

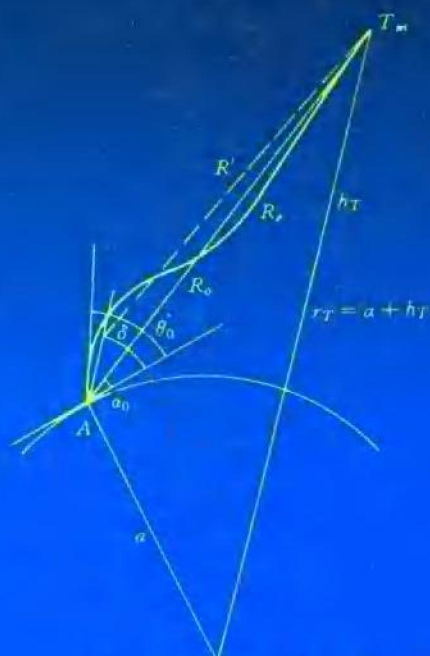


导弹航天测控通信技术丛书

# 电波大气折射误差修正

*Correction for Atmospheric  
Refractive Error of Radio Wave*

黄捷主编



国防工业出版社

1 17014

导弹航天测控通信技术丛书

电波大气折射误差修正  
Correction for Atmospheric  
Refractive Error of Radio Wave

黄 捷 主编

国防工业出版社

• 北京 •

## 图书在版编目(CIP)数据

电波大气折射误差修正/黄捷主编. —北京:国防工业出版社,1999.6

(导弹航天测控通信技术丛书)

ISBN 7-118-02028-1

I. 电… II. 黄… III. 电波折射:大气折射-误差-修正  
IV. TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 33010 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 8½ 220 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:17.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

国防科技图书出版基金  
第三届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 名誉主任委员    | 怀国模 |     |     |     |
| 主任委员      | 黄 宁 |     |     |     |
| 副主任委员     | 殷鹤龄 | 高景德 | 陈芳允 | 曾 铎 |
| 秘书长       | 崔士义 |     |     |     |
| 委 员       | 于景元 | 王小谟 | 尤子平 | 冯允成 |
| (以姓氏笔划为序) | 朱森元 | 朵英贤 | 刘 仁 | 杨星豪 |
|           | 吴有生 | 何庆芝 | 何国伟 | 何新贵 |
|           | 宋家树 | 张立同 | 张汝果 | 张均武 |
|           | 张涵信 | 陈火旺 | 范学虹 | 柯有安 |
|           | 侯正明 | 莫梧生 | 崔尔杰 |     |

# 导弹航天测控通信技术丛书

## 编审委员会

|           |        |     |         |     |
|-----------|--------|-----|---------|-----|
| 名誉主任委员    | 沈荣骏    |     |         |     |
| 顾问        | 陈芳允    | 赵起增 |         |     |
| 主任委员      | 尚学琨    |     |         |     |
| 副主任委员     | 王文宝    | 李长海 | 罗海银(常务) |     |
| 委员        | 于志坚    | 刘仁  | 刘蕴才     | 华仲春 |
| (以姓氏笔划为序) | 张殷龙    | 林秀权 | 赵业福     | 侯鹰  |
|           | 贺瑞法    | 郭詮水 | 陶有勤     | 高德江 |
|           | 隋起胜    |     |         |     |
| 主编        | 刘蕴才(兼) |     |         |     |
| 副主编       | 张纪生    |     |         |     |
| 秘书        | 崔福红    |     |         |     |

# 《电波大气折射误差修正》

主 编 黄 捷

编 著 者 黄 捷 张仁芳 胡大璋

主 审 吴 平

责任编辑 林秀权

## 序

为了发展导弹、航天事业,我们经过 40 年的艰苦奋斗,自立创新,建成了具有中国特色、先进、实用的导弹、航天测控网,圆满地完成了历次导弹、航天试验任务。

为了总结 40 年来取得的丰富经验,使其科学化、系统化、理论化,总装备部测量通信总体研究所在有关单位的支持、协同下,已经编著出版了《导弹卫星测控总体设计》、《导弹卫星测控系统工程》(上、下册),受到广大测控、通信技术人员欢迎。现在,以总装备部测量通信总体研究所为主,组织有关试验基地、院校和原航天工业总公司及电子工业部有关研究所,共同编著一套覆盖测控与通信领域主要专业、包含丰富实践经验、具有较高理论水平的《导弹航天测控通信技术丛书》,这是我国导弹、航天测控领域一件具有重要意义的建设性工作。

