

学校编码: 10384
学号: 23320071152164

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于压缩传感的智能天线 DOA 估计算法研究

Study on the DOA Estimation Algorithm for Smart Antennas
Based on Compressed Sensing

李波

指导教师姓名: 王博亮 教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2010 年 月

论文答辩日期: 2010 年 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2010 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

随着移动用户数量的剧增和新型多媒体无线业务的涌现,使得无线通信业务量迅速增加,进而使得有限的无线频率资源与不断增长的个人无线通信需求这一对矛盾日益激烈,与此同时,无线信号传输环境的复杂性和不确定性,使得无线信号在传输过程中产生多径衰落和损耗,所以需要采用各种信号增强技术来提高系统的接收性能。智能天线利用信号在传输方向上的差异,将同频率或同时隙、同码道的信号区分开来,最大限度地利用有限的信号频谱资源。在移动通信系统中,采用智能天线可以提高频谱利用率、提高信干比、增加系统容量、扩大基站覆盖范围、降低基站的发射功率,改善通信质量。智能天线已成为第三代无线移动通信的研究热点之一。其中波达方向(DOA)估计是智能天线研究的一个重要内容,因为无论是上行多用户信号的分离,还是下行选择性波束形成,对用户信号DOA进行精确的估计,都成为智能天线实现定向收发的前提条件。

论文首先总结了经典的DOA估计算法,对其算法原理和估计性能进行了分析和比较,特别对基于子空间的多信号分类(MUSIC)算法进行了详细论述和性能评价。针对基于子空间法需要采样点多,不能对相干信号直接进行DOA估计等缺点进行改进,提出了基于压缩传感技术的DOA估计算法。该方法依赖于一个事实,即通过单径或多径信道的阵列信号可以由一组从预先定义的原子库中选择几个原子的线性组合来近似,从而产生接收信号的稀疏近似表示。该方法的关键是设计与阵列信号高度匹配的参数化波形,即原子词典,从而产生更高的能量压缩和稀疏的表示,这样才能有更高的CS重建概率。对参考阵元随机观测得到的信号利用基追踪算法重建入射信号。利用重建的入射信号与阵列流形,形成用来估计DOA的原子字典。利用匹配追踪算法找出与阵列接收信号最匹配的原子,进而得到入射信号的DOA估计。针对高精度下原子库过大引起的计算复杂度过大的问题,提出“先粗调再细调”和基于遗传算法的改进算法。通过仿真对比,验证了基于压缩传感技术的DOA估计算法的有效性及可行性。

关键词: 智能天线, 波达方向估计, 压缩传感

Abstract

With the rapid increase in the number of mobile users and the emergence of new multimedia wireless services, the wireless communications services become larger and larger. The limited wireless frequency resources and the rapid growth of personal wireless communication demand became more and more conflicted, and in the meanwhile, the transmission environment of the wireless communication is complicated and uncertain. So the transported signals are declined and worn down, especially by multipath effect. All of this severely restricts the performance and system capacity of wireless communication system. So it is necessary to propose methods to improve the performance of receive antenna system. Using different transmission directions of the transported signals, Smart antennas can adjust its directional pattern adaptively and distinguish the signals with the same frequency, time slot and code. The smart antenna technology is an effective solution to significantly improve the SINR, to take good use of the frequency sources, to extend the coverage area of base stations and to promote the capacity and the service quality of the communication system. The smart antenna technology had become one of the hottest research fields of 3G. Among these techniques, direction-of-arrival (DOA) estimation is an important part during the research work of smart antenna. Both the division of user signals in uplink and the alternative emitting in the downlink, the DOA information of user signals is necessary to realize the aimed emitting of smart antenna.

