

现代通信信号处理丛书



鲁棒自适应阵列 信号处理

汪晋宽 宋昕 著

1.7

0097



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

现代通信信号处理丛书

鲁棒自适应阵列信号处理

汪晋宽 宋昕 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统、深入地阐述了鲁棒阵列信号处理的理论和方法,尤其是阵列信号处理的多种经典算法和鲁棒阵列信号处理技术,并给出了大量的定性分析和定量计算。全书共9章,内容包括阵列信号处理基础,自适应波束形成算法,DOA 估计算法,鲁棒波束形成器的设计方法,适用于不同情况的鲁棒波束形成算法,阵列信号处理的新发展。

本书取材新颖,内容丰富,体系完整,涵盖了作者多年来在该领域所取得的科研成果以及国内外阵列信号处理的最新成果和最新进展,是一部理论与实用研究同步的专著。

本书可供从事移动通信、雷达信号处理及相关技术的专业技术人员、科研工作者,以及从事相关领域研究的高校教师、博士和硕士研究生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒自适应阵列信号处理 / 汪晋宽, 宋昕著. —北京: 电子工业出版社, 2009.12
(现代通信信号处理丛书)

ISBN 978-7-121-09975-5

I. 鲁… II. ①汪… ②宋… III. 鲁棒控制—自适应性—信号处理 IV. N911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第217969号

责任编辑: 张来盛(zhangls@phei.com.cn) 特约编辑: 牛雪峰

印 刷: 北京智力达印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 428千字

印 次: 2009年12月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

随着通信技术的发展，特别是第三代移动通信技术的发展，宽带无线通信网、高速通信网、新一代信息网技术、光通信技术、个人通信技术和智能信息处理技术等已经进入了一个新的高速发展时期，对各种信号处理技术有了更高的要求。为了适应各种现代通信信息传输网络的技术要求，除了继续采用传统的数字信号处理技术外，还应在此基础上提出新的信号处理技术、算法和模型，以满足应用的需求。

随着通信智能化、大数据量、高速实时的多媒体应用需求的不断增多，处理信号的类型已经不仅仅局限于对常规数据的处理，还要处理大量的语音信号和视频信号等。这类信号的特点是数字化、宽频带、大数据量。信号处理技术在通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、光信息科学与技术、测控技术与仪器、移动通信、无线通信、卫星通信、光通信、网络通信、智能信息系统以及多媒体通信等领域获得广泛的应用，已经成为应用工程的关键技术之一。目前，国内有关通信应用领域信号处理技术系列化的图书种类还非常匮乏，而市场对这方面的需求量又较大。因此，从这个角度出发，我们依托中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会，在专业委员会专家、教授的大力支持下，组织出版一套面向 21 世纪的《现代通信信号处理丛书》。

这套丛书从我国现代通信信号处理技术应用现状与发展情况出发，以应用为中心，全面、系统地介绍了信号处理领域所涉及的有关关键技术与热点技术，如通信中的智能信号处理、通信中的阵列信号处理、通信中的自适应信号处理、通信中的光信号处理、超宽带技术、通信中的信号检测与估值、量子通信中的量子信号处理、网络信号处理和信号处理算法的实时 DSP 实现等内容。虽然所涉及的领域还不够全面，但我们会一直努力。在确保丛书质量的前提下，不断丰富，不断完善，力求内容的先进性、实用性和系统性，突出理论与应用实践的紧密结合，引导读者将信号处理的原理、技术与应用有机地结合，力争为读者奉献一套可读性与可操作性强的系列丛书。

这套丛书的主要读者对象，是广大从事通信信号处理技术工作的科技研发人员和工程技术人员，也适合高等院校相关学科各专业在校师生及刚刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书的过程中，得到了中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会的大力支持，参与编著和审定的各位专家都为此付出了大量的心血，可以说，没有他们的支持和帮助，就没有这套丛书的出版，对此，我们表示衷心的感谢。希望广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议，以便今后我们加以改进，为广大读者奉献更多、更好的优秀通信类图书。
联系信箱：wchn@phei.com.cn。

前 言

智能天线技术是由微波技术、自动控制理论、自适应阵列技术、数字信号处理 (DSP) 技术等多学科交叉发展而成的一门新技术, 其核心是阵列信号处理。阵列信号处理的理论和方法已经广泛应用于雷达、声纳、航空航天、地球物理、生物医学和通信等领域, 传统的阵列信号处理理论及其应用已日趋成熟。在实际通信系统中, 误差的存在是不可避免的, 尤其是在信号环境复杂的条件下, 系统的性能急剧下降, 在高信噪比时, 期望信号会被当做干扰而受到抑制, 从而产生信号相消的现象。鲁棒算法可以在不降低系统性能的前提下, 改善信号和系统误差的影响。因此, 阵列信号处理的鲁棒算法的研究受到了广泛的关注。

