



深空网导航数据的测量 和计算公式

(美) Theodore D. Moyer 著

北京跟踪与通信技术研究所 组织翻译

刘迎春 译 黄天衣 刘利生 校



JPL深空通信与导航丛书

深空网导航数据的测量 和计算公式

(美) Theodore D. Moyer 著

北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译

刘迎春 译 黄天衣 刘利生 校

清华大学出版社
北京

Theodore D. Moyer

Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation
EISBN: 0-471-44535-5

Copyright © 2003 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

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: 01-2005-2652

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

深空网导航数据的测量和计算公式/(美)莫耶(Moyer, T. D.)著;刘迎春译. —北京:清华大学出版社,2006.8

(JPL 深空通信与导航丛书)

书名原文: Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation

ISBN 7-302-13002-7

I. 深… II. ①莫… ②刘… III. ①深空激光通信系统—航空导航—数据—技术测量 ②深空激光通信系统—航空导航—数据—计算—公式 IV. V249.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051052 号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

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

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 石 磊

文稿编辑: 赵从棉

封面设计: 李海涛

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 153 × 235 印张: 21 字数: 364 千字

版 次: 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-13002-7/TN · 326

印 数: 1 ~ 3000

定 价: 98.00 元

JPL 深空通信与导航丛书

编译委员会

主任 于志坚

委员 匡乃雪 董光亮 孙 威

李海涛 李 平

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、工程和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在

陆星

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

本书介绍喷气推进实验室(JPL)的轨道确定程序 Regres 中的公式。该程序用于计算美国深空网(DSN)测站获取的各种观测量(如多普勒和距离测量)的计算值。该程序还用于计算观测量测量值的传播介质修正及观测量计算值对待估参数向量 $\mathbf{q}$ 的偏导数。DSN 实际观测到的数据从轨道数据编辑程序(ODE)得到,利用本书中给出的公式可以从这些数据计算出 DSN 各种数据类型的“测量值”。这些测量值通过 OD 文件提供给程序 Regres。在程序 ODE 中计算的 DSN 各种数据类型测量值的定义,与在程序 Regres 中计算的 DSN 数据类型计算值的定义是相同的。ODP 软件中的估计程序对待估参数进行微分改正,依据观测量测量值对观测量计算值进行最小二乘拟合。该处理中使用程序 Regres 计算出 O-C(观测量测量值减去计算值)和观测量计算值对待估参数向量 $\mathbf{q}$ 的偏导数。这些待估参数的估计值确定了航天器的轨道。

上一次关于程序 Regres 中公式的外部报告是笔者在 1971 年撰写的(见本书参考文献)。该报告中给出了 ODP 完整的公式。因此本书仅给出程序 Regres 中的公式。笔者 1963 年到 JPL 即开始从事程序 Regres 的工作。在本书出版前,程序 Regres 的部分公式曾包含在前述 Moyer(1971)报告和 JPL 内部的一些备忘录中。撰写本书的目的是希望将程序 Regres 的完整公式汇总在一个可广泛应用的外部文件中。JPL 目前正在开发的下一代导航软件将应用这些公式。这些公式是可用的,可以被任何正在开发 ODP 的组织使用。它可应用于太阳系中任一位置处的航天器导航。

Theodore D. Moyer

2000 年 10 月

致 谢

感谢那些对程序 Regres 中公式有贡献和帮助我理解这些贡献的人们。特别感谢以下诸位: JPL 的 John D. Anderson, James S. Border, Frank B. Estabrook, William M. Folkner, Gene L. Goltz, Ronald W. Hellings, Robert A. Jacobson, Andrew Kwok, Gabor E. Lanyi, Jay H. Lieske, E. Myles Standish, Richard F. Sunseri, James G. Williams 和 Sien C. Wu; 最近从 JPL 退休的 X X Newhall, Ojars J. Sovers 和 J. Brooks Thomas; 以前在 JPL 工作过的 Jeff A. Estefan; 从 JPL 退休的 John R. Smith 以及得克萨斯州立大学奥斯汀分校的 John C. Ries。还要感谢 Peter J. Breckheimer, John E. Ekelund, James B. Collier, Tseng-Chan, (Mike) Wang 和 Dah-Ning Yuan 等把 Regres 公式转换成程序。同时对 JPL 信息技术部的 Roger Carlson 和 Judi Dedmon 为本书的编辑、出版所做的工作深表谢意。

