

# 移动卫星 天线姿态控制策略

曹海青◎著

非外借

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 移动卫星天线姿态控制策略

曹海青 著



机械工业出版社

本书共 5 章, 较全面地介绍可用于海上隐蔽式移动卫星天线系统, 分析了海洋环境中天线系统的姿态变化情况, 研究了海洋环境下的动载式卫星天线姿态控制策略。本书主要内容包括移动卫星天线系统设计、海洋力学性质研究、基于局域位置预测的天线姿态控制、基于多环自抗扰控制器的天线姿态控制和基于非光滑控制技术的天线姿态控制。本书的各章节对理论研究和仿真实验的方法进行了详细阐述。

本书适合通信工程、自动化及其他相关专业的高年级本科生和研究生阅读, 也可供从事卫星通信天线工程领域, 特别是移动卫星天线控制研究的工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

移动卫星天线姿态控制策略 / 曹海青著. —北京: 机械工业出版社, 2017.5

ISBN 978-7-111-56594-9

I. ①移… II. ①曹… III. ①移动通信—卫星通信—卫星天线—卫星姿态控制 IV. ①TN827

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 078401 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 朱 历 责任编辑: 陈大立

封面设计: 付海明 责任校对: 张万英

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·11 印张·216 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-56594-9

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

随着卫星通信技术突飞猛进的发展，移动卫星天线技术也迎来了前所未有的发展契机，尤其是在复杂环境中移动卫星天线技术得到更高的关注，众所周知使用环境的复杂性增加了移动卫星天线姿态控制的难度，而随着移动卫星天线在航空航天、海域通信、灾难救援等领域应用需求的增加，使得复杂环境下天线姿态控制成为当前的研究热点和技术难点。

本书研究了一种漂浮于海上的隐蔽式移动卫星天线及其姿态控制。全书共 5 章，内容包括小型漂浮式平板卫星通信天线系统设计、漂浮式天线的力学特性研究和漂浮式天线姿态控制策略研究；天线姿态控制策略包括基于局域位置预测的天线姿态控制、基于双环自抗扰控制器的天线姿态控制和基于非光滑控制技术的天线姿态控制；其中基于局域位置预测的天线姿态控制策略通过预测天线姿态的位置信息实现天线姿态的超前控制；基于双环自抗扰控制器的天线姿态控制策略利用自抗扰技术对复杂环境的扰动进行抑制，实现复杂扰动环境下的天线与目标卫星间的高质量通信；基于非光滑控制技术的天线姿态控制是在以有界扰动二阶系统为对象所研究的非光滑控制器的技术，构建了漂浮式卫星天线姿态非光滑控制器，不仅实现了天线姿态的快速控制而且很好地抑制了海洋环境的各种复杂扰动。

本书得到了首都经济贸易大学新入职青年教师科研启动基金项目（00791654490339）、北京市自然科学基金资助项目（4163072）和北京市教育委员会科技计划一般资助项目（SQKM20150037002）的共同资助，在此深表谢意！在本书内容的研究和撰写过程中，得到许多专家学者的大力支持和帮助，在此一并表示谢意！同时感谢我家人多年来对我无私的支持和帮助，本书的出版他们功不可没。

此外，由于卫星通信相关领域正快速发展中，且作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，尚希广大读者不吝指正。

曹海青

2016 年 9 月于北京

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 动载天线的研究现状	1
1.1.1 动载式天线产品概述	1
1.1.2 天线板	2
1.1.3 惯性导航	3
1.1.4 自动跟踪卫星技术	5
1.1.5 伺服控制策略	6
1.1.6 船舰载卫星天线	7
1.2 研究背景及意义	8
1.3 本书内容	9
第 2 章 漂浮式平板卫星通信天线系统	10
2.1 漂浮式卫星天线系统的设计	10
2.1.1 漂浮式基座的设计	10
2.1.2 漂浮式平板卫星天线的接收子系统	11
2.1.3 漂浮式平板卫星天线系统的性能指标	13
2.1.4 漂浮式平板卫星天线的半实物仿真平台	14
2.2 漂浮式卫星天线的静力学研究	15
2.2.1 浮性	16
2.2.2 稳性	19
2.2.3 抗沉性	25
2.3 漂浮式卫星天线伺服系统的动态响应研究	25
2.3.1 海洋涌浪	25
2.3.2 海浪波能谱	27
2.3.3 漂浮式卫星天线的漂浮运动	28
2.3.4 漂浮式卫星天线横摇运动	29
2.4 漂浮式卫星天线的姿态控制	32
2.4.1 天线姿态	32
2.4.2 天线姿态角间耦合性	34
2.4.3 天线姿态变化对通信影响的研究	37