近年来, 在教育部科学研究重点项目和博士点基金的支持下, 我们系统地研究了自适应信号处理中的波束形成和波达方向估计问题, 着重对鲁棒自适应波束形成方法及其在工程上的应用进行了深入的研究并取得了一些成果。作为研究工作的阶段总结, 我们将近年来的相关研究成果汇总成册, 构成了本书的主要内容, 期望为从事通信和信号处理研究工作的同仁在理论分析方法和实际工程应用上提供一些有益的帮助。

本书是作者多年来研究成果的总结, 同时介绍了国际上该领域的研究进展, 旨在为读者提供系统的鲁棒阵列信号处理的理论与技术, 其中介绍了阵列信号处理的概念、基本原理和经典算法, 重点研究了鲁棒波束形成算法, 并结合实际工程应用详细描述了定性分析和定量计算。在本书的编写过程中, 作者力求在内容选取、整体结构、知识体系和写作手法等方面做到:

(1) 选材广泛, 体系完整。本书参考了大量国内外著名期刊的论文资料, 尤其是在国际权威杂志《IEEE 信号处理》、《天线传播》上发表的成果, 以作者多年的研究成果为主体进行了精心的组织、提炼和总结, 尽量做到系统、全面地论述适用于实际通信环境的鲁棒波束形成算法; 在体系结构上, 按照循序渐进的原则, 从简单的传统阵列信号处理方法到适用于实际复杂环境的鲁棒阵列信号处理方法, 在层次清晰的基础上保证了知识的整体性。

(2) 重视知识的新颖性, 保证创新性。本书在介绍作者多年来在该领域所取得的研究成果的同时, 详细地介绍了鲁棒阵列信号处理的最新成果与最新进展, 并给出了算法实现的详细步骤和计算机仿真结果, 是一部理论与实际应用同步的专著。

(3) 深入浅出, 可读性强。本书采用基本原理与直观的仿真实验相结合的方法, 系统地介绍了鲁棒阵列信号处理的理论与方法, 深入浅出, 使读者能够直观、深刻地理解该领域的基本原理与实际应用。

全书共由 9 章构成, 主要内容包括: 阵列信号处理的基本理论和研究现状; 传统阵列信号处理方法及其应用; 鲁棒自适应阵列信号处理的理论与技术, 并对其进行了分析与比较; 适用于波达方向不确定情况的鲁棒波束形成算法; 在最差信号环境下的鲁棒信号处理方法及其性能; 基于可变对角载入的鲁棒波束形成算法; 基于二次型约束的鲁棒阵列信号处理技术; 鲁棒算法的理论分析和实验分析; 阵列信号处理的新发展。

本书由汪晋宽组织编写，宋昕执笔，刘福来、高静、任敬国、王彬、许鹏参与了前两章部分内容的编写和绘图工作，薛延波、刘志刚、韩英华参与编写了第3章的部分内容。全书由汪晋宽统稿。在编写过程中，参阅和借鉴了大量国内外文献资料，东北大学秦皇岛分校在研究设备和资金上提供了资助，在此一并表示衷心的感谢！

由于自适应信号处理正在飞速发展，加上作者水平有限，本书的选材与论述一定会有遗漏与不足之处，恳请诸位专家、同仁和读者批评指正。

目 录

第 1 章 阵列信号处理基础	(1)
1.1 智能天线技术	(1)
1.1.1 智能天线的概念和基本原理	(1)
1.1.2 智能天线的分类	(1)
1.1.3 国内外智能天线的研究现状	(3)
1.1.4 智能天线的优点及应用	(5)
1.2 无线信道的电波传播特性	(6)
1.2.1 无线电波传播的基础特性	(6)
1.2.2 衰落的无线信道	(7)
1.3 阵列信号建模	(10)
1.3.1 理想情况下的数学模型	(10)
1.3.2 考虑信号误差的数学模型	(13)
1.3.3 相干信号源的数学模型	(14)
1.3.4 分布式信源信号模型	(15)
1.4 阵列信号处理的统计模型	(15)
1.4.1 统计模型的建立	(15)
1.4.2 方向图函数	(16)
1.5 空间信号处理的数学基础	(18)
1.5.1 矩阵代数的相关知识	(18)
1.5.2 平稳随机过程	(21)
1.5.3 最优化方法	(25)
1.6 阵列信号处理的发展及研究现状	(29)
1.6.1 自适应波束形成的研究现状	(29)
1.6.2 波达方向估计的研究现状	(32)
1.7 本章小结	(34)
参考文献	(34)
第 2 章 自适应波束形成算法	(38)
2.1 自适应控制算法的性能量度	(38)
2.1.1 均方误差 (MSE) 性能量度	(38)
2.1.2 信噪比 (SNR) 性能量度	(40)
2.1.3 最大似然 (ML) 性能量度	(42)
2.1.4 最小噪声方差 (NV) 性能量度	(43)
2.1.5 最优解的因式分解	(44)
2.2 自适应波束形成算法	(45)
2.2.1 波束形成的最优权重向量	(45)