目 录

第 1 章 引言	1
第 2 章 时间尺度和时间差	3
2.1 概述	3
2.2 时间尺度	3
2.2.1 历书时	3
2.2.2 国际原子时	4
2.2.3 世界时(UT 和 UT1R)	4
2.2.4 协调世界时	4
2.2.5 GPS 或 TOPEX 主控时	5
2.2.6 测站时	5
2.3 时间差	5
2.3.1 ET-TAI	5
2.3.2 TAI-UTC	14
2.3.3 TAI-GPS 和 TAI-TPX	14
2.3.4 TAI-UT1 和 TAI-UT1R	15
2.3.5 测站时 ST 和 UTC 或主控时(GPS 或 TPX)之间的 二次偏差	15
2.4 时间差、极移和章动角修正的输入文件	15
2.5 时间转换树状图	16
2.5.1 地面 DSN 测站接收	17
2.5.2 地面 GPS 接收站接收	18
2.5.3 TOPEX 卫星接收	18
2.5.4 地面 DSN 测站发射	18
2.5.5 GPS 卫星发射	19
第 3 章 行星历表、小天体历表和卫星星历	20
3.1 行星历表和小天体历表	20

3.1.1	概述	20
3.1.2	从行星历表和小天体历表插值获得的位置、速度和 加速度矢量	21
3.1.3	从行星历表和小天体历表插值得到的位置矢量对 参考参数的偏导数	24
3.1.4	行星历表的修正	28
3.2	卫星星历	28
3.2.1	概述	28
3.2.2	从卫星星历插值获得的位置、速度和加速度矢量	29
3.2.3	从卫星星历中插值获得位置矢量的偏导数	30
第4章	航天器历表和偏导数文件	31
4.1	概述	31
4.2	程序 PV 的概述	31
4.3	局部地心参考架和太阳系质心参考架之间的转换	32
4.3.1	位置坐标	32
4.3.2	时间坐标的微分方程	38
4.3.3	时间坐标	39
4.3.4	引力常数	39
4.4	太阳系质心参考架中的相对论方程	40
4.4.1	质点的牛顿和相对论摄动加速度	41
4.4.2	测地岁差	44
4.4.3	Lense-Thirring 岁差	45
4.4.4	天体球谐系数引起的航天器牛顿加速度	47
4.4.5	地球球谐系数引起的航天器相对论加速度	49
4.4.6	扁率引起的积分中心加速度	51
4.5	局部地心参考架中的相对论运动方程	53
4.5.1	质点的牛顿加速度	53
4.5.2	地球引起的质点相对论加速度	54
4.5.3	测地岁差	55
4.5.4	Lense-Thirring 岁差	56
4.5.5	地球和月球球谐系数引起的近地航天器的牛顿 加速度	57

4.5.6 扁率引起的积分中心加速度	58
第5章 测站在地心空固系中的位置、速度和加速度矢量	59
5.1 概述	59
5.2 测站在地固系中的位置矢量	60
5.2.1 测站或邻近测量基准的 1903.0 位置矢量	60
5.2.2 从测量基准到测站的矢量偏移	61
5.2.3 地固速度矢量引起的位移	62
5.2.4 原点偏置	62
5.2.5 极移	62
5.2.6 地球固体潮	64
5.2.7 海洋负荷	77
5.2.8 极潮	79
5.3 地固系到空固系的转换矩阵 T_E 和它的时间导数	84
5.3.1 T_E 的高级方程, 它的时间导数和偏导数	84
5.3.2 获得章动角、世界时 UT1 和地极的坐标	88
5.3.3 UT1 周期项的算法	89
5.3.4 岁差矩阵	92
5.3.5 章动矩阵	94
5.3.6 用真恒星时表示的自转矩阵	96
5.4 测站地心空固位置、速度和加速度矢量	103
5.4.1 从地固系到空固系的坐标旋转	103
5.4.2 地心空固位置矢量从局部地心到太阳系质心相对论 参考架的转换	103
5.5 测站地心空固位置矢量的偏导数	104
5.5.1 影响测站地固位置矢量的参数	104
5.5.2 参考架系连的旋转角	106
5.5.3 世界时 UT1	106
第6章 着陆航天器相对行星、行星系统或月球质心的空固位置、 速度和加速度矢量	107
6.1 引言	107
6.2 着陆航天器在天体固连坐标系中的位置矢量	108

