



基于人工蜂群算法的基站天线方位角与下倾角自优化方法

蔡佳祺^{1,2}, 万海斌^{1,3}, 孙友明^{1,3}, 覃团发^{1,3}

- (1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004;
2. 中国联合网络通信有限公司漯河市分公司, 河南 漯河 462000;
3. 广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对 3GPP 中提出的 SON (self-organizing network, 自组织网络) 覆盖自优化问题, 提出一种基于人工蜂群算法的基站天线方位角与下倾角同时优化方法。首先, 基站根据用户设备上报的 MR (measurement report, 测量报告) 数据确定待优化区域, 并建立以基站天线对待优化区域的平均增益为目标函数的优化模型; 其次, 利用人工蜂群算法求解该目标函数, 并得到基站天线方位角与下倾角的最优解; 最后, 将基站天线方位角与下倾角调整至最佳值, 实现基站根据用户设备位置的覆盖自优化。通过系统建模、仿真与外场实验, 以用户设备接收的 RSRP (reference signal receiving power, 参考信号接收功率) 为指标, 利用人工蜂群算法的计算方法较未优化的初始参数提升 6.81 dB, 较依靠人工经验的判别方法提升 4.35 dB。实验结果证明, 提出的自优化方法可根据用户位置分布精准及时地对基站天线方位角与下倾角进行调整, 提升用户对信号强度的感知。

关键词: 人工蜂群算法; 覆盖自优化; MR; 方位角; 下倾角

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021006

Artificial bee colony algorithm based self-optimization of base station antenna azimuth and down-tilt angles

CAI Jiaqi^{1,2}, WAN Haibin^{1,3}, SUN Youming^{1,3}, QIN Tuanfa^{1,3}

1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China
2. Luohe Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Luohe 462000, China
3. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Nanning 530004, China

Abstract: Aiming at the problem of SON coverage self-optimization proposed in 3GPP, a method based on artificial bee colony algorithm was proposed to optimize the azimuth and down-tilt angles of base station antenna at the same time. Firstly, the base station determined the area to be optimized according to the MR data reported by user equipment, and established the objective function of the average gain of the base station antenna area to be optimized. Se-

收稿日期: 2020-05-28; 修回日期: 2020-12-20

通信作者: 万海斌, hbwan@gxu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61661005, No.61761007, No.61761006); 广西自然科学基金资助项目 (No.2018GXNSFAA138079, No.2017GXNSFAA198276)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61661005, No.61761007, No.61761006), The Natural Science Foundation of Guangxi (No.2018GXNSFAA138079, No.2017GXNSFAA198276)



condly, the artificial bee colony algorithm was used to solve the objective function, and the optimal solution of the base station antenna azimuth and down-tilt angle was got. Finally, the base station antenna azimuth and down-tiltangles were adjusted to the optimal value to achieve the coverage self-optimization of the base station. Through system modeling, simulation and field verification, taking the RSRP received by the user's equipment as the index, the identification method using the artificial bee colony algorithm was improved, 6.81 dB higher than the initial parameters which were not optimized, and 4.35 dB higher than the method based on artificial experience. The experimental results show that the optimization method proposed can accurately and timely adjust the azimuth and down-tiltangles of the base station antenna according to the user distribution, and improve the signal strength received by the user equipment.

Key words: artificial bee colony algorithm, cover self-optimization, MR, azimuth angle, down-tilt angle

1 引言

为减少电信运营商在运维管理中产生的 OPEX (operating expense, 操作开销), 3GPP 引入了自组织网络 (self-organizing network, SON) 概念, 目的是减少人工干预, 降低运维成本, 提升工作效率^[1]。SON 主要包含 3 部分功能: 第一, 自配置功能, 是指自动对新入网基站的初始参数进行配置, 完成基站入网前需要的必要配置; 第二, 自优化功能, 是指自动对现网基站参数进行优化, 使网络性能达到最佳状态, 主要包括覆盖与容量优化、移动负载均衡、小区间干扰协调、随机接入信道优化等; 第三, 自治愈功能, 是指自动对网络故障进行修复, 减少由设备故障对网络造成的影响。

