限制;除此之外,需要满足流量连接能力限制条件:

$$c_w \sum_m f^m_{(i,j)_w} \leqslant c(i,j), \forall (i,j)_w\in L, w\in W \tag{8}$$

其中:c_w 表示单个波长通道的带宽;$c(i,j)$ 表示连接 (i,j) 的信道容量。

1.3　网关选择和用户、带宽分配

考虑在一定 QoS 限制下,单跳无线网络的网关选择、用户和带宽分配问题。本文的目的是通过网络编码提供一个无线光网络的多点通信解决方案。QoS 的限制条件包括 ONU-GW 总速率的上限 R_m、分块大小的上限 M、每一个无线用户的最低速率 γ。

假设 y_i 表示 ONU-GW $i\in T_m$ 是否被使用。为了表示无线

用户的分配,本文采用另一个变量 $x_{i,j}$。$x_{i,j}$ 为 1 表示用户 $j\in D_m$ 被分配到 ONU-GW $i\in T_m$。m_{ii} 表示 ONU-GW$i\in T_m$ 分配给用户 $j\in D_m$ 的带宽。则有如下的限制条件:

$$\sum_{i\in D_m} m_{ij}\leqslant R_m,\ \forall i\in T_m \tag{9}$$

$$\sum_{i\in T_m} x_{ij}=1,\ \forall j\in D_m \tag{10}$$

$$x_{ij}\leqslant y_i,\ \forall i\in T_m, j\in D_m \tag{11}$$

$$\sum_{i\in D_m} x_{ij}\leqslant M,\ \forall i\in T_m \tag{12}$$

$$\sum_{\forall i\in T_m} m_{ij}\geqslant \gamma,\ \forall j\in D_m \tag{13}$$

$$(1-x_{ij})m_{ij}=0,\ \forall i\in T_m, j\in D_m \tag{14}$$

$$y_i\in\{0,1\}, x_{ij}\in\{0,1\},\ \forall i\in T_m, j\in D_m \tag{15}$$

前面所提到的两个问题都受到 ONU-GW 选择的限制。ONU-GW 选择的结果不仅影响到光网络中网络编码的目标集合,同时还影响到无线网络中用户和带宽的分配。一旦 ONU-GW 选择以后就成为网络编码流的一个目标节点;另一方面又成为了一个中间节点。因此式(1)所示的流量平衡条件可以表示为

$$\sum_{j:(i,j)\in L} g^t_{(i,j)_w}-\sum_{j:(j,i)\in L} g^t_{(j,i)_w}=\begin{cases} R_m & i=S_m\\ -y_iR_m & i\in T_m\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{16}$$

在光网络中,最大的多播速率必须是单波信道带宽的整数倍,因此计算最大速率等效为计算所有信道的占用率。对于一个特定的多播会话,假设信息源 S_m 具有 K 个输出波长信道,目标集为 T_m,速率为 R_m。本文引入 K 个虚拟信息源,K 个终点为 S_m 的虚拟连接,因此会话 m 能够被分解为 K 个子会话以满足整数倍速率的限制。假设与 T_m 的第 K 个子会话的速率为 $R^m_k\in[0,1]$,则会话的总速率为

$$R_m=\sum_k R^m_k\leqslant K \tag{17}$$

假设目标 $j\in D_m$ 的速率为 m_{ij} 的效用函数为 $U_{ij}(\cdot)$,$U_{ij}(\cdot)$ 是关于 m_{ij} 的单调非减、二次可微的凹函数。为了保持每个子会话的公平性,本文引入 $U_k(\cdot)$ 表示第 k 个子会话的效用函数。进一步假设 ONU-GW 的配置费用为 φ_i,则目标函数可以表示为

$$F=\sum_{i\in T_m}\sum_{i\in D_m} U_{ij}(m_{ij})+\sum_k U_k(R^m_k)-\sum_{i\in T_m}\varphi_i y_i \tag{18}$$

