

大地测量的折射问题

F.K. 布伦纳 编辑

测绘出版社

大地测量的折射问题

F.K.布伦纳 编辑

梁振英 方佩竹 译

陈 健 校

测绘出版社

内 容 简 介

本书论述了有关折射问题的基本理论和最新发展,由国外13位权威作者撰写的10篇文章组成。内容涉及大地测量中有关折射问题的各个方面。重点讨论了:用改善仪器结构的方法来克服大气扰动对精密测量的影响,如方向观测的双色法、干涉测量法、多波长电磁波测距和水汽辐射测量等;大气影响的模拟方法,特别是对精密水准和天文观测;电磁波传播的理论。

本书向读者介绍了多学科领域的最新研究成果,提供了近地气层复杂结构的牢固知识和研究方法,弥补了这一重要学科在文献方面长期存在的空白。

本书可供大地测量、工程测量、地球物理、气象学方面的科研人员、大专院校师生和专业人员参考。

Gednetic Refraction

大地测量的折射问题

F.K.布伦纳 编辑

梁振英 方佩竹 译

陈 健 校

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 850×1168 1/32 ·印张 8.75·字数 187 千字

1988 年 8 月第一版 · 1988 年 8 月第一次印刷

印数 1—1,500 册 · 定价 2.50 元

ISBN 7-5030-0120-8/P·51

统一书号: 15039 · 新 659

译者的话

本书论述了有关折射问题的基本理论和最新发展,是由若干权威作者分别撰写的反映最新科学成就的专著。众所周知,在大地测量的各个领域,包括卫星多普勒测量、GPS、VLBI、电磁波测距、三角高程、水平角观测、精密水准和天文测量等等,都受大气折射的影响。而在大地测量仪器精度高度发展的今天,大气折射已大大限制了仪器的自身精度。因此,对这个问题的研究,具有十分重要的现实意义。本书根据微气候学理论,介绍了这个重要的、多学科领域的最新科学成就。其中第六章关于低层大气中温度和湿度结构的描述,具有相当的深度,不仅对测绘和地球物理工作者,而且对从事微气候学研究的专业人员,也具有重要的参考价值。

本书序言及第一、二、三、四、五、七章由方佩竹同志翻译,第六、八、九、十章由梁振英同志翻译。全书由天津大学陈健教授校译,在此表示感谢。由于本书涉及的知识面很广,译文中难免有不妥之处,敬希读者予以批评指正。

译者 1987.10.

前 言

除极个别的情况以外，大地测量总是用电磁波辐射来测量方向、距离、时间延迟以及多普勒频移等，以便测定主要的地面及空间观测目标。随测量的目的和使用的电磁波辐射波长的不同，人们量测下列一些电磁波参数：振幅、相位、入射角、偏振与频率。这些观测结果都必须施加精确的改正，以顾及发射机和接收机之间介质的影响。采用大气模型、专门的观测程序、遥感技术以及仪器方面的方法等，都是已知的解决办法。

许多事实证明地球大气层的影响在很大程度上限制了大地测量观测结果的精度，不论地面或空间都是如此。而在大地测量仪器高度发展的今天，大地折射已大大限制了仪器的自身精度，因此，解求大地测量折射的精度要求正在进入一个新的数量级范围。

本专集主要讨论大气对于各种测量结果影响的性质及其计算。10篇文章涉及大气对大地测量结果影响的最迫切的方面。这些最新论著是由相应领域的著名专家们撰写的。

有关论文是在“大地测量中折射研究的进展”讨论会上的应征讲稿，该会是1982年5月在东京举行的IAG大会期间进行的。笔者个人认为需要将这些论文汇编成集，以便在这个边缘学科的研究领域内建立继续发展的基础。为此，曾与IAG所属“在大气中电磁波的传播与折射”的专门研究组1.42进行了联系。

编纂本书，旨在为大地测量折射研究的成就提出代表性的报导，并为继续研究提供所需要的科学背景。收集的10篇论著均自成体系，每篇都有所用符号的说明。第一章是大地测量中折射研究的概述。第二章评述用双色波法仪器测定大气对大地测量方

向观测结果影响的发展。第三章研究大气湍流对于地面干涉测量结果的不利的影响。第四章讨论多波长测距仪发展的情况。第五章评述水汽测量的理论基础、仪器设计原理和可达到的精度。第六章涉及在大气边界层中温度和湿度结构的现代知识。第七章论述用于地面大地网观测的模型方法的一般概念,着重于电磁波测距与竖直角观测方面。第八章研究了精密水准测量中的折光误差。第九章概述在天体测量学中大气折射研究的现代成果。第十章推导了电磁波在与地球共同旋转的折射介质中传播状态的方程。

