

带有生存性感知的低成本光无线混合网络无线功能部署策略

王汝言^{①②} 刘辉^{①②} 吴大鹏^{*①②} 张炎^③ 向罗勇^③

^①(重庆高校市级光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^③(重庆电信研究院 重庆 401336)

摘要: 光无线混合网络的生存性保障程度与部署成本之间存在矛盾。为提高网络资源利用率, 该文提出一种低成本的无线功能部署策略。根据网络中无线功能部署情况, 综合考虑网络生存性保障程度及部署成本两方面因素, 在此基础上, 提出基于向量评价的二进制粒子群算法实现其优化过程, 进而, 由进化得到的种群粒子不断调整光网络单元选取, 以较低的成本实现较强生存性的网络部署。结果表明所提出的无线功能部署策略能有效提高网络的生存性, 并大幅度的降低网络成本。

关键词: 光无线混合网; 生存性; 低成本; 粒子群算法

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)06-1354-08

DOI: 10.11999/JEIT150872

Low-cost Optical Network Unit Deployment Strategy with Survivability Aware in Hybrid Optical-wireless Broadband Access Networks

WANG Ruyan^{①②} LIU Hui^{①②} WU Dapeng^{①②} ZHANG Yan^③ XIANG Luoyong^③

^①(Key Laboratory of Optical Communication and Network, Chongqing 400065, China)

^②(School of Telecommunication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^③(Chongqing Institute of Telecommunications, Chongqing 401336, China)

Abstract: There is a contradiction between the degree of survivability and the cost of deployment in Hybrid Optical-Wireless Broadband Access Networks (HOWBAN). To improve the network resources utilization, a low-cost Optical Network Unit (ONU) deployment strategy is proposed. According to the deployment of wireless functions in the network, the degree of network survivability and the deployment are considered in the optimization process of vector evaluated binary particle swarm optimization. Furthermore, to deploy the network with low cost while at the same time guaranteeing a high degree of survivability, the selecting of optical-network-units can be decided dynamically by the evolution of particle. The results show that low-cost ONU deployment strategy can effectively improve the network survivability, and reduce network cost.

Key words: Hybrid Optical-Wireless Broadband Access Networks (HOWBAN); Survivability; Low-cost; Particle swarm algorithm

1 引言

随着通信技术的发展和多媒体业务的迅速普及, 接入网开始向高带宽和高移动性演进, 同时网络运营商也需要降低接入成本并提高服务质量。在

这种宽带移动化和移动宽带化的趋势下, 融合具有高带宽和高可靠性的光网络和具有高移动性、高灵活性的无线网络成为下一代接入网的重要解决方案之一。

光无线混合网络 (Hybrid Optical-Wireless Broadband Access Network, HOWBAN) 由光域和无线域两部分组成, 其中光域代表始于光线路终端 (Optical Line Terminal, OLT) 止于光网络单元 (Optical Network Unit, ONU) 的无源光网络 (Passive Optical Network, PON) 网络, 而无线域则代表前端的无线网状网络 (Wireless Mesh Network, WMN)。因此, HOWBAN 具有无源光网络的高带宽、传输稳定特性, 同时也具有无线网络易部署、

收稿日期: 2015-07-21; 改回日期: 2016-02-19; 网络出版: 2016-03-25

*通信作者: 吴大鹏 wudapengphd@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61371097), 重庆市自然科学基金重点基金(CSTC2013JJB40006), 重庆市青年科技人才培养计划(CSTC 2014KJRC-QNRC40001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61371097), Chongqing Natural Science Foundation (CSTC2013JJB40006), Youth Talents Training Project of Chongqing Science & Technology Commission (CSTC2014KJRC-QNRC40001)

支持移动性特征，能够为终端用户提供更快速、更高质量的服务。此外，HOWBAN的前端可应用于无线局域网、无线城域网及传感网^[1]等多种无线网络中，具有很强的市场前景。从HOWBAN的结构来说，其前端的无线域具有自愈性，而树形结构的光域更易出现故障；同时，HOWBAN具有高带宽的特性，尤其是光域中携带着大量的数据流量，光域中设备故障将导致大量的业务中断^[2,3]。因此，有效的生存性保障机制对改善网络性能和提高网络可靠性至关重要。

目前，针对HOWBAN的特点，国内外研究人员提出了多种生存性保障机制。文献[4]指出支线光纤故障是HOWBAN后端光域的典型故障，且利用前端的无线域转移受故障影响的数据可以实现网络恢复。在同时考虑网络中的容量和覆盖范围的情况下，文献[5]采用线性规划模型部署HOWBAN中的ONU和网状网节点(Mesh Point, MP)，从而解决了由支线光纤发生故障所引起的服务中断问题。文献[6]提出了一种最优化备用ONU选取及最优化备用光纤部署算法。该算法通过模拟退火算法选取备用ONU，以最小跳数的方式实现了故障ONU到备用ONU之间的倒换，进而减小了其故障恢复时延。文献[7]对ONU故障级的恢复路由进行了改进，通过建立备用无线路径以确保故障ONU到其可替代ONU之间存在有效路径。但是由于备用路径只有在ONU故障情况下才可以利用，从而降低了资源利用率。文献[8]提出了一种基于辅助图的保障机制，解决了故障恢复过程中的最大流最小跳问题，从而提高了资源利用率。但是，上述机制均假设网络中的ONU皆具有无线功能，未能根据网络的生存性保障程度对其ONU进行合理的无线功能部署。同时，由于受支线光纤故障概率的影响，受故障影响的数据往往只在部分ONU之间进行转发，对网络中所有的ONU进行无线功能部署将导致网络资源利用率降低，部署成本较高。