在 3GPP 提出的 TR32.836 协议^[2]中, 对覆盖自优化的用例进行了定义, 但未给出具体的解决方案。目前, 针对基站天线方位角或下倾角的自优化问题, 已有学者提出了一些方法。参考文献[3]提出针对弱覆盖小区和叠覆盖小区, 利用改进的模拟退火算法优化基站天线方位角, 改善系统的吞吐量。参考文献[4]提出利用粒子群优化算法优化基站天线倾角, 改善用户平均频谱效率。参考文献[5]提出用户设备到基站呈现高斯分布特性, 利用该特性判别基站天线的最佳方位角, 发现天线接反、天线方向不合理等问题。参考文献[6]提出利用萤火虫算法优化基站电调天线倾角,

改善系统的吞吐量。参考文献[7]提出利用梯度下降法优化基站天线倾角, 改善系统频谱效率。

综合上述参考文献, 现有方法局限于针对基站天线方位角或下倾角单独进行优化, 鲜有针对基站天线方位角与下倾角同时优化的方法; 现有方法主要针对系统吞吐量、用户平均频谱效率、频带利用率等作为优化目标的情况, 鲜有针对基站天线对用户设备的增益作为优化目标的研究。本文将以待优化区域平均增益为目标函数, 利用 MATLAB 平台对系统进行仿真建模, 通过人工蜂群算法对目标函数最优解进行计算, 得到基站天线方位角与下倾角的最优解, 并选取平原地区农村场景进行外场实验。实验结果表明, 该方法与依靠人工经验的传统网络优化方法相比, 基站天线方位角与下倾角的调整方案能够更精确、及时, 基站周边用户接收的 RSRP 得到明显提升。

2 系统建模

实验基站 m 与用户设备 n 之间的位置关系示意图如图 1 所示, 设点 $O(a,b)$ 为实验基站 m 的位置, 点 C 为用户设备 n 的位置, 点 $C'(x,y)$ 为点 C 在水平面上的投影, h_m 为实验基站 m 的高度, h_n 为用户设备 n 的高度, $d_{m,n}$ 为用户设备 n 到实验基站 m 的水平距离。射线 AB 为实验基站 m 第 i 扇区天线的下倾方向, θ_i 为该天线以正北方向为基准的水平方位角, ϕ_i 为该天线的垂直下倾角, θ_i^n 为用户设备 n 以正北方向为基准的水平方位角,

φ_i^n 为用户设备 n 到实验基站 m 第 i 扇区天线方向垂直下倾方向的垂直下倾角。

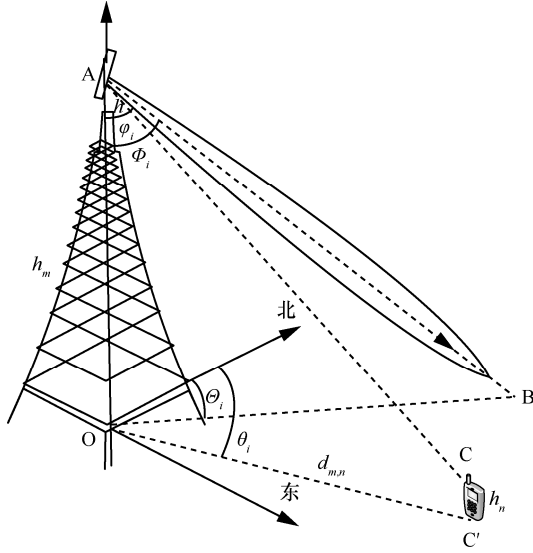


图1 基站与用户设备之间位置关系图

实验基站 m 连接用户设备集合 N , 基站天线对于每个用户设备 n 的水平增益角与垂直增益角均不相同。因此, α_i^n 为用户设备 n 到实验基站 m 第 i 扇区天线方向在地面投影的水平偏角, 即基站天线对用户设备 n 的水平增益角。根据几何关系可知:

$$\alpha_i^n = \theta_i^n - \theta_i = \arctan \frac{x-a}{y-b} - \theta_i \quad (1)$$

