

面向成本最优的 FiWi 网络中 ONU-BS 部署策略

齐 峰^① 陈智辉^{*①} 韦 磊^② 陆 忞^③ 邵苏杰^① 郭少勇^①

^①(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

^②(国网江苏省电力公司 南京 210024)

^③(国网江苏省电力公司南京供电公司 南京 210008)

摘 要: 光和无线(Fiber-Wireless, FiWi)混合网络可以有效解决“随时随地”接受高速业务的网络接入问题。作为 FiWi 网络的关键节点, ONU 数目和位置很大程度上决定了网络的成本和性能。为降低 FiWi 网络的建设成本, 提升网络性能, 该文基于 EPON-WIMAX 混合组网的 FiWi 网络, 提出一种 ONU 部署策略, 基于改进的遗传算法优化 ONU 部署, 在使 ONU 数量最少的基础上, 保证一定程度上的负载均衡。仿真结果表明该文算法能够避免过早收敛导致的局部最优, 得到全局最优、数目最少的 ONU 部署方案, 并实现较好的负载均衡。

关键词: FiWi 网络; 网络规划; 遗传算法; ONU-BS; 负载均衡

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)01-0087-08

DOI: 10.11999/JEIT170388

ONU-BS Deployment Strategy for FiWi Network Based on Cost Optimization

QI Feng^① CHEN Zhihui^① WEI Lei^② LU Min^③ SHAO Sujie^① GUO Shaoyong^①

^①(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

^③(Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: Fiber-Wireless (FiWi) hybrid network can effectively solve the problem that people need to receive high speed service anytime and anywhere. As the key node of the FiWi network, the number and location of ONUs determine the cost and performance of the network to a great extent. In order to reduce the construction cost of FiWi network and improve network performance, an ONU deployment strategy based on improved genetic algorithm is proposed in the EPON-WIMAX hybrid network. It can minimum the number of deployed ONUs and take into account the load balancing. The simulation results show that the proposed algorithm avoids sub-optimal trap and the final number of ONU is the least, while maintaining a high load balancing level with better performance.

Key words: Fiber-Wireless (FiWi) network; Network programming; Genetic algorithm; ONU-BS; Load balance

1 引言

现代社会对于能够“随时随地”接受高速业务的需求越来越迫切。光网络作为最重要的高速有线接入网技术, 可以为用户提供高带宽和高稳定性的网络体验, 但由于网络部署需要应用大量的精密光

学器件, 部署成本较高, 接入灵活性较差, 不能实现完全覆盖。反之, 无线网络接入技术的部署成本较低, 且具有强大的末梢网络覆盖能力。因此, 结合了上述两种技术优势的光无线(Fiber-Wireless, FiWi)混合网络能够有效地满足现代社会的网络接入需求。FiWi 网络在人口密度较大的中心城区, 可以利用高带宽的光纤接入结合无线基站进行覆盖; 在偏远地区及光纤暂时无法覆盖的区域, 可以利用无线实现接入, 二者互为补充, 节省网络的建设难度和成本。FiWi 网络可以有效支持视频直播、高清晰度互动游戏、网络电话等对业务质量要求极高的应用, 因此有着广阔的应用前景^[1-4]。

收稿日期: 2017-04-26; 改回日期: 2017-10-17; 网络出版: 2017-11-08

*通信作者: 陈智辉 451060866@qq.com

基金项目: 国网江苏省电力公司科技项目(J2016044), 中国博士后科学基金(2016M6000971), 中国高校基本科研基金

Foundation Items: The State Grid Jiangsu Electric Power Company Technology Project (J2016044), The General Financial Grant from the China Postdoctoral Science Foundation (2016M6000971), The Fundamental Research Funds for the Central Universities

FiWi 网络中,光网络的建设包括大量的精密器件、线路辐射等,建设成本和建设难度较高,在 FiWi 网络建设中占据主要地位,因而光网络的不合理规划将导致极高的建设成本和建设难度。此外,光网络还具有拓扑结构复杂、网络可扩展性不高等特点。因此,如何利用现有的高速无线基站,考虑建设成本和设备成本,规划并建设合理的光接入网络,提高网络建设效率,提升设备和线路利用率,同时满足业务发展所需的网络可扩展性要求,成为 FiWi 网络规划的主要问题。其中,ONU 作为 FiWi 网络的关键节点,其成本是 FiWi 网络成本最主要组成部分,其位置和数量极大程度决定了业务质量^[5-8]。

