



可生存光纤—无线融合宽带接入网规划方法

谭红君¹, 解亚敏², 刘业君²

(1. 四川工程职业技术学院, 四川 德阳 618000;

2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 光纤—无线融合(fiber-wireless, FiWi)宽带接入网的出现不仅为随时随地的灵活宽带接入提供了新的技术参考, 同时也为可生存宽带接入网的低成本设计增加了研究契机。研究了可生存 FiWi 接入网的网络规划问题, 提出一种基于无线重路由保护的可生存网络规划方法。当任意光纤链路断裂时, 失效的光网络单元可通过无线重路由将业务转移到其他可用的光网络单元承载。重点解决了无线路由器部署、备份射频接口配置及光网络单元容量分配的联合优化问题, 目标是通过最小化网络部署成本实现业务的完全保护。采用整数线性规划方法获得了小规模网络规划问题的最优解, 同时提出了适用于大规模网络规划问题的启发式算法。仿真结果证实了所提方法在降低网络部署成本方面的有效性。

关键词: 光纤—无线融合; 可生存网络规划; 无线重路由; 网络保护; 备份资源

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016120

Planning approach of survivable fiber-wireless broadband access network

TAN Hongjun¹, XIE Yamin², LIU Yejun²

1. Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China

2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: The emerging fiber-wireless(FiWi) broadband access network provides not only the new technological references for flexible broadband access anywhere and anytime, but also the research opportunities for the cost-efficient design of survivable broadband access network. The study of survivable FiWi access network planning was focused on, and an approach of survivable network planning based on wireless-rerouting protection was proposed. When any fiber link cuts, the failed optical network unit (ONU) can transfer its traffic into other normal ONUs. Solving the joint optimization problem of wireless routers placement, backup radios configuration and ONU capacity allocation was put more importance on, aiming to fully protect all traffic with the minimum deployment cost. The method of integer linear programming was employed to obtain the optimal solution for small-scale network planning. The heuristic algorithm was also proposed for the large-scale network planning. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach in reducing network deployment cost.

Key words: fiber-wireless, survivable network planning, wireless rerouting, network protection, backup resource

1 引言

近年来,全球范围的地震、海啸等自然灾害频发,这加剧了网络故障的潜在风险,同时也为网络生存性建设提出更高要求。网络故障不仅导致大量数据丢失和运营商的极大经济损失,更制约着灾难营救效率,可生存接入网规划已成为学术界和工业界共同关注的焦点^[1,2]。

无源光网络(passive optical network, PON)凭借其在带容量及传输稳定性方面的突出优势,已被业界公认为下一代宽带接入理想的候选技术之一。然而, PON 的树型拓扑结构缺乏自愈能力,易受网络组件故障的影响。例如,当光网络单元(optical network unit, ONU)与光线路终端(optical line terminal, OLT)之间的光纤链路发生断裂时,相应 ONU 上承载的全部业务将被中断^[1-3]。现有研究主要通过为工作光纤链路配置备份光纤链路的方法对 PON 进行保护。一旦工作光纤链路出现故障,被中断的业务可通过光开关转移到备份光纤链路上承载。备份光纤的方法虽然能为业务恢复提供有效的带宽保证,但它要求大量额外的成本投入。尤其在风险分离部署场景中,工作光纤链路与备份光纤链路不能共享相同的光缆或光纤隧道,额外的基础设施建设将进一步加剧备份光纤部署的成本压力。因此,成本效益问题一直是运营商进行可生存 PON 建设面临的主要挑战之一^[4,5]。

光纤—无线(fiber-wireless, FiWi)融合宽带接入网作为一种新兴的宽带接入技术,它集成了光纤网络带容量高、传输稳定以及无线网络接入灵活、部署成本低等优势^[6,7],已得到学术界和工业界的广泛关注。不仅如此,FiWi 接入网的出现也为可生存宽带接入网的低成本设计提供了新的技术参考。典型的 FiWi 接入网呈树型—网状拓扑结构,由前端的无线网状网(wireless mesh network, WMN)及后端的无源光网络组成^[8,9]。在这种结构下,前端的无线子网能在不同 ONU 之间进行业务重路由为后端的光纤子网提供保护。例如,当任意光纤链路断裂导致 ONU 与 OLT 之间连接中断,失效的 ONU 可通过无线路径将业务转移到其他可用的 ONU 上承载。由于无线设备比光纤基础设施更易于部署和维护,因此无线重路由保护方法能实现比传统备份光纤保护方法更高的成本效益,尤其适用于业务规模稀疏、运营成本敏感的网络区域。

本文研究了可生存 FiWi 接入网的低成本规划问题,针对 FiWi 接入网中典型的单分支光纤链路故障情况,提

出了基于无线重路由保护的生存网络规划方法,重点解决了无线路由器部署、备份射频接口配置与备份 ONU 容量分配的联合优化问题,目标是通过最小化的网络部署成本构建工作 ONU 与备份 ONU 之间的无线备份路径。本文利用整数线性规划(integer linear programming, ILP)对优化问题进行了规范的数学描述,并获得小规模网络规划问题的最优解。考虑到大规模网络规划问题的 ILP 模型难于求解,本文同时提出高效的启发式算法。

