

文章编号: 2095-4980(2021)01-0060-07

基于 ILP 和概率贪婪调度的无线网络容量提高

历光平¹, 王耀彬²

(1.四川卫生康复职业学院 人文社科部, 四川 自贡 643000; 2.西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为提高无线 Mesh 网(WMNs)的容量, 提出一种将自由空间光(FSO)技术集成到现有基于 RF 的 WMNs 中的解决方案。首先, 基于每个节点预期的长期上行和下行流量需求, 构建一个整数线性规划(ILP), 用于 FSO 收发器和 RF 链路调度的联合分配, 以找到关键位置节点, 对这样的节点升级后, 能够最大限度地提高整个网络的容量; 其次, 为了避免原始 ILP 的复杂性, 提出一种概率贪婪调度算法, 以非常低的计算成本计算出一个可行解, 作为比较基准, 还提出了一种模拟退火算法。仿真实验结果表明, 采用对若干关键位置的节点进行升级, 可以提高网络容量。

关键词: 无线 Mesh 网; 有向图; FSO 技术; 整数线性规划; 链路调度; 容量提高

中图分类号: TN711

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020330

Wireless network capacity improvement based on ILP and probabilistic greedy scheduling

LI Guangping¹, WANG Yaobin²

(1.Department of Humanities and Social Sciences, Sichuan Vocational College of Health and Rehabilitation, Zigong Sichuan 643000, China; 2.School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: A new solution is proposed to integrate Free-Space Optics(FSO) technology into the existing RF-based Wireless Mesh Networks(WMNs) in order to improve the capacity of wireless mesh networks. Firstly, based on the expected long-term uplink and downlink traffic demands at each node, an Integer Linear Program(ILP) is constructed for the joint assignment of FSO transceiver and RF link scheduling to find the key location nodes which increase the overall network capacity to the greatest extent if they get upgraded. Secondly, in order to avoid the complexity of the original ILP, a Probabilistic Greedy Scheduling(PGS) algorithm is proposed, which can calculate a feasible solution at a very low computational cost. As a comparative benchmark, a Simulated Annealing(SA) algorithm is also proposed. The simulation results show that the network capacity can be improved by upgrading some key location nodes.

Keywords: Wireless Mesh Networks; directed graph; FSO technology; Integer Linear Program; link scheduling; capacity improvement

基于光纤的网络可以满足新兴网络媒体的带宽需求, 但其基础设施建设成本高, 在某些区域难以部署, 因此通常使用无线技术构成无线 Mesh 网(WMNs)^[1-2]。但基于 RF 的 WMNs 在延迟和吞吐量方面降低了整个网络的性能, 采用基于 RF 的解决方案来提高网络容量需要在一些节点部署多个 RF 或多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)天线。这些方法除了需要对物理层进行大的升级之外, 还会给网络带来干扰。而自由空间光(FSO)链路极大依赖于天气条件, 因此基于 FSO 技术的网络也不是可靠的解决方案。将 RF 和 FSO 技术结合起来才是一种理想的方法^[3-5]。

文献[6]针对超密集异构蜂窝网络的无线资源高效管理问题, 提出了一种多维无线资源联合分配算法; 文献[7]针对长期网络流量预测准确率低、收敛速度慢的问题, 提出一种小波系数感知的网络流量预测机制; 文献[8]利用 Physarum 启发的自主优化模型设计了一种 Physarum 启发的多参数自适应路由协议, 以提高混合 WMNs 的

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2020-08-17

基金项目: 自贡市科技局科技计划(2018GYCX33)

作者简介: 历光平(1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机技术及应用。email:mqnju29@163.com

