

光纤-无线接入网络中的下行数据分配算法

李 燕¹,代仕芳¹,常相茂²

(1. 南京财经大学 信息工程学院,南京 210046; 2. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院,南京 210002)

摘 要: 光纤-无线接入网络通过光网络单元将无线子网和光纤子网融为一体,是目前广泛部署的一种接入设施。在接入网络运行期间,如何节约其能量消耗进而降低维护成本成为研究热点。为此,针对光纤-无线接入网络中下行数据流的传输,研究能量有效的下行数据分配问题,在保证数据传输质量的前提下使用最少数目的光网络单元承载下行数据流以节约能耗。在证明该问题复杂性的基础上,提出一种基于线性规划松弛的启发式下行数据分配算法,并通过理论分析论证了该算法的性能下界。实验结果表明,该算法在传输性能和能耗节约方面均能获得较好的结果。

关键词: 光纤-无线接入网络;下行数据分配;光网络单元;无线终端;能量消耗;数据传输

中文引用格式:李 燕,代仕芳,常相茂. 光纤-无线接入网络中的下行数据分配算法[J]. 计算机工程,2016,42(8): 80-84.

英文引用格式:Li Yan, Dai Shifang, Chang Xiangmao. Downstream Data Distribution Algorithm in Fiber-Wireless Access Network[J]. Computer Engineering,2016,42(8):80-84.

Downstream Data Distribution Algorithm in Fiber-Wireless Access Network

LI Yan¹,DAI Shifang¹,CHANG Xiangmao²

(1. College of Information Engineering,Nanjing University of Finance and Economics,Nanjing 210046,China;

2. College of Computer Science and Technology,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210002,China)

[Abstract] Fiber-Wireless(FiWi) access network which integrates wireless subnetwork and fiber subnetwork via Optical Network Unit(ONU) is now widely deployed as an infrastructure to provide Internet access. During network operation, how to save energy and then reduce maintenance cost is becoming a hot research topic in FiWi. For the downstream data transmission over FiWi,this paper studies the problem of energy-efficient downstream data distribution,while assuring the quality of data transmission. It aims to support downstream transmission by using minimum number of ONUs for energy saving,proves the NP-hardness of the problem, and proposes a heuristic algorithm based on linear programming relaxation. The performance lower bound of the algorithm is evaluated by theoretical analysis. Simulation results demonstrate that this algorithm can achieve better transmission performance and higher energy efficiency.

[Key words] Fiber-Wireless (FiWi) access network; downstream data distribution; Optical Network Unit (ONU); wireless terminal;energy consumption;data transmission

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2016.08.015

1 概述

光纤-无线(Fiber-Wireless,FiWi)接入网络是目前广泛部署的一种接入设施^[1-2],它集合了光纤接入网络和无线接入网络的优点,能够以较低的铺设代价为用户提供稳定高速的数据传输服务。典型的光纤-无线接入网络体系结构一般包含一个无线 Mesh

网络作为前端^[3-4]和一个无源光网络作为后端^[5-6]。

光纤-无线接入网络中的下行数据传输指的是从光线路终端(Optical Line Terminal,OLT)向无线终端传输数据^[7]。通常,下行数据的传输分为2个阶段:首先光分裂器将从OLT发出的下行数据复制成多个拷贝广播至每一个光网络单元(Optical Network Unit,ONU),它同时集成了无线网关的功

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202350);中国博士后科学基金资助项目(2012M521080);江苏省教育厅自然科学基金资助项目(12KJB120003)。

作者简介:李 燕(1983-),女,讲师、博士,主研方向为光纤-无线接入网络、无源光网络;代仕芳,讲师、博士;常相茂,副教授、博士后。

收稿日期:2015-07-16 **修回日期:**2015-08-11 **E-mail:**yanli@njue.edu.cn

能^[8];然后再由 ONU 将数据传送至最终的目的无线终端。由于每个 ONU 都能接收到 OLT 广播的数据,因此如何选择合适的 ONU 实现最终的数据传输,也即如何进行下行数据的分配,成为一个重要的研究问题。

本文针对光纤-无线接入网络中下行数据流的分布情况,从能量消耗和传输性能的角度综合考虑,提出一种下行数据分配算法,在保证数据传输质量的前提下降低 ONU 的能量消耗。