2 无线重路由保护方法概述

无线重路由保护方法的原理如图 1 所示,首先为每个工作 ONU 分配至少一个备份 ONU,每个备份 ONU 需要为其工作 ONU 预留剩余容量作为备份容量。然后,在无线前端有策略地部署无线路由器并配置备份射频接口,确保每个工作 ONU 与其任意备份 ONU 之间至少存在一条可用的无线备份路径。为保证业务切换到备份路径上的 QoS,无线备份路径经过的每个备份射频接口应当为重路由的业务分配备份容量。一旦网络遭遇分支光纤链路故障,失效 ONU 可通过无线备份路径将受影响业务转移到其备份 ONU。备份 ONU 将通过预留的备份容量将来自工作 ONU 的业务上传给 OLT。因为备份容量取自于备份 ONU 和备份射频接口的剩余容量,因此业务从工作 ONU 切换到备份 ONU,理论上不会影响备份 ONU 原有业务的性能。

3 可生存网络规划问题描述

将整个网络区域均匀地划分成 $S \times S$ 个方型单元,以每个方型单元的中心作为无线路由器的候选位置。已知每个工作 ONU 在网络区域中的位置及其业务的带宽需求,基于无线重路由保护的生存网络规划主要解决无线资源与光网络资源的联合优化分配问题,包括:哪些方型单元内需要部署无线路由器;每个无线路由器需要配置多少个备份射频接口;每个工作 ONU 需要分配哪些备份 ONU;每个备份 ONU 需要预留多少备份容量。

3.1 符号定义

为便于问题描述,定义如下符号。

(1) 已知参量

i : 无线节点(包括无线路由器和 ONU/无线网关)的索引编号, $i \in \{1, 2, 3, \dots\}$;

w_i : 由 i 索引的无线节点;

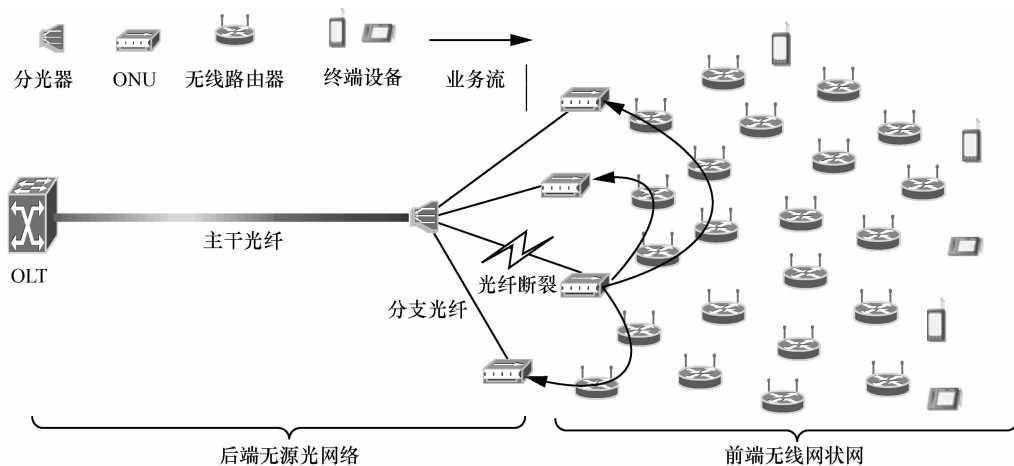


图1 FiWi接入网中无线重路由保护方法示意

p, q : 无线路由器的候选位置索引编号, $p, q \in \{1, 2, 3, \dots, S \times S\}$;

l_p : 由 p 索引的候选位置;

$L_{p,q}$: 候选位置 l_p 与 l_q 之间的无线链路;

k : 无线路由器的索引编号, $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$;

r_k : 由 k 索引的无线路由器;

U : 网络中 ONU 数量;

m, n : ONU 的索引编号, $m, n \in \{1, 2, 3, \dots, U\}$;

o_m : 由 m 索引的 ONU;

T : 无线节点的传输半径;

$d_{p,q}$: 候选位置 l_p 和 l_q 之间的距离;

$\partial_{p,q}$: 二进制常量, 若 $d_{p,q} \leq T$, 取值为 1; 否则, 取值为 0;

R : 每个无线路由器最多能配置的备份射频接口数量;

C : 每个备份射频的带宽容量;

d_m : ONU o_m 的业务量;

μ_m : ONU o_m 的剩余容量;

ρ_u : 配置 u 个备份射频接口的无线路由器的部署成本, $u \in \{1, 2, \dots, R\}$;

H : 无线备份路径的长度约束(单位: 跳数);

I : 足够大的整数。

(2) 决策变量

λ_p : 二进制变量, 如果无线路由器部署在位置坐标 l_p , 取值为 1; 否则, 取值为 0;

$\delta_{m,n}$: 二进制变量, 如果 o_n 是 o_m 的备份 ONU, 取值为 1; 否则, 取值为 0;

$\phi_{m,n}^{p,q}$: o_m 到 o_n 的无线备份路径加载到链路 $L_{p,q}$ 上的业务量;

