



利用地球卫星的无线电掩星技术 ——波动说处理法

(美) William G. Melbourne 著
北京跟踪与通信技术研究所 组织翻译
刘迎春 译 张济生 校



利用地球卫星的无线电掩星技术 ——波动说处理法

(美) William G. Melbourne 著
北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译
刘迎春 译 张济生 校

清华大学出版社
北京

William G. Melbourne

Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment

ISBN: 0-471-71222-1

Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc.

Original language published by John Wiley & Sons, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by John Wiley & Sons, Inc., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国约翰·威立父子公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2007-2715

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

利用地球卫星的无线电掩星技术:波动说处理法/(美)梅尔本(Melbourne, W. G.)著;
刘迎春译.--北京:清华大学出版社,2011.5

(JPL 深空通信与导航丛书)

书名原文:Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment

ISBN 978-7-302-23272-8

I. ①利… II. ①梅… ②刘… III. ①航空导航—人造地球卫星—掩星—研究
IV. ①V249.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 187899 号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮编:100084

社总机:010-62770175

邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市春园印刷有限公司

经销:全国新华书店

开本:153×235 印张:31.5 字数:524 千字

版次:2011 年 5 月第 1 版 印次:2011 年 5 月第 1 次印刷

印数:1~2500

定价:86.00 元

产品编号:026768-01

丛书译序

进入 21 世纪以来,随着美国机遇号、勇气号火星探测器成功登陆火星,卡西尼号探测器飞抵土星并成功释放惠更斯号探测器着陆土卫六,深空探测越来越成为全球关注的焦点。美国宣布将在 2015 年前后将宇航员重新送上月球,在那里建立永久性基地;在 2030 年之后,美国宇航员将前往遥远的火星探险。随着人类探索外太空活动的深入,深空探测正逐步成为航天活动的新热点。

我国于 2000 年发布的《中国的航天》白皮书中指出,深空探测是指对太阳系内除地球外的行星及其卫星、小行星、彗星等的探测,以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测。它是继卫星应用、载人航天之后的又一航天技术发展领域。

月球探测和火星探测将是 21 世纪空间探测的重点领域。我国探月工程计划的启动是中国走向深空探索的第一步,标志着我国深空探测的开始,也是未来进行更远深空探测的必然要求。随着我国经济和科技实力的不断增强,进一步开展深空探测,展开对火星、小行星和其他太阳系内行星的探测将是我国未来深空探测的目标。

北京跟踪与通信技术研究所在我国测控领域的技术总体单位,广大科技人员长期跟踪国际深空测控领域的技术动态和发展方向,并对深空测控通信技术进行了预先研究。此次我所组织翻译的“JPL 深空通信与导航丛书”是美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)编著的一套关于深空探测器测控通信技术的专著,该套丛书总结了美国 NASA 近 50 年来深空测控通信工程技术的经验,是从总体上了解和掌握深空测控通信技术不可多得的教材。同时,书中提供的参考文献为读者进一步深入研究和學習提供了帮助。相信该丛书的翻译出版不仅对深空测控领域的科研、工程 and 教学人员具有较高的参考价值,而且对于我国未来深空测控通信系统的总体设计和建设以及相关技术的研究都具有一定的指导意义。

北京跟踪与通信技术研究所

于志望

2005 年 3 月

丛书序

1998年,美国国家航空航天局(NASA)在加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)成立了深空通信和导航系统精英中心(DESCANSO)。DESCANSO负责管理和促进能够满足未来深空探测对通信和导航技术需求的创新和改革。

DESCANSO的目标是实现在任何时间、任何地点的连续通信和精确导航。为了支持这一目标,DESCANSO努力探寻和提倡新概念、新系统和新技术;培养关键的技术人才;主办报告会、专题讨论会和论坛,来实现互动和思想交流。

“JPL深空通信与导航丛书”由在各自领域有多年经验的科学家和工程师撰写,通过交流关键技术领域的最新技术知识为创新奠定基础。该丛书归纳了JPL在几十年的深空探测研究过程中获得的基本原理和实践经验,同时还介绍了值得赞美的成果和应该吸取的教训。该丛书将作为新一代从事本领域研究的科学家和工程师的指南。

Joseph H. Yuen
(DESCANSO负责人)