2.2.2	广义旁瓣相消器	(47)
2.2.3	最小方差无畸变响应 (MVDR) 算法	(48)
2.2.4	采样自相关矩阵求逆 (SMI) 算法	(48)
2.2.5	直接矩阵求逆 (DMI) 算法	(49)
2.2.6	最小均方 (LMS) 算法	(49)
2.2.7	递推最小二乘 (RLS) 算法	(53)
2.2.8	恒模 (CMA) 算法	(57)
2.2.9	神经网络方法	(62)
2.2.10	宽带信号的波束形成算法	(63)
2.3	本章小结	(65)
	参考文献	(65)
第 3 章	DOA 估计算法	(68)
3.1	信号数目的推定	(68)
3.1.1	序列假设检验 (SH) 准则	(68)
3.1.2	AIC 和 MDL 准则	(69)
3.1.3	利用盖氏圆半径法进行信源数目估计	(70)
3.2	传统的 DOA 估计方法	(72)
3.2.1	古典谱估计法	(72)
3.2.2	Capon 最小方差法	(73)
3.2.3	线性预测方法	(73)
3.2.4	最大熵谱估计	(74)
3.2.5	MUSIC 算法	(74)
3.2.6	ESPRIT 算法	(82)
3.2.7	最大似然法	(87)
3.3	鲁棒 DOA 估计算法	(89)
3.3.1	适用于 CDMA 系统的鲁棒 DOA 估计算法	(89)
3.3.2	互耦条件下的鲁棒 DOA 估计算法	(91)
3.3.3	非高斯噪声下的鲁棒 DOA 估计算法	(93)
3.3.4	基于盲波束形成的 DOA-Doppler 鲁棒估计算法	(97)
3.3.5	存在循环频率误差的鲁棒 DOA 算法	(98)
3.4	本章小结	(100)
	参考文献	(100)
第 4 章	鲁棒波束形成器的设计方法	(104)
4.1	影响算法鲁棒性的因素	(104)
4.2	鲁棒波束形成算法	(105)
4.2.1	线性约束最小方差 (LCMV) 波束形成算法	(107)
4.2.2	对角载入 SMI (LSMI) 算法	(108)
4.2.3	特征空间算法	(109)
4.2.4	鲁棒 RLS 算法	(110)
4.2.5	最差性能优化鲁棒波束形成算法	(112)

4.2.6	适于高阶信号模型的鲁棒波束形成算法	(116)
4.2.7	基于 Bayesian 方法的鲁棒波束形成算法	(118)
4.2.8	用于宽带、移动、相干干扰的鲁棒波束形成算法	(119)
4.2.9	鲁棒 Capon 波束形成算法	(121)
4.2.10	基于均方误差的鲁棒波束形成算法	(130)
4.3	鲁棒宽带波束形成算法	(132)
4.3.1	宽带阵列信号模型	(133)
4.3.2	宽带波束形成	(135)
4.3.3	鲁棒宽带波束形成	(137)
4.4	本章小结	(142)
	参考文献	(142)
第 5 章	适用于信号波达方向不确定情况的鲁棒波束形成算法	(145)
5.1	基于 Bayesian 方法的鲁棒恒模算法	(145)
5.1.1	线性约束恒模算法 (LCCMA)	(145)
5.1.2	线性约束差分恒模算法 (LCDCMA)	(146)
5.1.3	线性约束差分恒模算法的性能分析	(147)
5.1.4	算法的鲁棒性改进	(149)
5.1.5	实验结果	(151)
5.2	基于 Bayesian 方法的鲁棒波束形成算法	(154)
5.2.1	传统波束形成算法	(154)
5.2.2	鲁棒波束形成算法	(155)
5.2.3	鲁棒递推波束形成算法	(156)
5.2.4	实验结果	(158)
5.3	基于 Bayesian 方法的鲁棒约束 LMS 波束形成算法	(161)
5.3.1	传统约束 LMS 算法及其性能	(161)
5.3.2	鲁棒约束 LMS 算法	(162)
5.3.3	收敛性能分析	(164)
5.3.4	实验结果	(165)
5.4	本章小结	(168)
	参考文献	(169)
第 6 章	在最差信号环境下的鲁棒自适应波束形成算法	(171)
6.1	鲁棒约束恒模自适应波束形成算法	(171)
6.1.1	信号模型	(171)
6.1.2	线性约束恒模算法	(172)
6.1.3	鲁棒约束恒模自适应波束形成算法	(173)
6.1.4	收敛性能分析	(175)
6.1.5	实验结果	(175)
6.2	鲁棒约束最小二乘恒模算法	(179)
6.2.1	线性约束最小二乘恒模算法	(179)
6.2.2	鲁棒约束 LSCMA 算法	(180)

