

卫星跟踪测量技术研究 (文集)

黎孝纯 著 ■



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

卫星跟踪测量技术研究

(文集)

黎孝纯 著

西安电子科技大学出版社

p236/14

内 容 简 介

本文集共收录 22 篇论文,分六个部分。第一部分讲述锁相环的捕获、VCO 噪声分析和 AGC 环分析;第二部分讲述舰载测量设备中舰摇对跟踪测量的影响和多径反射对跟踪测量的影响;第三部分讲述空间交会对接微波雷达方案;第四部分讲述双星定位入站信号快速捕获攻关研究结果;第五部分讲述调频调相应答机距离零值测量理论和方法;第六部分讲述中继星星间链路天线跟踪指向系统中几个技术难题的解决途径。

本文集内容丰富,系统性和可读性较强,可供高等院校跟踪测控工程专业本科生和研究生产学习参考,也可供相关专业的科研工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星跟踪测量技术研究:文集/黎孝纯著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2014.10
ISBN 978 - 7 - 5606 - 3411 - 1

I. ① 卫… II. ① 黎… III. ① 卫星跟踪—卫星测量法—文集 IV. ① P236-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223242 号

策 划 戚文艳

责任编辑 王 瑛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 北京京华虎彩印刷有限公司

版 次 2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 13

字 数 292 千字

印 数 1~1000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3411 - 1/TP

XDUP 3703001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

作者简介



黎孝纯，男，1938年9月生于四川省渠县一个农民家庭，12岁开始念书，1962年成都电讯工程学院（现电子科技大学）雷达专业毕业。1959年9月加入中国共产党。

1968年以来，一直从事卫星通信、跟踪测量、定位技术的研究。现任中国航天科技集团公司第五研究院西安分院（原五〇四所）研究员。曾任中国宇航学会第二、三届飞行器测控专业委员会委员（1987—2000年），中国宇航学会第二、三届遥测专业委员会委员（1987—2000年），航天五院学科学术带头人和五院科技委员会委员（1995—2000年）。在40多年的科研攻关中，负责完成了十余种精密测控设备的设计和研制，获10项国家发明专利（均为第一发明人），发表论文40多篇，主持编著《锁相技术基础》、《星间链路天线跟踪指向系统》两本书，主持合作形成了三个理论创新（“调频调相应答机距离零值测量理论”、“对宽带数据传输信号的角跟踪理论”、“星间链路天线恒线速度螺旋扫描捕获理论”）。2006年获航天五院优秀发明人称号。获国家发明三等奖、四等奖各1次；获部科技进步一等奖2次、二等奖4次、三等奖5次；享受政府特殊津贴。

人生格言

“难题是成功的机会，抓住难题攻坚不止，难题被突破了，你就成功了。”

“发明是一种诀窍，它用一种简单的方法和设备解决了一个按传统途径无法解决的技术难题。”

“发明产生于对基本概念的深刻准确理解、灵活应用和精心设计。”

以上三条是黎孝纯撰写的人生格言，被收入在由人民日报出版社 2004 年 10 月出版的《人生格言经典》一书的第 185、307、513 页。

前 言

世界空间技术的发展日新月异,空间资源开发的市场竞争日益加剧,中国的航天事业方兴未艾。正如江泽民在第47届国际宇航联大会上指出的那样:“航天事业的前景十分广阔,即将到来的二十一世纪是航天事业蓬勃发展的新世纪。”

四十多年来,中国的航天事业得到了飞速发展。本文集是作者从一个农民孩子跟随共和国成长起来、经历了中国航天事业的这段发展史、成为一名普通航天科技人员的习作。

本文集分六部分:第一部分包括论文一至论文三;第二部分包括论文四至论文八;第三部分包括论文九;第四部分包括论文十;第五部分包括论文十一至论文十六;第六部分包括论文十七至论文二十二。

第一部分为“锁相环和 AGC 环的分析”。

1980 年前后,锁相环是我国的一个研究热点,论文一“VCO 噪声对锁相环的影响”发表于 1975 年,是我国第一篇研究 VCO 噪声对锁相环的影响的文章。当时,卫星测控设备的锁相环频率捕获是一大难题,要求锁相环捕获性能满足宽频带、高灵敏度、快速(捕获时间不大于 1 秒)和防错锁四项要求。

