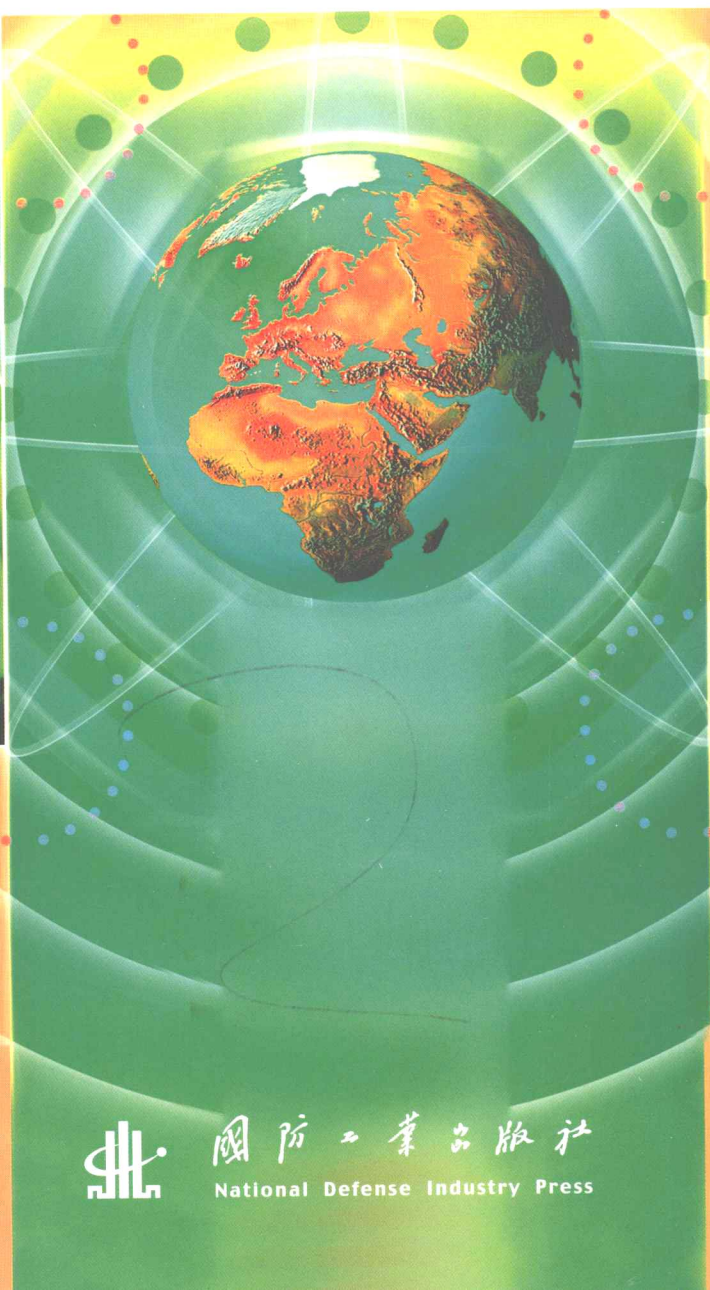
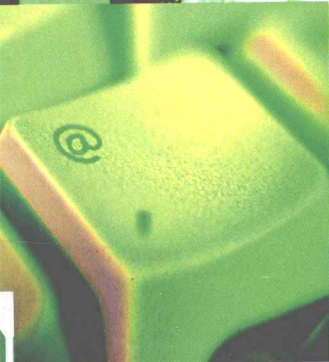
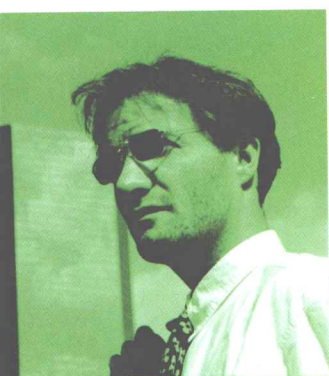


无线通信督导工程师培训教程(之二)

——微波通信与时分多址 移动通信系统

魏楚千 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TN925/33

2008

无线通信督导工程师 培训教程(之二)