6.2.3	实验结果	(181)
6.3	基于最陡下降准则的鲁棒 LMS 波束形成算法	(185)
6.3.1	基于最差性能的鲁棒算法	(185)
6.3.2	性能分析	(187)
6.3.3	实验结果	(188)
6.4	基于神经网络的鲁棒自适应波束形成算法	(190)
6.4.1	鲁棒自适应波束形成算法	(191)
6.4.2	波束形成的 RBFNN 实现	(191)
6.4.3	实验结果	(193)
6.5	本章小结	(196)
	参考文献	(197)
第 7 章	基于可变对角载入的鲁棒自适应波束形成算法	(199)
7.1	基于广义旁瓣相消器的鲁棒 LCMV 算法	(199)
7.1.1	基于对角载入的鲁棒 LCMV 算法	(199)
7.1.2	可变对角载入值的计算	(200)
7.2	基于最优对角载入值的鲁棒算法	(202)
7.2.1	算法描述	(202)
7.2.2	实时更新对角载入值	(203)
7.2.3	基于模值约束的鲁棒算法	(205)
7.3	基于可变对角载入的鲁棒算法	(206)
7.3.1	传统算法描述	(206)
7.3.2	鲁棒波束形成算法	(208)
7.3.3	实验结果	(210)
7.4	基于可变对角载入的鲁棒 LMS 自适应波束形成算法	(214)
7.4.1	鲁棒波束形成算法及对角载入值的计算	(214)
7.4.2	性能分析	(216)
7.4.3	实验结果	(217)
7.5	本章小结	(220)
	参考文献	(220)
第 8 章	基于二次型约束的鲁棒自适应波束形成算法	(222)
8.1	阵列指向性二次型约束鲁棒波束形成算法	(222)
8.1.1	阵列指向性二次型约束	(222)
8.1.2	二次型约束波束形成算法	(223)
8.2	基于二次型约束的鲁棒 Capon 算法	(224)
8.3	二次型约束鲁棒递推优化算法	(226)
8.3.1	二次型鲁棒递推波束形成算法	(228)
8.3.2	性能分析	(229)
8.3.3	实验结果	(230)
8.4	基于二次型约束的鲁棒最小二乘恒模算法	(233)
8.4.1	CDMA 系统中的线性约束最小二乘恒模算法	(233)

8.4.2	二次型约束鲁棒 LSCMA 算法	(235)
8.4.3	性能分析	(238)
8.4.4	实验结果	(240)
8.5	本章小结	(243)
	参考文献	(243)
第 9 章	阵列信号处理的新发展	(245)
9.1	鲁棒阵列信号处理的新发展	(245)
9.2	超宽带无线通信技术	(246)
9.2.1	超宽带技术的优势	(246)
9.2.2	超宽带技术的主要应用	(248)
9.2.3	超宽带研究的关键技术	(249)
9.3	MIMO 雷达技术	(251)
9.3.1	MIMO 雷达的基本原理及优点	(251)
9.3.2	MIMO 雷达的信号处理过程	(251)
9.4	本章小结	(252)
	参考文献	(252)

第 1 章 阵列信号处理基础

自 1959 年 Van Atta 提出了自适应天线阵列这个术语以来，自适应阵列天线技术经过几十年的研究，其理论已有了长足的发展。特别是近些年，随着计算机和数字信号处理技术的飞速发展，DSP 芯片的处理能力日益提高，价格也逐渐能够为科研和生产所接受，这样就促进了自适应信号处理技术的发展。另外，随着移动通信业务的不断扩大，在有限的频谱资源和不断增长的系统容量需求之间形成了矛盾，而在实际的通信系统中广泛存在的多径干扰、多址干扰、信道衰落等也对系统性能和容量产生了严重的影响，如何对抗衰落和干扰，提高频谱利用率，在保证通信质量的前提下扩大系统容量，成为无线通信业务亟待解决的问题。在阵列天线基础上发展起来的自适应阵列信号处理技术正是解决上述问题的关键。通过选择合适的自适应算法，动态形成空间定向波束，使天线阵列方向图主瓣对准期望信号波达方向，旁瓣或零陷对准干扰信号波达方向，从而达到提取期望信号并抵消或最大程度地抑制干扰信号的目的。本章从智能天线的基本概念入手，介绍智能天线的研究现状及应用环境，根据相关的数学知识，给出阵列信号处理的统计模型。