论文二“宽频带频率引导捕获方法和装置”巧妙地将计算机用于锁相环捕获。计算机控制扫描时将环路滤波电容短路,使环路成为不包含惯性元件的环路,扫描速度提高 20 倍,满足了上述四项性能要求。1986 年此技术获国家发明专利,并实现了技术转让。作者对此总结如论文二最后所述:工程中的一个装置产生于发明者对基本物理概念的深刻而又准确的理解,以及在具体工程条件下的灵活应用和精心设计。这已成为作者后续几十年攻关科研难题的一个指导思想。

研究锁相环的较多理论成果集中在由杨士中、黎孝纯等编著的《锁相技术基础》(人民邮电出版社出版,1978 年)一书中,其中第 1~5 章以及附录 A、附录 B 由黎孝纯编写。

论文三“自动增益控制环路的线性分析和设计”于 1988 年发表,该文对工程设计有很好的指导作用。

第二部分为“舰载测量设备分析”。

舰载测量设备与陆站测量设备的不同点之一,是舰摇对测速、测距、测角的影响。作者采用位置矢量法完成了舰摇对测速、测距影响的分析,其分析方法是比较巧妙的。

论文四“舰摇对多普勒测速精度的影响”发表在《空间电子技术》1979 年第 3 期上。一位比作者年长的专家(研究员)说此文是错的。有关的技术争论到 1989 年,十年过去了,他仍坚持说此文是错的。作者只好要求 504 所出函请负责舰载设备的测量通信研究所进行鉴定,鉴定结果是“本成果使用位置矢量投影法,在合理假设条件下,分析了舰摇对多普勒测速的影响,推导出简便而实用的修正公式,可用于测量船双频测速修正”(附录 C)。

在这个问题上,使用位置矢量投影法,使分析大为简化。在这十年里,作者经受了一种特殊的考验。

从论文五“修正舰摇引起多普勒测速误差的实验研究”可以看出,摇摆台上的实验证明作者的分析方法和所得的测速修正公式是正确的。

舰载测量设备的另一个问题是海浪形成多径反射对卫星测量的影响。论文七和论文八中,多径反射信号对测速、测距的影响的分析是较为全面的,得到了各种极化(线极化和圆极化)入射波经不同表面(光滑平面镜反射、粗糙面镜反射、粗糙面漫散射)形成多径信号引起测速、测距误差的表示式。

第三部分为“空间交会对接”。

论文九“空间交会对接微波雷达”研究的是星上测角、测速、测距和通信的综合系统,该方案具有交会对接全程测量能力和可靠性高的优点。

第四部分为“双星定位系统”。

双星定位入站信号快速捕获是双星定位系统中最关键的技术之一,美国 Geostar 公司宣称,它拥有此项技术,是美国政府批准的专利,不出售。Geostar 公司凭借这些专利与世界上一些国家合作建立双星定位系统。1986 年以来,作者及其同事利用 6 年的时间,突破了这项关键技术,且技术性能优于 Geostar 公司的专利水平。

第五部分为“调频调相应答机距离零值测量”。调频调相应答机距离零值测量是 20 世纪 80 年代末 90 年代初中国航天测控界的一个技术难题。作者及其同事突破了这一难题。1990 年 1 月提出了“调频调相应答机距离零值测量方法”,陈芳允先生主持论证了此方法,同行认为微波倍频调制度变换器方法巧妙。1992 年 6 月采用该方法的设备完成了调频调相应答机距离零值测量,接着完成了调频调相应答机距离零值分析,1995 年获国家发明专利,在实践中形成了一套较为系统、完整的理论和测量方法,走出了一条中国自己的路。相应的设备已应用于中国的多种卫星的距离零值测量。