$\tau_{m,n}^{p,q}$: 二进制变量, 如果 o_m 到 o_n 的无线备份路径经过

l_p 与 l_q 之间的边, 取值为 1; 否则, 取值为 0;

$\eta_{m,n}: o_m$ 到 o_n 的无线备份路径上承载的业务量;

ρ_p^m : 在位置坐标 l_p 上的无线节点为工作 ONU o_m 预留的备份射频容量;

θ_u^p : 二进制变量, 如果在位置坐标 l_p 上的无线节点配置 u 个备份射频, 取值为 1; 否则, 取值为 0;

$\pi_{p,q}$: 二进制变量, 如果 l_p 与 l_q 之间存在无线链路, 取值为 1; 否则, 取值为 0。

3.2 优化目标

基于无线重路由保护的可生存网络规划以最小化 FiWi 前端无线网络的部署成本为目标。无线网络的部署成本主要取决于每个无线路由器配置的备份射频接口数量, 因此优化目标可描述如下:

$$\min \sum_{p=1}^{S \times S} \sum_{u=1}^R \theta_u^p \rho_u \quad (1)$$

(1) 关于备份 ONU 容量分配的约束条件

按照无线重路由保护方法, 每个备份 ONU 将从自己的剩余容量中为其工作 ONU 预留备份容量。在单分支光纤链路故障情况下, 任何一对工作 ONU 不会同时与 OLT 之间发生连接中断, 因此不同工作 ONU 之间可以共享相同的备份 ONU 的剩余容量。为保证工作 ONU 失效情况下业务恢复的带宽需求, 每个工作 ONU 的所有备份 ONU 的累计剩余容量应大于或等于该工作 ONU 的业务量。因此, 关于备份 ONU 容量分配的约束条件可定义为:

$$\sum_{n=1, n \neq m}^U \mu_n \delta_{m,n} \geq d_m, \quad \forall m \quad (2)$$

(2) 关于备份射频容量分配的约束条件

一旦工作 ONU 的分支光纤链路故障, 失效的工作

ONU 将通过无线备份路径将业务转移到备份 ONU 承载, 因此工作 ONU 到它的每个备份 ONU 之间至少存在一条可用的无线备份路径。任意无线备份路径能够穿过位置坐标 l_p 与 l_q 之间的边, 当且仅当 l_p 与 l_q 之间存在可用的无线链路时:

$$\tau_{m,n}^{p,q} \leq \pi_{p,q}, \quad \forall m \neq n, p \neq q \quad (3)$$

其中, l_p 与 l_q 之间存在可用无线链路的条件是 l_p 和 l_q 上均部署无线路由器, 且在彼此传输范围之内, 如下:

$$\pi_{p,q} \leq \lambda_p, \quad \forall p \neq q \quad (4)$$

$$\pi_{p,q} \leq \lambda_q, \quad \forall p \neq q \quad (5)$$

$$\pi_{p,q} \leq \delta_{p,q}, \quad \forall p \neq q \quad (6)$$

$$\pi_{p,q} \geq \lambda_p + \lambda_q + \delta_{p,q} - 2, \quad \forall p \neq q \quad (7)$$

如果在位置坐标 l_p 上没有部署无线路由器, 存在 $\theta_u^p = 0, \forall u$, 相应的约束条件为:

$$\sum_{u=1}^R \theta_u^p \leq \lambda_p, \quad \forall p \quad (8)$$

无线备份路径经过的每个无线路由器需要为工作 ONU 分配足够的备份射频容量, 以满足业务转移过程中的带宽需求。由于业务转移所占用的备份射频容量被提前预留且独立于其他业务, 因此不同业务在转移过程中不会争用彼此的备份射频容量。尽管如此, 由于在单分支光纤链路故障场景下, 不同工作 ONU 不会同时与 OLT 之间连接中断, 因此不同工作 ONU 的无线路径经过相同无线路由器时允许它们共享备份射频容量。这要求无线路由器为每个工作 ONU 分配的备份射频容量均不应超过这个无线路由器上所有备份射频的总容量, 数学表示为:

$$\sum_{n=1, n \neq m}^U \sum_{q=1, q \neq p}^{S \times S} \varphi_{m,n}^{p,q} = \rho_p^m, \quad \forall p, m \quad (9)$$

$$\rho_p^m \leq \sum_{u=1}^R \theta_u^p \cdot u \cdot C, \quad \forall p, m \quad (10)$$

(3) 关于无线备份路径长度的约束条件

无线重路由保护方法中影响业务恢复效率的因素包括保护切换时间和备份路径的传输时延, 二者均主要取决于无线备份路径的跳数。显然, 较长的无线备份路径不利于业务恢复效率, 为此引入无线备份路径长度约束, 限制每条无线备份路径的长度不超过 H 跳, 数学表示为:

$$\sum_{p=1}^{S \times S} \sum_{q=1, q \neq p}^{S \times S} \tau_{m,n}^{p,q} \leq H, \quad \forall m \neq n \quad (11)$$