——微波通信与时分多址
移动通信系统

魏楚千 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

《无线通信督导工程师培训教程》是为无线通信初学者而编写的一套书籍,本册书是第二册,主要包括3部分内容。在“数字微波通信”篇,详细介绍了微波天线,微波传播技术,微波设备构成及技术指标,给出微波路由设计实例。在“移动通信电波传播”篇,详细介绍了幂定律传播机制,阴影衰落,详细解释了3种快衰落的物理概念。在“GSM及GPRS移动通信系统”篇,详细介绍了GSM帧结构,逻辑信道到物理信道的映射,链路预算,容量设计,直放站及塔放的工程应用与计算,GPRS系统接口、编码,逻辑/物理信道及无线块概念。

本教程适合于准备从事无线通信工程督导、售前/售后技术支持、设备销售、产品推介岗位工作的无线通信新入门者。教程假定读者没有系统学习过无线通信知识,从培养一名合格无线通信督导工程师的角度出发设置教程内容。教程注重工程实践,注意实践环节介绍。普及和易于自学是本教程编写时的一个主要考虑。

图书在版编目(CIP)数据

微波通信与时分多址移动通信系统/魏楚千编著. —北京:国防工业出版社, 2008. 1
无线通信督导工程师培训教程(之二)
ISBN 978-7-118-05389-0

I. 微... II. 魏... III. ①微波通信-技术培训-教材
②时分多址-移动通信-技术培训-教材 IV.
TN925 TN929.532

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 156353 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 382 千字

2008年1月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 68428422

发行邮购:(010) 68414474

发行传真:(010) 68411535

发行业务:(010) 68472764



无线通信督导工程师岗位是无线通信行业中的一个重要岗位。各种无线通信设备的安装、调试都是在督导工程师的努力下逐一到位的。如果范围扩大一点,根据通信公司不同规模,公司对无线通信督导工程师工作职能的要求可能包括:公司产品推介、售前技术支持、产品销售、客户需求方案设计、现场设备安装和调测、售后技术支持。

根据本人从事无线通信工作的经历,感觉无线通信督导工程师岗位需要掌握以下通信基础知识和无线通信专业知识(如不考虑卫星通信)。

通信基础知识包括:信号与系统概念,傅里叶频谱分析,信号功率谱;概率论基础,随机信号分析基础;检错/纠错编码基础;数字信号的基带和频带传输;通信网络,有线通信基础。

无线通信专业知识包括:天线基本概念;无线通信电波传播;微波通信技术;移动通信基础;几种主要移动通信系统技术;无线局域(城域)网技术;其他地面固定无线通信系统技术;无线通信新技术。

无线通信涵盖很宽的专业领域,对督导工程师岗位的知识 and 技能要求只是其中很小的一部分。然而,如果不掌握这些必要的知识和技能,要成为一名合格的无线通信督导工程师是困难的。

根据以上认识,结合自己对无线通信督导工程师岗位的理解和多年来在公司从事培训工作的体会,本人编写了《无线通信督导工程师培训教程》。

在工作中经常看到,许多走上无线通信督导工程师岗位的年轻技术人员,大学所学并非通信专业,在从事无线通信督导工程师工作后,由于职业要求奔走于城市之间,无暇系统学习无线通信专业技术知识。然而,缺乏对无线通信基础知识的较系统学习,在工作中往往专业文献和技术资料看不进去,在技术书籍阅读中遭遇大量拦路虎,难以从技术本质层面深刻理解本公司及竞争对手产品技术上的差异,以及各自的优缺点。学习新技术、理解新概念往往费时颇多却效果不好。

还有不少通信专业毕业的督导工程师,由于日常工作繁忙,基础及专业知识遗忘、荒疏严重,在工作中遇到不少困难。

在无线通信领域,技术发展迅速,知识更新周期快,在工作中需要不断自学,而打下一个基本的专业知识基础才能顺利地完自学。

编写本教程的初衷是希望能为刚走上无线通信督导工程师岗位的年轻工程师提供一

本程度不深、知识相对比较全面、突出基本概念、偏重物理概念和工程实践的岗位培训教程。

本教程具有以下特点:

- 阅读本教程不需要较高的理工科知识基础,有高中阶段的数学/物理知识,以及数学分析、线性代数、概率论(教程内有简介)知识便可顺利完成各篇、章的阅读。

- 对于无线通信专业的介绍不是面面俱到,但已介绍内容尽量完整;突出物理概念,精简数学推导;重要概念不同篇、章多次从不同侧面介绍。

- 本教程各章节安排了许多有助于自学者理解章节疑难内容的“提示”,希望通过此“提示”,在疑难问题冒出来的“现场”给初学者以帮助,帮助读者自学完成本教程。例如,采用“提示”方式,详细介绍了噪声系数的概念及计算;详细介绍了归一化信噪比(E_b/N_0)的概念及应用;详细介绍了接收机热噪声的概念及计算。

- 本教程内容安排力求从满足无线通信督导工程师岗位的工作要求出发,涵盖上述列举内容。

- 本教程力求在不超过3个月(集中培训)的时间内,使学习者较全面地掌握无线通信督导工程师岗位所要求的基本专业知识和技能。

- 本教程吸取了许多优秀通信教育家的经典思想和通俗易懂的讲解方法,并结合无线通信督导工程师岗位要求作了细化、归纳和拓展。

- 本教程立足于作为无线通信督导工程师培训的普及教程,希望能够成为督导工程师进一步自学和深造的铺路石。

- 对于学习非通信专业、希望毕业之后从事无线通信相关专业工作的在校生,通过本教程的学习,可以较快地掌握无线通信的基本知识和技能。

- 在本教程相关册的附录中,有针对性地收录了关于防雷及接地技术介绍,关于微波天线、电缆避雷器、射频电缆、射频连接器的指标,关于分贝各种表述的介绍,关于分贝与功率、电压的转换表,爱尔兰B表,关于复数计算等内容,以方便阅读者使用。

本教程共4册,本书为第二册。

第一篇由“微波天线”、“数字微波通信设备”、“微波传播技术”和“微波通信工程设计指标体系及路由设计举例”共4章组成。本篇的重点在后2章,在这2章中详细介绍了基于菲涅耳椭圆球面的微波信号传输,介绍了菲涅耳半径,反射波与直射波的行程差,余隙,反射衰落因子与相对余隙的关系式,绕射公式,地球凸起高度,等效地球半径系数 K ,微波通信中的平衰落分析,微波通信中的多径衰落特点;介绍了假设参考数字信道概念和数字微波通道误码性能指标,详细解释了噪声系数,门限电平,归一化信噪比,各种收信电平的概念。最后举例介绍了微波通信无线路由设计。

第二篇由“移动通信电波传播”1章组成。主要介绍幂定律传播机制的物理概念,对数正态分布与阴影衰落分析,瑞利分布与莱斯分布,多普勒频移的物理概念,3种快衰落的含义及物理概念,介绍了用于蜂窝移动通信室外宏小区、微小区及室内信号传播的传播模型。

第三篇由“GSM移动通信系统组成”、“GSM系统无线接口技术”、“GSM系统通信流

程”“GSM 系统网络规划与优化”和“GPRS 技术”共 5 章组成。前 3 章介绍了 GSM 系统,包括系统结构、接口协议、区域构成、编号计划,GSM 帧结构,逻辑信道到物理信道的映射,GSM 中的交织,帧偏移与时间提前量,主叫流程等;第 9 章详细介绍了 TDMA 移动通信系统的链路预算特点和容量设计,详细介绍了直放站及塔放在 GSM 系统中的应用及有关工程计算,介绍了噪声系数,热噪声功率谱密度为 -174dBm 的由来,基站输入端固有噪声功率的计算等概念,对于计算过程中功率比与分贝的使用举例作了说明。最后一章介绍 GPRS,重点在新增逻辑信道,无线块,逻辑信道到物理信道的映射,临时块流,GPRS 的 4 种信道编码方案,PDP 上下文激活,MM 上下文激活,GPRS 移动台移动管理状态以及 GPRS 中的通信流程等。

