

专栏：低空通信

基于三维传播建模与自适应遗传算法的低空通信基站配置优化

周航¹, 秦亚龙¹, 龙泽宇¹, 张盈斐²

(1. 中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300;
2. 郑州航空工业管理学院民航学院, 河南 郑州 450015)

摘要: 为满足低空通信场景中广域覆盖与信号质量均衡的需求, 针对城市低空复杂场景, 提出一种融合三维传播建模与自适应遗传算法的基站配置优化方法。该方法构建了综合考虑自由空间损耗、多径传播与环境衰减的路径损耗模型, 并引入信干噪比开展干扰分析。结合三维地形和离散化需求点建立了覆盖率、信号质量与建设成本的多目标优化框架。为克服传统遗传算法易陷入局部最优的缺陷, 采用多段式染色体结构与自适应进化机制改进遗传算法, 实现了基站选址与天线参数的联合优化。实验结果表明, 该方法在保证成本可控的同时, 提升了信号覆盖均衡性和综合性能。在离地200 m的城市低空场景中, 改进的遗传算法仅使用8个基站即可100%覆盖目标区域。

关键词: 低空通信; 基站配置优化; 改进遗传算法; 路径损耗模型; 信干噪比

中图分类号: TN929.5; V243.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250652

Optimization of low-altitude communication base station configuration based on three-dimensional propagation modeling and adaptive genetic algorithm

Zhou Hang¹, Qin Yalong¹, Long Zeyu¹, Zhang Yingfei²

1. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
2. School of Civil Aviation, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, China

Abstract: To satisfy the requirement of wide-area coverage and balanced signal quality in low-altitude communication scenarios, a base station configuration optimization method was proposed for complex urban low-altitude environments, which was combined with three-dimensional propagation modeling and an adaptive genetic algorithm. A path loss model was constructed by comprehensively considering free-space loss, multipath propagation, and environ-

收稿日期: 2025-11-06; 修回日期: 2025-12-10

通信作者: 周航, h-zhou@cauc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No.62201577); 国家重点研发计划项目 (No.2023YFB4302901); 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项项目 (No.3122020075)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201577), The National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB4302901), The Fundamental Research Funds for the Central Universities-Special Project of Civil Aviation University of China (No. 3122020075)



mental attenuation, and the signal to interference plus noise ratio was introduced for interference analysis. A multi-objective optimization framework was established based on three-dimensional terrain and discretized demand points, including coverage rate, signal quality, and construction cost. To overcome the tendency of the traditional genetic algorithm (GA) to fall into local optima, an improved GA with a multi-segment chromosome structure and adaptive evolutionary mechanism was adopted to achieve the joint optimization of base station location and antenna parameters. Experimental results showed that this method improved signal coverage uniformity and overall performance while keeping the cost controllable. In an urban low-altitude scenario at 200 m above the ground, the improved GA could achieve 100% coverage of the target area with only eight base stations.

Key words: low-altitude communication, base station configuration optimization, improved genetic algorithm, path loss model, signal to interference plus noise ratio

0 引言

近年来,随着有人/无人驾驶飞行器的快速发展,其应用场景涵盖了物流运输、城市监测、应急救援以及空中出行等多个方面^[1]。伴随低空飞行器运行密度的持续提升,如何为其提供稳定且连续的通信保障,已成为亟待解决的核心问题。2024年,低空产业联盟提出建设“低空智联网”,其中低空通信网络承担着数据传输与远程控制等关键任务,是保障低空经济高效运行的重要环节。

然而,现有4G/5G通信公网主要面向地面用户设计,低空区域面临覆盖不足、越区干扰和高度因素导致的信号密度分布不均等问题。卫星通信系统虽具备可兼顾不同高度等优势,但其容量有限,难以单独支撑高密度的业务需求^[2]。2021年,中国移动提出未来的网络建设需要遵循“空地协同、分层分域、按需部署”策略,构建地面、低空专用与卫星互补的立体通信体系。基于此,本文聚焦低空专用网络建设,研究复杂城市环境中基站数量、位置布局与天线参数的联合优化,以提升信号覆盖率和信号质量,并降低建设成本。

与传统地面通信基站布局规划相比,低空场景在基站配置优化方面呈现出显著差异。低空飞行器在任务执行过程中通常具有高速运动、多姿态变化以及严格的可靠通信需求,其对链路稳定性、覆盖连续性与信号强度的要求普遍高于地面终端;低空覆盖需求从二维平面扩展至三维空域,

飞行器在高度方向的动态变化,使基站需要兼顾不同高度层的连续信号覆盖;建筑物在低空不同高度的遮挡特性呈不均匀性:较低高度受密集建筑强遮挡,中高度多径效应增强,而更高高度又面临强视距干扰,传播环境比地面场景复杂;传统基站天线方向图主瓣主要指向地面,难以有效覆盖低空区域,易导致大范围空域盲区。因此,低空场景在传播模型构建、优化变量定义以及天线方向图与角度参数优化等方面均具备特殊要求,亟须开展面向低空场景特性的基站配置优化研究。

现阶段,国内外学者在基站部署优化方面已积累大量成果,但多数方法主要针对地面通信场景,其模型假设难以直接适用于低空场景。在确定性优化模型方面,文献[3]提出基于混合整数二次约束规划的5G基站部署模型,兼顾覆盖率与经济成本,为资源受限场景下的基站规划提供了有效手段。文献[4]构建了混合整数非线性优化模型,提出5G宏微基站协同部署方案,进一步提升了覆盖率与经济性的平衡。然而,上述方法均基于二维场景或理想化圆形覆盖模型,未充分考虑城市三维环境导致的信号复杂传播特性。为提升建模精度,本文基于三维城市模型,引入天线方向图与信号传播机制,并结合弹跳射线(shooting and bouncing ray tracing, SBR)法进行信号传播与覆盖仿真模拟。在智能优化算法方面,文献[5]提出基于最大覆盖位置模型的优化框架,结合地理数据与人工免疫算法,实现了城市

5G基站布局的整体优化。文献[6]利用灰狼优化算法,在减少基站数量和能耗方面取得了成效。文献[7]提出了改进免疫遗传算法,引入精英保留与成本约束机制,在降低建设成本的同时,实现了弱覆盖点的全覆盖,其成果表明,遗传类算法在提高覆盖率和经济性方面具有良好的应用价值。文献[8]采用贪婪与模拟退火(simulated annealing, SA)算法相结合的方式求解基站布局,在一定程度上实现了弱覆盖率与成本的平衡。然而,上述研究局限于覆盖率提升和成本控制方面,未讨论多基站协同下的信号干扰与均衡性问题,本文引入信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)模型,开展覆盖率、建设成本与信号质量联合优化研究。文献[9-10]利用遗传算法(genetic algorithm, GA)进行宏微基站联合优化,在兼顾覆盖率与经济性的同时,验证了GA在基站布局中的实用性,但其采用的轮盘赌选择机制易使算法陷入局部最优解,本文采用自适应参数调整策略与多种进化操作改进遗传算法。文献[11]采用遗忘机制和质心牵引策略改进粒子群算法,实现了农村地区的信号覆盖问题,但该文中设定天线方向角固定,且未考虑天线倾角,难以应用于低空环境,本文引入天线方向图模型,并设计多段式染色体编码结构,用于开展考虑基站数量、布局与天线参数等因素的综合优化。

现有研究虽在基站布局优化问题上取得一定突破,且展现出GA和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法等智能优化算法的潜力,但普遍存在传播模型过于简化,未能反映城市低空三维特征;天线方向性与参数耦合缺失,导致覆盖估计偏差;干扰与信号均衡性问题未被系统考虑。这些因素限制了现有方法在真实城市低空通信中的适用性与推广价值。

针对上述问题,本文提出一种基于自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)的低空通信基站配置优化方法。该方法通过构建数字

三维城市地形,结合低空业务需求、候选基站点位与信号传播模型,建立了综合考虑覆盖率、信号质量与建设成本的多目标优化模型;设计多段式染色体编码结构,以实现基站数量、布局与天线参数的联合优化,引入多种进化操作及两阶段自适应参数调整策略,以提升算法的全局搜索与局部收敛能力。该方法通过信号干扰建模与传播仿真,实现了对低空通信覆盖的精确刻画,从而在保证高覆盖率与高信号质量的同时,有效降低了建设成本。

1 低空通信场景建模

在城市低空通信研究中,精确的场景建模是链路性能分析与网络优化的前提。本节旨在构建一个贴合实际的低空通信系统建模框架,其中,三维地形和需求点构成研究基础,基站点位与天线特性决定系统配置,路径损耗与射线追踪模型刻画信道传播特征,接收功率与SINR则进一步反映链路性能。该建模体系可为后续的低空基站部署优化与通信性能评估提供完整的理论与计算依据。

