

基于蜂窝通信系统的中继器分布优化研究

阎少宏^{1,2,3}, 吴宇航^{3,4}, 龚佃选³

(1. 河北省数据科学与应用重点实验室, 河北 唐山 063009; 2. 唐山市数据科学重点实验室, 河北 唐山 063009;
3. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063009; 4. 华北理工大学数学建模创新实验室, 河北 唐山 063009)

摘 要: 首先考虑信号在空间的链路损耗, 结合中继器最低保护场强、功率及系统余量等参数的合理分析与确定, 采用 Egli 模型得出中继器覆盖半径表达式; 其次在中继器分布位置上, 将蜂窝通信系统中的中心激励模型进行改进得到中心—顶点激励模型。该模型能将面积覆盖率提高 4%, 用户覆盖率提高 22%。为通信系统中的中继器分布提供了较好的优化方案。

关键词: Egli 模型; 蜂窝通信系统; 中心—顶点激励模型; 通信覆盖率

中图分类号: TN914.3

文献标识码: A

Research on optimization of repeater distribution based on cellular communication system

YAN Shao-hong^{1,2,3}, WU Yu-hang^{3,4}, GONG Dian-xuan³

(1. Hebei Key Laboratory of Data Science and Applications, Tangshan 063009, China;

2. Tangshan Key Laboratory of Data Science, Tangshan 063009, China;

3. College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China;

4. Mathematical Modeling Innovation Lab, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract: First considering the signal in space link loss, in combination with lowest relay protection field intensity, power and the reasonable analysis and determination of parameters such as system allowance, a repeater Egli model was adopted to cover radius expression was drew. Secondly on the repeater distribution location, center incentive model of cellular communication system was improved to the center-vertex incentive model. The model area of coverage can be increased by 4%, the user coverage increased by 22%. The repeater distribution in communication system provides a good optimization.

Key words: Egli model, cellular communication system, center-vertex incentive model, communication coverage

1 引言

目前, 在空间广阔的环境中, 无线信号的覆盖率比带宽和速度更重要, 使用中继器来扩展基站的覆盖范围是较佳的选择。然而, 对中继器覆盖半径的计算存在较为繁琐的问题^[1~3], 需要一种合理简洁的计算模型; 另外, 由于中继器不合理分布使覆盖率较低, 而且重叠面积大, 出现信号干扰严重等问题^[4~6], 因此, 需要对中继器的分布

进行合理的规划。

2 中继器覆盖半径的计算过程

考虑到中继器在不同的工作频率下有不同的灵敏度, 采用基于经验值 $0.33 \mu\text{V}/\text{m}$ 这样一个灵敏度值进行分析和计算。

1) 最低保护场强 E_{\min}

$$E_{\min} = -47.6 + d + 20 \lg f \quad (1)$$

其中, f 为工作频率, 取中继台接收频率, 此处取

收稿日期: 2016-09-01

通信作者: 龚佃选, dxgong@ncst.edu.cn

基金项目: 国家青年基金资助项目(No.11301120); 河北省青年科学基金资助项目(No.A2015209189)

Foundation Items: The National Youth Foundation of China(No.11301120), The Youth Science Foundation of Hebei Province (No.A2015209189)

145~148 MHz; d 为恶化量, 因主台设在移动通信基站, 为高燥区, d 取 5 dB。在式(1)中代入 f 和 d 的值解得最低保护场强为 $E_{\min} = 0.674 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$ 。

2) 最低保护功率 P_{\min}

$$P_{\min} = E_{\min} + 20\lg\lambda - 154.6 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

其中, c 表示光速, 取 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; f 表示所传送电磁波的工作频率, 此处取 145 MHz。 λ 表示所传送电磁波的波长, 代入已知参数解得 $P_{\min} = -147.565 \text{ dBw}$ 。

3) 系统余量 S_m

为保证系统既有一定的抗干扰能力又不浪费信号资源, 工程系统余量 S_m 一般在 6~10 dB^[7], 此处取 $S_m = 6.41 \text{ dB}$ 。

