基于遗传算法的电信网络自动设计

Jo˜ão Correia[1],Gustavo Gama[1], Jo˜ão Tiago Guerrinha[2], Ricardo Cadime[2],Pedro Antero Carvalhido[2], Tiago Vieira[2], 和 Nuno Louren¸ço[1]

[1] 科英布拉大学，CISUC，DEI，葡萄牙科英布拉 jncor@dei.uc.pt, gustavogama@student.dei.uc.pt, naml@dei.uc.pt[2] AlticeLabs，葡萄牙{joao-t-guerrinha,ricardo-v-cadime,pedro-a-carvalhido , tiago-s-vieira}@alticelabs.com

arXiv:2304.00637v1 [cs.NE] 2 Apr 2023

摘要。 随着对高质量互联网服务的需求不断增长，部署吉比特无源光网络/光纤到户网络是互联网服务提供商面临的最大挑战之一，因为这需要大量投资。自动化网络设计对于辅助网络规划变得日益重要，可最大限度地降低规划和部署成本。本文的主要目标是解决网络优化问题，该问题需要考虑多个因素，例如设备部署及其配置、光缆线路优化、用户分配优化，以及最小化问题涉及的其他约束。本文提出了一种基于人工智能的解决方案，以实现网络设计自动化；这项工作通常由工程师团队手动完成，且手工完成需要耗费大量时间。为减轻这项繁琐的工作，我们提出了一种采用两级表示的遗传算法，用于自动设计网络。为验证该方法，我们将生成的解决方案的质量与现实中已部署的手工设计方案进行比较。结果表明，我们的方法能够节省成本和时间，并找到比现有方案更合适、更优的解决方案，显示出其作为吉比特无源光网络/光纤到户网络解决方案辅助设计工具的潜力。具体而言，在验证所提方案的两个场景中，与现有手工设计方案相比，我们的方法分别可降低 31% 和 52.2% 的成本，展现并验证了所提方法的潜力。

关键词： 遗传算法；自动设计；网络设计

1 引言

近年来，随着云服务、视频和音频流媒体以及游戏等高带宽应用的使用日益普及，对高质量互联网服务的需求迅速增长。这促使互联网服务提供商（ISP）考虑采用更快的技术来满足不断增长的需求，例如光纤，即光纤到X（FTTX）。FTTX

指电信网络最后一公里阶段中适用于不同场景的多种部署配置。最常见的场景包括直接连接到客户住所的光纤到户（FTTH），以及直接接入建筑物的光纤到楼（FTTB）。提供此类服务的一种方式是采用基于吉比特无源光网络（GPON）的解。GPON 是一种点到多点（P2MP）网络，通过分光过程使单套光纤系统能够为多个用户驻地提供服务。与多年来作为标准解的其他类型网络（例如铜缆网络［数字用户线路（DSL）］）相比，这项技术具有诸多优势。首先，它能够实现更快的数据传输并扩大覆盖范围，光纤电缆的传输距离可达 20 公里。其次，它能够增强安全性。第三，如果需要升级网络，只需更换端点，同时保留光纤基础设施。此外，它的成本效益也很高。

部署 GPON/FTTH 网络时，互联网服务提供商需要应对诸多挑战，并投入大量资金。部署 GPON/FFTH 网络涉及建设新的基础设施（例如开挖管道、铺设连接住宅的新电缆），或升级和维护现有基础设施。因此，优化网络设计以降低高昂成本至关重要。考虑到网络部署的难点源于设计中的工程或技术因素，妥善设计解决方案可节省约 30% 的成本 [4]。

然而，要打造经济高效的 GPON/FTTH 网络，工程师必须考虑多个因素，例如分光器位置及其最大分光比、前端位置、光分配点位置、需要考虑的路径、最大距离、服务住宅数量以及光功率预算。综合考虑这些因素是一项复杂的任务，需要投入大量时间和精力。因此，将这一流程自动化，可在优化成本的同时，把设计所需的时间从数天缩短至数小时甚至数分钟，大幅减少工作量。通常，这一设计流程包含多个阶段，从物理基础设施到 GPON/FFTH 网络的规划设计，再到网络本身。显然，在多个阶段中，自动化都能节省时间和精力，并为负责部署的电信网络公司创造价值。尽管本研究涉及设计流程的多个阶段，但我们关注的是设备层级的网络设计，并假设物理部分已处理完毕。

因此，本文提出了一种仿生方法，用于自动设计 GPON/FTTH 网络。我们将网络的自动设计建模为一个组合优化问题，并旨在通过进化计算求解。我们设计了一种遗传算法（GA），其中每个个体都具有映射到现有物理基础设施的双层表示。第一层对应一个二进制列表，用于定义最优分配点（PDO）；第二个列表则表示 PDO 与客户之间的连接。我们通过将所提方法用于