1.1 系统场景描述

开展低空通信研究必须首先明确外部环境与业务需求。本节通过三维地形图构建、需求点定义以及基站点位集合与天线建模,建立面向城市低空通信的系统性分析框架。

1.1.1 三维地形图模型

本文基于OpenStreetMap平台的公开数据,选取长沙市某20 km²的区域作为研究对象,其纬度范围为[28.276 3°, 28.315 8°],经度范围为[112.883 0°, 112.930 0°],结合玻璃、砖块和混凝土等典型材质建立三维地形模型,其中地面材质用混凝土表示。三维地形模型材质参数见表1^[12]。基于长沙市某20 km²区域OpenStreetMap数据构建的三维地形模型如图1所示。该模型不仅提供了信号反射和衍射的边界条件,也保证了传播分析贴合城市低空环境的实际特征。



表1 三维地形模型材质参数

材料种类	电导率/($S \cdot m^{-1}$)	相对介电常数的实部	建筑颜色
玻璃	0.019 2	6.27	蓝色
砖块	0.038 0	3.75	红色
混凝土	0.089 9	5.31	灰色



图1 基于长沙市某20 km²区域OpenStreetMap数据构建的三维地形模型

1.1.2 通信需求点定义

需求点集合用于刻画低空飞行器在空域中的通信位置分布。为实现可计算的覆盖评估与优化求解，本文在典型飞行高度层采用栅格划分法，将连续空间离散为可控精度的通信需求点集合 Q ，每个栅格中心为需求点 q 。通过设定合理的栅格边长 l ，集合 Q 可表示为：

$$Q = \{q_i = (x_i, y_i, H) | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

其中， H 为飞行高度， m 为栅格数， x 和 y 分别表示经纬度。栅格总数满足：

$$m = \frac{WL}{l^2} \quad (2)$$

其中， W 、 L 分别表示研究区域的宽度与长度。该方法可在保证空间精度的同时，降低计算复杂度，使需求点能够精确反映低空通信的空间覆盖特性。

1.1.3 基站点位集合和天线模型

基站点位与天线模型是决定低空通信覆盖性能的关键因素，在完成需求点定义后，本文进一步从候选点选取和天线模型两方面展开描述。

结合传统蜂窝通信的站址布局原则与低空通信的空域特点，候选点优先选择建筑物顶部、城市主干道旁、空旷地带、飞行器起降点和航线密集区。针对研究区域的密集城区特性，考虑地面塔站与楼顶站点的建设成本差异，本文利用蒙特卡洛方法^[13-14]生成候选点分布。基于蒙特卡洛方法生成的长沙市某20 km²区域内基站候选点分布如图2所示。

在天线建模方面，由于目前国内外尚未形成面向低空通信场景的专用天线结构与方向图标准，为保证研究的合理性与科学性，本文使用国际电信联盟无线电通信部门（International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, ITU-R）M.2412^[15]中定义的8×8均匀矩形阵列模型。该模型常被用于5G网络规划与覆盖仿真研究，具备大带宽、低时延和高可靠等优势，同样适用于低空通信场景。方向图参数包括65°的水平与垂直3 dB波束宽度、30 dB的最大旁瓣衰减，以及覆盖-180°~180°方位角与-90°~90°俯仰角

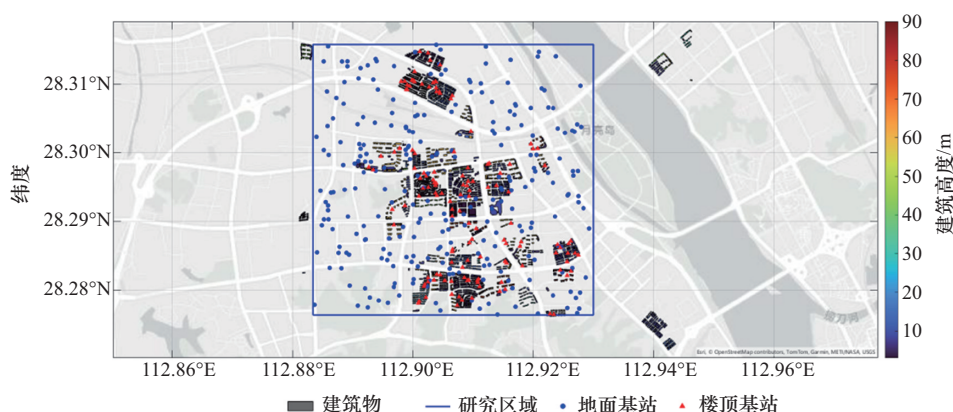


图2 基于蒙特卡洛方法生成的长沙市某20 km²区域内基站候选点分布

的三维辐射特性。本文基于 MATLAB 天线工具箱构建该模型。基于 MATLAB 天线工具箱生成的 8×8 均匀矩形阵列模型三维辐射方向图如图 3 所示。

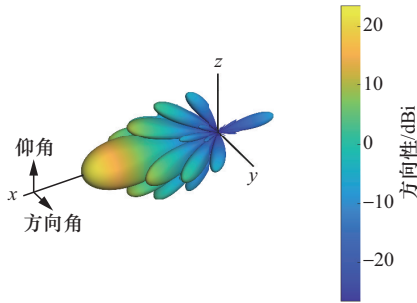


图3 基于 MATLAB 天线工具箱生成的 8×8 均匀矩形阵列模型三维辐射方向图

1.2 信号传播模型

在低空通信中，飞行器与地面基站之间的信号传播受到建筑物、地形以及大气环境的影响，因此，建立准确的传播模型对于覆盖评估和基站优化至关重要。本文采用综合路径损耗模型描述低空环境下的理论衰减特性，信号在传播过程中所经历的总路径损耗 PL_{total} 可表示为：

$$PL_{total} = PL_{fs} + PL_{mp} + PL_{gas} \quad (3)$$

其中， PL_{fs} 为自由空间路径损耗，表示电磁波在理想空间传播时距离增加导致的功率衰减，主要由传播距离 d （单位：km）和载波频率 f （单位：MHz）决定。其对数形式可用式（4）^[16]表示：

$$PL_{fs} = 32.45 + 20\lg(d) + 20\lg(f) \quad (4)$$

多径效应损耗 PL_{mp} 由直射、反射与衍射分量组成^[17]，直射分量由式（4）表示，反射^[18]与衍射分量^[19]可由式（5）表示：

$$\begin{cases} PL_{ref} = -20\lg \left| \mathbf{J}_{rx}^{-1} \mathbf{L} \mathbf{J}_{tx} \right| \\ PL_{diff} = \mathbf{J} \mathbf{V}'_{rx} \mathbf{H}_{diff1} \mathbf{J} \mathbf{V}_{tx} \end{cases} \quad (5)$$

其中， PL_{ref} 和 PL_{diff} 分别为反射、衍射分量， \mathbf{J}_{tx} 、 \mathbf{J}_{rx} 和 $\mathbf{J} \mathbf{V}'_{rx}$ 、 $\mathbf{J} \mathbf{V}_{tx}$ 分别为发射端与接收端的琼斯极化矢量， \mathbf{L} 和 \mathbf{H}_{diff1} 分别为极化矩阵^[18]和一阶衍射矩阵^[19]。此外，环境吸收损耗 PL_{gas} 可依据 ITU-R P.676^[20]建模为：

$$PL_{gas} = (\gamma_0 + \gamma_w) \times d \quad (6)$$

其中， γ_0 和 γ_w 分别为干燥空气和水蒸气的比衰减，考虑在气压为 1 013.25 hPa、温度为 15°C、水汽密度为 7.5 g/m³ 时，频率为 4.9 GHz 所对应的取值分别为 0.007 3 dB/km、0.001 4 dB/km。

为精确仿真复杂城市低空场景中的传播特性，本文在路径损耗模型基础上，引入 SBR 法^[21]对低空信号进行传播模拟与计算，为后续信号功率与 SINR 计算提供精准数据。

考虑低空通信场景实测在经济性和可行性上的限制，测量数据收集非常困难，现阶段针对传播损耗开展的验证一般是基于仿真计算分析，较少使用测量数据进行对比。为进一步验证传播建模（含射线追踪结果）的准确性，参考文献[22]在缺乏测量数据条件下的处理方式，通过对比理论模型预测结果与系统仿真结果来对模型进行检验。本文在研究区域内随机选取 60 个需求点位置作为整体区域的代表，其高度设为低空场景中常用的 200 m，需求点的位置分布如图 4 所示。



图4 需求点的位置分布

根据各需求点的位置，分别采用式（3）～式（6）建立的传播损耗模型进行理论计算，与采用基于 MATLAB 仿真平台的 SBR 法进行传播模拟。两种方法在需求点位置、基站参数与天线模型等条件上保持一致。相同位置的理论模型预测与 SBR 法仿真的接收功率对比如图 5 所示。