2 相关工作

在光纤-无线接入网络中传输下行数据流时,通常是选用离该数据流目的无线终端最近的 ONU 进行数据转发,而其他 ONU 则直接将接收到的广播数据丢弃^[9]。考虑到无线子网的传输带宽远远小于光纤子网的传输带宽,这种将一个下行数据流分配至最近 ONU 上的方法可能会导致 ONU 上的数据拥塞,进而影响下行数据的传输性能。

为了避免 ONU 上的下行数据拥塞,文献[10]根据下行数据流目的无线终端所能连接到的 ONU 情况,将一个下行数据流按比例分配到多个 ONU 上,再由这多个 ONU 共同将下行数据传送至最终的目的无线终端。通过这种分流的方法,可以实现 ONU 负载平衡,降低拥塞。但是该方法在传输一个下行数据流时,使得与该数据流目的无线终端可达的所有 ONU 都参与了数据传输,没有考虑 ONU 的能量消耗,而能量有效性是目前光纤-无线接入网络中的一个关注热点^[11-12]。

基于能耗考虑的下行数据分配算法为每个 ONU 分别设置负载上限和下限,在下行数据分配时,总是将数据流分配至负载最大但未超过上限的 ONU 上,从而将负载量小于下限的光网络单元调节为睡眠状态,以达到降低能耗的目的^[12-13]。该方法虽然试图通过设置 ONU 负载上限来避免拥塞,但仍将数据流集中在一个 ONU 上的做法没有考虑 ONU 的负载平衡,进而可能影响下行数据的传输质量。而且,将负载量小于下限的 ONU 调节为睡眠状态所需要的负载重分配(也即将这些将要转入睡眠的 ONU 上的数据流重新分配至其他活动的 ONU)不可避免地会引入额外的计算代价。

3 问题建模

本文综合考虑传输性能和能量消耗,提出一种能量有效的下行数据分配算法。具体而言,给定下行数据流的分布,将每个数据流分配到至少 k ($k \geq 1$) 个 ONU 上,同时保证用最少数量的 ONU 支持这种分配以减少能量消耗。这里, k 值可以根据网络

的状态做及时调整(若网络中 ONU 上的排队延迟较大,可以提高 k 值增加分流,反之,可以降低 k 值以节约能量)。数据流在 k 个 ONU 上的具体分布依据每个 ONU 当前的流量承载情况而决定,本文对此不做具体研究。

3.1 网络模型

图 $G = (V, E)$ 表示光纤-无线接入网络的拓扑结构。 $V = V_w \cup V_o$ 和 $E = E_w \cup E_o$ 分别表示网络中节点的集合和边的集合,其中, V_w 是由无线路由节点和 n 个无线终端节点构成的无线节点集合; V_o 是由一个 OLT 和 m 个 ONU 构成的光节点集合; E_w 是 ONU 与无线节点之间以及无线节点自身之间的链接集合; E_o 是 OLT 和 ONU 之间的链接集合。

由于本文只关注下行数据的分配而不考虑具体的路由,因此基于图 G 中的无线子网链接状态,假定每个 ONU 到每个无线终端的路径可以通过 Dijkstra 算法计算获得。为了保证下行数据的传输延迟,设置一个门限值 δ , 只有当 ONU 与无线终端之间有路径且路径延迟小于等于 δ 时才认为这两者之间是可达的。

3.2 问题描述

设 $ONU = \{ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_m\}$ 和 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 分别表示 G 中 ONU 和无线终端的集合。 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_h\}$ 则表示 G 中下行数据流的集合,数据流 T_l ($1 \leq l \leq h$) 的目的无线终端为 $w_{d(l)}$, 这里 $1 \leq d(l) \leq n$ 。 a_{ij} ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$) 表示 ONU_i 和 w_j 是否可达,若 ONU_i 和 w_j 之间有路径且路径延迟小于等于 δ , 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。基于此,令 P_i 表示 ONU_i 所能到达的目的无线终端集合, Q_j 表示数据流 T_j 的目的无线终端,也即 $w_{d(j)}$ 所能到达的 ONU 集合。本文研究的下行数据分配问题即是将 T 中的每个数据流根据其目的无线终端分配到至少 k 个可达的 ONU 上以保证数据的传输质量,同时最小化支持这种分配的 ONU 总数以降低能耗。

在问题正式建模之前,先定义如下的变量:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果将 } T_j \text{ 分配至 } ONU_i \text{ 上} \\ 0 & \text{反之} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{如果 } ONU_i \text{ 被选中用于承载数据流} \\ 0 & \text{反之} \end{cases}$$

