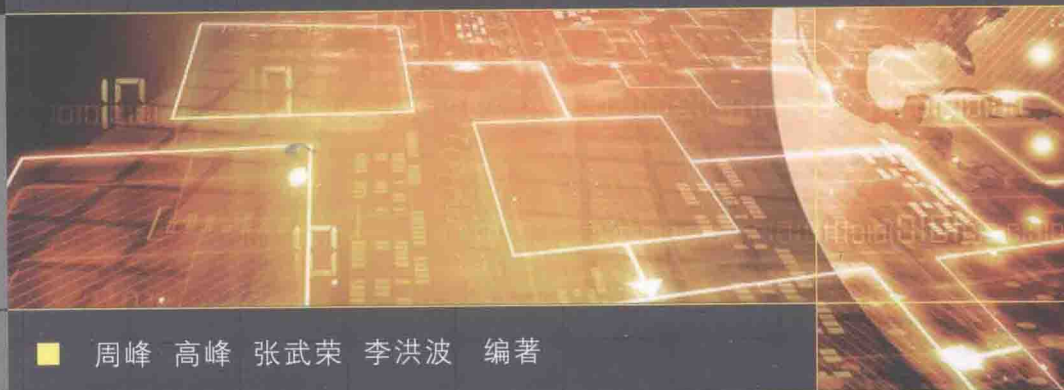


A

ntenna Technologies and Applications
in Mobile Communication System

移动通信天线 技术与工程应用



■ 周峰 高峰 张武荣 李洪波 编著

- ▶ **内容实用** 工程技术人员需要一本面向工作需要的、能够流畅阅读的天线技术读本。本书定位于工程实用读物，尽量减少复杂数学推导，必要的公式力求简明，语言力求平实生动。
- ▶ **全面深入** 本书内容集中在“移动通信天线系统”，对该领域相关技术，比如天线的构造、工程应用、电磁辐射、雷电防护等都做了全面介绍。
- ▶ **紧跟前沿** 本书作者团队一直工作在移动通信天线技术的前沿，撰写的相关内容来自科研一线，这些都保证了本书内容原汁原味，紧跟技术前沿。
- ▶ **易学易用** 本书语言平实简明，采用模块化的编排方式，以尽量满足读者快速学习的需求。读者不必逐章阅读，可以挑选感兴趣的章节直接阅读而基本不影响理解。



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

A

ntenna Technologies and Applications
in Mobile Communication System

移动通信天线 技术与工程应用

■ 周峰 高峰 张武荣 李洪波 编著

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

移动通信天线技术与工程应用 / 周峰等编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-115-37545-2

I. ①移… II. ①周… III. ①移动通信—天线—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第275649号

内 容 提 要

天线是移动通信系统的重要组成部分。本书首先全面介绍了与移动通信天线相关的理论知识和实用技术,包括电磁波的基本规律、天线的电路参数和辐射参数、天线的构造和质量、移动通信天线测试测量、天馈线系统相关的器件;接下来讲解了智能天线、MIMO 和有源天线领域的先进技术,及天线隔离度和蜂窝系统共存;然后以 LTE 网络和 WLAN 网络为例详细介绍了天线的工程应用,此外还介绍了天馈线及基站系统的防雷;最后一章介绍了移动通信天线的电磁辐射、环境评估和辐射缓解。

本书定位于具有先进性的工程实用读物,主题集中,尽量减少复杂数学推导,语言力求平实生动。本书作者团队长期工作在技术前沿,本书内容大多来自作者的技术研究和工程实践,这保证了本书的先进性和实用性。本书主要针对移动通信设计、勘测、工程建设、网络优化、运营维护、设备采购、质检测试领域的工程技术人员。对于从事天线研发制造的技术人员,以及移动通信、天线微波专业的高校师生,本书也有参考价值。

◆ 编 著 周 峰 高 峰 张武荣 李洪波

责任编辑 刘 洋

责任印制 程彦红

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 27

2015 年 2 月第 1 版

字数: 657 千字

2015 年 2 月北京第 1 次印刷

定价: 99.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

本书编委会

(按姓氏笔画排序)