2.4.4	横滚角动态补偿方法	41
2.4.5	天线初始寻星策略的改进	42
2.4.6	天线姿态的自动控制	50
<b>第 3 章</b>	<b>局域位置预测的天线姿态控制</b>	<b>53</b>
3.1	时间序列的局域混沌预测	53
3.1.1	时间序列及其应用	53
3.1.2	混沌预测	56
3.1.3	一种改进的时间序列局域预测法	57
3.2	天线方位的局域预测控制	58
3.2.1	漂浮式卫星天线位置预测	58
3.2.2	位置局域预测的天线方位 PID 控制	63
3.2.3	位置局域预测的天线方位 PID 控制仿真研究	68
3.3	天线方位伺服控制的免疫 PID 控制器	73
3.3.1	人工免疫系统	73
3.3.2	免疫反馈控制器	74
3.3.3	天线方位伺服控制的免疫 PID 控制器	76
<b>第 4 章</b>	<b>天线姿态控制的自抗扰控制器</b>	<b>80</b>
4.1	自抗扰控制	80
4.1.1	跟踪微分器	81
4.1.2	扩张状态观测器	84
4.1.3	非线性状态误差反馈控制律	87
4.2	天线俯仰系统控制的自抗扰控制器	88
4.2.1	漂浮式天线系统的自抗扰控制器	89
4.2.2	天线俯仰伺服系统位置环自抗扰控制器	89
4.2.3	天线俯仰伺服系统速度环自抗扰控制器	90
4.2.4	天线俯仰伺服双环控制器的仿真研究	100
4.2.5	天线俯仰伺服双环控制器的半实物仿真研究	106
4.3	天线姿态跟踪的自抗扰解耦控制器	107
4.3.1	漂浮式卫星天线姿态调整的三轴伺服系统	107
4.3.2	漂浮式卫星天线的自抗扰解耦控制器	113
<b>第 5 章</b>	<b>天线姿态控制的非光滑控制器</b>	<b>118</b>
5.1	一种新的非光滑控制器	118
5.1.1	非光滑控制	118
5.1.2	一种新的非光滑控制器	122
5.1.3	新的非光滑控制器的稳定性研究	123

5.1.4	新非光滑控制器的性能	126
5.2	天线姿态控制的非光滑输出反馈控制器	133
5.2.1	漂浮式天线方位系统控制的非光滑输出反馈复合控制器	134
5.2.2	漂浮式卫星天线方位伺服非光滑输出反馈控制器的仿真研究	135
5.3	天线姿态控制的非光滑前馈控制器	139
5.3.1	漂浮式天线方位系统非光滑前馈控制器	140
5.3.2	漂浮式卫星天线姿态控制的非光滑前馈复合控制器	143
5.4	天线姿态控制的非光滑 PID 控制器	146
5.4.1	非光滑 PD 控制器	147
5.4.2	非光滑 PI 控制器	148
5.5	天线姿态非光滑控制的仿真研究	149
5.5.1	非光滑复合控制器的 MATLAB 仿真研究	149
5.5.2	非光滑复合控制器的半实物仿真研究	153
参考文献		156

# 第 1 章

## 绪 论

简单地说, 卫星通信就是地球上的无线电通信站间利用卫星作为中继而进行的通信, 卫星通信以其通信距离远、覆盖面积大、通信容量大、机动灵活等优点已被广泛应用在各种领域。卫星通信系统由卫星和卫星通信地球站两部分组成。卫星通信地球站的作用是将用户的基带信号调制到微波信号上, 通过卫星传输到另一个地球站; 同时接收卫星的下行微波信号, 处理后进行解调, 获得基带信号。卫星通信地球站分为固定式地球站和移动式的地球站<sup>[1]</sup>, 固定式地球站是指卫星通信站固定在地球表面, 不可进行随意搬迁的地球站<sup>[2]</sup>; 移动式的地球站是指可以进行移动的卫星通信地球站。由于固定式地球站不可移动, 而且建设成本高, 故障恢复时间长, 导致通信具有一定的局限性, 使得未建固定地球站或地球站故障的地区成为通信盲区; 而移动式的地球站因其移动性和便捷性, 可以弥补固定地球站的缺陷, 应用在一些特殊的通信需求场所, 有关移动式卫星通信技术已得到了广泛的关注和研究。移动卫星通信技术也称为“动中通”(Satellite Communications on the Move)技术, 该技术集卫星通信天线技术、惯性导航技术、数据采集及信号处理技术、机械设计技术、伺服控制技术和卫星通信技术等于一体, 是以机电一体化、自动控制技术为主体, 多个学科有机结合的产物<sup>[3]</sup>。动中通技术的研究主要集中在车载式卫星天线、机载式卫星天线、舰载式卫星天线、弹载式卫星天线和星载式卫星天线产品及相关技术等的研究, 这些天线有一个共同的特点, 就是天线通信部件和伺服控制系统安装在一个可以移动的载体上, 因此可将这类天线系统称为动载式卫星天线系统。目前, 动载式卫星天线已经被广泛应用于应急通信、电视转播、航空指挥、舰载导航、特勤临时通信等领域<sup>[4-6]</sup>。