基于此,能量有效的下行数据分配问题可以用整数线性规划建模如下:

$$\min \sum_{i=1}^m y_i \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq k, \forall 1 \leq j \leq h \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \forall 1 \leq i \leq m, \forall 1 \leq j \leq h \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq a_{id(j)}, \forall 1 \leq i \leq m, \forall 1 \leq j \leq h \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall 1 \leq i \leq m, \forall 1 \leq j \leq h \quad (5)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \forall 1 \leq i \leq m \quad (6)$$

式(1)表明下行数据分配的目标是最小化所使用的 ONU 数目进而减少能量消耗;式(2)显示了每个数据流需要分配到至少 k 个 ONU 上;式(3)表明一个 ONU 被选中用于承载数据流仅当至少一个数据流被分配至其上;式(4)显示了一个数据流能被分配至某个 ONU 上仅当其目的无线终端与该 ONU 之间是可达的;式(5)和式(6)则表明上述规划是 0-1 整数线性规划。

4 能量有效的下行数据分配算法

本节首先对上述问题的复杂性进行论证,基于此提出具体的数据分配算法,最后对所设计算法的性能进行理论分析。

4.1 问题复杂性

定理 1 上述的下行数据分配问题即使在 $k=1$ 时也是 NP-hard 问题。

证明:通过将 $k=1$ 时的下行数据分配问题归约到一个经典的 NP-complete 问题——集合覆盖问题^[14]来证明此定理。

集合覆盖问题:给定集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_u\}$ 、有限集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_v\}$ (这里 $C_i \subseteq S$) 以及一个正整数 $t \leq |C|$, 集合覆盖问题即为是否可以找到 $C^* \subseteq C$, 使得 C^* 能够覆盖 S 中的所有元素且 $|C^*| \leq t$ 。

给定集合覆盖问题的一个实例,可以在多项式时间内构建一个下行数据分配问题($k=1$)的实例。具体而言,对于 S 中的每一个元素 s_i , 相应的定义 T 中的一个数据流 T_i 且其目的无线终端定义为 $w_{d(i)}$ 。假定网络中共有 v 个 ONU, 其中 ONU_i 对应于集合 C_i , 不失一般性, 令 $C_i = \{s_1, s_2, \dots, s_{|C_i|}\}$, 则 ONU_i 所能到达的目的无线终端集合为 $P_i = \{w_{d(1)}, w_{d(2)}, \dots, w_{d(|C_i|)}\}$ 。现在的下行数据分配问题是能否使用不超过 t 个 ONU 传输 T 中的下行数据流, 使得每个数据流能够成功到达各自的目的无线终端。

假定集合覆盖问题存在一个可行解, 即规模为 r ($r \leq t$) 的集合 C^* , C^* 可以覆盖 S 中的所有元素。不失一般性, 令 $C^* = \{C_1, C_2, \dots, C_r\}$, 则在构建的下行数据分配问题中, 可以使用 $ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_r$ 传输下行数据流, 这样, T 中的每个数据流 T_i 都能通过相应的 ONU 到达各自的目的无线终端 $w_{d(i)}$ 。反之, 如果对于下行数据分配问题存在一个可行解 $ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_r$, 即 $w_{d(i)} \in P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_r$ ($\forall 1 \leq j \leq u$), 那么对应的集合 $C^* = \{C_1, C_2, \dots, C_r\}$ 一定是集合覆盖问题的解。因此, $k=1$ 时的下行数据分配问题等价于集合覆盖问题, 定理

得证。

鉴于上述下行数据分配问题的 NP-hard 特性, 很难在多项式时间内找到问题的最优解。因此, 本文提出一种启发式算法用于解决该问题, 以获得问题的近优解。

4.2 启发式算法

本文提出一种基于线性规划松弛的启发式算法, 用以求解光纤-无线接入网络中能量有效的下行数据分配问题。

首先, 放松整数线性规划模型中的整数限制条件, 即用式(7)和式(8)分别代替式(5)和式(6):

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall 1 \leq i \leq m, \forall 1 \leq j \leq h \quad (7)$$

$$0 \leq y_i \leq 1, \forall 1 \leq i \leq m \quad (8)$$

基于条件放松, 对得到的线性规划进行求解, 而线性规划可以在多项式时间内得到最优解。定义通过线性规划得到的解为 x_{ij}^L, y_i^L , 这两者的值可能并不是整数。

