

# 平坦地条件下移动通信基站天线远场分析

吴 凯<sup>1</sup>, 潘 锦<sup>1</sup>, 徐 斌<sup>2</sup>, 刘贤峰<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731; 2. 四川省辐射评价治理有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要** 介绍了一种平坦地条件下基站天线远区场分析的理论方法。文章利用射线跟踪法, 通过建立适当坐标系进行三维建模, 结合电磁散射矩阵关于散射场入射场关系进行理论分析。文中采用最常见的对称天线模拟基站天线, 对某 900 MHz GSM 落地式基站进行电磁环境仿真, 对仿真结果进行分析并与实测数据比较, 得到结论: 在距离基站 30 m 范围之内, 要同等考虑直射信号与地面反射信号对场观察点的场强贡献, 在距离 >30 m 时, 只需考虑天线直射信号对场观察点的场强贡献。

**关键词** 电磁辐射; 基站天线; 射线跟踪法

中图分类号 TN943 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2014)11-139-03

## Analysis of the Far Field of Communication Base-station Antenna on Flat Ground

WU Kai<sup>1</sup>, PAN Jin<sup>1</sup>, XU Bin<sup>2</sup>, LIU Xianfeng<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Sichuan Province Radiation Governance Evaluation Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract** A theoretical method for far-field distribution analysis of communication base-station antenna under the condition of flat ground is introduced. A proper 3D model is established by the ray tracing method based on the electromagnetic scattering matrix theory about the relationship between scattering field and incident field. The most common symmetric antenna (Electric Dipole) is used to simulate a 900 MHz base station antenna of floor type. The simulation result is compared with the measured data, which shows that the contribution of the incident wave and the reflected wave to the field of distant point should be considered for the comparable standard in the range of 30 m away from the base station, otherwise, only the incident wave should be considered.

**Keywords** electromagnetic radiation; base-station antenna; the ray tracing method

移动通信基站的合理规划与建立是关乎通信运营商和移动用户两方面的问题。从运营商的角度讲, 基站的规划和建立要考虑土地征用与基站建立后设备的充分利用及后续网络优化问题; 从移动用户的角度讲, 信号质量的优劣直接影响着他们的使用。与此同时, 目前国内在电磁环境评价中计算、预测大型电磁辐射源附近的电磁环境, 都采用《HJ/T 10.2-1996 辐射环境保护管理导则-电磁辐射检测仪器和方法》介绍的理论公式<sup>[1]</sup>。这些公式没有考虑基站周围地形地物的影响, 同时没有区分远场和近场计算的差别。所以理论计算结果和实际场强分布差别很大。

基于上述描述, 论文从本质出发利用射线跟踪法并结合电磁散射原理对基站天线电波传播路径进行分

析, 推导远区场强并与实测结果进行比较, 归纳出特定地域电波传播的特点, 以供基站规划和基站周围电磁环境评价参考。

### 1 求解平坦地条件下基站天线远区场

调研了某模拟 900 MHz 基站天线架设方式和应用环境, 测量了基站天线 200 m 范围之内场强值。由此对理想条件下基站天线理论模型进行辐射特性理论研究, 并进行三维建模, 作出理论分析并与调研数据进行比较。本文偏向于对基站天线直射信号和地面反射信号的研究, 暂不考虑因天气环境、植被变化的影响。

#### 1.1 射线跟踪法

射线跟踪法<sup>[2]</sup>是基于几何光学理论、一致性绕射理论和几何绕射理论的计算机图形学里的阴影测试分析方法。射线跟踪法被引入到无线通信系统研究中是电磁学的跨越。这种跨越是基于电磁波在高频情况下, 它所经过的传输媒质的特性或其他散射参量在这样一个波长范围内变化比较缓慢, 使高频电磁波具有“局部”特性。即在求解一个给定场点的场量时, 无需

收稿日期: 2014-04-28

作者简介: 吴凯(1989—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电波传播, 天线理论与技术。E-mail: sdlwwk2012@163.com。潘锦(1962—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 非均匀介质中的场与波, 时域宽带电磁探测系统, 瞬时宽带天线理论与技术等。