### 1.1 动载天线的研究现状

#### 1.1.1 动载式天线产品概述

动中通技术的研究始于 20 世纪 80 年代的美国和日本, 最早出现在美军的装备中, 位于麻省的沃尔瑟姆雷声公司率先制造出可以安装在“悍马”车和高级极高频飞机上的动中通产品 SMART-T; 2004 年美国 L3 通信公司设计开发了多功能卫星移动通信终端, 用于装备海军陆战队、空军、预备役部队和国民警卫队; 2005



年美国通用动力公司 C4 为美国陆军成功研制了移动卫星通信系统 SOTM；同时俄罗斯、印度、日本、以色列、意大利、澳大利亚等国也纷纷对卫星移动通信展开深入研究。目前动中通技术的研究重点集中在车载、船舰载、机载、星载和弹载等运动载体上卫星通信的研究，其相关技术日趋成熟，国内外成熟的产品也较多，其中美国海洋通信有限公司、美国 KVH 公司、美国 Orbit 海事通讯有限公司、韩国 WiWorld 公司、美国 JPL (Jet Propulsion Laboratory)、TracStar、Sea Tel、日本三菱电子有限公司、以色列 RaySat 公司、澳大利亚柯顿公司等先后研制出军用和民用的动载式卫星天线<sup>[7-10]</sup>。我国移动卫星通信产业起步于 20 世纪 90 年代，2000 年北方波尔科技有限公司第一次研制出可用于陆地、海上、空中的移动式卫星接收系统，2002 年重庆航天测量通信技术有限公司研制出动态电子信息化系统，可用于移动的火车、汽车、轮船上实时收看卫星转发的多套赛事节目；而现如今移动卫星通信产业呈现出蓬勃发展的态势，中国电子集团 39 所、中国电子集团 54 所、中国航天科技集团公司重庆巴山仪器厂、中国卫星集团、北京航天仪器研究所和一些高等院校也纷纷投入人力物力进行动中通卫星天线产品及技术的研究和开发，也推出了一些具有自主知识产权的产品，但与国外产品相比，国内产品具有体积庞大、工作频段低、天线跟踪速度慢和运动范围受限、座架谐振频率低、初始捕获和重新捕获时间长、通信业务量少、成本高等缺点。

### 1.1.2 天线板

动载式卫星天线系统中所使用的天线多为具有跟踪功能的相控阵板式天线或机械跟踪板式天线。相控阵天线是通过电控方式改变相控阵列中辐射单元相位，使波束按要求对空间扫描的天线；即通过控制阵列天线中辐射单元的馈电位来改变方向图形状的天线，控制相位改变天线方向图最大值的指向，以达到波束扫描的目的；这种天线具有波束扫描速度快，相位变化速度快的特点<sup>[11-13]</sup>。相控阵天线的关键器件是移相器和辐射单元，移相器分为连续式移相器和数字式移相器，连续式移相器可以在  $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$  内连续变化，数字式移相器的移相值是离散的，只能是  $(1/2)^n \times 360^{\circ}$  的整数倍，其中  $n$  为数字式移相器的位数；天线辐射单元的设计应使一定移相范围内（或波束扫描范围内）和一定频率范围内的输入阻抗变化尽可能小，以保证发射器正常工作，防止由于射频信号的多次反射而出现寄生副瓣和方向图中出现凹点（盲点）的现象。相控阵天线的馈电方式分为传输线馈电和空间馈电两种，在传输线馈电方式下，射频能量通过波导、同轴线和微带线等微波传输线馈给辐射单元；在空间馈电方式下，发射器产生的射频能量通过辐射装置辐射至自由空间，传输一段距离后由一个接收阵接收，接收阵的每个单元或一组单元所接收到的信号，经过移相器移相后再馈给发射阵的发射单元并辐射出去，在这种情况下移相器位于发射阵和接收阵之间<sup>[14,15]</sup>。相控阵天线具有低剖面、

