



国防科技著作精品译丛

Radio Interferometry
and Satellite Tracking

无线电干涉测量 与卫星跟踪

【日】 Seiichiro Kawase 著

李智译



 **ARTECH HOUSE**
BOSTON | LONDON



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

无线电干涉测量与卫星跟踪

Radio Interferometry and Satellite Tracking

[日] Seiichiro Kawase 著
 李 智 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2012 -117 号

图书在版编目 (CIP) 数据

无线电干涉测量与卫星跟踪 / (日) 川濑诚一郎著; 李智译.

— 北京: 国防工业出版社, 2014. 11

(国防科技著作精品译丛)

书名原文: Radio interferometry and satellite tracking

ISBN 978-7-118-09589-0

I. ①无… II. ①川… ②李… III. ①无线电干涉测量法②卫星定位 IV. ①TN972②P228.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 138268 号

Translation from the English Language edition:

Radio Interferometry and Satellite Tracking by Seiichiro Kawase

Copyright © 2012 Artech House

All rights reserved. Printed and bound in the United States of America. No part of this book may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

All terms mentioned in this book that are known to be trademarks or service marks have been appropriately capitalized. Artech House cannot attest to the accuracy of this information. Use of a term in this book should not be regarded as affecting the validity of any trademark or service mark.

本书简体中文版由 Artech House, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

无线电干涉测量与卫星跟踪

[日] Seiichiro Kawase 著

李智 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 13 $\frac{1}{4}$

字 数 215 千字

版 印 次 2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 66.00 元



(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

空间在全球遥感、观测和信息传输等方面，具有巨大的社会、经济和军事价值，已经成为继陆地、海洋和空中之后，人类经济、军事活动的一个特殊利益空间和战略制高点。空间竞争已成为国与国之间在各个方面的竞争，更是综合国力的竞争，其实质是通过谋求空间战略优势获得国家更大的生存与发展空间。

当前，日益增长的需要已经造成激烈的竞争，地球静止轨道资源的竞争尤其激烈，卫星共位技术已经开始使用，由于共位卫星之间的间距过小，需要进行极其精细的轨道控制才能保证在轨卫星的安全。本书是 Seiichiro Kawase 根据其长期的研究工作和宝贵经验整理而成的，目的就是探讨在过度拥挤的环境下利用无线电干涉测量技术对地球同步轨道卫星进行跟踪与监视，作者从理论上证明了干涉测量技术在实际中可以用于地球同步轨道卫星的精确跟踪与测量。

无线电干涉测量是一种被动的卫星跟踪技术，人们虽然早已经注意到这种技术的潜在价值，但由于技术原因，迄今为止干涉测量技术用于地球同步轨道卫星跟踪的案例还非常有限。随着技术的快速发展和日益迫切的需求牵引，无线电干涉测量技术将得到广泛的应用。

本书分为三部分，第一部分介绍干涉测量的基本原理，第二部分讨论地球同步卫星的轨道动力学，第三部分重点说明了如何采用干涉测量方法来进行卫星跟踪，并简要介绍了如何利用干涉测量来定位发射干扰信号的地面站。

本书对我国的航天事业的发展有一定的推动作用,尤其对航天测控技术的研究具有重大参考价值。本书可作为高等院校相关专业的高年级本科生和研究生的教材,同时可供从事航天测控领域相关方向的科研工作者作为参考资料。

本书的翻译整理工作于 2012 年启动,周海俊、刘红娅、陈明、邱敏参与了本书部分章节的翻译工作,张鑫、李海晶和丁国振参与了插图和公式的编辑和校对工作。

由于译者水平有限,书中不妥之处,敬请批评指正。

译 者

2014 年 9 月于北京

前言

随着航天测控技术的发展,地球同步卫星的数量快速增加,导致卫星在轨道上的间隔越来越小。有时候由于卫星间距过小,以至于需要极其谨慎的卫星控制才能保证轨道安全。当前,为了争夺空余的轨道位置,预定发射的卫星需要与其他卫星进行更多的协调。卫星面临的问题是过分拥挤的轨道。本书的目标是探讨如何在过度拥挤的环境下利用无线电干涉测量对地球同步卫星的轨道进行跟踪监视。

无线电干涉测量是一种被动的卫星跟踪技术,理论上,这项技术在观测方向角方面具有较高的精度。虽然在人造卫星的早期阶段,人们就已经注意到这种技术的潜在价值。但实际上,由于干涉测量的测量精度很难保证,迄今为止,利用无线电干涉测量技术跟踪地球同步轨道卫星的案例寥寥无几。本书将证明干涉测量可以真正用于精确的卫星跟踪。

卫星还面临着另外一个问题。当地面站向卫星发射不必要的信号时,就会出现射频干扰。需要用一种特殊的跟踪方法来定位地面站,原理与卫星跟踪干涉仪相同。本书也涵盖这个专题。