优化真实网络，并将自动设计的解决方案与现有方案进行比较，后者由工程团队人工设计，目前已部署并投入运行，从而验证了该方法。结果表明，对于每个基准网络，遗传算法都能设计出成本低于现有人工设计方案的网络。具体而言，与人工设计方案相比，我们的方法在所考虑的两个场景中，能够找到分别降低 31% 和 52.2% 成本的解决方案。

本文其余部分安排如下：第2节介绍问题的背景与定义以及相关工作。第3节阐述网络自动设计的方法。随后，第4节介绍实验设置，第5节呈现结果。第6节总结全文，并介绍未来的研究工作。

2 背景

简单的 GPON 网络由三个组件构成：光线路终端（OLT），代表互联网服务提供商的共享网络设备；多个光网络单元（ONU），代表客户端侧的设备（调制解调器）；以及分光器。

分光级数与分光比 从光线路终端（OLT）引出一条馈线光纤，连接分光器，并以 $1:N$ 的分光比将信号分至多条光纤，再连接至光网络单元（ONU）；其中，N 为输出端口数。要优化设计 GPON/FTTH，必须确定分光比和分光级数。可采用多种配置。例如，在集中式方案中，设计者可以采用 $1:32$ 的分光比，这意味着该分光器最多可为 32 户住宅（ONU）提供服务。在级联分光方案中，可以在连接至用户侧之前，让多个分光器彼此连接 [10]。这种多级方案可以为各级分光器采用不同的分光比。例如，第一级分光器采用 $1:4$ 的分光比，第二级则采用 $1:8$。方案的选择取决于服务区域。集中式方案更适用于城市环境和人口密集区域，因为它具有更大的灵活性且成本更低。另一方面，在需要覆盖较大区域的情况下，通常采用级联方法，例如长距离无源光网络 [7]。

网络设备的位置对网络设计至关重要，因为材料和相关土建工程的成本很高。必须考虑不同的设备因素，例如分光器的位置、各个 ONU（客户）的位置、前端位置，以及光分配点位置（即沿线路设置的街边机柜，用于管理互连、进行光纤熔接，也可容纳分光器及其他组件）。在规划经济高效的网络设计时，必须优化所有设备的布置，以尽量减少网络中所用电缆的数量和总体成本。

如果我们讨论的是将建筑物视为住宅的情况（光纤到楼场景），可能需要考虑该地点的需求。例如，该地点可能需要

为建筑物内的所有住宅提供 50 个端口，而对于普通住宅，只需要一个。因此，装有分路器和其他组件的机柜应直接放置在建筑物所在地。

另一个需要考虑的重要方面是，无论选择何种拓扑和设计方案，都必须遵守光功率预算。光功率预算是指在一定距离内通过光纤连接传输信号所需的光功率。预算损耗（以 dB 为单位）有多个来源。分光器在分割信号时会造成能量损耗，称为分路器损耗（表 1）。网络的其他组件（如连接器）也可能造成损耗。然而，大部分损耗来自电缆长度，约为每千米 0.35 dB。因此，减少 GPON 所需电缆长度十分重要。缩短电缆距离可以提高网络效率（减少损耗）。

综合上述方面，自动设计 GPON网络的问题可概括为：在降低财务成本的同时，为不同类型的设备寻找最合适的位置，确定不同层级分路器的分光比，并满足光功率预算。

2.1 相关工作

光纤网络设计问题通常采用元启发式技术来解决。在 [11], 中，提出了一种将遗传算法与图论相结合的方法，用于为具有多个层级（即包含多个层级分路器）的网络设计不同网络拓扑（总线、树和环）的无源光网络。其主要目标是降低网络实施成本，重点优化所需材料，包括分路器的数量、地理位置、分光比和电缆长度。为此，作者提出的遗传算法解决方案基于从光线路终端（中心局中的共享设备）到每个光网络单元（住宅）的路径，这些路径借助图论算法获得。另一项类似研究见 [6], ，其中采用遗传算法，在多个约束条件下解决无源光网络优化问题。同样，该研究考虑了多层分路器设计。一个个体由双字符串表示（元素的顺序会产生影响）：一个字符串表示分路器设备的位置（一级和二级）及分光比，另一个表示光网络单元的位置。这些字符串的长度取决于需要服务的光网络单元数量以及可用材料／分路器的数量。这种表示方式使作者能够自动满足某些约束。作者还比较了遗传算法方法与整数线性规划方法。对于较小的网络，两种方法似乎都能找到精确解。然而，随着问题规模增大，整数线性规划方法要想在可接受的执行时间内找到解就显得力不从心，而遗传算法则表现更佳，尽管无法确定是否找到了全局最优解。

[5], 近期提出的另一项研究还详细介绍了将遗传算法与图论结合起来解决无源光网络设计问题的应用。研究考虑了四种不同的拓扑结构，采用不同的分光器配置，包括集中式和级联方法。遗传算法的表示方式