为保证任意无线备份路径的路由连续性, 其源节点(如工作 ONU o_m)的输出流量为 $\eta_{m,n}$, 输入流量为 0; 目的节

点(如备份 ONU o_n)的输入流量为 $\eta_{m,n}$, 输出流量为 0; 中间节点的输出流量与输入流量相等, 为此引入如下的流守恒(flow conservation)约束:

$$\sum_{q=1, q \neq p}^{S \times S} \varphi_{m,n}^{p,q} - \sum_{q=1, q \neq p}^{S \times S} \varphi_{m,n}^{q,p} = \begin{cases} \eta_{m,n}, & p = m \\ -\eta_{m,n}, & p = n, \quad \forall p, m \neq n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, 二进制变量 $\varphi_{m,n}^{p,q}$ 应满足 $\tau_{m,n}^{p,q}$ 的定义, 数学表示如下:

$$\tau_{m,n}^{p,q} \leq \varphi_{m,n}^{p,q}, \quad \forall m \neq n, p \neq q \quad (13)$$

$$\tau_{m,n}^{p,q} \geq \varphi_{m,n}^{p,q} / I, \quad \forall m \neq n, p \neq q \quad (14)$$

此外, 无线重路由保护方法允许每个失效的工作 ONU 通过多跳无线备份路径将业务转移给不同的备份 ONU, 所有无线备份路径应当完全承载失效工作 ONU 的业务量。

$$\sum_{n=1, n \neq m}^U \eta_{m,n} = d_m, \quad \forall m \quad (15)$$

$$\eta_{m,n} \leq \delta_{m,n} \cdot d_m, \quad \forall m \neq n \quad (16)$$

$$\eta_{m,n} \geq \delta_{m,n} / d_m, \quad \forall m \neq n \quad (17)$$

其中, 式(16)和式(17)保证每个工作 ONU 与其备份 ONU 之间的无线备份路径一定承载业务量, 从而避免多余的空载备份路径。

4 启发式算法

考虑到大规模网络规划的应用需求以及 ILP 等数学方法的耗时特征, 本文提出了最大保护业务量优先(maximum protected-traffic first, MPTF) 的启发式算法。在 MPTF 算法中, 首先将无线路由器逐个地部署到网络中, 初始情况下每个无线路由器按照最多 R 个备份射频接口进行配置。增加网络中无线路由器的部署有利于工作 ONU 与备份 ONU 之间建立新的无线备份路径, 从而增加新的备份 ONU 以及被保护的作业量。然后, 以最大化新增被保护业务量为目标, 依次决策出每个无线路由器的最佳部署位置, 并为工作 ONU 的业务分配备份 ONU 容量和备份射频容量, 直到网络中所有工作 ONU 的业务量被完全保护。最后, 根据工作 ONU 的实际带宽需求删除每个无线路由器上的冗余备份射频。为便于论述, 为 MPTF 算法引入如下符号定义。

$c_k^{i,m}$: 当部署第 k 个无线路由器 r_k 时, 无线节点 w_i 已分配给 ONU o_m 的备份射频容量;

$\mu_k^{m,n}$: 当部署无线路由器 r_k 时, ONU o_n 的剩余容量中可以继续为 o_m 提供的备份容量;



$\eta_k^{m,n}$: 当部署无线路由器 r_k 时, ONU o_m 到 o_n 的无线备份路径上已承载的业务量;

$\Psi_{k,p}^m$: 如果 r_k 部署在位置坐标 l_p 上, 工作 ONU o_m 新增的备份 ONU 集合;

$N_{k,p}^{m,n}$: 如果 r_k 部署在位置坐标 l_p 上, 从 ONU o_m 到 o_n 新增的无线备份路径上的节点集合;

$\eta_{k,p}^{m,n}$: 如果 r_k 部署在位置坐标 l_p 上, 从 ONU o_m 到 o_n 新增的无线备份路径上最多能承载的业务量;

$\gamma_{k,p}^{m,n}$: 如果 r_k 部署在位置坐标 l_p 上, ONU o_m 能被 o_n 额外保护的作业量;

$\gamma_{k,p}$: 如果 r_k 部署在位置坐标 l_p 上, 整个网络额外被保护的作业量;

W : 网络中总共部署的无线路由器数量;

P : 当前整个网络已经被保护的作业量;

R_k : 为无线路由器 r_k 配置的射频接口数量。

下文为 MPTF 算法的伪代码流程。当部署第 k 个无线路由器 r_k 时, 遍历所有可能的候选位置, 对于任意候选位置 l_p , 首先在包括 l_p 的无线拓扑中通过 Dijkstra 路由算法为每个工作 ONU o_m 确定可能的备份 ONU 集合 $\Psi_{k,p}^m$ (见算法 1 第 5 行)。对于任一 ONU $o_n \in \Psi_{k,p}^m$, 保证 o_m 到 o_n 之间至少存在一条满足长度约束且射频容量非零的无线备份路径。已知无线备份路径上的节点集合 $N_{k,p}^{m,n}$, 工作 ONU o_m 可以在这条无线备份路径上承载的作业量主要受限于集合 $N_{k,p}^{m,n}$ 中剩余射频容量较小的节点。对于任意无线节点 $w_i \in N_{k,p}^{m,n}$, 定义 $\rho_k^{i,m} = C \cdot R - c_k^{i,m}$ 代表无线节点 w_i 的剩余射频容量中能够继续为工作 ONU o_m 备份的射频容量, 那么可计算出 ONU o_m 到 o_n 之间的这条无线备份路径上最多承载的作业量如下 (见算法 1 第 6 行):

$$\eta_{k,p}^{m,n} = \min \{ \rho_k^{i,m}, \forall i: w_i \in N_{k,p}^{m,n} \}, \quad \forall w, m, i, j, i \neq j \quad (18)$$