因此,基于网络编码的无线光网络多播会话的设计问题可以转换为整个网络效用的最大化,同时使配置费用最小化的问题。也就是:

$$\max_{f,g,y,x,m} F \qquad \text{s.t. 式(2)}\sim(16) \tag{19}$$

2　两步优化算法的设计

很明显,式(19)是一个混合整数非线性规划问题,其求解是一个 NP 问题,主要是由于整数限制。本章提出一种两步优化算法得到式(19)的近似解,其算法的基本思想如下:凭直觉选择具有较高系数的节点作为候选的目标节点能够得到较高的速率,从而提高网络效率。然而,ONU-GW 的费用也会影响到目标函数,因此引入效率因子 $p(i)=\mathrm{In}(i)/\phi_i$,$i\in T_m$,其中 $\mathrm{In}(i)$ 表示 ONU-GWi 的度。具有较高 $p(i)$ 的 ONU-GW 具有更高的被选做目标点的概率。具体地,本文首先根据无线网络用户的数量计算最小的 ONU-GW 使用数,$E=|D(M)|/M$;然后 ONU-GW 节点按照 $p(i)$ 的降序排列被考虑作为目标点。对具有相同 $p(i)$ 的 ONU-GW,则选做具有较高度的点。

为了求解式(19),本文交替地求解一个分布式拉格朗日对偶分解问题和一个小规模的混合整数优化问题。通过采用这种方法能够有效扼降低复杂度,从而应用于实际的网络中。

对一个特定的多播会话 m,第一个子问题可以表示为

$$\max_{f,g,R}\sum_k U_k(R^m_k) \tag{20}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j:(i,j)_w\in L} g^{k,d}_{(i,j)_w}-\sum_{j:(j,i)_w\in L} g^{k,d}_{(j,i)_w}=\begin{cases} R^k_m & i=s_m\\ -R^k_m & i\in T_m\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

$$g^{k,d}_{(i,j)}\leqslant f^k_{(i,j)_w},\ \forall (i,j)_w\in L, k\in K, d\in O$$

$$g^{k,d}_{(i,j)_w}, f^k_{(i,j)_w}\in\{0,1\},\ \forall (i,j)_w\in L, k\in K, d\in O, w\in W$$

在求解式(20)之后,可以得到每一个子会话的速率和 R_m。第二个子问题可以表示为

$$\max_{x,m}\sum_{i\in T_m}\sum_{j\in D_m} U_{ij}(m_{ij}),\quad \text{s.t. 式(4)}\sim(10) \tag{21}$$

在求解式(21)后可以得到用户和带宽分配。

2.1　基于拉格朗日对偶分解的光网络编码

假设 $p^{k,d}_i$ 为式(20)中与数据流平衡限制相关的拉格朗日系数,则式(20)可以表示为

$$L(R,p,g,f)=\sum_k U_k(R^m_k)-\sum_{i,k,d\in O} p^{k,d}_i\Big(h^k_i-\sum_{j:(i,j)_w\in L} g^{k,d}_{(i,j)_w}+\sum_{j:(j,i)\in L} g^{k,d}_{(j,i)_w}\Big) \tag{22}$$

其中:$p^{k,d}_i$ 可以理解为在节点 i 处子会话 k 和目标 d 的阻塞代价。通过将式(22)在 p 固定的时候求解关于 R、g、f 的最大值可以得到资源分配和阻塞控制的联合算法。

式(22)可以重新表示为

$$L(R,p,g,f)=\sum_k U_k(R^m_k)-\sum_{i,d} p^{k,d}_i h^k_i+\sum_{i,k,d} p^{k,d}_i\Big(\sum_{j:(i,j)_w\in L} g^{k,d}_{(j,i)_w}-\sum_{j:(j,i)\in L} g^{k,d}_{(j,i)_w}\Big) \tag{23}$$