根据HOWBAN的特殊结构，利用无线域中多跳路径转发受光域节点故障影响的业务，能够有效提高故障状况下服务的连续性，从而增强网络生存性。然而，在实际应用中，不具有无线功能的ONU无法利用无线路径完成数据转发，使其无法为故障的支线光纤提供保护；同时由于各个ONU对网络生存性影响存在差异，对网络生存性影响较小的ONU进行无线功能部署将造成网络资源浪费，导致网络成本增加。可见，网络中ONU的无线功能部署情况将直接影响网络生存性和网络成本。因此，合理地ONU进行无线功能部署是设计低成本、

高可靠性HOWBAN的关键。针对上述问题，本文提出一种带有生存性感知的低成本HOWBAN无线功能部署策略(Low-cost ONU Deployment Strategy with Survivability aware, LDSS)，采用定量分析方法评估网络生存性，从而根据当前的ONU无线功能部署情况准确量化得到网络可靠度，进而，利用多目标优化方法有效地均衡网络成本和网络可靠度，以最大资源利用率为目标完成ONU的无线功能部署。所提出的策略能够在满足网络生存性的同时，达到提高网络资源利用率及降低网络成本的目的。

2 网络生存性评估

网络生存性表现为网络抗毁能力，网络生存性受多方面因素的影响，难以对其进行具体描述^[9]。作为一种可以同时承载无线业务和有线业务的接入网络，其应用环境复杂，自然灾害或人为因素都将导致网络发生故障。自然灾害的发生具有不确定性；人为的破坏是有预谋的，但是却难以获知其具体的破坏信息。可见，HOWBAN中的故障发生具有随机性。因此，本文采用一种基于概率的定量分析方法，通过分析节点在故障作用下链路能正常工作的概率来评估网络生存性。

2.1 链路故障概率分析

现将长度为 L 的光纤链路划分成 N 段长度为 ΔL 的光纤链路，其中每段的链路的长度为无穷小。对于随机故障而言，由于故障的发生具有不确定性，且任意段光纤链路都存在发生故障的可能性，可认为其故障发生概率均相同；同时光纤中任意一段链路发生故障不会对其他各段故障发生造成影响，其故障发生相互独立。可见，该随机故障是均匀且独立的作用于光纤链路中，现假设该随机故障发生的概率为 λ ，当光纤链路的长度趋近与无穷小时，通常可认为其链路发生故障的概率为故障概率与链路长度之积^[10]，如式(1)所示：

$$P(\Delta L) = \lambda \Delta L \quad (1)$$

已知将长度为 L 的光纤链路分成 N 段长度为 ΔL 的链路，只有当其中的每段链路均不发生故障时，该链路才处于正常工作状态。采用极限求解原理，由长度为 L 的光纤链路正常工作的概率可获知其发生故障的概率如式(2)所示。可见，光纤链路故障概率随光纤链路长度和随机故障概率的增加呈指数变化，此时其故障概率将迅速增大。

$$P(L) = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \left(1 - (1 - \lambda \Delta L)^{L/\Delta L} \right) = 1 - e^{-\lambda L} \quad (2)$$

由于馈线光纤发生故障将导致 OLT 与所有的 ONU 之间传输中断,从而导致大量的数据丢失。因此,为了提高网络生存性,从 OLT 到分光器的光纤链路采用 1+1 热备份保护方式,当工作光纤发生故障时,OLT 通过检测链路信息获知主干光纤故障,进而 OLT 自动发起保护倒换,使用备用光纤传输数据^[1]。此种馈线保护树形光网络可以有效提高网络生存性,相对于成本过大的全保护措施来说,可以降低网络成本^[2]。显然,当 HOWBAN 后端馈线保护树形光网络中主干光纤与备份光纤同时发生故障时,OLT 与分光器之间无法正常通信。通常主备用光纤的长度均为 L ,则由主备份光纤同时故障的概率可计算 OLT 与分光器之间的链路正常工作的概率。

$$P_0 = 1 - (1 - e^{-\lambda L})^2 \quad (3)$$

HOWBAN 采用具有无线功能的 ONU 作为网状网入口节点(Mesh Portal Point, MPP)来完成无线域节点与光域节点之间的数据传输,不具有无线功能的 ONU 则用于承载传统光网络中的业务。因此,具有无线功能的 ONU 之间可以通过无线路径建立连接,从而为与其所连的支线光纤提供保护。然而,与不具有无线功能 ONU 相连的支线光纤在其故障状态下,由于不存在冗余路径,导致数据无法得到转发。因此,为了获知网络中支线光纤受保护情况,需要得到网络中 ONU 的无线功能部署信息。本文引入二进制常数用于描述 ONU 的部署情况,该参数表示当前的 ONU 是否进行了无线功能部署,其定义如式(4)所示。