然后, 进一步考虑备份 ONU o_n 的剩余容量对业务保护的限制, 可计算出 o_m 能够被 o_n 保护的作业量为:

$$\gamma_{k,p}^{m,n} = \min \{ \eta_{k,p}^{m,n}, \mu_k^{m,n} \}, \quad \forall k, p, m, n, m \neq n \quad (19)$$

按照式(18)和式(19)可依次计算出集合 $\Psi_{k,p}^m$ 中每个备份 ONU 能够为 ONU o_m 保护的作业量。值得一提的是, ONU o_m 通过不同无线备份路径转移给各备份 ONU 的作业量不能共享无线节点的备份射频容量, 以免引起业务恢复过程中的资源争用。由此, 可推导出无线路由器 r_k 部署在位置坐标 l_p 上, 整个网络内所有工作 ONU 被保护的业

务量如下 (见算法 1 第 8 行):

$$\gamma_{k,p} = \sum_{m=1}^U \sum_{n: o_n \in \Psi_{k,p}^m} \gamma_{k,p}^{m,n}, \quad \forall k, p \quad (20)$$

MPTF 算法伪代码如下所示。

算法 1 MPTF 算法

输入 $l_p, U, C, R, d_m, \mu_m, \forall m, p$ 。

输出 $\delta_{m,n}, \lambda_p, R_k, \eta_{m,n}, \forall p, k, m, n: m \neq n$ 。

(1) 初始化 $\lambda_p \leftarrow 0, \delta_{m,n} \leftarrow 0, P \leftarrow 0, W \leftarrow 0, k \leftarrow 1, \eta_k^{m,n} \leftarrow 0,$

$\mu_k^{m,n} \leftarrow \mu_m, c_k^{i,m} \leftarrow 0, \forall p, k, m, n: m \neq n;$

(2) while $P \neq \sum_{m=1}^U d_m$ do

(3) for $p=1$ to $S \times S$ do

(4) for $m=1$ to U do

(5) 在满足跳数约束的情况下, 通过 Dijkstra 路由

算法计算 $\Psi_{k,p}^m$;

(6) $\forall o_n \in \Psi_{k,p}^m$, 按照式(18)和式(19)计算 $\gamma_{k,p}^{m,n}$;

(7) end for

(8) 按照式(20)计算 $\gamma_{k,p}$;

(9) end for

(10) 将 r_k 部署在位置坐标 $l_{\tilde{p}}$, 实现 $\gamma_{k,\tilde{p}}$ 最大化;

(11) 更新 $\delta_{m,n} \leftarrow 1, \forall m, n: o_n \in \Psi_{k,\tilde{p}}^m, \lambda_{\tilde{p}} \leftarrow 1,$

$P \leftarrow P + \gamma_{k,\tilde{p}}, W \leftarrow W + 1;$

(12) $\forall k, i, m, n: m \neq n$, 按照式(21)~式(24)分别计算

$\mu_{k+1}^{m,n}, \eta_{k+1}^{m,n}$ 和 $c_{k+1}^{i,m}$;

(13) 更新 $k \leftarrow k + 1;$

(14) end while

(15) $\forall m \neq n, \eta_{m,n} \leftarrow \eta_{W+1}^{m,n};$

(16) 根据式(25)计算 R_k 并删除冗余的备份射频;

(17) 输出 $\lambda_p, \delta_{m,n}, R_k, \eta_{m,n}, \forall p, k, m, n: m \neq n$

显然, 每个无线路由器 r_k 部署在不同位置将实现不同程度被保护的作业量。为了减少无线前端的部署成本, MPTF 算法将 r_k 部署在可实现最大化被保护作业量的最佳位置 $l_{\tilde{p}}$, 即 $\forall p \neq \tilde{p}, \gamma_{k,\tilde{p}} \geq \gamma_{k,p}$ 。

每完成一个无线路由器的部署, 执行以下更新步骤 (见算法 1 第 11 行): $\delta_{m,n} \leftarrow 1 (\forall m, n: o_n \in \Psi_{k,\tilde{p}}^m), \lambda_{\tilde{p}} \leftarrow 1, P \leftarrow P + \gamma_{k,\tilde{p}}, W \leftarrow W + 1$ 。同时, 可根据式(21)和式(22)分别计算 $\mu_{k+1}^{m,n}$ 和 $\eta_{k+1}^{m,n}$ (见算法 1 第 12 行)。

$$\mu_{k+1}^{m,n} = \mu_k^{m,n} - \gamma_{k,\tilde{p}}^{m,n}, \quad \forall k, m, n, m \neq n \quad (21)$$

$$\eta_{k+1}^{m,n} = \eta_k^{m,n} + \gamma_{k,p}^{m,n}, \quad \forall k, m, n, m \neq n \quad (22)$$