式(23)中第一部分与速率 R 相关,第二部分与资源分配 g 相关。

阻塞控制:对于给定的代价 p,虚拟源节点根据每个虚拟节点处的局部阻塞情况调整数据传输速率。每个虚拟节点的阻塞情况可以表示为

$$R^m_k=U'^{-1}_k\Big(\sum_d p^k_s{}^d_m\Big) \tag{24}$$

将式(23)的第二部分最大化可以得到

$$\max_{g,f}\sum_{i,k,d} p^{k,d}_i\Big(\sum_{j:(i,j)_w\in L} g^{k,d}_{(i,j)_w}-\sum_{j:(j,i)_w\in L} g^{k,d}_{(j,i)_w}\Big)=\max_f\sum_{i,j,k,d} f^k_{(i,j)_k}[p^{k,d}_i-p^{k,d}_j]^+ \tag{25}$$

其中,$[x]^+=x, x\geqslant 0$;$[x]^+=0, x\leqslant 0$。

节点 i 从其邻近的节点 j 收集阻塞代价的信息,从而找到子会话 $k_{(i,j)_w}$:

$$k_{(i,j)_w}=\arg\max_k\sum_{d\in O}[p^{k,d}_i-p^{k,d}_j]^+ \tag{26}$$

资源分配:对于连接(i,j),如果子会话 $k_{(i,j)_w}$ 与目标 d 满足 $p^{k_{(i,j)w},d}_j-p^{k_{(i,j)w},d}_j>0$,则其传输速率为 $c_{(,j)_w}$,与单波长信道容量相同。即

$$g^{k,d}_{(i,j)_w}=\begin{cases} c_{(,j)_w} & k=k_{(i,j)_w}, p^{k,d}_i-p^{k,d}_j>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{27}$$

式(20)的对偶函数为

$$D(p)=\max_{R,g,f} L(R,p,g,f)\quad \text{s.t. } g^{k,d}_{(i,j)_w}\leqslant f^{k,d}_{(i,j)_w} \tag{28}$$

则式(20)的求解可以表示为

$$\min_p D(p) \tag{29}$$

式(29)的求解可以通过梯度下降法,并且可以用来更新

代价函数。

代价函数的更新：节点 i 根据下式更新子会话 k 和目标 d 的代价为

$$p_i^{k,d} \leftarrow p_i^{k,d}(t) + \alpha\left(h_i^k - \sum_{j:(i,j)_w \in L} g_{(i,j)_w}^{k,d} + \sum_{j:(j,i)_w \in L} g_{(j,i)_w}^{k,d} \right)^+ \quad (30)$$

其中：α 为一个正的步长参数。

2.2　基于 GBD 的用户和带宽分配

求解式(21)的难点在于限制条件中的乘积部分 $x_{ij}m_{ij}$。在这里通过线性化的方法使其简化。考虑二进制变量 x_{ij} 和非负实变量 m_{ij}，可以将式(14)重新表示为

$$m_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} = 0 \\ \in [0, R_m] & x_{ij} = 1 \end{cases} \quad (31)$$

式(31)可以进一步表示为

$$\begin{cases} m_{ij} \geqslant \sigma(1 - x_{ij}) \\ m_{ij} \leqslant (R_m - \sigma)x_{ij} + \sigma \end{cases} \quad (32)$$

GBD 算法的基本思想就是迭代求解一个扩展非线性规划问题(基本问题)和混合整数线性规划问题(主问题)。基本问题与最初的固定二进制变量问题对应；主问题通过采用拉格朗日乘子根据对偶理论得到。前者得到与限制条件相对应的下界和拉格朗日乘子；后者得到上界和二进制变量。

通过固定二进制变量 $x_{ij}^{(n)}$，可以得到式(21)的基本问题：

$$\max_x Z_{\text{primal}} \sum_{j \in D_m} \sum_{i \in O} U_{ij}(m_{ij}) \quad \text{s.t 式(4)(8)}$$
$$m_{ij}\sigma(1 - x_{ij}), \forall i \in O, j \in D_m$$
$$m_{ij} \leqslant (R_m - \sigma)x_{ij} + \sigma, \forall i \in O, j \in D_m \quad (33)$$