国内外关于 FiWi 混合网络规划问题已有很多研究。文献[9]提出了一种在混合光无线宽带接入网中混合整数规划模型,考虑基站和 ONU 建设约束、用户和信道分配约束、信号质量约束和干扰约束,使网络建设成本最低。文献[10]考虑互联网通信和对等通信,提出了一种在 FiWi 中 ONU 部署算法,该算法运用禁忌搜索,目标是降低路由器到 ONU 的总跳数,但文章没有考虑 ONU 设备成本。文献[11]提出的 FiWi 网络中 ONU 部署算法,目标是部署 ONU 数目最少。首先将 ONU 部署在区域中心,通过减少 ONU 数目的策略,移除多余的 ONU;然后通过遗传算法进一步降低 ONU 数量。与其他算法相比较,该方法可以实现成本最优。但算法只考虑成本最优,没有考虑到 ONU 负载等因素,当一个 ONU 所关联的基站数目过多或出现闲置 ONU,会导致一个区域内网络质量下降或资源利用率低。文献[12]提出的 FiWi 网络中 ONU 部署策略,保证 ONU 数目较少的情况下,考虑负载均衡。首先利用贪心算法,每次选择出现新基站最多的 ONU 位置进行部署,直到覆盖所有基站。然后进行负载转移,对 ONU 所服务的基站再分配。由于在部署 ONU 时,只选择区域的中心进行部署,这与实际不符,若 ONU 的位置不局限于区域中心,其数量会进一步减少。文献[13]提出在 EPON-WIMAX 混合组网中,一种改进的聚类算法(MCA),使 ONU 和基站结合点(BO)最少。但在簇生成过程中,节点选择掺杂人为因素,结果产生偏差。文献[14]研究了多种光和无线混合网络架构,分析了每种架构中设备位置优化的过程,最后针对 PON-LTE-WiFi 网络,提出了 3 步规划方案。为解决第 1 步的问题,即确定 MUE 最佳分组和 eNB 最佳位置,提出了 ILP 模型,用线性规划的方法解决该问题。在混合组网规划问题中使用线性规划,当组网复杂,网络规模比较大,线性规划方法花费大量时间,建设和规划难度大。

本文在总结国内外研究的基础上,吸取已有研究的经验与不足,提出了一种在 FiWi 网络中 ONU 部署策略,在保证覆盖范围、业务质量的基础上,使 ONU 和基站结合点的数目最少,并保证一定程度上的负载均衡,实现效益最大化。文章组织结构如下:第 2 节研究基于 EPON-WIMAX 混合组网的 FiWi 网络架构,第 3 节建立网络规划模型,第 4 节提出以基站分配及 ONU-BS 部署可行性判别算法和 ONU-BS 规划算法为核心的 ONU 部署策略,第 5 节进行仿真实验,第 6 节总结并得出结论。

2 EPON-WIMAX FiWi 网络架构

在 FiWi 中的光网络侧,EPON 相对于其他 PON 结构,维护简单,容易扩展,可以提供高带宽,服务范围大,带宽分配灵活,成为主流的光网络接入技术;在无线网络侧,WIMAX 由于其传输速率高、传播距离远、组网灵活、成本低,受到运营商和用户的青睐。因此本文选用 EPON-WIMAX 混合组网架构。

典型的 EPON-WIMAX 网络架构有独立式架构、混合式架构、统一式架构、MoF 架构,本文选用混合式架构。独立式架构中 ONU 直接通过以太网和基站相连,EPON 和 WIMAX 的内部运行情况对彼此是不可见的,这样的缺点是数据传输存在瓶颈,数据传输速度受到接口限制,而混合式架构中 ONU 和基站被合成了一个设备——ONU-BS,这样两个系统对彼此不再是透明的,EPON 和 WIMAX 系统可以知道对方的数据调度机制,使带宽得以提升,提高整个系统的吞吐量^[15]。

EPON-WIMAX 混合式架构如图 1 所示。该网络架构支持互联网通信和对等通信。对于互联网通信,当用户需要网络服务时,用户首先向附近的路由器发送数据包,然后数据包通过无线网关进入无线基站组成的无线多跳网络,当数据包传送到 ONU-BS 节点时,数据包会通过 ONU,经过光纤、分光器,上传到 OLT,最终 OLT 将数据包传送到骨干网络。当互联网为用户提供服务时,数据流逆向传输给用户。一个 ONU-BS 与跳数范围内的基站形成一个簇,如虚线框所示。对等通信是指两个用户之间的通信,数据包可能只经由无线多跳网络将数据包发送给另一个用户,也可能通过无线多跳网络经由光网络,最终由光网络将数据包传送到对应的无线多跳网络并发送给用户。