其中, β_i^n 为实验基站 m 第 i 扇区天线到用户设备 n 的方向与其发射方向之间垂直偏角, 即基站天线对用户设备 n 的垂直增益角。根据几何关系可知:

$$\beta_i^n = \Phi_i - \varphi_i^n = \Phi_i - \arctan \frac{d_{m,n}}{h_m - h_n} \quad (2)$$

根据 3GPP TR25.996 协议^[8], 由式 (1) 与式 (2) 中所求的水平偏角与垂直偏角, 可分别求得基站天线对于用户设备 n 的水平增益与垂直增益。

实验基站 m 第 i 扇区天线对用户设备 n 的水平增益为:

$$A_H^n(\alpha_i^n) = -\min \left[12 \left(\frac{\alpha_i^n}{\theta_{3\text{dB}}} \right)^2, A_m \right] \quad (3)$$

其中, $\theta_{3\text{dB}}$ 为水平半功率波束宽度, A_m 为最大衰减, 实验中取 $\theta_{3\text{dB}}=65^\circ$, $A_m=25\text{ dB}$ 。

实验基站 m 第 i 扇区天线对用户设备 n 的垂直增益为:

$$A_V^n(\beta_i^n) = -\min \left[12 \left(\frac{\beta_i^n}{\delta_{3\text{dB}}} \right)^2, \text{SLA}_V \right] \quad (4)$$

其中, $\delta_{3\text{dB}}$ 为垂直半功率波束宽度, SLA_V 为旁瓣的最大衰减, 实验中取 $\delta_{3\text{dB}}=15^\circ$, $\text{SLA}_V=20\text{ dB}$ 。

实验基站 m 第 i 扇区天线对用户设备 n 的总增益为:

$$A^n(\alpha_i^n, \beta_i^n) = -\min \left\{ -[A_H^n(\alpha_i^n) + A_V^n(\beta_i^n)], A_m \right\} \quad (5)$$

其中, A_m 为最大衰减, 实验中取 $A_m=25\text{ dB}$ 。

实验基站 m 第 i 扇区天线对用户设备集合 N 的平均增益为:

$$A^n(\alpha_i^n, \beta_i^n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N -\min \left\{ -[A_H^n(\alpha_i^n) + A_V^n(\beta_i^n)], A_m \right\} \quad (6)$$

其中, N 为接入实验基站 m 的用户设备数量, A_m 为最大衰减, 实验中取 $A_m=25\text{ dB}$ 。

由于实际应用中, 用户对于信号强弱的感知取决于用户设备接收的 RSRP 值, 且用户设备分布具有一定聚集性规律, 因此需要调整基站天线方位角与下倾角, 使在用户聚集范围内基站天线对用户设备的平均增益最大。该问题可抽象为: 以实验基站 m 第 i 扇区天线对用户设备集合 N 的平均增益为目标函数, 实验基站 m 第 i 扇区天线方位角与下倾角为二维变量, 天线方位角与下倾角取值范围为变量约束域的最优化问题。该最优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \max A^n(\alpha_i^n, \beta_i^n) = & \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N -\min \left\{ -[A_H^n(\alpha_i^n) + A_V^n(\beta_i^n)], A_m \right\} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} 0^\circ \leq \theta_i \leq 360^\circ \\ 0^\circ \leq \Phi_i \leq 15^\circ \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$