高速跟踪的优点,但价格昂贵。机械跟踪天线是利用机械的方法驱动天线将波速指向卫星,主要包括抛物面天线、平板天线和微带天线;抛物面天线分为发射天线和接收天线,发射天线由馈源发出的球面电磁波经抛物面反射后成方向性很强的平面波束向空间辐射,可以将无线信号直线发射到卫星或者其他抛物面接收天线;接收天线由抛物面反射器将垂直信号反射收集到馈源;抛物面天线结构简单,方向性强,工作频带宽,是目前较为常用的一种天线。平板天线是直接接收式天线,与抛物面天线相比其天线面起接收信号的作用,而抛物面天线面是起反射作用;平板天线的天线面由天线保护层、接收天线层、印制电路板的介质层和接地导体层组成,其中接收天线层由许许多多排列整齐的单元振子天线阵组成,由于要保证天线振子的同位性,故其工艺要求较高,但这种天线的衰耗小、效率高。微带天线是在一个薄介质基片上,一面附上金属薄层作为接地板,另一面用光刻腐蚀方法制成一定形状的金属贴片,利用微带线或同轴探针针对贴片馈电构成天线;微带天线具有小型化、易集成和方向性好等优点,其应有前景广阔。近年来还有一些学者研究和设计其他形状类型动中通天线,其中船舶重工集团的钱平于2011年设计了塔状结构的船载天线,安装于小型舰艇上,经实践证明该天线系统的结构设计安全可靠,可在恶劣环境下正常稳定工作<sup>[16]</sup>。电子科技大学的景侯等于2011年为动中通设计了四臂螺旋式天线,这种天线具有很好的电子特性,可应用于海事移动式通信<sup>[17]</sup>。

### 1.1.3 惯性导航

动载式天线系统因天线安装在运动的载体上,载体的运动和卫星的摄动会造成信号的丢失,引起通信中断,因此如何隔离载体运动和实时跟踪卫星是动中通的关键,目前采用惯性导航系统来保障动中通通信的稳定性。惯性导航系统的基本工作原理是以牛顿定律为理论基础,通过惯性测量元件测量载体的运动参数(速率和加速度等),利用坐标变换和数学解算来补偿和修正测量元件的输出,实现载体运动隔离<sup>[18]</sup>;一般把惯性导航系统划分为平台式惯性导航和捷联式惯性导航两类。

#### 1. 平台式惯性导航

平台式惯性导航系统就是在天线和载体之间构建一个机电式的稳定平台,通过三个惯性级的加速度计分别测量出平台坐标系的三个正交轴向加速度信息,根据加速度信息求出力的信息,然后通过坐标变换将其转换为导航坐标系中三个正交轴向的力,接着通过计算和补偿求出载体相对于导航坐标系加速度的三个分量,利用积分计算出载体相对导航坐标系的速度和位置;平台式惯性导航的核心是一个惯性级的陀螺稳定平台,就是充分利用陀螺的定轴性和进动性,以陀螺为敏感元件,隔离载体的角运动并能使被控对象按指令旋转的机电控制系统。陀螺稳定

平台的主要作用就是使平台能自动产生卸荷力矩抵消干扰力矩,卸荷力矩包括两种类型,其一是由固定在平台体上的陀螺产生陀螺力矩,其二是由平台的伺服回路产生的伺服力矩,根据两类力矩在卸荷力矩中所起的作用不同,将陀螺稳定平台分为直接式陀螺稳定平台、间接式陀螺稳定平台、指示式陀螺稳定平台、动力式陀螺稳定平台和指示动力式陀螺稳定平台。目前,动力式陀螺稳定平台和指示动力式陀螺稳定平台在工程中应用较广,而且可以是单轴、双轴和三轴的稳定平台。平台式惯性导航系统主要依靠惯性测量元件和导航计算,其计算量小,容易补偿和修正测量元件的输出,但自主能力差,结构复杂,成本较高。

## 2. 捷联式惯性导航

捷联式惯性导航系统是将惯性测量元件直接安装在天线单元上,用“数学解析平台”代替平台式惯性导航系统中机电式稳定平台,实现天线跟踪卫星不受载体运动的影响而始终保持要求的姿态,就是将惯性测量元件测量到的信息直接送至智能计算单元(计算机或者MCU)进行实时的姿态矩阵解算,通过姿态矩阵把测量的加速度信息转换到导航坐标系中,然后再进行导航计算,并从姿态矩阵的有关元素中提取出天线的姿态信息<sup>[19]</sup>。捷联式惯性导航对惯性测量元件的要求较高,易受环境的影响,且误差随时间累积会影响测量结果,因此为了克服上述缺点,一般采用以下几种具有捷联式惯导的组合导航系统。

(1) 数字罗盘(罗经)/GPS组合方案。该方案由数字罗盘测量载体的航向角、俯仰角和横滚角,GPS测量载体位置信息,通过在智能计算单元中进行坐标变换,解算出天线的姿态信息,再通过伺服控制调整天线的指向。万德钧、周一和任天民应用陀螺罗经和GPS组合构成船用捷联惯导系统<sup>[20]</sup>。

(2) IMU/GPS组合方案。该方案利用三个垂直安装的速率陀螺测量值,通过姿态解算算法来跟踪天线的姿态变化,用GPS测量载体的航向变化,需要进行大量的数据处理,需要耗费大量的资源来补偿载体姿态角精度和陀螺漂移的影响,其跟踪精度受传感器的影响较大,而且成本较高<sup>[21]</sup>。滕云鹤、毛献辉、章燕申等和Paul G Savage采用捷联式激光陀螺和GPS组成组合导航系统进行天线稳定性研究<sup>[22,23]</sup>。

