

# 智能天线工程

王素玲 编著



西安地图出版社

责任编辑：王兴华

封面设计：马毅卿

ISBN 978-7-80748-451-6



9 787807 484516 >

定价：28.00元

# 智能天线工程

王素玲 编著



西安地图出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

智能天线工程/王素玲编著. —西安:西安地图出版社,  
2009.7

ISBN 978-7-80748-451-6

I. 智… II. 王… III. 人工智能—天线 IV. TN821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 130642 号

## 智能天线工程

王素玲 编著

西安地图出版社出版发行

(西安市友谊东路 334 号 邮政编码:710054)

新华书店经销

中国电子科技集团公司第二十二研究所印刷厂印刷

850 毫米×1168 毫米 1/32 开本 9.25 印张 263 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

印数 0001—1000

ISBN 978-7-80748-451-6

---

定价:28.00 元

# 前 言

近年来，伴随着移动通信和个人无线通信用户数量的急剧增加，人们对通信系统资源利用率的要求越来越高，为了满足日益增长的通信需求，达到更高的数据速率、更广泛的覆盖范围、更大的系统容量，移动通信和无线通信系统正日趋复杂。尽管新的接口技术数据速率可高达每秒几兆比特，但大多建立在理想信道模型的前提之下，其应用受到实际信道的限制。智能天线技术在扩大系统容量、提高系统信干噪比方面具有不可替代的优势，已引起业内的广泛关注，正在成为通信系统的关键技术之一。

智能天线技术是一个跨学科的课题，涉及天线阵、信号处理、数字通信、射频技术以及电波传播等方面的知识和技术。天线智能化实际上就是实现天线工作过程中的空间辐射与接收性能可以随着接收或发射信号的不同进行调节。智能天线系统对接收通道和信号处理部分都有较高的要求，由于受到集成电路运算速度和数据吞吐量等技术方面的限制，早期的智能天线技术发展缓慢。随着信号处理和集成电路技术的快速发展，智能天线在通信中的应用成为可能。

智能天线通常分为自适应智能天线和多波束智能天线两大类。自适应智能天线智能化调节波束极大值方向，使之总是跟踪期望用户方向，并在干扰方向产生零陷达到抑制非期望用户的目的。多波束智能天线按照空间区域方位不同发射不同的多个波束，不同波束的用户可以使用同一个编码而不会相互影响，从而提高通信系统的容量。因而就功能而言，智能天线已经从传统天线单纯的定向、高效地传输能量和信息的传感器型部件转变为集能量和信息的传递，干扰抑制，空间滤波，目标的识别、定位和跟踪等多种功能于一体的综合子系统。

智能天线包含了天线阵列设计和信号处理技术，目前有关该领域的文献很多，但多数发表在期刊杂志上，给工作于该领域的

技术人员的查阅和研究带来一定的不便，本书试图综合智能天线领域的研究成果，填补这一空白。

本书主要内容包括智能天线的基本原理、硬件结构原理和数据处理等智能天线的基本问题。第一章介绍了智能天线基本概念、现状，作为全书的概貌和基础。第二章介绍空间信道模型和抗多径衰落技术。第三章介绍天线辐射原理及其技术指标包括天线的基本概念、参数定义。第四章智能天线阵列信号。第五章介绍数字波束形成（DBF）技术，这一部分是智能天线信号处理部分的核心。这一章在 DBF 原理、三大准则的基础上，介绍了几种典型的盲、非盲算法。第六章天线阵信号波达方向估计。DOA 估计是智能天线系统的另一个重要研究方向，是实现移动通信系统许多功能的关键，自智能天线兴起以来得到了广泛的关注。第七章 Rake 接收机。第八章信道失配及天线互耦校正技术，是智能天线对无线通信系统功能的拓展。第九章则介绍了智能天线的硬件实现和现有一些智能天线系统的原理和框架。

智能天线内容十分广泛，涉及不同学科，本书只是一个简略的介绍。书中部分内容使用了中科院上海微小卫星工程中心的研究成果，在此表示衷心感谢。在本书的写作过程中参考了大量国内外文献，作者同样向这些参考文献的作者致以崇高的敬意。此外，在本书的编写过程中河南理工大学“电机与电器省级重点学科”学科组的全体同仁提出了许多宝贵意见，在此同样表示衷心的感谢。由于水平有限，错误之处在所难免，不足之处，谨请指正。