根据整个场的初始信息来求解,而只需利用该场点附近的局部场分布来求取。这样,就可以把电磁波近似为光线,利用几何光学知识处理电磁波在传播过程中遇到障碍物时的反射、绕射、衍射等情况。

## 1.2 电磁散射及电磁散射矩阵

电磁波传播遇到空间障碍物所发生的反射、绕射以及衍射,其本质都是属于电磁散射。波源发出的电磁波被散射体散射到周围空间,电磁散射的正问题就是根据给定的波源及散射体求解观察点的散射场。图1中,  $k_i$  为发自波源的人射波方向上的单位矢量,  $k_s$  为观察点收到的散射场传播方向上的单位矢量<sup>[3]</sup>。将要讨论的散射矩阵被用于描述散射体的电磁特性。通常,散射体离波源较远,因此,到达散射体的电磁波可以当做平面波。同时观察者离开散射体也较远,到达观察点的散射场具有辐射场特性,即散射场振幅与距离成反比,相位与距离成正比。

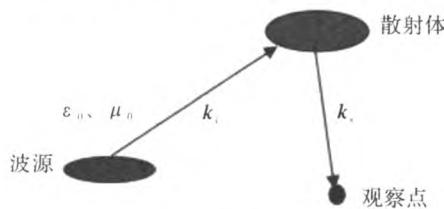


图1 电磁散射

另外,根据叠加原理,可将入射波和散射波分别分解为垂直极化波( $E_\varphi$ )和平行极化波( $E_\theta$ )。由此得到散射矩阵<sup>[4-6]</sup>(下标  $s$  表示散射波,  $i$  表示入射波;下标  $\theta$  代表平行极化分量,  $\varphi$  代表垂直极化分量)

$$\begin{bmatrix} E_{\theta s} \\ E_{\varphi s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) & f_{12}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) \\ f_{21}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) & f_{22}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\theta i} \\ E_{\varphi i} \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 1.3 两径模型的建立

根据射线跟踪法的理论介绍及移动通信基站所处实际场景,结合研究的侧重点,做出如下假设:(1)蜂窝内地球曲率忽略不计<sup>[7]</sup>。(2)基站所处环境为郊区建筑物较少的开阔地,地物均匀单一。(3)基站周围无其他基站等电磁辐射的干扰。(4)利用对称天线模拟基站天线。

由上,可以建立模型—两径模型如图2所示。

由于课题所研究的场为天线远区场,所以可以把天线辐射的波和平坦地面的反射波视为平面波分析。同时,在此只研究到达场观察点的天线直射波和地面反射波,所以称模型为两径模型。图2(a)中,  $A$  点为基站天线所处位置,  $O$  点为地面反射点;  $P$  点为场观察点;  $AP$  为电磁波对场观察点的直射路径;  $AO-OP$  为电磁波经平坦地面反射的波路径;  $\theta, \varphi$  为场观察点在

球坐标系中的坐标量。图2(b)是对图2(a)的简化提取变形,忽略直射波与地面入射波的夹角<sup>[7]</sup>,将波径  $AP, BO$  视为平行;  $h$  代表场观察点的高度。

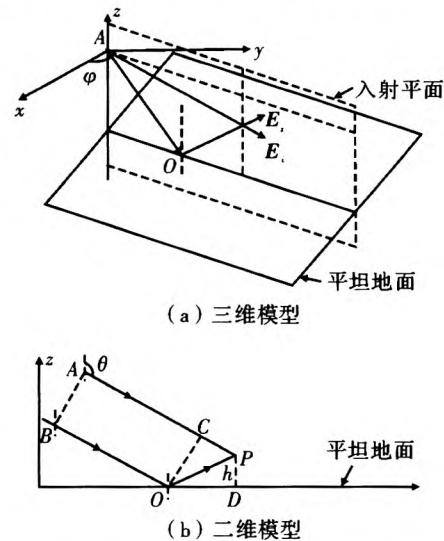


图2 两径模型

## 1.4 理论推导过程

(1)根据平面电磁波在均匀介质中的传播特性及均匀介质的反射特性可以得到  $P$  点直射波为

$$E_1 = E_i \exp(ikr_3) = (\dot{\theta}_i E_{\theta i} + \dot{\varphi}_i E_{\varphi i}) \exp(ikr_3) \quad (2)$$