3 ONU-BS 规划模型

文中参数定义如下: p 为 ONU 单价, N_T 为无

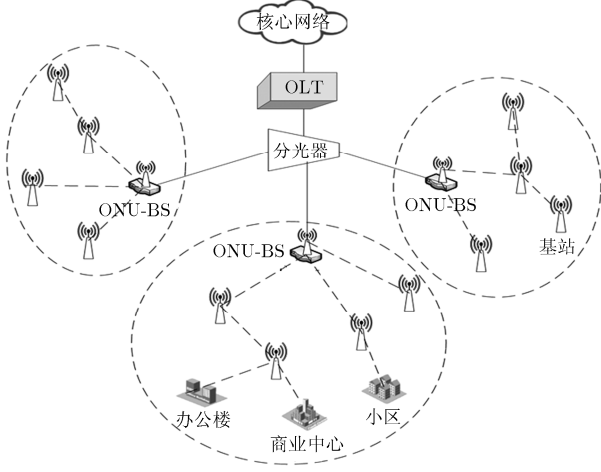


图1 混合式 EPON-WIMAX 架构

线基站的总数目， T_i 为无线基站集合，其中 $i \in (1, 2, \dots, N_T)$ ， N_{OB} 为被选做 ONU-BS 的基站数目， OB_j 为 ONU-BS 集合，其中 $j \in (1, 2, \dots, N_{OB})$ ， N_B 为没有被选作 ONU-BS 的基站数目， B_k 为没有被选作 ONU-BS 集合，其中 $i \in (1, 2, \dots, N_B)$ ， $d(u, v)$ 为结点 u, v 之间的距离，其中 $u, v \in N_T$ ， t_r 为基站信号传输范围， $h(u, v)$ 为节点 u, v 之间的跳数，其中 $u, v \in N_T$ ， D_T 为基站与基站之间的连接矩阵， D_L 为基站与 ONU-BS 之间的服务关系矩阵， b_i 为 0,1 变量表示基站 i 是否被选为 ONU-BS，其中 $i \in (1, 2, \dots, N_T)$ ， C_s 为最大簇规模， H_{\max} 为基站到 ONU-BS 的最大跳数， H_{BTO} 为基站到 ONU-BS 的跳数， H_{BTB} 为基站到基站的跳数， H_{OTB} 为 ONU-BS 到基站的跳数， c 为 ONU 成本， S_{OB_j} 为 ONU-BS 所服务的基站集合，其中 $j \in (1, 2, \dots, N_{OB})$ ， UA_{OB_j} 为 ONU-BS 所服务的未分配基站集合，其中 $j \in (1, 2, \dots, N_{OB})$ ， $AVG(S_{OB})$ 为 ONU-BS 所服务的基站平均数， D_{OB} 为 ONU-BS 所服务的基站数目方差， M 为遗传代数。

规划模型如下：

用无向图 $G(V, E)$ 表示 WIMAX 网络侧的无线多跳网络，其中 V 代表无线基站，即 $V = T_i$ ， E 代表两个 BS 或 BS 与 ONU-BS 之间的通信链路，其中 $OB_j \subseteq T_i$ 。ONU 成本如式(1)：

$$c = \sum_{j=1}^{N_{OB}} p \cdot OB_j \quad (1)$$

考虑负载均衡，ONU-BS 部署策略应尽量确保各个 ONU-BS 所服务的基站数目相差不大，避免网络负载过高导致网络拥塞或出现闲置 ONU-BS。 S_{OB_j} 代表第 j 个 ONU-BS 服务的基站数目，每

个 ONU-BS 服务的平均基站数目为

$$AVG(S_{OB}) = \sum_{j=1}^{N_{OB}} S_{OB_j} / N_{OB} \quad (2)$$

用式(3)衡量 ONU-BS 部署策略的负载均衡度， D_{OB} 值越小说明负载均衡度越好。

$$D_{OB} = \sum_{j=1}^{N_{OB}} (AVG(S_{OB}) - S_{OB_j})^2 / N_{OB} \quad (3)$$

用 $N_T \times N_T$ 的矩阵 D_B 表示无向图 $G(V, E)$ ，矩阵中 1 表示节点之间存在通信链路，0 表示节点之间不存在通信链路，即

$$D_B = (\phi_{ij})_{N_T \times N_T} = \begin{cases} 1, & d(u_i, v_j) \leq t_r \\ 0, & d(u_i, v_j) > t_r \end{cases}, 1 < i, j < N_T; u, v \in T \quad (4)$$

用 $N_B \times N_{OB}$ 的矩阵 D_L 表示 ONU-BS 与所服务基站的对应关系，矩阵中 1 表示基站被对应的 ONU-BS 所服务，0 表示基站不被该 ONU-BS 服务，即

$$D_L = (\sigma_{ij})_{N_B \times N_{OB}} = \begin{cases} 1, & u_i \text{ 被 } v_j \text{ 服务} \\ 0, & u_i \text{ 不被 } v_j \text{ 服务} \end{cases}, 1 < i < N_B; u \in B, v \in OB \quad (5)$$