经过 18 年的攻关研究,在 2008 年,作者发表了论文十六“调频调相应答机距离零值测量新方法”,完全解决了调频调相应答机距离零值测量的大难题。

1998 年 3 月,调频调相应答机距离零值测量也发生了技术争议。作者用严密的理论分析和实验证明了调频调相应答机距离零值测量是正确的。

距离零值测量理论和方法经受了一场严峻的考验,作者再一次经受了这种特殊的考验。

第六部分为“中继星星间链路天线跟踪指向系统”。

1995 年中国开始研究跟踪与数据中继卫星系统,中继卫星天线跟踪指向系统是一个世界难题,美国第一、二代中继卫星系统都采用星地大回路捕获跟踪指向方案。本部分是为实现星上自主闭环跟踪指向方案而攻关研究的成果,包括:建立了“对宽带数据传输信号的角跟踪理论”,有了这种理论,角跟踪接收机用 2~3 个带通滤波器切换就能实现对 100 kb/s~300 Mb/s 数传信号的角跟踪(否则就要像某国用 12 个滤波器切换);建立了更适合星间链路天线扫描捕获的恒线速度螺旋扫描捕获理论和方法。星间链路角跟踪系统校相方案和建立天线跟踪指向系统动力学模型都是必须要解决的关键问题。

本文集是作者 1975 年至 2009 年间的研究成果,体现了作者的科研思想,即作者在人民日报出版社出版的《人生格言经典》中所写的:“难题是成功的机会,抓住难题攻坚不止,难题被突破了,你就成功了。”“发明是一种诀窍,它用一种简单的方法和设备解决了一个按传统途径无法解决的技术难题。”“发明产生于对基本概念的深刻准确理解、灵活应用和

精心设计。”

本文集的撰写和出版得到了中国空间技术研究院西安分院与西安电子科技大学出版社的大力支持和指导。文集中的很多内容体现了中国空间技术研究院西安分院多年来研究和研制跟踪测量设备的成果。

本文集编写过程中，崔万照研究员审阅了原稿，陈豪研究员提出了宝贵意见，在此一并致以诚挚的感谢。在编写过程中，作者参阅了大量中外资料和经典著作，均已列入参考文献中，在此谨向这些文献的作者表示深切的感谢。文集中若有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 6 月

目 录

第一部分 锁相环和 AGC 环的分析

一、VCO 噪声对锁相环的影响	2
1 问题的提出	2
2 频率稳定度的定义及表征	2
2.1 长期稳定度和短期稳定度	2
2.2 频域表征——相对频率起伏的单边功率谱密度 $S_y(f)$	3
2.3 时域表征——阿仑方差 $\sigma_y^2(\tau)$	3
2.4 频域表征量和时域表征量的互换	4
3 VCO 短期稳定度与环路相位抖动的关系	5
3.1 VCO 的噪声模型	6
3.2 二阶环中 VCO 短期稳定度与环路相位抖动的关系	6
3.3 三阶环中 VCO 短期稳定度与环路相位抖动的关系	10
4 结语	13
二、宽频带频率引导捕获方法和装置	14
1 引言	14
2 组成及工作原理	14
2.1 扫描搜索	15
2.2 VCO 频率粗置	15
2.3 VCO 频率细调整	15
2.4 环路锁定	16
2.5 监视环路工作及失锁再捕获	16
3 技术要点	16
三、自动增益控制环路的线性分析和设计	17
1 引言	17
2 AGC 环路的线性分析	17
2.1 AGC 环路的传递函数	17
2.2 AGC 环路的稳定性	20
2.3 对输入噪声的过滤性能	20
2.4 AGC 环路的噪声带宽	21
2.5 AGC 环路的跟踪误差	22
3 设计举例	22