1.1 智能天线技术

1.1.1 智能天线的基本概念和基本原理

智能天线是一种空分多址的信号处理技术，它是由多个天线按照一定结构排列组成的天线阵。智能天线技术是在微波技术、自动控制理论、自适应天线技术、数字信号处理技术等多学科基础上综合发展而成的一门新技术，其核心是阵列信号处理，它主要由天线阵、波束形成网络、波束形成算法三部分组成。智能天线的主要思想是能够针对正在变化的信号环境产生空间定向波束，使天线的主波束对准期望信号的波达方向，旁瓣和零陷对准干扰信号的波达方向，从而达到提取期望信号的目的。智能天线技术在雷达、通信、声呐以及医疗卫生等领域^[1-9]都有着广泛的应用前景，每年都有大量的研究成果问世。把智能天线应用于 CDMA 移动通信系统中，可以大大提高系统容量，扩大小区覆盖范围，改善通信质量，降低用户的发射功率，延长移动台寿命，极大地降低同一小区和小区以外的多址干扰^[10-11]。自适应波束形成技术作为阵列信号处理的一个研究方向，其目的是对各阵元加权进行空域滤波，以实现某一准则下的最佳接收，并且可以根据信号环境的变化，自适应改变各阵元的权重系数，以提高系统输出的信干噪比。

1.1.2 智能天线的分类

智能天线按权重向量调节方式的不同可分为多波束天线（也称做波束切换智能阵列天线）与自适应天线^[12]，另外在空-时信号处理的基础上提出了宽带自适应阵列天线。

1. 多波束天线

当智能天线的波束控制部分使用波束切换控制时，则称其为波束切换天线。波束切换天线利用多个并行波束覆盖整个用户区，每个波束的指向是固定的，波束宽度随阵列数目而定。随着用户在小区中移动，基站选择不同的相应波束以使接收信号最强。切换波束的优点是：①能够提供更高的信干噪比（SINR）、更大的覆盖范围或更小的发射功率，可以在一定程度上减少时延扩展；②只需检测信号强度以确定所用波束，无需准确地对用户方向进行判定或者估计；③结构简单、造价低廉，与现有基站系统连接比较容易。缺点是波束切换中的各权重系数只能从预先计算好的几组参数中挑选，不能完全实现自适应任意指向，在理论上是准最优的。在实际环境中，当期望用户信号位于波束边缘，干扰信号位于固定波束中心时，接收效果最差，所以多波束天线不能实现信号的最佳接收，不能实现自适应干扰置零。当波束数量增加时，干扰信号会从旁瓣进入，同时期望用户信号也要通过旁瓣进入各个波束。若要充分利用各波束的信号，阵列信号处理将变得复杂，对靠近期望信号方向的多径分量抑制能力降低，对多径信号的角度分布较自适应天线系统变得更为敏感。

2. 自适应天线

当智能天线的波束控制部分使用自适应算法时，则称其为自适应天线。自适应天线使用自适应波束形成算法来调整天线阵列中的权重向量，能够提高输出的性能。与波束切换天线相比，自适应天线的方向图是根据期望信号和干扰的不同波达方向动态调整的。当期望信号和干扰靠得比较近时，自适应天线仍然可以有效地抑制干扰；能够改善输出的信干噪比，从而增加系统容量，提高频谱利用率；而且可以利用路径分集对期望用户的多径信号合成。自适应天线虽然从理论上可以达到最优，但在实际信道条件下，当干扰较多、多径干扰严重，特别是信道快速变化时，确定权重向量的各种算法均存在计算量大，收敛速度慢，在某些情况下甚至可能出现错误收敛等缺点，很难实现对某一用户的准确跟踪。快速的鲁棒波束形成算法是自适应天线实用化的关键，也是未来无线通信的理想目标。