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{ONU}_i \text{进行了无线功能部署} \\ 0, & \text{ONU}_i \text{没有进行无线功能部署} \end{cases} \quad (4)$$

如前所述,HOWBAN 中前端无线网络能够为支线光纤提供保护,即当支线光纤出现故障时,若与该支线光纤相连的 ONU 具有无线功能,则受故障影响的数据可以通过前端的无线节点发送到其他 ONU 中。由于 HOWBAN 前端的无线网络存在多条可供数据转发的无线路径,从而具有自愈性。因此,通过计算与 ONU 所连的支线光纤及与具有无线功能的 ONU 所连的支线光纤同时故障的概率可获知 ONU 与分光器之间无法正常通信的概率。

$$\begin{aligned} P(\text{ONU}_i) &= (1 - e^{-\lambda L_i})(1 - x_i x_1 e^{-\lambda L_1}) \\ &\quad \cdot (1 - x_i x_2 e^{-\lambda L_2}) \cdots (1 - x_i x_m e^{-\lambda L_m}) \\ &= (1 - e^{-\lambda L_i}) \prod_{j \neq i, j=1}^m (1 - x_i x_j e^{-\lambda L_j}) \end{aligned} \quad (5)$$

通过式(5)可知,在参数 x_i 和 x_j 同为 1 的情况下,表明 ONU_i 和 ONU_j 都进行了无线功能部署,则可以在它们之间通过无线路径传输数据。此外,

ONU 与分光器之间可以通过两种方式建立连接:一种是通过该 ONU 与分光器之间支线光纤直接通信;另一种是通过将数据发送到其他的 ONU 内,并利用该 ONU 所连的支线光纤将数据传输到分光器中。

在后端采用馈线保护树形光网络和前端采用 WMN 的 HOWBAN 中,只有当 ONU 与分光器及 OLT 与分光器之间同时正常工作时 ONU 才能与 OLT 正常通信。按照上述所得的 OLT 与分光器之间不能正常通信的概率及 ONU 与分光器之间不能正常通信的概率可知,在故障作用下,ONU_{*i*} 与 OLT 之间能正常通信的概率如式(6)所示:

$$P'_i = \left[1 - (1 - e^{-\lambda L})^2 \right] \cdot \left[1 - (1 - e^{-\lambda L_i}) \prod_{j \neq i, j=1}^m (1 - x_i x_j e^{-\lambda L_j}) \right] \quad (6)$$

2.2 网络生存性定量分析

如前所述,增强后端光域的生存性对于提高 HOWBAN 的生存性至关重要。在 HOWBAN 中,来自用户端的业务均汇聚到 ONU 中,并且在 ONU 到 OLT 的上行信道采用时分多址访问机制,来自 ONU 的业务全部传输到 OLT 中;OLT 到 ONU 的下行方向采用广播机制,OLT 业务分发到所有的 ONU 中。因此,HOWBAN 中后端光域中的业务分布类型属于集中型,即业务分布主要集中在 OLT 和 ONU 之间,其中 OLT 作为枢纽节点。假设来自用户端的业务可以无故障地传输到 ONU 中,此时由于 ONU 与 OLT 之间的链路存在故障,将导致业务数据丢失,最终能成功从 ONU 传输到 OLT 的业务量即为网络能完成的业务量。显然,网络的生存性越强,ONU 与 OLT 之间正常通信的概率也就越高,从而业务丢失也会越低。因此,网络能完成的业务量能够在一定程度上反映网络的生存性。

在后端树形结构的光域中,已知业务服从集中型分布,OLT 作为枢纽节点,若来自 ONU 的业务量均相同,则任意 ONU 与 OLT 之间的链路发生故障都将导致业务量的丢失。因此网络生存性的定义为在故障发生时,网络能够完成的业务量占正常工作条件下所能完成的业务量的比重^[13]。显然,在故障作用导致链路无法正常工作的情况下,网络能完成的业务量和 ONU 与 OLT 之间的通信概率有关。

$$S(\lambda) = \sum_{i=1}^N P'_i S_i(\lambda) \quad (7)$$

其中, P'_i 表示 ONU_{*i*} 与 OLT 之间的通信概率, $S_i(\lambda)$ 表示来自 ONU_{*i*} 的业务量。

如前所述,网络生存性表现为网络抗毁能力,显然在故障作用下网络能完成的业务量占正常工作

状态下能完成的业务量比重越大, 则表明此种网络的抗毁能力越强, 此时网络的生存性强度也就越高。根据生存性的定义将网络生存性强度量化所得的结果称之为网络可靠度, 已知生存性定义为在故障作用下网络能完成的业务量占正常工作下的比重, 因此该参数的具体计算方法即为网络故障状态下能完成的业务量与网络正常工作下所完成业务量的比值为

$$V(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{N \cdot S_i(\lambda)} = \frac{\sum_{i=1}^N P'_i}{N} \quad (8)$$