4 环路频率响应的测量	23
4.1 利用调幅信号发生器测量环路频率响应	23
4.2 对环路加低频调制信号测量环路频率响应	23
5 结语	24

第二部分 舰载测量设备分析

四、舰摇对多普勒测速精度的影响	26
1 引言	26
2 大地坐标和甲板坐标的关系	26
2.1 坐标系的规定	26
2.2 空间任一点的甲板坐标转换为大地坐标	28
3 两个矢量的数积	29
4 舰摇引起的测速误差	30
5 双频测角精度对修正量的影响	31
6 结语	32
五、修正舰摇引起多普勒测速误差的实验研究	33
1 实验目的	33
2 原理简述	33
2.1 舰摇引起测速误差的分析方法	33
2.2 天线在摇摆台上跟踪固定信标修正测频公式	35
2.3 实验中 φ_1 和 φ_2 数据的获取	35
3 结果分析	36
六、舰摇对侧音测距精度的影响	39
1 引言	39
2 大地坐标和甲板坐标的关系	39
2.1 坐标系的规定	39
2.2 空间任一点的甲板坐标转换为大地坐标	40
3 两个矢量的数积	42
4 舰摇引起的测距误差	43
5 结语	44
七、多径反射对卫星多普勒测速的影响	45
1 引言	45
2 线极化波多径信号的影响	45
2.1 光滑平面镜反射	45
2.2 粗糙面镜反射	47
2.3 粗糙面漫散射	47
3 圆极化波多径信号的影响	50
3.1 光滑平面镜反射	50
3.2 粗糙面镜反射	52
3.3 粗糙面漫散射	53
4 结语	54

八、多径反射对卫星侧音测距的影响 59

1 引言 59

2 光滑平面镜反射多径信号对测距的影响 59

3 粗糙面镜反射多径信号对测距的影响 62

4 粗糙面漫散射多径信号对测距的影响 64

5 结语 65

第三部分 空间交会对接

九、空间交会对接微波雷达 70

1 引言 70

2 交会对接的阶段划分 70

2.1 远距离引导段 71

2.2 近距离引导段 71

2.3 逼近段 71

2.4 对接段 71

3 国外交会对接测量系统简况 71

4 交会对接微波测量系统方案 73

4.1 RVD 测量敏感器组合形式 73

4.2 微波测量系统的功能和测量要求 73

4.2.1 各阶段 RVD 过程中,微波雷达系统的功能 73

4.2.2 RVD 各阶段中,微波雷达系统的主要测量系数及其精度 74

4.3 微波雷达频段选择 74

4.4 微波雷达测量系统的组成及工作原理 75

5 追踪飞行器和目标飞行器的微波雷达测量兼容性考虑 78

6 结语 78

第四部分 双星定位系统

十、双星定位入站信号快捕系统研究 80

1 引言 80

2 同步码(速率为 8 Mb/s)输入信噪比为-20 dB 的快捕系统 81

2.1 技术指标要求 81

2.2 快捕系统的原理 81

2.3 获得的成果及重要意义 83

2.3.1 获得的成果 83

2.3.1 重要意义 84

3 同步码(速率为 8 Mb/s)输入信噪比为-22 dB 的快捕系统 84

3.1 技术指标要求 84

3.2 快捕系统的原理 85

3.2.1 输入信号格式和同步码信号格式 85

3.2.2 捕获系统的原理 85

3.3 实验结果	87
4 同步码(速率为 4 Mb/s)输入信噪比为 -22 dB 的快捕系统	87
4.1 技术指标要求	87
4.2 快捕系统的原理	88
4.2.1 输入信号格式和同步码信号格式	88
4.2.2 快捕系统的原理	88
4.3 实验结果	90

第五部分 调频调相应答机距离零值测量

十一、调频调相应答机距离零值测量方法	94
1 概述	94
2 PM-PM 应答机的 R_0 测量方法	94
3 FM-PM 应答机的 R_0 测量方法	95
3.1 为什么不能用 PM-PM 应答机的 R_0 测量方法	95
3.2 FM-PM 应答机的 R_0 测量方法	95
3.3 应答机时延 τ_0 的计算方法	96
4 方法正确性的证明	96
4.1 三个基本概念	96
4.2 已调频信号通过恒幅线性相位系统的时延	97
4.2.1 群时延和相位时延	97
4.2.2 已调频信号通过系统的时延	97
4.3 混频器和倍频器的时延测量	98
4.3.1 混频器的时延测量	98
4.3.2 12 倍频器的时延测量	98
5 结语	99
十二、调频调相应答机距离零值分析	100
1 概述	100
2 自校状态的分析	101
2.1 主侧音	101
2.2 次侧音	102
3 主侧音和次侧音通过 12 倍频器的分析	103
4 应答机的低通滤波器的影响	106
4.1 主侧音	106
4.2 次侧音	106
5 主侧音与次侧音测量时 τ_0 的计算公式	106
5.1 主侧音(27.77 kHz)测量时 τ_0 的计算公式	107
5.2 次侧音测量时 τ_0 的计算公式	107
6 结语	107
十三、调频调相应答机距离零值测量的理论与实践	108
1 引言	108
2 FM-PM 应答机 R_0 测量的若干基本概念	108