基站没有到自身的通信链路。

$$\phi_{ii} = 0, 1 < i < N_T \quad (6)$$

一个基站只能被一个 ONU-BS 服务而且必须被一个 ONU-BS 服务，即 ONU-BS 要覆盖所有基站。

$$\sum_{j=1}^{N_{OB}} \sigma_{ij} = 1, 1 < i < N_B, 1 < j < N_{OB} \quad (7)$$

当一个基站被选为 ONU-BS 时，才能为其他基站提供服务。

$$\sigma_{ij} \leq b_j, 1 < i < N_B, 1 < j < N_{OB} \quad (8)$$

对等通信有两种传输方式，一种是只经由无线多跳网络将数据包发送给另一个用户，另一种则通过无线多跳网络经由光网络，最终由光网络将数据包传送到对应的无线多跳网络发送给用户。由于光网络传输时延可以忽略不计，基站-光网络-基站传输模式下的时延主要取决于无线多跳网络中的传输时延，即跳数大小，对等通信会选择两种方式中跳数较少的方式进行通信。

$$h(u_i, v_j) = \min \{ H_{BTB}, \{ H_{BTO} + H_{OTB} \} \} \leq C_s, \quad \forall i, j \in N_B; u, v \in B \quad (9)$$

互联网通信中，数据包通过无线多跳网络传送到 ONU-BS，通过光纤传输到 OLT，再由 OLT 传送到互联网。因此，互联网通信的主要时延主要取

决于无线多跳网络中包的转发时延。

$$h(u_i, v_j) = H_{\text{BTO}}, 1 < i < N_B, 1 < j < N_{\text{OB}}; \\ u \in B, v \in \text{OB} \quad (10)$$

若无线多跳网络内基站数目过多, 通信时数据包被基站多次转发, 导致时延过高, 通信质量下降; 同时会使 ONU-BS 承载的业务量过高, 数据吞吐量过大, 极易发生网络拥塞。因此一个 ONU-BS 所服务的基站数目不能超出最大簇规模。

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{OB}}} \sigma_{ij} \leq C_s, \forall i \in N_B \quad (11)$$

考虑互联网通信, 在 EPON-WIMAX 架构中, 互联网通信的主要时延主要取决于无线多跳网络中包的转发时延, 为保障用户体验, 提高网络性能, 基站到 ONU-BS 的跳数必须设定一个阈值。

$$h(u_i, v_j) \leq H_{\text{max}}, 1 < i < N_B, 1 < j < N_{\text{OB}}; \\ u \in B, v \in \text{OB} \quad (12)$$

4 ONU 部署策略

为解决上述问题, 本节提出以基站分配及 ONU-BS 部署可行性判别算法和 ONU-BS 规划算法为核心的 ONU 部署策略, 综合考虑网络服务质量和用户业务需求, 保证一定程度的负载均衡, 使 ONU-BS 数目最少。本文部署策略分两步进行, 在使用基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法的同时, 利用 ONU-BS 部署可行性判别算法为每个 ONU 划分其所服务的基站, 为改进遗传算法中个体适应度的计算提供依据。

4.1 ONU-BS 部署可行性判别

每当遗传算法产生一个新个体时, 即一组 ONU-BS 集合, 通过该算法为其划分服务的基站, 兼顾负载均衡, 并对 ONU-BS 部署可行性进行判别(表 1), 判断该集合是否满足约束条件, 为改进遗传算法中个体适应度计算提供依据。

以图 2 为例描述算法 1 的执行过程, 48 个基站分布在一个区域中, 通过遗传算法产生一个新个体, 该个体选中 8 个基站作为 ONU-BS, 如图 2 所示。算法 1 基站分配执行过程示于表 2。

分别给 ONU-BS 和 BS 标号, 首先将跳数为 1 的基站加入 UA_{OB} 集合。接着遍历 UA_{OB} 集合中的每一个元素, 如果一个元素只属于一个集合并且不属于其他集合, 则将该元素加入 S_{OB} 中, 并且删除 UA_{OB} 集合中对应的元素, 并对集合进行排序。

接下来取编号为 3 的 UA_{OB} 集合, 将元素 7 加入 S_{OB_3} 中, 之后遍历剩余的 UA_{OB} 集合, 如果存在元素 7, 则删去。将跳数为 1 的基站全部加入 S_{OB} 后,

表 1 ONU-BS 部署可行性判别

算法 1:

- (1) 设当前跳数 $i = 1$;
- (2) 将跳数为 i 的基站 B 加入 UA_{OB} 集合中, 依次遍历集合中的元素 B_k , 如果 $\exists B_k$ 使得 $B_k \in UA_{\text{OB}_m}, B_k \notin UA_{\text{OB}_n}, \forall n \in N_{\text{OB}}, m \neq n$, 则把元素 B_k 放入对应的 S_{OB_m} 中, 并删除 UA_{OB_m} 集合中的元素 B_k ;
- (3) 将 S_{OB} 按照元素个数升序排列, 若 S_{OB} 元素个数相同, 则按照 UA_{OB} 升序排列;
- (4) 取最小的集合 S_{OB_j} , 将 UA_{OB_j} 集合中的一个元素 B_k 加入 S_{OB_j} 中;
- (5) 遍历其余的 UA_{OB} 集合, 若集合中存在元素 B_k , 则该集合删除 B_k 这个基站元素。如果 $\bigcup_{j \in N_{\text{OB}}} UA_{\text{OB}_j} = \emptyset$, 进入第 6 步, 否则跳回第 3 步;
- (6) 如果当前跳数 $i < H_{\text{max}}$, 且 $\bigcup_{j \in N_{\text{OB}}} S_{\text{OB}} = B'$, 则该个体满足约束条件, 可以进行适应度计算, 结束; 若 $\bigcup_{j \in N_{\text{OB}}} S_{\text{OB}} \neq B'$, 进入第 7 步。若当前跳数 $i < H_{\text{max}}$, i 自增 1, 跳回第 2 步;
- (7) 选择没有被分配的基站 B_k , 为其寻找一条合适的可转移路径, 若不存在这种路径, 则该个体不满足约束条件, 算法结束。

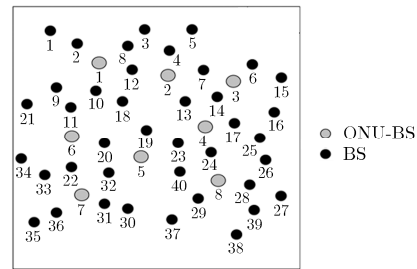


图 2 算法 1 执行示意图

表 2 算法 1 基站分配执行过程

编号	ONU-BS _j	UA _{OB_j}	S _{OB_j}
3	ONU-BS ₃	{7,14}	{6}
6	ONU-BS ₆	{20,22}	{11}
2	ONU-BS ₂	{7,12,13}	{4}
4	ONU-BS ₄	{13,14,23,24}	{17}
5	ONU-BS ₅	{20,23,32,40}	{19}
8	ONU-BS ₈	{24,40}	{28,29}
1	ONU-BS ₁	{12}	{2,8,10}
7	ONU-BS ₇	{22,32}	{31,33,36}

结果如表 3 所示。

最终跳数为 1 的基站被全部划分给对应的 ONU-BS 所服务。在不超过最大跳数的约束下, 依

表3 算法1跳数为1基站分配结果

编号	ONU-BS _{<i>j</i>}	UA _{OB_{<i>j</i>}}	S _{OB_{<i>j</i>}}
2	ONU-BS ₂	∅	{4,12}
4	ONU-BS ₄	∅	{13,17}
3	ONU-BS ₃	∅	{6,7,14}
1	ONU-BS ₁	∅	{2,8,10}
6	ONU-BS ₆	∅	{11,20,22}
7	ONU-BS ₇	∅	{31,33,36}
8	ONU-BS ₈	∅	{24,28,29}
5	ONU-BS ₅	∅	{19,23,32,40}

次将跳数为2,3,...,H_{max}的基站划分给对应的 ONU-BS, 若存在没有分配的基站, 为其寻找一条合适的可转移路径, 直至所有基站都分配给对应的 ONU-BS 服务或者找不到合适的可转移路径, 算法结束。

4.2 基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法

ONU 规划问题是 NP-Hard 问题, 通过传统的方法正向求解困难, 本文采用遗传算法求解。本文运用改进的遗传算法解决 ONU 规划问题, 过程如下:

染色体编码: 在用遗传算法解决 EPON-WIMAX 混合组网规划问题中 ONU 部署问题, 每一条染色体代表一种基站选择方案。本文采用二进制编码, 1 代表基站被选为 ONU-BS, 0 则相反。例如某网络有 8 个基站, 染色体 S_{*v*} 的编码为 {10001001}, 则表示编号为 1, 5, 8 的基站被选做 ONU-BS。

适应度函数: 综合考虑 ONU 数量和网络质量, 对于每个个体, 利用算法 1 进行判别, 把不满足约束条件的个体适应度设置为 0。对于 ONU 数量因素, 将成本函数作为适应度评判标准, 其值越低, 代表所用的 ONU 数目越少, 适应度越高; 对于网络质量因素, 考虑各个 ONU 之间负载均衡, 其值越低, 代表负载均衡水平越高。因此染色体 S_{*v*} 的适应度函数为

$$f(S_v) = \begin{cases} (X - c) + \delta(Y - D_{OB}), & \text{算法1判别通过} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