其中, N 表示 HOWBAN 中 ONU 的数目, $S(\lambda)$ 表示网络能完成的业务量, $S_i(\lambda)$ 表示来自 ONU _{i} 的业务量, 并假设来自各 ONU 的业务量均相同。由式(8)可知, 网络可靠度大小是 ONU 和 OLT 之间正常通信概率的平均值, 因此 ONU 与 OLT 之间正常通信的概率越大, 则网络可靠度越强。

3 ONU 无线功能部署策略

根据 HOWBAN 结构可知, 若某个 ONU 具有无线功能, 则其能够通过无线路径传输数据, 从而在支线光纤故障时, 转移受故障影响的数据。HOWBAN 中 ONU 无线功能部署与网络生存性和网络成本直接相关。若具有无线功能的 ONU 数目过大, 则使一部分对生存性影响较小的 ONU 具有了无线功能, 从而降低了网络资源利用率, 同时增加了网络成本; 若具有无线功能的 ONU 数目过少, 则多数支线光纤无法得到有效保护, 导致网络生存性降低。因此, 网络中 ONU 进行无线功能部署对于提高网络生存性及优化资源利用率来说至关重要。

3.1 多目标优化

显然, 网络中具有无线功能的 ONU 越多, 则受保护的支线光纤越多, 网络的生存性也就越强; 然而此时, 需要进行无线功能部署的 ONU 过多, 导致网络成本增大。可见, 网络成本和网络生存性是两个相互影响、相互冲突的变量, 即其中一个变量的改善将导致另一个变量的衰减, 无法使两个变量同时达到最优化。为了解决上述问题, 本文在二进制粒子群算法^[14]和基于向量评价的粒子群算法^[15]的基础上, 提出了一种基于向量评价的二进制粒子群优化(Vector Evaluated Binary Particle Swarm Optimization, VEBPSO)算法, 用于均衡网络生存性和网络成本, 以使得两个变量尽可能达到最优化。

在本文提出的 VEBPSO 中, 任意个体可被看作为没有体积和质量的粒子, 且每个粒子由当前位置、当前速度、最优位置 3 部分组成, 其中粒子当前位

置根据粒子当前速度得到, 且每个粒子位置代表一种 ONU 无线功能部署方案, 同时粒子当前速度受粒子最优位置影响, 粒子的最优位置代表粒子采用目标函数所求得的最优解。VEBPSO 依旧采用二进制粒子群算法的单目标优化方法, 即每个粒子将网络可靠度或者部署成本作为目标函数, 并根据自身的最优位置和群体全局最优位置更新自己的位置和速度, 各粒子由于受群体全局位置的影响, 能很快搜索到全局最优位置附近; 同时结合基于向量评价的粒子群算法的思想, 即子群中粒子的更新过程接受来自另一子群的全局极值信息, 从而使分别维持着网络可靠度和部署成本的粒子子群相互作用, 进而实现多目标最优化。

在 ONU 无线功能部署过程中, 网络成本与需要进行无线功能部署的 ONU 的数量和单个 ONU 的无线功能部署成本有关, 若单个 ONU 的部署成本用 φ 表示, 则网络成本的计算方法为

$$\psi_{\text{cost}} = \varphi \sum_{i=1}^N x_i \quad (9)$$

按照上述网络成本和网络可靠度的计算方法, 可将式(8)和式(9)作为目标函数用于评价群体中的每个粒子, 即根据当前的 ONU 无线功能部署方案得到其网络成本和网络可靠度, 从而利用基于向量评价的二进制粒子群算法实现粒子种群的进化, 进而得到新的部署方案。该算法的核心思想是: 根据前述单目标优化函数的个体评价方法, 由粒子的当前位置可获知其网络成本和网络可靠度, 然后分别从中选择一半较优的粒子作为下一代的两个子粒子群。子群间共享彼此社会信息, 即一个子粒子群中速度的改变受到另一个粒子群中全局极值的影响, 从而实现多目标优化的目的。每个粒子的速度更新主要受到粒子当前速度、个体极值、全局极值 3 个方面的影响, 其具体计算方法为

$$v_{ij}(t+1) = w \times v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_2 (g_i - x_{ij}(t)) \quad (10)$$

其中, w 表示惯性权重, 该值与算法的收敛速度有关。 r_1 和 r_2 为均匀分布于[0,1]的随机数。 c_1 和 c_2 为加速因子, 它们分别用于调节粒子到自身最佳位置和全局最佳位置的步长。若 $p_{ij}(t)$ 表示以生存性为目标函数的粒子群中粒子搜索到的最佳位置, g_i 表示以网络成本为目标函数的粒子群搜索到的全局最佳位置。可见, 在速度更新过程中, 一个子粒子群中速度的改变受到另一个子粒子群中全局极值的影响, 从而使粒子又朝着另一个目标函数的方向趋近。因此, 网络成本和网络可靠度在优化过程中相互作