4) 链路预算 PL

对于实际中的链路预算^[7], 链路预算为

$$PL = P_t + G_t + G_r - P_{\min} - S_m - L_t - L_r \quad (4)$$

其中, P_t 为手持机功率, $P_t = 4.78 \text{ dBw}$; G_t 为手持机天线增益 $G_t = 0 \text{ dB}$; L_t 为手持机馈线损耗, $L_t = 0 \text{ dB}$; G_r 为中继台天线增益, $G_r = 9 \text{ dB}$; L_r 为中继台馈线损耗和双工器插入损耗, $L_r = 5.5 \text{ dB}$ 。

由上述已知参数以及第 2) 和第 3) 部分计算出来的相关参数的值可解得 $PL = -149.435 \text{ dB}$ 。

5) 中继器覆盖半径为 r

Egli 模型^[8]的中值路径损耗预测最远通信距离即中继器的覆盖半径, 对于不规则地形上的无线信号, Okumura 模型^[9]仅适用于 UHF 频段, 在 VHF 频段, 应使用 Egli 模型的经验公式, 当地形平均起伏高度不高时, 满足 Egli 模型的经验公式的适用条件: 不规则地面上的视距传播 (地形平均起伏高度为 50 英尺左右, 等于 15.24 m), 载波频率范围为 $40 \text{ MHz} < f < 400 \text{ MHz}$ 或 $25 \text{ MHz} < f < 1000 \text{ MHz}$, 故采用 Egli 模型 $PL = 88.1 + 20\lg f - 20\lg(h_m h_n) + 40\lg r + k$ 可以解出中继器的最远通信距离 (覆盖半径)。

$$\lg r = \frac{PL - 88.1 - 20\lg f + 20\lg(h_m h_n) - k}{40} \quad (5)$$

其中, r 为中继器的覆盖半径; h_m 为手持机天线高度, 取 1.5 m; h_n 为中继台天线高度, 取 30 m; k 为修正因子, 在满足可通信概率为 95% 的情况下, 取 k 为 5 dB, 即可满足通信要求。

将 $f = 145 \text{ MHz}$ 、 148 MHz 分别代入式(5)中, 求平均的中继器覆盖半径 $r = 14.2 \text{ km}$ 。以上分析的覆盖半径均为下行 (下行指从移动台发送消息到中继台, 而上行则相反) 覆盖半径, 考虑到上行的覆盖半径比下行覆盖大, 因此, 覆盖半径取下行时的覆盖半径。

3 “蜂窝”状通信系统

蜂窝系统^[10]也称“小区制”系统, 是将要覆盖的地区划分为若干小区, 在小区内部设立中继器为用户服务, 相邻的所有在不同频率下工作的中继器所覆盖的小区形成区群, 但这些小区共同使用了所有的系统频道资源。区群内的小区数应满足 $N = i^2 + ij + j^2$, 其中, i, j 均为正整数, i 表示从当前位置开始沿任意一条边垂直方向的小区个数; j 表示旋转 60° 再数 j 个小区到达相邻同频道小区, 如此 N 只能取一系列三点值, 如 3、4、7 等。

假设要确定半径为 64.3 km 的圆形区域内中继器的分布, 所选中继器的覆盖半径为 14.2 km。以 $r = 14.2 \text{ km}$ 为正六边形边长, 将 63.4 km 的圆形区域分隔成多个小区, 此处以 7 个小区 (正六边形 A、B、C、D、E、1、2) 组成的区群为单位做出中继器可能的分布, 如图 1 所示。