由图 5 可知，理论模型预测值与射线追踪结



果基本一致。进一步的统计检验表明，两组数据的差异不显著 ($p>0.05$)，说明理论模型与仿真结果具有良好的一致性，可认为本文的传播建模能够有效反映信号衰减特性，为后续基站配置优化提供可靠支撑。

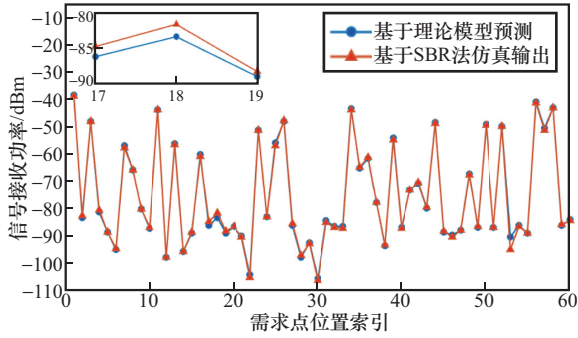


图5 相同位置的理论模型预测与SBR法仿真的接收功率对比

1.3 低空信号接收指标

信号接收功率与 SINR 是衡量低空通信链路性能的关键指标，直接反映信号传播特性及通信质量。基于传播损耗结果 PL_{total} ，飞行器在任意需求点处的接收功率可表示为：

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL_{total} \quad (7)$$

其中， P_{rx} 为信号接收功率（单位：dBm）， P_{tx} 为信号发射功率（单位：dBm）， G_{tx} 和 G_{rx} 分别表示发射和接收天线增益（单位：dBi）。

在低空通信场景中，飞行器相较地面用户具有更高的视距概率，通常可同时接收来自多个基站的信号，其主服务基站不再由最近距离决定，而取决于实际链路质量。已有研究表明，在 150 m 高度，飞行器仍可接收到来自 2~3 km 外基站的强视距信号，其服务小区并非最近基站^[2]。因此，为准确刻画低空环境下由天线方向角、上倾角、视距条件及天线增益共同决定的链路特性，本文采用最大接收功率关联机制：定义最大接收功率对应的基站为主服务基站，其余基站视为干扰源^[23]，则需求点 j 的信号接收功率可表示为：

$$P_{rx,j} = \max (P_{rx,ij}) \quad (8)$$

其中， $\max (P_{rx,ij})$ 为需求点 j 从任意基站 i 接收到

的最大信号功率。该方法已广泛使用在空地覆盖分析的相关研究中，被认为能够更真实地反映低空终端的实际基站选择机制。基于接收功率，需求点 j 的 SINR^[23-24] 可被定义为：

$$SINR_j = \frac{P_{rx,j}}{\sum_{k \neq i} P_{rx,kj} + N} \quad (9)$$

其中， $\sum_{k \neq i} P_{rx,kj}$ 表示来自其他基站的干扰功率， $N = K \cdot T \cdot B \cdot F$ 为噪声功率，其与玻尔兹曼常数 K 、环境温度 T 、带宽 B 和噪声系数 F 有关。相比最邻近关联方式，上述关联机制可有效避免因高视距概率带来的错误基站选择，从而准确反映天线方向角和上倾角配置对覆盖性能的影响。上述指标体系反映了低空通信环境中多基站信号叠加、干扰影响及噪声约束等因素，为后续的覆盖率、信号质量评估与配置优化提供了数据支撑。

2 问题描述

与传统地面蜂窝网络相比，低空通信系统需要面向空域中的三维需求点，且受限于复杂城市环境中的建筑物遮挡和多径传播效应，增加了规划难度。同时，基站建设涉及较高的经济投入，如何在保证覆盖与通信质量的同时控制建设成本，成为低空通信基站配置中的核心问题。基于此，本文从通信覆盖率、信号质量和建设成本这 3 个方面构建优化目标函数，并结合约束条件建立低空通信基站配置优化的数学模型。该模型通过加权求和策略，将多个目标转化为统一的综合优化目标函数，以便于后续算法求解与性能评估。低空通信基站配置优化数学模型如下。

$$\max F \quad F = \alpha f_1 + \beta f_2 + \gamma (1 - f_3) \quad (10)$$

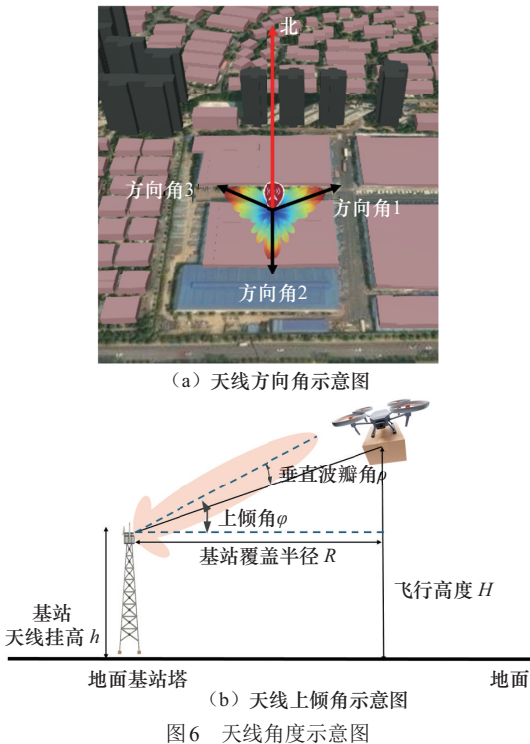
$$\text{s.t.} \begin{cases} f_1 \geq \eta_{\min} \\ d_{ij} \geq d_{\min} \\ d_{\min} = k \times R \\ \theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}] \\ \varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}] \\ \alpha + \beta + \gamma = 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中, f_1 、 f_2 和 f_3 分别为通信覆盖率、通信信号质量和建设成本、 α 、 β 和 γ 分别为覆盖率、信号质量和建设成本的权重系数, η_{\min} 为最小覆盖阈值, d_{ij} 表示任意两个基站间的欧氏距离, d_{\min} 为最小距离值, 旨在避免基站过度集中导致的重复覆盖与干扰, k 为控制系数, R 为简化的基站覆盖半径, θ 为天线方向角, 其示意图如图 6 (a) 所示, 表示天线方向图主波束朝向与正北方向的夹角, 现有研究中通常设置 θ 处于 $0\sim 360^\circ$, 可满足低空环境对全方位覆盖的需求, φ 为天线上倾角, 其示意图如图 6 (b) 所示, 计算式^[25]如下所示:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{H-h}{R}\right) + \rho \quad (12)$$

其中, H 为飞行器飞行高度, h 为基站天线挂高, R 为基站覆盖半径, 其数值可通过链路预算获得。

依据文献[26]对低空服务高度和基站天线安装高度的分析, 考虑覆盖需求与参数调优空间, 本文将上倾角 φ 取为 $0\sim 30^\circ$ 。方向角和上倾角作为发射天线的基本配置参数, 在优化建模中被视为决策变量。天线角度示意图如图 6 所示。



2.1 通信覆盖率

与地面 4G/5G 网络基站布局问题不同, 低空通信基站覆盖范围受天线方向性和传播环境影响, 难以简化为规则圆形^[27]。本文基于需求点接收功率判定是否覆盖: 设布尔变量 δ_j 表示第 j 个需求点的状态, 当接收功率 $P_{rx,j} \geq P_{\min}$ 时, $\delta_j=1$, 否则为 0。通信覆盖率可表示为:

$$f_1 = \frac{1}{m} \sum_{j \in Q} \delta_j \quad (13)$$

其中, f_1 为通信覆盖率, Q 为需求点集合, m 为需求点的数量。

2.2 通信信号质量

在低空通信场景中, 仅依据信号接收功率确定基站布局难以准确反映通信性能, 即使接收功率超过阈值, 仍可能因干扰无法实现有效连接。为此, 本文引入 SINR 用于评估信号质量, 并设定 $\text{SINR}_{\min} = -6 \text{ dB}$ ^[23], 结合文献[28]中的分级标准, 将不同 SINR 区间映射为对应评分, 进而构建归一化通信信号质量指标 f_2 , 以更合理地反映整体通信质量。通信信号质量指标 f_2 可表示为:

$$f_2 = \frac{1}{4 \times \sum_{j \in Q} \delta_j} \sum_{j=1}^m \delta_j \times S_{u,j} \quad (14)$$

其中, $S_{u,j}$ 为任意需求点的质量评分。基于 SINR 的信号质量评分标准见表 2。

表 2 基于 SINR 的信号质量评分标准

信号状态	SINR/dB	评分
极好	>25	4
好	16~25	3
中	11~15	2
差	-6~10	1
极差	<-6	0

2.3 建设成本

为了在满足覆盖需求的前提下, 尽可能减少基站建设成本, 本文根据地方标准中所述的研究区域与基站覆盖面积的关系, 估算基站数量^[29],



进一步得到归一化建设成本指标为：

$$f_3 = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (15)$$

其中， C 为实际建设成本， C_{\max} 与 C_{\min} 分别为在同等数量下的最高与最低成本。

3 面向基站配置优化问题的自适应遗传算法

针对基站建设成本、覆盖率和信号质量等目标，以及基站位置、天线方向角和上倾角等配置参数，本文采用AGA进行求解。为提升传统GA在低空通信场景中的适用性，本文进行了以下3方面的改进。