由二进制表示构成，用于在一组潜在候选位置中确定设备的部署地点。研究人员在巴西的真实网络中测试了该系统，并比较了不同拓扑结构在不同地图上的应用效果。总体而言，效果取决于地图类型。研究考虑了密集地图和非密集地图。例如，在客户较少的场景中，级联方法可能更为适用，可减少电缆用量。解决方案还考虑了光功率预算，以检查网络的有效性。

其他元启发式方法也已用于解决这一网络设计问题。例如，在 [2], 中，采用蚁群优化（ACO）设计全新部署场景下的 GPON/FTTH（即在全新站点部署网络），输入要求包括材料的潜在位置（分路器和电缆分配位置）。该方法能够求得近似最优解。作者将其与精确求解器（单纯形算法）得到的解进行了比较，解的质量差异不到 1%，而执行时间则大幅缩短，对于规模更大的实例快了$50-90\%$ 。为实现这一结果，还采取了其他步骤，例如放宽约束并进行后优化。在 [3], 中，同一作者提出了结合额外元启发式方法的类似 ACO 方法，但这次针对的问题涉及其他设备（汇聚设备/引入缆封闭件）。

此外，Ali 等人的研究 [1], 提出了一种局部搜索方法。局部搜索过程会对候选解进行局部修改，直到无法检测到改进（或满足其他停止准则）。在这项研究中，这些修改可以只是将某个客户分配给新的网络设备，或交换两个客户之间的连接（链路）。至于引导机制，当算法陷入局部最优时，会使用惩罚函数。目标函数将发生变化（即，修改当前解中各项特征的权重）。这一方法与模拟退火方法进行了比较，结果表明其性能显著优于后者。

最后，人工智能也应用于电信网络的其他子问题。Javier Mata[8]对人工智能在电信问题中的广泛应用进行了综述。其中一些被引用的研究值得一提，例如，Morais 等人 [9], 提出了一种遗传算法，用于在考虑网络生存能力的情况下进行拓扑设计。网络生存能力是指网络在发生设备故障时仍能运行的能力。同样，他们也采用整数线性规划方法对其方法进行基准测试。

3 所提方法

我们开发了一套基于遗传算法的系统，用于解决网络设计问题。如第2节所述，为获得稳健的解，必须考虑若干设计因素。本节将概述所开发的系统，并说明主要的算法设计选择，

以及相关考量。在进化过程中，遗传算法必须处理以下约束和挑战：(i) 确定网络设备，具体而言是光分配点（PDO）的位置，以便将客户的住宅连接到网络。PDO 的容量受限，即可用端口数量有限；(ii) 确定需要考虑的路径，以尽量减少覆盖所有客户住宅所需的资源。因此，应尽可能避免采用“埋设”的路径（成本更高）；(iii) 必须考虑每位客户的需求（光纤需求每增加1个单位，就需要为该客户分配1个端口）；(iv) 如果存在公寓楼等大型建筑，出于现场实施的便利性，预期将 PDO 设置在现场，即距离最近的网络设备节点处；尽管该地点的需求会因此增大，但这样可以减少此类情况下所需的引入光缆长度；(v) 根据 PDO 的现有端口，确定最优的引入光缆链路；(vi) 引入光缆受到最大距离约束，例如限制用于连接客户与 PDO 的电缆长度；(vii) 配线光缆受到相关约束，以限制网络规模并满足光功率预算；(viii) 设计会受到权重影响，这些权重体现为给定解所需的设备成本；(ix) 引入光缆还受到交叉约束，即引入光缆不得与配线光缆相交。后续各节将详细介绍所采用的基于遗传算法的解决方案的相关特性。

3.1 表示

在我们的方法中，种群中的每个个体由两个数组组成：（i）一个二进制表示，其中每个索引对应一个可用于部署 PDO 的候选网络设备；若该设备对应的值为 1，则在该设备上部署 PDO；（ii）一个整数表示，用于管理与 PDO 端口数量有限这一容量受限子问题相关的引入光缆链路。每个索引对应一个不同的客户，其值表示该客户住宅所关联的 PDO（节点标识符）。如果某栋住宅未分配给 PDO，则其值为 -1。该数组取决于第一个二进制表示，修改第一个数组可能会影响第二个数组。

3.2 变异算子

我们的变异算子作用于二进制表示。变异通过改变一个基因，随机修改个体种群。本研究采用了位翻转突变，其做法很简单：以固定概率修改第一个表示数组中的一个比特，即将 1 变为 0，反之亦然。

同样，交叉算子通过组合两个不同个体（父代）的遗传物质来产生新的解，从而使种群在每一代都能发生变化。交叉算子的功能是均匀交叉。

在所提出的进化系统中，变异算子会修改“表示 1”；由于 PDO 的位置可能因此发生变化，因此可能需要更新“表示 2”，并重新检查部分住宅以确认其链路。这两个算子均基于适应度分数，作用于选定的个体群体（父代）。

