

无线 Mesh 网络部署几何连通覆盖问题求解方法

李 越 刘乃安

(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

摘 要 用户覆盖和网络连通是无线 Mesh 网络规划面临的重要挑战,传统上是对它们独立进行分析。为了有效结合二者进行网络部署,将网络的分层特性、用户需求、网络连通、部署开销等因素考虑在内,提出了面向无线 Mesh 网的几何连通圆盘覆盖问题。利用备选点集选择算法来将连续空间选址问题转变为离散空间选址问题,并采用改进的多目标遗传算法对优化问题进行求解,从而获得 Pareto 解集。实验结果证明,提出的方案可以有效解决网络部署的优化问题。

关键词 无线 Mesh 网(WMNs),网络部署,几何连通,多目标遗传算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.012

Method of Geometric Connected Disk Cover Problem for Wireless Mesh Networks Deployment

LI Yue LIU Nai-an

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract User coverage and network connectivity are important for wireless mesh networks planning which are studied separately in traditional ways. In order to effectively combine these two factors, a geometric connected disk cover problem for wireless mesh networks was proposed considering hierarchical network characteristics, user demands, network connectivity and deployment cost. Continuous spatial location selection problem is transformed into discrete problem by the set of candidate points' generation algorithm. An improved multi-objective genetic algorithm was proposed to get Pareto solutions. Experimental results prove the efficiency of this scheme to deploy mesh networks.

Keywords Wireless mesh networks (WMNs), Networks deployment, Geometric connected, Multi-objective genetic algorithm

1 引言

无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Networks, WMNs)是一种新型的高容量、高速率分布式无线网络。作为未来无线网络理想的组网方式和关键技术之一^[1], WMNs 可以应用在网络接入、电子商务和实时监控等多个领域^[2]。近年来,对于 WMNs 的研究主要集中在链路调度、路由选择、网络安全等方面^[3-4]。想要获得良好的组网性能,网络设备部署也是一个需要考虑的问题。

如图 1 所示, WMNs 是由 Mesh 路由器(Mesh Router, MR)、网关(Gateway, GW)和 Mesh 终端(Mesh client, MC) 3 类节点构成的一个分层网络。MR 不仅作为无线接入点(Access Point, AP)为其覆盖范围内的 Mesh 终端提供无线接入,还作为中继器为其他 MR 转发报文;GW 以有线方式连接到 Internet,为用户提供互联网服务。在此类场景中,用户的需求分布以及优先级信息可以事先获得,Mesh 骨干网的拓扑通常固定不变,网络部署的目标就是在骨干网络连通的前提下覆盖更多的用户。不恰当的部署位置或是过少的 MR 数量

都会导致网络的覆盖和连通性达不到设计要求,无法满足用户的带宽需求,甚至造成网络负载不均衡以及网络瘫痪。而过多的 MR 不仅会增加网络成本,同时可能会由于无线信号的相互干扰而降低网络的整体性能。在 MR 数量一定的情况下,还应该尽量保证重要用户优先得到服务。实验表明^[5],在覆盖区域均匀或是随机地部署 MR 都无法充分利用每个 MR,导致网络性能下降。因此,建立好的优化模型并用合适的方式求解,对于提升网络性能和降低网络成本具有重要意义。

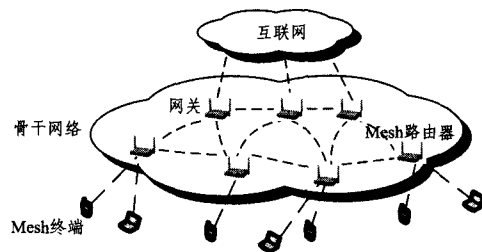


图 1 无线 Mesh 网络结构示意图

本文研究的路由部署问题是在用户需求已知的前提下,

到稿日期:2016-05-22 返修日期:2016-09-16

李 越(1989—),男,硕士生,主要研究方向为无线 Mesh 网, E-mail: yue.li.xidian@foxmail.com; 刘乃安(1966—),男,教授,主要研究方向为无线通信与射频电路、宽带无线 IP 网络与技术、扩展频谱通信与通信对抗。

在连续空间进行路由的选址,实现网络连通、用户覆盖和成本的最优化。本文首先对该问题进行了数学建模,然后设计了备选点集选择算法来将连续空间转变为离散空间,最后采用改进的多目标遗传算法(Improved Multi-objective Genetic Algorithm)进行求解。通过与贪婪算法以及传统遗传算法进行比较,表明该网络部署方案可以获得更好的效果。