2.1 测量任务	108
2.2 测量原理	108
2.3 用微波倍频器(例如 12 倍频器)作调制度变换器	109
2.4 自校信号的调制方式对时延的影响	109
2.5 载波初始相位和副载波初始相位对时延的影响	110
2.6 混频器高本振和低本振对时延的影响	110
2.7 应答机是否造成测距信号倒相的判断	110
2.8 主侧音与次侧音的时延计算公式	111
3 某宇航局校验调频调相转换器的时延	111
3.1 某宇航局校验调频调相转换器时延的过程	111
3.2 某宇航局校验调频调相转换器时延的疑问	112
4 FM-PM 转换器的距离零值测试	112
5 结语	113
十四、调频调相转换器相位零值的判断	114
1 问题的提出	114
2 调频调相转换器中的测距音倒相分析	115
3 参考文献[6]中调频调相转换器相位零值校准的疑问	116
3.1 参考文献[6]中调频调相转换器相位零值校准的过程	117
3.2 参考文献[6]中调频调相转换器相位零值校准的疑问	117
3.3 看法	118
3.4 初步思考	118
4 调频调相转换器相位零值的另一种判断方法	119
4.1 正弦调制信号与已调相信号、已调频信号的波形关系	119
4.1.1 理论上 $f(t)$ 与 $u_{PM(t)}$ 、 $u_{FM(t)}$ 的关系	119
4.1.2 实验结果	119
4.2 调频调相转换器相位零值的判断	121
5 结语	122
十五、卫星测距校零中调频信号源大频偏调制与小频偏调制的时延差测量方法	124
1 引言	124
2 调频信号源大频偏调制和小频偏调制两种状态下时延差的测量方法	125
3 分频调制度变换器的工作原理及时延测量	126
4 对调制度变换器时延测量的进一步验证	127
5 结语	128
十六、调频调相应答机距离零值测量新方法	130
1 问题的提出	130
2 分频调制度变换器	130
2.1 工作原理	130
2.2 分频调制度变换器的时延测量方法	131
3 调频信号源大频偏调制和小频偏调制两种状态下时延差的测量方法	132
4 恒时延 FM 调制器法测量应答机距离零值	133
5 分频调制度变换器法测量应答机距离零值	135
6 结语	135

十七、TDRS 天线捕获跟踪指向系统设计中的几个问题	138
1 概述	138
1.1 APS 的特点	138
1.2 APS 的方案	138
1.3 天线跟踪指向控制系统和姿态控制系统的关系	139
2 APS 模型	139
2.1 APS 的组成	139
2.2 功能及指标	139
2.3 动力学方程	140
2.4 天线指向控制系统框图	140
3 天线指向控制系统的设计考虑	140
3.1 卫星姿态控制系统(ACS)和天线指向控制系统(APS)的相互影响	141
3.2 控制系统带宽的考虑	141
3.3 结构参数变化的考虑	142
4 结语	142
十八、对宽带数据传输信号的角跟踪理论	143
1 引言	143
2 单通道跟踪接收机方案	143
3 取数传信号频谱主瓣的小部分带宽内信号实现角跟踪理论的数学推导	144
3.1 宽带单通道信号通过窄带带通滤波器的求解方法	144
3.2 宽带单通道信号的指数傅立叶级数表示式	145
3.2.1 BPSK 数传信号的表示式	145
3.2.2 天线输出信号的表示	145
3.2.3 单通道信号的表示	145
3.3 窄带带通滤波器的频率特性	146
3.4 宽带数传信号通过窄带带通滤波器的输出表示式	147
3.5 跟踪接收机中频带宽的选择	147
4 取数传信号频谱主瓣的小部分带宽内信号实现角跟踪理论的物理解释	148
5 实验验证	149
6 结语	150
十九、再论证“对宽带数据传输信号的角跟踪理论”	151
1 引言	151
2 单通道跟踪接收机方案	152
3 取数传信号频谱主瓣的任意部位小部分带宽内信号实现角跟踪理论的数学推导	153
3.1 宽带单通道信号通过窄带带通滤波器的求解方法	153
3.2 宽带单通道信号的指数傅立叶级数表达式	153
3.2.1 BPSK 数传信号的表达式	153
3.2.2 天线输出信号的表示	154
3.2.3 单通道信号的表示	154