3.3 局部搜索

对于前文提到的与 PDO 容量约束问题相关的子问题，将每个住宅连接到 PDO 有两种方法可选：(i) 采用距离住宅最近的方法；(ii) 使用爬山法进行局部搜索，以优化分布。针对我们的具体情况，我们最终结合了这两种方法。算法首先采用方法 (i)；如果有住宅未分配到距离最近的 PDO，就将其记录下来，以便采用方法 (ii)。需要计算每个被分配到第二近（或更远）PDO 的住宅可能连接的 PDO 节点集合，并可使用缓存避免重复计算。随后，交换过程可以从该组 PDO 中交换引入电缆及其连接的客户住宅。如果成本降低，则保留修改后的解。

需要注意的是，每次交换都必须满足引入光缆长度上限和 PDO 端口数方面的约束（对于当前检查的住宅和被交换的另一客户住宅均如此）。

另一个值得一提的是，我们只会偶尔进入局部搜索阶段，因为这会带来较高的计算成本。只有当住宅未分配给距离最近的 PDO 时，算法才会考虑局部搜索步骤；理论上，这种情况只会出现在图中较密集的区域。

3.4 适应度函数

遗传算法的另一个关键方面是用于评估各个解性能的适应度函数。所提出的进化系统会在初始阶段以及每个代周期评估种群。该函数表示网络建设的财务成本，目标是使这一成本最小化。

适应度函数需要图、待评估的个体、预先计算的引入光缆成本，以及用户提供的不同输入权重（业务规则）。有三种主要材料会显著影响返回解的成本：(i) 引入电缆成本 C_{Drop}；(ii) 配线电缆成本 C_{Dist}；(iii) PDO成本 C_{Pdo}，其成本应取决于可用端口的最大数量。

第一步是计算当前解所需的引入光缆数量 N_{Drop}（可通过访问缓存来完成，该缓存包含系统初始阶段计算出的引入光缆距离成本）。只需遍历第二种表示形式（整数表示）即可完成此步骤。需要注意的是，对于建筑物（多住户单元），引入光缆的财务成本会乘以 10，以引导遗传算法将 PDO 设置在建筑物附近（如果地图上存在建筑物）。

第二步着重计算解所需的配电电缆 N_{Dist}。这是从起点到各个 PDO 的网络电缆

表 1. 构成该实验的两张地图中的图的特征。

数据集（地图）	数量 位置（节点）	数量 路径（边）	数量 有效网络 设备 节点	客户总数: 住宅（单户住宅）和建筑物 （多住户单元）	总和 距离 所有路径
地图 *1*	188	81	80	103 & 5	2.11 千米
地图 *2*	222	166	133	76 & 11	4.76 公里

（总数为 N_{Pdo}）。此步骤需要更多计算能力，因为必须计算从 PDO 到起点的最短路径。在这种情况下采用 Dijkstra算法，并将结果存储在动态缓存中，以便后续调用此适应度函数时能够复用。对于规模较大的网络和稠密图，这种存储步骤至关重要，有助于加快处理速度。

第三步按照以下公式，将输入权重乘以所需资源（电缆和 PDO）的成本，计算材料成本 C_{Mat}：

$$C_{Mat} = C_{Drop} * N_{Drop} + C_{Dist} * N_{Dist} + C_{Pdo} * N_{Pdo} \tag{1}$$

最后，如果违反约束条件，还可以在此成本 C_{Mat} 上追加惩罚项 P。在这种情况下，系统可能无法覆盖所有客户。因此，任何未将所有客户连接到网络的解都会受到固定惩罚 P；常数 P 设定为 PDO 的成本（通过试错法选定）。该惩罚基于未分配的住宅数量 $H_{Missing}$。如果所有住宅都得到覆盖，则该值为零，也不会追加惩罚（最小化）。返回的适应度（f）结果如下:

$$f = C_{Mat} + H_{Missing} * P \tag{2}$$

4 实验设置

本节介绍用于验证所提出的网络自动设计方法的实验设置。我们的实验旨在为每个数据集自动寻找一个解，并将其与现有的实际人工设计方案进行比较。我们首先介绍所用地图的详细信息，接着说明电信合作伙伴施加的业务规则和限制。最后，我们介绍遗传算法所用的参数。

我们在来自纽约和新泽西州的两种不同场景中评估了我们的方法。表1列出了可用的地图，以及与之对应的人工设计方案。在该表中，位置节点的数量（第2列）有时大于有效网络设备节点的数量（第4列）与客户节点总数（第5列）之和。这是因为部分设备节点不属于包含起点的主连通分量，因此在筛选时被排除，也就是孤立节点。