2 网络部署相关研究

网络部署受很多因素的影响,因此需要根据实际情况建立合适的数学模型。为了满足用户的容量需求,文献[6]建模为连通度受限的末端 Steiner 数问题。考虑到现实环境中各类遮挡物的影响,MR 的覆盖范围不是标准的圆盘模型,而是非均匀的图形。这种模型虽然更符合实际情况,但需要物理层技术估计每条链路的信号质量,实现起来比较困难。文献[7]考虑了部署开销、用户覆盖、信道分配、网络容量、干扰、负载均衡等因素,建立了多目标模型,并采用粒子群算法进行求解。该模型较为复杂,而且是在离散环境下进行研究的,需要事先提供离散备选位置。

网络的连通和用户覆盖是部署分层无线 Mesh 网必须解决的问题,如何将二者结合起来讨论是很多学者研究的重点。文献[8]把问题定义为连通圆盘覆盖问题,将此问题分解为几何圆盘覆盖和寻找包含最少 Steiner 点的 Steiner 树两个子问题,并分别设计算法对两个子问题进行求解。这样虽然可以简化求解过程,但将覆盖和连通分开求解的效果并不理想。文献[9]考虑了用户优先级对节点部署的影响,保证优先级超过界限的用户必须被覆盖,并利用添加了惯性项的模拟退火算法进行求解。但文献[9]没有对整网的连通性进行约束,这样可能会使网络出现分割现象。文献[10]利用网格规划方法离散化覆盖区域,设计了贪婪算法,迭代寻找最佳部署位置。该算法先完成区域覆盖,再实现网络连通,最后进行修正,删除冗余部署节点。但是贪婪算法存在一定的盲目性,且分开考虑网络覆盖和连通也会影响最终结果。

本文综合考虑了现有文献对于建模以及求解存在的问题,提出了几何连通圆盘覆盖模型,把覆盖、连通和部署开销作为优化目标,再将连续空间离散化得到备选点集,最后求解多目标优化问题。

3 网络部署问题描述与建模

目前大多数的模型是提前给定了非常多的路由节点候选位置,再通过算法从中选取一个位置集合。这样会简化模型的建立过程,但此种假设往往不太现实。要想达到比较好的部署效果,就需要大量的候选位置来提高精度,而对候选位置进行采集整理非常困难,同时算法的计算时间也会延长。而在本文讨论的实际应用场景中,无线路由节点往往可以部署在大部分连续区域。连续空间选址模型的求解虽然更加困难,但却更符合实际需求,能获得更好的结果。

3.1 场景模型和假设

本文假设在二维平面上构建了一个由骨干层和接入层组成的分层 WMNs 部署模型。其中骨干层由多个路由节点组成,而接入层由离散化的用户需求点构成。节点之间的关系有两种:骨干层节点间的连通关系和骨干层节点与用户节点

之间的覆盖关系。该模型的定义如下。

定义 1(几何连通圆盘覆盖问题) 在确保整个网络连通的前提下,在连续区域中选择尽可能少的路由节点覆盖尽可能多的用户需求,同时考虑不同用户的优先级以及骨干层节点的接入容量约束。

假设用户均为普通的 802.11 设备,他们与路由节点之间能够进行一跳范围内的通信,用户的分布与需求量事先已知,并通过离散的用户需求点来表示,需求量大的区域离散点的密度更大。另外,实际环境中不同区域的用户的服务等级有区别,因此部署需要优先实现对高服务等级用户的覆盖。在骨干层,路由节点可以通过多跳方式相互通信,转发用户节点的数据,从而让远距离的交流成为可能。为了确保网络的整体连通性,需要骨干层两节点之间存在路由链路。其他假设如下:

假设骨干层节点的覆盖范围是以该节点为中心的圆盘区域,其半径记为 r ;

假设骨干层节点的连通范围是以该节点为中心的圆盘区域,其半径记为 $R(R>r)$;

假设每个 MR 的部署成本大致相同,可用 MR 数量来反映部署成本;

假设骨干层节点可以接入的用户量有上限;