In this dissertation, we firstly summarize the classic DOA estimation algorithms, then analyze and compare the principle and performance of each algorithm under the same situation, especially the representative sub-space method MUSIC(Multi Signal Classification). Aim at the drawbacks of the Subspace-based method, for example, can not directly estimate the DOA of coherent signals and require a large number of sampling points under the same precision, the DOA estimation algorithm for smart antennas based on compressed sensing (CS) is developed. The proposed approach

relies on the fact that array signal through a single-path or multipath channel can be approximated by a linear combination of a few atoms from a pre-defined dictionary, yielding thus a sparse representation of the received array signal. The key in the proposed approach is in the design of a dictionary of parameterized waveforms (atoms) that closely matches the information-carrying array signal leading thus to higher energy compaction and sparse representation, and, therefore higher probability for CS reconstruction. In this approach, from a set of random projections of the received signal of the referential sensor, the Basis Pursuit (BP) algorithm is used to reconstruct the incident signal. Together with the array manifold, this reconstruct signal is subsequently used as a referent template in the dictionary. Then we use the Matching Pursuit (MP) to identify the strongest atoms in the projected signal that, in turn, are related to the DOA of the strongest incident signal. Dictionary are excessive large under high-precision, so computational complexity increases. To solve this problem, we propose the "After the first coarse fine-tuning" algorithm and the improved algorithm based on genetic algorithm. Simulation results demonstrated the effectiveness and feasibility of the methods based on compressed sensing (CS).

Key Words: Smart Antenna; DOA Estimation; Compressed Sensing

目 录

摘要.....	I
Abstract	II
目 录.....	IV
Contents.....	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的和意义	3
1.3 国内外研究现状.....	4
1.4 本文的主要工作及内容安排.....	6
第 2 章 智能天线技术原理	8
2.1 智能天线概述.....	8
2.2 阵列天线模型.....	9
2.2.1 等距线阵模型.....	10
2.2.2 单径条件下等距线阵信号模型	11
2.2.3 多径条件下等距线阵信号模型	13
2.2.4 相干信号等距线阵信号模型.....	13
2.3 波束形成基本概念	14
2.4 影响 DOA 估计结果的因素和性能参数.....	15
2.4.1 影响因素	15
2.4.2 性能参数	16
2.5 本章小结	16
第 3 章 DOA 估计技术.....	17
3.1 DOA 估计的传统方法.....	17
3.1.1 延迟-相加法.....	17
3.1.2 Capon 最小方差法.....	19
3.2 DOA 估计的子空间方法.....	20
3.2.1 MUSIC 算法.....	20

3.2.2	ESPRIT 算法.....	24
3.3	本章小结	27
第 4 章	基于压缩传感的 DOA 估计算法.....	28
4.1	压缩传感理论 (COMPRESSED SENSING)	28
4.1.1	问题描述	29
4.1.2	信号的稀疏表示.....	31
4.1.3	观测矩阵的设计	32
4.1.4	信号重构	35
4.2	基于压缩传感的 DOA 估计方法.....	41
4.3	算法仿真及性能分析	46
4.4	本章小结	51
第 5 章	算法形象化解释及其改进.....	53
5.1	算法形象化解释.....	53
5.1.1	BP 算法的形象化解释	53
5.1.2	MP 算法的形象化解释.....	53
5.1.3	BP 和 MP 算法比较.....	54
5.2	针对 BP 算法的算法改进.....	54
5.3	针对 MP 算法的算法改进	56
5.3.1	基于“先粗调再细调”的方法	56
5.3.2	基于智能算法的改进方法.....	58
5.4	本章小结	62
第 6 章	总结与展望	63
	参考文献.....	64
	在学期间已发表论文	67
	致 谢.....	68

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Contents in Chinese	IV
Contents in English	VI
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Reserch Background	1
1.2 Research Significance	2
1.3 Research Status	4
1.4 Main Reserch Works	6
Chapter 2 Principles of Smart Antenna	8
2.1 Smart Antenna Overview	8
2.2 Array Antenna Model	9
2.2.1 Uniform Linear Array	10
2.2.2 Single-path Signal Model	11
2.2.3 Multipath Signal Model	13
2.2.4 Coherent Signal Model	13
2.3 Beamforming	14
2.4 Factors and Performance Parameters	15
2.4.1 Factors	15
2.4.2 Performance Parameters	16
2.5 Summary	16
Chapter 3 DOA Estimation Algorithm	17
3.1 Traditional Algorithm	17
3.1.1 Delay - add Algorithm	17
3.1.2 Capon Algorithm	19
3.2 Subspace Algorithm	20
3.2.1 MUSIC Algorithm	20
3.2.2 ESPRIT Algorithm	25
3.3 Summary	27