在本书编写过程中参阅了许多优秀通信教育家的著作,在此,对这些文献的作者以及出版这些文献的出版社表示衷心感谢。

由于个人能力有限,所编写的《无线通信督导工程师培训教程》很可能存在不足与谬误,希望得到专家和读者的批评指正。

本人联系方式:weichuqian@sina.com

魏楚千
2007 年 6 月



第一篇 数字微波通信

第1章 微波天线	1
1.1 天线概述	1
1.2 方向性函数和方向图	1
1.3 天线的辐射效率和馈电效率	3
1.4 天线方向性系数 D	3
1.5 天线增益系数 G	4
1.6 dBi 与 dBd	4
1.7 天线极化方式	6
1.8 接收天线有效接收面积 A_e	6
1.9 工作频段	7
1.10 天线反射系数与电压驻波比	7
1.11 天线的寄生耦合(近场隔离度)	7
1.12 抛物面天线	8
1.13 馈线系统及信号收发公用器	9
1.13.1 同轴电缆与波导	9
1.13.2 极化分离器及收发公用器	10
第2章 数字微波通信设备	12
2.1 发信设备的构成及工作原理	12
2.2 发信设备的主要性能及指标	12
2.3 收信设备的构成及工作原理	15
2.4 收信设备的主要性能及指标	16
2.5 SDH 数字微波通信简介	18
第3章 微波传播技术	20
3.1 电波自由空间传播	20
3.1.1 自由空间传播损耗 L_s	21
3.1.2 自由空间传播条件下接收机输入功率电平 P_r	22
3.2 直视传播距离与天线高度	22
3.3 惠更斯—菲涅耳原理	23

3.4	电波传播的菲涅耳区	24
3.4.1	菲涅耳旋转椭球面及菲涅耳区	25
3.4.2	菲涅耳区半径	28
3.5	反射波对收信电平的影响	31
3.6	余隙概念及其在地面反射波分析中的作用	35
3.7	低空大气层大气折射对微波传播的影响	39
3.7.1	大气折射率 n 及折射指数 N	40
3.7.2	折射率梯度	40
3.7.3	等效地球半径系数 K	41
3.7.4	大气折射的分类	42
3.7.5	考虑大气折射后的地球凸起高度及余隙变化	43
3.7.6	工程设计中 K 值的选取	44
3.7.7	考虑大气折射后复杂球形地面电波衰落计算	45
3.7.8	微波链路路径设计用路径剖面图	46
3.8	微波电波传播的信号损失	46
3.8.1	衰落的分类	47
3.8.2	多径衰落	48
3.8.3	平衰落的分析方法	49
3.8.4	频率选择性衰落的分析方法	50
3.8.5	抵御大气效应的衰落储备	52
3.9	微波通信的抗衰落技术	53
3.9.1	抗衰落技术概述	53
3.9.2	空间分集接收概念	54
3.9.3	二重空间分集接收方式简介	54
3.9.4	自适应均衡技术简介	54
第4章	微波通信工程设计指标体系及路由设计举例	56
4.1	假设参考数字通道	56
4.1.1	提出假设参考数字通道的原因	56
4.1.2	假设参考数字通道	56
4.2	微波通信链路传输质量指标	58
4.2.1	误码性能指标含义	58
4.2.2	实际数字微波通道的误码性能指标	59
4.2.3	误码率指标的分配	60
4.2.4	可用性指标	61
4.3	G.821 建议与 G.826 建议	61
4.4	射频波道划分	62
4.5	接收机收信电平计算	63
4.5.1	接收机噪声系数	63
4.5.2	门限电平/门限载(信)噪比	64

4.5.3	微波通信中的归一化信噪比	64
4.5.4	接收机输入门限功率	65
4.5.5	最低收信电平的计算	65
4.6	微波通信路由工程设计	67
4.6.1	微波路由选择概述	67
4.6.2	微波通信无线路由设计举例	69
4.7	微波设备安装与链路调测	74
参考文献		78

第二篇 移动通信电波传播

第5章	移动通信电波传播	79
5.1	移动通信电波传播特点	79
5.2	移动通信电波传播的主要形式	80
5.3	自由空间传播	81
5.4	幂定律传播机制	82
5.4.1	双射线传播模型	82
5.4.2	幂定律传播规律	84
5.5	阴影衰落	85
5.5.1	阴影衰落概念	85
5.5.2	分析移动无线信号衰落的常用概念	86
5.5.3	对数正态分布	87
5.6	移动通信中的多径衰落	89
5.6.1	造成多径传播的散射体	89
5.6.2	多径信号的几个特点	90
5.6.3	移动通信中的多普勒频移	91
5.6.4	快衰落的信号分布(瑞利分布和莱斯分布)	92
5.6.5	快衰落分类	94
5.7	移动通信的电波传播模型	100
5.7.1	室外宏小区传播模型	100
5.7.2	室外微小区传播模型	103
5.7.3	室内传播模型	103
参考文献		104