(3) 全自主捷联惯导方案。该方案使用高精度的陀螺和加速度计作为惯性测量元件,利用数学计算平台解算和补偿天线姿态信息,无需GPS信号,是完全自主的惯性导航<sup>[24]</sup>。何昆鹏、许德新、吴简彤和程万娟利用3只光纤陀螺和3只加速度计组成船用捷联惯导系统<sup>[25]</sup>。

(4) 陀螺直接稳定方案。该方案是将陀螺直接安装在天线上构成多轴稳定方式,测量天线的姿态信息,并将姿态信息应用于伺服系统中构成稳定环节。陶可妍、靳英卫和闫英敏使用陀螺传感器和电子罗盘、16位单片机、伺服系统和接收天线,组成了车载捷联导航系统<sup>[26]</sup>。

总之,捷联式惯性导航相比平台性惯性导航系统结构简单,成本比较低,便于维护,可提供更多的导航和制导信息,具有较高的可靠性。

#### 1.1.4 自动跟踪卫星技术

动载式卫星天线要实现天线与卫星间的高质量通信,就必须能及时隔离因载体运动所引起天线指向偏离卫星最佳通信区域的影响,即在载体运动过程天线系统可以利用一定控制策略及时调整自身姿态保证天线指向始终处于天线与卫星的最佳通信区域,实现天线自动跟踪卫星。目前,天线跟踪目标卫星的方式可分为手动跟踪、程序跟踪和自动跟踪。其中,手动跟踪是根据经验或预知的目标位置随时间变化的规律,由人工及时调整天线的指向,或者是根据收到信号的大小由人工方式操纵跟踪系统,使接收信号最强<sup>[27]</sup>。手动跟踪主要用于动载式天线的调试和初始寻星,自动化程度较低,跟踪效率受人为因素影响较大。程序跟踪(又称惯导指向跟踪)主要工作原理是利用GPS或其他设备获取载体所在的地理信息,利用载体上的惯性导航装置测出载体的姿态参数(包括载体相对正北方向的航向角、载体相对水平面的横滚角和俯仰角),根据目标卫星的星历数据,通过天线控制计算单元进行坐标变换和解算,计算出天线对准卫星所需的方位角、俯仰角和极化角,然后驱动天线伺服机构实现对卫星的跟踪。这种跟踪方式的跟踪速度较快,可以进行极化跟踪,系统实现简单,容易实现对卫星的快速初始捕获。但由于地球的密度不均匀和其他干扰的影响,星历数据会随着时间有小的变化,一般很难计算出长时间的精确轨道数据,所以长时间跟踪会有积累误差<sup>[28]</sup>。程序跟踪一般应用于动载式天线初始自动寻星,利用程序跟踪可以提供动载式天线初始对星的自动化水平。自动跟踪是指根据天线接收到卫星所发的信标信号,通过变频、放大、输入跟踪接收机,跟踪接收机检测出姿态误差信号,将误差信号作为控制策略的控制量,利用所用的控制策略由伺服控制器驱动天线转台系统,使天线自动地对准卫星,这种跟踪方式没有误差累积,可以长时间连续跟踪。根据自动跟踪原理和设备组成,自动跟踪可分为步进跟踪、圆锥扫描跟踪和单脉冲自动跟踪。步进跟踪(又称极化跟踪)是指天线指向以一定的步长向接收电平增大的方向进行不断调整,是一种开环控制方式,跟踪精度较低,跟踪速度慢。圆锥扫描跟踪是把馈源绕天线对称轴作圆周运动,或者把副面倾斜旋转,这样天线波束就成圆锥状旋转,当天线轴对准卫星时,地球站收到的信标电平是一恒值,当天线轴偏离卫星时,信标电平将受到一个频率极低的信号对其进行幅度调制,调制频率与波束的旋转频率相同,调制深度与波束偏离卫星的距离有关,调制的相位与波束偏离的方向有关,所以根据调制信号的幅度和相位就能检测出天线波束指向误差。圆锥扫描跟踪的优点是设备简单,缺点是馈源永远偏离抛物面的焦点,使天线增益下降,只能满足低速运动跟踪系统。单脉冲自动跟踪是当天线的射束

固定时, 在一个脉冲的间隔时间内就能确定天线波束偏离卫星的大小和方向, 获取天线伺服轴运动的误差信号以驱动伺服系统, 使天线迅速对准卫星。单脉冲自动跟踪有多喇叭方式和高次模方式。多喇叭方式通常有幅度比较和相位比较两种, 对于抛物面天线, 通常配置多个喇叭, 用幅度比较方式产生误差信号进行跟踪; 高次模方式则是当天线对称轴偏离卫星方向时, 提取馈源波导管内产生的高次模作为位置误差信号进行跟踪。单脉冲自动跟踪体制的跟踪速度和跟踪精度都比步进跟踪体制和圆锥扫描跟踪体制要高出几个数量级, 但它设备复杂, 成本较高<sup>[29]</sup>。