前 言

精确地定量描述波穿过复杂介质的传播仍然是当代较困难的数学问题之一。20 世纪,电动力学中出现了麦克斯韦方程的多种求解法,都包含这种或那种形式的近似。这些方法涵盖了从方程自身的近似(如 WKB、扰动理论、抛物线方程、有限元、动态规划、用亥姆霍茨-基尔霍夫定理的标量衍射多相屏传播,等等),到适当辅以波/光混合和各种谱技术的纯射线理论法。而且,特别在波长相对于折射介质尺度为小量时,不得不进行解析的和几何的简化来使问题容易处理。对声学、电动力学和地震学等不同领域的波传播文献进行比较,会发现难以计数的解析方法,有时还会发现同一种技术在不同领域应用时取不同的符号。

在波传播处理和推断介质某些物理特性的反演问题中,用航天器探测折射介质的无线电掩星技术相对来说还是一个新事物。第一次用航天器开展的行星掩星是在大约 40 年前利用 NASA/JPL 水手 4 号航天器经过火星背面完成的。在水手号与火星发生掩星的掩始期间,地面接收到的水手号无线电信号首次横切火星电离层和大气层。在水手号从火星背面掩终时,水手号无线电信号再次穿过这些介质。使用射线理论技术(部分借用地震学技术),这次初步试验成功获得了精确的火星大气层垂直折射剖面以及相关密度和压力信息。

这些早期的射线理论技术在火星大气层那样的稀薄介质和其他行星大气层(如地球大气层)的上部区域中工作良好。但是,正如每个认真研究日出和日落的人都可以预见到的那样,且不说那些更加复杂的结构,即使是简单的中等尺度分层结构的稠密大气,使用基础射线理论技术也会导致反演问题遇到困难。从发射机经不同路径穿过大气层到达接收机的多条射线以及大气使各射线谱线加宽,导致纯射线理论方法产生模糊问题和分析困难。而且,在至少不借助标量衍射理论的辅助时,射线理论在垂直于视线方向的空间维上强加了某种分辨率限制,即所谓第一菲涅耳区,该区类似于光学仪器中用来调整分辨率性能的爱里斑。由于基础射线理论的这些局限性,无线电掩星技术的研究者们早就转向了波/光学技术来解多径模糊度,并利用

接近波动说所提供的极限合成孔径概念来增强分辨率。类木行星的厚大气层和加强这些行星环观测分辨率的愿望,导致了大约始于 25 年前的旅行者探测器执行的掩星试验中的一系列波/光学技术创新。近期出现携带有掩星测量 GPS 接收机(过去 10 年约 6 台,未来 10 年将大约翻倍)的低轨地球轨道器,导致了无线电掩星科学、分析技术的研究开发以及新仪器、数据信息系统的技术开发等方面的显著发展。地球的大气层远比我们太阳系中的邻居们的大气层易于进入。

这些现代反演技术在如地球对流层下部那样不利信号条件下基本上能工作得相当好,大致可分为基于谱/全息或者基于标量衍射的技术。它们都使用一些与波相关的概念来复原接收射线的折射弯曲角,再通过某种射线理论反演处理来复原大气层垂直折射剖面。这种波-射线混合方法通常称为波/光学分析法。

本书的主要宗旨是推导一种纯波动说方法。给定点上某一谐波的振幅和相位用复谱级数形式来表示,其谱系数取决于介质的折射梯度、谱数和波的初始条件。因此,因为折射梯度不为零,谱系数在介质中随位置而变化,但是在各向同性介质中它们不变。将谱级数在所有谱数上相加,就得到给定点上电磁场的总贡献。谱数中的平稳相位点表示对场计算有贡献的主要邻域。这里我们的目标是从观测到的接收波振幅和相位的时间序列复原谱系数。谱系数的量值与大气层的吸收有关,它相对于各向同性介质中保持定常相位的相移与对波的该谱分量上大气折射梯度的累积效应相关。谱系数的相移由折射率梯度引起的相位延迟谱密度函数给出。通过复原这种谱密度函数,由这些量的形式积分关系式可得到折射梯度的剖面。尽管此类问题的全波动法因其复杂和麻烦而声名狼藉,但仍然可通过明智地使用渐近技术和平稳相位概念等方法将其数学部分变成易于处理的形式。这里将在波动说范畴下处理射线理论中众所周知的一些专题,如射线、焦散、折射、散焦和多径,等等。