业务规则包括材料成本以及与问题相关的约束。它们会直接影响算法返回的结果。在这组实验中，我们采用了一种配置，旨在减少 PDO 数量、减少配线电缆用量并增加引入光缆用量。该配置预先设定了若干项目的成本，这些成本会影响评估阶段的权重。最终，这些设置促使算法收敛到具有上述特征的解。每种场景都基于一组固定权重，这些权重代表材料成本（由用户提供的输入）。表2展示了实验所用的权重。请注意，可根据限制条件调整这些参数。值得注意的是，这些权重被代入遗传算法适应度函数中。

表2. 材料实验权重集。

材料	**Cost**
PDO 成本	300$ 单位
引入光缆成本 每米	2$
配电电缆成本 每米	5$

关于约束，它们指的是可能限制搜索空间以寻找解的所有因素。每个场景也受到表 3 中定义的约束限制。需要考虑两类约束。一类与 PDO 有关：每个 PDO 的最大端口数，以及为网络未来扩展而给每个 PDO 预留的余量。例如，如果选择一个端口上限为 12 个、并预留 10% 空余端口的 PDO，那么实际上只有 11 个端口可运行。我们还对电缆允许的最大距离设有限制，例如网络的最大总距离（从 OLT 到客户端），以及对引入电缆施加的限制。对于引入电缆，设计方案以 85 米为上限，但该数值可能会根据数据集而变化。我们的方法能够处理所有上述输入，即成本和约束；与我们的方法交互的用户可以对这些参数进行调整和选择。从实验角度来看，它们就是我们方法的输入。

表 3. 实验约束。

约束参数	**值**
每个 ***PDO*** 的端口数上限	12
每个 ***PDO*** 预留端口余量	10%
引入光缆长度上限	85 米（范围：50-100）
网络最大范围 20 千米	

表 4. 遗传算法参数。

参数	值
种群规模	100
迭代代数	100
变异	位翻转
变异率	$2/len(genotype)$
交叉	均匀交叉 （每个基因 0.5）
交叉率	0.85
锦标赛选择	5
生存者选择 （精英保留比例）	10

表 4 展示了每次进化运行中遗传算法所使用的配置。我们将要呈现的实验结果是 10 次进化运行的平均值。所有实验均在一台具有以下硬件规格的计算机上进行：Intel(R) Core(TM) i7-8700K 中央处理器 @ 3.70GHz；内存：16GB。

5 实验结果

本节展示了我们的方法在两张地图上设计网络时取得的结果。我们根据以下指标对所得网络与手工设计的网络进行了分析和比较：PDO 数量、引入电缆和配电电缆的使用量。我们的方法所得的所有结果均为 30 次独立运行的平均值。

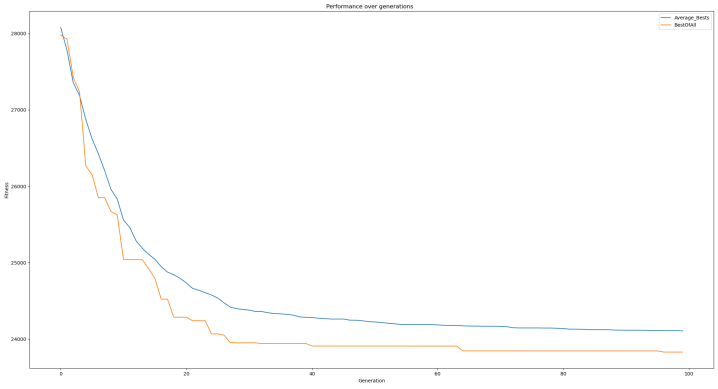


图1。 数据集地图 1 在各代中的适应度。

图1展示了 10 次运行中 100 代的平均值和最佳值。从图中可以看出，适应度在前 25 代迅速下降。此后，遗传算法仍继续提升解决方案的质量，但速度有所放缓。这些结果表明，无需等待太久便能获得高质量的结果。

表5汇总了各项指标的结果。第二列显示手工设计方案各项指标的数值，下一列则显示遗传算法（GA）得出的最佳值、最差值、中位数和平均值。比较遗传算法得出的最佳解可以看出，遗传算法减少了PDO的数量（16个），但引入电缆的距离有所增加。

我们还注意到，与最佳解相比，最差解的适应度得分大幅升高（最佳解得分为23908，最差解得分为204545）。高分是由遗传算法适应度函数中的若干惩罚项造成的，具体来说，是因为有些住宅未分配到网络中。为引导进化算法实现住宅的全面覆盖（即渗透率达到100%），算法会根据尚未分配的住宅数量施加较大的固定惩罚。

表格第二列（手工设计）包含已部署的真实网络手工设计方案的统计数据。以适应度得分衡量时，与遗传算法生成的解相比，遗传算法在最佳解（以及中位数解）方面优于手工设计方案。这是因为手工设计方案安装了过多的PDO。每种网络设备（如电线杆或基座）都有一个安装点（PDO），而其数量本可以更加合理。