### 1.1.5 伺服控制策略

动载式天线稳定跟踪目标卫星的关键是设计出科学合理的天线伺服控制跟踪系统<sup>[30]</sup>。有关动中通卫星天线的伺服控制研究重点集中在伺服控制执行机构和控制方法的研究。

#### 1. 伺服控制执行机构

动载天线的姿态控制和自动跟踪目标卫星中, 对于不同类型的天线采取了不同的伺服执行机构。

(1) 车载式天线主要采用了两轴和三轴伺服执行机构, 两轴伺服执行机构分别用于天线姿态方位和俯仰的调整与控制, 三轴伺服执行机构用于天线姿态方位、俯仰和极化的调整与控制<sup>[31-33]</sup>。两轴执行机构结构简单, 缺点是一般需要范围较大的测量装置, 无法进行极化姿态的调整和跟踪, 而三轴执行机构成本较高, 但可以进行极化姿态的调整和跟踪, 其跟踪效果较好。

(2) 船载式天线主要采用两轴、三轴和四轴伺服执行机构, 两轴执行机构实现方位和俯仰姿态的调整与控制; 三轴执行机构实现方位、横摇和俯仰姿态的调整与控制; 四轴伺服执行机构实现横滚、方位、俯仰和纵摇姿态的调整与控制。但两轴伺服执行机构在姿态调整和卫星跟踪过程中易出现跟踪盲区; 三轴执行机构转换环节少, 精度较高, 但与敏感元件的精度有关; 四轴执行机构独立性强, 但可靠性高, 精度取决于惯导平台的精度<sup>[34-36]</sup>。

(3) 机载天线主要采用单轴、三轴和四轴伺服执行机构, 单轴执行机构实现共轴式无人机天线倾斜姿态的调整和控制; 三轴执行机构实现偏航角、横滚角和俯仰角的调整与控制; 四轴伺服执行机构实现内方位角、外方位角、内俯仰角和外俯仰角的调整与控制<sup>[37-39]</sup>。

(4) 星载天线采用双轴执行机构进行方位和俯仰姿态的调整和控制<sup>[40,41]</sup>。

(5) 弹载式天线一般采用捷联式稳定平台来实现天线姿态的调整与控制<sup>[42]</sup>。

#### 2. 控制方法

动载天线伺服控制中开环控制和闭环控制均得到了广泛的应用, 两者的差别



主要是在控制过程中是否通过接收到卫星信号作为系统反馈的依据,即开环控制主要被用于极化调整和俯仰调整,闭环控制被用于方位调整、俯仰调整和横滚调整。而在动载式天线伺服控制中关键是所采用的控制算法,目前天线伺服系统所采用的控制算法主要有PID控制算法、模糊PID控制算法、变结构控制算法和预测控制算法。南京邮电大学的顾晓强等和上海交通大学的夏芳等将经典PID算法应用在车载动中通卫星通信系统方位角的控制,保证了动中通天线方位角在复杂运动条件下的稳定性<sup>[43]</sup>,但PID控制算法易出现积分饱和,参数优化时间较长,控制精度不高等缺陷;南京邮电大学的顾晓强和赵来定及台湾清华大学的ChangPo-Kuang和Lin Jiu-Ming将模糊PID算法应用车载动中通方位角的控制,保证了在复杂路况条件下方位角的稳定性<sup>[44-46]</sup>,但模糊PID算法需要根据不同的情况建立相对应的模糊规则,且动态响应时间较长;北京航空航天大学李光军、刘强和刘建章在 $H^\infty$ 混合灵敏度约束下PID参数的稳定域内,采用遗传算法对PID控制器的参数进行了优化,通过仿真实验表明天线系统具有响应快速而平稳、抗负载扰动和模型误差能力强的特点<sup>[47]</sup>;上海大学的陶佳安将滑模控制算法应用于高性能天线伺服控制器的研究与设计中,改善了经典PID控制的积分饱和现象,提高了控制精度,减少了外部干扰和内部可变参数对系统的影响,增强系统的鲁棒性<sup>[48]</sup>;湖南科技大学的徐宏略、吴新开和张敏海在分析动中通中所用的永磁同步电动机数学模型的基础上,将智能滑模变结构控制策略引入到双闭环矢量控制中,经仿真表明这种智能交流伺服控制系统具有更强的鲁棒性与更好的快速响应性<sup>[49]</sup>;北京理工大学的余创和刘向东将自适应滑模变结构方法应用于卫星天线跟踪指向的位置环控制中,仿真实验结果表明这种方法可减少外部干扰和自身参数变化对系统的影响,其控制性能良好,输出稳定,具有较强的鲁棒性<sup>[50]</sup>;北京科技大学的李果、胡剑飞和姬献征设计了 $\mu$ 鲁棒控制器应用于移动卫星天线控制,使得移动卫星天线可适应外界环境不同路况的变化<sup>[51]</sup>。