服务质量；文献[9]研究了 FSO/RF 混合通信系统采用低密度奇偶校验混合信道编码方案时与不同混合调制方式结合，在不同条件下误比特率随 FSO 链路信噪比的变化；文献[10]提出在瓶颈节点使用多个 RF，以提高 WMN 的容量；文献[11]提出一种宽松的联合协作路由选择和信道分配算法；文献[12]分析了基于光路选择或源-中继-目的地的 3 路 FSO 装置的中断容量，从信息理论的角度仔细分析了速率自适应中继 FSO 系统的性能和设计；文献[13]提出了一种串联衬底认知 RF 网络与 MIMO FSO 链路的双跳传输系统，分析并推导出中断概率的闭合表达式；文献[14]提出了一种更加有效的适应 WMNs 路由场景的路由协议；文献[15]针对动态信道分配策略平均吞吐率较低的不足，提出了一种基于可通邻居节点可用信道表的信道分配方法。

本文将 FSO 技术集成到现有基于 RF 的 WMNs 中，极大提高了网络容量。

1 网络模型

将研究的多跳 WMN 表示为一个有向图 $G=(V,E)$ ，其中 V 和 E 分别表示无线路由器和它们之间的有向链路的集合。假设 g 表示网关集合，它是 V 的一个子集。目标就是找到 V 的一个子集与 FSO 收发器连接在一起。假设终端用户采用不干扰 WMN 的不同频带连接到各自的接入点(即无线路由器)，汇聚的上行链路流量的目的端是一个或多个网关，下行链路流量的目的端是各自的无线路由器。这样，无线路由器 v 就有一个汇聚的上行链路和下行链路流量需求，分别表示为 $r_u(v)$ 和 $r_d(v)$ 。

1.1 物理层和干扰模型

假设 WMN 中的 RF 天线是全向的，节点以半双工方式通信。每个链路的标称容量给定，所有干扰每个链路的有向链路都可以预先计算。给定链路 $e \in E$ 的干扰链路集合，并表示为 $I_e \subseteq E$ 。为了表征链路的有效容量，考虑链路可用性 a ，它是 FSO 链路以 C_F 的数据速率成功运行的概率，因此，有效容量为 aC_F 。

1.2 链路调度框架

将时间帧分成不重叠的时隙，在时隙内应用一组链路调度，目标就是确定一帧内的调度集合，使得整个网络容量最大化。链路 $e \in E$ 的调度用调度向量 $S(e)$ 表征，假设一帧时间分割成 T 个大小相等的时隙。这样，调度向量 $S(e)$ 就由 T 个二进制元素构成，这些二进制元素决定了一帧内任意时隙链路 e 的状态： $S(e,t)=1$ 表示链路 e 在时隙 t 处呈现活跃状态。

2 问题定义与构建

网络容量定义为在调度框架内可接受的每个节点流量需求速率(包括上行和下行链路)的总和。如果 $r_u(v)$ 和 $r_d(v)$ 为节点 $v \in V$ 的上行和下行链路需求，则定义最大的网络容量为 R 。对于 R ，需求 $R \times r_u(v)$ 和 $R \times r_d(v)$ 可以成功地传输。

2.1 问题定义

已知：a) RF 网络拓扑 $G=(V,E)$ ；b) 用于 FSO 升级的 E 的子集；c) FSO 链路的可用性 a ；d) FSO 升级/收发器的数目 M ；e) 每个链路 e 的干扰链路集 I_e ；f) 一帧的时隙数 T ；g) 上行链路和下行链路需求向量 r_u 和 r_d ；h) RF 和 FSO 链路的标称容量 C_R 和 C_F 。

寻找：a) 每个链路 e 的 RF 链路的调度向量 $S_R(e)$ ；b) FSO 链路的布局 S_F ；c) 上行链路和下行链路流量 A_u 和 A_d ，以使网络容量 R 最大化。

为此，将该问题构建为一个整数线性规划(ILP)，使 R 最大化。

2.2 ILP 构建

1) 流量约束：网关接收来自无线路由器的上行链路流量并作为来自反方向的下行链路流量的源，因此有：

$$\begin{cases} A_u(e) = 0 & \forall e \in E_o(v) \\ A_d(e) = 0 & \forall e \in E_i(v) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $A_u(e)$ 表示沿链路 e 的业务流。对于任意非网关节点的上行链路，业务流有：

$$\sum_{e \in E_o(v)} A_u(e) - \sum_{e \in E_i(v)} A_u(e) = R \times r_u(v) \quad (2)$$

