

电子工程技术丛书

移动通信系统中的天线

● 刘 英 龚书喜 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书
国家科技重大专项资助出版

移动通信系统中的天线

Antennas for Mobile Communication Systems

刘 英 龚书喜 编著

编者（按姓氏笔画顺序）：

卜安涛 李 龙 孙长果 张 玉

陈胜兵 赵勋旺 黄丘林

审稿（按姓氏笔画顺序）：

李乐伟 傅德民 焦永昌

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

序 言

这是一本涉及移动通信系统中各种天线设计及其应用的专业著作。移动通信是电子领域目前最活跃、最富有前途的领域之一。天线在移动通信中起到举足轻重的作用，直接关系到通信系统的质量。国内专门阐述移动通信系统中天线及其应用的著作并不多见。本书覆盖了移动通信系统中天线的相关内容，有移动通信系统介绍、移动通信中天线基本设计原理等背景内容；有天线计算技术，包括天线数值计算与电磁优化设计等；还分别给出了多种应用领域中的天线应用实例，包括基站天线、智能天线、移动终端天线、超宽带天线、用于天线设计的电磁新材料和射频识别天线等相关内容。书中内容汇集了国内工作在一线的研究人员的一些研究成果，在该领域非常有特色并具有一定的创新性。书中研究成果饱含了作者及参与编著本书研究人员的辛勤劳动和汗水。特撰此书，作者及参编人员期待与大家更好地交流，并与广大学者、工程应用人员和研究生共飨，以进一步促进该领域更快、更好、更繁荣地发展。



新加坡
2010-9-10

前 言

随着全球电子技术的发展,移动通信无疑是与人们的生活关系最密切的领域之一,而只要有无线传输的地方,必然有天线的存在。天线技术是移动通信系统中最关键、最有发展前途的方向之一,移动通信在世界范围内也已成为天线发展的主要动力,随着各种新兴技术的发展,通信天线也在不断地创新与应用。

本书由一批工作在第一线的人员来完成编写工作,在名气上,他们也许并不为外界所知,但他们在各个研究方向上积累了比较丰富的工作经验并具有较高的学术造诣,本书中的内容体现了他们多年的研究成果,也借此书来与业界进行交流。

本书内容包括移动通信系统中天线的相关知识,重点阐述各种应用领域的天线技术。全书共分12章:1.移动通信中天线综述,介绍移动通信中的各种天线及其研究进展;2.移动通信天线的基础知识,介绍天线设计中相关的基本概念和基础理论;3.天线仿真计算,介绍电磁场数值计算中的最新数值计算方法及其并行计算等;4.粒子群优化算法及其应用,介绍电磁领域的优化算法及其在天线设计中的应用实例;5.基站天线,介绍移动通信系统中基站天线的设计及其应用;6.移动通信系统中的多天线技术,介绍多天线技术的相关背景与在无线通信系统中的应用;7. TD-SCDMA 系统中的智能天线,介绍智能天线相关技术及其性能评估等;8.移动终端天线,介绍移动终端天线的设计;9.超宽带天线,介绍超宽带天线及其陷波特性和隐身特性;10.可穿戴天线,介绍织物天线及其他可穿戴天线的应用;11. EBG 结构特性研究,介绍电磁材料的发展及其在天线设计中的应用;12.射频识别天线,介绍射频识别系统和应用到的天线。

本书内容集中了作者和广大撰稿人近年来在天线方面的研究成果,内容新颖,理论与工程应用相结合,对于电磁场与微波技术等学科领域的科研人员、高校教师和研究生等,都有较高的参考价值。

本书由刘英教授、龚书喜教授负责编著,第1章与第2章由刘英教授、龚书喜教授撰写,第3章由赵勋旺博士、张玉博士撰写,第4章由陈胜兵博士、焦永昌教授撰写,第5章由卜安涛博士、陈胜兵博士撰写,第6章与第7章由孙长果博士撰写,第8章至第10章由刘英教授撰写,第11章由李龙教授撰写,第12章由黄丘林博士撰写,参与本书编写的还有姜文博士生和洪涛博士生等。