第三篇 GSM 及 GPRS 移动通信系统

第6章	GSM 移动通信系统组成	105
6.1	GSM 系统概述	105
6.2	GSM 的基本特点和技术特征	106

6.2.1	GSM 的基本特点	106
6.2.2	GSM 的技术特征	106
6.3	GSM 系统结构	107
6.3.1	移动台 (MS)	107
6.3.2	基站子系统 (BSS)	108
6.3.3	网络交换子系统 (NSS)	109
6.3.4	操作支持子系统 (OSS)	111
6.4	GSM 系统接口概述	111
6.5	GSM 系统接口协议	113
6.5.1	GSM 系统分层模型	113
6.5.2	GSM 系统中主要功能实体的作用	114
6.5.3	GSM 系统主要接口的下三层协议结构	115
6.5.4	7 号信令在 GSM 系统中的应用	116
6.6	GSM 系统移动区域组成	117
6.6.1	小区 (CELL)	117
6.6.2	基站覆盖区	117
6.6.3	位置区 (LA)	117
6.6.4	MSC 覆盖区	118
6.6.5	PLMN 覆盖区	118
6.6.6	GSM 服务区	118
6.7	GSM 网络编号计划	118
第 7 章	GSM 系统无线接口技术	121
7.1	GSM 采用 FDMA 和 TDMA 相结合的多址方式	121
7.2	GSM 帧结构	121
7.3	突发序列	123
7.4	GSM 系统信道结构	124
7.4.1	物理信道	124
7.4.2	逻辑信道	125
7.4.3	逻辑信道到物理信道的映射	127
7.5	无线信号形成	131
7.5.1	信道编码	131
7.5.2	GSM 系统中的交织	132
7.5.3	加密	133
7.5.4	突发脉冲格式化	133
7.6	无线接口的其他技术	133
7.6.1	TDMA 帧偏移和时间提前量 (TA)	133
7.6.2	非连续发射 (DTX)	134
7.6.3	非连续接收 (DRX)	135
7.6.4	功率控制	135

7.6.5 跳频通信技术简介	136
第8章 GSM系统通信流程	138
8.1 网络选择	138
8.1.1 网络选择的目的是	138
8.1.2 网络选择的过程	139
8.2 小区选择	139
8.2.1 小区选择的条件	139
8.2.2 小区选择的具体流程	140
8.2.3 小区接入控制	140
8.3 小区重选	141
8.4 位置更新	141
8.4.1 正常位置更新	142
8.4.2 IMSI 分离与附着	142
8.4.3 周期性位置更新	143
8.5 随机接入	143
8.6 鉴权与加密	144
8.6.1 鉴权	144
8.6.2 加密	145
8.6.3 TMSI 的使用	146
8.7 移动用户主叫	146
8.7.1 移动用户主叫信令接续流程	146
8.8 移动用户被叫简介	150
8.9 切换	150
8.9.1 切换的原因	150
8.9.2 GSM 的移动台辅助切换及移动台相邻小区测量	150
8.9.3 切换分类	151
8.9.4 不同 MSC/VLR 间的切换	152
8.10 漫游简介	153
第9章 GSM系统网络规划与优化	154
9.1 GSM系统网络规划概述	154
9.1.1 概述	154
9.1.2 优秀移动网络的标准	154
9.2 蜂窝通信的概念	155
9.3 小区分类	157
9.4 频率复用方式	158
9.5 小区规划	158
9.5.1 覆盖规划	158
9.5.2 链路预算	160
9.5.3 容量规划	164