同样可以得到下行链路业务流约束。

为简化起见, 定义 2 个大小为 $|V| \times |E|$ 的矩阵如下:

$$\begin{cases} V_i(v,e) = \begin{cases} 1, & e \in E_i(v) \\ 0, & \text{or else} \end{cases} \\ V_o(v,e) = \begin{cases} 1, & e \in E_o(v) \\ 0, & \text{or else} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

此外, 定义 $V_{oi}=V_o-V_i$, 式(2)可以简写为 $V_{oi} \cdot A_u = Rr_u$ 。

2) 链路容量约束: 对每个链路, 总的上行链路和下行链路流量最多可等于每个链路的有效容量, 因此有:

$$A_u + A_d \leq c_F + \bar{c}_R \quad (4)$$

式中 \bar{c}_R 为一个其元素是每个 RF 链路的有效时间平均容量的向量。

3) 半双工约束: 令二进制变量 $X(v,t)$ 和 $Y(v,t)$ 分别表示在时隙 t 节点 v 的 RF 接口的发送和接收状态。在任何一种模式下, 都会产生相应的变量 1 或 0, 因此有 $X(v,t)+Y(v,t) \leq 1$, 或用一般的矩阵形式表示为 $X+Y \leq 1$ 。

4) 链路活跃约束: 除非相应的发射机处于传输模式, 否则没有输出链路是活跃的, 因此有:

$$X_v(t) = \sum_{e \in E_o(v)} S_R(e,t) \quad (5)$$

上述约束可以概括为 $V_o \cdot S_R = X$ 。同理, 可得到输入链路类似的约束。

5) 干扰约束: 一旦链路 e 在时隙 t 是活跃的, 即 $S_R(e,t)=1$, 则它的全部干扰链路 $e' \in I_e$ 在时隙 t 一定是不活跃的, 即有:

$$\sum_{e' \in I_e} S_R(e',t) \leq |E| \times (1 - S_R(e,t)) \quad (6)$$

该约束可以概括为 $(I+|E|) \cdot S_R \leq |E|$, 其中 I 表示干扰矩阵, 其大小为 $|E| \times |E|$ 。

6) 平均链路容量: 一个时间帧中链路 e 的时间平均活跃性为 $\sum_t S_R(e,t) / T$, 因此有:

$$\bar{c}_R = C_R \left(\frac{1}{T} S_R \cdot \mathbf{1} \right) \quad (7)$$

7) 链路容量: 二进制变量 $S_F(e)$ 表示一个链路是否采用 FSO 升级。这样, 一个链路的容量可计算为:

$$c_F(e) = C_F S_F(e) a_F(e) \quad (8)$$

式中 $a_F(e)$ 表示链路 e 的可用性。

8) 升级数量约束: 考虑到升级总数为 M , 则有:

$$\sum_e S_F(e) \leq M \quad (9)$$

最后, 得到构建的 ILP 如表 1 所示。

在 ILP 中, T 在性能和复杂性方面起着关键作用。 T 除了对复杂性和容量的影响之外, 对于 T 的选择还有实际考虑。 T 值过小, 可能导致太少的时隙选择用于激活链路, 使得最终的拓扑断开; T 太大(不改变帧的持续时间), 需要频繁地切换收发器, 可能增加包时延。

3 ILP 松弛及其求解

网络容量最大化 ILP 在计算上很复杂。为了降低其复杂度并得到网络容量的上限, 可以应用一定的松弛即放宽约束条件。对 ILP 的约束主要为 3 类(如表 1 所示), 它们有不同的复杂程度。第一类约束即流量约束, 主要是实值约束, 这些约束通过提供每个链路上的业务流数量来指定路由信息; 第二类约束即调度约束, 与 RF 链路的调度有关, 描述了调度矩阵的解空间, 所涉及的变量都是整数, 且与 $O(T)$ 成比例; 第三类约束是关于 FSO 升级位置的。这些约束尽管涉及整数变量, 但很少, 且与 $O(|E|+|V|)$ 成比例。选择松弛调度约束, 即 ILP 的松弛形式可得到升级的位置。为此, 首先找到一种随机算法来近似最优调度矩阵。