表5。 地图 1 的手工解与遗传算法解的比较。

		GA			
指标	**手工制作**	**最佳值**	**最差值**	**中位数**	**Mean**
配电点数量	62	17	22	20	18.80 (±0.92)
引入电缆用量（km）	2.75	4.18	3.76	4.07	4.15 (±0.12)
所用配电电缆（km）	2.08	1.74	1.77	1.74	1.70 (±0.03)
适应度得分	34505	23908	204545	24561	38893(±5832)
适应度差异（遗传算法-手工设计）		-10597	170040	-9944	-4388

PDO的要求之一是可用端口数量以及需要预留的端口余量。表6展示了带有建筑连接的PDO节点结果。这些建筑物（多住户单元）的需求可能高于普通住宅（单住户单元），后者通常为1。我们可以看到，即使多个住宅和建筑物连接到同一个PDO，也始终会留有端口余量，因为端口数从未达到最大限制。例如，如果这些区域新建住宅，或现有住宅的需求发生变化，这便为未来的网络扩展提供了空间。

关于分光器和电缆的类型，地图 1 中需要以下额外设备：2 个分路器；2 根 16芯光纤电缆；3 根 32芯光纤电缆。该网络的需求为

121 根光纤。为满足这一需求，至少需要 2 个 1:64 型分路器。至于电缆，则需根据从起始点节点引出的分支选择不同类型。例如，需要 47 根光纤的分支，需要一根 32芯光纤配电电缆和另一根 16芯光纤配电电缆（共 48 根光纤，其中 1 根未使用，但仍可用于未来扩展）。

在执行时间方面，设计这个首个网络的一次运行耗时 30.5 秒。与人工设计方案相比，这一方案更具优势；理论上，设计如此规模的网络可能需要数小时。总体而言，最佳优化版本的总成本比人工设计方案低 31%。

表6. 地图 1 中包含与建筑物（多住户单元）连接的 PDO 所使用的端口数量。

PDO 节点标识符（包含一条多住户单元链路）	**已使用端口数（最多 12 个）**	**服务的独立用户数量（不同的单住户单元/多住户单元节点）**
0	6	5
9	9	4
24	9	8
65	7	5
76	11	5

研究的第二张地图来自新泽西州（地图 2），比地图 1 略大，包含更多节点和边。由于存在多条可能的路径，这张地图构成了更具挑战性的场景。在地图 1 中，到达特定分支上某个节点的可能路径有限，也就是说，只有一条路径。由于篇幅限制，我们仅从各项指标的角度比较人工设计方案与遗传算法的解。从表 7 的结果可以看出，这些结果与此前的结果一致。遗传算法以增加引入光缆的距离为代价，生成了配电点数量较少的解决方案。至于计算时间，尽管地图规模更大，设计整个网络平均只需 37 秒。与人工设计方案耗费数天相比，计算开销微乎其微。遗传算法找到的最佳解相较于人工设计方案的成本节省了 52.2%。

在图 2 和图 3 中，我们可以观察到可视化设计解决方案。就解决方案而言，它们各不相同，为工程师提供了可供后续更新和改进的替代方案。遗传算法解决方案倾向于探索设备节省方案，并降低新设备的成本。由于适应度函数的性质，这一结果是合理的。我们可以观察到，与手动找到的方案相比，大多数 PDO 都具有多个汇聚连接。总体而言，找到的解决方案并未违背由

表 7. 地图 2 的手工设计与遗传算法解决方案比较

		GA			
指标	**手工设计最佳值**	**最差值**	**中位数**	**平均值**	
配电点数量	27	14	14	15	16 (±0.5)
引入电缆用量（公里）	3.53	3.09	3.29	2.90	3.01 (±0.01)
配电电缆用量（公里）	2.76	1.65	1.57	1.76	1.71(±0.05)
适应度得分	50216	24828	15013	25274	26635(±1247)
适应度差异（遗传算法-手工设计）	-	-25388	64797	-24942	-23581

电信公司设定的参数，最终为初创企业提供经过优化且节省成本的解决方案，尽量缩短电缆长度和配电点数量，并利用最大引入光缆约束，以节省客户与 PDO 之间的多条短连接。

6 结论

多年来，随着云服务、视频和音频流媒体以及游戏等带宽密集型应用的使用日益普及，对高质量互联网服务的需求迅速增长。这促使电信公司改进其网络服务，以满足客户的需求。然而，要构建有效的网络，公司必须考虑多项因素，例如设备成本、距离、需要服务的住宅数量以及光功率预算。综合考虑所有这些因素，这是一项复杂的任务，需要投入时间和人力资源。因此，通过自动化这些网络的设计，我们可以将设计过程所需的工作量从数天缩短至数小时甚至几分钟，同时优化设计，降低成本。