卜振钊	卜斌龙	王洪博	甘洪文	史德年	冉志强
芒戈	朱琨	安少庚	安旭东	孙立新	李伟
杨毅锋	吴玲琦	何龙军	何桂立	张炎	张明
张培艳	张颖艳	张睿	金正宇	陆冰松	陈景富
孟艾立	赵娜	施冠超	徐晓燕	郭琳	常磊
蒋皓	韩镒	鲁祖训	曾强	薛锋章	

序 言

天线是移动通信系统中的关键设备，信号的收发都离不开天线。移动通信领域的很多工程师都需要和天线打交道，他们需要一本全面、实用的天线技术书。

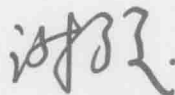
近年来我国移动通信产业蓬勃发展，在移动通信天线领域出现了一大批科研成果，涌现出了一批技术和规模都位居世界前列的中国天线企业。在这种情况下，需要一本专门的书来系统介绍我国在该领域的技术、产品和工程经验。

这本书的出现恰逢其时。

本书几位作者分别来自研究机构、大学、电信运营企业和设备制造企业，他们长期在天线和移动通信领域工作，这个产学研用相结合的作者团队力图为读者撰写一本实用的技术书。此外，来自多个单位的专家组成的编委会为本书的写作提供了技术支持，可以说，这本书汇聚了行业的智慧和经验。

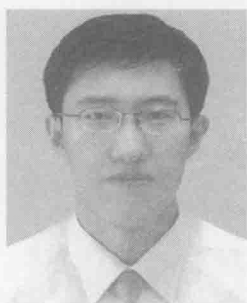
本书技术内容贴合我国实际情况，具有很强的实用性。本书作者长期在国际电信联盟、3GPP 等国际组织从事与移动通信天线相关的标准化工作，了解国际技术动态。

本书还介绍了小型化介质天线、超材料天线、有源阵列基站天线和 3D MIMO 等前沿技术，这使得本书具有先进性。



中国信息通信研究院副院长 谢毅 博士
2014 年 12 月

作者简介



周峰，中国泰尔实验室通信计量部副主任。在北京邮电大学获得了通信与电磁场微波领域的学士、硕士和博士学位。是国际电信联盟天线隔离度技术报告的主要起草人之一。



高峰，北京邮电大学电磁场与微波技术专业博士，主要研究方向为移动通信与宽带无线接入技术。出版图书 9 种，负责及参与移动通信领域科研项目 20 余项，发表论文 40 余篇。



张武荣，华为技术有限公司专家。1997 年北京邮电大学信号与信息处理专业博士毕业。加拿大维多利亚大学电子与计算机工程系博士后。曾在国内和国际顶级期刊，包括 IEEE Transactions 上发表多篇文章。国家重大专项 3D-MIMO 项目首席科学家。有源天线技术标准化的推进者和组织者。



李洪波，中国通信建设集团设计院有限公司第二设计所所长。在北京理工大学获得了电磁场与微波技术学士学位，在南京邮电大学获得了电子与通信技术硕士学位。目前主要从事无线网络规划设计工作。

读者所欲 常在我心 ——代前言

很多一线的工程师抱怨：何时才能有一本难度适中、适合工作需要的天线读本？读者所欲，常在我心。

本书作者之一近两年为北京移动设计院做过两次移动通信天线技术方面的培训，内容实用，颇受学员好评。有学员强烈建议将讲义整理为书稿。于是就有了这本书。

天线方面的著作汗牛充栋，但其中大量的微分方程、数值算法让读者望而却步。目前大部分天线技术书是写给天线研发人员看的，而不是写给天线使用人员看的，但是后者人数要大于前者，开车的人比造车的人要多，这是一个普遍规律。本书面向使用天线的工程技术人员，对于天线研发人员也有参考价值。

霍金在《时间简史》中调侃说：增加一个方程，减少一半读者。作为工程技术类书籍，没有方程是不现实的，但必须是大部分读者能看得懂、用得着的方程。

广大移动通信技术人员需要一本天线读物。有相当多的移动通信从业人员在大学阶段没有学过专门的天线课程，或者大学阶段的天线课程只是通识教育，对移动通信天线介绍不多。移动通信领域相当多的从事设计、勘测、工程建设、网络优化、运营维护、设备采购、质量检测的技术人员需要和天线打交道，他们需要一本针对性强、可读性强的天线读物。