假设骨干层节点间通信的带宽需求不受链路容量的限制。

3.2 形式化描述

为形式化地描述 MR 部署问题,本文将使用表 1 所列的符号。

表 1 本文符号定义

符号	定义
$S=\{1,\cdots,m\}$	部署 MR 的候选位置集
$N=\{1,\cdots,n\}$	MC 需求点集
$G=(V,E)$	骨干网连通图
$w(G)$	骨干网连通分支数
p_i	MC i 优先级
a_{ij}	MC i 与 MR j 的覆盖关系
x_{ij}	MC i 与 MR j 的分配关系
b_{jl}	候选位置 j 与 l 之间的连通关系
y_{jl}	部署在候选位置 j,l 的 MR 之间的连通关系
z_j	一个 MR 被部署在候选位置 j 处
$S_i=\{j_1^{(i)},j_2^{(i)},\cdots,j_L^{(i)}\}$	可以覆盖 MC i 的候选位置子集

问题可以建模为:

Maximize $\sum_{i \in N} \sum_{j \in S} p_i x_{ij}$ (1)

Minimize $\sum_{j \in S} z_j$ (2)

Subject to: $\sum_{j \in S} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N$ (3)

$x_{ij} \leq a_{ij} z_j, \forall i \in N, \forall j \in S$ (4)

$z_j^{(i)} + \sum_{h=l+1}^{L_i} x_{jh}^{(i)} \leq 1, \forall \ell=1,\cdots,L_i-1, \forall i \in N$ (5)

$b_{jl} \leq z_j, \forall j,l \in S$ (6)

$b_{jl} \leq z_l, \forall j,l \in S$ (7)

$2y_{jl} \leq b_{jl}(z_j+z_l), \forall j,l \in S$ (8)

$w(G)=1$ (9)

$a_{ij}, x_{ij}, b_{jl} y_{jl}, z_j \in \{0,1\}, \forall i \in N, \forall j,l \in S$ (10)

目标函数式(1)是最大化加权的用户覆盖总和。式(2)是最小化 MR 部署数量。约束条件式(3)要求每个 MC 至多被分配给一个 MR。式(4)表明 MC 分配给 MR 的前提条件是该候选位置可以覆盖到 MC 并且安装了 MR。式(5)强调了同一个 MC 能被多个 MR 覆盖的情况下选择信号最强的 MR 接入。式(6)、式(7)表明 MR 之间可以连通的前提是该候选位置安装了 MR。式(8)表明 MR 之间构成通路的前提是二者位置上可以连通并且该候选位置安装了 MR。式(9)要求骨干网的连通分支数为 1,即全连通性要求。式(10)是参数的二进制约束。

MR 部署是 NP-hard 问题,随着节点规模的扩大,其解空间也会急剧增大,因此需要提出一种高效的启发式部署算法来解决此问题;尤其对于 MR 候选位置连续的情况,大部分的启发式算法都很难求解。为了克服启发式算法的缺点,简化求解并提高精确度,还需要将连续空间选址问题转变为离散空间选址问题。

4 备选点集选择算法

该算法依据用户节点的拓扑分布情况和优先级顺序,将初始平面区域划分成不同连接功能的子区域,再根据网络拓扑和单位覆盖圆的性质依次从中筛选出覆盖和连通性能最好的离散点组成备选区域,从而在保证求解质量的前提下将连续空间几何问题转化为离散空间节点问题,为下一步求解启发式算法做准备。

4.1 定义与原理

4.1.1 备选点集

假设平面存在两个用户节点,二者之间的距离为 d ,无线路由的覆盖范围为 r 。当 $d < 2r$ 时,通过在两点间部署单个路由节点,可以实现同时覆盖;当 $d > 2r$ 时,则无法利用一个路由节点实现覆盖。利用该性质,可以对连续空间进行分类。

在图 2 所示的双用户节点分布图($2r > d > r$)中,路由节点可以部署在任意连续区域,但只有部署在黑色区域中的 MR 才能够同时覆盖两个用户,因此覆盖效果更好的黑色区域就是备选区域。若 $d > 2r$,则不存在备选区域。全部节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 中距离小于 $2r$ 的任意两个节点都能够生成一个备选区域,在备选区域内部任何位置部署路由都可以保证对这两个用户节点的覆盖。若某些节点与其他所有节点的距离都大于 $2r$,则该类节点无法构建备选区域,可以被定义为孤立用户节点。

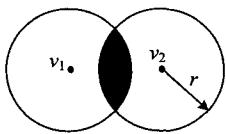


图 2 双节点备选区域示意图

定义 2(备选区域) 由两个间距小于 $2r$ 的用户节点确定的,能够同时覆盖到两个节点的路由部署区域。

上述方法可以排除大部分的无用区域,但获得的备选区域仍然是连续空间,不利于优化算法的求解。文献[11]引入了边界弦和边界点的概念。如图 3 所示,节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 中距离小于 $2r$ 的两个点构成一组边界点,边界点的连线是边界弦,以边界弦为对称轴,距离两个边界点 r 的