启发式算法为求得下行数据分配问题的可行解, 定义为 x_{ij}^F 和 y_i^F , 对上述的线性规划结果进行如下操作: 对于任意一个数据流 T_j ($1 \leq j \leq h$), 从所有的 x_{ij}^L 中选取前 k 个最大值, 令相应的 $x_{ij}^F = 1$, 同时令其余的 $x_{ij}^F = 0$ 。对于 y_i^F ($1 \leq i \leq m$), 若有任一 $x_{ij}^F = 1$, 则令 $y_i^F = 1$, 否则令 $y_i^F = 0$ 。

经过上述操作, 每个下行数据流都被分配至 k 个 ONU 上, 且 x_{ij}^F 和 y_i^F 的取值或为 0 或为 1, 因此, x_{ij}^F 和 y_i^F 确为 3.2 节中所描述问题的可行解。

本文算法致力于利用最少数目的 ONU 将每个下行数据流分配至 k 个可达的 ONU 上, 而其他未承担负载的 ONU 则可以转入睡眠模式以节约能量。这样, 在保证了下行数据传输性能的同时也提高了能量有效性。

4.3 算法性能分析

本节对基于线性规划松弛的启发式算法进行性能分析。

引理 1 在启发式算法中, 对于任一下行数据流 T_j ($1 \leq j \leq h$), 如果 $x_{ij}^F = 1$, 则必有 $x_{ij}^L \geq \frac{1}{g}$, 其中, $g = \max_{1 \leq j \leq h} \{|Q_j| - k + 1\}$ 。

证明: 假定该引理不成立, 则至少有一 $x_{ij}^F = 1$, 对应的 $x_{ij}^L < \frac{1}{g}$ 。因为 $x_{ij}^F = 1$ 是从 x_{ij}^L 中选取前 k 个最大值而得到的, 所以最多只有 $k-1$ 个 x_{ij}^L 满足 $x_{ij}^L \geq \frac{1}{g}$, 相应的至少有 $|Q_j| - k + 1$ 个 x_{ij}^L 的值小于 $\frac{1}{g}$, 由此可

以得到:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m x_{ij}^L &= \sum_{ONU_i \in Q_j} x_{ij}^L < (k-1) + \frac{|Q_j| - k + 1}{g} \\ &= (k-1) + \frac{|Q_j| - k + 1}{\max_{1 \leq j \leq h} \{|Q_j| - k + 1\}} \\ &\leq k - 1 + 1 = k \end{aligned} \quad (9)$$

显然,式(9)的结论与式(2)的限制条件矛盾。因此,假设不成立,引理得证。

引理 2 在启发式算法中,对于任一 ONU_i ($1 \leq i \leq m$),如果 $y_i^F = 1$,则必有 $y_i^L \geq \frac{1}{g}$,其中, $g = \max_{1 \leq j \leq h} \{|Q_j| - k + 1\}$ 。

证明:根据启发式算法的描述,如果 $y_i^F = 1$,则必有 $x_{ij}^F = 1$ 。因此有:

$$y_i^L \geq x_{ij}^L \geq \frac{1}{g} \quad (10)$$

引理得证。

定理 2 基于线性规划松弛的启发式算法的近似比为 g ,也即基于该算法所计算出的用于承载下行数据流的 ONU 总数不超过整数线性规划最优解的 g 倍。

证明:定义下行数据分配问题的最优解为 x_{ij}^o 和 y_i^o 。对于 $y_i^F = 1$,有 $y_i^L \geq \frac{1}{g} = \frac{1}{g} y_i^F$;对于 $y_i^F = 0$,有 $y_i^L \geq 0 = \frac{1}{g} y_i^F$ 。所以总有 $y_i^F \leq g y_i^L$,因此有:

$$\sum_{i=1}^m y_i^F \leq \sum_{i=1}^m g y_i^L = g \sum_{i=1}^m y_i^L \leq g \sum_{i=1}^m y_i^o \quad (11)$$

定理得证。

5 仿真实验及分析

本节首先构建一个具有 32 个 ONU 和 200 个无线终端的光纤-无线接入网络作为整个实验环节的网络架构,然后通过各项实验对所提出的下行数据分配算法进行性能验证。