移动通信技术的发展呼唤一本天线读物。目前 LTE 建设已经大面积展开，和天线相关的工程量大，且涉及很多新技术，需要专门的书籍予以介绍。本书的特点如下。

(1) 内容实用，可读性强。天线理论博大精深，涉及复杂的电磁场方程和数学方法，难免曲高和寡；需要和天线打交道的工程技术人员很多，他们很难有时间和精力去深入钻研天线理论，这就需要一本面向工作需要的、能够流畅阅读的天线技术读本，本书提供了这样一种选择。本书定位于工程实用读物，尽量减少复杂数学推导，必要的公式力求简明、语言力

求平实生动。

(2) 主题集中, 内容全面。天线应用很广, 比如卫星天线、雷达天线、电子对抗天线, 等等。而本书内容集中在“移动通信天线系统”, 对该领域相关技术, 比如天线的构造、工程应用、电磁辐射、雷电防护等都做了全面介绍。

(3) 紧跟前沿。本书作者团队一直工作在移动通信天线技术的前沿。作者之一是国际电信联盟天线隔离度技术报告主要起草人之一, 也是中国通信标准化协会《天线隔离度技术报告》主要起草人。另有作者担任 3GPP 有源基站天线技术报告起草组的主席。撰写的相关内容来自科研一线, 这些都保证了本书内容原汁原味, 紧跟技术前沿。

(4) 易学易用。本书语言平实简明, 采用模块化的编排方式, 以尽量满足读者快速学习的要求。读者不必逐章阅读, 可以挑选感兴趣的章节直接阅读而基本不影响理解。

本书主要针对移动通信设计、勘测、工程建设、网络优化、运营维护、设备采购、质检测试领域的工程技术人员。对于从事天线研发制造的技术人员, 以及移动通信、天线微波专业的高校师生, 本书也有参考价值。

在本书写作过程中, 得到了中国信息通信研究院泰尔实验室各级领导的关怀指导, 同时还得到了北京邮电大学、华为技术有限公司、中国通信建设集团设计院有限公司、京信通信、摩比天线技术有限公司、中国电信北京研究院、武汉虹信通信技术有限责任公司、中国移动设计院、罗森博格公司、罗德与施瓦茨公司、北京森馥科技股份有限公司等单位的帮助, 在此一并致谢。

由于作者学识有限, 书中错误之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。读者可通过本书编辑的电子邮箱 (liuyang@ptpress.com.cn) 与我们联系。