由于新增的无线备份路径经过的节点将预留额外的备份射频容量,相应地需要更新这些无线节点已分配给工作 ONU 的射频容量 $c_{k+1}^{i,m} (\forall i, m)$ 。为此,首先定义临时二进制变量 $\alpha_i^{m,n}$: 当无线节点 w_i 位于工作 ONU o_m 到其备份 ONU $o_n (o_n \in \Psi_{k,p}^m)$ 的无线备份路径上,即 $w_i \in N_{k,p}^{m,n}$, 那么 $\alpha_i^{m,n}$ 取值为 1; 否则,取值为 0, 如下:

$$\alpha_i^{m,n} = \begin{cases} 1, & w_i \in N_{k,p}^{m,n}, \forall m, n: o_n \in \Psi_{k,p}^m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

可得:

$$c_{k+1}^{i,m} = c_k^{i,m} + \sum_{n: o_n \in \Psi_{k,p}^m} \alpha_i^{m,n} \cdot \gamma_{k,p}^{m,n}, \quad \forall k, i, m \quad (24)$$

按照上面的迭代步骤,完成每个无线路由器的部署,直到所有工作 ONU 的业务量都得到完全的保护,即 $P = \sum_{m=1}^U d_m$ (见算法 1 第 2 行)。最后,为删除每个无线路由器上冗余的备份射频,计算无线路由器 r_k 需要配置的备份射频数量为:

$$R_k = \left\lceil \frac{1}{C} \max \{c_{w+1}^{i,m}, \forall m = 1, 2, \dots, O\} \right\rceil, \quad \forall k \quad (25)$$

其中, $\lceil x \rceil$ 表示大于或等于 x 的最小整数, $c_{w+1}^{i,m}$ 表示完成所有 W 个无线路由器部署以后,无线路由器 r_k 为工作 ONU o_m 预留的备份射频容量。因为不同工作 ONU 之间可能共享同一无线路由器的射频容量,为保证所有工作 ONU 转移业务的射频容量需求,每个无线路由器需要按照这些工作 ONU 当中最大容量需求进行射频配置。

5 性能评估

5.1 仿真设置

仿真中设置 20 km×20 km 的方形网络区域,其中随机部署 10 个 ONU (即 $O=10$)。指定 OLT 和分光器的位置,且主干光纤链路和分支光纤链路的长度分别限定在 15 km 和 5 km 范围内^[7]。将整个网络区域划分为 $S \times S$ 个单元格,其中, $S \in \{6, 7, 8, 9, 10\}$ 。每个无线路由器的备份射频最大数目为 $R=4$ ^[10]。定义无线路由器配置单个备份射频的成本作为无线子网部署成本的基本单位,并且每增设一个备份射频,部署成本相应增加 0.5 个单位。因此,无线路由器配置 1、2、3、4 个备份射频对应的部署成本分别为 1、1.5、2 和 2.5。所有 ONU 均等的分配 20 个单位容量。每个 ONU 的业务量在区间 $[5, d_{\max}]$ 内生成,其中, $d_{\max} \in \{8, 10, 12, 14, 16\}$ 。无线传输范围 T 在 $\{0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ km 之间变化。任意

一对无线节点间存在无线链路的条件是两个节点在彼此的传输范围之内且占用相同信道。

仿真中分别基于 ILP 模型和启发式算法进行网络规划,其中,ILP 模型在 Intel Core i5 2.30 GHz CPU 和 2 GB RAM 的主机上通过专业优化工具 ILOG CPLEX 12.1 求解。为分析成本效益优势,将文中提出的网络规划方法与广泛用于 PON 保护的备份光纤方法进行比较,并假设部署每公里光纤的成本是配置单个备份射频的无线路由器成本的 16 倍^[11]。

5.2 结果分析

在图 2 中,设置参数 $S=7$ 和 $T=0.7$ 。根据美国加利福尼亚大学戴维斯分校的研究结果^[12],在 FiWi 接入网中无线路径长度大于 3 跳的情况下,传输时延性能出现明显下降,因此本文在图 2 及后续的仿真场景中将无线备份路径长度限制设为 $H=3$ 。随着 ONU 业务量的变化,图 2 中对基于备份光纤保护的网路规划方法和基于无线重路由保护的网路规划方法(包括启发式方法和 ILP 方法)进行单位业务量平均网络部署成本的性能对比。由于备份光纤保护方法中忽略了业务量的可扩展性,其总部署成本与业务量无关,因此业务量的增加将导致单位业务量平均网络部署成本逐渐下降,但与此同时也会增加光纤链路的带宽压力。相比之下,本文提出的基于无线重路由保护的网路规划方法在进行备份射频容量和备份 ONU 容量分配时充分保证业务量带宽需求,因此在业务恢复过程中不会发生网络拥塞。随着业务量逐渐增加,本文提出的网路规划方法的总部署成本也逐渐升高,这导致单位业务量平均网络部署成本的波动变化。尽管如此,本网络规划方法始终保持比备份光纤保护方法更低的部署成本。当业务量取值区间从 $[5, 8]$ 增加到 $[5, 16]$ 时,本启发式网路规划方法相对于备份光纤保护方法节省的部署成本比率从 85.1% 变化到 66%。同时,可