用,从而达到两个目标函数的优化,进而实现低成本高生存性的网络部署。

3.2 ONU 选取策略

由当前网络中 ONU 的无线功能部署情况,可以获知网络成本和网络可靠度。根据所提出的多目标优化算法,选取需要进行无线功能部署的 ONU,从而改善网络成本和网络可靠度,以达到降低网络成本和提高网络生存性的目的。因此,在 ONU 的无线功能部署过程中,合理、有效的 ONU 选取策略至关重要。

网络随机部署 ONU 的无线功能,即生成初始种群,每个粒子由 N 维的二进制序列构成,其中 $x_i = 1$ 表示 ONU_i 具有无线功能; $x_i = 0$ 表示 ONU_i 不具有无线功能。进而,采用单目标优化的方法,分别利用可靠度和部署成本计算粒子适应值,并根据适应值的大小在种群中选择一半较优粒子生成子种群。接着计算粒子的个体极值和全局极值,即根据适应值的大小搜索个体所经历的个体最优位置和全局最优位置,且根据式(10)对粒子速度进行更新,并同时改变粒子自身位置,进而获得新的 ONU 无线功能部署方案。然后将所有的粒子合并为一个新的粒子种群,并更新其粒子适应值。对于多目标问题的求解,由于各个目标函数之间是相互影响、相互冲突的,导致不一定存在对于所有目标函数都为最优的解。因此,多目标优化的最终目标是在权衡和折中处理各子目标的情况下,以达到各个子目标尽可能最优。将种群中的粒子与最优解集中的粒子进行比较,若种群中的粒子在可靠度和部署成本两方面同时优于最优解集中的粒子,则该种群中的粒子优于最优解集中的粒子;若种群中的粒子相对于最优解集中的粒子而言,仅在可靠度或者部署成本的单一方面表现最优特性,此时两个粒子之间无法进行比较,则判断其为 Pareto 最优解。按照上述两种情况,可根据粒子的适应值大小判断其是否为最优解。最后将最优解粒子加入最优解集中,若原最优解集中的粒子在可靠度和部署成本两方面都次于该粒子,则将其删除,同时原最优解集中仅在可靠度或部署成本单一方面表现较好特性的粒子得以保留,从而实现最优解集合的更新。可见,在最优解集合中的粒子之间是无法进行比较的,比如,若粒子在可靠度方面优于另外一个粒子时其在部署成本方面必定次于该粒子;若粒子在部署成本方面优于另外一个粒子时其在网络可靠度方面必定次于该粒子。因此 ONU 选取策略无法实现在部署成本和网络可靠度两个方面都最优的解。但 ONU 选取策略可有效权衡部署成本和网络可靠度之间的关系,从而得到使部署成本和网络可靠度都表现较好性能的最优解集合,即该 ONU 选取策略

能够在给定成本下实现网络可靠度的增强,同理也能够在给定网络可靠度的情况下,实现部署成本的最低化。因此,在 HOWBAN 无线功能部署策略中,可根据实际的可靠度需求和部署成本情况,选择最佳部署方案。

如前所述,由本文提出的基于向量评价的二进制粒子群算法实现 ONU 的选取过程可知,最优解集合中的粒子在可靠度和部署成本两方面都表现出较优性能,因此结合该粒子对网络中的 ONU 进行无线功能部署可实现低成本和高可靠度的网络设计。本文所提出的 ONU 选取策略的伪代码如表 1 所示。

表 1 ONU 选取策略伪代码

Algorithm(Survivability aware Low-cost ONU Deployment Strategy pseudo-code)

```

1: Initialize: maxiteration  $m$   $N$ 
2: for( $i = 1; i \leq m; i++$ ) //  $m$  为种群中粒子数目
3: {
4:   for( $j = 1; j \leq N; j++$ ) //  $N$  为粒子维度,即网络中的 ONU 数目
5:   {
6:     CreateInitialPopulation; //生成初始种群
7:   }
8: }
9: while( iteration  $\leq$  maxiteration )
10: {
11:   CalculateParticleFitness( $f_{cost}, f_{rel}$ ); //计算粒子基于成本和可靠度的适应值
12:   SortParticle(FitnessSize); //按照适应值大小对粒子进行重新排序
13:   for(ParticlePopulation:  $m/2$ ) //在种群中选择一半较优个体到子种群中
14:   {
15:     CreatCostPopulationAndReliabilityPopulation; //生成子种群
16:   }
17:   CalculatePersonalBestAndGlobalBest( $p, g$ ); //计算子种群的个体极值和全局极值
18:   UpdateParticleVelocity( $v_{ij}$ ); //更新粒子速度
19:   UpdateParticlePosition( $x_{ij}$ ); //更新粒子位置
20:   CreatNewPopulation; //生成新的种群
21:   UpdateParticleFitness( $f'_{cost}, f'_{rel}$ ); //更新粒子适应值
22:   if(OptimalParticle || ParetoOptimalParticle); //若粒子为最优解则将其放入最优解集合中
23:     OptimalSetReceive(Particle);
24:   else
25:     OptimalSetRefuse(Particle); //若粒子不为最优解则拒绝将其添加到最优解集合中
26:   UpdateOptimalSet; //更新最优解集合
27:   iteration = iteration + 1;