通过求解式(33)可以得到拉格朗日乘子 λ 和与最后两个限制条件相对应的参数 μ。本文将其解表示为 $m_{ij}^{(n)}$、$\lambda_{ij}^{(n)}$、$\mu_{ij}^{(n)}$。

采用式(33)所示基本问题的解可以得到主问题：

$$\max_x Z_{\text{master}} = \theta, \text{s.t.} \quad \text{式(5)(7)}$$
$$L(x_{ij}, m_{ij}^{(l)}, \lambda_{ij}^{(1)}, \mu_{ij}^{(l)}) \geqslant \theta, \forall l = 1, \cdots, n$$
$$x_{ij} \in [0, 1] \quad (34)$$

式(34)的解表示为 $x_{ij}^{(n+1)}$。

GBD 算法是一种迭代算法，其停止条件可以表示为 $UB^{(n)} - LB^{(n)} \leqslant \varepsilon$。$\varepsilon$ 为近似因子，ε 越小，迭代步数越多，近似效果越好。

3　仿真验证

考虑图 1 所示的无线光网络拓扑结构。假设光网络具有方向性，每一光纤信道具有一个波长，其容量为 1 Gbps。无线网络具有 4 个网关节点和 6 个无线用户，每一个网关节点能够覆盖所有用户。因此，4 个网关都可作为 ONU-GW。在这里考虑由 1 个信息源和 6 个用户组成的多播会话。分块大小的上限为 $M = 3$，每一个无线用户速率的下限为 0.2 Gbps。使用的 ONU-GW 的最小数量为 2，则 ONU-GW 的候选数量为 2，所提出的两步优化算法的外部迭代步数为 3。

首先采用图 1 所示的无线光网络拓扑结构来验证基于拉格朗日对偶分解的网络编码算法的性能。为了简化难度，假设每一个 ONU-GW 具有相同的价值。由于每一个子会话的最大会话速率与单波长信道容量相等，因此可以将效用函数 $U_k(R_k^m)$ 用对数函数 $\log(R_k^m)$ 代替。在第一次外部迭代中选择标号为 6 和 7 的 ONU-GW 作为多播会话的目标节点。信息源 S 具有两个输出波长信道，因此有两个虚拟信息源。

图 3 所示为信息源速率和两个子会话速率相对于迭代步数的演化过程。在第一次外部迭代中，步长参数 $\alpha = 0.02$。从图 3 中可以看出，两个子会话的速率在 30 次迭代以后仍然在其最佳值 1 Gbps 的 10% 以内。最大多播速率可以通过式(17)计算。从图 3 中可以看出，在 45 次迭代之后，仍然在其最佳值的 2% 以内。在第二次外部迭代中，采用标号为 6、7、9 的三个 ONU-GW 作为多播的目标点，步长参数 $\alpha = 0.06$。两个虚拟信息源在 $10i$ 迭代以后在其最佳值 1 Gbps 的 10% 以内。四个目标点的最大多播速率在 15 迭代以后在其最佳值 2 Gbps 的 2% 以内。

步长参数影响到了算法的收敛速度和收敛以后的性能。特别是，较小步长会使得收敛速度较慢，但是会使得收敛后的性能接近于最佳。在实际应用中，开始的时候采用加大步长，然后减小步长，从而在性能和速度之间折中。