为显示本文下行数据分配算法(HB-DDD)的能量有效性,首先通过实验对 HB-DDD 算法、3.2 节中整数线性规划的最优解算法(OP-DDD)以及一种随机 k -ONU 分配算法,也即将每个下行数据流随机的分配至 k 个可到达其目的无线终端的 ONU 上(RS-DDD),从 ONU 能量消耗的角度进行比较。

在实验中,OP-DDD 和 HB-DDD 中的线性规划部分均是基于 LINGO4.0 平台求解的。依据文献[15],设定 ONU 处于激活状态和睡眠状态的能量消耗分别为 10 W 和 1 W,同时设定下行数据流的数目为 50 个且每个数据流具有不同的目的无线终端。

为简单起见,假定每个目的无线终端所能连接到的 ONU 数目是相等的。

图 1 显示了在固定每个目的无线终端均能到达 16 个 ONU 的前提下 k 值与 ONU 能量消耗之间的关系。从图中可以看出,随着 k 值的增大,ONU 能量消耗也随之增加,这一变化趋势是合理的,因为当每个下行数据流需要分配至更多的 ONU 上时,处于激活状态的 ONU 数目肯定会相应增加。同时图中也显示了本文提出的 HB-DDD 算法与 OP-DDD 算法非常接近且明显优于 RS-DDD 算法,RS-DDD 算法在 $k=6$ 时,ONU 能量消耗就已经达到最大值,因为该算法总是随机的将每个数据流分配至 k 个 ONU 上,而不考虑能量的节约。这说明了 HB-DDD 算法能有效降低能耗。

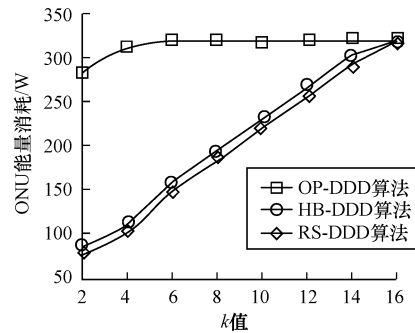


图 1 k 值与 ONU 能量消耗的关系

图 2 在设定 $k=8$ 的基础上显示了目的无线终端所能连接到的 ONU 数目与 ONU 能量消耗之间的关系。从图中可以看出,随着目的无线终端所能连接到的 ONU 数目的增加,OP-DDD 算法和 HB-DDD 算法所消耗的能量相应减少,这是因为每个 ONU 可以承载更多的下行数据流,而 RS-DDD 算法的能量消耗始终处于最大值,因为该算法没有节约能耗的意识。同时如图 1,图 2 也显示了 HB-DDD 算法与 OP-DDD 算法非常接近且明显优于 RS-DDD 算法。

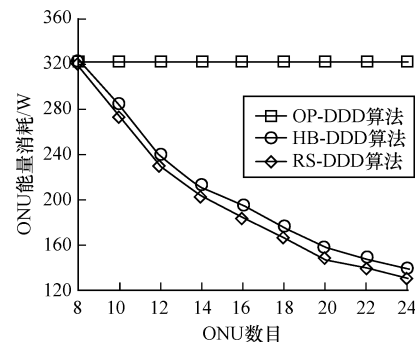


图 2 目的无线终端能连接到的 ONU 数目与 ONU 能量消耗的关系

上述实验结果显示了 HB-DDD 算法在能耗方面的有效性,而为了展示该算法同时保证了较高的

数据传输质量,下文将构建实验对 HB-DDD 算法和常见的最近 ONU 分配算法(CO-DDD)从数据包在 ONU 缓冲区中的平均排队延迟的角度进行比较。

实验设定每个 ONU 与所连接的无线路由器之间基于 802.11a 协议进行通信且传输速率设置为 10 Mb/s。简单起见,假定每个 ONU 的下行缓冲区初始时空,HB-DDD 算法将每个数据流均匀的分配至选定的 k 个 ONU 上(此处设置 $k=8$,固定每个目的无线终端均能到达 16 个 ONU),而 CO-DDD 算法则将每个下行数据流分配至离其目的无线终端最近的一个 ONU 上。

图 3 显示了数据流数目在 10~50 内变化时,数据包在 ONU 缓冲区中的平均排队延迟情况。这里,每个数据流的负载固定为 1 Mb/s,数据包的大小设置为 1 000 Byte。从图中可以看出,HB-DDD 算法的延迟总是小于 CO-DDD 算法,而且随着数据流数目的增加,HB-DDD 算法在降低延迟上的优势愈发明显。这是因为 HB-DDD 算法通过数据分流,保证了较高的数据传输质量。