X, Y 是一个大数, 可以保证 f(S_{*v*}) 的值为正数; δ 是一个调节因子, 由于成本和负载均衡度有很大的数量级差别, 因此需要做归一化处理, 保证成本影响程度高于负载均衡度的影响程度。

选择: 本文采用按比例的适应度分配, 即

$$P(S_i) = f(S_i) / \sum_{i=1}^M f(S_i) \quad (14)$$

本文采用轮盘赌选择, 个体被选择的概率与其适应度大小成正比。

交叉、变异: 改进的遗传算法采用的交叉算子是单点交叉算子, 依照交叉概率 P_{*c*} 在父代染色体中随机选择一个交叉点, 在该点父代染色体进行互换。采用的变异算子是基本位变异, 依照变异概率 P_{*m*} 随机选择变异位置, 对该位置基因进行变异。改进遗传算法引入自适应策略, 使得 P_{*c*} 和 P_{*m*} 可以随着搜索过程动态改变。当个体适应度趋于一致时, 使 P_{*c*} 和 P_{*m*} 增加, 相应当适应度比较分散时, 使 P_{*c*} 和 P_{*m*} 减少。对于适应度高的个体, 对应较低的 P_{*c*} 和 P_{*m*}; 适应度低的个体对应较高的 P_{*c*} 和 P_{*m*}。这样可以保证算法收敛性的同时, 保持物种多样性。具体如式(15), 式(16):

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (15)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{m1}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (16)$$

其中, f' 代表两个交叉个体中适应度较高的个体, f 代表变异个体的适应度值, f_{avg} 代表群体的平均适应度值, f_{max} 代表群体最大适应度值。P_{*c1*}, P_{*c2*}, P_{*m1*}, P_{*m2*} 为常数。

基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法示于表 4。

5 仿真

运用上述算法分别在 40×40, 32×32, 28×28 的区域内, 数量为 50, 80, 100 的基站中选择部署 ONU, 初始基站位置随机生成。最大簇规模为 8, 最大跳数为 2, 基站传输距离最大为 5 km。种群规模为 80, 遗传代数最大为 300, 采用精英选择策略, 最优的个体直接进入下一代, 不经过选择变异的过程。改进的遗传算法引入自适应策略, 其中 P_{*c1*} = 0.9, P_{*c2*} = 0.6, P_{*m1*} = 0.1, P_{*m2*} = 0.01, P_{*c*}, P_{*m*} 根据式(15), 式(16)随搜索过程动态改变。规划结果如图 3, 图 4, 图 5 所示。在图 3, 图 4, 图 5 中, ●代

表4 基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法

算法 2:

- (1) Gen=0。
- (2) 染色体编码。初始化种群, 随机产生 M 个初始个体。
- (3) 判断是否满足终止条件, 若满足, 则停止, 输出最优解; 若不满足, 进入第 5 步。
- (4) 计算群体中各个体适应度。
- (5) 依次进行交叉, 变异过程, 更新适应度值。
- (6) 将上一代种群中的个体和本次遗传操作产生的新个体根据适应度进行选择, 加入到新个体中。
- (7) Gen=Gen+1, 返回第 4 步。

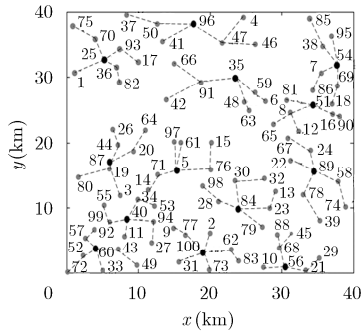


图 3 基站数量 100 的规划结果

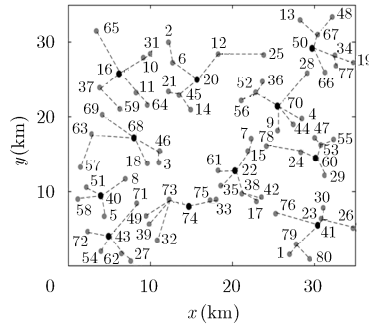


图 4 基站数量 80 的规划结果

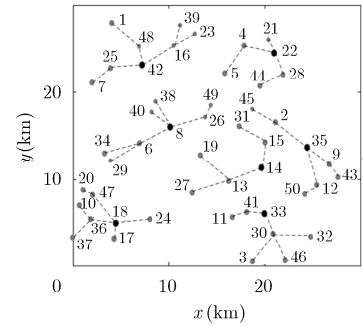


图 5 基站数量 50 的规划结果

表 ONU-BS, ●代表基站,可以看出,基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法可以有效地在已有的基站中,合理选择 ONU-BS 节点,使 ONU 部署数量最少。在 3 种部署条件分别执行本文算法 100 次,对各项指标取均值,结果由表 5 所示。由表 5 可以看出,不同部署条件下的负载均衡度均小于 1,负载均衡度较高。