假设对于给定的 T , 通过求解 ILP 得到最优调度矩阵 S , 它决定了任意时隙 t 所有链路的状态。考虑一种无需替换随机选择帧调度向量序列的方法, 即在第一轮中, 每个调度向量的选择概率为 $1/T$ 。在选择了第一个调度后, 第二个调度以 $1/(T-1)$ 的概率从其余的调度中选择。这个过程连续进行, 直至全部调度被使用。在此过程

表 1 实现网络容量最大化的 ILP

Table 1 ILP for maximizing network capacity	
constraints	contents
flows	$V_i(v) \cdot A_u = 0 \quad V_o(v) \cdot A_d = 0 \quad v \in G$ $V_{oi} \cdot A_u / r_u = -V_{oi} \cdot A_d / r_d = R \quad v \in I/G$ $A_u + A_d \leq C_F S_F a_F + C_R (S_R \cdot \mathbf{1} / T)$
schedules	$V_i \cdot S_R = Y \quad V_o \cdot S_R = X$ $X + Y \leq \mathbf{1} \quad (I + E) \cdot S_R \leq E $
upgraded position	$S_F \cdot \mathbf{1} \leq M$

结束时，链路 e 活跃的期望次数(以 σ_e 表示)可计算为 $\sum_t \mathbf{S}_R(e,t)/T$ ，其元素为实值的时间平均向量 σ 是调度矩阵的质心(即由矩阵表示的所有点的平均位置)。时间平均向量 σ 可用于放宽调度约束，并仍保留关于调度矩阵有意义的信息。采用这个变量， $\mathbf{S}_R(e,t)$ 的约束集就可以压缩为将 ILP 转换为一个更简单的约束集。如，式(5)两边对 t 求和得到：

$$\frac{1}{T} \sum_t [\mathbf{X}_v(t)] = \frac{1}{T} \sum_t \left[\sum_{e \in E_0(v)} \mathbf{S}_R(e,t) \right] \quad (10)$$

将 $\sum_t \mathbf{S}_R(e,t)/T$ 替换为 $T\sigma_e$ ，得到的约束变为：

$$p_t(v) = \sum_{e \in E_0(v)} \sigma_e \quad (11)$$

式中 $p_t(v)$ 是节点 v 在时隙 t 处于传输模式的概率。采用上述随机算法，得到如表 2 所示的松弛 ILP。

3.1 解空间特性

最优调度矩阵可用调度向量空间的合适抽样来近似。为此，必须找到确定链路状态的 T 个调度向量。为此，提出一种概率贪婪调度(PGS)算法来构造调度矩阵。一旦计算出该矩阵，就可以将其插入到原来的 ILP 中，找到每个链路上实际的流量。

根据 σ 定义， $\sigma = \mathbf{S}_R \cdot \mathbf{1}/T$ 是调度矩阵的质心，如果得到的 $\hat{R} = \alpha R$ (其中 $0 < \alpha \leq 1$ ，且 R 是松弛 ILP 的解)，则可定义一个调度矩阵 \hat{S} 为一个 α -近似调度矩阵。为了找到最优解的一个很好的近似，可以使 $\hat{\sigma}$ 在 σ 上的投影最大化，这可以通过使 $\hat{\sigma}/\sigma$ 的最小元素最大化来实现。

3.2 概率贪婪调度算法

PGS 算法通过已知约束，用一种方法对向量空间进行采样，采样点的质心在 σ 表示的感兴趣方向上。PGS 的第一步是求解松弛 ILP 来计算 σ ，找到 FSO 升级的位置。然后，迭代过程寻找 T 个调度向量，目标是找到一个 α -近似的调度矩阵，使 α 最大化。