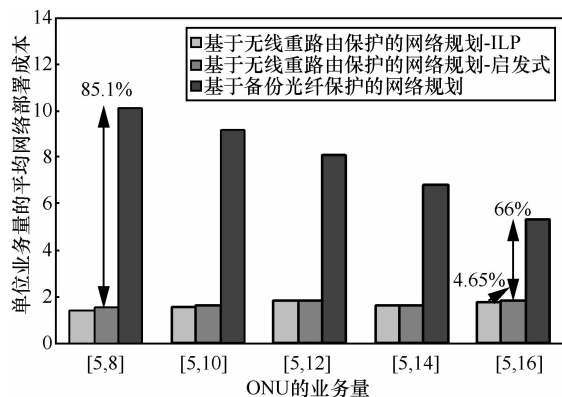


图 2 不同业务量对应的平均网络部署成本



观察到启发式网络规划方法的部署成本略高于 ILP 网络规划方法。然而,二者之间的差距始终限制在小于 4.65% 的范围内。更重要地,ILP 网络规划方法要求数小时量级的运行时间,而启发式网络规划方法的运行时间仅为数秒。当业务量从区间[5, 8]变化到区间[5, 16]时,启发式网络规划方法能节省超过 99.99% 的运行时间,见表 1。这些结果充分证明了启发式网络规划方法是产生次优解的高效方法。

图 3 显示出不同网格数量情况下 3 种方法的单位业务量平均网络部署成本的比较结果。设置参数 $d_{\max}=14$, $T=0.7$ 和 $H=3$ 。网络中更大的单元格数量意味着无线路由器的部署将有更多的候选位置,这有助于降低网络部署成本。因此,可以观察到当单元格数量较大时,本文提出的网络规划方法的部署成本逐渐降低。特别当单元格数目增加到 10×10 ,启发式网络规划方法相比备份光纤保护方法在减少部署成本方面获得了接近 81.4% 的优势。值得注意的是,当单元格数目过高时,ILP 的运行时间将不可接受。在这种情况下,启发式网络规划方法比 ILP 网络规划方法更具时效性和实用性。

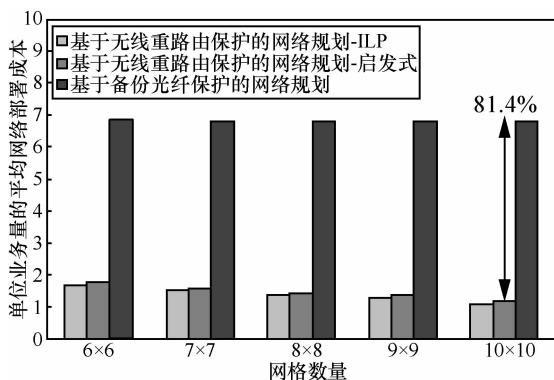


图 3 不同网格数量对应的平均网络部署成本

在图 4 中,设置参数 $d_{\max}=14$, $S=7$ 和 $H=3$,对不同无线传输范围的单位业务量的平均网络部署成本进行比较。当无线传输范围较大时,每个无线节点拥有更多的邻居节点,这有助于减少每条无线备份路径上无线路由器的数量。因此,本文提出的网络规划方法的平均部署成本表现

出逐渐降低的趋势。例如,当无线传输范围从 0.6 km 变化到 1 km 时,启发式网络规划方法的部署成本减少了 42.4%。相比之下,备份光纤保护方法的部署成本始终保持在恒定水平,即与无线传输范围无关。所以,当无线传输范围较大时,本文提出的网络规划方法在减少网络部署成本方面能实现出更为显著的优势。

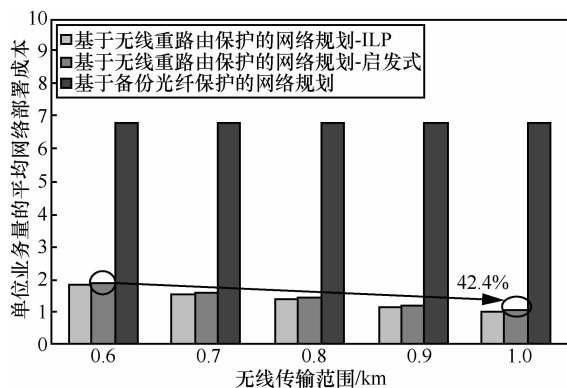


图 4 不同无线传输范围对应的平均网络部署成本

为进一步分析不同的无线备份路径长度约束 H 对平均网络部署成本的影响,仿真中设定参数 $d_{\max}=14$, $S=7$ 和 $T=0.7$,对基于无线重路由保护的网路规划方法与基于备份光纤保护的网路规划方法在 $H \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ 的情况下进行部署成本比较,结果如图 5 所示。根据无线重路由保护方法,每个工作 ONU 与它的备份 ONU 之间应该至少存在一条可用的无线备份路径,且路径长度小于或等于 H 跳。较大的 H 有利于减少无线备份路径所需的无线路由器和备份射频数量,因此有利于降低部署成本。例如,当跳数限制 H 从 2 增加到 6 时,本文提出的启发式网络规划方法中平均每单位业务量需要的网络部署成本降低 24.3%。此外,启发式网络规划方法与 ILP 网络规划方法始终保持相当接近的网络部署成本,且差距小于 5.7%。