在本研究中，我们提出了一种基于遗传算法的电信网络自动设计方法。具体而言，我们提出了一种双层表示法。第一层对应一个二进制列表，用于定义最优配线点；第二个列表则指明客户连接到哪个点。我们使用纽约和新泽西州的地图，将该方法得出的结果与两个人工设计并实际部署的解决方案进行比较，以验证该方法。针对每张地图，我们都将结果与人工设计方案进行比较，以评估自动设计网络的质量。

总体而言，遗传算法能够发现比现实中由工程师团队规划并人工设计的现有方案更优的解决方案。对于所考虑的场景，我们提出的解可将成本降低 31% 和 52。2%。我们方法的另一个重要优势，是能够在相对较短的计算时间内获得高质量的解。通常，设计一个新的人工设计方案可能需要数小时甚至数天的人工工时，具体取决于网络的复杂程度。相比之下，所提出的系统只需几秒钟即可生成解决方案，即使面对更大的地图也是如此。

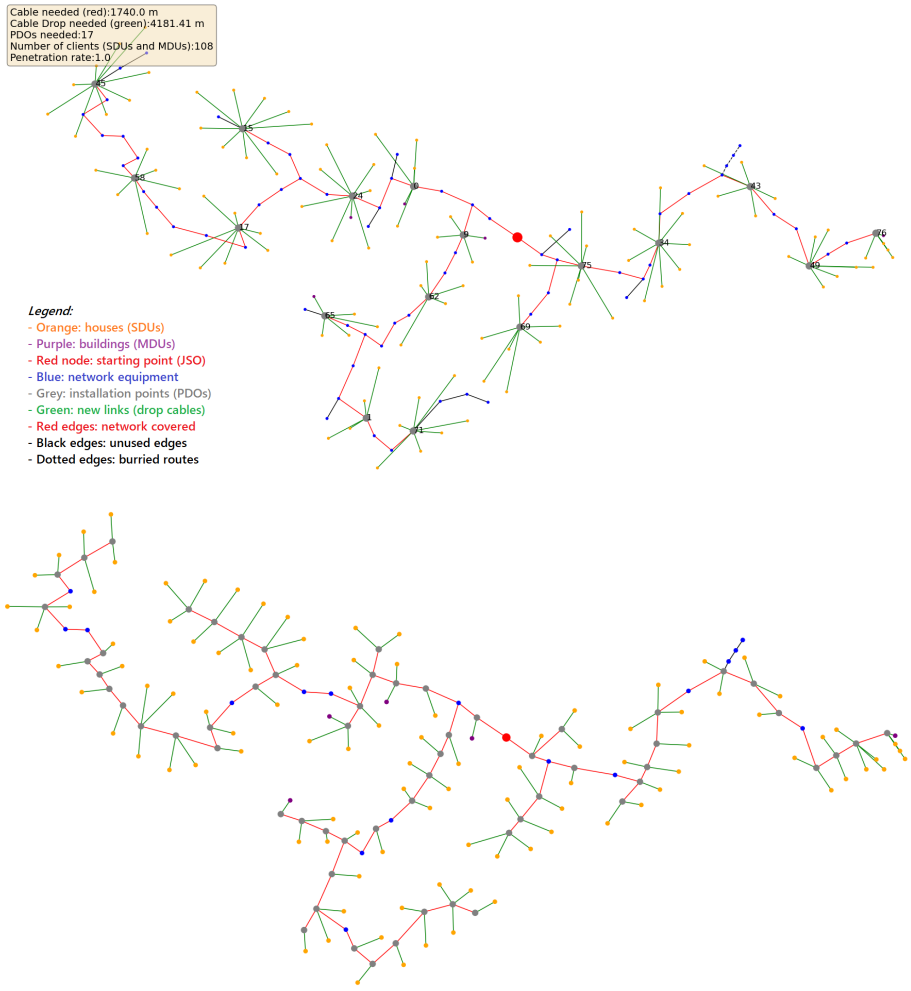


图 2。 地图 1 的解决方案可视化。上方是所提方法的最佳解，下方是现实中手工制作并已部署的方案。

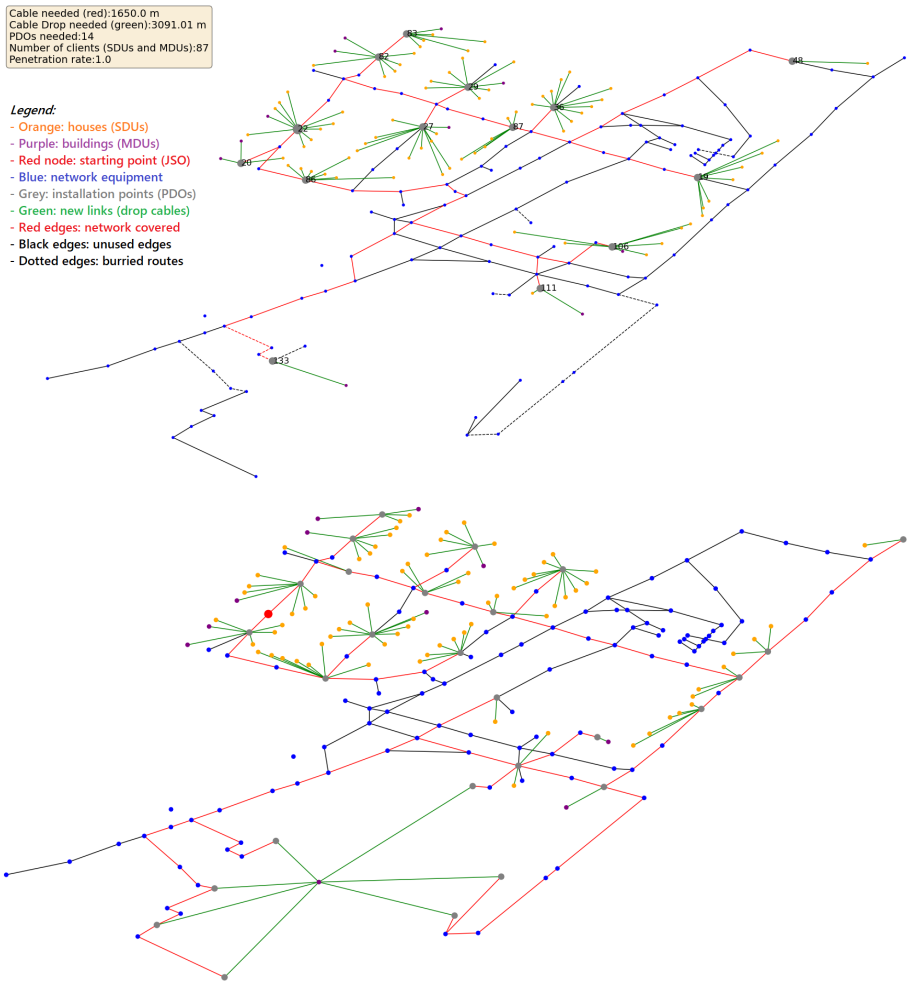


图 3. 地图 2 的解决方案可视化。顶部是所提方法的最佳解决方案，底部是现实中手工制作并已部署的方案。

致谢

本研究部分由项目 POWER（资助编号 POCI- 01-0247-FEDER-070365）提供资金，该项目由葡萄牙2020（PT2020）通过欧洲区域发展基金（FEDER）共同资助，同时也由竞争力与国际化运营计划（COMPETE2020）以及 FCT - 科学技术基金会，I.P./MCTES 通过国家资金（PIDDAC）提供资助，资助范围为 CISUC 研发单位 - UIDB/00326/2020 或项目代码 UIDP/00326/2020*

参考文献