(1) 设计多段式染色体编码结构，实现基站位置与天线配置参数的联合表达。

(2) 在进化过程中考虑精英保留、改进变异、改进均匀交叉、随机重置和随机遗传等策略，以维持种群多样性。

(3) 引入基于适应度收敛行为的自适应参数调整机制^[30]，避免算法陷入局部最优解，提高全局搜索能力。

由此，得到的AGA可输出最优基站布局与天线配置方案。

3.1 染色体编码结构设计

针对基站位置与天线参数的联合表达问题，本文设计多段式染色体编码结构，其遵循ITU-R M.2412标准中推荐的典型3天线部署形式。该形式被广泛采用在覆盖分析研究中，可满足低空通信场景的全方位覆盖需求。每个染色体由若干基因片段 g_i 组成，可表示为：

$$g_i = [b_i, \theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}, \phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{i3}] \quad (16)$$

其中， b_i 为第 i 个基站的位置编号， θ_{ij} 为第 i 个基站第 j 个天线的方位角， ϕ_{ij} 为第 i 个基站第 j 个天线的上倾角。完整染色体由 e 个基因片段构成，如 $\text{Chromosome}_i = \{g_1, g_2, \dots, g_e\}$ ，表示一种基站位置布局与天线配置方案。

3.2 改进遗传进化策略

为保证种群多样性和全局搜索能力，本文在遗传操作中采用了以下机制。

3.2.1 精英选择机制

为避免轮盘赌选择导致算法陷入过早收敛，本文采用精英选择策略。设种群数为 pop_{num} ，精英遗传概率为 P_e ，每代按照适应度排序结果，仅保留适应度前 $\text{pop}_{\text{num}} \times P_e$ 个个体进入下一代，以保证优质解的继承。

3.2.2 改进变异机制

变异概率 P_m 一般较小，且仅变异 $\text{pop}_{\text{num}} \times P_m$ 个个体进入下一代。改进的变异过程如图7所示，从染色体中随机选取基因片段，对于基站编号采用替换式变异，即从候选集中随机抽取新的基站编号进行替换；对该片段中的方向角与上倾角参数，则施加服从零均值高斯分布的随机扰动，并通过边界约束确保取值合规；随后进行基因检测与修正，对存在重复编号的个体予以修正，对不满足最小间距约束的个体剔除或调整，经处理后进行基因编码，生成可行的子代染色体，完成变异操作。

3.2.3 改进均匀交叉机制

为增强全局搜索能力并提高染色体间的信息交换效率，本文对均匀交叉算子进行了改进。设交叉概率为 P_c ，在此操作中生成 $\text{pop}_{\text{num}} \times P_c$ 个子代个体。改进的交叉过程如图8所示，从当前种群中优先选择两个适应度较高的个体作为父代，经基因解码后得到若干片段；交叉时，子代的每个基因片段均以相同概率继承自父代A或B，从而实现遗传信息的均衡重组。随后，执行基因检测与修正，并重新编码生成合法的子代染色体。

3.2.4 随机重置和随机遗传机制

本文基于上述改进的遗传操作，引入随机化机制，以概率 P_r 随机重新初始化，生成 $\text{pop}_{\text{num}} \times P_r$ 个新个体。当 $\text{pop}_{\text{num}} \times (P_e + P_m + P_c + P_r) < \text{pop}_{\text{num}}$

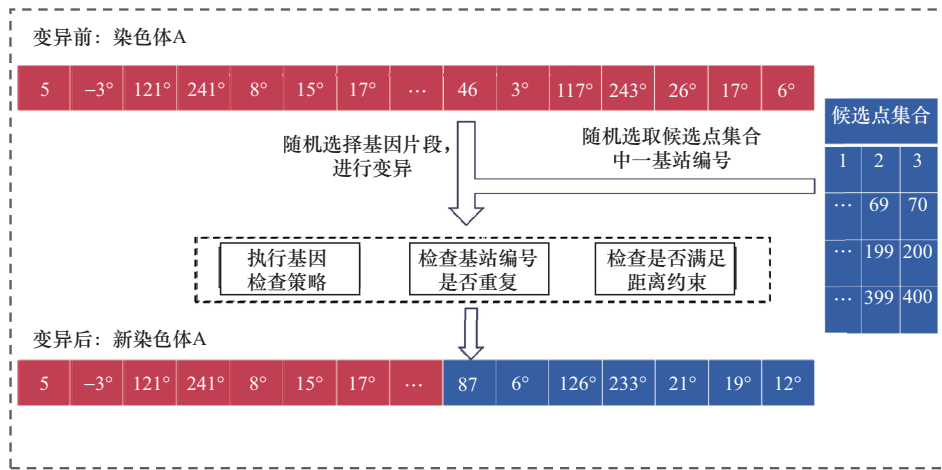


图7 改进的变异过程

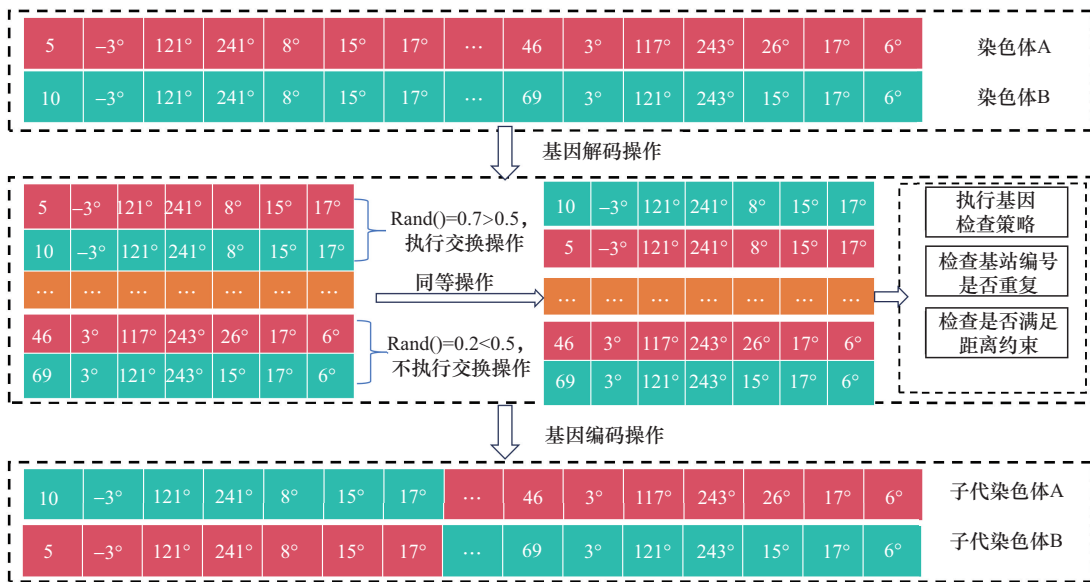


图8 改进的交叉过程

时，剩余个体以概率 $P_f=1-(P_e+P_m+P_c+P_r)$ 随机继承，以保持种群稳定性。

3.3 自适应参数调整策略

针对传统GA易陷入局部最优的缺陷，本文引入基于最优适应度收敛行为的自适应参数调整机制^[30]。该机制通过实时监测种群最优适应度 F_{max} 的变化情况，并结合其连续未变化的世代数 K_{nc} ，动态修正交叉概率与变异概率。算法在迭代过程中，根据 F_{max} 和 K_{nc} 的变化，分两阶段修正参数，实现交叉与变异操作的自适应调节，具体步骤如下。

步骤1 初始交叉概率设为 P_{c0} ，初始变异概率设为 P_{m0} 。

步骤2 若连续 K_{nc1} 代无改进，则调整为 $P_{m1} > P_{m0}$ 、 $P_{c1} < P_{c0}$ ，从而增加变异强度、减弱交叉，以跳出局部最优。

步骤3 若连续 $K_{nc2} > K_{nc1}$ 代仍无提升，则进一步加大变异概率为 $P_{m2} > P_{m1}$ ，减小交叉概率为 $P_{c2} < P_{c1}$ ，以增强算法的随机性。