笔者由衷地感谢各位作者愿意向本书投稿,也感谢他们在编纂本书的过程中杰出的合作。此外,还要感谢在编排和补充本书方面作过贡献的人们。也要感谢 Springer 出版社当出版最后期限需作多次调整时所表现的耐心和灵活性。

Fritz K. Brunner

1984 年 8 月瑞士 Heerbrugg

目 录

第一章 大地测量折射研究概述

(作者: F.K.Brunner) (1)

- 1 引言 (1)
- 2 我们面临的问题 (2)
- 3 内容编排 (5)

第二章 双波长角折射测量

(作者: D.C.Williams 和 H.Kahmen) (9)

- 1 引言 (9)
- 2 方法的理论 (10)
 - 2.1 折射的积分 (11)
 - 2.2 折射的大小 (13)
 - 2.3 双波长的关系 (14)
 - 2.4 水汽的考虑 (16)
- 3 仪器的方法 (18)
 - 3.1 仪器方法的探讨 (19)
 - 3.2 Khvostikov (20)
 - 3.3 Tengström (21)
 - 3.4 Vshivkov 及 Shilkin (23)
 - 3.5 Startsev 及 Tikh (24)
 - 3.6 Brein 及 Glissmann (25)
 - 3.7 Dyson 及 Williams (27)
 - 3.8 Astheimer 及 McHenry (28)
 - 3.9 Mikhailov (29)
- 4 结论 (31)

4.1	未来展望	(31)
4.2	折射的消除	(32)
第三章 大气湍流对大地测量干涉观测的影响:		
归算方法 (作者: M.T.Prilepin 和 A.S.Medovikor)		
		(38)
1	引言	(38)
2	信噪比	(38)
2.1	总论	(38)
2.2	在双光束中具有相似与完全相关起伏 的对称干涉仪	(40)
2.3	具有相似但仅部份相关起伏的对称干 涉仪	(40)
2.4	具有无起伏参考臂的干涉仪	(41)
2.5	讨论	(41)
3	到达角的起伏: 影响的估算	(43)
4	线性干涉测量: 起伏影响及其归算	(45)
第四章 多波长电磁波测距 (作者: J.Levine)		
		(51)
1	引言	(51)
2	仪器设计 (一般原理)	(52)
3	仪器设计 (技术上的权衡协调)	(53)
4	提出的仪器设计	(57)
5	现行的仪器	(58)
第五章 用于大地测量中的水汽辐射测量		
(作者: G.M.Resch)		
		(60)
1	引言	(60)
2	问题	(60)
3	计算公式	(63)
4	算法中“常数”的确定	(67)
5	仪表	(78)

6	水汽对于基线测定的影响	(87)
7	摘要与结论	(97)
第六章 低层大气中的温度和湿度结构		
	(作者: E.K.Webb)	(102)
1	引言	(102)
2	总的情况	(103)
3	近地面大气层	(104)
3.1	湍流交换关系	(104)
3.2	非绝热平均廓线形式	(113)
3.3	温度和湿度的波动特征	(121)
3.4	温度和湿度的波动幅度	(126)
3.5	谱和结构函数	(128)
4	大气边界层	(143)
4.1	主要特征	(143)
4.2	对流边界层	(144)
4.3	稳定边界层	(154)
5	表面影响的复杂性	(162)
5.1	引言	(162)
5.2	小尺度调整或“局地平流”	(163)
5.3	海风	(163)
5.4	山谷效应	(164)
第七章 大气对大地测量观测影响的模拟		
	(作者: F.K.Brunner)	(177)
1	引言	(177)
2	模拟的概念	(179)
3	大气湍流模型	(182)
4	$\tilde{r}$ 的整体模型	(186)
4.1	概述	(186)
4.2	矫正模型	(188)

4.3	运算模型	(192)
4.4	讨论	(193)
5	模型的评定	(193)
6	讨论	(196)

第八章 精密水准测量的折光问题

	(作者: P.V.Angus-Leppan)	(202)
1	引言	(202)
2	库卡梅基的折光研究	(204)
3	水准折光的通用方程	(207)
4	大气边界层的温度梯度	(209)
5	Holdahl的水准折光改正模型	(211)
6	美国国家大地测量局的试验结果	(213)
7	Angus-Leppan 公式的应用研究	(214)
8	统计分析	(217)
9	系统性和偶然性影响	(221)
10	结论	(222)

第九章 用经典方法进行时间和纬度观测时大气

	折射的影响 (作者: I Naito 和 C.Sugawa)	(229)
1	引言	(229)
2	天文折射的改正公式	(230)
3	VZT、PZT 和等高仪观测中的折射问题	(231)
4	实际的大气结构	(233)
5	折射影响及消弱其影响的若干气象学措施	(234)
6	结论	(236)