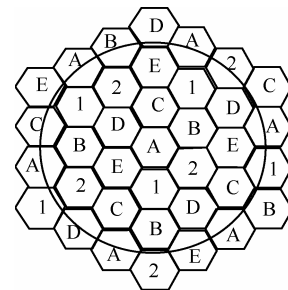


图 1 共有 37 个中继器的小区分布

在覆盖区域内的小区分布, 如图 2 所示, 根据文献^[11], 现行的中继器在小区内或小区间的位置有 2 种, 一种是中继设在六边形的中心, 称作中心

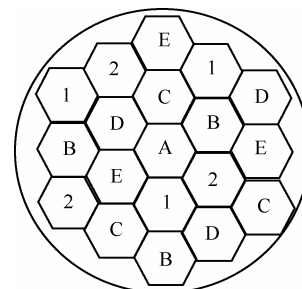


图 2 共有 19 个中继器的小区分布

激励；另一种是中继器设在 3 个小六边形所共用的顶点上，称作顶点激励。中心激励与顶点激励如图 3 和图 4 所示。

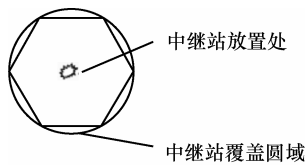


图 3 中心激励

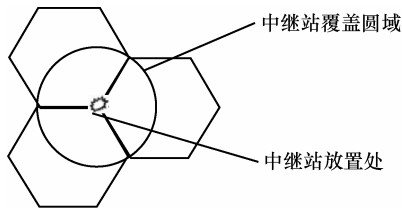


图 4 顶点激励

4 完全中心激励模型

由图 1 可知，如果将半径为 64.3 km 的圆周完全覆盖，共需要 37 个小区，其中，有 19 个完全位于区域内，18 个被区域边界分开，如果要将圆形区域完全覆盖，则需要 37 个中继器，考虑此方案资源浪费很大，如果采取图 3 中继器分配方式，采用 19 个圆区域代替六边形区域，其信号覆盖如图 5 所示。

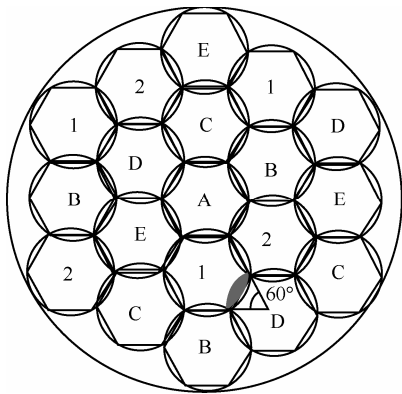


图 5 采用 19 个圆区域

要计算完全中心激励模型对区域的面积覆盖率，需要剔除多个如图 6 所示的重叠区域，由几何知识可知

$$S_{\text{重复区域}} = 2 \left(\frac{1}{2} \alpha_1 R^2 - \frac{\sqrt{3}}{4} R^2 \right) \quad (6)$$

其中， α_1 为弧度制下的扇形圆心角， $\alpha_1 = \frac{\pi}{3}$ 。

总覆盖区域的面积为

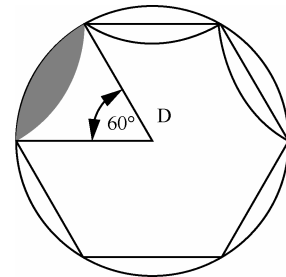


图 6 需要剔除重叠区域的示意

$$S = 19S_{\text{圆}} - 42S_{\text{重复区域}} \quad (7)$$

则此种情形下的区域覆盖率为

$$\eta_1 = \frac{S}{64.3^2 \pi} = 86.75\% \quad (8)$$

但根据资料显示，工程上中继器覆盖率应达到 90% 才满足要求，如果仅把 19 个中继器采用中心激励简单的放在所示地点，总的覆盖率并不能满足工程上的要求，所以需要进行改进。

5 中心—顶点激励模型

在第 4 节中采用的是中心激励模型，将中继器全都设置在正六边形中心。现取区群中心为中心激励，中心周围的 6 个小区设置为顶点激励，在靠近圆形区域边界的区群不完整，区群中的有些小区被圆形边界分割，将这些小区设置为顶点激励，但该区群中的有些小区仍在圆形区域的内部，将其设置为中心激励，这样做可以提高有效覆盖率，如图 7 所示。这种转换不会改变中继器的数目，这样设置会产生圆内部部分区域没有被覆盖的情况，如超出边界的 C 小区，其为顶点激励，将 C 小区所在区域图形放大得到如图 8 所示，黑色的阴影部分为没有被覆盖区，在整个圆上有 6 个这样的未覆盖区域，下面计算这种情况下的覆盖率。