位置为圆心,可以确定两个离散备选点 k_1, k_2 。所有边界点确定的离散备选点以及全部的孤立用户节点构成了备选点集。

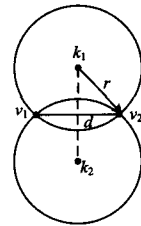


图 3 边界点覆盖示意图

如图 4 所示,节点 v_1, v_2 之间的距离小于 $2r$,构成一组边界点,根据边界弦规则可以确定两个离散备选点 k_1, k_2 。同理,边界点 v_2, v_3 可以确定离散备选点 k_3, k_4 。而节点 v_1, v_3 之间的距离大于 $2r$,无法产生离散备选点。由于节点 v_4 与其他所有节点的距离都大于 $2r$,因此其以孤立节点的身份加入到备选点集。最终生成的备选点集 $\{k_1, k_2, \dots, k_5\}$ 可以确保对所有用户的覆盖。

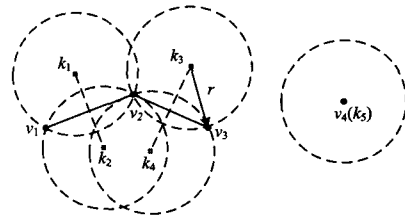


图 4 备选点集示意图

定义 3(备选点集) 用户节点集合中所有满足距离条件的节点利用边界点、边界弦规则确定的离散备选点与孤立用户节点的集合。

备选点的数量由用户的数量和相对位置决定,当规模扩大到一定程度时,会出现很多的相似备选点,这些点的位置相近,能够覆盖的用户数量相当。为了进一步减少运算量,同时保证求解质量,有必要通过算法排除掉冗余的备选点,获得最终的备选点集,从而满足优化算法的求解要求。

用一个 0-1 矩阵 $C = \{c_{ij}\}_{m \times n}$ 来记录备选点集和用户节点的覆盖关系, m 为备选点数量, n 为用户节点数量。若第 i 个备选点能够覆盖第 j 个用户,则矩阵元素 $c_{ij} = 1$ 。每个行向量代表该备选点的覆盖集合。若第 i 个备选点覆盖的用户节点集是第 j 个备选点的真子集,则第 i 个备选点被第 j 个备选点支配,即该备选点是可以被排除的。通过判定覆盖关系矩阵中行向量之间的支配情况,即可确定出冗余的备选节点。

4.1.2 连通约束修正

文献[11]中的备选区域选择算法仅仅处理了用户覆盖问题,并没有将路由节点的连通需求考虑在内。为此,本文在构建备选点集的基础上对连通约束进行了修正,以在保证备选区连通的前提下,尽量减少新增离散备选点的数量。

构建网络图 $G(V, E)$, V 是筛选后的备选点集, E 是备选边集。边存在的条件是两备选节点连通,即相对距离小于骨干层连通半径 R 。首先计算备选区的连通分支数,若等于 1 则说明点集已经全连通,否则统计每个分支与其他分支相距最近的节点对。接着利用这些节点对进行连通性修正,若节点对距离小于 $2R$,利用连通半径 R 和节点坐标生成两个新的备选点;若距离大于 $2R$,则在节点对连线上依次等间距排列

备选点。然后统计每个备选点覆盖用户的情况,遍历所有备选点,删除被支配的冗余备选点。最终根据被覆盖的用户加权后的大小对筛选修正后的备选点集进行排序,并将排序结果作为智能优化算法的输入数据。