每次迭代，每个调度向量将链路集划分为活跃和不活跃 2 个子集。为使投影比率最大化，即 $\max[\min_e(\alpha_e)]$ ，则必须频繁激活链路，使得选择概率为 $\alpha \cdot \sigma_e$ 。采用一个简单的迭代过程来激活每个时隙 t 中的链路 e ，这意味着在一帧 \hat{S} 中，链路 e 处于活跃状态的期望时隙数是 $\alpha \sigma_e T$ ，因此有：

$$\begin{cases} E \left[\sum_{t \leq T} \hat{S}(e,t) \right] = \alpha \sigma_e T \\ \frac{1}{T} \sum_{t \leq T} E \left[\hat{S}(e,t) \right] = \frac{1}{T} \sum_{t \leq T} \rho_e(t) = \alpha \sigma_e \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\rho_e(t)$ 为链路 e 在时隙 t 中活跃的概率。式(12)表明，选择概率的时间平均值必须等于 $\alpha \sigma_e$ 。为公平起见，不能简单地假设 $\rho_e(t)$ 在选择过程中保持不变。为此，采用一种随机循环方法，将公平性应用到链路选择过程中，使得选择权值为 $\rho_e(t)$ 。如，假设已经选择了 t 个调度向量，且知道链路 e 已经在 h_t 个时隙中处于活跃状态，为了对其他链路公平，提出改进的选择概率：

$$\rho_e \left(t+1 \left| \sum_{\tau \leq t} \hat{S}(e,\tau) = h_t \right. \right) = \alpha \max \left(0, \sigma_e - \frac{\eta h_t}{T} \right) \quad (13)$$

式中： τ 为小于等于 t 的调度向量数目； $\eta=1/\alpha$ ； $\max(0, \cdot)$ 用于确保权值不为负数。由于链路选择的概率是比较进行的，因此可得到如下递归方法：

$$\rho_e(t) = \begin{cases} \rho_e(t-1) & \hat{S}(e,t-1) = 0 \\ \max(0, \rho_e(t-1) - \eta/T) & \hat{S}(e,t-1) \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)用 $\rho_e(1) = \sigma_e$ 初始化，迭代过程在每个时隙 t 按概率逐个选择活跃的链路。用 L 表示每次迭代时要处理的剩余链路集，在每次迭代中，这个过程都用 $L=E$ 初始化。每个链路 e 采用与 $\rho_e(t)$ 成比例的概率随机选择，一旦选择了一个链路，就更新一组变量。算法过程如下：a) 选择链路(如 e)添加到活跃链路集 A 中；b) 从 L 中移除

表 2 实现网络容量最大化的松弛 ILP

Table 2 Relaxed ILP for maximizing network capacity			
constraints	contents		
flows	$V_i(v) \cdot \mathbf{A}_i = 0$	$V_o(v) \cdot \mathbf{A}_i = 0$	$v \in G$
	$V_{oi} \cdot \mathbf{A}_i / r_{i0} = V_{oi} \cdot \mathbf{A}_i / r_{i0} = R$		$v \in V/G$
	$\mathbf{A}_i + \mathbf{A}_i \leq C_P \mathbf{S}_P a_F + C_R \sigma$		
schedules	$V_i \cdot \sigma = p_i$	$V_o \cdot \sigma = p_i$	
	$P_r + p_i \leq \mathbf{1} \quad (I+ E) \cdot \sigma \leq E $		
upgraded position	$\mathbf{S}_F \cdot \mathbf{1} \leq M$		

来自 e 的接收器的全部输出链路 e_r 以及到其发射器的输入链路 e_t ; c) 从 L 中移除链路 e 及可能的干扰链路 I_e ; d) L 中的所有剩余链路 e' 必须从 L 中移除; e) 更新调度向量 $\hat{S}(e,t)=1$; f) 将 e 的选择概率降低为 η/T 。这个过程在剩下的链路中重复, 直至 L 为空。第一次迭代确定调度向量 $\hat{S}(e,t)$, 为了得到剩下的调度向量, 将算法重复 $T-1$ 次。算法 1 为 PGS 算法实现的伪代码。