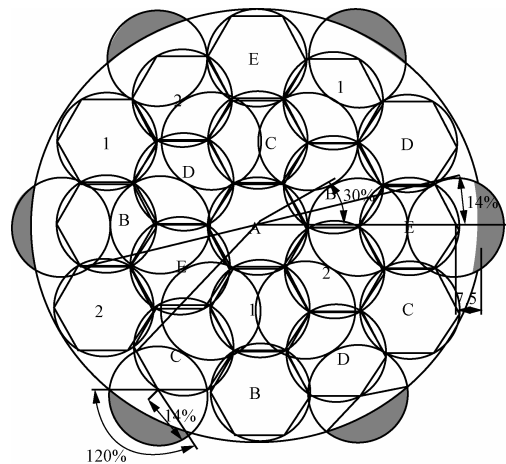


图 7 中心—顶点激励交替

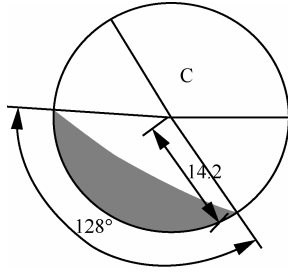


图 8 出界扇形面积示意

根据图 8，由几何知识可知，扇形区域的面积为

$$S_{\text{扇形}} = \frac{1}{2}\alpha_2 R^2 - \frac{1}{2}\alpha_2 L \quad (9)$$

其中， α_2 为弧度制下的扇形圆心角， $\alpha_2 = \frac{32\pi}{45} \approx 0.71\pi$ 。

总覆盖区域的面积为

$$S = 19S_{\text{圆}} - 6S_{\text{扇形}} \quad (10)$$

则此种情形下的区域覆盖率为

$$\eta_2 = \frac{S}{64.3^2 \pi} = 90.7\% \quad (11)$$

相比第 4 节中的均设中心激励，当中继器数目均为 19 时，中心激励与顶点激励相结合模型的覆盖率提高很多，优化较好。但这个模型的不足之处是它仅仅从覆盖面上考虑中继器的选址，并没有考虑用户分布的不均匀性对信号覆盖率的影响，所以对其进行改进是很有必要的。

6 基于用户密度不均匀时求中继器覆盖率的模型

由于区域内用户密度分布的不均匀性，为了从用户覆盖面上衡量本文所选择的中心—顶点激励模型，此处假设从圆形区域中心开始，沿半径方向用户分布密度逐渐递减，某点的用户密度与该点到圆形区域中心 O 的距离 r 呈线性关系，即

$$\rho(r) = kr + m \quad (12)$$

此外,还假设在圆形边缘 $r = R$ 的区域用户密度为 0，圆形区域总的用户数目为 N_0 ，则

$$\rho(R) = kR + m = 0 \quad (13)$$

$$N_0 = \int_0^{63.4} 2\pi r(kr + m)dr \quad (14)$$

假设圆形区域半径 $R = 64.3$ ， $N_0 = 1000$ ，求解得

$$k = -3.6 \times 10^{-3}, m = 0.231 \quad (15)$$

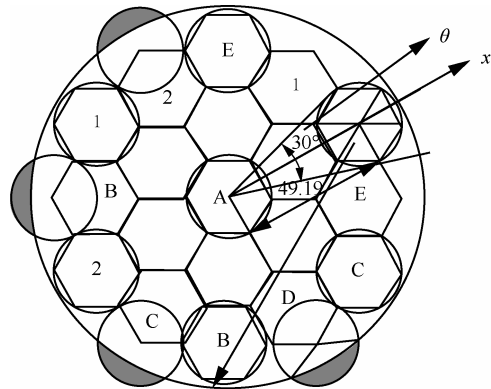
由此得到用户密度关于点到圆形区域中心的

函数为

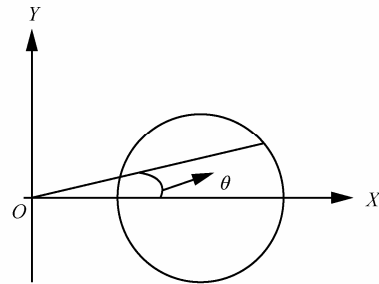
$$\rho(r) = -3.6 \times 10^{-3}r + 0.231 \quad (16)$$

要用中继器所覆盖用户的数量，衡量中心—顶点激励的覆盖率，需求每一个中继器覆盖域内的用户数量，此处分步来求中心与顶点结合的模型所覆盖的用户数量。

对于圆中心到圆形区域中心 $(0,0)$ 的距离为 $a \neq 0$ 的整个圆都在区域内部的圆，对于其中任意一个，以区域中心为原点建立平面直角坐标系如图 9 所示。