本书分为三部分。第一部分介绍干涉测量的基本原理。首先介绍一些术语,如基线矢量、参考点、干涉相位;然后介绍干涉仪硬件,包括天线、接收设备以及相位检测的信号处理过程。跟踪测量的精度将从信号、噪声、系统误差等方面进行讨论。第一部分的内容是干涉测量的基本问题。

第二部分讨论地球同步卫星的轨道动力学。因为跟踪目标是地球同步卫星,所以必须了解它们的轨道运行方式。首先介绍基本轨道定律,然后

介绍轨道机动和摄动,最后介绍位置保持方法。书中没有进行复杂的数学公式推导,而是直接给出讨论结果,因为这种方式易于理解而又不失正确。可以将第二部分看成是对地静止轨道原理的简明科普版。

第三部分讨论如何利用干涉仪进行卫星跟踪。文中介绍了不同的干涉测量设备,它们可分别用于各种不同的卫星跟踪和轨道估计。这里会频繁涉及第一部分和第二部分的内容,因为这两部分的内容结合在一起才能更好地理解干涉测量的应用问题。第三部分还专门举例说明如何利用干涉测量来定位发射干扰信号的地面站。

按照内容不同,第一部分可以归类到电子工程领域,而第二部分可划分到机械工程领域。电子工程人员毫不费力就能理解第一部分的内容,但是需要花精力解读第二部分的内容;而机械工程人员需要仔细研读第一部分的内容,因为要理解第三部分的内容需要首先理解前两部分内容。各章节各自独立又彼此关联。

在此,本书要对日本情报通信研究机构(NICT)表示感谢,作者在此从事卫星通信、跟踪及轨道动力学工作。NICT的一个部门,Kashima 空间技术中心,是第18章、第20章、第21章中看到的干涉仪的运行场所。诚挚地感谢维护这些干涉仪的所有工程部门和管理部门的人员。最后把最深切的谢意献给 Erik Mattias Soop 博士。在20世纪80年代,作者访问欧洲空间运行中心期间,就是在 Erik Mattias Soop 博士的建议下,对干涉跟踪发生了兴趣,并尝试着对轨道预报进行分析,开始涉足地球同步卫星的干涉跟踪问题。

地球静止轨道测量技术的研究可追溯至20世纪60年代,干涉跟踪是一种相对年轻的技术。作者希望本书能引起相关人员对这个年轻技术的兴趣,从而致力于该技术的深入发展,因为这项技术必将带给我们动力,以应对日益拥挤的地球同步轨道的难题。

目录

第一部分 无线电干涉测量

第 1 章 无线电干涉测量概述	2
参考文献	4
第 2 章 接收天线	5
2.1 接收点和基线	5
2.2 参考点	6
2.3 极化	8
2.4 旁瓣	9
2.5 机械稳定性	9
第 3 章 接收设备	10
3.1 频率转换	10
3.2 接收路径	11
3.3 相位稳定性	12
3.4 参考校正	14
3.5 电缆稳定的条件	15
3.6 参考耦合	16
参考文献	17

第 4 章 相位检测	18
4.1 直接相位测量	18
4.2 分开测量	19
4.3 傅里叶变换	20
4.4 图像频谱问题	22
4.5 相位测量中的信号处理	23
4.6 降低噪声	25
4.7 跟踪非信标信号	28
参考文献	30
附录 4A 窗口和相位测量	31
4A.1 信标测量	31
4A.2 非信标测量	32
第 5 章 信号、噪声和精度	34
5.1 所需 SNR	34
5.2 信号功率和噪声功率	35
5.3 信标下行链路预算	37
5.4 跟踪弱信号	38
5.5 估计 PFD	40
参考文献	41
第 6 章 误差因素	42
6.1 基线误差	42
6.2 相位模糊	43
6.3 大气折射	45
6.4 雨水的影响	47
参考文献	48
第 7 章 设计和安装	49
7.1 系统布局	49
7.2 反射干涉仪	50

第二部分 地球静止轨道

第 8 章 地球静止轨道概述	55
参考文献	57
第 9 章 开普勒定律	58
9.1 开普勒第一定律	58
9.2 开普勒第二定律	59
9.3 开普勒第三定律	61
9.4 开普勒定律的物理意义	61
9.5 开普勒定律的重要性	65
第 10 章 准静止轨道	67
10.1 静止轨道和准静止轨道	67
10.2 小偏心率轨道	68
10.3 小偏心率轨道的运动	70
10.4 非静止轨道半径的运动	72
10.5 轨道平面内的运动	73
10.6 垂直轨道面的运动	74
10.7 相对位置坐标	75
参考文献	77
附录 10A 8 字形星下点轨迹经度跨度计算	78
第 11 章 轨道改变	80
11.1 轨道能量	80
11.2 平面内轨道改变	81
11.3 平面内轨道机动	83
11.4 倾角机动	85
第 12 章 轨道摄动	87
12.1 主要摄动力	87