```

4 数值结果分析

本文采用 matlab 仿真平台对所提出无线功能部署策略的性能进行验证, 分别与其他 2 种典型无线功能部署策略进行比较, 其中包括文献[13]中所提出的 US 部署策略和 rand 部署策略。US 部署策略根据需要进行无线功能部署的 ONU 数目, 以一定的 ONU 数间隔依次选取 ONU, 从而使具有无线功能的 ONU 均匀地分布在网络中。rand 部署策略通过随机选取 ONU 以实现 HOWBAN 无线功能部署。

为了验证本文所提出无线功能部署策略的有效性, 本文在不同故障概率及不同网络规模下对上述无线功能部署策略进行了分析比较, 主要性能包括网络可靠度和单位成本可靠度。单位成本可靠度定义为网络可靠度与归一化部署成本的比值关系, 如式(11)所示, 其中归一化部署成本为网络当前部署成本与网络最大部署成本的比值, RS 为单位成本可靠度, $V(\lambda)$ 为网络可靠度, N 为网络中 ONU 的总数, φ 为单个 ONU 的部署成本, ψ_{cost} 为网络部署成本。

$$RS = V(\lambda) [N\varphi/\psi_{cost}] \quad (11)$$

由式(11)可知网络可靠度与归一化部署成本皆为 0~1 之间无量纲的变量, 其比值所得的单位成本可靠度可综合衡量网络可靠度与部署成本, 网络可靠度越高且同时部署成本越低, 则单位成本可靠度越大。由于网络可靠度与部署成本是两个相互冲突的变量, 即当一种无线功能部署策略在可靠度方面优于另一种无线功能部署策略时, 则该部署策略的部署成本往往高于另一种策略, 此时这两种部署策略之间由于没有统一的度量参数, 从而无法进行部署策略的优劣比较。现将无线功能部署策略的有效性定义为单位成本下能实现的网络可靠度, 若无线功能部署策略的单位成本可靠度越高, 则可认为其有效性越好。

如前所述, 由 ONU 选取策略可得一组最优解集合粒子, 其中各粒子分别代表不同的无线功能部署方案, 且各部署方案皆在网络可靠度和部署成本两方面都表现较优性能。利用单位成本可靠度对不同部署策略的有效性进行分析, 由最终得到的结果可知单位成本可靠度最大的部署策略其单位成本能实现的网络可靠度最高, 此时该部署策略的最优解可实现最优化网络可靠度和部署成本的目的。因此通过该部署策略对网络中指定的 ONU 进行无线功能部署能以较低的成本实现较强可靠度的网络部署。

具体仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数设定	参数数值
网络区域(km) ²	25×25
馈线光纤长度(km)	15
支线光纤长度(km)	1~10
故障概率	0.0001~0.001 ^[16]
ONU 数目	16~128
种群规模	20
迭代次数	100

4.1 不同故障概率下的网络性能

网络可靠度直观地反映了网络的生存性强度, 当网络中的 ONU 数为 16 时, 由图 1 所示结果可知在不同故障概率下, 有无无线功能部署情况的网络可靠度随故障概率的增加呈上升趋势, 其主要原因在于, 随着故障概率的增加, 网络中 ONU 与 OLT 之间正常通信的概率减小, 从而导致网络的可靠度降低。显然, 在具有无线功能部署的情况下, HOWBAN 前端的无线域能够为部分的支线光纤故障提供保护, 从而使网络的可靠度增强。结果表明, 有无线功能部署网络的可靠度较无无线功能部署的网络提高了 0.4。

图 2 给出了各 ONU 选取数目在不同故障概率下的单位成本可靠度。从结果可知, 当网络中的 ONU 数目为 16 时, 3 种 ONU 数目选取方式的单位成本可靠度均随着故障概率的增加而不断降低。其主要原因在于, 当选取部署无线功能的 ONU 数目一定时, 故障概率的增加将导致网络可靠度降低, 由于此时网络部署成本固定不变, 从而使单位成本可靠度不断降低。当 ONU 的选取数为 4 时, 与另外两种选取方式相比, 其单位成本可靠度最高, 且随着故障概率的增加, 其单位成本可靠度的变化也较大。同时, 当 ONU 的选取数为 12 时, 单位成本可靠度始终维持在 1.0~1.3 之间, 变化缓慢。可见, 在小规模的 HOWBAN 中, ONU 的选取数目对单位成本可靠度的影响较大。

4.2 不同网络部署成本下的网络可靠度

不同部署成本下的网络可靠度如图 3 所示。从结果可知, 随着网络部署成本的增加, 3 种无线功能部署策略的网络可靠度均呈现出逐渐上升的趋势。其主要原因在于, 网络部署成本与需要进行无线功能的 ONU 数目有关, 因此选取进行无线功能部署的 ONU 数目越多, 其部署成本也就越大; 同时随着具有无线功能的 ONU 增加, 则能为更多的支线光纤提供保护, 从而使网络的可靠度增加。由于 LDSS 采用了低成本高可靠度的部署策略, 其网