作者

2009年4月于河南理工大学

# 目 录

第一章 导 言.....	1
1.1 移动通信系统与智能天线技术.....	1
1.2 智能天线技术.....	2
1.3 智能天线的基本组成及工作原理.....	3
第二章 空间信道模型和抗多径衰落技术.....	6
2.1 通信信道.....	6
2.2 空间信道模型.....	7
2.3 无线通信的多径信道模型.....	10
2.4 智能天线的空时信道模型.....	16
2.5 通信信道的容量.....	21
2.6 抗多径衰落技术.....	22
第三章 天线辐射原理及其技术指标.....	31
3.1 天线的电性能参数.....	32
3.2 天线阵列中的几种常用天线.....	39
3.3 天线阵的方向性.....	55
第四章 智能天线阵列信号.....	65
4.1 天线阵波束形成基本原理.....	65
4.2 天线阵信号模型.....	69
4.3 智能天线阵列的阵元配置.....	72
4.4 阵列信号处理的统计模型及其协方差矩阵.....	82
第五章 空间多波束形成.....	84

5.1 多波束天线概述 .....	84
5.2 多波束基本工作原理 .....	91
5.3 窄带数字波束形成算法 .....	92
5.4 天线阵信号的最优化处理 .....	106
5.5 基于多波束天线的自适应调零技术和干扰定位技术 .....	113
5.6 多波束合成覆盖和信号分布 .....	119
5.7 宽带波束形成技术 .....	121
5.8 典型多波束天线发射系统 .....	134
第六章 天线阵信号波达方向估计 .....	136
6.1 DOA 波达方向估计常用算法 .....	136
6.2 传统算法及其仿真实验 .....	138
6.3 MUSIC 算法及其性能分析 .....	145
6.4 ESPRIT 算及其性能分析 .....	156
6.5 一维阵列相干信号波达方向判断 .....	159
6.6 二维 MUSIC 空间谱平滑技术 .....	166
6.7 频域平均法 .....	178
第七章 RAKE 接收机 .....	184
7.1 RAKE 接收机概述 .....	184
7.2 一维 (1-D) RAKE 接收机 .....	187
7.3 空时平滑算法 .....	197
7.4 大延时 2D-RAKE 接收机 .....	204
第八章 信道失配及天线互耦 .....	208
8.1 信道失配 .....	208



8.2 阵元位置误差的理论分析 .....	211
8.3 多通道接收机幅相不一致性校正 .....	221
8.4 多信号幅相一致性校正 .....	224
8.5 天线阵元位置误差的校正方法 .....	227
第九章 智能天线硬件平台和数字处理终端 .....	232
9.1 硬件平台结构简介 .....	232
9.2 多通道接收系统 .....	235
9.3 射频接收通道 .....	242
9.4 模数(A/D)转换器部分 .....	250
9.5 数字波束形成网络 .....	258
参考文献 .....	266

# 第一章 导 言

## 1.1 移动通信系统与智能天线技术

随着移动用户数目的急剧增加及第三代移动通信系统中宽带业务的开展，人们对移动通信容量的需求与日俱增，频率资源匮乏的问题更加突出。美国贝尔实验室提出的蜂窝组网理论利用电磁波在自由空间中的传输损耗使相隔一定距离的不同基站重复使用同一组工作频率在很大程度上克服了信道容量受限的问题，极大地推动了移动通信技术的发展，被誉为移动通信史上的蜂窝革命。

蜂窝移动通信经历了以调频模拟电话信号传输和频分多址FDMA为主要标志的第一代；以窄带数字信号传输和时分多址TDMA以及码分多址CDMA为主要标志的第二代；目前以宽带数字信号传输为主要特征的第三代移动通信系统正在投入使用。

早期移动通信系统以模拟技术为基础，采用频分多址FDMA技术。多路接入时将可用频谱分成若干具有固定带宽的信道，不同用户占用不同的信道与基站进行通信，换句话说，所有用户共享的资源为带宽。显然采用频分多址FDMA技术由于频谱有限，通信的容量受到很大限制。

第二代通信采用时分多址TDMA以及码分多址CDMA技术，TDMA系统按照时隙分配整个资源，即不同的用户采用分时传输技术，其共享资源为时间。全球移动通信系统GSM采用了TDMA技术，其信道宽度为200kHz。另一种基于扩频的多址技术是码分多址技术CDMA，其共享资源是码域。与前两种技术相比CDMA技术独特的干扰处理方式使得它能提供更高的容量。

传统移动通信基站使用的天线大多数为扇区天线，天线覆盖 $120^\circ$ 扇区。不同的扇区可以使用相同的时间资源或频率资源，从而提高了通信容量，但同时带来了同频干扰问题。基站与移动用