其中, $\theta_{3\text{ dB}}$ 为水平半功率波束宽度, $\delta_{3\text{ dB}}$ 为垂直半功率波束宽度, A_m 与 SLA_V 分别为最大衰减与旁瓣的最大衰减, 实验中取 $\theta_{3\text{ dB}}=65^\circ$, $\delta_{3\text{ dB}}=15^\circ$, $A_m=25\text{ dB}$, $\text{SLA}_V=20\text{ dB}$ 。

为了解决此问题, 本文选取人工蜂群算法求解该最优方程, 方程的最优解即基站天线最佳方位角与下倾角。

3 基于人工蜂群算法的基站天线方位角与下倾角自优化方法

人工蜂群算法是土耳其学者 Karaboga 在 2005 年提出的一种新型群体智能优化算法, 该算法通过模拟蜂群个体之间相互转化协作的采蜜行为, 并对蜜源不断探索进行仿真, 计算待优化问题的最优解, 解决函数最优化问题^[9]。

在传统网络优化工作中, 网络优化人员需要根据基站位置、用户分布、参数配置等以及自身的专业知识与经验, 确定网络优化的调整方案。然而, 该方法存在一定的主观性, 可能会因网络优化人员的技术水平而产生差异。因此, 在实际网络优化工作中, 会出现因人工经验判断不准确而出现反复测试、分析与调整等问题。为解决该问题, 本文提出一种基于人工蜂群算法的基站覆盖自优化方法。

步骤 1 实验基站 m 通过 MDT(minimization of drive-test, 最小化路测) 技术分析用户设备集合 N 上报的 MR 数据, 当弱覆盖比例高于阈值时, 开始覆盖自优化流程。

步骤 2 根据实验基站 m 与用户设备集合 N 的位置关系, 利用式 (6) 构建实验基站 m 第 i 扇区天线对周围用户设备集合 N 的平均增益模型, 作为最优化问题的目标函数。

步骤 3 对人工蜂群算法的蜂群规模 ColonySize、最大循环次数 maxCycle、最大限制搜索次数 Limit 等参数进行初始化。设实验基站 m 第 i 扇区天线方位角与下倾角构成的二维向量为

$X_i = \begin{pmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{pmatrix}$, 天线方位角与下倾角最小值与最大值

构成的二维向量分别为 $X_{\min} = \begin{pmatrix} \theta_{\min} \\ \phi_{\min} \end{pmatrix}$ 与

$X_{\max} = \begin{pmatrix} \theta_{\max} \\ \phi_{\max} \end{pmatrix}$ 。根据式 (8), 随机生成蜂群规模

ColonySize 个基站天线方位角与下倾角向量 $(X_1, X_2, \dots, X_{\text{ColonySize}})$, 并根据式 (7), 计算每个向量对应的基站天线对用户设备集合 N 的平均增益。

$$X_i = X_{\min} + \text{rand}(0,1)(X_{\max} - X_{\min}) \quad (8)$$

步骤 4 将步骤 3 计算得到的 ColonySize 个平均增益按从小到大进行排序, 并将向量 X_i 分为两部分。

步骤 5 对于平均增益较大的一半向量 X_i , 根据式 (9), 在向量附近搜索, 并根据式 (7) 计算平均增益。若新平均增益大于原平均增益, 根据贪婪准则, 新搜索出的向量 new_ X_i 代替原向量 X_i 。

$$\text{new_}X_i = X_i + \text{rand}(-1,1)(X_i - X_j) \quad (9)$$

步骤 6 对于平均增益较小的一半向量 X_i , 根据式 (10), 依平均增益的大小等比例选择一个向量 X_i , 根据式 (9), 在向量附近进行搜索, 并根据式 (7) 计算平均增益。与步骤 5 相同, 若新平均增益大于原平均增益, 根据贪婪准则, 新搜索出的向量 new_ X_i 代替原向量 X_i 。

$$P_i = \frac{\text{fit}_i}{\sum_{n=1}^N \text{fit}_n} \quad (10)$$

步骤 7 当向量 X_i 的搜索次数超过最大限制搜索次数 Limit, 而仍未搜索得到更大的平均增益时, 则放弃该向量 X_i 。与步骤 3 相同, 根据式 (8), 再随机生成向量 X_i 。