络可靠度较其他两种部署策略都有明显的提高，同时，由于各 ONU 对网络可靠度的影响不同，而 US 与 rand 部署策略的无线功能部署主要集中在这部分对网络可靠度影响较小的 ONU 中，将导致网络可靠度出现缓慢增幅的情况。

4.3 不同网络规模下的单位成本可靠度

当网络中的 ONU 数目为 16 时，不同 ONU 选取数目下的单位成本可靠度如图 4 所示。如前所述，当网络规模较小时，选取进行无线功能部署的 ONU 数目对单位成本可靠度的影响较大，因此随着 ONU 选取数目的增加，3 种无线功能部署策略均呈下降趋势。从结果可知，LDSS 部署策略与 US 和 rand 部署策略相比，在不同的 ONU 选取数目下其单位成本可靠度均有所提高，可见，当网络的部署成本足够大时，LDSS 部署策略将使网络可靠度得到一个显著的提升。其主要原因在于，LDSS 部署策略利用多目标优化方法有效地均衡了部署成本和网络可靠度，实现了以最大资源利用率为目标完成 ONU 的无线功能部署。

当网络中的 ONU 数目为 128 时，不同 ONU 选取数目下的单位成本可靠度如图 5 所示，如前所述，由于 LDSS 部署策略利用多目标优化算法有效地均衡部署成本和网络可靠度，与 US 和 rand 部署策略相比，其单位成本可靠度均有所增加。US 部署策略以一定的间隔在网络中选取 ONU，从而使具有无线功能的 ONU 均匀地分布在网络中，因此随着网络

中 ONU 数目的增加，其单位成本可靠度呈缓慢变化趋势。而 rand 部署策略通过随机的选取 ONU 完成网络的无线功能部署，因此其单位成本可靠度变化较大。当网络规模达到一定程度时，与图 5 所示的小规模网络相比，LDSS 部署策略的单位成本可靠度随 ONU 选取数目的增加呈递减趋势。其主要原因在于，区别于小规模的网络，当网络规模达到一定程度时，部署成本与网络可靠度都对单位成本可靠度造成绝对的影响，即在增加网络部署成本的同时使网络可靠度得到了明显的增大，此时网络可靠度与网络成本的比值反而增加；而当网络部署成本增加导致网络可靠度增幅不大时，网络可靠度与网络成本的比值相应减小，从而导致单位成本可靠度在一定范围内呈起伏震荡变化。

5 结束语

为了提高网络资源利用率，本文提出一种最优 ONU 选取方法，进而设计了带有生存性感知的低成本 HOWBAN 无线功能部署策略。采用定量分析方法评估网络生存性，从而根据当前的 ONU 无线功能部署情况准确量化得到网络可靠度，进而，利用多目标优化方法有效地均衡网络成本和网络可靠度，以最大资源利用率为目标完成 ONU 的无线功能部署。与传统的无线功能部署策略相比，本文所提出的策略能够在满足网络生存性的同时，达到提高网络资源利用率及降低网络成本的目的。

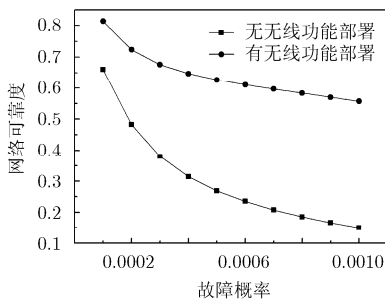


图 1 不同故障概率下的网络可靠度

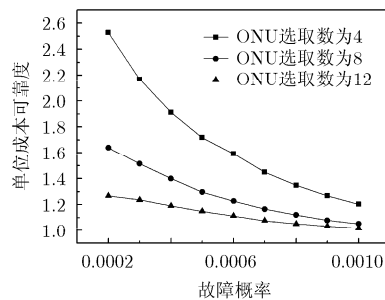


图 2 不同故障概率下的单位成本可靠度

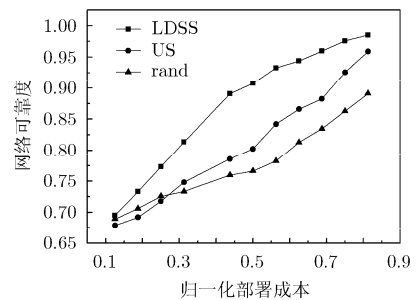


图 3 不同部署成本下的网络可靠度

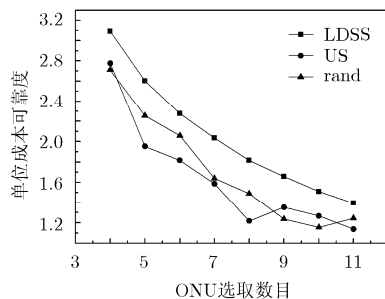


图 4 不同ONU选取数目下单位成本可靠度(ONU=16)