$O$  点直射波为

$$E_2 = (\dot{\theta}_i E_{\theta i} + \dot{\varphi}_i E_{\varphi i}) \exp(ikr_1) \quad (3)$$

$P$  点反射波为

$$E_3 = (\dot{\theta}_s R_\theta E_{\theta i} + \dot{\varphi}_s R_\varphi E_{\varphi i}) \exp[ik(r_1 + r_2)] \quad (4)$$

式中,  $r_1, r_2, r_3$  分别代表路径  $AO$  ( $BO$ )、 $OP$ 、 $AP$  的距离;  $R_\theta, R_\varphi$  分别代表平行极化波和垂直极化波的地面反射系数<sup>[8]</sup>

$$R_\theta = \frac{\varepsilon'_r \cos \theta_s - \sqrt{\varepsilon'_r - \sin^2 \theta_s}}{\varepsilon'_r \cos \theta_s + \sqrt{\varepsilon'_r - \sin^2 \theta_s}} \quad (5)$$

$$R_\varphi = \frac{\cos \theta_s - \sqrt{\varepsilon'_r - \sin^2 \theta_s}}{\cos \theta_s + \sqrt{\varepsilon'_r - \sin^2 \theta_s}} \quad (6)$$

$\theta_s = \pi - \theta$  表示地面反射角,  $\varepsilon'_r = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0$  是地

面复相对介电常数,  $\varepsilon_r, \sigma$  是地面的相对介电常数与电导率, 地球具有相对介电常数平均值 15, 中国国土面积上土壤电导率变化范围为  $10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ 。

(2)根据对称天线远区辐射特性和平坦地面对平面波的影响,可推导得到基站天线在  $P$  点的直射场<sup>[9]</sup>

$$E_\varphi = -j \frac{60I}{r} (\cos \varphi_0 \sin \varphi + \sin \varphi_0 \cos \varphi) \sin \theta_0 \times \left[ \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)}{\sin^2 \theta} \right] \exp(ikr_3) \quad (7)$$

$$E_\theta = -j \frac{60I}{r} [\cos\theta_0 \sin\theta + (\cos\varphi_0 \cos\varphi + \sin\varphi_0 \sin\theta_0 \cos\theta)] \times \left[ \frac{\cos(kl \cos\theta) - \cos(kl)}{\sin^2\theta} \right] \exp(ikr_3) \quad (8)$$

式中,  $\theta_0, \varphi_0$  均代表对称天线的取向;  $(\theta, \varphi, r)$  代表场观察点的球坐标。 $P$  点总场为

$$E_\varphi^{sg} = -j \frac{60I}{r} (\cos\varphi_0 \sin\varphi + \sin\varphi_0 \cos\varphi) \sin\theta_0 \times \left[ \frac{\cos(kl \cos\theta) - \cos(kl)}{\sin^2\theta} \right] [1 + \exp(ik\Delta) R_\varphi] \exp(ikr) \quad (9)$$

$$E_\theta^{sg} = -j \frac{60I}{r} \{ \cos\theta_0 \sin\theta [1 + \exp(ik\Delta) R_\theta] + (\cos\varphi_0 \cos\varphi + \sin\varphi_0 \sin\varphi_0) \times \sin\theta_0 \cos\theta [1 - \exp(ik\Delta) R_\theta] \} \left[ \frac{\cos(kl \cos\theta) - \cos(kl)}{\sin^2\theta} \right] \exp(ikr) \quad (10)$$

式中, 上标  $sg$  表示平坦地 (Smooth ground) 存在下的总场,  $\Delta (\Delta = \frac{-h(1 + \cos 2\theta)}{\cos\theta} = -2h \cos\theta)$  表示直射波路径与反射波路径的波程差,  $r$  即路径  $BO$  的长度。