Chapter 4 Algorithm based on Compressed Sensing.....	28
4.1 Compressed Sensing.....	28
4.1.1 Problem Description.....	29
4.1.2 Sparse Decomposition.....	31
4.1.3 Observation Matrix.....	32
4.1.4 Signal Reconstruction.....	35
4.2 Algorithm based on Compressed Sensing.....	42
4.3 Simulation and Analysis of Algorithm.....	47
4.4 Summary.....	51
Chapter 5 Figurative Interpretation and Improvement.....	53
5.1 Figurative Interpretation.....	53
5.1.1 Figurative Interpretation of BP Algorithm.....	53
5.1.2 Figurative Interpretation of MP Algorithm.....	53
5.1.3 Comparison of BP and MP Algorithm.....	54
5.2 Improvement of BP Algorithm.....	54
5.3 Improvement of MP Algorithm.....	56
5.3.1 "After the first coarse fine-tuning" Algorithm.....	56
5.3.2 Improvement Based on Intelligent Algorithm.....	58
5.4 Summary.....	61
Chapter 6 Conclusion.....	63
Reference.....	64
Published & Accepted Paper List.....	67
Acknowledgement.....	68

第1章 绪论

1.1 研究背景

十多年来,随着蜂窝移动网络和宽带无线接入系统的出现和迅速发展,移动通信在电信网络中逐步占有了重要的地位,这一领域是 20 世纪 90 年代以来通信行业中增长最快、商业前景最为看好的领域。蜂窝移动通信以其接入的方便、个人化、可漫游和无处不在的特性已经成为当前人们广泛关注的热点。据有关机构统计,全球蜂窝移动通信用户现在已经达到约 14 亿,超过了有线电话用户数。我国是目前世界上移动通信发展速度最快、用户数量最多的国家,2008 年 6 月末移动通信用户数量就已经超过 6 亿。尽管如此,目前我国移动电话普及率仅为 40%左右,即使是北京、上海等大城市,移动电话普及率与发达国家相比还有较大的差距,所以我国的移动通信仍然有很大的发展空间。

众所周知,当前广泛使用的第二代移动通信系统(包括 GSM 和 IS-95 CDMA)只能提供话音和低速率数据业务,而新建的 GPRS 系统所支持的分组数据速率大约为 50kbit/s,远不能支持多媒体应用。此外,第二代移动通信系统和 GPRS 系统的频谱利用率都比较低,而频谱资源紧张已经成为当前阻碍移动通信发展的重要因素之一。20 世纪 80 年代后期,ITU 已经注意到频谱资源紧张的问题,并开始考虑 21 世纪移动通信的需求。由于社会信息化的发展,近几年 IP 业务正以突飞猛进的速度成倍增长,我国上网人数已经达到 1 亿多,因此,在保证话音业务继续高速增长的同时,开发移动 IP 和宽带多媒体业务已经提到了议事日程上。移动分组数据业务的不断扩大、传输速率的提高和高质量话音业务的发展,将导致频谱资源的进一步紧张,迫切需要扩展新的频段并采用更先进的、频谱利用率更高的新的技术体制,开发出能够支持多种业务的更大容量的移动通信系统^[1]。

在移动通信系统中,电波传播环境比较复杂,无论是上行链路或下行链路上信号电波都要发生折射、反射和散射,形成多条传播路径。不同路径的信号到底接收端时,由于天线的位置、方向和极化不同,使接收信号的幅度和相位动态地发生改变,从而产生严重的多径衰落现象。同时由于各个路径的长度不同,信号到达接收端得时间不同,接收端接收到的信号中不仅包括原脉冲还包括原脉冲的