户通信时,大量的同频干扰限制了系统容量的增长,尽管可以对蜂窝小区进行裂化或将小区分成若干个扇区来进一步增加系统容量,但是随着小区裂化或小区扇区数的增加,移动台的越区切换会变得越来越频繁,而完成越区切换会消耗较多的信道资源,因此对小区进行裂化或在小区中增加扇区数同样受到一定限制。

消除同信道干扰、多址干扰与多径衰落成为第三代移动通信系统提高无线移动通信系统性能考虑的重要因素。第三代移动通信有三大主流标准,即北美的CDMA2000、欧洲的W-CDMA和中国提出的TD-SCDMA。TD-SCDMA即时分-同步码分多址的缩写,是中国拥有完全知识产权的第三代移动通信国际标准。从目前的技术发展和实现能力看第三代TD-SCDMA标准的移动通信智能单元主要包括:智能天线、智能传输、智能接收、智能业务接入和智能网络管理等技术。

## 1.2 智能天线技术

智能天线技术是提高系统容量和通信质量的有效途径之一。智能天线利用数字信号处理技术,产生空间定向波束,使天线主波束对准用户信号到达方向,旁瓣或零陷对准干扰信号到达方向,达到高效利用移动用户信号、抑制干扰信号的目的。智能天线能够根据所处的电磁环境,自动调节自身参数,提高天线增益,扩展通信容量。其基本思想是提取天线阵信号相位信息,通过数字信号处理得到不同信号空间方位,采用空域滤波来减少共信道干扰,实现在同一信道中发送和接收多信号扩大系统容量。现有的频分多址、时分多址和码分多址,分别是在频域、时域和码域上实现了多址接入,而智能天线则引入了第四维多址——空分多址技术。

智能天线分为两大类:多波束与自适应阵智能天线。多波束天线利用多个并行波束覆盖整个用户区,每个波束指向固定方向,具有一定的波束宽度,随着用户在小区中的移动,基站选择不同的波束使接受信号最强。自适应天线系统采用数字信号处理技术识别用户信号到达方向,根据用户信号的不同空间传播方向提供

不同的空间信道,当用户移动时,波束随之作自适应改变,波束中心始终指向用户方向,确保用户始终处于波束的主最大方向。显然,这种类型的智能天线性能最佳,但这种智能天线结构复杂,对系统实时性要求较高。与自适应天线阵列相比,多波束天线具有结构简单、无须判定用户信号到达方向等优点。

### 1.3 智能天线的基本组成及工作原理

图1.1为典型的智能天线基本原理图。从物理层面看,智能天线系统由天线阵列、多通道接收机、A/D和D/A转换器以及实现智能天线算法的数字信号处理器件(通常为DSP+FPGA构成)组成。天线阵列由 $n$ 个相互独立的天线组成,天线阵列接收信号经过多通道接收机进行放大和变频处理后得到中频模拟信号;再经A/D转化得到 $n$ 组离散的数字信号,波束形成器根据一定的算法和优化准则来调节各个阵元的加权幅度同时调整各路信号的位相关系,动态或定向的产生数字波束。

天线阵列有一维阵列结构和二维结构。一维天线阵列结构通常可以用来判断信号的一维空间方向,如用来判断信号的俯仰角。一维天线阵列算法相对简单,但不能同时确定二维方向角一方位角和俯仰角。二维天线阵列结构有多种排列形式,如圆形排列结构、平面形结构等,天线阵列之间间距通常为半个波长。二维天线阵列不仅可以判断波达方向的俯仰角而且可以判断波达方向的方位角。

目前,受A/D转换器采样速率的限制,不能直接对射频信号进行采样,必须先行对信号进行射频放大和下变频处理,以降低频率达到A/D转换的采样要求。多通道接收机负责完成射频放大和下变频功能。

信息处理是智能天线的核心,根据智能天线类型的不同智能处理部分的功能不同。对于多波束天线系统,信息处理部分主要完成多波束加权以形成固定多波束系统;对于自适应天线系统或测向系统智能天线信息处理部分需要完成波达方向、信源数目、信号频率等参数估计并能根据计算参数自适应的形成动态波束。

动态波束根据用户的位置自动调节波束指向，确保波束主最大方向指向用户信号方向。波束形成的主要目标是根据系统性能指标形成对基带信号的最佳组合与分配，也就是说补偿无线信号传播过程中空间损耗和多径衰落引起的信号失真，同时降低共信道干扰。