步骤4 一旦发现 F_{max} 出现提升，则立即重置变异和交叉概率为初始值 P_{m0} 、 P_{c0} ，使算法重新聚



焦于新解空间的局部搜索。

需要指出的是，在执行上述过程时，需要合理设定参数，确保调整后的变异和交叉参数满足 $P_e+P_m+P_c+P_r \leq 1$ 。

4 实验模拟

本文在 Windows 10 Professional 64 位系统上使用 MATLAB 2024a 仿真软件对研究区域低空通信基站配置优化问题进行了仿真实验和分析，实验区域面积约 20 km²，涵盖城区主要街区、高楼林立区域以及部分开阔地带。系统配备 Intel (R) Core (TM) i7-10700 CPU@2.90 GHz 和 16 GB 内存。模拟基本参数见表 3，其中， $K_{nc1}=10$ 、 $K_{nc2}=2 \times K_{nc1}$ 的设定依据文献[30]推荐的自适应 GA 收敛判据，能够有效识别早期收敛与深度停滞阶段，避免陷入局部最优。

表 3 模拟基本参数

参数	数值
区域面积/km ²	20
迭代次数	200
种群大小	100
待选基站数量	400
天线数/个	3
天线发射功率/dBm	43
天线发射频率/GHz	4.9
最大反射次数	4
最大衍射次数	2
覆盖高度/m	200
天线方向角 θ	0°~360°
接收天线增益/dBi	0
精英遗传概率 P_e	0.1
变异概率 P_m	0.65
交叉概率 P_c	0.2
随机重置概率 P_r	0.05
阶段 1 连续未变化的世代数 K_{nc1}	10
阶段 2 连续未变化的世代数 K_{nc2}	20
最小距离值 d_{min}/m	1 000
交叉概率变化量 ΔP_c	0.1
变异概率变化量 ΔP_m	0.05
天线上倾角 φ	0°~30°

4.1 权重消融实验

权重设置直接影响基站配置优化的目标倾向，不同权重组合在覆盖率、信号质量和建设成本之间形成不同的平衡关系。本文基于研究区域的实际场景开展权重消融实验，考查各优化目标对最终配置结果的作用差异，并据此确定合理的权重分配方案。实验中，候选基站共分为楼顶与地面两类：编号 1~140 为楼顶基站，141~400 为地面基站，成本分别为 30 万~40 万元与 40 万~50 万元^[11,25]。根据地方标准^[26]估算，约 8 个基站即可实现全覆盖。在正式实验前，对 $\alpha \in [0.1, 0.5]$ 进行了多组权重组合测试，结果表明在该区间内覆盖率均可保持 100%。基于此，为避免覆盖率权重过高导致其他优化目标（信号质量与建设成本）的差异性被掩盖，同时突出权重变化对优化结果的影响，本文在正式实验中固定覆盖率权重为 $\alpha=0.2$ ，并在此基础上分别调整信号质量权重 β 与建设成本权重 γ ，取每组权重组合下 20 次实验的平均结果，以评估权重变化对基站配置方案的影响。权重组合模拟结果见表 4。

实验结果表明，在研究区域，随着信号质量权重的增加，整体覆盖性能不断增强，建设成本呈上升趋势，且基站位置逐渐从楼顶转移至地面。综合对比实验结果可知，权重组合为 (0.2, 0.3, 0.5) 时，各项指标的表现最为均衡，能够确保在成本可控的前提下兼顾信号质量，并维持较高的综合优化效果，且使用 7 个楼顶基站和 1 个地面基站即可实现全覆盖。与方案 1 ($\gamma=0.7$) 相比，方案 3 的信号质量提升 19.5%，成本增加 3.3%，综合目标函数值仅下降 3.7%，体现了在保证成本可控的同时有效改善信号质量的趋势。与方案 2 ($\gamma=0.6$) 相比，方案 3 的信号质量提高 14.0%，成本仅增加 0.2%，目标函数值下降 1.6%，显示出更优的平衡性。与方案 4 ($\gamma=0.4$) 对比，尽管方案 3 的信号质量与其保持在同一水平，但目标函数值提升 8.1%，建设成本降低

表4 权重组合模拟结果

方案序号	覆盖率权重 α	信号质量权重 β	建设成本权重 γ	综合目标函数 值 F	通信覆盖率 f_1	通信信号质 量 f_2	建设成本 f_3 / 万元	楼顶基站个数/ 地面基站个数
1	0.2	0.1	0.7	0.765	100%	0.41	270.57	7/1
2	0.2	0.2	0.6	0.749	100%	0.43	278.96	7/1
3	0.2	0.3	0.5	0.737	100%	0.49	279.57	7/1
4	0.2	0.4	0.4	0.682	100%	0.49	289.60	5/3
5	0.2	0.5	0.3	0.679	100%	0.55	293.96	5/3
6	0.2	0.6	0.2	0.678	100%	0.57	307.43	5/3
7	0.2	0.7	0.1	0.645	100%	0.58	341.32	2/6

3.5%，优化效果更佳。与方案5 ($\gamma=0.3$) 相比，方案3的成本降低4.9%，目标函数值提升8.5%，信号质量虽降低6.9%，但处于可接受水平。对比方案6和方案7可知，尽管两者的信号质量（分别为0.57和0.58）相较方案3略高，但成本显著增加（分别增加10.0%和22.1%），目标函数值分别下降8.0%和12.5%，整体性能明显劣于方案3。进一步分析可以发现，在同种信号质量和与覆盖范围情况下，7/1分布的建设成本更低。

因此，权重组合(0.2,0.3,0.5)在信号质量与建设成本之间实现了最优平衡，实现了楼顶与地面基站的合理分布，满足了研究区域的全覆盖需求。该方案采用7个楼顶基站和1个地面基站，兼顾高楼林立区域与街区开阔地带的信号覆盖与经济性，被确定为本文的最优权重组合方案。

4.2 基站数量优化实验

基站数量不仅决定覆盖范围，还会影响整体的信号质量与建设成本。本文基于4.1节得到的最优权重组合开展多组实验，进一步分析研究区域不同基站数量下的优化结果，重点考查各目标函数值随基站数量变化的平衡特性，如图9所示。

从综合目标函数值及3个子目标函数值的变化趋势可以看出，基站数量对覆盖能力、信号质量与建设成本具有明显影响。当基站数量较少(4~6个)时，研究区域中部分高楼阴影区和街

区密集区信号无法充分覆盖，信号质量难以得到充分保障，导致综合目标函数值 F 、覆盖率 f_1 和信号质量 f_2 均处于较低水平。随着基站数量增加至7~8个，覆盖率 f_1 快速上升；信号质量 f_2 有所改善，并在8个基站时达到最大值；尽管建设成本 f_3 随基站数量增加持续上升，但在8个基站规模下仍处于可接受范围；此阶段 F 值稳步提升，并在8个基站时达到最优，说明该规模在覆盖率、信号质量与成本之间实现了较优平衡。然而，当基站数量继续增加至9~12个时，冗余部署不仅提高了建设成本，还在多处区域加剧了信号干扰，从而导致信号质量劣化，使得 f_2 值快速下降，同时覆盖率维持在100%。在三者共同作用下， F 值呈明显下降趋势，表明过度增加基站数量并不能带来持续优化，反而削弱了系统的整体效益。综合考虑 F 值与3个子目标函数的变化规律，最终确定研究区域的最优基站数量为8个，其中7个楼顶基站分布在高楼密集区，1个地面基站部署在地面开阔区域，有效保证了整体覆盖和信号均衡。冗余部署的SINR分布如图10所示。

AGA的最优覆盖图如图11所示。图11展示了基于SBR法得到的三维最优覆盖模拟结果，其中信号功率和SINR值在街区及建筑周边均达到可接受水平，表明优化方案在实际城市场景中可行，不仅能够保证100%的覆盖率，还能在成本可控和干扰较小的前提下获得最高的目标函数