本书承蒙新加坡国立大学李乐伟教授,西安电子科技大学傅德民教授、焦永昌教授审阅,并提出了不少宝贵的修改意见,在此一并致谢。

本书的出版得到了“新一代宽带无线移动通信网”科技重大专项“高效节能的有源一体化天线”课题的资助。

本书编辑、出版工作繁重,电子工业出版社的有关领导和工作人员付出了大量的心血,特此一并致谢。

由于作者水平有限,书中错误难免,对于所引用的文献,书中都给出了标注,但难免有疏漏之处,恳请读者不吝指教,以不断完善本书。

编者

2010年11月于西安电子科技大学

编著者介绍:

刘英



1977 年生, 河南省周口市人。分别于 1998 年、2001 年和 2004 年在西安电子科技大学获得学士、硕士和博士学位。2004 年毕业后留校任教, 2006—2007 年在韩国汉阳大学从事博士后工作。2007 年被评为副教授, 2010 年被破格评为教授, 目前为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业教授、博士生导师。主持国家自然科学基金项目与国家科技重大专项项目各 1 项, 主持总装预研一般基金项目 1 项, 总装预研实验室基金项目 1 项, 主持横向项目多项。联合编著《天线雷达截面预估与减缩》专著 1 部, 在国内外发表论文 40 余篇, 申请国家发明专利 3 项。中国电子学会 (CIE) 高级会员, IEEE 会员。研究方向为电磁散射与隐身技术、天线理论与设计。

龚书喜



1957 年生, 河北霸州人, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所所长、天线与微波技术国防科技重点实验室西安分部主任。中国电子学会天线分会副主任委员。多年从事 RCS 研究工作, 主持“九五”、“十五”、“十一五”等多项总装国防预研项目, 多个项目获得陕西省和信息产业部等相关奖项。发表论文百余篇, 发表学术专著 2 部。

编者介绍 (按姓氏笔画顺序):

卜安涛

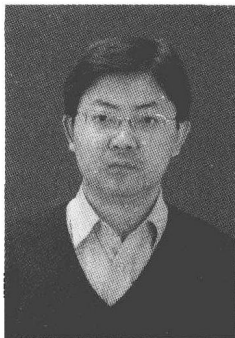


1976 年生, 陕西渭南人, 分别于 1998 年、2001 年和 2005 年在西安电子科技大学获得学士、硕士和博士学位。毕业后在西安海天线科技股份有限公司任天线研发部总经理, 是国内智能天线技术较早的研发人之一。2009 年起工作于江苏捷士通科技股份有限公司, 任公司副总裁和总工程师。中国电子学会天线分会委员, 在国内外发表论文 10 余篇, 拥有专利 10 余项, 主要研究方向为智能天线、基站天线和移动终端天线等。

李龙



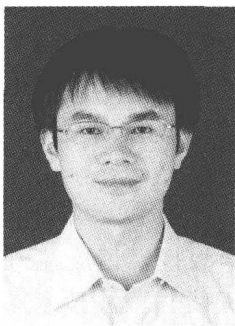
1977 年生, 贵州人, 分别于 1998 年和 2005 年在西安电子科技大学获得学士和博士学位。2005 年毕业后留校任教, 2006 年 3 至 11 月, 任中国香港城市大学高级研究员, 2006 年 12 月至 2008 年 12 月, 任日本东北大学 JSPS 研究员。2010 年破格晋升为教授, 目前为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业教授、硕士生导师。主持国家自然科学基金等科研项目 3 项。2006 年荣获日本 JSPS 奖学金, 其博士论文荣获 2007 年全国百篇优秀博士论文提名奖、2008 年国际会议 ISAP 最佳论文奖, 2009 年获教育部“新世纪优秀人才支持计划”, 已在国内外权威刊物上发表学术论文 40 余篇。中国电子学会 (CIE) 高级会员, IEEE 和 IEICE 会员。主要研究方向为电磁新材料、计算电磁学和电磁兼容研究。



孙长果

1974 年生, 吉林农安人。分别于 1998 年和 2006 年在西安电子科技大学获得学士和博士学位。2002 年加入大唐移动通信设备有限公司, 目前为电信科学技术研究院硕士生导师、系统与标准部总经理助理兼信号处理研究室经理。作为课题负责人、联合负责人分别主持国家科技重大专项项目各 1 项。发表论文 10 余篇, 申请专利 50 余项。主要研究方向为移动通信信号处理、多天线技术、信道特性与建模等。