第十章 随地球旋转的折射介质中电磁波的传播

	方程 (作者: E.W.Grafarend)	(238)
1	引言	(238)
2	变分问题	(239)

2.1	欧拉-拉格朗日方程.....	(239)
2.2	哈密顿复合式	(240)
2.3	不变性公理	(241)
2.4	实例	(242)
3	电磁介质中波动方程的变分原理.....	(246)
3.1	法拉第-麦克斯韦张量.....	(246)
3.2	线性本构方程	(249)
3.3	波动方程的变分原理	(251)
4	对地固坐标系中波动方程的讨论.....	(252)
4.1	在惯性坐标系内静止介质中的波动方 程组	(252)
4.2	随地球旋转的介质中的波动方程组	(255)
4.3	举例	(260)

第一章 大地测量折射研究概述

F.K.Brunner

1 引言

本专辑集中讨论以电磁波传播为基础的大地测量结果所受到的大气影响的问题。大地测量计算需要采用的观测值，就是假定电磁波是在真空中传播而得的数值。本辑主要研究大气影响的性质及其计算。共分三个主要研究范畴：

- (i) 仪器方面的解决方法；
- (ii) 大气折射影响模式的求定；
- (iii) 理论上的发展。

除极少数例外，大地量测都是利用电磁波射线来确定地面与空间主要可见目标的方向(水平及竖直)、距离、时延与多普勒频移。被观测的电磁波参数是振幅、相位、终端角、偏振及频率，这都取决于辐射波长与观测的目的。为了顾及发射机至接收机间介质的影响，必须施加某些改正。特殊的折射率场改变着电磁波射线穿过它时的速度、强度、频率与方向。

我们采用“大地测量折射”这一总称来描述大气对大地测量结果的一切影响，把方向、频率、速度与强度方面的变化都包括在内。大地测量折射的研究，已集中于计算非均匀而呈静态的折射场对各种大地测量结果的影响。解决的办法是使用大气模型、特定的观测程序、遥感技术与专门的仪器。电磁波传播的色散效应是仪器法的基本原理。在这方面，曾将电荷为中性的大气层和电离层的各种效应用在不同解法中，并取得了重大的成功。

介质的折射率取决于电磁波射线穿过它时的传播频率与介质的成份。中性大气层由地面延伸到其上方达 45 km 左右的空间，

在此层中，光波显示一种色散效应。水汽的这种效应则极小。然而，在中性大气层中微波的折射率并不显示色散效应，但与水汽含量的依赖关系却极其强烈。电离层的折射率视频率而定。色散效应随着电磁波频率的增高而降低。

2 我们面临的问题

天文折射是一项极其古老的课题，它比皮卡 (Picard) 于 1669 年首次提到的大地测量折射更为古老。从那时起，许多大地测量工作者觉得这个颇为隐晦的问题富有魅力，值得耗费一些时间对它的影响进行研究。许多知名人物都与这项主题有关。下面适当地列举数人，并不要求完整：Bauernfeind, Bayer, Bomford, Brocks, Bruns, Dufour, Gauss, de Graaff-Hunter, Helmert, Hotine, Jordan, Kukkamäki, Lallemant, Levallois, Moritz, Näbauer 及 Tengström。国际大地测量协会 (IAG) 历来承认大地测量折射研究的重要性，接纳了相应的专门研究组。曾经举行过多次国际性会议，鼓励协作，旨在解决有关问题，例如在 Oxford (1965), Vienna (1967), Boulder (1969), Stockholm (1974), Wageningen (1977), Uppsala (1978), Dubrovnik (1981) 和东京 (1982) 举行的会议。

1826 年 C.F. 高斯在汉诺威大地测量网中推算出竖直角观测结果的折射系数为 0.13 (即地球的曲率半径与光径的曲率半径之比)。他认定该值有 $\pm 25\%$ 的误差。对一个大地测量和普通测量方面学识浅薄的观测员来说，似乎自从 150 年前高斯的研究工作以来，在这方面没有取得多少进展。然而，如前所述，大量的研究作业已进行，对大地测量折射问题已有了基本的了解。但是这种研究工作极少有推出什么新的实用测法或新型仪器的。

今天的大地测量仪器，特别是用于地面观测的仪器，可以具有比大气影响容限更高的观测精度。诚然，大地测量折射限制了用这些仪器所得的精度的进一步提高。许多大地测量工作者似乎都

有相同的看法，即“大地测量折射很麻烦，是极难逾越的障碍”。

近来这种见解似乎正在变化，按照笔者的意见，变化的原因有二：第一，地面大地测量方法已经遇到一个强有力的竞争者，就是空间方法，当然，空间测量同样受到地球大气层的影响，但方式不同；第二，现代地壳形变研究无疑地要求大范围的距离及高差观测要有最高的精度。