1. Ali, R., Glover, T., Kampouridis, M., Tsang, E.：用于优化吉比特无源光网络/FTTP 网络设计的引导式局部搜索。载于：计算机网络与通信（NetCom）。英国 2. Andrej, C., Kin, P., Anis, O.：一种改进的蚁群优化算法，用于 FTTH 接入网设计。载于：2012年 第17届欧洲网络与光通信会议。阿布扎比，阿联酋（2012年） 3. Andrej, C., Kin, P., Anis, O.：使用蚁群优化设计配备汇聚设备的 GPON-FTTH 网络。载于：2013年 IEEE 通信系统与网络计算智能研讨会（ CIComms ）（ 2013 年） 4. Council, F.：光纤到户手册，第7版。欧洲（2016年） 5. Dias, L., Santos, A., Pereira, H., Almeida, R., Giozza, W., Sousa, R., Assis, K.：用于实际无源光网络设计的进化策略。载于：Photonics 2022, 9, 278（2022年） 6. Kokungal, Ari：无源光网络规划优化。载于：应用数学建模，第35卷，第7期。土耳其（2011年） 7. Lin, B.：LRPONs 中的级联分光器拓扑优化（2012年） 8. Mata, J.：光网络中的人工智能（人工智能）方法：全面综述。英国（2018年） 9. Morais, R., Pavan, C., Pinto, A., Requejo, C.：用于可生存光传送网络拓扑设计的遗传算法。载于：光通信与网络期刊，第3卷。葡萄牙（2011年） 10. Papaefthimiou, K.：面向资本支出最小化的算法化 PON/P2P FTTH 接入网设计。塞尔维亚，贝尔格莱德（2013年） 11. Tany, V.：使用遗传算法设计无源光网络。载于：SBMO/IEEE MTT-S 国际微波与光电子会议（IMOC）。巴西（2009年）