4.2 算法细节

根据上述规则,分别设计用于覆盖和连通的备选点集生成算法。

算法 1 覆盖用户的 MR 备选点集生成算法

输入:MC 需求点集 N ,MC 优先级权值集合 P ,MR 覆盖半径 r

输出:MR 离散备选点集 S_{cov} ,覆盖关系矩阵 C

1. 初始化 $S_{cov} \leftarrow \emptyset, S_{iso} \leftarrow N, C = \{0\}$
2. for MC $i, j \in N, i \neq j$
3. 计算二者距离 $dis(i, j)$
4. if $dis(i, j) < 2r$
5. 根据 MC i, j 坐标位置及 r 生成两个离散备选点 k_1, k_2
6. $S_{cov} \leftarrow S_{cov} \cup \{k_1, k_2\} / *$ 将边界点加入备选点集 $*/$
7. $S_{iso} \leftarrow S_{iso} \setminus \{i, j\}$
8. $S_{cov} \leftarrow S_{cov} \cup S_{iso} / *$ 将孤立节点加入备选点集 $*/$
9. for MR $i \in S_{cov}$
10. for 用户 $j \in N$
11. 计算二者的距离 $dis(i, j)$
12. if $dis(i, j) < r$
13. $c_{ij} = p_j / *$ 生成覆盖关系矩阵 $*/$
14. 计算 MR i 覆盖的 MC 优先级总和 $c_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}$
15. for MR $i, j \in S_{cov}, i \neq j$
16. 比较二者的 MC 覆盖情况
17. If i 被 j 支配
18. $S_{cov} \leftarrow S_{cov} \setminus \{i\} / *$ 删除冗余节点 $*/$

算法 2 连通的 MR 备选点集生成算法

输入:MR 备选点集 S_{cov} ,MR 连通半径 R ,覆盖关系矩阵 C

输出:连通的 MR 备选点集 S_{con}

1. 初始化 $S_{con} \leftarrow S_{cov}$
2. 根据 S_{con} 构建连通图 G ,计算连通分支数 $w(G)$
3. while $w(G) > 1$
4. $D_{min} = \inf, u^* = v^* = \inf$
5. 遍历各个连通分支,确定两个连通分支相距最近的两点 u, v ,并计算两点间距离 $dis(u, v)$
6. if $dis(u, v) < D_{min}$
7. $D_{min} = dis(u, v), u^* = u, v^* = v$
8. if $D_{min} < 2R$
9. 根据 u^* 和 v^* 的坐标位置及 R 生成两个离散备选点 k_1, k_2
10. $S_{con} \leftarrow S_{con} \cup \{k_1, k_2\}$
11. else
12. 在 u^* 和 v^* 连线上均匀排列 $[dis(u, v)/R]$ 个备选点 $k_1, k_2, \dots, k_{[dis(u, v)/R]}$
13. $S_{con} \leftarrow S_{con} \cup \{k_1, k_2, \dots, k_{[dis(u, v)/R]}\}$
14. 根据 S_{con} 构建连通图 G ,计算连通分支数 $w(G)$
15. 计算新增备选点的覆盖用户优先级总和
16. 根据覆盖用户优先级总和和对 S_{con} 中的节点排序

5 模型求解算法

本文建立的求解模型同时考虑了部署的成本和用户覆盖情况,是一个多目标优化问题。遗传算法模拟生物的自然选择和遗传特性,通过个体之间的相互作用和迭代进化来寻找

最优解,是目前应用较为广泛的智能优化算法。而对于多目标优化问题,遗传算法同样可以满足求解需求。

5.1 多目标遗传算法 NSGA-II

由于多个目标之间存在冲突,因此多目标优化最终得到的一般是多个 Pareto 解。对于一个多目标优化问题, x 是决策向量, $\min f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)), x \in X$, $f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)$ 为 N 个目标函数, x 表示决策解, X 表示解空间。若解向量 x_1 和 x_2 满足:

$$\begin{cases} \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}, & f_j(x_1) \leq f_j(x_2) \\ \exists k \in \{1, 2, \dots, N\}, & f_k(x_1) < f_k(x_2) \end{cases} \quad (11)$$

则称解向量 x_1 支配解向量 x_2 , 记作 $x_1 > x_2$ 。给定一个解 x^* , 若在解空间 X 中不存在支配 x^* 的解, 则称 x^* 为 Pareto 最优解或非支配解。所有非支配解构成多目标意义下的最优解集, 这些解在目标空间中构成问题的 Pareto 前沿。

多目标算法除了要求算法能够快速收敛到 Pareto 最优解之外, 还需要保持非支配解集的多样性, 即 Pareto 前沿的连贯性。NSGA-II 是印度科学家 Deb 于 2000 年在 NSGA 的基础上提出的一种基于快速分类的非支配遗传算法 (fast-nondominated-sorting)^[12]。为了使 Pareto 域中的元素能扩展到整个 Pareto 域, 并尽可能均匀遍布, Deb 提出了拥挤距离 (crowding distance) 的概念。通过估计某个点周围的解密度, 采用拥挤距离比较算子代替共享参数的取值, NSGA-II 降低了算法复杂度, 提高了收敛性, 保持了解的多样性。