9.6	GSM 网络优化概述	165
9.7	GSM 直放站	166
9.7.1	无线直放站工作原理	166
9.7.2	直放站分类	167
9.7.3	直放站的主要技术指标	167
9.7.4	直放站的适用场合	170
9.7.5	直放站的应用	171
9.7.6	直放站工程设计简介	173
9.8	塔顶放大器	174
9.8.1	塔顶放大器工作原理	174
9.8.2	塔顶放大器的作用	175
9.9	GSM 网络室内覆盖简介	179
9.9.1	室内覆盖分布系统	179
9.9.2	室内覆盖系统的实施	180
9.10	现场测试与网络性能统计分析	181
9.10.1	现场测试	181
9.10.2	网络性能统计分析简介	182
第 10 章	GPRS 技术	183
10.1	GPRS 简介	183
10.2	GPRS 系统结构	184
10.2.1	从 GSM 升级到 GPRS 需要增加或升级的硬件和软件	184
10.2.2	GPRS 网络接口	185
10.2.3	GPRS 协议栈	186
10.2.4	传输平面其他接口和协议及信令平面接口和协议简介	192
10.2.5	举例说明用户数据通过传输平面各层协议及接口的过程	194
10.3	GPRS 新增编号内容	195
10.4	GPRS 使用的一些重要概念	197
10.5	GPRS 空中接口	199
10.5.1	GPRS 新增加的逻辑信道	199
10.5.2	GPRS 物理信道、无线块及帧结构	201
10.5.3	GPRS 信道编码	203
10.6	GPRS 移动台移动管理状态	205
10.7	GPRS 的附着与去附着	207
10.8	GPRS 小区选择与重选	208
10.8.1	小区选择	208
10.8.2	小区重选	209
10.9	GPRS 位置更新	209
10.9.1	小区更新	209
10.9.2	路由区更新	210

10.9.3 周期性路由区更新	211
10.10 GPRS 会话管理	212
10.11 GPRS 数据传输中临时块流(TBF)的建立过程	213
10.12 GPRS 系统的 QoS	213
10.12.1 优先级别	214
10.12.2 延迟级别	214
10.12.3 可靠性级别	214
10.12.4 吞吐量级别	215
参考文献	216
附录 1 微波抛物面天线(卡塞格伦)技术指标	217
附录 2 射频同轴电缆技术指标	218
附录 3 射频连接器技术指标	220
附录 4 微波通信的防雷和接地简介	222
附录 5 分贝定义及不同场合下使用分贝	230
附录 6 功率与分贝速查简表	233
附录 7 已知分贝值查电压比/功率比值	235
附录 8 已知电压比/功率比值查分贝值	240
附录 9 利用爱尔兰 B 公式估算话音用户数及系统基站数	245
附录 10 爱尔兰 B 表	247
附录 11 英文缩写词解释	250
参考文献	258

第一篇 数字微波通信

第1章 微波天线

1.1 天线概述

在无线通信系统中,无线电波的辐射和接收都必须依靠天线完成,天线是无线通信不可缺少的设备。

发射天线是将来自发射机的高频电流能量变换成电磁波的能量,并将电磁波辐射到空中预定方向的装置;接收天线则是将由预定方向传来的电磁波能量变换成高频电流能量并传送给接收机的装置。发射天线与接收天线的作用是一个可逆的过程,因此同一副天线既可用作发射天线也可用作接收天线。

天线的种类多种多样,微波中继通信(点对点)中使用的天线主要是面式抛物面天线和其改进型——卡塞格伦天线,本章主要介绍这两种天线。

技术性能优异的天线可以用最小的电能在指定方向上产生足够的电磁能量,同时又可将它在其他不必要方向的辐射抑制到最小。天线的技术性能一般用一系列特性参数来描述。考虑到本教程立足于工程应用,在本节将从微波通信工程需要的角度介绍天线特性参数,这些参数是:方向性函数和方向图、天线的辐射效率和馈电效率、方向性系数、增益系数、极化方式、接收天线有效接收面积、天线反射系数与电压驻波比、天线工作频段、天线近场隔离度。

应该指出的是,虽然本章围绕微波通信介绍天线,但是本章所介绍的许多内容同样适用于移动通信等其他工作在微波频段的无线通信系统。

1.2 方向性函数和方向图

天线的方向性函数是描述天线的辐射特性在空间的相对分布情况的数学表达式,方向图则是其相应的图解表示。在绝大多数情况下,天线的辐射特性根据它的远场区确定,并用极坐标或直角坐标图形表示。