6.3	天体固连坐标系到空固系的转换矩阵 T_B 及其时间导数	108
6.3.1	T_B 的高级方程及其时间导数	108
6.3.2	α, δ 和 W 及其时间导数的表达式	110
6.3.3	$\Delta\alpha, \Delta\delta$ 和 ΔW 及其时间导数的表达式	111
6.4	着陆航天器的空固位置、速度和加速度矢量	113
6.4.1	相对着陆天体 B 的空固矢量	113
6.4.2	行星系统的质心和着陆行星或行星卫星的质心间的 偏移	116
6.5	着陆航天器空固位置矢量的偏导数	117
6.5.1	着陆器的柱坐标或球坐标	117
6.5.2	天体固连坐标系到空固坐标系的转换矩阵 T_B 中的 参数	118
6.5.3	卫星星历参数	119
第 7 章	计算 ET-TAI 的算法	120
7.1	概述	120
7.2	GPS/TOPEX 数据相位中心的偏移	120
7.3	计算 ET-TAI 的算法	122
7.3.1	在地面测站的接收时刻	122
7.3.2	在地面测站的发射时刻	124
7.3.3	在 TOPEX 卫星的接收时刻	124
7.3.4	在 GPS 卫星的发射时刻	126
第 8 章	光行时解	127
8.1	概述	127
8.2	参与者的位置、速度和加速度矢量	128
8.3	航天器光行时解	130
8.3.1	光行时方程	130
8.3.2	光路径的一条支路上传播时间的线性微分改正	144
8.3.3	发射时刻 t_2 的下行支路预报	145
8.3.4	发射时刻 t_1 的上行支路预报	147
8.3.5	映射方程	148
8.3.6	航天器光行时解的算法	150

8.4 类星体光行时解	155
8.4.1 光行时方程	155
8.4.2 接收方 2 的接收时刻的线性微分改正	158
8.4.3 类星体光行时解的算法	158
第 9 章 角度	162
9.1 引言	162
9.2 地面测站的坐标系、角度和单位矢量	163
9.2.1 时角和赤纬	163
9.2.2 北-东-天顶坐标系	164
9.2.3 方位角和仰角	166
9.2.4 角度 X 和 Y	167
9.2.5 角度 X' 和 Y'	168
9.2.6 地固系单位矢量到空固系单位矢量的转换	169
9.3 在地面测站接收和发射时刻角度计算	169
9.3.1 单位矢量 L	169
9.3.2 折射修正 $\Delta_r \gamma$	172
9.3.3 计算的角度	175
9.4 地面测站处由于参考系的小转动引起的修正	177
9.5 地球卫星处辅助角的计算	178
9.5.1 TOPEX 卫星接收时刻的辅助角	178
9.5.2 GPS 卫星发射时刻的辅助角	179
第 10 章 传播介质和天线修正	180
10.1 引言	180
10.2 Regres 数据处理中的传播介质修正	181
10.2.1 各个支路的对流层修正	181
10.2.2 各个支路的带电粒子修正	185
10.2.3 光行时修正	186
10.3 电离层偏导数模型	193
10.3.1 电离层模型和各个支路的偏导数	194
10.3.2 精确光行时的偏导数	195
10.4 日冕模型	196

10.4.1	日冕修正角度的计算	197
10.4.2	各个支路的日冕修正	198
10.4.3	对光行时解增加日冕修正	200
10.4.4	各个支路的日冕偏导数	201
10.4.5	精确光行时的偏导数	201
10.5	天线修正	202
10.5.1	概述	202
10.5.2	天线类型和修正	204
第 11 章	精确光行时和类星体时延的计算	206
11.1	引言	206
11.2	时延	207
11.2.1	数据时标转换至接收电子设备处的接收时刻 ...	209
11.2.2	航天器和类星体光行时解中开始时刻时延的 计算	209
11.2.3	航天器和类星体光行时解结束时刻时延的计算 ...	209
11.3	精确往返光行时 ρ	210
11.3.1	ρ 的定义	210
11.3.2	ρ 的计算	210
11.4	精确单向光行时 ρ_1	212
11.4.1	计算较差单向光行时的高级方程	212
11.4.2	计算 Δ 的高级方程	213
11.4.3	计算 I 和 $\dot{I}$ 中参数 $U, \dot{U}, v^2$ 和 $(v^2)'$ 的算法	214
11.4.4	计算精确单向光行时 ρ_1	218
11.5	GPS/TOPEX 观测量的精确单向光行时 ρ_1	218
11.5.1	ρ_1 的定义	219
11.5.2	ρ_1 的计算	219
11.5.3	计算几何相位修正 $\Delta\Phi$ 的公式	221
11.5.4	计算可变相位中心偏差	225
11.6	精确类星体时延 τ	227
11.6.1	τ 的定义	227
11.6.2	τ 的计算	227