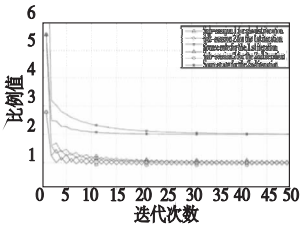

图3 不同ONU-GW 情况下信息源速度和子会话速度随迭代步数的变化

同样，采用图 1 所示的无线光网络拓扑结构来验证 GBD 算法的性能。将 $U_{ij}(m_j)$ 等价为 $j\log(m_{ij})$。在每一次外部迭代中，首先采用基于拉格朗日对偶分解的方法得到最大多播速率，然后采用所选择的 ONU-GW 执行 GBD 算法。两步优化算法具有三次外部迭代。图 4 所示为第二次外部中 GBD 算法的性能。图 4 所示为由 GBD 算法得到的上下界随迭代步数的变化情况。从图 4 中可以看出，随着迭代的进行，上下界的差距逐渐缩小，在第 330 次迭代时达到停止迭代的条件。最大的效用值为 92.358。将 GBD 算法所得到的结果与 YALMIP 算法[11]的结果相比较。从图中可以看出，在达到相同的效用时，YALMIP 算法的迭代步数为 590。因此基于 GBD 的方法效率更高。

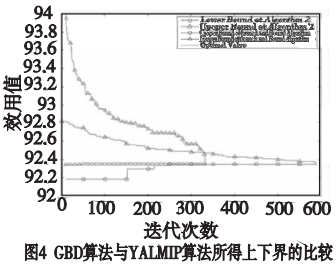

图4 GBD算法与YALMIP算法所得上下界的比较

下面评估一下整个算法的性能。系统包含了 4 个 ONU-GW 和 6 个无线用户。不同的无线用户和 ONU-GW 具有不同的优先级。图 5 上半部分所示为光网络编码的数据流变化；下半部分所示为无线网络中的 ONU-GW 选择、用户和带宽分配。仅仅采用了标号为 6、7、9 的 ONU-GW。虚线所示为用户分配情况，带宽的分配情况标注在相应的连接上。从图 5 中可以看出，每一个 ONU-GW 为两个用户服务，每个用户在同一时刻只使用一个 ONU-GW，每个用户的速率都满足最低速率的要求。除此之外，具有较高权重的用户分配了更宽的带宽。

(下转第 3083 页)

算法,检验其端到端路径识别准确率、信息流开始时间识别误差和信息流持续时长识别误差等,算法在各实验场景下均能保证较高的识别准确率。

参考文献:

[1] CHEN Juan,ZHANG Hong-li,FANG Bin-xing,*et al*. Towards efficient anonymous communications in sensor networks[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2011:1-5.

[2] WANG Jin, WANG Jian-ping,WU Chuan,*et al*. Anonymous Communication with network coding against traffic analysis attack[C]//Proc of INFOCOM. 2011:1008-1016.

[3] DOUGLAS K,RICARD R,RUSTY B,*et al*. Exploring extant and emerging Issues in anonymous networks: a taxonomy and survey of protocols and metrics[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2):579-606.

[4] HE Ting, WONG Ho-yin, LEE Kang-won. Traffic analysis in anonymous MANETs[C]//Proc of IEEE Military Communications Conference(MILCOM). 2008:1-7.

[5] QIN Yang, HUANG Di-jiang. A statistical traffic pattern discovery system for MANETs[C]//Proc of IEEE Military Communications Conference(MILCOM). 2009:1-7.

[6] HUANG Di-jiang. Unlinkbility measure for IEEE 802. 11 based MANETs[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(3):1025-1034.

[7] KIM J,TONG Lang. Detection of time-varying flows in wireless networks[C]//Proc of IEEE Military Communications Conference. 2010:2199-2204.

[8] KIM J,TONG Lang. Timing-based detection of packet forwarding in MANETs[C]//Proc of IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications . 2010:1-5.

[9] KIM J,TONG Lang. Detection of time-varying directional flows in wireless networks[C]//Proc of the 48th Annual Allerton Conference on Digital Object Identifier. 2010:1397-1404.

[10] LIU Yun-zhong,ZHANG Yan-chao,SHI Jing,*et al*. Traffic inference in anonymous MANETs[C]//Proc of the 7th Annud IEEESensor Mesh and Ad hoc Communications and Networks. 2010:1-9.

[11] JIANG Jin-fang,HAN Guang-jie,XU Hui-hui,*et al*. A Two-hop localization scheme with radio Irregularity model in wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2012 :1704-1709.