表 5 不同数量基站规划结果

基站数量	适应度	ONU 成本	负载均衡度
50	1683.23	2217.20	0.41
80	2702.42	3481.67	0.35
100	3500.59	4197.21	0.30

基站数量为 50, 80, 100 时,适应度函数随进化代数的变化如图 6 所示。由图 6 看出,在不同数量的基站中选择 ONU-BS 时,基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法均可在有限的进化代数内达到收敛。在进化初期,个体平均适应度快速上升,这表明基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法具有高效的性能。此外当基站数目越少,达到收敛的速度越快。

基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法引入了

自适应策略和精英策略。为验证这些策略对算法性能的影响,在基站数目为 100 的区域内,对比传统遗传算法。传统遗传算法的种群规模、遗传代数和上述相同,交叉概率取 0.6,变异概率取 0.01。为了避免实验出现偶然性,对以上两种算法各执行 100 次,对各项指标取均值结果如图 7 所示。可以看出,传统的遗传算法相对于基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法在初期适应度上升更迅速,并提早达到收敛,但是平均个体适应度比本文的算法低。这说明传统遗传算法会快速收敛达到最优,但容易陷入局部最优。由表 6 看出基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法最终收敛后的 ONU 成本比传统遗传算法低,说明其在减少 ONU 部署数量方面性能比传统遗传算法高,同时使用基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法的负载均衡度略低于传统的遗传算法,可以保证较高的负载均衡水平。

为进一步验证基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法的性能,与随机放置方法、禁忌搜索算法进行对比。结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,本文算法相较于禁忌搜索算法、随机部署方法,最终可以实现部署的 ONU 数目最少。由表 7 可以看出使用本文算法在 FiWi 网络中部署 ONU 的负载均衡度均小于 1,可以保证较高的负载均衡水平,而禁忌搜索算法和随机部署方法的负载均衡度均远大于 1,

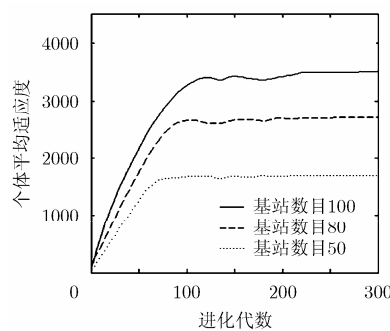


图 6 进化代数与个体适应度关系

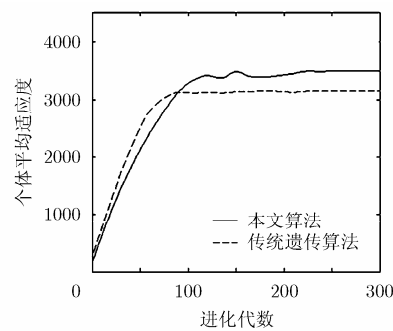


图 7 传统与改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法比较

表 6 传统遗传算法与基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法规划结果比较

	适应度	ONU 成本	负载均衡度
本文算法	3492.53	4209.14	0.29
传统遗传算法	3154.23	4505.39	0.43

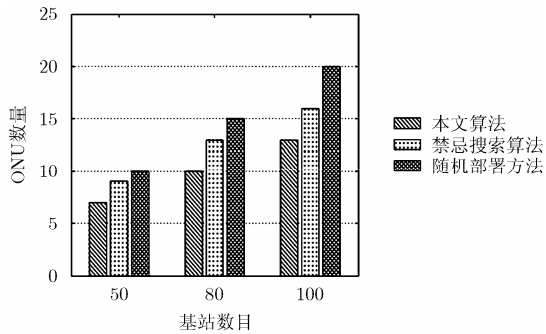


图 8 不同算法下基站数目与 ONU 数目

表 7 不同算法负载均衡度

	基站数目 50	基站数目 80	基站数目 100
本文算法	0.44	0.34	0.28
禁忌搜索算法	5.68	5.10	4.85
随机部署方法	7.86	7.10	6.38

在负载均衡水平方面性能比较差。综上所述，基于改进遗传算法的 ONU-BS 规划算法在 FiWi 网络中规划 ONU，可以使 ONU-BS 数目最少，同时兼顾负载均衡，算法性能好。

6 结束语

ONU 作为 FiWi 网络中的关键节点，其数目和位置在很大程度上决定了网络的成本和性能。为了降低 FiWi 网络的建设成本，提升网络性能，本文提出了一种在 EPON-WIMAX 混合组网中，基于改进遗传算法的 ONU 部署策略，EPON-WIMAX 混合组网规划问题模型，在满足网络连接约束、跳数约束、簇大小约束的基础上，使得部署的 ONU 数量最少，并兼顾负载均衡。仿真结果表明本文算法可以满足上述要求，避免过早收敛进入局部最优，最终 ONU 部署数目最少，并保证一定程度上的负载均衡，具有很好的性能，为网络建设提供参考依据。