(3) 根据上述关于散射矩阵的介绍, 可通过修正, 将场观察点  $P$  处总场与直射场的关系进行如下式表示

$$\begin{bmatrix} E_\varphi^{sg} \\ E_\theta^{sg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) & 0 \\ 0 & f_{22}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_\varphi \\ E_\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中, } f_{11}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) = [1 + \exp(ik\Delta) R_\varphi], f_{22}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) = [\cos\theta_0 \sin\theta (\cos\varphi_0 \cos\varphi + \sin\varphi_0 \sin\varphi_0) \sin\theta_0 \cos\theta] \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{[1 - \exp(ik\Delta) R_\theta]}{[1 + \exp(ik\Delta) R_\theta]} \end{bmatrix} \times \frac{\{\cos\theta_0 \sin\theta + (\cos\theta_0 \cos\varphi + \sin\theta_0 \sin\varphi_0) \sin\theta_0 \cos\theta\}}{[1 + \exp(ik\Delta) R_\theta]}$$

## 2 理论推导与实测数据的比较

根据对平坦地条件下基站天线远区场场强及场强关系的推导, 利用 Matlab<sup>[10]</sup> 编程绘图, 将理论推导结果与实测数据进行比较如图 3 所示。

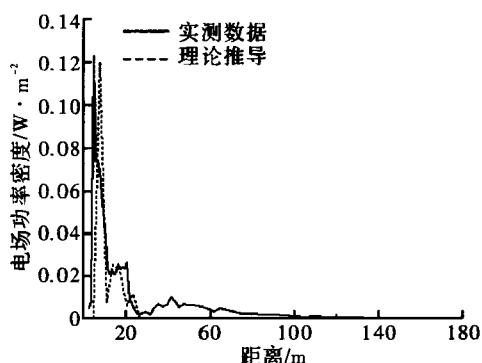


图 3 实测数据与理论推导曲线图

图 3 中的理论结果来自四川省成都市某平原模拟基站测量数据, 基站所处环境为平坦空旷地, 基站天线下倾角为 3°, 天线加高为 3.1 m, 场点测量天线架高 1 m, 测量天线下倾角为 3°。从图 3 中可以看出, 理论推导结果曲线与实测数据基本吻合, 两者均遵循功率密度随距离先陡峭上升后较缓慢下降的规律, 在距离约为 30 m 以后, 功率密度几乎趋于零, 并无较大变化。但从比较可以看出, 两曲线尚存在差别, 其中原因是实际地面不平坦、地物多样, 以及测量公差等, 而理论模型中视地面为平坦, 使得直射波与平坦地面反射波存在相干衰落。因此, 理论模型有待进一步优化。

## 3 结束语

本文利用射线跟踪法, 结合电磁散射矩阵关于入射场与散射场的关系, 通过建立适当的坐标系, 推导得到平坦地条件下基站天线远区场表达式及远区总场与直射波的矩阵关系。利用 Matlab 对理论推导结果进行绘图并与实测结果进行比较。结果比较表明, 在距离基站 30 m 范围之内, 要同等考虑直射信号与地面反射信号对场观察点的场强贡献, 在距离 > 30 m 时, 只需考虑天线直射信号对场观察点的场强贡献。从结果比较来看, 本文所建立的理论模型能较好地表示理想条件下基站天线远区场, 但对于更加实际环境的模拟, 需进一步修正。

## 参考文献

- [1] 梁高光, 于雪, 刘丽玲, 等. 基站电磁环境仿真研究 [C]. 成都: 第 22 届全国电磁兼容学术会议, 2012.
- [2] 袁正午. 蜂窝通信系统移动终端射线跟踪定位理论与方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- [3] 傅眉君, 冯恩信. 高等电磁理论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [4] TSANG L, KONG J A, DING K H, et al. Scattering of electromagnetic waves, numerical simulations [M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [5] TSANG L, KONG J A, SHIN R. Theory of microwave remote sensing [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [6] TAI C T. Dyadic green functions in electromagnetic theory [M]. New York: IEEE Press, 1994.
- [7] 谢益溪. 移动通信无线网络设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [8] 葛德彪, 魏兵. 互易定理计算分层半空间上方任意取向偶极子的远区场 [J]. 物理学报, 2012, 61(5): 29–35.
- [9] 杨显清, 王园, 赵延文, 等. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 赵海滨. Matlab 应用大全 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>