步骤 8 记录当前所有的平均增益, 并返回步骤 4 进行循环。当循环次数达到最大循环次数

maxCycle 时, 输出当前最大平均增益对应的天线方位角与下倾角。

步骤 9 网络优化人员根据调整方案对基站天线进行调整, 并返回步骤 1, 实验基站 m 继续通过 MDT 技术对网络覆盖进行实时监控。

4 仿真与效果分析

实验网络选取目前组网成熟的 LTE 网络, 实验场景选取 5 km×5 km 的平原地区农村场景, 实验基站选用的广泛使用的三扇区基站天线初始方位角分别为 0°、120°和 240°, 初始下倾角均为 4°。重要参数设置表见表 1。

表 1 重要参数设置表

网络参数	参数取值
水平半功率波束宽度 $\theta_{3\text{dB}}$	65°
垂直半功率波束宽度 $\delta_{3\text{dB}}$	15°
实验基站经度	114.***3
载频	1 850 MHz
基站发射功率	18.2 dBm
基站高度	50 m
用户设备高度	1.5 m
实验基站纬度	33.***7
工作带宽	20 MHz
路径损耗模型	Okumura

实验基站与基站周边用户设备的位置关系如图 2 所示, 图 2 中 ▲ 为实验基站的位置, 浅色扇形区域为实验基站三面天线的覆盖方向, ■ 为实验基站周边用户设备的位置。在传统网络优化方法中, 基站天线方位角与下倾角的设定取决于网络优化人员的经验, 根据当前基站与周边村落的位置关系, 依靠人工经验判别的基站

天线方位角分别为 320°、140°和 220°, 基站天线倾角分别为 3°、3°和 2°。

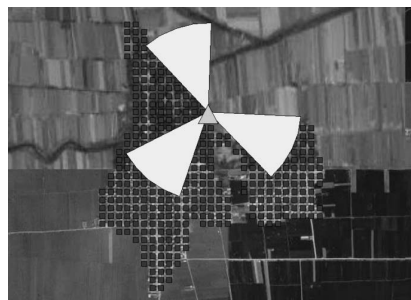


图 2 实验基站与基站周边用户设备位置关系

MR 测量数据见表 2, 实验基站通过 MDT 技术, 分析实验基站周围用户设备上报的 MR 数据, 获取周围用户设备接收的信号强度与用户位置, 确定待优化区域。

根据表 1 所示实验基站位置与表 2 所示用户设备位置, 以实验基站第一扇区为例, 构建以基站第一扇区天线对周边用户设备平均增益为目标函数的优化模型, 利用 MATLAB 平台仿真人工蜂群算法, 计算得到基站天线最佳方位角与下倾角。实验基站第一小区优化模型立体图如图 3 所示。实验基站第一小区优化结果如图 4 所示。

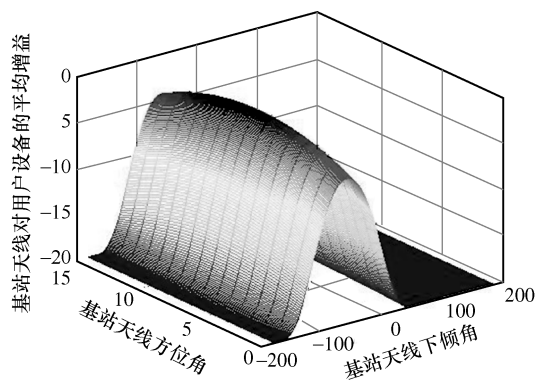


图 3 实验基站第一小区优化模型

表 2 MR 测量数据

总采样点数	覆盖良好采样点数	良好覆盖率	栅格大小	栅格经度	栅格纬度
3 470	3 145	90.63%	50 m	114.*****2	33.*****3
265	260	98.11%	50 m	114.*****1	33.*****6
5 330	4 735	88.84%	50 m	114.*****9	33.*****0