[12] ZHU Wei-ping, CAO Jian-nong, XU Yi, *et al*. Fault-tolerant RFID reader localization based on passive RFID tags[C]//Proc of INFOCOM. 2012:2183-2191.

[13] SHI Yan,JENSEN M A. Improved radiometric Identification of wireless devices using MIMO transmission[J]. IEEE Trans on Information Forension and Security, 2011,6(4):1346-1354.

[14] SHARMA S,HUSSAIN A,SARAN H. Experience with heterogenous clock-skew based device fingerprinting[C]//Proc of Workshop on Learning From Authoritative Security Experiment Results New York: ACM Press,2012: 9-18.

[15] DAVID F,ROBERT P,ROGER P. Statistics[M]. [S. l.]:Worton & Company Incorporated,1998.

[16] 柯志亨,陈瑞馨,邓德隽,等. 计算机网络实验使用 QualNet 模拟工具实作[M]. 2nd ed. 台北:鼎茂图书贸易有限公司,2008.

(上接第 3078 页)

4　结束语

本文考虑了在综合集成网络中的基于网络编码的多播会话的设计问题,使得网络效用最大化,而布网的费用最小化。这个问题被转换为一个混合的整数非线性规划问题,精确求解极其困难。为了使得问题简化,本文采用了一种两步优化方法进行求解:交替地为多点会话选择光网络单元和网关。在每一次迭代过程中需要解决两个问题:光网络的网络编码设计问题和无线网络的用户和带宽分配问题。前者通过基于拉格朗日对偶分解的分布式方法实现;后者通过广义 Benders 分解实现。仿真表明了本文所采用的方法的有效性。

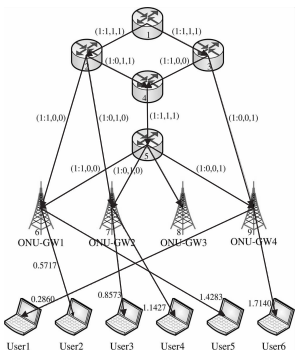

图5 整个算法的性能评估结果

参考文献:

[1] SARKAR S,YEN H H,DIXIT S,*et al*. Hybrid wireless optical broadband access network (WOBAN): network plan-ning and setup[J]. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 2008,26(6): 12-21.

[2] FILIPPINI I, CESANA M. Topology optimization for hybrid optical wireless access networks[J]. Ad hoc Networks, 2010,8(6):614-625.

[3] LI Kai, WANG Xiao-dong. Cross-layer design of wireless mesh networks with network coding[J]. IEEE Trans on Mobile Compututing 2008,7(11):1363-1373.

[4] YU Yang,MURPHY S,MURPHY L. Planning base station and relay station locations in IEEE 802. 16j multi-hop relay networks[C]//Proc of IEEE Consumer Communications Networking Conference. 2008: 922-926.

[5] XIAO Ming,AULIN T. Energy-efficient network coding for the noisy channel network[C]//Proc of IEEE International Symposium on Information Theory. 2006:778-782.

[6] MILLER K,BIERMANN T,WOESNER H,*et al*. Network coding in passive optical networks[C]//Proc of IEEE International Symposium Netwoek Coding. 2010:1-6.

[7] LUN D S,MEDARD M,HO T,*et al*. Network coding with a cost criterion[C]//Proc of International Symposium Infornation Theory Applications. 2004:1232-1237.

[8] LUN D S,RATNAKAR N,MEDARD M,*et al*. Minimum-cost multicast over coded packet networks[J]. IEEE Trans on Inference Theory,2006, 52(6):2608-2623.

[9] LI S Y R,YEUNG R W,CAI N. Linear network coding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003,49(2):371-381.

[10] HO T,MEDARD M,KOETTER R,*et al*. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Trans on Information Theory,2004,52(10):4413-4430.

[11] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]//Proc of IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design. 2004:284-289.