各个多径时延信号，这就引起的接收信号中脉冲的时延扩展现象。多径衰落现象和时延扩展现象会造成了符号间串扰 (ISI: Inter-Symbol Interference)；在蜂窝移动通信普遍采用的频率复用技术，如果功率控制机制不好，很容易使本小区的基站和移动台接收到其他同频小区基站或移动台的干扰信号，从而引起了同信道干扰 (CCI: Co-Channel Interference)，还有 CDMA 系统中由于其自身的特点会产生多址干扰 (MAI: Multiple Access Interference) 等，这些干扰都会严重降低了链路性能和系统容量。为了对抗上述几种干扰的影响、提高系统容量，信道编码技术、匹配滤波器、均衡、交织、RAKE 接收等技术分别应用各代移动通信系统中。在多址接入方式上依次采用了频分多址 (FDMA)、时分多址 (TDMA)、码分多址 (CDMA)，分别在频域、时域和码域上实现用户的多址接入。但是这些对抗干扰的技术和多址接入方式都只使用了接收信号的时域或频域信息，接收信号在空间域 (Space Domain) 的信息我们实际上并没有使用。

智能天线就是为了应用信号空间域特性应运而生的。智能天线以多个高增益窄波束动态跟踪多个期望用户，在接收模式下，来自窄波束之外的信号被抑制，在发射模式下，能使期望用户接收的信号功率最大，同时使窄波束照射范围以外的非期望用户受到的干扰最小。智能天线利用信号在传输方向上的差异，将同频率或同时隙、同码道的信号区分开来，最大限度地利用有限的信号频谱资源。智能天线通过调节各阵元信号的加权幅度和相位，来改变阵列的天线方向图，自动测量出呼叫用户方向，将天线波束指向用户，动态形成空间定向波束，使天线主波束对准用户信号到达方向 (DOA: Direction of Arrival)，旁瓣或零陷对准干扰信号到达方向，达到充分高效利用移动用户信号并抵消或抑制干扰信号的目的。与此同时，利用各个移动用户间信号在空间特征的差异，通过智能天线技术在同频率或者同时隙、同码道上接收和发射多个移动用户信号而不会发生相互干扰，使无线电频谱的利用率和信号传输更加高效。在不增加系统复杂度的情况下，使用智能天线可以满足服务质量 (QoS) 和网络扩容的需要^[2]。

智能天线技术对移动通信系统所带来的优势是目前任何技术所难以替代的。总之，利用信号的空间特性，采用空分多址 (SDMA) 技术将是一条解决目前频谱资源相对不足的有效途径。如果能够在基站和移动终端之间建立一条方向和能量相对集中的无线链路，并能追踪移动终端的活动，那么就可以有效的利用空间资

源，这是智能天线得以提出和逐渐变成研究热点的客观环境。智能天线技术已经日益成为移动通信中最具有吸引力的技术之一，并在以后几年内将发挥巨大的作用。

而对用户信号波达方向（DOA: Direction of Arrival）的测定，已成为智能天线实现指向性发射的必要前提。从接收的角度来看，基站利用智能天线来自移动终端的多径电波进行波达方向估计，进而进行空间滤波，抑制其他移动终端和多径干扰。从发送的角度来看，基站利用智能天线对发射信号下行波束赋形，使基站发射信号能够沿着移动终端的电波的来波方向发送回移动终端，从而降低发射功率，减小对其他移动终端的干扰。因此用户信号的 DOA 估计是智能天线研究的一个重要方面。从一定程度上说，DOA 估计的精度越高，对干扰的抑制能力就越强，信道容量就越大。

本课题来源于移动通信领域中提高通信质量、扩大系统覆盖距离、对抗多址干扰和适应复杂通信环境的实际要求。主要针对 DOA 估计的多重信号分类(MUSIC: Multiple Signal Classification) 算法需要采样点多，不能对相干信号直接进行 DOA 估计等缺点进行改进研究，提出了基于压缩传感技术的 DOA 估计算法。该算法结合阵列信号模型建立对应的原子库，通过基追踪算法(BP: Basis Pursuit) 和匹配追踪算法(MP: Matching Pursuit) 算法对空间信号频率和 DOA 进行估计，改进算法适应样本数较少、信噪比较低和入射信源存在相干信号的通信环境，同时保持分辨力和估计精度。并且针对高精度下原子库过大引起的计算复杂度增大的问题，提出“先粗调再细调”和基于遗传算法的改进算法。在一定程度上减小运算量。