参考文献

- [1] 王立芊. EPON 与 WIMAX 融合宽带接入网关键技术研究[D]. [博士学位论文], 北京邮电大学, 2009.
WANG Liqian. Study on key technologies of EPON and WIMAX convergence network[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing University of Post and Telecommunication, 2009.
- [2] 柴志成. 光纤无线异构网络生存性评价方案研究[D]. [博士学位论文], 浙江工业大学, 2016.
CHAI Zhicheng. Study on the survivability evaluation scheme of fiber-wireless access network[D]. [Ph.D. dissertation], Zhejiang University of Technology, 2016.
- [3] LIU Jiajia, GUO Hongzhi, and NISHIYAMA Hiroki. New perspectives on future smart FiWi networks: Scalability, reliability, and energy efficiency[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1045–1072. doi: 10.1109/COMST.2015.2500960.
- [4] ESTEBAN IngaOrtega, ARTURO PeraltaSevilla, and ROBERTO Carlos Hincapie. Optimal dimensioning of FiWi networks over advanced metering infrastructure for the smart grid[C]. *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 2015 IEEE PES, Montevideo, Uruguay, 2015: 30–35. doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381125.
- [5] 唐洁莹. 光无线混合宽带接入网拓扑部署优化研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2013.
TANG Jieyin. Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network(WOBAN): Topology deployment and optimization study[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [6] UMA Rathore Bhatt, SADA Hirve, and NITIN Chouhan. Computation of performance parameters of ONU placement algorithms for FiWi network[C]. 2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet), Trivandrum, India, 2015: 433–438. doi: 10.1109/CoCoNet.2015.7411222.
- [7] ARTURO Peralta-Sevilla, ESTEBAN Inga, and RENAT Cumbal. Optimum deployment of FiWi Networks using wireless sensors based on Universal Data Aggregation Points [C]. 2015 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), Colombian, 2015: 1–6. doi: 10.1109/ColComCon.2015.7152079.
- [8] YU Yinpeng, CHATHURIKA Ranaweera, and CHRISTINA Lim. Optimization and deployment of survivable Fiber-Wireless (FiWi) access networks with integrated small cell and WiFi[C]. *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, Montreal, QC, Canada, 2015: 1–5. doi: 10.1109/ICUWB.2015.7324491.
- [9] SUMAN Sarkar, HONG Hsu, and YEN Sudhir. A mixed integer programming model for optimum placement of base stations and optical network units in a hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Kowloon, China, 2007: 3907–3911. doi: 10.1109/WCNC.2007.714.

- [10] REJAUL Chowdhury, ABDALLAH Shami, and KHALED Almustafa. Designing of next-generation hybrid optical-wireless access network[C]. 14th International Conference on Innovations for Community Services (I4CS), Reims, France, 2014: 9–15. doi: 10.1109/I4CS.2014.6860546.
- [11] BHATT U R, CHOUHAN N, and UPADHYAY R. Hybrid algorithm: A cost efficient solution for ONU placement in Fiber-Wireless access network[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 22: 76–83.
- [12] LIU Y, SONG Q, LI B, *et al.* Load Balanced Optical Network Unit (ONU) placement in cost efficient fiber-wireless (FiWi) access network[J]. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4594–4601.
- [13] LIU Y, ZHOU C, and CHENG Y. Integrated BS/ONU placement in hybrid EPON-WIMAX access networks[C]. Global Telecommunications Conference, Honolulu, HI, USA, 2009: 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425770.
- [14] ZHENG Z., WANG J, and WANG X. ONU placement in fiber-wireless (FiWi) networks considering peer-to-peer communications[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, HI, USA, 2009: 1–7. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425913.
- [15] 王焯, 范红, 魏雷. 基于 EPON 和 WiMAX 的融合网络[J]. 光通信技术, 2010, 34(12): 1–4.
- WANG Ye, FAN Hong, and WEI Lei. The integrated network based on EPON and WiMAX[J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(12): 1–4.
- 元 峰: 男, 1971 年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为通信软件、智能电网信息通信.
- 陈智辉: 男, 1994 年生, 硕士生, 研究方向为混合组网规划.
- 韦 磊: 男, 1982 年生, 高级工程师, 研究方向为电力系统信息通信和智能电网.
- 陆 恣: 女, 1983 年生, 高级工程师, 研究方向为智能电网和电力信息通信.
- 邵苏杰: 男, 1985 年生, 博士后, 研究方向为网络管理与智能电网.
- 郭少勇: 男, 1985 年生, 讲师, 研究方向为网络管理、终端管理与智能电网.