提示

天线远场区确定

满足下述两式的区域被视为天线的远场区：(1) 对于高方向性天线， $d \geq 2D^2/\lambda$ ；(2) 对于低方向性天线， $d \geq \lambda/2\pi$ 。其中： D 为天线最大尺寸； λ 为无线信号的波长； d 为(发射)天线到测量场点的距离。对工作在 900MHz 的高方向性天线(假设天线最大尺寸为 1m)，因 $\lambda = 0.33\text{m}$ ，所以 $d \geq 6\text{m}$ 。对工作在 2000MHz 的高方向性天线(假设天线最大尺寸为 1m)，因 $\lambda = 0.15\text{m}$ ，所以 $d \geq 13.3\text{m}$ 。在远场区的电磁场称为电磁波的辐射场。

场强振幅的方向性函数表示以天线为中心，在某一恒定半径的球面(处于远场区)上辐射场强的相对分布情况。场强振幅的归一化方向性函数 $F(\theta, \varphi)$ 一般表示为

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{|E_{\max}|} \quad (1-1)$$

式中： $E(\theta, \varphi)$ 为天线在任意方向上的辐射(以发射天线为例)场强； $E_{\max}$ 为天线在其最大辐射方向上的辐射场强； θ 为仰俯角； φ 为方位角。

广义来说，天线的辐射作用分布于整个空间，因而天线的方向图是一个三维空间的分布图。对于地面微波通信，常常采用在两个特殊平面上的方向图来代替三维空间分布图。这两个特殊平面方向图是：水平方向图，是指仰俯角(电波射线与地面的夹角)为某常数时，场强随水平方位角变化的图形；垂直方向图，是指水平方位角为某常数时，场强随仰俯角变化的图形。图 1-1 给出了极坐标形式的天线垂直方向图示例。

对于方向性天线(抛物面天线和卡塞格伦天线都是方向性天线)，如图 1-1 所示，其方向图可能包含有多个波瓣，分别被称为主瓣、副瓣和后瓣。由图 1-1 可知，主瓣就是最大辐射方向波瓣。除主瓣外，其他波瓣都称为副瓣。主瓣集中了天线辐射功率的主要部分，主瓣宽度决定天线方向性强弱。主瓣最大辐射方向两侧，场强为最大场强的 0.707 倍(即功率密度为最大方向上功率密度的 1/2)的两点之间的夹角称为半功率点波瓣宽度，用 $2\theta_{0.5}$ 表示；主瓣最大方向两侧，两个第一零辐射方向之间的夹角称为零波瓣宽度，用 $2\theta_0$ 表示。

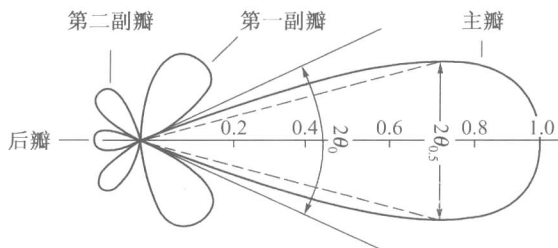


图 1-1 极坐标形式天线方向图

副瓣代表天线在不需要的方向上的辐射或接收。一般来说，希望它们越小越好。通常把副瓣方向上的功率密度与主瓣最大辐射方向上的功率密度之比的对数称为副瓣电

平,表示为

$$\text{副瓣电平} = 10\lg(\text{副瓣最大功率密度} / \text{主瓣最大功率密度}) \quad (\text{dB})$$

正常情况下,副瓣功率密度总是小于主瓣,所以副瓣功率电平的对数值总是负数。

1.3 天线的辐射效率和馈电效率

1. 辐射效率 η_1

从发射机馈送到天线上的功率 P_{in} 并不是全部都转化为辐射功率,有一部分将损耗于其他方面。对于发射天线来说,功率损耗包括天线导体中的热损耗、介质材料损耗、天线近旁物体的吸收损耗以及泄漏和遮挡损耗等。设辐射功率为 P_{T} , 损耗功率为 P_{L} , $P_{\text{in}} = P_{\text{T}} + P_{\text{L}}$, 则天线的辐射效率 η_1 为辐射功率 P_{T} 与输入功率 P_{in} 之比,即

$$\eta_1 = P_{\text{T}} / P_{\text{in}} \quad (1-2)$$

工作在不同频率的天线的辐射效率差异很大,长、中波天线的效率低于 10%,超短波、微波天线的辐射效率可达 100%。

2. 馈电效率 η_2

如果天线的输入阻抗与馈线的特性阻抗不匹配,馈电点处将出现能量的反射,引起附加的反射损耗。由此引起的馈电效率 η_2 为

$$\eta_2 = 1 - \left| \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \right|^2 \quad (1-3)$$