3. 宽带智能天线

在宽带自适应阵列天线系统中，阵列的每个支路都使用了抽头延迟线，它是一类空域和时域联合滤波的自适应阵列天线系统。抽头延迟线使每个阵元能够随频率变化的相位响应，这样可以解决低频信号分量和高频信号分量经过相同传播距离而相移不同的问题。宽带自适应阵列天线系统可以看做一个均衡器，以保证阵列对不同频率的响应相同。抽头延迟线可能对空间响应加以“平滑”，使入射到阵列上的信号带宽相对于中心频率变得很小，从而忽略带宽的影响。无线信道中的多径可以导致接收机入射信号产生延时信号，从而引起符号间干扰，降低接收信号质量。如果多径分量的角度不同，但延迟大致相同，则一维空间阵列就可以有效地消除或合并这些分量；如果这些多径分量的入射角度非常接近，可以使用时域均衡器^[13]抑制延迟多径分量。宽带智能天线结构正是结合了空间处理器和时域均衡器的优点，能够捕获延迟差别很大的多径分量的能量，可将抽头延迟线作为自适应干扰清除滤波器来使用，同时在空域和频域抑制干扰信号。这在非均匀信号环境，即不同带宽不同载频的信号入射到阵列的情况下尤其重要。

智能天线按实现形式分类，可分为以下三类：自适应调零智能天线、等旁瓣针状波束智

能天线和数字波束形成智能天线。

① 自适应调零智能天线。它是以自适应天线技术为基础的,采用自适应算法来形成方向图。自适应调零智能天线的基本原理是根据天线的输入特性和输出特性,按一定的算法准则自动地调节天线阵元的幅度和相位加权,从而在干扰方向上形成零陷,在信号入射方向上增益最大,这样就可以大幅度地降低干扰电平,提高系统的信噪比。从空间响应看,其自适应天线阵列是一个空间滤波器,主瓣对准期望信号,旁瓣和零陷对准干扰信号。但由于系统方向图主瓣宽度是由天线阵列孔径决定的,所以自适应调零智能天线对处于主瓣区域内干扰的抑制能力是很有限的。

② 等旁瓣针状波束智能天线。它也是以自适应天线技术为基础的,但与自适应调零智能天线不同之处在于它的天线方向图是等旁瓣方向图,且方向图的权重值是预先计算好的。系统工作时,首先通过测向确定用户信号的波达方向(DOA),选取合适的权重系数,然后将等旁瓣方向图的主瓣指向用户方向,从而提高用户的接收信噪比。对处于非主瓣区域的干扰,这类智能天线可以通过低的等旁瓣电平来抑制;但对处于主瓣区域内的干扰,此类智能天线将无法抑制,性能不及自适应调零智能天线。等旁瓣智能天线的最大优点在于性能可靠,波束形成无需迭代,而且响应速度快。

③ 数字波束形成智能天线。它利用数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)技术使自适应天线阵与数字信号处理技术相结合。工作时利用高分辨率的测向算法获得通信系统需要的基准信号。当基准信号到达波束形成自适应天线阵时,给信号处理器提供一个方向信息,将各阵元的接收信号转换到基带,由A/D转换器转换成数字信号,然后根据方向信息对数字信号进行加权处理,从而在此方向上形成所需的波束。

智能天线按扩容原理分类,又可以分为以下两类:

- 软容量的扩容,如CDMA系统。在这类系统中由于可用信道数足够多,系统的容量决定于系统的信噪比。利用智能天线的抗多径干扰能力,可以提高系统的信噪比。对于给定的信噪比门限值,采用智能天线的系统可以容纳更多的用户,达到扩容的目的。
- 硬容量的扩容,如FDMA、TDMA等系统。在这类系统中智能天线利用其空间分集的能力,使空间角度不同的多用户使用同一传统信道(频分信道、时分信道)。硬容量扩容实际是将一个传统信道再分为若干个空分信道,从而成倍地提高系统容量。

1.1.3 国内外智能天线的研究现状

采用智能天线技术能够有效地抑制与接收信号方向不同的多径干扰、同信道干扰,提高信号的传输质量和频谱的利用率,增大系统容量。由于智能天线技术在移动通信领域的巨大潜能,世界各国都非常重视智能天线技术在未来移动通信方案中的地位和作用。虽然智能天线技术从理论到实践的过程比较困难,但有很多国家已经在这方面做了不少工作,不仅搭建了智能天线试验平台,实现了各自的智能天线试验系统,而且通过实验获得了一些具有实际意义的成果。

1. 欧洲智能天线项目

欧洲通信委员会在RACE(Research into Advanced Communication in Europe)计划中实施了第一阶段智能天线技术研究。该计划的目标是评估、开发可以应用于欧洲下一代移动通