(a) 19个中继器的分布



(b) 以区域中心为原点建立坐标系

图 9 圆形区域直角坐标系示意

设其圆心坐标为 $(a,0)$ ，则这个圆的平面坐标方程为

$$(x - a)^2 + y^2 = r^2 \quad (17)$$

圆上任意一点 (x, y) 与原点的连线即为圆形区域的半径，设其方程为 $y = x \tan \theta$ ，该连线与圆的交点坐标分别是 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ，设 r_θ 为交点到原点的距离，则

$$r_\theta = \sqrt{x^2 + y^2} = x\sqrt{1 + \tan^2 \theta} \quad (18)$$

根据积分，该圆所覆盖的用户数量为

$$N_i = 2 \int_0^{\theta_0} d\theta \int_{r_1}^{r_2} \rho(r)rdr \quad (19)$$

其中, i 为与该圆位置相对中心圆位置一样的圆数量, θ_0 为直线与圆相切时所对应的偏角 θ , 对于中心圆 $N_1 = \int_0^r \rho(r)2\pi r dr$, 因为圆彼此之间没有重叠区域, 与位于中心的圆也没有相交, 则 $N' = \sum_{i=1}^n iN_i$ 就是它们所覆盖的用户数量。

当 $N_0 = 1000$ 时计算得到, 中心圆覆盖用户数 $N_1 = 124$, 围绕中心圆的第 2 层圆覆盖用户数 $N_2 = 489$, 第 3 层未被圆域切割的圆覆盖用户数 $N_{3a} = 204$, 被圆域切割的圆 (如图 10 所示) 覆盖用户数的求取如下。

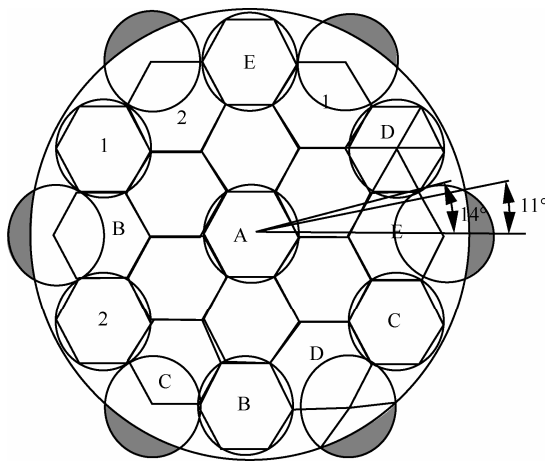


图 10 被分割的圆形区域

对于其中任意一个圆域, 所覆盖的用户数量, 分成两部分的积分, 积分 1 中 r 的下限为直线与小圆的交点, 上限为直线与大圆的交点; 积分 2 中, 积分的上下限均为直线与小圆的交点。

$$(x - 56.8)^2 + y^2 = 14.2^2 \quad (20)$$

设圆上任意一点 (x, y) 与原点的连线即为圆形区域的半径, 设其方程为 $y = x \tan \theta$, 连线与圆交点到原点的距离为

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = x_1 \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \quad (21)$$

$$r_2 = 64.36 \quad (22)$$

$$r_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} = x_3 \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \quad (23)$$

积分 1 为

$$N_{3a} = 2 \int_0^{11} d\theta \int_{r_1}^{64.36} (-3.6 \times 10^{-3} r + 0.231) r dr \quad (24)$$

积分 2 为

$$N_{3b} = 2 \int_{11}^{14} d\theta \int_{r_1}^{r_3} (-3.6 \times 10^{-3} r + 0.231) r dr \quad (25)$$

则可得

$$N_{32} = 6(N_{3a} + N_{3b}) = 136 \cos^{-1} \theta \quad (26)$$

根据以上分析, 这种中心与顶点相结合的模型在用户数量为 1 000, 用户密度从中心沿半径逐渐递减的假设前提下所覆盖的总的用户数量为

$$N'' = N_1 + N_2 + N_{31} + N_{32} = 953 \quad (27)$$

总的用户数量 $N_0 = 1000$, 则用户覆盖率为

$$\eta_2' = \frac{N''}{N_0} \times 100\% = 95.3\% \quad (28)$$

与直接用中心激励相比, 仅选用中心激励的简单模型所覆盖的人口数量为

$$N' = \int_0^{42.6} 2\pi r \rho(r) dr = 734 \quad (29)$$

用户覆盖率为

$$\eta_1' = \frac{N'}{N_0} \times 100\% = 73.4\% \quad (30)$$

由于积分上限是选择中心激励所能覆盖的最远点到中心的距离, 但实际上有些区域的覆盖并未达到最远点, 所以中心激励的实际覆盖率 $\eta_{实} < 73.4\%$ 。