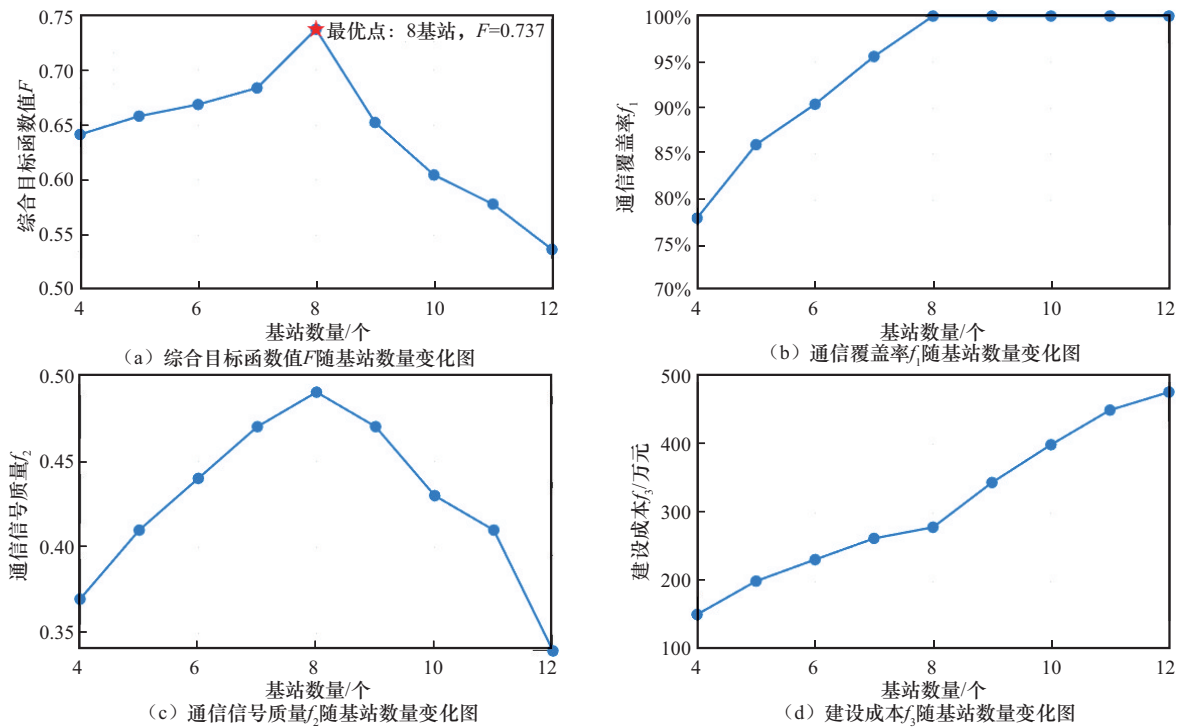


图9 各目标函数值随基站数量变化的平衡特性

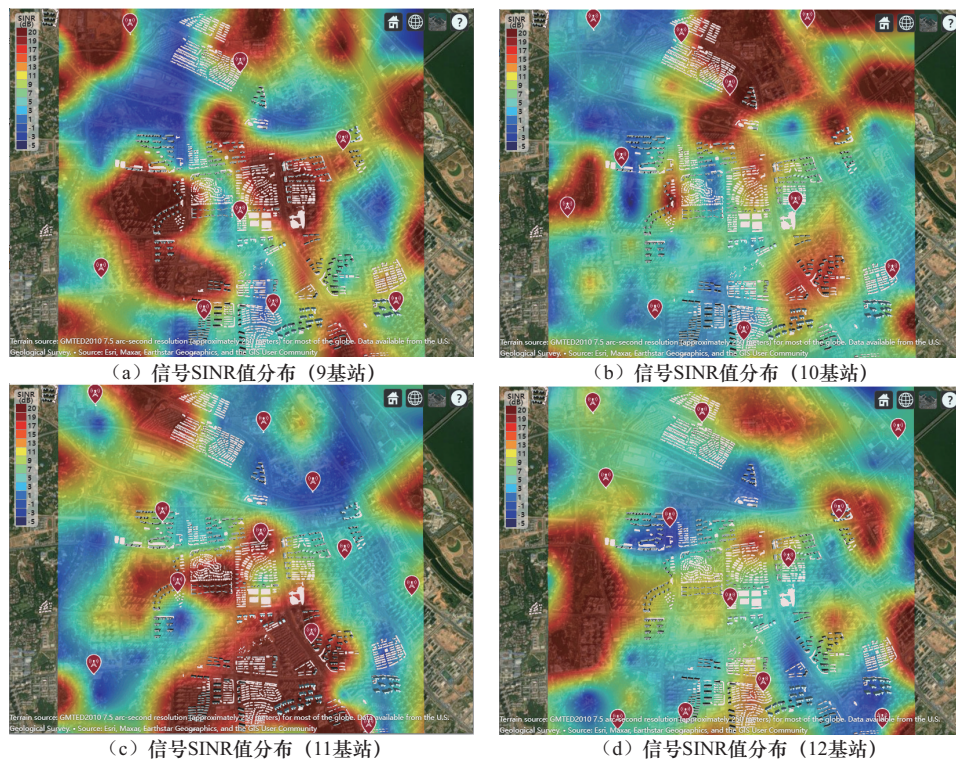
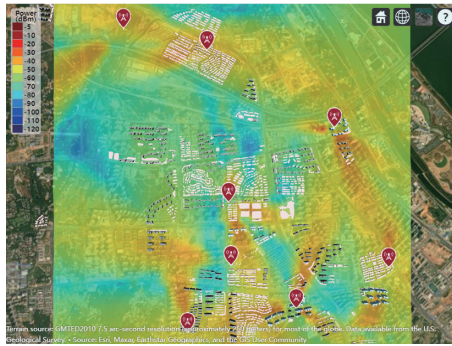


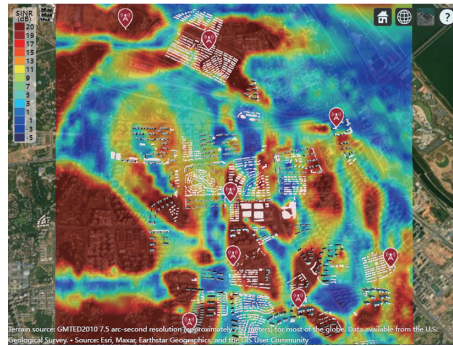
图10 冗余部署的SINR分布

值。最优基站布局下的天线参数配置见表5，其中各天线的上倾角均分布在 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围内，与

文献[26]的研究结论保持一致，验证了优化结果的准确性与合理性。



(a) 信号功率值分布



(b) 信号SINR值分布

图11 AGA 的最优覆盖图

表5 最优基站布局下的天线参数配置

类型	编号	天线	方向角/(°)	上倾角/(°)
楼顶基站	91	天线1	22.0	19.3
		天线2	67.5	23.8
		天线3	291.0	16.6
	102	天线1	336.5	8.4
		天线2	135.7	19.3
		天线3	186.6	9.3
	124	天线1	302.2	9.4
		天线2	131.9	21.7
		天线3	220.1	21.9
110	天线1	6.0	8.7	
	天线2	61.1	18.7	
	天线3	215.9	18.1	
116	天线1	348.1	10.7	
	天线2	73.5	18.9	
	天线3	186.5	16.3	
1	天线1	353.6	21.4	
	天线2	107.0	21.3	
	天线3	208.7	11.9	
75	天线1	14.5	21.9	
	天线2	130.4	11.4	
	天线3	197.3	9.8	
地面基站	257	天线1	353.6	24.4
		天线2	107.0	21.3
		天线3	208.7	16.9

4.3 算法对比实验

为验证本文所提算法的性能，将其与传统 GA、PSO 算法和 SA 算法进行对比，算法参数设置与表 3 中一致。本文基于 4.1 节和 4.2 节所得的最优权重组合和基站数量开展对比实验，算法对

比结果见表 6，SA 算法、GA 和 PSO 算法的最优覆盖图分别如图 12~图 14 所示。

表6 算法对比结果

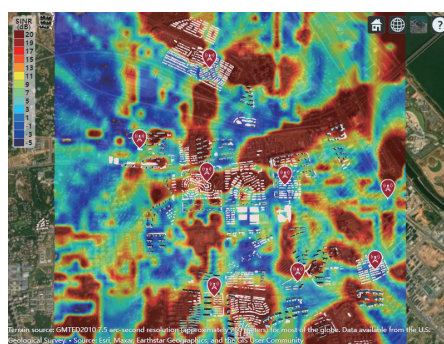
算法	F	f_1	f_2	f_3 /万元	楼顶基站个数/ 地面基站个数
AGA	0.737	100%	0.49	279.57	7/1
PSO	0.729	100%	0.51	289.60	6/2
GA	0.695	100%	0.43	305.88	5/3
SA	0.712	100%	0.45	296.43	5/3

表 6 给出了不同算法在相同测试条件下的优化结果。与其他算法相比，本文提出的 AGA 在综合性能方面表现最优。与 PSO 算法相比，AGA 的综合目标函数值提升了 1.10%，尽管信号质量略有下降，但建设成本降低了 3.59%（约 10 万元），整体优化效果更为均衡。与 GA 相比，AGA 的综合目标函数值提高了 6.04%，信号质量提升了 13.95%，成本降低了 8.58%，优势较为明显。与 SA 算法相比，AGA 在目标函数值上提升了 3.51%，信号质量提升了 8.89%，成本下降了 5.69%，进一步验证了其在成本控制与信号质量优化方面的有效性。

从基站布局方案来看，AGA 选择了 7 个楼顶基站和 1 个地面站，在保证 100% 覆盖的同时兼顾信号质量和成本效益。这种明显偏向楼顶站点的选择，与低空环境下楼顶位置具备的传播优势密切相关：一方面，楼顶基站具有更少的遮挡，