信系统 UMTS 的智能天线技术。该智能天线的试验平台选用了 DECT 的射频标准, 系统较简单, 它由 8 个阵元组成, 阵元分布包括直线阵、圆环阵和平面阵等, 阵元之间的间距可调, 并且每个阵元后接一个通道。该系统采用基于子空间的 MUSIC 算法来测算信号的空间波达角, 分别应用了基于波束空间和阵元空间的两种自适应波束形成算法, 研究了基于参考信号的 NLMS (Normalized Least Mean Squares) 算法和 RLS 算法等。研究表明, 在两个信号和四个空间信道的条件下, 系统的比特差错率小于 10^{-3} 。试验评测了采用 MUSIC 算法判别用户信号波达方向的能力。同时, 通过现场测试表明, 圆环和平面天线阵适用于空间通信环境, 而直线阵更适合于市区环境。

2. 英国智能天线项目

SCARP 项目 (Smart Communication Antenna Research Program) 在许多企业和组织的支持下已经得到了实现。系统采用了八面锥体上的八个天线阵元来提供半球覆盖。该项目采用 NLMS 算法, 研究了系统在衰落信道中的性能。研究结果表明, 该系统能够跟踪时变环境中的信号而不降低信号质量, 而且最优合并比分集合并性能提高了 50 dB。

3. 日本智能天线试验平台

日本三菱电气和 ATR 光电通信研究所等联合研制了用于卫星通信的移动数字波束形成 (DBF) 试验系统。该系统由 4×4 的 16 阵元平面方阵组成, 阵元间距为半个波长, 载波为 1.542 GHz。该波束形成处理器包含 16 个 DSP 核, 10 个 13 000 门的 FPGA, 系统较复杂。在进行波束形成算法处理时, 16 个 DSP 内核同时工作。该试验系统分别进行了恒模算法 (CMA) 和最大比合并分集算法的处理, 同时进行了自适应干扰抑制的试验。为减小计算复杂度, 系统采用了波束空间 CMA 算法, 首先在多波束形成器中形成多个波束, 然后选择具有强输出信号的波束进行自适应处理。

4. 美国试验平台

在智能天线技术方面, 美国比其他国家要领先一步, 已经将研究成果投入使用。美国 ArrayComm 公司和中国邮电电信科学研究院 (大唐集团) 的信威公司研制出应用于无线本地环路 (WLL) 的智能天线系统。该系统采用可变阵元的配置, 在不同试验环境下分别采用 12 阵元和 4 阵元的圆环形自适应阵列。现场实验表明, 在 PHS 基站采用该技术可以使系统容量提高 4 倍。

5. 中国智能天线项目

我国大唐集团的信威通信公司推出的 S-CDMA WLL 系统是国际上第一套成功应用智能天线的同步 CDMA 无线通信系统。在此基础上进行改进并提出的 TD-SCDMA 系统成为第三代移动通信的技术标准之一, 也是我国拥有自主知识产权的技术。该系统的智能天线由 8 个天线阵元的圆形阵列组成, 直径为 25 cm。同全向天线相比, 可获得 8 dB 的增益。该系统分别采用阵元空间和波束空间的处理方式, 采用 TDD 的工作模式, 每个子帧的长度为 5 ms。由于在 TDD 双工方式下, 上行信道和下行信道使用同一频率, 只要上下行间隙之间的时间小于信号的相干时间, 则可以认为两条信道具有相同的电波传输特性, 所以从上行信道获得的空间参数可以直接用于下行信道的波束形成, 从而避免了复杂的数学计算。另外, 国防科

技大学研制了 4 阵元双速率 Systolic 阵自适应波束形成系统, 西安电子科技大学电子工程研究所对时空二维自适应处理系统进行了研制, 并取得了一定的研究成果。

尽管如此, 目前智能天线仍处于积极研究试验阶段, 智能天线技术距实际应用还有一定距离, 实际应用的例子较少。虽然从理论上讲可以达到最优, 但要实现理想的智能天线, 还有很多的问题有待于解决。目前, 智能天线只能应用于基站, 在进行多用户跟踪时, 对天线主瓣区内的干扰无能为力, 并且在移动用户运动速度过快、干扰过多时, 由于需要增加天线阵元数目, 使天线的响应速度和抗多径干扰的能力下降。

智能天线技术是一种新兴的通信技术, 随着专用集成电路 (ASIC) 技术、微电子技术和第三代移动通信系统标准的不断完善, 智能天线技术将发挥它巨大的潜力和优势。未来的智能天线将是软件无线电技术、空时处理技术、高性能高集成度 DSP 技术和数字下变频 (DDC) 技术等多种技术的综合应用, 它不仅取消上下变频器, 采用高集成度射频集成处理器直接对天线阵元接收的高频信号进行采样处理, 还可借助软件无线电技术集多种自适应算法于一身, 使通信系统能够适应各种复杂的通信环境, 移动用户兼容各种不同的体制和标准, 从而完全实现通信智能化。