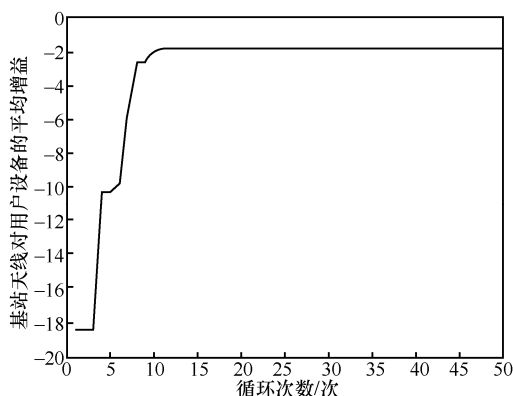


图4 实验基站第一小区优化结果

在人工蜂群算法的参数设置中,本文实验设置蜂群规模 ColonySize 为 20,最大循环次数 maxCycle 为 50,最大限制搜索次数 Limit 为 5。算法参数在上述设置下,大约进行 15 次迭代后,可分别计算得到 3 个扇区天线的最佳方位角与下倾角。利用人工蜂群算法计算得到的基站天线最佳方位角分别为 300.468° 、 118.903° 和 224.753° ,基站天线最佳下倾角分别为 $7.392\ 29^{\circ}$ 、 $4.550\ 1^{\circ}$ 和 $5.639\ 16^{\circ}$ 。实验基站 3 种状态的天线方位角与下倾角见表 3。

为验证 3 种天线状态的覆盖性能,实验按照表 3 分别将基站天线调整至初始参数、人工经验判别、人工蜂群算法计算 3 种状态,并分别对基站周围区域进行驱车测试,分析基站周围的覆盖效果。

3 种实验基站天线状态的周边区域 RSRP 累积分布函数如图 5 所示,利用人工蜂群算法优化后基站周围 RSRP 值大于 $-95\ \text{dBm}$ 的概率为 84.69%,依靠人工经验判别优化后基站周围 RSRP 值大于 $-95\ \text{dBm}$ 的概率为 68.57%,未优化的初始

状态基站周围 RSRP 值大于 $-95\ \text{dBm}$ 的概率为 59.37%。利用人工蜂群算法优化后较未优化的初始状态基站周围 RSRP 值大于 $-95\ \text{dBm}$ 的概率提升了 25.32%,较依靠人工经验判别优化后基站周围 RSRP 值大于 $-95\ \text{dBm}$ 的概率提升了 16.12%。

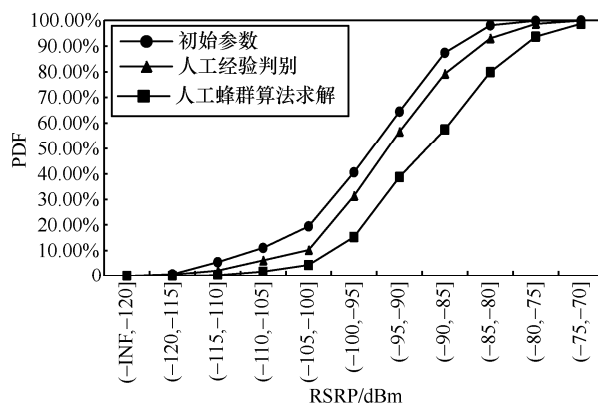


图5 3种实验基站天线状态的周边区域 RSRP 累积分布函数

利用人工蜂群算法优化后基站周围平均 RSRP 值为 $-86.98\ \text{dBm}$,依靠人工经验判别优化后基站周围平均 RSRP 值为 $-91.33\ \text{dBm}$,未优化的初始状态基站周围平均 RSRP 值为 $-93.79\ \text{dBm}$ 。利用人工蜂群算法优化后较未优化的初始状态基站周围平均 RSRP 值提升了 6.81 dB,较依靠人工经验判别优化后基站周围平均 RSRP 值提升了 4.35 dB。