(a) 信号功率值分布

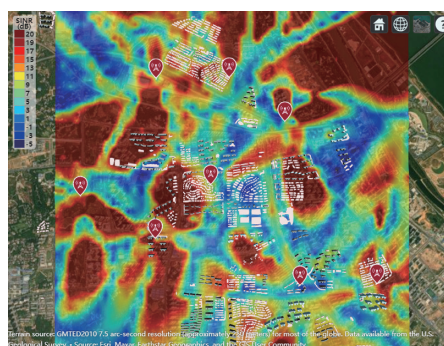


(b) 信号SINR值分布

图12 SA算法的最优覆盖图

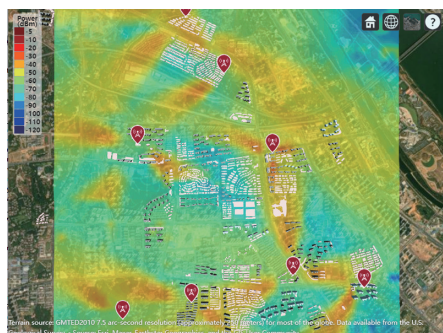


(a) 信号功率值分布

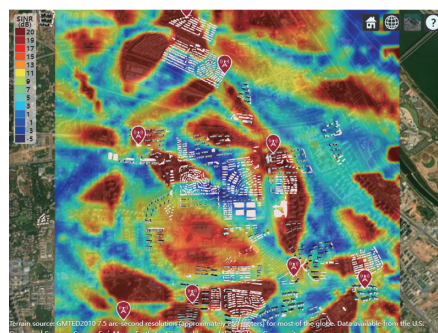


(b) 信号SINR值分布

图13 GA的最优覆盖图



(a) 信号功率值分布



(b) 信号SINR值分布

图14 PSO算法的最优覆盖图

可提升飞行器与基站之间的视距链路比例，从而减少信号传播路径损耗；另一方面，AGA的改进进化策略与自适应机制使其在寻优过程中能够更充分探索不同的站型组合，更易将具有较少遮挡且建设成本较低的楼顶站点保留下来，从而逐渐形成以楼顶为主的稳定布局模式。相比之下，PSO算法尽管信号质量略高，但其收敛过程中更易受初始种群与速度更新规则影响，导致部分方

案更依赖地面站点，从而提高了建设成本；GA和SA算法则因易陷入局部最优解，结果表现为信号质量不足或成本过高，未能实现整体优化。

在本文所采用的城区仿真场景中，对于数量为pop的种群，AGA在每代的主要计算量来自适应度计算与进化操作。设适应度计算的复杂度为 $cost_{fitness}$ ，每条染色体包含 g_c 个基因片段。尽管AGA引入了多段式染色体结构、改进交叉与变异

算子以及自适应参数调整机制，但在本文场景规模下，自适应参数调整机制仅需要基于最优适应度的收敛行为进行条件判断，其复杂度可视为常数项 $O(1)$ ；遗传操作的复杂度 $O(\text{pop} \times \text{ge})$ 与 $O(\text{pop} \times \text{cost}_{\text{fitness}})$ 相比可忽略不计。因此，算法进行 iter 次进化后的总体复杂度为 $O(\text{pop} \times \text{cost}_{\text{fitness}} \times \text{iter})$ 。实际运行结果显示，与传统 GA 相比，AGA 的计算复杂度并未产生明显差异。算法迭代曲线如图 15 所示。从图 15 可以看出，AGA 在迭代初期便表现出稳定的适应度提升，并在 180 次迭代左右逐渐收敛至最优值。相比之下，GA 在收敛过程中波动较大，PSO 算法的收敛速度明显滞后，而 SA 算法尽管前期收敛较快，但最终陷入局部最优，适应度值偏低。由此可见，AGA 兼具稳定性与全局搜索能力，最终实现了收敛性能和适应度值的双优表现。

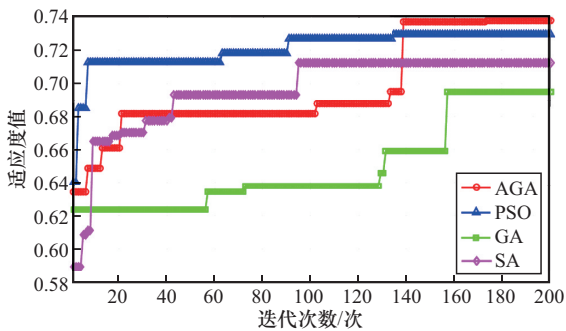


图 15 算法迭代曲线

SINR 是评估网络整体覆盖信号质量的重要指标，其分布均衡可减少飞行器运行过程出现的信号切换次数，保持链路的稳定。本文将 -6 dB 设定为 SINR 阈值。不同强度区间的 SINR 占比和 SINR 分布分别如图 16、图 17 所示。从图 16 与图 17 可以看出，AGA 在所有区间均保持较为合理的分布，其中 -6 dB~ 10 dB 区间的占比为 50.2%， 10 ~ 15 dB 区间的占比为 14.7%， 15 ~ 25 dB 区间的占比为 20.9%，大于 25 dB 的强信号区间仍保持 14.2% 的占比。相比之下，PSO 算法、GA 与 SA 算法在中高信号区间 (15 ~ 25 dB 与大于 25 dB)

的分布分别存在偏低或偏高的情况。例如，PSO 算法与 GA 在大于 25 dB 区间仅有 5.6% 与 11.5% 的占比，低于 AGA 的 14.2%；SA 算法虽在 15 ~ 25 dB 区间达到 31.6%，但在 10 ~ 15 dB 区间的占比仅为 15.3%，表现出分布不均衡。

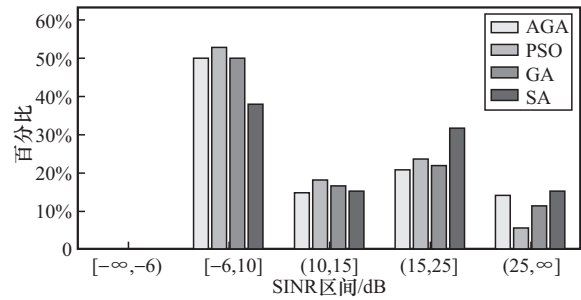


图 16 不同强度区间的 SINR 占比

整体来看，AGA 在中高信号区间的总覆盖比例达到 35.1%，相比 PSO 算法提高 20.2%，相比 GA 提高 7.8%，在分布均衡性上优于 SA 算法。这主要得益于 AGA 的多段式染色体编码联合优化基站位置与天线方向，以及改进的进化和自适应参数调整策略，使算法能有效规避天线参数配置不合理导致的局部高干扰区域，并淘汰信号质量较差的解，从而得到覆盖范围更广、SINR 分布更均衡的优化结果，有效减少飞行器低空运行过程中的信号切换次数，提高链路的稳定性。

5 结束语

本文针对研究区域低空通信环境，开展了基站数量、位置及天线参数的联合优化研究。本文基于三维地形、街区建筑分布及离散化需求点，构建了覆盖率、信号质量与建设成本的多目标优化模型，并引入 SINR 指标进行干扰分析。同时，针对传统 GA 易陷入局部最优的问题，提出 AGA，通过多段式染色体结构与自适应参数调整机制实现基站位置与天线参数的动态优化。实验结果显示，在长沙市某 20 km^2 区域，仅需要 8 个基站即可实现全覆盖，其中包含 7 个楼顶基站和