1.2 研究目的和意义

智能天线是自适应天线阵列的发展，因此 DOA 估计不仅是智能天线的核心技术，同时也是阵列信号处理领域中重要的研究方向，是近年来迅速兴起的一门跨学科跨专业的边缘技术。该技术在通讯、雷达、声纳和地震信号处理等领域都有着十分广泛的应用前景。近年来，DOA 估计的各种算法取得了丰硕的成果，其理论日益完善，但将其应用到实践中，仍然有很多的问题亟待解决^[3-5]。

随着阵列信号处理研究的不断深入，超分辨 DOA 估计研究中的若干问题成为

当前研究的重点,例如,宽带信号的方向估计、相干信号的方向估计、低计算复杂度的方向估计。另外,由于在实际应用中,理想环境总是难以满足,信号环境、误差背景往往是复杂多变的。在系统存在多种误差的情况下大部分算法性能将严重恶化,因而探索非理想条件下更有效、更稳健的 DOA 估计算法也是当前超分辨参数估计算法中研究的热点。超分辨参数估计算法由理论走向实际工程应用的另一个主要障碍是,现有的子空间方法^[6]计算复杂度太高以及对信号环境的严格要求。所以,研究具有低的计算复杂度、可以应用在小样本和多径相干的信号环境中的超分辨方法也是当前重要的研究方向。

随着无线定位技术的发展,为用户提供定位信息的社会需求也越来越大。如果能够利用移动通信网络为用户提供定位信息,将给人们的生活带来极大的便利。但复杂时变的通信环境的影响,在移动通信网络中实现移动终端的精确定位仍然有许多技术难点亟待解决。如果基站采用智能天线,由此就可以获得信号的 DOA 估值,这样用两个基站就可以将用户终端定位到一个较小的区域。因此,实现对用户信号 DOA 的准确估计,是基站实现对小区内移动用户定位的一个前提条件,对移动用户的定位有广阔的应用前景和广泛的社会和经济效益。

移动通信网所提供的定位业务具有巨大的应用前景,一方面,它可为社区公共事业做出巨大的贡献,如急救业务、城市交通导引、车辆跟踪调度、移动终端盗打防范、移动网络管理等领域;另一方面,可给移动通信和汽车等行业带来很大的经济效益,也可为电信运营部门提供增加运营收入的新手段^[7]。

1.3 国内外研究现状

波达方向估计是空间谱估计研究的主要课题,对于同一参考信号源来说,各天线阵元所接收到的信号之间存在着相位差,从而形成谐波。不同方向的信号源对应着不同的谐波频率,只要估计出各谐波频率,即可求出各对应信号源的波达方向。由此可见波达方向估计技术在很大程度上依赖于谱估计理论的发展。

早期的波达方向估计是基于傅立叶变化的线性谱估计方法,主要包括自相关法和周期图法。由于受到阵列天线的物理孔径限制,称为“Rayleigh 极限”,无法辨认小于一个波束宽度的空间目标,并且抗噪声能力差,不能取得满意的效果。

70年代以来,主要的谱估计方法有 Pisarenko 谐波分析法, Burg 最大熵法, Capon 最小方差法^[8-9]等。这些方法统称为传统方法。后来,基于统计分析的最大似然 (ML, Maximum likelihood) 谱估计方法,因其具有很高的分辨性能和较好的鲁棒性而倍受到人们的关注,然而,最大似然估计法要对高维参量空间进行搜索,运算量极大,仅存在理论上的参看意义,很难在实践中得到应用^[10-12]。