张玉



1978 年生, 安徽淮北人, 西安电子科技大学副教授。分别于 1999 年和 2004 年在西安电子科技大学获得学士和博士学位。2006 年 5 月至 2009 年 5 月, 受美方邀请与资助, 先后任美国 Syracuse University 访问学者、兼职教授。2006 年由西安电子科技大学出版社出版《电磁场并行计算》, 2009 年由 IEEE Press 与 Wiley 联合出版合著《Parallel Solution of Integral Equation-Based EM Problems in the Frequency Domain》, 2010 年由 IEEE Press 与 Wiley 联合出版合著《Time and Frequency Domain Solutions of EM Problems Using Integral Equations and a Hybrid Methodology》。张玉博士曾获中日微波会议最佳论文奖(2003 年), 陕西省优秀博士学位论文奖(2006 年), 美国 Syracuse University EECS 杰出研究成就奖(2009 年), ISAP 2010 国际会议最佳论文奖(2010 年), 上海超级计算中心高性能计算与应用杰出贡献奖(2011 年)。

陈胜兵



1975 年生, 安徽太湖人, 分别于 1998 年和 2006 年在西安电子科技大学获学士和博士学位。2006 年进入索尼爱立信(中国), 主要从事移动终端天线设计。在国内外著名学术期刊及会议上发表论文 10 余篇, 为 IEEE 会员。主要研究方向包括天线理论与工程、电磁兼容、电磁场安全、移动终端天线设计, 以及优化方法等。



赵勋旺

1983 年生, 山西人, 西安电子科技大学讲师。2008 年毕业于西安电子科技大学电磁场与微波技术专业, 获博士学位, 毕业后留校任教。2008 年 12 月至 2009 年 5 月在美国纽约州 Syracuse 大学做访问学者。在国际知名期刊会议上发表多篇学术论文。主要研究方向为电磁快速算法、天线设计、电磁兼容等。

黄丘林



1978 年生, 湖北钟祥人, 分别于 2001 年和 2007 年在西安电子科技大学获得学士和博士学位。2008 年 6 月晋升为副教授, 同年遴选为硕士生指导教师。2009 年 9 月至 2010 年 9 月在法国鲁昂大学/法国国家科研中心(CNRS-UMR 6614 CORIA)实验室从事博士后研究工作。在国内外重要杂志与会议上发表论文 10 余篇, 为 IEEE 会员。主要研究方向为射频识别、多天线技术及毫米波无衍射波束等。

审稿专家介绍（按姓氏笔画顺序）：

李乐伟（Joshua Le-Wei Li）



江苏南京市人，分别于 1984 年、1987 年和 1992 年在徐州师范大学、电波传播研究所和莫那什大学（Monash University，澳大利亚墨尔本市）获得学士、硕士和博士学位。1992 年 6 月至 11 月，作为研究员工作于 La Trobe 大学，并兼职于莫那什大学。1992 年 11 月起，任职于新加坡国立大学，现任国大微波与射频研究中心主任及 CMRF 电磁学讲座教授（从 1998 年起任终身教授）。1998 年入选为美国电磁科学院（The Electromagnetics Academy），现为院士（Fellow of EMA，2007 年）。2004 年 11 月当选为美国电气与电子工程师学会会士（Fellow of IEEE）。

主要研究方向为电磁场理论、计算电磁学、电波传播与散射及天线分析和设计。编著和联合编著 3 本著作：《电磁学中的椭球波函数》（Spheroidal Wave Functions in Electromagnetic Theory）、《不均匀介质中的并矢格林函数》（Dyadic Green's Functions in Inhomogeneous Media）和《复杂介质的电磁理论》（Electromagnetic Theory of Complex Media），完成其他多本书中 48 章的内容，发表 300 多篇被 SCI 引用的国际学术刊物的论文（其中 150 多篇发表在 IEEE 的刊物上）。

傅德民



1941 年生，陕西人，现为西安电子科技大学退休返聘教授、博士生导师，从事电磁场理论教学与科研近 40 年，在天线的近远场测量、RCS 计算及测量、天线工程设计等领域有独到的研究。曾主持重大科研项目 5 项，发表学术论文 50 余篇，撰写专著 1 部，获省部级奖 2 项。