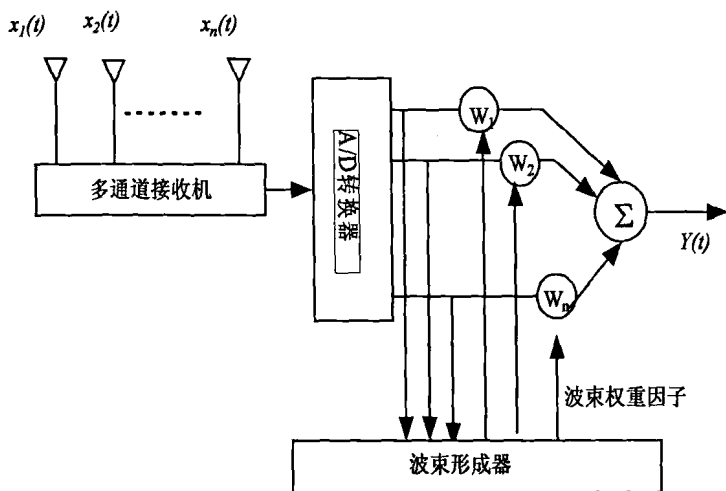


图1.1 典型的智能天线原理图

由于实际信道常常有很多条路径，因此，智能天线阵元数不是足够多时，阵列天线将不能正确区分各信号。此外，若多径角度扩展，或者同道干扰和期望信号未足够分离时，阵列接收信号中的导向矢量矩阵将因接近线性相关而导致病态，并会导致额外的噪声影响。Rake接收机利用多个相关器分别检测多径信号中最强的若干个多径信号，然后再对每个相关器的输出按照一定的准则和方式进行加权求和，可以有效提高输出信噪比，提供优于单路相关器的信号检测。Rake接收机在时域上处理，是对抗多径衰落的一个有效手段，因此在智能天线系统通常需要结合Rake接收技术，充分利用时域处理技术和空域处理技术的联合优势来改善通信质量。

从智能天线的功能和工作原理可知，移动通信系统中采用智能天线可以扩大小区的覆盖范围，降低的功耗，增加系统的容量，降低系统的干扰，减小初装费用。对于CDMA系统而言，可以利用空间的隔离降低对功率控制精度的要求，提高系统的稳定性，更为重要的是智能天线可以提高信道的传输质量。鉴于上述技术优势，智能天线技术已被确定为第三代移动通信系统的关键技术之一。与其他成熟的抗干扰技术相比，智能天线技术在移动通信中的应用研究更显得方兴未艾，显示出巨大潜力。

虽然从理论上讲智能天线可以达到最优，但要实现理想智能天线，许多问题仍有待研究解决。目前已有大量文献报道了智能天线上行信道的一些算法及容量分析，而下行链路的波束形成研究还存在一些瓶颈，这是因为基站在发送前不能观察到下行链路的信道特征，在FDD双工方式，上下行载波的频率差大于相干频带上下行信道，不能用上行信道直接估计下行信道，故智能天线应用于下行链路仍是一个技术难题。

智能天线技术涉及微波辐射理论、信号处理理论、射频电路技术等专业知识，是一门跨学科的综合性较强课题。本书围绕智能天线的有关理论和技术展开讨论，首先介绍天线阵信号的特点，然后讲述智能天线信号处理基本原理和算法，在此基础上进一步讨论多径信号、宽带信号的智能天线处理技术、智能天线射频通道的幅相一致性技术等问题，本书旨在为通信领域的专业技术人员提供必要的参考。

## 第二章 空间信道模型和抗多径衰落技术

### 2.1 通信信道

按照 WCDMA 规范, 信道可以分为三种, 分别是物理信道、传输信道和逻辑信道。物理信道是指用来传送信号或数据的物理通路。网络中两个结点之间的物理通路称为通信链路。物理信道由传输介质及有关设备组成。物理信道可以分为两大类: 一类是电磁波的空间传播渠道, 如短波信道、超短波信道、微波信道、光波信道等, 这一类信道是具有各种传播特性的自由空间, 称为无线信道或空间信道; 另一类是电磁波导引传播渠道, 如明线信道、电缆信道、波导信道、光纤信道等, 这一类信道通过具有传输能力的导引体作为媒介, 称为有线信道。信道的作用是把携有信息的信号从它的输入端传递到输出端, 因此, 它最重要特征参数是信息传递能力。典型的情况下, 信道的信息通过能力与信道频带宽度、工作时间、信道的噪声功率密度等有关, 频带越宽, 工作时间越长, 信号与噪声功率比越大, 则信道的通过能力越强。信道和电路不同, 信道一般都是用来表示向某个方向传送数据的媒体, 一个信道可以看成是电路的逻辑部件, 而一条电路至少包含一条发送信道或一条接收信道。