80年代以后,学术界提出了一类基于矩阵特征值分解的谱估计方法。其中以 Schmidt 等人提出的 MUSIC (Multiple signal Classification) 方法和 Roy 等人提出的 ESPRIT (Estimating Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques) 方法为代表。它们分别基于信号子空间与噪声子空间的正交性和信号子空间的旋转不变性。以 MUSIC 为代表的特征结构分析法,具有很好的角度分辨能力。在一定的条件下, MUSIC 算法是最大似然法的一维近似实现,具备与最大似然法相近的性能^[13-16]。在这一点上 MUSIC 算法超过了其它算法,受到广泛的重视,其弱点是运算量偏大。ESPRIT 算法及其改进算法,如 TLS_ESPRIT, VIA_ESPRIT, GEESE 等,都有较好的分辨率。更重要的是这类方法避免了运算量极大的谱搜索过程,大大加快了波达方向估计的速度,这是其它方法所无法比拟的。但是, ESPRIT 算法及其改进算法需要通过特殊的阵列结构才能实现波达方向估计,因而适用范围相对较窄^[17-18]。

近年来,学术界认为常规的空间谱估计波达方向估计方法,如 ML, MUSIC, ESPRIT 等方法都忽略了信号的时间特性,而随着阵列信号处理技术日益广泛的应用,在许多场合中信号是配合其他信号使用的(如在通信领域)。因此有必要在使用常规方法进行空域处理的同时有效的引入适当的时域处理,更充分的利用信号中的有用信息。一些学者认为可以在空域和时域对信号同时进行采样,利用多出来的一维处理补充空域信息的不足,即利用空时二维阵列信号的处理方法,降低对阵列结构的约束,提高算法的抗噪能力。近年来,人们在探索同时利用时域和空域信息来改善波达方向估计的性能方面取得了重大进展,已成为阵列信号处理领域的前沿课题。其中,时域信息包括信号的高阶统计量、循环平稳性以及运动目标的多普勒频率等^[19-22]。

由于雷达、通信信号在一定的条件下具有循环平稳特性,人们近年来将循环平稳信号处理技术与传统空间谱估计方法相结合,提出了一系列基于信号循环平

稳特性的波达方向估计方法，如循环 MUSIC、循环 ESPRIT 等方法。由于循环平稳统计量对噪声和干扰特殊的抑制作用，同时由于不同信号的特征频率不同，因而这些方法在进行波达方向估计时具有信号选择的能力，能够大大提高算法的抗干扰能力、分辨能力^[23-25]。

针对实际中经常存在的有色噪声环境，近年来人们尝试采用基于高阶累积量的阵列信号的处理方法。由于高阶累积量对任意高斯噪声有自然盲性，基于累积量的算法使原有的波达方向估计算法所适应的观测噪声扩展到对称的非高斯空间有色噪声。

在阵列信号处理中，天线阵列接收来自多个信号源的信号，源信号可能是完全未知的，传输通道也是未知和时变的，而传输通道的不确定性是限制高分辨率波达方向估计算法实用化的主要因素之一。所以国内外学者提出了波达方向盲估计的概念。波达方向盲估计可以在未知通道特性的情况下估计信号波达方向，具有广阔的应用前景。自适应信号盲分离源于 1991 年 Herault 和 Jutten 的开创性工作，近年来人们提出了许多不同的算法，原则上这些盲分离算法都可以用于波达方向盲估计^[26-28]。

许多天然和人工的信号，如语音、生物医学信号、雷达和声纳信号，都是典型的非平稳信号，其特点是持续时间有限，并且是时变的。出于对实际系统的非线性、非平稳特性考虑，在波达方向估计中采用人工神经网络方法，也是近年来研究的方向^[29]。

近年来，由独立分量分析 (ICA: Independent Component Analysis)^[30-31] 发展起来的信号稀疏分解也在 DOA 估计中得到应用，DOA 估计算法正朝着多元化的方向发展。

1.4 本文的主要工作及内容安排

对智能天线的波达方向进行高精度的估计是数字定向波束形成的前提，因此波达方向估计算法的性能直接影响智能天线是否能快速、可靠地形成高增益定向波束来对准期望入射信号来波方向，抑制干扰信号，提高通信系统的容量和通信质量。本文重点研究智能天线技术中的波达方向估计算法，结构安排如下：

第一章：介绍本文的研究背景，研究目的和意义、发展现状和应用领域。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库