作者

2014 年 12 月

目 录

第1章 天线、无线通信与

电磁波 1

1.1 天线的基本概念 1

1.2 人类探索利用电磁波的历程 2

1.3 电磁波的基本特性 4

1.4 近场和远场 5

1.5 电磁辐射与电波传播 8

1.6 对称振子的辐射 10

1.7 电磁波的极化 11

1.7.1 极化匹配和失配 11

1.7.2 水平极化波的近地损耗 12

1.8 人体和物体的电波穿透损耗 17

1.8.1 使用喇叭天线的测量 18

1.8.2 使用水平面全向天线的 测量 20

参考文献 21

第2章 天线的参数 23

2.1 天线工程中的量值单位 24

2.2 电路参数 28

2.2.1 电压驻波比 28

2.2.2 端口隔离度 30

2.2.3 功率容量 30

2.2.4 无源互调 30

2.3 辐射参数 33

2.3.1 天线方向图 33

2.3.2 增益 36

2.3.3 波束宽度 37

2.3.4 前后抑制比 40

2.3.5 副瓣(旁瓣)抑制 41

2.3.6 零点填充 42

2.3.7 下倾 43

2.3.8 极化方式 47

2.3.9 交叉极化比 48

2.3.10 其他辐射参数 50

2.4 智能天线的特殊参数 51

2.5 其他天线参数 53

2.6 移动通信天线的参数要求 53

2.6.1 普通室外基站天线参数 要求 53

2.6.2 TD-SCDMA 智能天线 参数要求 59

2.6.3 室内分布系统天线参数 要求 60

2.7 覆盖场景与天线参数 64

2.7.1 市区基站天线选择 64

2.7.2 农村基站天线选择 64

2.7.3 郊区基站天线选择 65

2.7.4 公路覆盖基站天线选择 65

2.7.5 山区覆盖基站天线选择 67

2.7.6 近海覆盖基站天线选择 67

2.7.7 隧道覆盖基站天线选择 68

2.7.8 室内覆盖天线选择 68

2.7.9 点对点通信天线选择 70

参考文献 70

第 3 章 天线的构造	71	4.3.3 天线电下倾角测量	128
3.1 辐射单元	71	4.3.4 终端天线的 OTA 测试	128
3.1.1 振子单元	71	4.4 远场、紧缩场、近场和甚近场 的测量	133
3.1.2 微带单元	74	4.4.1 远场测量	133
3.2 辐射单元的阵列结构	77	4.4.2 紧缩场测量	134
3.3 馈电网络	81	4.4.3 近场测量	135
3.3.1 馈电网络的结构	81	4.4.4 甚近场测量	137
3.3.2 馈电网络中的功分器	83	4.5 天线的环境及可靠性测试	140
3.3.3 电调下倾天线的馈电 网络	84	4.5.1 高低温循环试验	142
3.4 反射板	87	4.5.2 淋雨试验	143
3.5 外罩	91	4.5.3 自由跌落试验	144
3.6 宽带天线的构造	95	4.5.4 模拟风载试验	144
3.7 小型化天线	99	4.6 天线测试自测题若干	145
3.7.1 传统结构的小型化 设计	100	参考文献	146
3.7.2 小型化介质天线	101	第 5 章 天馈系统的器件及 其测试	148
3.7.3 超材料与天线小型化	104	5.1 馈线和连接器	148
3.8 天线的质量	109	5.1.1 同轴馈线	148
3.8.1 当前的问题	109	5.1.2 漏缆	151
3.8.2 采购的理性	110	5.1.3 同轴连接器	155
参考文献	112	5.2 无源器件	160
第 4 章 移动通信天线测试	114	5.2.1 功分器	161
4.1 驻波比和传输损耗测试	114	5.2.2 耦合器	163
4.1.1 测试仪表及测试方法	114	5.2.3 3dB 电桥	163
4.1.2 驻波自动监测天线	122	5.2.4 滤波器	165
4.1.3 天线驻波比测试误区 若干	122	5.2.5 合路器	166
4.2 其他电路参数测量	123	5.2.6 衰减器	167
4.2.1 天馈线无源互调测试	123	5.2.7 负载	167
4.2.2 天线功率容量测试	124	5.2.8 无源器件对信号质量的 影响	168
4.2.3 多端口天线隔离度 测试	125	5.2.9 电缆和无源器件的 保养	169
4.3 天线辐射特性的远场测试	126	5.3 塔顶放大器	170
4.3.1 天线增益测量	126	5.4 无源器件的性能指标	171
4.3.2 天线半功率波束宽度等 的测量	127	5.4.1 工艺和材料指标	171
		5.4.2 射频指标	173
		5.5 无源器件的测试	178