5 结束语

本文针对覆盖自优化中基站天线方位角与下倾角同时优化的问题,利用人工蜂群算法进行优化,并对此方法进行仿真计算与外场实验。实验结果表明,当以基站天线对周围用户设备的平均

表3 实验基站3种状态的天线方位角与下倾角

天线状态	第一小区		第二小区		第三小区	
	方位角	下倾角	方位角	下倾角	方位角	下倾角
初始参数	0°	4°	120°	4°	240°	4°
人工经验判别	320°	3°	140°	3°	220°	2°
人工蜂群算法计算	300.468°	$7.392\ 29^{\circ}$	118.903°	$4.550\ 1^{\circ}$	224.753°	$5.639\ 16^{\circ}$

增益为优化目标时, 利用人工蜂群算法与依靠人工经验判别的优化方法相比, 基站周边用户接收的 RSRP 值得到明显提升。

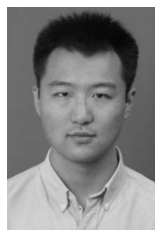
参考文献:

- [1] 3GPP. Telecommunication management; self-organizing networks (SON); concepts and requirements: TS32.500[S]. 2018.
- [2] 3GPP. Telecommunication management; study on network management (NM) centralized coverage and capacity optimization (CCO) self-organizing networks (SON) function: TR32.836[S]. 2014.
- [3] 于吉洋. LTE 系统中覆盖自优化技术的研究与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
YU J Y. Research and application of covering self-optimization technology in LTE system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [4] 连晓灿, 张彭园, 谭国平, 等. 长期演进网络中基于粒子群的天线下倾角自优化方法[J]. 计算机应用, 2017(1): 97-102.
LIAN X C, ZHANG P Y, TAN G P, et al. Antenna down-tilt angle self-optimization method based on particle swarm in long term evolution network[J]. Journal of Computer Applications, 2017(1): 97-102.
- [5] 梁松柏, 陈锋, 宋海平, 等. 基于高斯分布的基站天线最佳方向角定位算法[J]. 电信科学, 2018, 34(7): 134-140.
LIANG S B, CHEN F, SONG H P, et al. Optimal azimuth positioning algorithm for base station antenna based on Gaussian distribution[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(7): 134-140.
- [6] 杨涛. 基于萤火虫算法优化电调天线倾角研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
YANG T. Optimization of the down-dip angle of the electrically modulated antenna based on firefly algorithm[D]. Hefei: Anhui University, 2017.
- [7] ECKHARDT H, KLEIN S, GRUBER M. Vertical antenna tilt optimization for LTE base stations[C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011.
- [8] 3GPP. Technical specification group radio access network;

spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations: TR25.996[S]. 2020.

- [9] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: technical report-TR06[R]. 2005.

[作者简介]



蔡佳祺(1992—), 男, 广西大学计算机与电子信息学院硕士生, 中国联合网络通信有限公司漯河市分公司工程师, 主要研究方向为无线网络优化与自组织网络等。



万海斌(1979—), 男, 博士, 广西大学计算机与电子信息学院副教授, 主要研究方向为人工智能、中继协作通信、预编码以及网络优化等。



孙友明(1975—), 男, 博士, 广西大学计算机与电子信息学院计算机与电子信息学院讲师, 主要研究方向为编译码理论与网络优化技术等。



覃团发(1966—), 男, 博士, 广西大学教授、博士生导师, 广西多媒体通信与网络技术重点实验室主任, 主要研究方向为无线多媒体通信、网络编码以及区块链技术等。