### 1.1.6 船舰载卫星天线

船舰载卫星天线是将动载式卫星天线系统安装在船舰等载体上实现在海上的移动式卫星通信。一般船舰载卫星天线将天线安装在稳定的转台支架上,通过转动支架的运动补偿天线姿态的变化保证天线指向卫星的最佳通信区域。目前,主要应用两轴转台支架、三轴转台支架和四轴转台支架,其中两轴转台主要实现天线方位角和俯仰角的偏差补偿,三轴转台主要实现天线方位角、俯仰角和横滚角的偏差补偿,四轴转台实现方位角、俯仰角、横滚角和因船舰纵摇运动所造成天线指向偏离卫星通信区域的偏差。船舰载天线的姿态控制策略主要有PID、模糊PID、内模控制和容错控制等策略;船舰载天线要求即使在船舰的横滚角或纵摇角超过 $15^\circ$ ,也不会影响天线与卫星间的通信,同时尽可能避免周围的障碍物,在

障碍物遮挡消失后,天线能在较短的时间内实现与卫星的重新通信,这样对天线系统的安装位置和安装方式提出了特殊的要求。此外,由于舰船上安装有雷达等其他通信天线,为了避免天线间的耦合影响,增加了天线的安装方式及位置选择<sup>[26,52-54]</sup>。目前舰载天线的质量较大,最大可达 300kg,体积大,隐蔽性差,无法满足海上军事隐蔽式通信所需。

## 1.2 研究背景及意义

海事卫星移动式通信是通过将海事动载式卫星天线安装在舰船等载体上,随着舰船的漂移实现卫星天线接收系统的移动,通过这种方式实现茫茫海域中通信。但这种通信方式承载天线接收系统的载体与天线接收系统相比,载体的重量比天线接收系统大得多,载体本身对海洋涌浪扰动抑制能力比较强,这样海洋涌浪扰动对天线对准目标卫星的姿态控制影响较小,很容易实现天线与卫星间的高质量通信。虽然目前海事动载式天线已经被广泛应用于各种海上卫星通信应用场合,但却无法应用于海上隐蔽式的军事侦察通信,究其原因是由于这种海事移动式卫星通信方式承载天线接收系统的载体体积太大,不具备隐蔽性,易暴露目标;同时采用这种方式的海事卫星移动式通信因承载天线通信系统的载体成本较高,无法实现低成本的海上卫星通信全覆盖。近年来,我国近海海域安全出现了严峻的挑战,菲律宾和日本等与我国海域的近邻国,经常在我国海域和周边公海内引发一些争端。为此急需一种漂浮于海面隐蔽性较强的卫星通信实施,可以及时监测过往海域的舰船,并能及时将监测结果传输到指定的地点,这必将增强我国海域防范的威慑力。

另外,一些激进分子打着各种旗号明目张胆地扰乱我国海域秩序,无视我国海防尊严。还有近年来国际恐怖分子和海盗经常在一些海域明目张胆地抢劫和绑架过往船只,一旦这些船只上固有的通信系统出现故障或遭到破坏后,船只基本上就成为失控状态,无法与外界发生联系,耽搁或延误了最佳的搜救时间。如果能有一种隐蔽性较强的移动式卫星通信天线漂浮于海面不仅可以实现临时救援通信,而且可以实时监测到失控舰船的状况,为及时搜救和救援提供必要的保障。

综上所述,小型漂浮式的卫星天线体积小,隐蔽性高,可以漂浮于我国近海海域,可实现在海洋环境扰动下天线与卫星间的稳定通信。由于这种小型漂浮式卫星天线漂浮于海面,在一定范围内随流淌行,海洋环境的扰动对其漂浮状态影响较大,必将对天线指向卫星最佳通信区域的姿态影响较大,故需进一步研究海洋环境扰动下的小型漂浮式卫星天线的控制策略,以保证天线与卫星间的通信质量。所以,小型漂浮式卫星天线的研究对增强我国国防力量,强大我国海防的防御能力,打击海域反恐和失事舰船的搜救有着十分重要的意义。

## 1.3 本书内容

本书是研究一种漂浮于我国近海海域的新的小型天线的姿态控制策略,实现海洋环境扰动下新的小型漂浮式卫星天线姿态控制,保证天线与卫星间高质量的通信。其研究内容具体如下:

第1章研究动载式天线的现状,总结了目前动载式天线的产品、天线板、惯性导航技术、自动跟踪卫星技术和伺服控制策略等动载式天线密切相关的技术现状;结合隐蔽式军事侦察通信的需求提出了研究一种新的小型漂浮式卫星天线的价值和意义。