焦永昌



1964 年生，山西人，现为西安电子科技大学教授、博士生导师；中国电子学会高级会员、天线分委员会委员、青年工作委员会委员；陕西省第九届人大代表、陕西省第十届人大代表、常委会委员、教科文卫委员会委员。多年研究高性能天线设计、进化算法及应用。主持国家自然科学基金、国防科技重点实验室基金、“十五”国防预研项目等共计 30 余个纵向和横向科研项目。发表论文 80 余篇，其中 14 篇 SCI 检索，50 余篇 EI 检索。获得国家级、陕西省和电子部等科研获奖项目多项。

目 录

第 1 章 移动通信中天线综述	1
1.1 引言	1
1.2 发展趋势	3
1.3 现代移动天线设计	5
1.4 小结	6
参考文献	6
第 2 章 移动通信天线的基础知识	8
2.1 天线的基本概念	8
2.1.1 平面波	8
2.1.2 极化	8
2.1.3 天线方向图	11
2.1.4 天线方向性系数	12
2.1.5 天线增益	13
2.1.6 天线带宽	15
2.1.7 天线的噪声温度	15
2.1.8 天线的交调	17
2.2 电磁场的基本原理	17
2.2.1 Maxwell 方程组	17
2.2.2 对偶性原理	20
2.2.3 唯一性定理	21
2.2.4 镜像原理	21
2.2.5 惠更斯原理	22
2.2.6 巴俾涅原理	23
2.2.7 基尔霍夫近似	25
2.3 小结	26
参考文献	26
第 3 章 天线仿真计算	27
3.1 引言	27
3.2 高阶矩量法及其并行计算	28
3.2.1 PMCHW 积分方程	28
3.2.2 几何建模	30
3.2.3 高阶基函数	32
3.2.4 检验过程	34
3.2.5 并行高阶矩量法	38

3.2.6 仿真实例	40
3.3 时域有限差分法及其并行计算	47
3.3.1 FDTD 基本方程	47
3.3.2 数值稳定性和色散特性	51
3.3.3 吸收边界条件	52
3.3.4 激励源	55
3.3.5 近远场变换	62
3.3.6 并行时域有限差分法	64
3.3.7 仿真实例	69
3.4 小结	71
参考文献	71
第 4 章 粒子群优化算法及其应用	74
4.1 引言	74
4.2 进化计算概述	74
4.2.1 进化计算的基本结构	74
4.2.2 进化计算的主要特征	75
4.3 粒子群优化算法	75
4.3.1 PSO 算法基本思想	75
4.3.2 标准 PSO 算法	75
4.3.3 标准 PSO 算法流程	76
4.4 粒子群优化算法性能分析	76
4.4.1 无约束优化测试函数	76
4.4.2 PSO 算法参数分析	78
4.4.3 PSO 算法有待改进的几个方面	80
4.5 结合模式搜索的双中心粒子群优化算法	81
4.5.1 双中心策略	81
4.5.2 加权中心的计算	82
4.5.3 终止准则	82
4.5.4 滤除重复计算	82
4.5.5 模式搜索算法	82
4.5.6 结合模式搜索的双中心粒子群优化算法	83
4.6 优化实例	84
4.7 傅里叶级数分布的连续线源最优方向性综合	86
4.7.1 长为 L 的连续线源方向系数的计算	86
4.7.2 优化结果	87
4.8 双频基站天线的波束赋形设计	88
4.8.1 垂直面方向图波束赋形设计要求	88
4.8.2 波束赋形优化设计的目标函数	89
4.8.3 双频基站阵列天线技术方案	89
4.8.4 设计结果	90

4.9 小结	91
参考文献	92
第5章 基站天线	93
5.1 引言	93
5.2 基站天线技术	93
5.3 波束赋形基站天线	98
5.3.1 水平面波束赋形天线	98
5.3.2 垂直面波束赋形天线	102
5.4 波束赋形扇区智能天线	106
5.4.1 广播模式	107
5.4.2 业务模式	109
5.4.3 单元损坏	109
5.5 小结	112
参考文献	112
第6章 移动通信系统中的多天线技术	117
6.1 引言	117
6.2 多天线技术	117
6.2.1 多天线技术	117
6.2.2 多天线技术分类	119
6.2.3 多天线研究内容	119
6.3 空间信道特性	120
6.3.1 方向性信道冲激响应	120
6.3.2 阵列响应矢量	122
6.3.3 相关衰落	123
6.4 空间信道建模	124
6.4.1 子径叠加模型	125
6.4.2 天线模型	127
6.5 智能天线技术的发展	129
6.5.1 智能天线技术发展概述	129
6.5.2 DOA 估计及应用	131
6.5.3 校准	132
6.6 小结	133
参考文献	133
第7章 TD-SCDMA 系统中的智能天线	135
7.1 引言	135
7.2 TD-SCDMA 上行处理	136
7.3 广播波束赋形	137
7.4 TD-SCDMA 下行处理	139
7.4.1 赋形情况下的数据模型	139
7.4.2 波束赋形准则	141