本丛书包括《导弹测控系统》、《航天测控系统》(上、下册)、《光学测量系统》、《无线电跟踪测量系统》、《遥测遥控系统》(上、下册)、《计算机在测控网中的应用》、《试验通信技术》(上、下册)、《时间统一系统》、《外测数据事后处理》、《电波大气折射误差修正》和《导弹航天测控通信技术词典》等 11 卷 14 册。丛书的出版,将为我国导弹、航天测控与通信技术人员提供一套内容丰富的学习资料,亦为从事导弹、航天工程研制与试验的其它专业技术人员提供一套了解相关专业知识和进行技术交流的图书。期望这套丛书能帮助广大读者加深对导弹、航天测控与通信技术的了解和运用,共同促进我国导弹、航天测控与通信事业的进一步发展。

沈昌俊

1998 年 8 月 1 日

## 前 言

20 世纪 70 年代以来电子科学飞速发展,许多科学技术都与无线电波有关,而无线电波在地面、空中以及星体间的传播,都要经过包围地球的大气层。该大气层从地面一直延伸到数千公里的高空。随着离地面高度的增加,大气层的组成物质和电参数发生明显改变,对电波传播的影响也存在明显差异。

最靠近地面的对流层是多种气体(氧、氮、二氧化碳、氢等)与水汽的混合体,层内大气密度、温度和湿度随高度下降,且大尺度变化总叠加着大气的局部湍流运动。因此,对流层的介电特性是不均匀的,使无线电波产生散射和折射;氧、水汽和水汽凝结物对无线电波有吸收作用,而其中的水汽凝结物还对无线电波有散射作用,这些都会造成无线电波的衰减。

平流层的大气密度很小,几乎没有水汽。由于在 20~50km 高空含有少量臭氧,强烈吸收太阳紫外线,导致层内温度达到六七十度。大气以平流为主,其电特性变化小,且接近于真空,对无线电波传播影响很小,可以忽略不计。

由于太阳的辐射作用,使地球外层大气电离,形成了电离层,层内含有大量自由电子和离子。电子和离子的浓度与纬度、地磁场、太阳的活动有密切关系。电离层对无线电波传播影响较大,会使无线电波产生吸收、折射和反射等作用。电离层的电参数与频率有关,故称电离层是色散介质。

由于大气有折射效应,使得无线电外测系统的角度、距离、速度测量值都带有误差。为保证测量值准确,必须对大气折射误差

进行修正。随着测量精度要求的不断提高,大气折射修正方法也从起初简单的等效地球半径法发展到现在的三维折射修正法,而大气参数测量设备和方法也不断更新。

随着无线电外测和导航事业的发展,国内外对大气折射的研究也取得了很大进步,归结起来有以下四个方面:

一是研究了地球外部大气折射指数  $n$  的结构特点、量值及变化,称之为“无线电气候学”。它不仅研究大气的瞬时特性,还研究大气随时间、地点变化的规律。大气探测手段也是该研究的重要部分。新的高精度探测设备更精确、客观地描述了大气结构参数,为大气折射修正提供了条件。

二是对大气折射修正方法的研究。除了基础理论研究外,还根据无线电外测系统的工作特点和要求,研究各种无线电系统大气折射误差的修正方法。

三是对大气折射修正剩余误差的研究,即研究修正方法和大气测量等因素引起的修正不准确性。

四是直接测量或减小大气折射误差新方法的研究。这是正在开展的新课题。

本书力争较全面地介绍上述四个方面的研究成果,并使外测工作者及相关科技人员能了解和掌握大气折射修正的有关知识及基本方法。书中还给出了一些典型数据,可供外测系统总体设计人员参考。

本书介绍的大气折射修正方法,不仅适用于无线电外测,对光测系统的折光修正也基本适用。

本书由黄捷任主编,其中电离层部分由张仁芳高级工程师编著,其余大部分由黄捷高级工程师编著,胡大璋教授参加了部分章节的编著。书稿经吴平研究员主审。

本书是在总装备部测通所具体组织指导下编著的,得到测通所的全面支持,该所罗海银研究员在百忙中对书稿进行了审阅,张

纪生研究员、刘蕴才高工对编著提纲和书稿作了多次反复修改,出版社林秀权编审也付出了辛勤的劳动,他们对确保书稿质量起了重要作用,原电子工业部 22 所对本书的编著出版给予了积极的支持,在此一并表示感谢!