1.1.4 智能天线的优点及应用

近年来, 随着移动通信事业在全球范围内的蓬勃发展, 通信业务的需求量越来越大。作为通信主要手段之一的无线移动通信技术引起了人们极大的关注, 已成为目前通信技术发展的热点之一。而智能天线是第三代移动通信中实现信号处理的关键技术, 不仅能使系统容量成倍地增加, 而且还能使系统性能得到改善。归纳起来, 智能天线具有以下几个突出的优点。

1. 抗干扰

将智能天线用于 CDMA 基站可减少移动台对基站的干扰, 改善系统性能。抗干扰应用的实质是空间域滤波。智能天线波束具有方向性, 可区别不同入射角的无线电波。天线阵列的权重系数的调整方式与具有时域滤波特性的自适应均衡器类似, 可以自适应地根据电波传播环境的变化优化天线阵列方向图, 将其零陷或旁瓣自动对准干扰方向, 大大提高阵列的输出信噪比, 提高整个系统的可靠性。

2. 抗衰落

在陆地移动通信中, 电波传播路径由反射、折射及散射的多径波束组成。随着移动台的移动及环境的变化, 信号瞬时值及延迟失真的变化非常迅速且不规则, 这就造成了信号的衰落。采用全向天线接收所有方向的信号, 或采用定向天线接收某个固定方向的信号, 都会因衰落使信号的失真较大。如果采用智能天线控制接收方向, 使阵列天线产生定向波束, 从而使延迟波方向的增益最小, 减少信号衰落的影响。

3. 增加系统容量

智能天线技术使天线波束变窄, 提高了天线增益, 减少了移动通信系统的同频干扰, 降低了频率复用系数, 提高了频谱利用效率。使用智能天线后, 无需增加新的基站就可改善系统覆盖质量, 扩大系统容量, 增强现有移动通信网络基础设施的性能。智能天线允许任一无线信道与任一波束配对, 这样就可按需分配信道, 保证呼叫阻塞严重的地区获得较多信道资

源，等效于增加了此类地区的无线网络容量。采用智能天线是解决稠密市区容量难题既经济又高效的方案，可在不影响通话质量的情况下，将基站配置成全向连接，大幅度地提高基站容量。

4. 实现移动台定位

目前蜂窝移动通信系统只能确定移动台所处的小区，如果增加了定位业务，则可随时确定用户所处的位置，不但给用户和网络管理者提供了方便，还可开发出更多的新业务。

智能天线最初广泛应用于雷达、声呐及军事通信等领域，由于价格等因素的影响一直未能普及到其他民用通信领域。近年来，现代数字信号处理技术发展迅速，数字信号处理芯片处理能力不断提高，芯片价格已经可以为现代通信系统所接受，同时，利用数字技术在基带形成天线波束代替模拟电路形成天线波束的方法提高了天线系统的可靠性与灵活程度，因此智能天线技术必将在第三代移动通信系统中发挥重要的作用。

1.2 无线信道的电波传播特性

无线信道作为信号的传输媒介，是无线通信系统中必不可少的组成部分。实际通信系统的各种性能在很大程度上都受到无线信道传播特性的影响，因此无线信道传播的机理、特性及数学模型是阵列信号处理的基础^[14]。

1.2.1 无线电波传播的基础特性

实际传播环境中复杂的地形和建筑物都会影响电磁波的传播，导致电磁波能量损失以及反射、绕射、散射现象。下面介绍电磁波的传播方式：反射、绕射和散射。

1. 反射

当电磁波入射到一个尺寸比波长大得多的物体时，电磁波会发生反射。在移动通信的无线信道中，反射主要发生在地球表面、建筑物和墙壁等。当平面电磁波入射到某种媒介的表面，一部分能量进入该媒介中，另一部分能量则反射回原空间。

2. 绕射

在传播途径中遇到大障碍物时，电波会绕过障碍物向前传播，这种现象叫做电波的绕射。超短波、微波的频率较高，波长短，绕射能力弱，在高大建筑物后面信号强度小，形成所谓的“阴影区”。信号质量受到影响的程度不仅和建筑物的高度、接收天线与建筑物之间的距离有关，还和频率有关。在移动通信的无线信道环境中，绕射主要发生在建筑物墙角、电线杆表面等不连续处。

3. 散射

无线电波入射到尺寸较波长小得多的障碍物时会发生散射。如果物体表面粗糙，就会产生不同于镜面反射的散射现象。被散射的能量扩展到所有方向，比如路灯杆会将入射的能量散射到所有的方向上，从而使实际接收到的信号要比单独反射和绕射模型预测的接收信号强。尽管从原则上讲，散射场可以根据麦克斯韦方程组及边界条件求得，但只有少数比较简单的