7.4.3 波束赋形算法	143
7.5 性能仿真评估	147
7.5.1 仿真条件及假设	147
7.5.2 智能天线性能仿真	149
7.6 性能测试评估	154
7.7 小结	157
参考文献	157
第 8 章 移动终端天线	158
8.1 终端天线设计	158
8.1.1 单极子天线	158
8.1.2 螺旋天线	159
8.1.3 倒 F 天线	161
8.1.4 微带贴片天线	162
8.1.5 芯片天线	165
8.2 芯片天线	165
8.2.1 天线设计	166
8.2.2 天线性能	167
8.2.3 天线示例 2	169
8.2.4 小结	170
8.3 组合螺旋天线设计	170
8.3.1 天线结构与特性	170
8.3.2 天线测试结果	172
8.4 终端 MIMO 天线	173
8.5 小结	179
参考文献	179
第 9 章 超宽带天线	182
9.1 引言	182
9.1.1 发展与近况	182
9.1.2 超宽带的特点及局限	183
9.2 超宽带天线性能	184
9.2.1 超宽带天线的工作带宽	184
9.2.2 超宽带天线的指标要求	184
9.3 超宽带天线	186
9.3.1 超宽带平板单极子天线	187
9.3.2 印刷单极子天线	187
9.3.3 印刷缝隙全向天线	189
9.3.4 锥削缝隙天线	191
9.4 超宽带陷波天线	194
9.4.1 切槽技术	194
9.4.2 寄生单元	196

9.5 超宽带天线散射	198
9.5.1 引言	198
9.5.2 超宽带天线散射特性	199
9.5.3 超宽带天线 RCS 减缩	200
9.6 超宽带阵列天线	202
9.6.1 引言	202
9.6.2 电流片模型	203
9.6.3 超宽带锥削缝隙阵列	204
9.6.4 天线设计实例	206
9.7 小结	208
参考文献	208
第 10 章 可穿戴天线	211
10.1 引言	211
10.2 可穿戴天线的研究	212
10.2.1 COMWIN 天线	213
10.2.2 UCLA 织物天线	218
10.2.3 可穿戴纽扣天线	220
10.2.4 宽频带可穿戴天线	220
10.2.5 三维机织物微带天线	220
10.3 小结	222
参考文献	222
第 11 章 EBG 结构特性研究	224
11.1 引言	224
11.2 表面波抑制带隙	226
11.3 垂直入射平面波反射相位特性	233
11.4 斜入射平面波反射相位分析	240
11.5 局域谐振腔体单元模型	242
11.6 实验验证	244
11.7 近 EBG 表面的反射相位特性	246
11.8 小结	247
参考文献	248
第 12 章 射频识别天线	250
12.1 引言	250
12.2 射频识别技术简介	250
12.2.1 RFID 基本原理	250
12.2.2 RFID 工作频率	251
12.2.3 RFID 技术标准	252
12.3 低频和低频 RFID 天线	252
12.3.1 低频和低频标签天线	252
12.3.2 低频和低频读写器天线	254

12.4	超高频读写器天线	254
12.5	超高频标签天线与 RFID 芯片的阻抗匹配	255
12.5.1	T-匹配法	255
12.5.2	电感耦合环法	257
12.5.3	嵌套缝隙法	258
12.6	超高频标签天线	259
12.6.1	标签天线的设计要求	259
12.6.2	弯折线天线	259
12.6.3	平面倒 F 天线	261
12.7	小结	262
	参考文献	262
	缩略词	266