6 结束语

本文研究了可生存 FiWi 接入网的成本最小化规划问

表 1 启发式网络规划方法与 ILP 网络规划方法的比较

ONU 的业务量	ILP 网络规划方法		启发式网络规划方法	
	平均网络部署成本	运行时间/s	平均网络部署成本	运行时间/s
[5, 8]	1.46	3 168.58	1.51	0.034
[5, 10]	1.52	4 950.42	1.58	0.086
[5, 12]	1.75	5 675.81	1.82	0.125
[5, 14]	1.58	6 759.83	1.62	0.203
[5, 16]	1.72	8 015.92	1.80	0.225

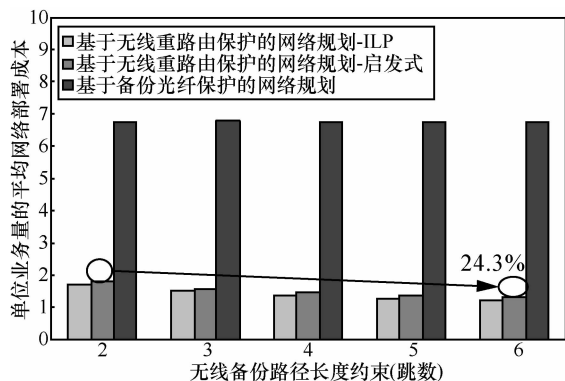


图5 无线备份路径的不同跳数限制对应的部署成本

题,针对典型的单分支光纤链路故障情况提出一种基于无线重路由保护的网路规划方法。以最小化前端无线网络部署成本为目标,重点解决 ONU 备份容量分配、无线路由器部署、备份射频配置的联合优化问题。通过 ILP 模型对联合优化问题进行了规范的数学描述,并通过专业优化工具 ILOG CPLEX 12.1 获得小规模网络的最优解。考虑到大规模网络场景中 ILP 求解的耗时特征,本文还提出高效的启发式算法。结果表明,本文提出的网路规划方法能实现比传统备份光纤保护方法更低的网络部署成本,尤其在候选位置较密集、无线传输范围较大以及允许无线备份路径较长的场景中,这种成本效益优势会更加明显。

参考文献:

- [1] LIU Y J, GUO L, WEI X T. Optimizing backup optical-network-units selection and backup fibers deployment in survivable hybrid wireless-optical broadband access networks[J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2012, 30 (10): 1509-1523.
- [2] LIU Y J, GUO L, GONG B, et al. Green survivability in fiber-wireless (FiWi) broadband access network[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(2): 68-80.
- [3] GUO L, LIU Y J, WANG F Z, et al. Cluster-based protection for survivable fiber-wireless (FiWi) access network [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(11): 1178-1194.
- [4] CHARNI R, MAIER M. Total cost of ownership and risk analysis of collaborative implementation models for integrated fiber-wireless smart grid communications infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2264-2272.
- [5] DAI Q L, SHOU G C, HU Y H, et al. A general model for hybrid fiber-wireless (FiWi) access network virtualization [C] // The IEEE International Conference on Communications Workshops, June 9-13, 2013, Budapest, Hungary. New Jersey:

IEEE Press, 2013: 858-862.

- [6] RANAWEERA C, WONG E, LIM C, et al. Architecture discovery enabled resource allocation mechanism for next generation optical-wireless converged networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(9): 1083-1094.
- [7] BURAK K, MOUFTAH H T. Reliable and fast restoration for a survivable wireless-optical broadband access network [C] // The International Conference on Transparent Optical Network, June 27-July 1, 2010, Munich, Germany. [S.l.: s.n.], 2010: 1-4.
- [8] LAI C L, LIN H T, CHIANG H H, et al. Design and analysis of a frame-based dynamic bandwidth allocation scheme for fiber-wireless broadband access networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6 (5): 486-500.
- [9] LIU Y J, SONG Q Y, MA R, et al. Protection based on backup radios and backup fibers for survivable Fiber-Wireless (FiWi) access network [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(3): 1057-1069.
- [10] REAZ A S, RAMAMURTHI V, TORNATORE M, et al. Cloud-integrated WOBAN: an offloading-enabled architecture for service-oriented access networks [J]. Computer Networks, 2014, 68(5): 5-19.
- [11] SARKAR S, YEN H H, DIXIT S, et al. Hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN): network planning and setup [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(11): 12-21.
- [12] SARKAR S, YEN H H, DIXIT S. DARA: delay-aware routing algorithm in a hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN)[C]//The IEEE International Conference on Communications, June 24-28, 2007, Glasgow, Scotland. New Jersey: IEEE Press, 2007: 2480-2484.

[作者简介]



谭红君(1977-),女,四川工程职业技术学院讲师,主要研究方向为电力电子通信、网络规划。

解亚敏(1990-),女,东北大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为下一代光接入网。

刘业君(1986-),男,东北大学信息科学与工程学院副教授,主要研究方向为光纤—无线融合接入网。