由于我们水平有限,错误之处在所难免,敬请批评指正。

编著者

1998 年 6 月

## 内 容 简 介

本书系统地论述了大气结构和电波大气折射修正的基本原理。给出了不同无线电测量系统和 GPS 系统的大气折射修正方法。对修正后的剩余误差及模型也作了详尽的研究。并给出了一些实验数据和计算结果。

本书可作为无线电测量系统总体设计和从事大气折射修正工作的研究人员有价值参考书,也可作为高校有关师生的参考书

The atmospheric structure and the principle of radio wave atmospheric refractive correction methods are described systematically in this book. The methods of atmospheric refractive correction for various radio tracking systems and GPS system are given. The Residual error and the Residual error models after refractive correction are discussed in detail. Also, some experimental data and calculated results are given.

The book is a valued reference for a overall designer of the radio tracking system and researcher of atmospheric refractive correction. The book is also a reference for the relevant teacher and students in university.

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| <b>第一章 大气的电波折射效应及模型</b> | 1  |
| 1.1 大气结构及对电波传播的影响       | 1  |
| 1.2 平面无线电波在理想均匀介质中的传播   | 3  |
| 1.2.1 麦克斯韦方程            | 3  |
| 1.2.2 平面无线电波的形成及传播      | 4  |
| 1.3 对流层大气模型             | 7  |
| 1.3.1 对流层的折射率           | 7  |
| 1.3.2 我国的无线电气候          | 10 |
| 1.3.3 对流层大气折射指数模型       | 16 |
| 1.4 电离层大气模型             | 26 |
| 1.4.1 电离层的形成            | 26 |
| 1.4.2 电离层的结构            | 28 |
| 1.4.3 宁静电离层电子浓度的变化      | 30 |
| 1.4.4 火箭喷焰对电离层的影响       | 36 |
| 1.4.5 电离层探测方法           | 39 |
| 1.4.6 电离层模型             | 45 |
| 1.4.7 电离层的电参量           | 54 |
| 1.4.8 电离层的折射指数          | 58 |
| 1.5 波在介质中的传播速度          | 61 |
| 参考文献                    | 64 |
| <b>第二章 大气折射修正的基本原理</b>  | 65 |
| 2.1 几何光学原理              | 65 |
| 2.2 射线方程                | 66 |
| 2.3 射线的曲率半径             | 69 |
| 2.4 大气折射的各种形式           | 71 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 2.5 大气折射对各无线电测量量的影响 .....       | 72        |
| 2.5.1 水平距离 .....                | 73        |
| 2.5.2 视在距离 .....                | 75        |
| 2.5.3 弯曲角 .....                 | 76        |
| 2.5.4 地心张角 .....                | 77        |
| 2.5.5 仰角误差 .....                | 77        |
| 2.5.6 距离误差 .....                | 78        |
| 2.5.7 视在距离变化率及真实距离变化率 .....     | 78        |
| 2.5.8 视在距离变化率与视在多普勒频移的关系式 ..... | 80        |
| 2.6 大气折射误差实例 .....              | 82        |
| 参考文献 .....                      | 88        |
| <b>第三章 大气折射修正的实用方法 .....</b>    | <b>89</b> |
| 3.1 各种典型无线电测量系统的折射修正公式 .....    | 89        |
| 3.1.1 单站雷达系统 .....              | 89        |
| 3.1.2 多站测速定位系统 .....            | 91        |
| 3.1.3 多 SS 测量系统 .....           | 98        |
| 3.1.4 甚长基线干涉仪 .....             | 99        |
| 3.1.5 测高雷达 .....                | 100       |
| 3.2 三维大气结构下的折射修正 .....          | 100       |
| 3.2.1 三维大气结构下的位置量折射修正 .....     | 101       |
| 3.2.2 三维大气结构下的测速折射修正 .....      | 115       |
| 3.3 简化的大气折射修正方法 .....           | 115       |
| 3.3.1 天文折射法 .....               | 116       |
| 3.3.2 等效地球半径法 .....             | 117       |
| 3.3.3 线性回归法 .....               | 119       |