3.3 窄带带通滤波器的频率特性	155
3.4 宽带数传信号通过窄带带通滤波器的输出表达式	155
4 取数传信号频谱主瓣的任意部位小部分带宽内信号实现角跟踪理论的物理解释	157
5 实验验证	158
6 结语	159
二十、星间链路角跟踪系统校相分析	160
1 引言	160
2 相位校准的指标要求	161
3 用户星角跟踪系统交叉耦合分析	161
3.1 分析依据	161
3.2 交叉耦合源	161
3.3 分析简述	162
3.4 计算例	164
4 用户星角跟踪系统校相方案选择	164
4.1 引起和差通道相移变化的 4 个环节	164
4.2 角跟踪系统校相方案选择	164
5 结语	165
二十一、中继星天线程控指向用户星的方位角和俯仰角计算	166
1 卫星轨道的 6 个轨道根数	166
2 坐标系定义及坐标转换矩阵	167
2.1 地心惯性坐标系 $O-X_1Y_1Z_1$	167
2.2 地心轨道坐标系 $O-X_oY_oZ_o$	168
2.3 质心轨道坐标系 $S-X_oY_oZ_o$	169
2.4 中继星星体坐标系 $S_D-X_bY_bZ_b$	169
2.5 中继星天线坐标系 $S_a-X_aY_aZ_a$	169
2.6 坐标转换矩阵	169
3 中继星到用户星的位置矢量在地心惯性坐标系中的表示	171
3.1 中继星在地心惯性坐标系中的位置矢量	171
3.2 用户星在地心惯性坐标系中的位置矢量	172
3.3 中继星到用户星的位置矢量在地心惯性坐标系中的表示	172
4 中继星到用户星的位置矢量在中继星质心轨道坐标系中的表示	172
5 中继星到用户星的位置矢量在中继星星体坐标系中的表示	173
6 中继星天线指向用户星的方位角和俯仰角计算	174
7 计算例	175
8 结语	176
二十二、星间链路天线扫描捕获方法	178
1 概述	178
2 中继星天线程控指向用户星的方位角 α 和俯仰角 β 的计算	178
3 阿基米德螺旋线方程	179
4 中继星天线恒角速度螺旋扫描捕获方法	179
5 中继星天线恒线速度螺旋扫描捕获方法	181
5.1 螺旋线长 L 的近似表达式	181

5.2	等线速螺旋线的极角 θ 的表达式	181
5.3	天线方位轴转角 α 和俯仰轴转角 β 的数学表达式	181
5.4	扫描轨迹恒线速度 V 与天线方位轴、俯仰轴的角速度 (α', β') 的关系	182
5.5	计入用户星运动参数的恒线速度螺旋扫描天线转角表达式	183
5.6	扫描参数选择	183
5.6.1	扫描参数及单位	183
5.6.2	扫描参数选择	184
5.7	信号判决门限设置	184
5.8	计算例	184
6	结语	185
附录 A	出版论文的刊物目录	186
附录 B	天线指向系统的数学模型框图绘制	188
附录 C	论文评审意见表	192

锁相环和 AGC 环的分析

张 毅

第一部分

锁相环和 AGC 环的分析