算法 1 PGS 算法伪代码

数据: V, E, I, p, T, η

结果: \hat{S}

```

1.begin
2.  $\tau \leftarrow 1$ 
3.  $\hat{S} \leftarrow 0$ 
4. while  $\tau \leq T$  do
5.  $L \leftarrow E$ 
6.  $A \leftarrow \emptyset$ 
7. for  $e \in L$  do
8.   if  $\tau=1$  then  $\rho_e(\tau)=\sigma_e$ 
9.   else
10.     $\rho_e(\tau)=\rho_e(\tau-1)$ 
11.   end
12. end
13. while  $L \neq \emptyset$  do
14.    $e = \text{RandomPick}(p, L)$ 
15.    $A \leftarrow A \cup \{e\}$ 
16.    $\rho_e(\tau) = \max(0, \rho_e(\tau) - \eta/T)$ 
17.    $L \leftarrow L \setminus \{e \cup I_e \cup E_o(e_r) \cup E_i(e_t)\}$ 
18.   for  $e' \in L$  do
19.     if  $e \in I_{e'}$  then  $L \leftarrow L \setminus e'$ 
20.   end
21.    $\hat{S}(e, \tau) \leftarrow \hat{S}(e, \tau) + 1$ 
22. end
23.  $\tau \leftarrow \tau + 1$ 
24. end
25.end

```

算法输出是对于给定的 η , 找到 $\alpha = \min\left(\frac{1}{T} \hat{S}_R \cdot \mathbf{1} / \sigma\right)$ 。对于 η , 需要找到一个好的值使得计算的 α 最大。对于在给定范围内选择的随机 η 值, 启发式算法可以多次运行。

3.3 模拟退火算法

为比较 PGS 性能, 采用模拟退火(SA)算法来实现上述过程。SA 算法实质上是一种基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的随机寻优算法, 用在一个大的搜寻空间内寻找最优解, SA 算法也是一种贪心算法。SA 在优化过程中引入了温度参数 θ , 并按 $\theta \cdot \beta$ 的几何衰减规律进行下一次迭代, 其中 $\beta \leq 1$ 为衰减因子。由于版面所限, 略去 SA 算法实现的伪代码。

4 仿真实验结果

仿真中 RF 物理层为 WiMAX(802.16e), 其中带宽为 20 MHz, 链路容量为 75 Mbps。采用窄激光束的 FSO 链路, 可以在大约 4 km 的范围内提供高达 1.2 Gbps 的容量; 采用 CPLEX 12.2 求解 ILP; 仿真生成 20 个随机图, 每个图由 15 个节点构成, 其中一个节点为网关, 节点随机放置在边长为 10 km 的正方形区域内, RF 传输的最大范围为 4 km。假设全部节点有相等的上行链路和下行链路需求, 全部 RF 链路的容量相同, 均为 75 Mbps; 采用标准的干扰模型, 即将干扰限制在一跳节点内; 求解表 2 中的 ILP 可得到 FSO 链路的最佳布局即最优 (Optimal, OPT) 算法解。

4.1 PGS 及 SA 与最优性能的比较

采用 OPT 算法计算采用 FSO 升级的计算网络的最佳容量。考虑 $T=10$ 和 20 的 $M \in \{1,2,3,4\}$ 。图 1 为仿真实验结果。可以看到，容量随着 FSO 链路数 M 的增加而增加， $T=20$ 得到的网络容量略高于 $T=10$ 的网络容量，这是因为前者更宽松的约束提供了更大的解空间；还可看到，SA 和 PGS 有相似的性能，在 $M=1$ 时，SA 的性能略好一些；对于大的 M 值，PGS 优于 SA。

表 3 为 3 种算法的运行时间比较。可见，最优算法的平均运行时间比 PGS 和 SA 大约高 2 个数量级；此外，算法的运行时间几乎与 T 成线性关系，但 PGS 的运行速度是最快的。