第 1 章 移动通信中天线综述

1.1 引言

第一个移动通信系统为 1885 年由 Thomas Edison 发明的火车与站台之间的无线电报业务^[1]，电报信号通过架空线进行传播，架空线与安装在火车车顶上的金属板进行电磁耦合起到信号传递的作用。真正的移动通信业务起始于 1898 年由 Guglielmo Marconi 发明的轮船上的无线电报^[2]，他使用类似 T 形、倒 L 形、扇形等的线天线来实现。真正的移动设备出现于 1910 年^[3]。

第一次世界大战和第二次世界大战的爆发促使了天线设计的发展，天线技术发展日新月异^[4]。线天线于 1920 年更加完善，如今的微波天线在 1950 年也已经很常见了。1960 年，由于半导体集成电路的革命性发展，天线设计进入了一个新的时代。需求促进技术的发展，现有的天线形式不断革新，产生体积更小、重量更轻、成本更低和便于安装的辐射结构，能与新的集成电子设备进行兼容。最突出的就是印刷天线技术，它使天线的功能更多样化^[5]。平面天线起始于印刷天线，已经用于各种需要小型化、低重量天线的移动系统中，如基站和移动终端等。

移动通信产业是当今世界发展最快、最富有活力的领域之一。近二十年来，移动通信经历了第一代的 AMPS、TACS 和 NMT 等系统，第二代 GSM、DCS 和窄带 CDMA 系统，直到目前刚刚商业化的 TD-SCDMA^[6]、WCDMA、CDMA2000 和 WiMax 等第三代系统^[7, 8]。移动通信技术使任何人在任何时间和任何地点都能和外界保持联系，正逐步改变人们的生活方式和思维模式。图 1.1 列出了全球移动系统发展的一些里程碑节点。

近年来，我国的移动通信事业取得了长足的发展，GSM 数字蜂窝移动通信系统从无到有，实现了群体突破，得到了广泛的应用。通信设备产业逐渐形成气候，关键技术研发不断取得进展，少数领域走到了世界前列，特别是拥有自主知识产权的 TD-SCDMA 标准，已经被国际电信联盟组织正式批准为第三代移动通信的主流标准之一，随着移动网络和移动用户数量的迅速发展，面对不断扩大的移动通信市场，中国的移动通信产业面临着前所未有的发展机遇。

天线^[9-14]作为无线通信系统的咽喉要道，是辐射和接收电磁波的系统部件。天线性能的优劣，对移动通信系统的总体性能起着非常重要的作用，一副高性能的天线能放宽系统的要求且改善整个系统的性能。移动通信系统的不断升级换代对天线提出了新的指标要求，小型化、低剖面、宽频带、低成本、坚固耐用且易于与系统集成等成为现代天线设计师需要考虑的主要因素。移动通信已经成为现代天线发展的主要原动力，未经过充分设计的常规天线形式常常不能满足新的系统要求。现代天线设计的核心问题就是使天线满足新系统中更为苛刻的技术要求，满足新的系统要求。

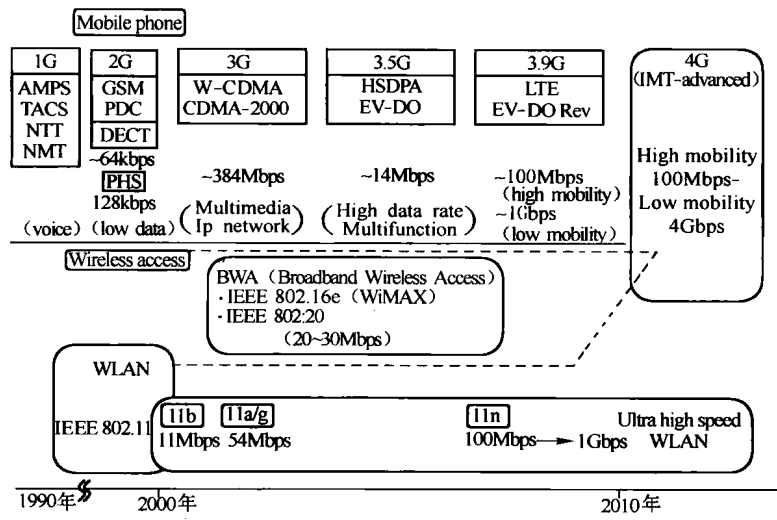


图 1.1 移动通信系统的发展

还有许多其他信息中继系统正在出现，它们与移动通信系统有着许多相似之处。此时，移动系统不仅与通信系统有关，还与控制、遥感、识别等系统有关。这些系统的应用领域一般有较大的客户群，它们需要更新的天线设计思路，表 1.1 列出了一些应用领域及其对天线的需求。