第 12 章 精确光行时和类星体时延的偏导数	229
12.1 引言	229
12.2 参与者位置矢量的偏导数	230
12.3 参与者亚位置矢量的偏导数	230
12.3.1 行星历表偏导数	230
12.3.2 小天体历表偏导数	231
12.3.3 卫星星历偏导数	231
12.3.4 航天器历表偏导数	231
12.3.5 测站偏导数	232
12.3.6 着陆器偏导数	232
12.4 将参与者的位置矢量偏导数转换至发射或接收时刻的偏导数	232
12.4.1 航天器光行时解	233
12.4.2 类星体光行时解	234
12.5 精确光行时和类星体时延对参考向量 q 的偏导数	235
12.5.1 精确往返光行时 ρ 的偏导数	235
12.5.2 精确单向光行时 ρ_1 的偏导数	238
12.5.3 GPS/TOPEX 观测量的精确单向光行时 ρ_1 的偏导数	239
12.5.4 精确类星体时延 τ 的偏导数	241
第 13 章 观测量	244
13.1 引言	244
13.2 发射频率和航天器转发比	245
13.2.1 地面测站的发射频率	245
13.2.2 航天器转发比	246
13.2.3 航天器的发射频率	247
13.2.4 多普勒参考频率	248
13.2.5 类星体频率	249
13.2.6 斜坡表格	249
13.2.7 相位表格	250
13.2.8 对光路径每个支路发射频率的算法	251
13.3 多普勒观测量	252

13.3.1	多普勒观测量的测量值	253
13.3.2	多普勒观测量的计算值、传播介质修正和 偏导数	257
13.4	总相位计数观测量	268
13.4.1	概述	268
13.4.2	总相位计数观测量的测量值	269
13.4.3	总相位计数观测量的计算值	270
13.4.4	总相位计数观测量的测量值减计算值的残差 ...	275
13.5	距离观测量	276
13.5.1	概述	276
13.5.2	从秒到距离单位的转换因子 F	276
13.5.3	距离观测量的测量值	277
13.5.4	距离观测量的计算值、传播介质修正和偏导数 ...	280
13.6	GPS/TOPEX 伪距和载波相位观测量	284
13.6.1	测量值	285
13.6.2	计算值、传播介质修正和偏导数	286
13.7	航天器干涉测量观测量	287
13.7.1	窄带航天器干涉测量(INS)观测量	288
13.7.2	宽带航天器干涉测量(IWS)观测量	291
13.8	类星体干涉测量观测量	299
13.8.1	类星体干涉测量观测量的测量值	299
13.8.2	类星体干涉测量观测量的计算值、传播介质 修正和偏导数	302
13.9	角度观测量	305
13.9.1	角度观测量的计算值	305
13.9.2	角度观测量计算值的偏导数	306

参考文献	309
------------	-----

缩略语	314
-----------	-----

第 1 章 引言

航天器的轨道确定是通过改变模型参数变量的值,依据测量值对观测量的计算值进行拟合。所谓的待估参数的估计值就确定了航天器的轨道。本书给出了当前使用的观测量测量值、计算值和观测量计算值对待估参数偏导数的计算公式。JPL 的轨道确定软件 ODP 的程序 Regres 使用这些公式。自 1968 年以来,这个第三代的软件一直用于月球和行星探测任务中航天器的轨道确定。近年来它也应用于确定地球卫星的轨道。

上一次关于程序 Regres 中公式的外部报告为文献(Moyer,1971)。该报告的范围为整个 ODP 软件的公式。本书给出了 ODP 中程序 Regres 的全部公式和程序 PV 的相对论项公式。程序 PV 用于生成航天器轨道和对待估参数的相应偏导数。因此本书中包含所有影响观测量计算值的相对论项公式。程序 PV 的完整公式最终将由该程序的程序员兼分析师 Richard F. Sunser 给出。ODP 的用户指南则由 DRTRAJ-DOP 用户参考手册(2000 版)给出。

所有观测量都可归为如下几大类:多普勒测量、距离测量、航天器和类星体的甚长基线干涉测量(VLBI)和角度测量,这些将在第 13 章中作详细介绍。而可进行估值的模型参数可分为如下几类:

1. 确定航天器轨道的动力学参数;
2. 确定测站在地固坐标系中位置的站址参数;
3. 确定地球空固指向的地球自转参数;
4. 确定太阳系中天体相对位置的参数;
5. 航天器和测站原子时修正的二次系数;
6. 航天器(如果有发射)发射频率修正的二次系数;
7. 测距系统差;