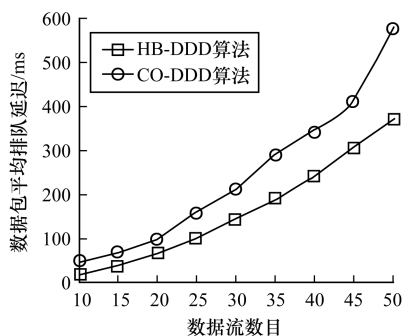


图 3 数据包平均排队延迟

6 结束语

本文研究了光纤-无线接入网络中能量有效的下行数据分配问题。首先证明了该问题是一个 NP-hard 问题,然后提出一种基于线性规划松弛的启发式算法 HB-DDD,该算法在保证数据传输质量的前提下可有效降低系统的能量消耗。理论分析证明了 HB-DDD 算法与最优算法之间的近似比。实验结果表明,HB-DDD 算法在 ONU 能耗方面与最优解非常接近且明显优于无能耗意识的 RS-DDD 算法;而在传输性能方面,相较于优先选择最近 ONU 承载下行数据流的 CO-DDD 算法,HB-DDD 算法则能有效降低数据包在 ONU 缓冲区中的排队延迟。

在 HB-DDD 算法中, k 值是传输性能与能量消耗之间的权衡点,因此,如何根据网络负载选择合适的 k 值是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Ghazisaidi N, Maier M, Assi C M. Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: A Survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(2): 160-167.
- [2] Liu Yejun, Guo Lei, Ma Rui, et al. Auxiliary Graph Based Protection for Survivable Fiber-Wireless (FiWi) Access Network Considering Different Levels of Failures [J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(6): 430-439.
- [3] Akyildiz I F, Wang Xudong, Wang Weilin. Wireless Mesh Network: A Survey [J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.
- [4] 王健全, 胡云, 吕召彪, 等. 无线 Mesh 网络性能分析及协议优化研究[J]. 计算机工程, 2013, 39(8): 107-111.
- [5] Lung B. PON Architecture Future Proofs FTTH [J]. Lightwave, 1999, 16(10): 104-107.
- [6] 王燕滨, 赵晓东, 赵新伟. 以太网无源光网络自愈环状保护结构[J]. 计算机工程, 2012, 38(15): 87-89.
- [7] 李文竹, 冯楠, 任丹萍, 等. 基于 SDN 的光纤无线混合接入网络架构研究[J]. 光通信研究, 2014, (6): 22-25.
- [8] Elmagzoub M A, Mohammad A B, Shaddad R Q, et al. Physical Layer Performance Analysis of Hybrid and Stacked TDM-WDM 40G-PON for Next Generation PON [J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(20): 6194-6197.
- [9] Sarkar S, Yen H, Dixit S, et al. A Novel Delay-aware Routing Algorithm (DARA) for a Hybrid Wireless-optical Broadband Access Network (WOBAN) [J]. IEEE Network, 2008, 22(3): 20-28.
- [10] Honda M, Nishiyama H, Nomura H, et al. On the Performance of Downstream Traffic Distribution Scheme in Fiber-Wireless Networks [C] // Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 28-31.
- [11] Liu Yejun, Guo Lei, Gong Bo, et al. Green Survivability in Fiber-Wireless (FiWi) Broadband Access Network [J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(2): 68-80.
- [12] Chowdhury P, Tornatore M, Sarkar S, et al. Building a Green Wireless-optical Broadband Access Network (WOBAN) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(16): 2219-2229.
- [13] Gong Xiaoxue, Hou Weigang, Zhang Lincong, et al. A Novel Energy-saving Algorithm Based on Sleeping Low-loaded ONU for Hybrid Wireless-optical Broadband Access Network [C] // Proceedings of International Conference on Networking and Information Technology. Singapore: IACSIT Press, 2011: 335-342.
- [14] Alfandari L, Monnot J. A Note on the Clustered Set Covering Problem [J]. Discrete Applied Mathematics, 2014, 164(5): 13-19.
- [15] Sarigiannidis P G, Pechlivanidou V D, Pechlivanidou M D, et al. Towards an Effective Energy Efficient Passive Optical Network [C] // Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 391-396.