William G. Melbourne

2004 年 4 月

致 谢

本书大部分完成于 2000—2002 年我被 JPL 派到 GFZ (GeoForschungs Zentrum-Potsdam) 工作期间。GFZ 现在是德国一流的地球科学院,它在 19 世纪是数学测地学这个新生领域中欧洲的领航者。我要感谢 GFZ-Potsdam 和 DRL-Neustrelitz 的同事 Georg Beyerle, Jens Wickert 和 Norbert Jakowski 间许多激动人心的讨论,感谢 Christoph Reigber 教授在 GFZ 为访问学者与工作人员创建的一视同仁、非凡的科学气氛。我还想感谢 JPL 的高管给予我周期性的休假。我特别要感谢 John LaBrecque 博士领导的 NASA 固体地球计划(代码 Y)的支持,他在 GPS 空间应用计划的成功中发挥了关键的作用。感谢我的妻子和朋友——Cami Melbourne,深深感谢她的贤惠和在文本图表准备过程中给予的技术支持。本著作的一部分内容来源于 JPL 参与空间应用高精度 GPS 接收机研究和开发的多个小组以及使用这一技术的无线电掩星技术小组提出的概念。在这方面,我还想特别感谢 George Hajj, Tom Meehan, Larry Romans 和 Tom Yunck 等人与我进行的诸多有益讨论。

还有一位我想特别感谢的人是大约 15 年前从 JPL 退休的 Gunnar Lindal,他早期在无线电掩星方面的先驱性研究给我许多灵感。虽然我长期在 JPL 领导了一个颇大的组织,他也曾在其中工作,但我却从来没有真正和他一起共事过。我们很少的几次交流都是关于管理和计划方面的。然而,我阅读了他 20 世纪 60~90 年代发表的绝大多数论文。很遗憾自己有机会时却没花更多时间与他沟通。

William G. Melbourne

2004 年 4 月

目 录

第 1 章 利用地球卫星进行无线电掩星的背景和概述	1
1.1 引言	1
1.1.1 掩星技术的历史	2
1.1.2 利用地球卫星的掩星	2
1.1.3 全球定位系统	7
1.1.4 定时	9
1.1.5 星历	10
1.2 GPS 掩星观测量中包含的信息	11
1.2.1 连通的相位	11
1.2.2 采样率与垂直分辨率的关系	11
1.2.3 无线电掩星数据的反演	12
1.2.4 无线电掩星数据的融合	14
1.2.5 射线和平稳性	15
1.2.6 附加多普勒	17
1.3 GPS 掩星观测的科学应用	19
1.3.1 气象	20
1.3.2 气候	23
1.4 多径引起的问题和一些补救措施	23
1.4.1 谱/全息技术	26
1.4.2 后向传播	29
1.4.3 正则变换技术	33
1.4.4 碰撞参数空间曲线	33
1.4.5 全波动说	35
1.5 概述	38
1.5.1 第 2 章	38
1.5.2 第 3 章	39
1.5.3 第 4 章	40

1.5.4	第 5 章	40
1.5.5	第 6 章	42
1.5.6	附录	48
1.6	局限性和简化	49
1.6.1	电离层	49
1.6.2	将被掩 GPS 卫星置于无穷远处	49
1.6.3	时间	50
1.6.4	球对称	51
1.6.5	共面性	51
1.6.6	圆形	51
1.6.7	将 GPS 信号当作谐波	51
1.7	对后面章节的建议	52
	参考文献	53

第 2 章 用薄相屏模型和标量衍射理论分析来自球形边界的

	电磁波散射	62
2.1	引言	62
2.1.1	多径情形	63
2.1.2	第 2 章概述	66
2.2	球形介质中的几何光学	67
2.2.1	几何光学所谓的多径、阴影区和焦散	70
2.2.2	稀薄大气条件	72
2.3	薄相屏模型	74
2.3.1	亥姆霍茨-基尔霍夫积分定理	75
2.3.2	碰撞参数的空间曲线	75
2.3.3	菲涅耳相位屏	80
2.3.4	用薄屏模型进行衍射分析的适宜性	81
2.3.5	薄屏的相位剖面	82
2.3.6	弯曲角扰动	83
2.3.7	情况 A: 折射率不连续性	84
2.3.8	情况 B: 标高的不连续性	86
2.3.9	情况 C: 温度垂直梯度的不连续性	87
2.4	用一个薄相屏模型的多径	87