表 1.1 一些应用领域及其对天线的需求

应 用	需 求
动物跟踪	不显眼但坚固的天线用于卫星监控
产品信息与显示说明	用于近场数据传输系统中 IC 和 RF 标签的电小天线
广播接收	专门设计用于 AM、FM 和 TV 接收的天线
交通信息、控制、安全和管理系统	车载或者安装于路边实现短距离通信的天线
安防系统	用于智能卡、门禁、个人识别等的隐形天线
家庭/办公的信息与数据传输系统	短距离通信（数据与语音）与控制系统
电子商务	用于银行、售票和电子商务的手持终端上的小天线
娱乐	用于游戏、影音传输接收等的移动终端上的小天线

- 移动系统的发展对天线提出了更高的要求：
- (1) 天线应作为一个系统，而不是孤立的接收/发射终端；
 - (2) 它要根据电波传播条件设计，要有一定程度的极化或方向图分集控制能力；
 - (3) 能传输高速率数据信号，如智能天线、MIMO 系统和 SDMA 天线等；
 - (4) 天线要适应环境条件，方向图与区域要求相一致，并且允许在天线附近有障碍物存在，而天线的特性也要考虑到这些障碍物的影响；
 - (5) 对于存在于载体上的天线，天线要与车辆或者平台综合考虑；
 - (6) 对于移动终端天线，设计天线时要考虑人手和身体的影响及可能存在的干扰；
 - (7) 要研究新的制作技术，开发新材料和集成电子新技术；
 - (8) 天线要小型化、轻重量、结构集成化；
 - (9) 天线满足电磁兼容（EMC）要求，减少电磁干扰（EMI）与 SAR；

(10) 天线要满足多媒体应用, 提高天线性能, 用于宽带、多频、MIMO 系统;

(11) 天线设计除了考虑其电气特性外, 还要具有用户使用方便、性能可靠等特点, 要有高度的机械可靠性;

(12) 超大规模集成 (VLSI) 技术和微波集成电路 (MIC) 技术有助于生产小型化设备, 为了良好的天线性能, 这些设计需要低损耗高频材料。在操作移动终端时, 人机接口是最重要的问题之一, 其中易于操作和安全是重要的。

1.2 发展趋势

移动通信系统现在正在向 4G 发展, 现代移动通信系统中有五个发展趋势。

- (1) 个性化发展;
- (2) 全球化发展;
- (3) 多媒体服务的增加;
- (4) 多维网络展开;
- (5) 软件实施。

这些发展趋势对天线提出了一定的要求, 图 1.2 给出了现代移动通信系统中这些发展趋势与对天线的要求, 下面具体讨论这些趋势。

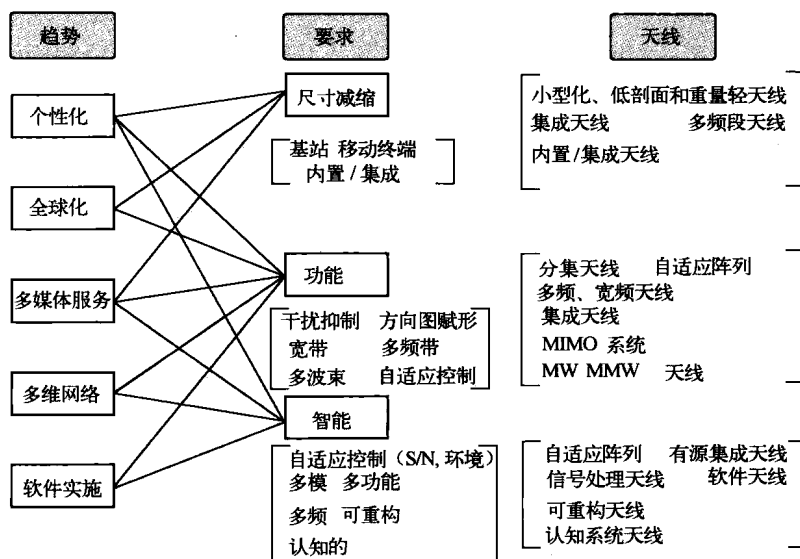


图 1.2 移动通信与天线结构的发展趋势

1. 个性化

在最近的移动终端中, 可以很明显地看到个性化的趋势, 这不仅是由设备尺寸减缩所导致, 还与移动终端功能的提高有关。现代移动电话除了打电话的功能外还配备了个人娱乐功能, 如游戏、电影、TV 广播、音乐等。有些移动电话还有买票、银行付款、GPS 导航、发电子邮件、网络连接等功能。这些移动电话已经不再是传统意义上的电话了, 而是一个复杂的信息终端。