5.2 算法设计

根据以上分析, 利用备选点集选择算法对几何连通圆盘覆盖问题进行离散化, 再利用 NSGA-II 算法求解多目标优化问题。为了满足 MR 部署问题需求和求解方便, 本文对多目标遗传算法进行了改进, 有如下关键步骤。

(1) 种群个体初始化

算法中的种群个体是由 m 个元素构成的向量 X , m 为备选节点的数量, 若在第 i 个备选点处部署 MR, 则向量元素 $x_i = 1$, 每个个体代表一组 MR 选择方案。遗传算法通常会采用完全随机的初始化方案, 该方案虽然能够保持较好的种群多样性, 但是容易生成许多适应度差的个体, 不利于算法收敛。本文方案在对备选区域离散化后, 会根据被覆盖的用户加权和对备选节点进行排序, 并按照式 (12) 所示的概率抽取相应的备选点构成初始种群。

$$p_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^m c_i} \quad (12)$$

其中, c_i 为备选节点的用户覆盖加权和, p_i 为该备选节点被选中的概率。这样, 覆盖效果更好的节点更易进入初始种群。本文的备选点集选择算法可以有效节省遗传算法的初始运行时间, 提高精度。

(2) 适应度

适应度评价是对解的好坏的一种度量, 它通常依赖于解的行为与种群的关系, 一般以目标函数或其他方法来表示。本文的目标函数是最大化用户覆盖加权和以及最小化 MR 部署数量。为了 NSGA-II 求解的方便, 适应度函数可以表示为:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{\sum_{i \in N} p_i v_i - \sum_{i \in N} \sum_{j \in S} p_i x_{ij}}{\sum_{i \in N} p_i v_i} \\ f_2 = \sum_{j \in S} z_j \end{cases} \quad (13)$$

其中,第一个函数表示归一化的未覆盖 MC 的优先级加权和,被覆盖的用户越多,适应度值越小;第二个函数表示部署的 MR 总数,部署开销越小,适应度值越小。算法运行过程中适应度值更小的个体更能满足优化的要求,存活概率更大。

(3)拥挤距离计算

拥挤距离即目标空间上某点与同等级相邻两点在各个目标函数上的相对距离之和,如图 5 所示。

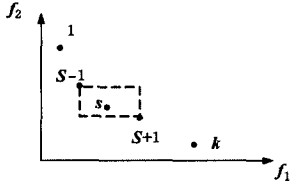


图 5 二维多目标优化个体拥挤距离示意图

计算时,将同等级的个体按照第 m 目标函数值进行排序,设定首尾两端个体的拥挤距离为无穷大,其它个体的拥挤距离按照式(14)进行计算。

$$D_s = \sum_m \frac{D_{s+1} \cdot m - D_{s-1} \cdot m}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (14)$$

其中, $D_s \cdot m$ 为第 s 个个体的第 m 目标函数。选择过程会使拥挤距离较大的个体进入下一代群体,从而尽量保证 Pareto 面的平滑性。

6 仿真实验与性能分析

本节通过仿真实验来展示改进过的多目标遗传算法的性能,并将其与其他传统算法进行对比。表 2 列出了仿真实验的部分参数选择。其中,用户节点的分布位置以及优先级数值均事先随机产生。

表 2 仿真参数

参数	参数值
仿真区域	128 × 128
用户节点数	100, 150, 200
MR 覆盖半径	10.5
MR 连通半径	21
种群数	100
迭代次数	1000
交叉概率	0.9
变异概率	0.1

6.1 改进的多目标遗传算法的性能分析

图 6 示出了不同用户密度下改进的多目标遗传算法求得的 Pareto 解集。

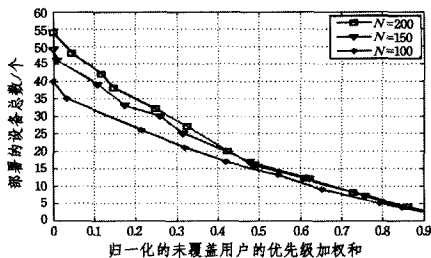


图 6 算法求得的 Pareto 解集示意图

由图 6 可知,算法得到了较为平滑且均匀的 Pareto 面,这为实际的网络部署提供了多种选择方案。随着用户密度的

增大,Pareto 面逐渐远离原点,说明了无线 Mesh 网的部署复杂度在逐渐增大。同时,实验中发现用于中继功能的路由数量比例不超过 3%,说明与传统的无线局域网相比,WMN 中的路由设备可以同时完成用户覆盖和网络连通的任务,并不需要太多额外的开销来部署中继设备。