2.5	标量衍射:瑞利-谢曼菲尔德积分	91
2.6	平稳相位法	93
2.6.1	几何光学法有效的必要条件	96
2.7	利用薄屏/标量衍射的数值结果	98
2.7.1	对温度下降速率不连续性的菲涅耳响应	100
2.7.2	对折射率不连续性的菲涅耳响应	103
2.7.3	边界层	105
2.8	探测电离层中的边界	106
2.8.1	边界上的菲涅耳效应	108
2.8.2	边界上的振幅影响	112
2.8.3	射线分裂	113
2.8.4	边界上的多普勒信息	117
2.8.5	用改进的电子密度模型分析菲涅耳效应	118
2.9	菲涅耳相位扰动造成的复原折射率误差	122
2.10	菲涅耳变换技术	124
2.10.1	伴随约束 $A(u) \equiv 1$	126
2.10.2	带多径的衍射积分	126
2.10.3	数值例子	127
2.10.4	菲涅耳混叠	129
2.10.5	数值结果	129
	参考文献	133
第3章	基于麦克斯韦方程的来自大透明球的散射:米氏散射理论	136
3.1	引言	136
3.2	标量势	139
3.2.1	标量势的级数展开	140
3.3	多次内部反射	142
3.4	反射和透射波振幅的菲涅耳公式	144
3.4.1	守恒原理	146
3.4.2	散射角和散射强度	146
3.4.3	焦散	149
3.5	米氏散射理论:获得边界上的散射系数	151
3.5.1	外部入射波的透射和反射系数	151

3.5.2	内部入射波的透射和反射系数	154
3.5.3	总散射	155
3.6	慢收敛问题	157
3.7	谢曼菲尔德-沃森变换	158
3.8	用渐近展开式计算散射系数	159
3.9	以相位复矢量表示的散射系数	164
3.10	在近地卫星处计算汉克函数和勒让德函数的渐近形式	167
3.11	米氏散射理论的几何光学解释	169
3.12	利用积分散射相位复矢量来计算米氏散射	170
3.13	使用平稳相位技术解释散射	172
3.13.1	平稳相位	172
3.13.2	与峰脊造成的衍射相比较	174
3.13.3	散射积分的平稳相位点	175
3.13.4	残留彩虹效应	178
3.13.5	透明折射球的渐近解	181
3.13.6	谱数的平稳相位值与斯涅耳折射定律之间的 对应关系	184
3.13.7	散射相位的稳态值	185
3.13.8	用平稳相位技术计算散射积分	187
3.14	电动力学和几何光学中平稳相位概念的对偶性	189
3.15	利用米氏散射理论的来自透明大折射球的衍射	190
3.15.1	数值积分	190
3.15.2	与薄屏/标量衍射结果的比较	191
3.16	寻找彩虹	194
3.16.1	折射球上的彩虹效应	194
3.16.2	低地球轨道距离上的彩虹效应	196
3.16.3	用三阶平稳相位技术估计彩虹效应	197
3.17	极限情况	200
3.17.1	全反射球	200
3.17.2	几何光学解释	205
3.17.3	极限情况: 强吸收球	206
3.17.4	极限情况: 来自无穷半径球的反射	209
	参考文献	209

第 4 章 波在分层介质中的传播：薄膜法	211
4.1 引言	211
4.2 薄膜概念	211
4.2.1 笛卡儿分层	212
4.3 特征矩阵	215
4.4 分层介质当作离散层的堆叠	216
4.4.1 $n(x)$ = 常数时的特征矩阵	216
4.4.2 $n(x)$ 为分段常数时多个均匀层堆叠	217
4.4.3 有效范围	220
4.4.4 TM 情况	220
4.5 爱里层的特征矩阵	221
4.6 外来和外出波及其转向点	224
4.6.1 程路径和同相法路径	228
4.6.2 散焦	230
4.7 串接爱里层	232
4.8 密切参数	236
4.8.1 在转向点上	240
4.9 作为基本函数的爱里函数	241
4.10 波在柱形分层介质中的传播	242
4.11 波在球形分层介质中的传播	247
4.12 笛卡儿分层和球形分层爱里层的特征矩阵的对应关系	252
参考文献	254
第 5 章 在球形分层折射介质中的传播和散射	256
5.1 引言	256
5.2 分层线性介质中的麦克斯韦方程	259
5.2.1 标量势函数	260
5.3 修正的球形贝塞尔函数	262
5.4 渐近形式	265
5.5 在球形分层介质中修正的米氏散射	266
5.5.1 外来波	269
5.5.2 计算分层介质中的谱系数	273