表 3 3 种算法运行时间比较(单位: s)
Table3 Comparison of running time for three algorithms

	optimal algorithm	PGS	SA
$T=10$	3.53×10^4	1.12×10^2	1.44×10^2
$T=20$	7.22×10^4	3.08×10^2	3.46×10^2
$T=50$	9.97×10^4	3.42×10^2	4.34×10^2

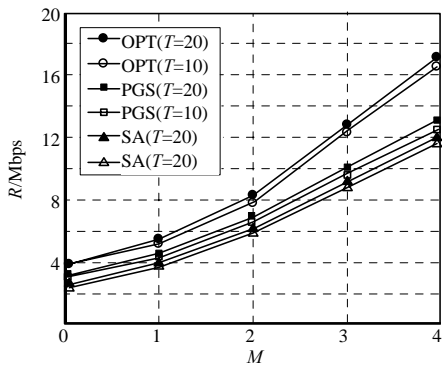


Fig.1 Performance comparison of PGS, SA and OPT
图 1 PGS 和 SA 的性能与最优性能的比较

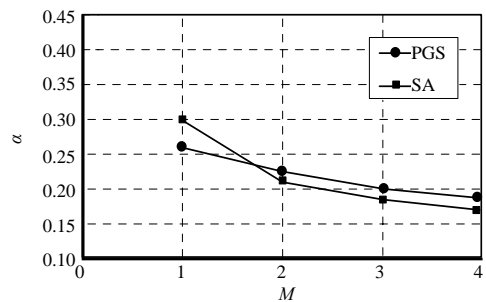


Fig.2 Comparison between achieved α for PGS and SA at $T=50$
图 2 $T=50$ 时, PGS 和 SA 得到的 α 比较

4.2 PGS 与 SA 的性能比较

图 2 为 $T=50$ 时，PGS 和 SA 计算得到的 α 值。可见，除了 $M=1$ 的情形外，PGS 具有更好的性能。一方面，SA 通常对于给定的计算预算执行随机穷尽搜索，当解空间较小时，有可能获得全局最优解，但当空间较大时，不太可能找到全局最优解；另一方面，PGS 具有一般的随机行为，依赖于输入变量 η ，解空间是随机抽样的，特别是当 η 在可能得到良好解的范围内时。

4.3 FSO 链路可用性对网络容量的影响

考虑 FSO 链路的 3 个可用性，即 $a \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$ ，从而得到有效容量 $c_F \in \{160, 320, 480\}$ Mbps，其中一条 FSO 链路的标称容量为 1.2 Gbps，在 $M \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 个 FSO 链路可以添加到网络的情况下采用 PGS 求解。图 3 为在生成的随机图上得到的平均解。

从图 3 可以看到，当 FSO 链路的可用性较低时 ($a=0.1$)，添加多于 2 条链路并不能明显提高网络容量。原因是 FSO 链路的有效容量与 RF 链路的有效容量相当，添加更多的链路并不能解决由于某些拥塞的 RF 链路可能造成的瓶颈问题。当 FSO 链路可用性较高 ($a=0.2$) 时，容量有较大提高。可以看到，在 $M > 3$ 时，对于 $a=0.3$ ，容量提高更明显。

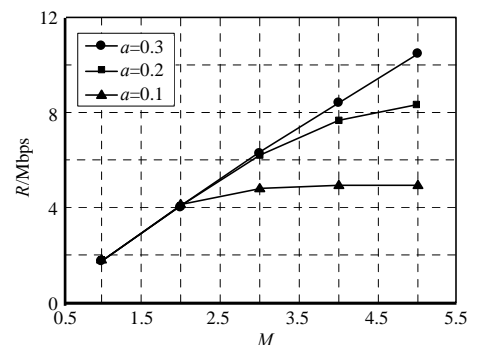


Fig.3 Effect of link availability on the network capacity at $T=50$
图 3 $T=50$ 时链路可用性对网络容量的影响

5 结论

本文提出了一种在混合无线光网络中采用 FSO 技术提高网络容量的新方法。首先将 FSO 布局和链路调度的联合问题构建成为一个 ILP，然后提出求解 ILP 的概率贪婪调度算法和模拟退火算法。仿真结果表明，与最优解方法相比，2 种算法可以明显降低计算成本；采用对若干关键位置的节点进行升级，可以大大提高网络容量。对于链路调度带来的切换延迟和 FSO 链路的可靠性是未来计划研究的内容。