| 3.3.4 线性分层法 .....               | 121       |
| 3.3.5 经验修正法 .....               | 124       |
| 3.3.6 结构模型法 .....               | 128       |
| 3.3.7 高度误差近似算法 .....            | 129       |
| 3.3.8 插值法 .....                 | 130       |
| 3.3.9 几种近似修正方法的比较 .....         | 135       |
| 参考文献 .....                      | 137       |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| <b>第四章 大气折射修正残差分析 .....</b>                  | <b>138</b> |
| 4.1 大气折射修正公式的假设误差 .....                      | 139        |
| 4.2 大气随机起伏对折射修正的影响 .....                     | 140        |
| 4.2.1 大尺度不均匀性引起的随机误差 .....                   | 141        |
| 4.2.2 小尺度不均匀性引起的随机误差 .....                   | 142        |
| 4.3 原始参数误差的影响 .....                          | 144        |
| 4.4 大气结构误差的影响 .....                          | 144        |
| 4.4.1 系统误差的影响 .....                          | 144        |
| 4.4.2 随机误差的影响 .....                          | 147        |
| 4.4.3 大气结构随时间变化对修正的影响 .....                  | 148        |
| 4.5 折射修正后的剩余误差模型 .....                       | 151        |
| 4.5.1 距离折射修正后的剩余误差模型 .....                   | 152        |
| 4.5.2 仰角折射修正后的剩余误差模型 .....                   | 153        |
| 4.5.3 距离差、距离变化率和距离差变化率折射修正后的剩余<br>误差模型 ..... | 154        |
| 4.5.4 剩余误差模型系数的简单估计 .....                    | 155        |
| 参考文献 .....                                   | 156        |
| <b>第五章 大气折射修正的新方法 .....</b>                  | <b>157</b> |
| 5.1 对流层微波辐射计修正法 .....                        | 157        |
| 5.1.1 微波辐射计的工作原理 .....                       | 157        |
| 5.1.2 辐射计大气折射修正的基本原理 .....                   | 162        |
| 5.1.3 辐射计修正法与公式修正法的比较 .....                  | 165        |
| 5.2 电离层折射误差实时修正 .....                        | 167        |
| 5.2.1 电离层折射效应的级数表达式 .....                    | 168        |
| 5.2.2 利用多相关频率的电离层折射自修正 .....                 | 184        |
| 5.2.3 群相时延互补法 .....                          | 192        |
| 参考文献 .....                                   | 194        |
| <b>第六章 GPS 系统的大气折射修正 .....</b>               | <b>196</b> |
| 6.1 GPS 简介 .....                             | 196        |
| 6.2 GPS 中的大气折射误差 .....                       | 197        |
| 6.2.1 电离层折射误差 .....                          | 197        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 6.2.2 对流层折射误差 .....                | 199 |
| 6.3 GPS 系统的大气折射修正 .....            | 199 |
| 6.3.1 电离层折射误差修正 .....              | 200 |
| 6.3.2 对流层折射误差修正 .....              | 205 |
| 6.4 GPS 差分系统和新型接收机的电离层折射修正 .....   | 206 |
| 6.4.1 GPS 差分技术 .....               | 207 |
| 6.4.2 新型 GPS 接收机的电波折射修正 .....      | 215 |
| 6.5 转发式 GPS 外测系统的折射修正 .....        | 220 |
| 6.5.1 转发式 GPS 外测系统概述 .....         | 221 |
| 6.5.2 电离层对 GPS 定位的影响 .....         | 221 |
| 6.5.3 转发式 GPS 外测系统的电离层综合修正法 .....  | 225 |
| 6.5.4 修正精度与效果检验 .....              | 242 |
| 6.5.5 利用 GPS 测量 TEC 以修正电离层折射 ..... | 243 |
| 参考文献 .....                         | 249 |