6.2 改进的多目标遗传算法与其他协议的性能对比

本文将改进的算法与传统的遗传算法以及贪婪算法在求解和收敛速度等方面进行对比。传统的遗传算法没有备选点集的生成过程,采用在连续部署区域中随机生成备选节点的方式形成初始种群。贪婪算法以迭代方式从备选区域依次选择覆盖效果最佳的节点部署 MR。图 7 示出了这几种算法求得的 Pareto 解集。

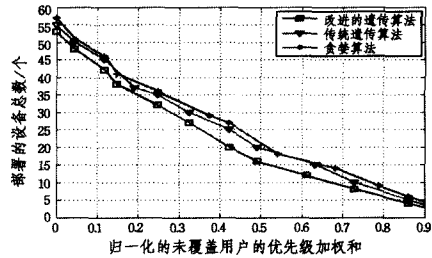


图 7 算法性能对比示意图

由图 7 可知,由于增加了备选点集生成算法,本文方案可以在覆盖效果更好的备选节点中进行优化选择,而且 NSGA-II 很好地保持了种群多样性,因此得到的 Pareto 解集比传统遗传算法更接近原点,Pareto 面比贪婪算法更加均匀。

图 8、图 9 示出了改进的算法与传统遗传算法在收敛速度上的对比。

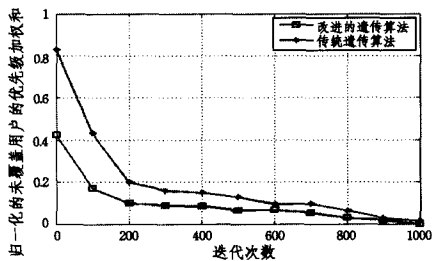


图 8 适应度 f_1 随迭代次数变化示意图

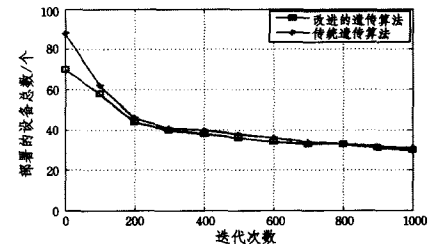


图 9 适应度 f_2 随迭代次数变化示意图

图 8 示出了 MR 部署数量控制在 50 个的情况下用户覆盖总和与遗传算法迭代次数之间的关系;图 9 示出了覆盖 80% 用户的情况下部署的 MR 总和与遗传算法迭代次数之间的关系。可知,备选点集选择算法可以排除掉大量的无用备选区,而在获得了备选点集之后,本文方案会优先选择覆盖用户加权和较大的节点构建初始种群。因此与传统遗传算法

- 学报, 2003, 31(5): 987-990.
- [4] GUO C, LIANG J R, LENG M. The Conditional Fault Diagnosis of PMC Model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(11): 2331-2337. (in Chinese)
郭晨, 梁家荣, 冷明. 基于 PMC 模型的条件故障诊断[J]. *电子学报*, 2015, 43(11): 2331-2337.
 - [5] MALEK M. A comparison connection assignment for diagnosis of multiprocessor systems[C]//*Proc. Seventh Int'l Symp Computer Architecture*. New York: ACM, 1980: 31-35.
 - [6] MAENG J, MALEK M. A comparison connection assignment for self-diagnosis of multiprocessor systems[C]//*The 11th International Symposium on Fault Tolerant Computing*. Edinburgh, Scotland, 1981: 173-175.
 - [7] ARMSTRONG J R, GRAY F G. Fault Diagnosis in a Boolean n cube array of microprocessors[J]. *IEEE Trans. Computers*, 1981, 30(8): 587-590.
 - [8] KAVIANPOUR A, KIM K H. Diagnosability of hypercube under the pessimistic One-step diagnosis strategy[J]. *IEEE Trans. Computers*, 1991, 40(2): 232-237.
 - [9] SENGUPTA A, DAHBURA A. On Self-Diagnosable multiprocessor systems: diagnosis by the comparison approach[J]. *IEEE Trans. Computers*, 1992, 41(11): 1386-1396.
 - [10] YANG X F, TANG Y Y. Efficient fault identification of diagnosable systems under the comparison model[J]. *IEEE Trans. Computers*, 2007, 56(12): 1612-1618.
 - [11] LAI P L. A system algorithm for identifying faults on hypercube-like networks under the comparison model[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2012, 62(4): 452-459.
 - [12] YE L C, LIANG J R. A fast pessimistic diagnosis algorithm for hypercube-like network under the comparison model[J]. *IEEE Trans. on Computers*, 2016, 65(9): 2884-2888.
 - [13] YE T L, HSIEH S Y. A scalable comparison-based diagnosis algorithm for hypercube-like networks[J]. *IEEE Tran. on reliability*, 2013, 62(4): 789-799.
 - [14] TSAI C H. A quick pessimistic diagnosis algorithm for hypercube-like multiprocessor systems under the PMC model[J]. *IEEE Tran. on computers*, 2013, 62(2): 259-267.
 - [15] HSIEH S Y, CHEN Y S. Strongly diagnosable systems under the comparison diagnosis model[J]. *IEEE Trans. on Computers*, 2008, 57(12): 1720-1725.
 - [16] XIONG X, LIANG J R, MA Q. Research on (t, k)-diagnosability for exchanged hypercube network[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(3): 190-198. (in Chinese)
熊茜, 梁家荣, 马强. 交换超立方网络的 (t, k) 故障诊断度研究[J]. *通信学报*, 2016, 37(3): 190-198.
 - [17] WANG D. Diagnosability of hypercubes and enhanced hypercubes under the comparison diagnosis model[J]. *IEEE Trans. on Computers*, 1999, 48(12): 1369-1374.