5.5.1 测试仪表及系统	178	6.5.1 移动通信中有源天线和 广义有源天线的差别	215
5.5.2 测试方法	183	6.5.2 移动通信中有源天线的 结构	216
5.5.3 自动测试系统	188	6.5.3 有源天线基站和传统 基站系统的区别	216
参考文献	191	6.5.4 有源天线固有优势	217
第 6 章 有源天线与 MIMO 技术 及其演进	193	6.5.5 有源天线的典型应用	218
6.1 天线阵列和方向图	193	6.5.6 2D-MIMO 技术简介	218
6.1.1 引言	193	6.5.7 双流波束成形 (Dual Layer Beamforming)	219
6.1.2 关于本章题目	193	6.5.8 基于有源天线的 3D-MIMO 及其演进	220
6.1.3 一些和方向图可调天线 相关的名词的区别	194	6.5.9 基于有源天线的小区间 协作技术	221
6.2 阵列天线的方向图	195	6.5.10 技术关键点	222
6.2.1 方向图的产生	195	6.6 有源天线的射频要求	222
6.2.2 方向图的调整	196	6.6.1 射频指标的意义和目的	222
6.2.3 传统有源和无源分离及 模拟天线合分路网络的 合理性	196	6.6.2 有源天线基站的射频 指标制定方法	222
6.2.4 阵列天线方向图的数学 模型	196	6.6.3 有源天线基站的射频 指标框架	223
6.2.5 小结	205	6.6.4 基站的分类	223
6.3 移动通信中阵列天线的特征	205	6.6.5 基站和移动终端之间的 最小耦合插损	224
6.3.1 通道相关性对方向图的 影响	206	6.6.6 基站关键发射机指标	224
6.3.2 业务波束和覆盖波束 (广播波束)	207	6.6.7 邻道泄漏比 (ACLR)	226
6.3.3 天线下倾角的调整	208	6.6.8 基站关键接收机指标	226
6.3.4 相位和幅度误差对方向 图的影响	210	6.6.9 辐射指标	227
6.3.5 小结	212	6.7 有源天线基站邻道泄漏比 (ACLR) 的空间方向性	228
6.4 蜂窝移动通信系统中天线的 发展	213	6.7.1 ACLR 空间方向性的 形成机理	228
6.4.1 无源天线的演进	213	6.7.2 有源天线 ACLR 空间 方向性的形成机理	229
6.4.2 从无源天线到有源 天线	213	6.7.3 有源天线 ACLR 的解析 表达	231
6.4.3 天线向智能化方向的 演进	214	6.7.4 ACLR 空间方向性的 实际测量和验证	233
6.5 移动通信中的有源天线和 MIMO 技术	215		

6.8 有源天线基站 EVM 的空间方向性	234
6.8.1 EVM 空间方向性的形成机理	234
6.8.2 EVM 空间分布的解析表达	234
6.8.3 量化仿真分析结果	235
6.9 有源天线基站带内阻塞性能要求	236
6.9.1 传统基站和有源天线基站带内阻塞的比较	236
6.9.2 有源天线基站带内阻塞信号功率仿真统计	237
6.10 阵列基站的空间交调	237
6.11 三维系统共存仿真简介	239
6.11.1 系统仿真简介	239
6.11.2 系统拓扑	239
6.11.3 仿真流程简介	240
参考文献	241

第 7 章 共建共享、天线隔离和系统共存 242

7.1 基站基础设施共建共享	242
7.1.1 我国的实践	242
7.1.2 国外的实践	243
7.1.3 相关标准化工作	244
7.2 干扰指标与天线隔离度要求	245
7.2.1 杂散、阻塞和互调干扰	245
7.2.2 典型天线配置场景	246
7.2.3 隔离度要求计算方法	247
7.2.4 蜂窝系统天线隔离度具体要求	249
7.3 天线隔离度计算	253
7.3.1 隔离度计算基本公式	253
7.3.2 水平和混合隔离度的远场边界	255
7.3.3 短偶极子天线的垂直隔离度公式理论证明	258
7.3.4 半波偶极子的垂直隔离	

度公式证明和距离边界	259
7.3.5 天线隔离度的频率依赖性	264
7.3.6 极化对天线隔离度的影响	268
7.3.7 金属塔架对天线隔离度的影响	269
7.4 天线隔离度的测量	271
7.4.1 我国 CCSA 组织的垂直隔离度测量	271
7.4.2 WiMAX 论坛组织的测量	274
7.4.3 法国电信组织的测量	281
7.5 共建共享模式下多系统的共存性	282
7.5.1 共存场景与分析方法	282
7.5.2 共建共享模式和邻近建站模式的干扰指标对比	285
7.5.3 DCS1800 和 TD-SCDMA 共存分析	286
7.5.4 DCS1800 和 WCDMA 共存分析	288
7.5.5 GSM900 和 cdma2000 共存分析	289
7.5.6 GSM900、WCDMA 和 TD-SCDMA 三系统的共存分析	290
参考文献	293

第 8 章 天线的工程应用 295

8.1 LTE 宏基站天馈系统建设	295
8.1.1 LTE 网络多天线发射模式	295
8.1.2 TD-LTE 天线制式选择	297
8.1.3 LTE FDD 天线技术选择	300
8.1.4 LTE 天馈系统建设策略	302
8.1.5 基站塔桅的共建共享	308