传输信道对应的是空中接口不同信号的基带处理方式。根据对信道的特性参数的处理方式不同, 构成不同的传输信道。具体地说, 传输信道根据信道编码、交织方式、CRC 冗余校验、块的分段等过程的不同, 定义不同类别的传输信道。

逻辑信道也是一种通路, 但在信号收、发点之间并不存在一条物理上的传输介质, 而是通过在物理信道基础上由结点内部或结点之间建立连接来实现的。通常把逻辑信道称为连接。逻辑信道只是逻辑上的人为定义。逻辑信道发射经过卷积、重复、交织、加长码、功率控制、加 Walsh 码、加短码、QPSK 调制等一系列

过程，逻辑信道接收则经过相应方向的解码。逻辑信道分为两大类，即控制信道和业务信道。业务信道主要是指用于传送用户语音或数据的业务信道，控制信道用于传送信令信息和短的分组数据。

从逻辑信道到传输信道再到物理信道，它们存在着映射关系。传输信道是在对逻辑信道信息进行特定处理后再加上传输格式等指示信息后的数据流，这些数据流仍然包括所有用户的数据。多个逻辑信道可能映射到同一个传输信道上，多个传输信道可能映射到同一个物理信道上，这样在功能协议层中就会有每一层的复用和解复用的功能。

## 2.2 空间信道模型

建立高质量的无线通信系统必须首先了解无线运行环境属性，根据无线运行环境属性建立信道的传播特性。无线运行环境属性中的物理属性实质上是无线电波的传播特性。为了进行个人通信的无线电子系统设计需要确定无线传播特性的下列参量：

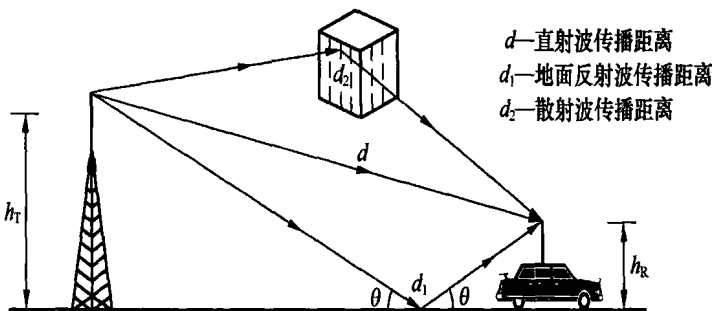


图 2.1 移动通信无线信道示意图

- (1) 最大传播距离；
- (2) 全程路径损耗预测模型；
- (3) 多径时延扩展；
- (4) 慢衰落统计特性；
- (5) 快衰落统计特性；



(6) 最大多普勒频移。

根据无线运行环境属性建立信道—空间建模信道已成为许多理论分析和现场实测的课题，许多文献给出了精确的数学描述及统计模型。然而，由于移动信道的复杂性，无线信号通常需要经过反射、衍射和散射才能到达接收系统，如图 2.1 所示，不可能用单一的数学模型来描述所有的移动环境，预测信道传播特性依然相当困难。现有的无线信道建模方法可以分为两类：一类基于理论计算，即用电磁场理论或统计理论，分析电波在无线环境中的传播特性，并用各种数学模型来描述无线信道。这种方法往往需要提出一些假设条件以简化信道的数学模型，因此这种描述是近似的，与实际的信道特性往往有较大差异。另一类是基于实际测量的信道数据，即在不同的传播环境中，对电波传播做实测实验，测试参数包括接收信号幅度、延时以及其他反映信道特征参数，根据测量数据形成所谓的经验模型或者半经验模型。

瑞利分布是最常见的用于描述平坦衰落信号接收包络，或独立多径分量接受包络统计时变特性的一种分布类型。莱斯分布则为正弦波加窄带高斯过程的包络概率密度函数分布。理论分析和实测试验结果表明，在移动环境中接收信号的幅度在大多数情况下符合瑞利分布。在有些情况，则更符合莱斯分布。由于实际移动环境的复杂性，不能建立单一的信道模型。另外，移动信道特性还受到系统工作频率和移动台运动状况的影响，在相同地区，工作频率不同、移动速率不同时接收信号衰落状况会有很大差异，需要建立不同的模型。

综上所述，无线信道主要具有以下特征：

- (1) 有一对（或多对）输入端，则必然有一对（或多对）输出端；
- (2) 绝大部分信道是线性的，即满足叠加原理，如图 2.2 所示；
- (3) 信号通过信道需要一定的迟延时间；
- (4) 信道对信号有损耗（固定损耗或时变损耗）；
- (5) 即使没有信号输入，在信道的输出端仍可能有一定的功率输出（噪声）。