(上接第 79 页)

相比, 本文方案能够大大加快初始迭代阶段的适应度函数的收敛速度。

结束语 本文将 WMNs 中的路由部署建模成了更符合实际的几何连通圆盘覆盖问题, 对部署开销和用户覆盖效果两个目标同时进行优化求解; 设计了备选点集选择算法来将连续空间选址问题转变为离散空间选址问题, 该算法将用户覆盖和网络连通同时考虑在内, 以保证生成的备选点集既可以满足覆盖和连通需求, 又不会产生过多的冗余节点; 采用改进的多目标遗传算法对优化问题进行求解, 获得 Pareto 解集。经过仿真实验验证, 本文提出的算法可以有效降低算法复杂度, 提高收敛效率, 保持解的多样性。

参 考 文 献

- [1] AKYILDIZ I F, WANG X, WANG W. Wireless mesh networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2005, 47(4): 445-487.
- [2] LIN H, MA J F. Cross mechanism based secure layer reputation routing protocol for WMNs[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2014, 41(1): 116-123. (in Chinese)
林晖, 马建峰. 无线 Mesh 网络中基于跨层信誉机制的安全路由协议[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(1): 116-123.
- [3] JIA J, CHEN J, YU J, et al. Joint topology control and routing for multi-radio multi-channel WMNs under SINR model using bio-inspired techniques[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 32: 49-58.
- [4] ZHANG X, LI G, HAN W. Ticket-Based Authentication for Fast Handover in Wireless Mesh Networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 85: 1509-1523.
- [5] ROBINSON J, KNIGHTLY E W. A Performance Study of Deployment Factors in Wireless Mesh Networks[J]. *IEEE Infocom*, 2007, 2(1): 2054-2062.
- [6] ROBINSON J, SINGH M, SWAMINATHAN R, et al. Deploying Mesh Nodes under Non-Uniform Propagation[C]//*Proceedings-IEEE INFOCOM*. 2010: 1-9.
- [7] MOUNTASSIR T, NASSEREDDINE B, HAQIQ A. An efficient model for nodes deployment optimization in wireless mesh networks[C]//*IEEE INTECH12*. 2012: 81-86.
- [8] SRINIVAS A, ZUSSMAN G, MODIANO E. Construction and Maintenance of Wireless Mobile Backbone Networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(1): 239-252.
- [9] LIN C C, SHU L, DENG D J. Router node placement with service priority in wireless mesh networks using simulated annealing with momentum terms[J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, 10(4): 1402-1411.
- [10] XU H, ZHU J, WANG B. On the Deployment of a Connected Sensor Network for Confidential Information Coverage[J]. *Sensors*, 2015, 15(5): 11277-11294.
- [11] HUANG S Q, WANG G C, ZHANG Z, et al. A Method of Geometric K-center Gateway Deployment of Wireless Mesh Networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(7): 1475-1484. (in Chinese)
黄书强, 王高才, 张震, 等. 一种无线 Mesh 网络几何 K 中心网关部署求解方法[J]. *计算机学报*, 2013, 36(7): 1475-1484.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.