8.1.6	LTE 基站天面勘察	310	9.5.3	馈线屏蔽层离塔处接地与否判定	362
8.1.7	LTE 基站天馈系统工艺要求	312	9.5.4	接地线的安装要求	365
8.2	WLAN 网络天馈建设	320	9.6	等电位连接	367
8.2.1	WLAN 网络中的多天线技术	320	9.6.1	星形等电位连接和网状等电位连接	368
8.2.2	WLAN 网络常用天线	322	9.6.2	基站机房设备等电位接地方案的计算电磁学仿真	370
8.2.3	WLAN 天馈安装工艺	323	9.7	天馈线的 SPD 保护	372
8.3	美化天线的应用	326	9.8	分布式基站和电调天线的防雷	374
8.3.1	美化天线设计要求	327	9.9	防雷测试	378
8.3.2	美化天线的分类	327	9.9.1	测试设备	378
8.3.3	宏基站美化天线解决方案	328	9.9.2	无线基站接地系统及 SPD 的测试方法	378
8.3.4	小区美化天线解决方案	331	9.9.3	无线基站用设备防雷的测试方法	379
8.3.5	室内美化天线解决方案	332	9.9.4	无线基站环境监控及各类传输设备耐混合波的雷电防护性能试验	380
8.4	集束天线的应用	333	9.9.5	土壤电阻率的测量	381
8.5	薇蓝有源天线系统	334	9.9.6	接地电阻的测量	382
8.5.1	有源天线室内分布原理	335	参考文献	383	
8.5.2	与传统无线天线造价及性能对比	335			
	参考文献	336			
第 9 章 天馈线系统的防雷 338					
9.1	雷击及其对移动通信系统的危害	338	第 10 章 天线电磁辐射与缓解 385		
9.1.1	雷电危害	338	10.1	电磁辐射的安全标准	385
9.1.2	雷电冲击波形的一般分析	339	10.2	移动通信天线的电磁辐射不可怕	388
9.2	防雷工程中的概念和术语	341	10.3	移动通信典型场景的电磁辐射测量	389
9.3	雷击耦合和防护概述	344	10.3.1	通信机房的电磁辐射	390
9.4	避雷针系统	349	10.3.2	楼顶基站天线电磁辐射测量一	391
9.4.1	直击雷的防护	349	10.3.3	楼顶基站天线电磁辐射测量二	391
9.4.2	二次抑制型避雷针	351	10.3.4	室内覆盖天线的电磁辐射	393
9.5	防雷系统中的接地	352	10.3.5	一些有趣的比较测量	393
9.5.1	基站接地网	353			
9.5.2	新型接地体	358			

10.4	辐射危害的避免和公众沟通	394	10.6.3	三基站在楼顶平台的电磁辐射仿真	405
10.5	基站天线辐射超标区域的仿真	397	10.6.4	四基站在垂直楼面上的电磁辐射及缓解仿真	406
10.6	多系统天线共塔架场景的电磁辐射及缓解措施仿真	400	10.6.5	五基站在垂直楼面上的电磁辐射及缓解仿真	410
10.6.1	单基站在地面广场上的电磁辐射仿真	400	10.6.6	三基站邻近建站的电磁辐射及缓解仿真	414
10.6.2	单基站在楼顶平台的电磁辐射仿真	401		参考文献	417

第 1 章

天线、无线通信与电磁波

天线的作用是发射和接收电磁波，故而是无线通信的重要组成部分。本章将给出天线的基本概念，回顾人类探索利用电磁波的历程，对历史的回顾有利于更好地理解现有的科学概念、增强创新意识。要学习天线首先要了解电磁波，本章将讲述正弦激励电磁波在时域和空间域的基本规律，包括近场和远场、电磁辐射与电波传播、对称振子的辐射、极化等内容。特别是针对移动通信工程领域对水平极化波的普遍看法，本章介绍了最新的研究成果。

1.1 天线的基本概念

天线作为辐射或接收无线电波的部件而应用于所有的无线电系统之中，其作用是将发射机送来的高频电流（或导波）有效地转换为无线电波并传送到特定的空间区域；或者将特定的空间区域发送过来的无线电波有效地转换为高频电流而进入接收机。前者称为发射天线，后者称为接收天线，这取决于无线电系统的功能要求，天线本身同时兼备发射和接收的功能，因此在理论上和分析设计上无需作特别区分。天线可以定义为：能够有效地向空间某特定方向辐射电磁波或能够有效地接收空间某特定方向来的电磁波的装置。天线的作用如图 1-1 所示。