5.5.3	外出波	277
5.5.4	在笛卡儿和球形分层相位量之间的对应关系	278
5.5.5	吸收	279
5.6	其他几何光学概念: 累积弯曲角、布格定律和散焦	279
5.6.1	散焦	281
5.7	其他渐近形式	284
5.7.1	$dG[\rho^+(\nu), \nu]/d\nu$ 等于 $\bar{\alpha}(\nu, \nu)$, $d^2G[\rho^+(\nu), \nu]/d\nu^2$ 等于 $d\bar{\alpha}(\nu, \nu)/d\nu$	289
5.7.2	通过渐近线匹配确定 $\hat{y} > 0$ 时 $g(\hat{y})$ 的形式	290
5.7.3	在转向点上 WKB 解的特性	293
5.7.4	确定 $\rho \leq \rho^+(\nu)$ 时的 $G[\rho, \nu]$	293
5.8	在球形分层介质中电磁波的谱表达式	294
5.8.1	$\partial G/\partial \nu$ 的特性	296
5.8.2	密切参数法的精度	298
5.8.3	数值比较	302
5.8.4	在爱里层中来自波动说和几何光学的相位延迟的 比较	308
5.8.5	渐近匹配外来波和外出波的谱系数	309
5.9	用平稳相位法解释折射介质中的波动说	312
5.9.1	相位复矢量的几何解释	313
5.9.2	平稳相位条件	314
5.9.3	$\psi(\pm, \pm)$ 的平稳性	315
5.9.4	平面波	315
5.9.5	外来波的电磁场	317
5.9.6	用平稳相位法计算电场矢量	319
5.9.7	外出电场	322
5.9.8	LEO 处的电场	323
5.10	几何光学和波动说的比较	324
5.10.1	波动说和几何光学的比较	325
5.10.2	系统间的对偶性	328
5.10.3	计及发射信号 GPS 卫星距离有限波前弯曲的 修正	329
5.11	转向点上的电场	330

5.11.1	爱里函数的傅里叶变换	332
5.11.2	爱里函数的菲涅耳变换	334
5.12	焦散和多径	335
5.12.1	多径和焦散的数值例子	336
5.12.2	多径的几何光学解释	342
5.12.3	几何光学导出的振幅变化	344
5.12.4	三阶理论	344
5.12.5	散焦使多径谱宽度减小	351
5.12.6	水蒸气和干燥空气的联合折射模型	352
5.13	嵌有不连续性的球形折射介质中的谱系数	356
5.13.1	折射梯度含不连续性的介质	357
5.13.2	透明球嵌入折射介质	364
5.14	来自嵌入折射介质全反射球的散射场	365
5.14.1	平稳相位分析	369
5.14.2	波动说的结果	375
5.14.3	反射定律	377
	参考文献	379
第 6 章	反演问题: 用谱理论复原大气折射剖面	380
6.1	引言	380
6.2	GPS 接收机的工作情况	381
6.2.1	信号不利条件	384
6.2.2	惯性外推	389
6.2.3	来自单射线概念的折射率误差	391
6.3	LEO 处场的谱表示法	392
6.3.1	LEO 处停止的场	394
6.3.2	倾斜因子	394
6.3.3	多普勒的变化	396
6.4	折射率复原	398
6.4.1	超折射	404
6.4.2	提高 $G^+(\nu)$ 的精度	407
6.4.3	分辨率问题	409
6.5	小结	410

参考文献	411
附录 A 多项推导	413
A.1 弯曲角和布格定律,式(2.2-2)	413
A.2 散焦	415
A.3 附加多普勒	415
A.4 标量衍射理论	420
A.5 第一菲涅耳区	421
A.6 阿贝尔变换	422
A.7 复原的折射率对误差源的敏感性	423
A.8 边界附近弯曲角剖面的扰动	423
A.9 弯曲角扰动	426
A.10 折射率不连续性(情况 A)引起的弯曲角扰动	427
A.11 菲涅耳变换对	428
A.12 射线路径相位延迟	429
参考文献	430
附录 B 焦散面	432
参考文献	435
附录 C 多射线路径的分离高度	436
C.1 类型 C: 不连续的温度下降速率	436
C.2 类型 B: 不连续的标高	437
C.3 类型 A: 不连续折射率	438
附录 D 三阶平稳相位理论	441
D.1 最大闪烁	441
D.2 阴影区内最小信号振幅	444
D.3 平稳相位法的精度	447
参考文献	448
附录 E 高斯电子密度分布引起的弯曲	449

附录 F 跳周对复原折射率的影响	451
附录 G 使用谢曼菲尔德-沃森变换	454
G.1 引言	454
G.2 用于全反射球	457
G.3 用于折射球	458
G.4 总散射	461
参考文献	462
附录 H 爱里层堆叠中的特征矩阵	463
附录 I 分层介质中的场方程	468
附录 J $\tilde{\alpha}(\nu, \nu)$ 和 $dG^+(\nu)/d\nu$ 以及 $d\tilde{\alpha}(\nu, \nu)/d\nu$ 和 $d^2G^+(\nu)/d\nu^2$ 之间近等价的条件	470
数学符号	473
缩略语	478