式中: ρ 为天线输入端处的驻波系数。 $\rho = Z_{\text{A}} / Z_0$, Z_{A} 为(发射)天线的输入阻抗; Z_0 为馈线的特性阻抗(一般为 50Ω)。

3. 天线的总效率 η

天线的总效率为

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 \quad (1-4)$$

1.4 天线方向性系数 D

天线的方向性可以用方向性函数或方向图来表示。但是,为了定量表示天线的方向性或比较不同天线的方向性,一般要借助于方向性系数或 1.5 节将要介绍的增益系数。为了定义天线的方向性系数,通常引入一个假想的无方向性天线,即在空间各个方向上具有均匀辐射的天线作为标准。

设被研究的天线和作为参考的无方向性天线的辐射功率分别为 P_{T} 和 P_{T0} , 则被研究天线的方向性系数 D 定义为:当辐射功率 $P_{\text{T}} = P_{\text{T0}}$ 时,被研究天线在它最大辐射方向上产生的辐射功率密度 S_{max} (又称能流密度)与无方向性天线在该处产生的功率密度 S_0 之比,功率密度单位为 W/m^2 ,即

$$D = D_{\max} = \frac{S_{\max}}{S_0} \bigg|_{P_T = P_{T0}} \quad (1-5)$$

简单的线式天线的方向性系数小于10,短波强定向天线的方向性系数可达几百,大口微波抛物面天线的方向性系数可达几千、几万或更高。实践中常常使用对数形式的方向性系数 $D_{\text{dB}} = 10\lg D$ 。

1.5 天线增益系数 G

增益系数是表征天线性能的又一重要参数。在形式上,增益系数 G 与方向性系数 D 十分相似,有时甚至完全相同。但是,方向性系数仅是天线方向性的度量,而增益系数则同时描述天线的方向特性和效率。与方向性系数相同,在讲到增益系数时通常指最大辐射方向上的数值。

增益系数 G 定义为:当以相同的输入功率送入被研究天线和作为参考标准的无方向性天线时,被研究天线在其最大辐射方向上产生的场强振幅的平方值与无方向性天线在该点产生的场强振幅的平方值的比值,即

$$G = G_{\max} = \frac{|E_{\max}|^2}{|E_0|^2} \bigg|_{P_{\text{in}} = P_{\text{in0}}} \quad (1-6)$$

式中: P_{in} 为输入被研究天线的功率; P_{in0} 为输入无方向性天线的功率。

增益系数 G 的另一个定义更为常用,它与方向性系数 D 直接联系在一起,该定义为:当接收点(在被研究天线最大辐射方向上的点)场强相同时,被研究天线所需要的输入功率与无方向性天线所需要的输入功率之比,即

$$G = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in0}}} \bigg|_{\text{(接收点场强相同)}} \quad (1-7)$$

增益系数的表达式与方向性系数相似,它们的差别在于:一个用输入功率 P_{in} 计算,另一个用辐射功率 P_{T} 计算。因为 $P_{\text{T}} = \eta_1 P_{\text{in}}$, 其中 η_1 为天线的辐射效率,而作为参考标准的无方向性天线的辐射效率等于1(损耗项 $P_{\text{L}} = 0$), 于是,由式(1-5)可得

$$G = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in0}}} = \frac{P_{\text{T}} \times \eta_1}{P_{\text{T0}}} = \eta_1 D \quad (1-8)$$

或

$$G_{\text{dB}} = 10\lg G$$

应当指出,天线是无源器件,它本身并不能放大功率,天线的增益只是反映天线在特定方向上汇聚辐射功率的能力。

1.6 dBi 与 dBd

附带介绍一下 dBi 与 dBd 的区别。