12.2 地球非球形摄动	88
12.3 经度漂移模型	91
12.4 太阳辐射压力	92
12.5 太阳位置	95
12.6 太阳辐射压力长期摄动影响	96
12.7 太阳引力	98
12.8 轨道面倾斜	100
12.9 月球引力	102
12.10 日月引力联合摄动影响	103
参考文献	105
第 13 章 定点保持	106
13.1 漂移率东西保持控制	106
13.2 偏心率东西保持控制	108
13.3 东西联合保持	110
13.4 南北保持	112
13.5 卫星自身因素	113
参考文献	115
第 14 章 站位拥挤与轨道管理	116
14.1 轨道管理	116
14.2 站位拥挤问题	118
参考文献	118
第三部分 干涉测量法跟踪	
第 15 章 干涉测量法跟踪概述	121
第 16 章 跟踪与轨道预报	123
16.1 一般概念	123
16.2 轨道预报类型	124
16.3 估值类型的选择	126
16.4 软件单元	126
16.5 轨道预报的意义	128

16.6 使用干涉仪跟踪	129
参考文献	131
第 17 章 方位角 — 仰角跟踪	132
17.1 方位角 — 仰角	132
17.2 方位角 — 仰角干涉仪	134
17.3 基线监测单位矢量	135
17.4 轨道预报	137
17.5 精度描述	138
17.6 非水平基线	139
第 18 章 经度跟踪	141
18.1 卫星经度	141
18.2 经度监视干涉仪	142
18.3 轨道预报	144
18.4 干涉仪结构	144
18.5 干涉仪监测实例	145
18.5.1 单颗卫星	145
18.5.2 双星	147
18.5.3 不同频段的卫星	148
参考文献	149
第 19 章 距离 — 方位角跟踪	151
19.1 联合跟踪进行轨道预报	151
19.2 联合跟踪的优点	152
19.3 干涉仪的硬件与性能	153
19.4 基于安全监测的位置保持	155
参考文献	155
第 20 章 差分跟踪	157
20.1 差分跟踪的概念	157
20.2 干涉仪硬件	158
20.3 轨道预报	159

20.4 可能的应用	161
参考文献	161
第 21 章 旋转基线干涉仪	163
21.1 旋转基线	163
21.2 带镜旋转基线	164
21.3 旋转基线干涉仪	165
21.4 操作与数据处理	169
21.5 轨道预报	172
21.6 长期监测	174
21.7 误差描述	176
21.8 误差标校	178
21.9 非几何误差	179
参考文献	180
第 22 章 地面定位干涉仪	181
22.1 地面定位原理与问题	181
22.2 弱信号监测	182
22.3 时延的限制条件与时延线	185
22.4 相关处理	187
22.5 时间积分效应	188
22.6 卫星转发器相位问题	190
22.7 相位测量精度	191
22.8 地球站定位	192
22.9 转发器频率误差	195
22.10 轨道信息	195
22.11 快速轨道预报	196
参考文献	197

第一部分 无线电干涉测量

第 1 章

无线电干涉测量概述

无线电干涉测量, 简称干涉测量, 是一种利用目标卫星的下行微波信号测量方向角的方法。其基本思路如图 1.1 所示。天线接收卫星微波信号, 利用天线之间测量出的相对相位来定位卫星指向。指向有两个自由度, 通常表示为方位角和仰角, 分别对应天线 (1) 和 (2) 之间以及天线 (2) 和 (3) 之间的测量出的相位。

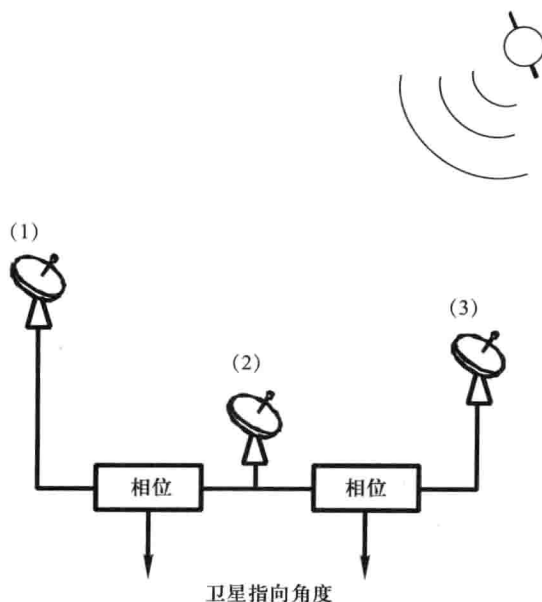


图 1.1 干涉测量基础

最初, 测量卫星方位的方法是使用自动跟踪的大口径抛物面天线。实际上, 干涉测量可以看成是自动跟踪天线的差分。自动跟踪天线的原理如图 1.2 所示。如果卫星在天线的正前方, 卫星微波到达馈元 (a)、(b) 的时间相同, 具有对称性。如果卫星的倾角如图 1.2 中虚线所示, 微波到达天线 B 的时间要早于到达天线 A 的时间, 因此, 就会先到达馈源 (b), 后到达馈源 (a)。