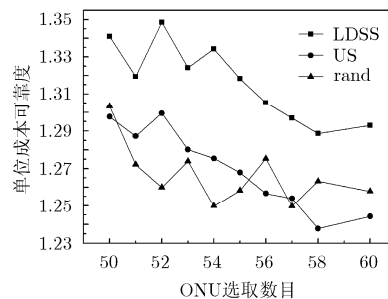


图 5 不同ONU选取数目下单位成本可靠度(ONU=128)

参考文献

- [1] WU Dapeng, HE Jing, WANG Honggang, *et al.* A hierarchical packet forwarding mechanism for energy harvesting wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(8): 92-98. doi: 10.1109/MCOM.2015.7180514.
- [2] GHAZISAIDI N, MAIER M, and ASSI C M. Fiber-Wireless (FiWi) access networks: a survey[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2): 160-167. doi: 10.1109/MCOM.2009.4785396.
- [3] BHATT U R, SARSODIA T, and UPADHYAY R. Survivability of an integrated Fiber-Wireless (FiWi) access networks[C]. 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), Ghaziabad, 2014: 238-243. doi: 10.1109/ICICT.2014.6781286.
- [4] LIU Yejun, WU Jingjing, YU Yinpeng, *et al.* Deployment of survivable fiber-wireless access for converged optical and data center networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2014, 14(8): 226-232. doi: 10.1016/j.osn.2014.05.012.
- [5] YU Yinpeng, LIU Yejun, GUO Lei, *et al.* Placement strategy for survivable hybrid WOBAN against multi-fiber failure[C]. 2014 12th International Conference on Optical Internet 2014 (COIN), Jeju, 2014: 1-2. doi: 10.1109/COIN.2014.6950617.
- [6] LIU Yejun, GUO Lei, and WEI Xuetao. OBOF: a protection scheme for survivable Fiber-Wireless broadband access network[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, 2012: 6225-6229. doi: 10.1109/ICC.2012.6364693.
- [7] LIU Yejun, SONG Qingyang, MA Rui, *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. doi: 10.1016/j.jnca.2013.01.014.
- [8] 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. doi: 10.1016/j.yofte.2012.06.008.
- [9] 王超, 马建峰, 朱建明. 网络系统的可生存性研究综述[J]. *网络安全技术与应用*, 2006(6): 15-17. doi: 10.3969/j.issn.1009-6833.2006.06.007.
- WANG Chao, MA Jianfeng, and ZHU Jianming. Survey of network system survivability technology[J]. *Network Security Technology and Application*, 2006(6): 15-17. doi: 10.3969/j.issn.1009-6833.2006.06.007.
- [10] 陈虹, 苏厉, 史国伟, 等. EPON 接入网的生存性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(7): 933-937. doi: 10.3321/j.issn:1000-0054.2004.07.019.
- CHEN Hong, SU Li, SHI Guowei, *et al.* Survivability of EPON access networks[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(7): 933-937. doi: 10.3321/j.issn: 1000-0054.2004.07.019.
- [11] KOONEN T. Fiber to the home/fiber to the premises: what, where, and when?[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(5): 911-934. doi: 10.1109/JPROC.2006.873435.
- [12] GHAZISAIDI N, SCHEUTZOW M, and MAIER M. Survivability analysis of next-generation passive optical networks and fiber-wireless access networks[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, 60(2): 479-492. doi: 10.1109/TR.2011.2134210.
- [13] KIASALEH K and HUANG D. A survivability analysis of WDM optical fiber systems with regular topologies[C]. *Conference on Optical Fiber Communication*, Dallas, 1997: 97-99. doi: 10.1109/OFC.1997.719727.
- [14] 贺毅朝, 王彦祺, 刘建芹. 一种适于求解离散问题的二进制粒子群优化算法[J]. *计算机应用与软件*, 2007, 24(1): 157-159. doi: 10.3969/j.issn.1000-386X.2007.01.054.
- HE Yichao, WANG Yanqi, and LIU Jianqin. A new binary particle swarm optimization for solving discrete problems[J]. *Computer Applications and Software*, 2007, 24(1): 157-159. doi: 10.3969/j.issn.1000-386X.2007.01.054.
- [15] PARSOPOULOS K E and VRAHATIS M N. Particle swarm optimization method in multi-objective problems[C]. *Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing*, Xi'an, 2002: 603-607. doi: 10.1145/508791.508907.
- [16] 王立芊, 陈雪, 马东超. 无源光接入网网络整体可靠性定义与量化分析[J]. *北京邮电大学学报*, 2009, 32(5): 66-70. doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2009.05.015.
- WANG Liqian, CHEN Xue, and MA Dongchao. An alysis on modeling of PON networks reliability[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2009, 32(5): 66-70. doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2009.05.015.
- 王汝言: 男, 1969年生, 教授, 博士, 研究方向为泛在网络、全光网络理论与技术、多媒体信息处理等。
- 刘辉: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为光无线混合网络。
- 吴大鹏: 男, 1979年生, 教授, 博士, 研究方向为泛在无线网络、社会计算、互联网服务质量控制等。
- 张炎: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为泛在无线网络。
- 向罗勇: 男, 1986年生, 工程师, 研究方向为泛在网络。