第2章重点研究新的小型漂浮式卫星天线结构;研究小型漂浮式卫星天线基座的静力学性质,保证小型漂浮式卫星天线系统在海面漂浮过程具有良好的海洋力学特性;研究小型漂浮式卫星天线的动态响应特性,确定了在风级小于4级、中小涌浪海况下小型漂浮式卫星天线系统的运动情况;研究天线系统姿态角及其耦合关系;研究小型漂浮式卫星天线姿态自动控制,确定课题研究的重点为在海洋环境扰动下天线姿态自动控制的控制策略。

第3章重点研究小型漂浮式卫星天线位置局域预测的天线姿态自动控制策略。利用改进混沌局域预测理论,以GPS所测的小型漂浮式卫星天线少量位置信息为预测源信息,对天线下一时刻可能到达的位置进行预测,根据预测值求出天线系统即将产生的偏差值,将此偏差值作为PID控制器的输入量,对小型漂浮式卫星天线姿态调整进行超前控制;同时为了改善PID控制对海洋中扰动的抑制性能,将免疫反馈原理用于PID控制器的改善,提高小型漂浮式卫星天线在海洋漂浮过程中姿态控制精度和效率。

第4章研究由小型漂浮式卫星天线位置环和速度环所组成的天线姿态双环自抗扰控制器,实现海洋环境扰动下的小型漂浮式卫星天线的姿态自动控制;另外将自抗扰控制器应用于小型漂浮式卫星姿态控制过程中所使用的三轴伺服执行机构的解耦控制。

第5章研究一种新的非光滑控制器及其快速收敛性和扰动抑制能力,并将其应用于小型漂浮式卫星天线的姿态自动控制中。研究了新的非光滑输出反馈控制器,实现小型漂浮式卫星天线姿态控制的快速性,同时降低了系统响应的超调量;研究了新的非光滑前馈控制器,并将其应用于预测小型漂浮式卫星天线在海洋漂浮过程中所受到的扰动;研究了非光滑PID控制器,改善了传统PID控制器快速性和系统超调间的矛盾。研究由非光滑输出反馈控制器、非光滑前馈控制器和非光滑PD控制器组成小型漂浮式卫星天线姿态复合控制器,实现海洋扰动下的小型漂浮式卫星天线的姿态控制。



## 第 2 章

# 漂浮式平板卫星通信天线系统

漂浮式卫星天线系统由漂浮式基座和天线通信子系统组成,这种漂浮式天线主要应用于我国近海海域隐蔽式军事侦察的通信中。本章主要研究一种新的漂浮式卫星天线的姿态控制策略,研究此类天线系统的性能指标,设计验证控制策略的半实物仿真平台;研究基座的力学性质和动态响应特性,分析在风级小于四级的中小涌浪海况中天线横摇运动和纵摇运动情况以及天线系统的姿态变化情况;研究天线姿态间的关系,验证通过动态补偿的方法隔离天线横滚角变化对通信影响的可行性;将模式聚类和神经网络应用于改善天线初始寻星策略;研究小型漂浮式卫星天线在海洋环境漂浮时所受到的环境扰动情况,并提出用扰动抑制率和扰动消失影响实践来评价控制策略的扰动抑制效果。

### 2.1 漂浮式卫星天线系统的设计

漂浮式卫星天线系统是一种新型的海事卫星天线系统,将在一定范围内随流淌行于我国近海海域,用于海域隐蔽式军事侦察通信。这种新的漂浮式卫星天线系统由小型漂浮式基座和卫星通信天线接收子系统组成,基座为承载天线接收子系统的载体,天线接收子系统固连接于基座上。故漂浮式卫星天线的设计包括小型漂浮式基座的设计和卫星通信天线伺服系统的设计。

#### 2.1.1 漂浮式基座的设计

目前,有关海洋漂浮体设计的研究集中于海船、舰艇、潜艇、海洋作业平台等大型设施的设计,这些漂浮体的排水量达成百上千吨,其几何尺寸庞大。而有关新漂浮体的设计一般以近似理论为基础;根据几何相似原理以现有的漂浮体为原型按比例确定新漂浮体的几何尺寸;根据物质相似原理以原型为基础确定新漂浮体的质量及其分布;根据运动相似原理以原型的运动为基础,在相同的海况条件下研究新漂浮体的运动状态<sup>[55]</sup>。而本节却无法用近似理论来设计基座模型,具体原因如下:

(1) 假设应用近似理论来设计基座模型。以某千吨级的货船为原型进行设计,该货船的基本参数为总长  $L=75\text{m}$ ,型宽  $B=13.4\text{m}$ ,型深  $D=5.4\text{m}$ ,设计吃水  $d=4.2\text{m}$ ,排水量为  $\nabla=2\ 858\text{t}^{[55]}$ ,若选择几何比例常数为 10,则基座的基本参数为  $L=7.5\text{m}$ ,