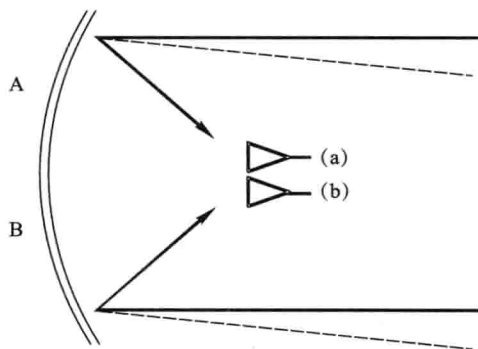


图 1.2 自动跟踪原理

假设正在接收卫星发出的信标信号。首先检测信号到达 (a)、(b) 的相对时间差, 并得到相对相位差。驱动电机扭转天线, 直到相位差为零。此时天线指向卫星的正确方向, 读取驱动轴的回转角就可以确定卫星的方位。

有时天线的焦点上只放置了一个馈源, 而不是两个。在这种情况下, 馈源可以当成是 (a) 与 (b) 的组合, 可以通过检测馈源中激发的高阶不规则项来获取相对相位差。如果 A、B 处的相位不同, 且焦点处的相位呈不均匀分布, 这就激发出高阶项。因此, 单馈源的跟踪原理类似于双馈源的情况。

跟踪卫星的方向依赖于天线 A、B 之间的相对相位差。如果确实如此, 可以在 A、B 上放置小天线, 而不是大型天线, 来检测 A、B 间的相对相位。这是干涉测量的基本原理。因为可以看成 A 和 B 在大型天线上水平、垂直交叉, 因此应该有两对小天线。按照这种方式, 干涉测量采用图 1.1 的布局, 天线 (1)、(2) 是一对, 天线 (2)、(3) 是另一对。

在早期的卫星通信中, 卫星尺寸小、质量轻、传输功率小, 因此地面站采用大口径天线。经过几十年的发展, 卫星发射功率越来越大, 地面站使用大型天线的机会已越来越少。这意味着地面站正在失去测量卫星方向的

能力,这时就需要进行干涉测量了。

干涉测量比自动跟踪天线具有更大的优势。首先,干涉仪不需要大口径天线。小天线的位置是固定的,如果跟踪目标是地球静止卫星则不需要驱动装置。随着天线之间的距离增大,方位测量的精度也随之提高,从而使低成本、高精度的卫星跟踪成为可能。当然干涉测量也有不足。干涉测量是基于精确的相位测量,而在现实环境中存在多种误差源,很难精确测量相位。如图 1.2,干涉测量只利用了大型天线中有 A 和 B 的一小部分,舍弃了 A、B 之间的大部分。因此,干涉测量缺乏尖波束来指向卫星,这导致确定方向时的不确定性。

要想使干涉测量实际可用,必须克服这些问题。本章内容旨在解决这些问题,并探讨干涉测量硬件设计的问题。第 2 章到第 4 章探讨干涉测量的基本组件,包括天线、接收设备、相位检测。第 5 章讨论卫星下行链路的传输质量。第 6 章和第 7 章讨论系统设计和安装,同时考虑如何消除误差以维持干涉测量的最佳性能。图 1.1 中,天线 (1)、(2) 组对,天线 (2)、(3) 组对,这两对天线功能相同。因此,第一部分重点讨论单面天线对。目前先考虑接收卫星信标信号,之后考虑非信标信号。

在讨论干涉测量硬件时,假设频段为 $3 \sim 4$ GHz (C 频段)、 $11 \sim 12$ GHz (Ku 频段),或二者皆有。越来越多的卫星使用这些频段,导致轨道和频段过度拥挤。

早期曾经使用过干涉测量来跟踪进入近地轨道的人造卫星,但是时间不长,就被多普勒、距离变化率以及测距方法所取代。后来,通过干涉测量进行卫星跟踪不常提及了。利用干涉测量地球静止卫星就成为一个新的概念,后面的讨论会从基本问题开始,介绍卫星通信链路的相关知识,参考文献 [2] 可以作为章节的背景,特别是第 5 章。

参考文献

- [1] Bate, R, D. D. Mueller, and J. E. White, *Fundamentals of Astrodynamics*, New York: Dover, 1971, pp.135–136, 138.
- [2] Agrawal, B. N., *Design of Geosynchronous Spacecraft*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986, Chap. 7.