7 结束语

通过中心—顶点激励模型与中心激励模型的对比 (如表 1 所示), 可以得出, 无论是在面积覆盖率还是在用户覆盖率上, 中心—顶点激励都较中心激励有很大的提高, 其中, 在用户覆盖率上二者相差高达 22%, 而且所用中继器的数目及其覆盖半径均没有任何改变, 由此可见, 顶点与中心激励相结合的模型能大幅度提高用户覆盖率, 满足用户需求。

表 1 中心—顶点激励与中心激励的面积覆盖率及用户覆盖率对比

激励模型	面积覆盖率	用户覆盖率
中心—顶点激励	90.7%	95.3%
中心激励	86.75%	73.4%

本文提供了一种有效的中继器覆盖半径计算方法, 利用此方法, 计算出某频率的中继器有效覆盖半径, 并以此半径为基础, 探讨某圆形区域内的

中继器分布。通过与原始蜂窝通信系统中的中心激励模型相比较,得出在面积和人口覆盖率上更高的中心—顶点激励模型。当今社会,无线信号的覆盖率比带宽和速度更重要,使用该模型来扩展基站的覆盖范围是较好的选择。

参考文献:

- [1] 张艳维. 无线传感器网络中位置受限的中继器放置问题[D]. 杭州电子科技大学, 2013.
ZHANG Y W. Position limited repeater placement in wireless sensor networks[D]. Hangzhou Dianzi University, 2013.
- [2] 缪庆育. 蜂窝通信系统中的中继器技术及性能研究[D]. 北京邮电大学, 2010.
MIAO Q Y. In a cellular communication system repeater technology and performance of research[D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [3] 崔素辉. 无线传感器网络若干中继器放置问题研究[D]. 杭州电子科技大学, 2009.
CUI S H. Study on placement of several repeater in wireless sensor networks[D]. Hangzhou Dianzi University, 2009.
- [4] 颜森林, 汪胜前. 激光混沌串联同步以及混沌中继器系统理论研究[J]. 物理学报, 2006(4): 1687-1695.
YAN S L, WANG S Q. Laser chaotic series synchronization and chaotic repeater system theory[J]. Acta Physica Sinica, 2006(4): 1687-1695.
- [5] 万宝华. 利用中继器解决山区无线列调区间弱场问题[J]. 铁道通信信号, 2006(6): 45-47.
WAN B H. Using repeater to solve the mountain wireless train interval weak field problem[J]. Railway Signalling & Communication, 2006(6): 45-47.
- [6] 孙恩涛, 杨雷, 王鹏. 基于光伏发电的物联网中继器的设计[J]. 物联网技术, 2014(7): 25-28.
SUN E T, YANG L, WANG P. Design of the relay of the Internet of things based on photovoltaic power generation[J]. Internet of Things Technologies, 2014(7): 25-28.
- [7] 陈国珉. 移动通信设台组网[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1995.
CHEN G D. Mobile communication network[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 1995.
- [8] 周金萍, 唐伶俐. 无线通信技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHOU J P, TANG L L. Wireless communication technology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 闻映红. 无线与电波传播理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2005.
WEN Y H. Wireless and radio wave propagation theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2005.
- [10] LEE W C Y. Wireless and cellular telecommunications[C]//McGraw-Hill Professional Publishing, 2005.
- [11] 张农. 直放站在蜂窝移动通信网中的应用[J]. 邮电设计技术, 2000(5): 1-7.
ZHANG N. Application of repeater in cellular mobile communication network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2000(5): 1-7.

作者简介:



阎少宏(1977-), 男, 河北唐山人, 华北理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算方法、高性能计算等。



吴宇航(1991-), 男, 河北唐山人, 华北理工大学硕士生, 主要研究方向为云计算理论及其应用。



龚佃选(1981-), 男, 山东沂水人, 博士, 华北理工大学副教授, 主要研究方向为多元样条理论及其应用、分片代数簇理论、径向基函数插值理论及应用等。