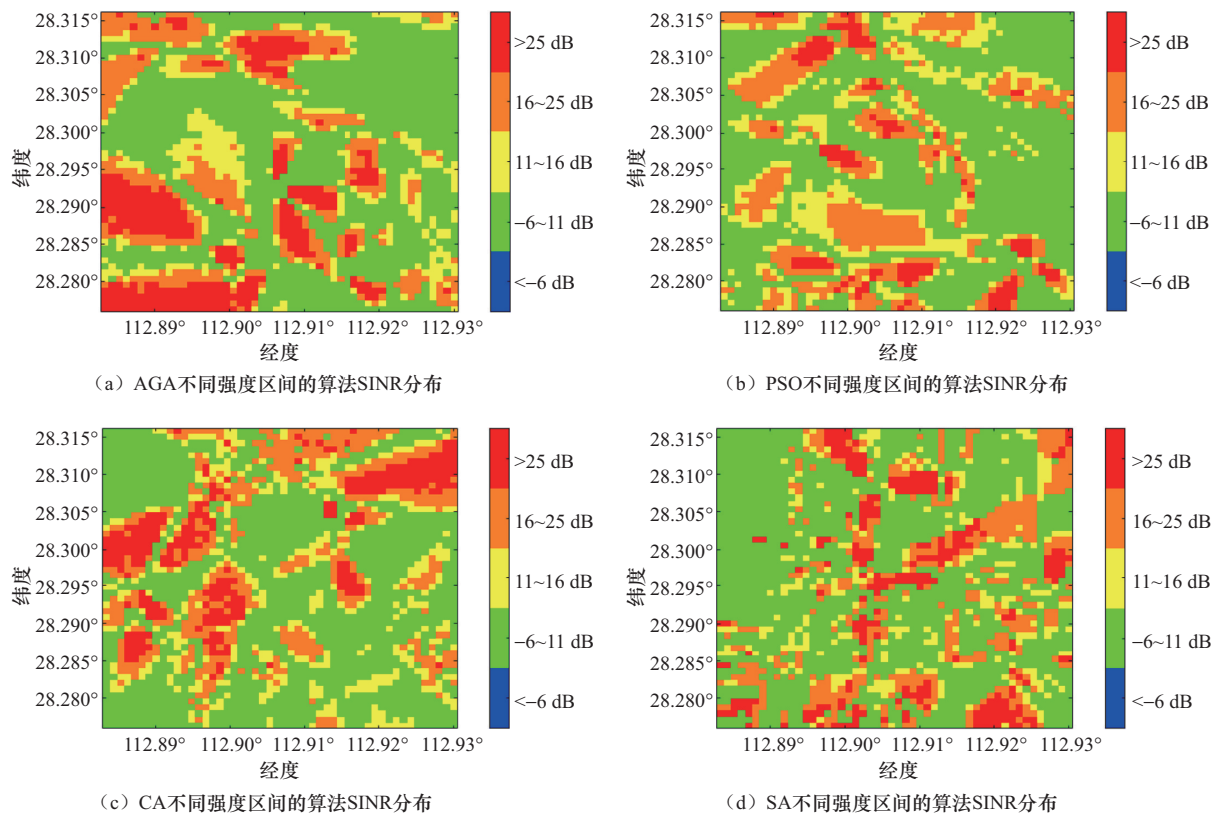


图17 不同强度区间的SINR分布

1个地面基站。与传统GA相比，本文算法在建设成本降低8.58%的同时，信号质量提升13.95%；与PSO算法相比，本文算法的综合目标函数值提升了1.10%，建设成本降低了3.59%；与SA算法相比，本文算法在综合目标函数值上提升了3.51%，信号质量提升了8.89%，成本下降了5.69%。优化方案在目标函数值、信号质量均衡性和建设成本上均优于对比算法，具有较强的可行性与推广价值。未来工作将基于本文的三维建模与优化框架，扩展至多高度层在复杂城市空间中的联合优化研究，并在此基础上引入强化学习方法，对发射功率、波束方向和频谱分配进行智能调控，以解决低空场景中动态干扰与资源利用效率不足等核心问题。

参考文献：

- [1] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966-1981.
- [2] 王俊杰, 王迪, 申奇, 等. 基于5G地面公网发展面向网联无人机的低空网络: 分析与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 1-12.
- [3] Liang L, Fu C C, Gao Y X, et al. An optimal siting and economically optimal connectivity strategy for urban green 5G BS based on distributed photovoltaic energy supply[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 301: 118043.
- [4] Wang C H, Lee C J, Wu X J. A coverage-based location approach and performance evaluation for the deployment of 5G base stations[J]. IEEE Access, 2020, 8: 123320-123333.
- [5] Wang Q, Zhao X, Lv Z T, et al. Optimizing the ultra-dense 5G base stations in urban outdoor areas: Coupling GIS and heuristic optimization[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 63: 102445.
- Liao X H, Xu C C, Ye H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(11): 1966-1981.

- [6] Boughaci D, Aouad S, Ikrouberkane S. Grey Wolf Optimizer based coverage planning for the fifth-generation (5G) of wireless networks[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [7] Zhang J F, Zhu L S, Chen H W. 5G base station siting scheme based on improved immune genetic algorithm[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1107-1112.
- [8] Du L F, Xiang Y, Xu N. Base station siting optimization based on greedy and simulated annealing algorithms[C]//Proceedings of the 2022 2nd International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 229-232.
- [9] Yin J H, Cheng L H. Research on site planning of communication network based on genetic algorithm[C]//Proceedings of the 2022 International Conference on Information Technology, Communication Ecosystem and Management (ITCEM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 81-85.
- [10] 李黎, 陈灿, 李灿, 等. 基于改进遗传算法的双向DC-DC变换器控制策略研究[J]. 电信科学, 2024, 40(5): 121-130.
Li L, Chen C, Li C, et al. Research on control strategy of bidirectional DC-DC converter based on improved genetic algorithm[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(5): 121-130.
- [11] Zhu D L, Shen J Y, Zhang Y M, et al. Multi-strategy particle swarm optimization with adaptive forgetting for base station layout[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 91: 101737.
- [12] 庞金剑. 基于量子遗传算法的5G基站部署及覆盖优化方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2025.
Pang J J. Research on 5G base station deployment and coverage optimization based on quantum genetic algorithm[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2025.
- [13] 雷宇骁, 李更丰, 黄玉雄, 等. 基于支持向量机的发/输电系统快速蒙特卡罗可靠性评估方法[J]. 电信科学, 2019, 35(6): 15-24.
Lei Y X, Li G F, Huang Y X, et al. Support vector machine based fast Monte Carlo reliability evaluation method for composite power system[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(6): 15-24.
- [14] Zhang Y F, Hu X B, Li H, et al. A fuzzy variable H strategy based ripple-spreading algorithm to find the k shortest paths[J]. Mathematics, 2024, 12(23): 3670.
- [15] ITU-R M.2412-0—2017 Guidelines for evaluation of radio interface technology for IMT-2020[R].
- [16] Mou Z Y, Gao F F, Liu J, et al. Resilient UAV swarm communications with graph convolutional neural network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(1): 393-411.
- [17] Zhou H, Chabory A. An extraction method for the multipath characteristics of simulated tropospheric propagation channels[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2025, 61(5): 14401-14413.
- [18] Chipman ほか R A. Polarized light and optical systems[M]. Florida: CRC Press, 2018.
- [19] McNamara D A, Pistorius C W I, Malherbe J A G. Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction[M]. Boston: Artech House, 1990.
- [20] ITU-R P.676-12—2019 Attenuation by atmospheric gases and related effects[R].
- [21] 刘刚. 新一代无线通信系统射线追踪传播模型的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
Liu G. Research on ray-tracing propagation models for next-generation wireless communication systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [22] 周娇, 李新, 曹蕾, 等. 一种低空立体组网场景下简化的下行干扰模型[J]. 电信科学, 2025, 41(3): 52-63.
Zhou J, Li X, Cao L, et al. A simplified downlink interference model for low-altitude three-dimensional networking scenarios[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(3): 52-63.
- [23] Colpaert A, Vinogradov E, Pollin S. Aerial coverage analysis of cellular systems at LTE and mmWave frequencies using 3D city models[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4311.
- [24] 刘刚, 李铭泰, 潘澄, 等. TS模式下STAR-RIS辅助的多用户无线系统波束成形设计[J]. 电信科学, 2024, 40(11): 16-26.
Liu G, Li M T, Pan C, et al. STAR-RIS assisted multi-user wireless system beamforming design in TS mode[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(11): 16-26.
- [25] T/SCS TXXH 1—2025 四川省低空覆盖5G数字蜂窝移动通信网络设计规范[S].
T/SCSTXXH 1—2025 Low-altitude 5G digital cellular mobile communication network design specification[S].
- [26] Maeng S J, Güvenç İ. UAV corridor coverage analysis with base station antenna uptilt and strongest signal association[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(4): 5621-5630.
- [27] Van Phi Nguyen, Bajer J, Vrščeká M. Assessment of 5G connectivity for UAV operations in urban environments: an analysis of network performance and UAV communication architec-



ture[J]. IFAC-PapersOnLine, 2024, 58(9): 103-108.

- [28] 李鹏展. 针对 5G 网联无人机的区域基站选址优化[D]. 北京: 清华大学, 2024.

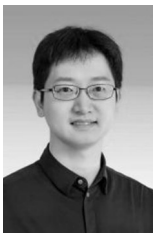
Li P Z. Regional base station location optimization for 5G-connected UAVs[D]. Beijing: Tsinghua University, 2024.

- [29] DB3205/T 1144—2024 低空 5G 通信基站建设要求.[S].

DB3205/T 1144—2024 Specifications for low-altitude 5G communication base station construction[S].

- [30] Zhou H, Hu X B, Zhou J, et al. A new city air terminal service mode: urban mobile station for luggage check-in service and evolutionary approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 7281-7297.

[作者简介]



周航（1990-），男，博士，中国民航大学中欧航空工程师学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为计算电磁学、低空通信系统。



秦亚龙（2000-），男，中国民航大学中欧航空工程师学院硕士生，主要研究方向为通信基站布局优化、计算电磁学。



龙泽宇（2001-），男，中国民航大学中欧航空工程师学院硕士生，主要研究方向为无人机组网优化，安全性评估。



张盈斐（1995-），女，博士，郑州航空工业管理学院民航学院讲师，主要研究方向为航空安全、智能计算。