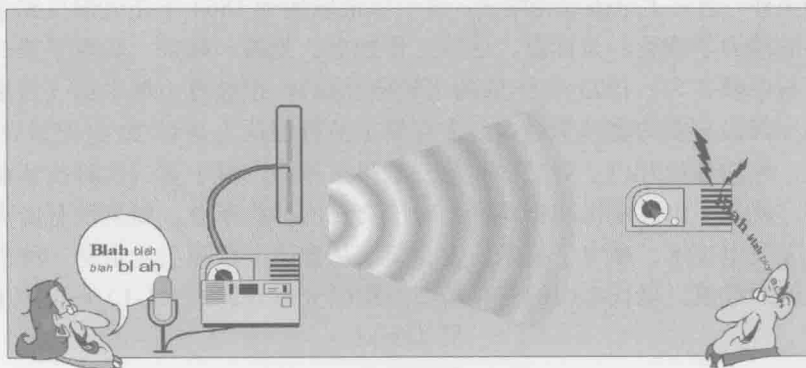


图 1-1 天线的作用漫画图示

天馈子系统是移动通信系统的射频前端，通常包括天线、微波无源器件、传输线和连接器（通常是射频同轴线和同轴连接器）等无源部件，其作用是：一方面将来自发射机的射频信号转化为电磁波并辐射至自由空间，另一方面将空间电磁波转化为射频信号并匹配地传送

至接收机。在一些移动通信系统中，为了增加和延伸覆盖距离，也常常在天馈子系统内加入塔顶放大器。在一个无线通信基站系统中，天线的位置如图 1-2 所示。

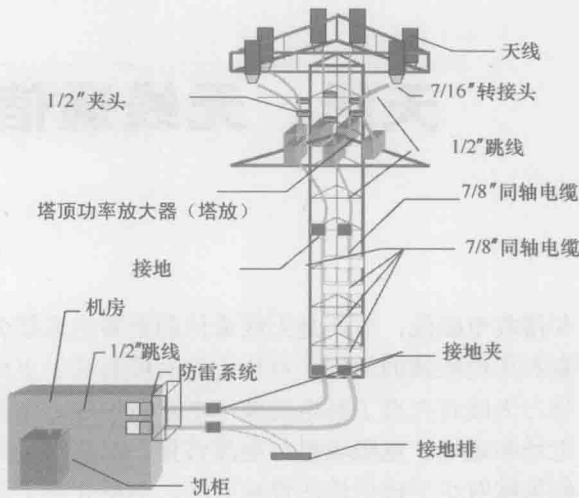


图 1-2 天馈线在移动通信基站系统中的位置

1.2 人类探索利用电磁波的历程

就人类探索利用电磁波的历程，以下 3 个事件是有里程碑意义的。

- (1) 1831 年，法拉第发现电磁感应。
- (2) 1864 年，麦克斯韦建立电磁方程。
- (3) 1888 年，赫兹验证了电磁波的发射与传播。

麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831—1879）是英国科学家。科学史上，称牛顿把天上和地上的运动规律统一起来，实现了第一次大综合。麦克斯韦总结了法拉第、安培、高斯、库仑等前人的工作，创立了电磁理论学说，这一学说以他于 1864 年在英国皇家学会上宣读的论文《电磁场的动力学理论》为标志。这些工作把电、光统一起来，实现了第二次大综合，因此麦克斯韦与牛顿齐名。1873 年出版的《论电和磁》，也被尊为继牛顿《自然哲学的数学原理》之后的一部最重要的物理学经典。麦克斯韦被普遍认为是 20 世纪最有影响力的 19 世纪物理学家。他的理论开启了第二次和第三次科技革命，对于第二次科技革命，如果没有麦克斯韦方程，就造不出发电机和电动机。对于第三次科技革命，如果没有麦克斯韦方程，也就没有现代无线电技术、微电子技术。麦克斯韦从理论上预测了光也是一种电磁波，并且推导得到了光速的数值。现代常用的麦克斯韦方程微分形式如式 (1-1) ~ 式 (1-4) 所示。

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{1-1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{1-2}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1-3}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{1-4}$$