参考文献:

- [1] 蒋伟昌. 集中式无线 Mesh 网络架构及切换技术研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2017. (JIANG Weichang. Research on centralized wireless mesh network architecture and switching technology[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.)
- [2] 朱文彬. 自适应无线 Mesh 网络组网技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017. (ZHU Wenbin. Research on adaptive wireless mesh networking technology[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [3] 邵军虎, 苏润民, 姚柳, 等. 软切换 FSO/RF 链路混合编码调制算法性能分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 682–687. (SHAO Junhu, SU Runmin, YAO Liu, et al. Performance analysis of soft-switching hybrid FSO/RF links using hybrid coding and modulation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 682–687.)
- [4] 王雪莲. 混合 FSO/RF 通信系统优化算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2016. (WANG Xuelian. Research on optimization algorithm of hybrid FSO/RF communication system[D]. Changchun, China: Jilin University, 2016.)
- [5] 赵柏山, 庄晓燕, 王争艳. 一种新型的 FSO/RF 切换算法研究[J]. 微处理机, 2019, 40(3): 21–24. (ZHAO Boshan, ZHUANG Xiaoyan, WANG Zhengyan. Research on a new FSO/RF switching algorithm[J]. Microprocessors, 2019, 40(3): 21–24.)
- [6] 辛杰, 赵力强, 张耀元. 超密集异构蜂窝网多维资源联合优化算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(1): 29–35. (XIN Jie, ZHAO Liqiang, ZHANG Yaoyuan. Joint radio resource allocation algorithm for ultra-dense heterogeneous cellular networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(1): 29–35.)
- [7] 林志达, 吕华辉. 小波系数感知的网络流量预测机制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(1): 131–135. (LIN Zhida, LYU Huahui. Wavelet coefficient aware network traffic prediction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(1): 131–135.)
- [8] HAN G, JIANG H, LU L, et al. Physarum-inspired multi-parameter adaptive routing protocol for coal mine hybrid wireless mesh networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(2): 1–14.
- [9] 苏润民. FSO/RF 混合信道下的高效编码调制算法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017. (SU Runmin. Research on efficient coding modulation algorithm for FSO/RF hybrid channel[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2017.)
- [10] SINGH P, PRAKASH S. Optical network unit placement in Fiber-Wireless(FiWi) access network by Moth-Flame optimization algorithm[J]. Optical Fiber Technology, 2017(36): 403–411.
- [11] 乔宏, 张大方, 谢鲲, 等. 多射频无线 mesh 网中的联合协作路由与信道分配算法[J]. 电子学报, 2016, 44(6): 1400–1405. (QIAO Hong, ZHANG Dafang, XIE Kun, et al. Joint cooperative routing and channel assignment in multi-radio wireless mesh network[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(6): 1400–1405.)
- [12] BOLUDA-RUIZ R, GARCIA-ZAMBRANA A, CASTILLO-VAZQUEZ B, et al. Outage capacity of rate-adaptive relaying for FSO links with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(9): 717–720.
- [13] 韩立强, 江红兵. 一种混合认知 RF 和 MIMO FSO 系统的中断概率分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 233–240. (HAN Liqiang, JIANG Hongbing. Outage probability analysis of a mixed cognitive RF and MIMO FSO system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 233–240.)
- [14] 汪红霞, 吕腾. 基于移动性预测的无线移动 Mesh 网路由协议[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 165–171. (WANG Hongxia, LYU Teng. Routing protocol for wireless mobile mesh networks based on mobility prediction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(4): 165–171.)
- [15] 魏振春, 吴亚伟, 张本宏. 一种用于多信道无线 Mesh 网络的信道分配方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1144–1150. (WEI Zhenchun, WU Yawei, ZHANG Benhong. Channel assignment method for multi-channel wireless mesh networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1144–1150.)