移动终端尺寸的小型化也促进了移动系统个性化的发展, 因为越小的终端越易于携带和

便于操作。移动电话生产厂商曾经一度纷纷竞相减小移动电话的尺寸、重量和体积。尺寸减缩给天线设计者带来非常严重的问题：终端尺寸小了，天线尺寸也小了，而天线特性却不能损失，相反地，还要提高天线功能，实现宽带与多频带工作特性。

移动系统具有在短距离实现控制、识别和信息传输/接收的功能。它也加快了个性化的发展，因为它们通常都是用于服务个人的。典型的系统为 NFC 系统、RFID 系统、超宽带（UWB）系统。这些系统所用天线就是一般小型化、低剖面 and 重量轻的天线，它们是不需要高增益的。相反地，移动宽带系统，如 WMAN 和 WiMAX，除了需要高速率数据信号外，一般使用功能性天线，如自适应阵列和 MIMO 系统等。

2. 全球化

通信系统包括移动系统的全球化与卫星系统的发展相关。卫星系统根据轨道分为：低轨道（LEO）、中轨道（MEO）、同步轨道（GEO）。但是，全球通信服务不仅依靠卫星系统，还依靠有线系统，如网络协议（IP）网络。除此外，还有可以从一个国家漫游到另一个国家，使用同样的网络服务的无线系统。典型的系统为 GSM，其网络分布全球，还有一些 3G 系统，包括 WCDMA 和 CDMA2000。这些系统的移动终端上使用双频/三频天线，一些移动终端上安装五频天线，可以同时 2G 和 3G 网络共存的情况下工作，同时还可以接收 GPS 信号。

3. 多媒体服务

除了前面所述的非语音业务外，数字技术也逐渐提高了传输速率，从每秒 K 字节（Kbps）到了每秒兆字节（Mbps）。日本的 3G 系统开始数据速率为 384Kbps，但在如今的 3.5G 系统中，通过引入高速下行分组接入（HSDPA），已经提高到了最大 14.4Mbps。如今的趋势是在高速移动系统中，数据率达到 100Mbps 级别，低速系统中达到 1Gbps，逐渐从 3.5G 系统过渡到 4G 系统，在 4G 系统中，最高数据率期望达到 4Gbps。

4. 多维网络

移动系统有一个趋势就是集成到其他系统里面，这样就产生了多维服务。典型的例子是通信系统与广播系统的结合：一个是通过通信卫星系统实现的 TV 广播，另一个就是移动终端包括移动电话上的陆地数字 TV 广播。通信系统趋于集成到多维网络里面，包含多信息媒体、多传输媒体和多层网络。信息媒体包含语音与非语音系统，包括数字语音、声音、静止和移动图像和计算机数据，传输媒体包含有线和无线网络、无线电和光纤等。陆地的、海上的、航空的和卫星的系统都将集成到复杂多层网络中，这样就可实现全球的、无论时间与空间的、完全连续的通信。

集成了信号处理、自适应控制和软件功能的智能的天线将是永远的需求。高频的应用，如微波和毫米波，甚至到太赫兹频段也都需要不断探索新型天线形式。

5. 软件实施

提高天线特性和系统特性的方法之一就是软件实施。一个例子就是为了得到天线最佳特性使天线满足环境条件而对天线特性进行的自适应控制，例如，当天线由于临近效应，如人体的影响而特性下降时可自适应控制天线电路。天线电路，如匹配电路可自适应地控制以实现接收终端最大信噪比（S/N）。这种自适应控制对既存在干扰信号又存在期望信号的天线系统工作环境特别有用。在这些系统中，所需的软件通常是简单的。

基于软件的移动系统不久将会出现。一个潜在的系统就是安装在移动终端上的软件，通