为了举例说明这种情况，将在地面上由各种测量方法观测一条基线所达到的精度 (e) 以基线长度 (b) 为参考绘于图1.1。所用方法如下：多普勒卫星定位(DOPPLER)，激光卫星测距(LASER, SLR)，甚长基线干涉测量(VLBI)，全球定位系统-基线干涉测量(GPS-BI)，电磁波测距(EDM)以及多波长电磁波测距(MWDM)。SLR 与 VLBI 的可移动形式，使用起来效率很高。图 1.1 中标出的精度量是文献中引用量和各个人估算量的平均值，并假定基线是作为一个整体来观测的。例如，如果像在地面大地测量中频繁采用的办法，把基线细分为一系列的短基线的话，那么就不去考虑相应的误差传播。

为各种测量方法各画两条线。上线代表一般核实的因而也是认可的精度；下线代表方法的内在精度，是只有在相应大气折射问题能被解决时才能达到的精度。

当采用精练的大气改正模型或比例法时，单波长电子测距具有 0.5ppm 的潜在精度。图 1 指出，地面方法中使用 GPS-BI 以及在较长基线的情况下使用移动式 VLBI 时几乎形成均匀的精度带。我们不能确切地给出某种特殊的基线长度，由这个长度开始，两种方法将会互为竞争者。当然，经济因素会起着与仪器因素一样的作用。例如，是将 GPS-BI 仪器制成单频还是制成双频接收机，这将起着决定性的重要作用。双频接收机几乎会排除电离层的全部影响，从而可以更精确地观测更长的基线。可是，非相关的水汽影响可能成为这里主要误差的来源。

多波长电磁波测距获得高于 EDM 和 GPS-BI 的精度级。

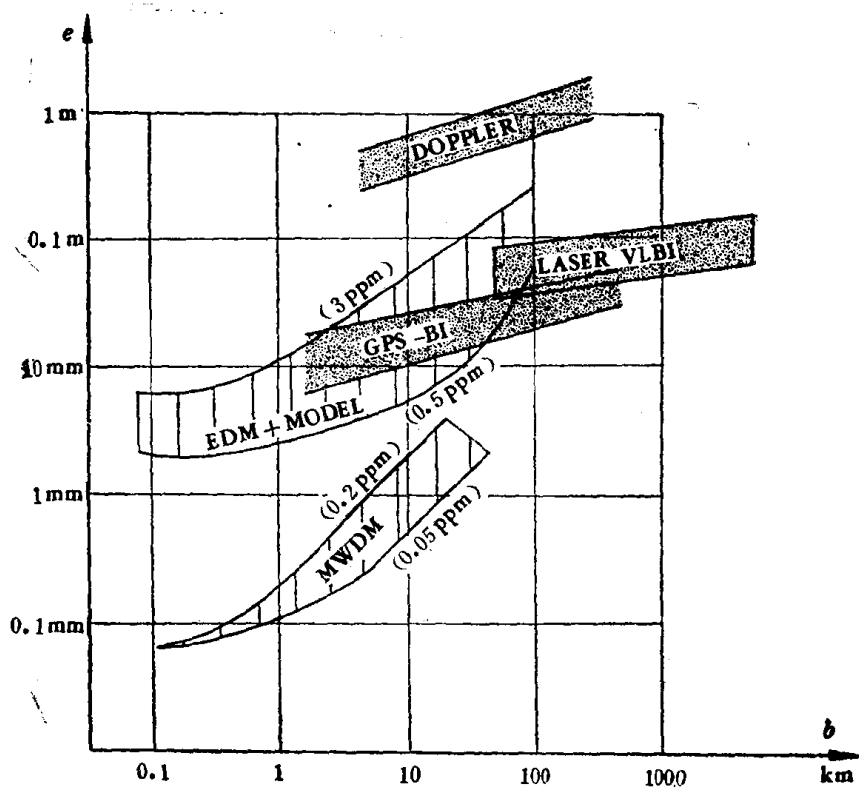


图 1.1 以基线长度 (b) 为参考的基线测定精度 (e)

在大地测量中，MWDM 已为地壳形变研究测量了极其精确的距离。测程的限制和形变观测的自动化问题都是明显的缺陷。这里大气湍流所形成的问题，是由于信号在不同激光波长处的抗相关现象或者由于自调制而引起的信号的失控调制。大气湍流的随机性状使我们不能对大地测量观测加以这类影响的改正。所以，大地测量折射影响的波动部份相当于大地测量结果最后精度的基本限值(Brunner, 1979, 1982)。

人们曾经争论过，是否大气层的影响基本上限制了大地测量结果的准度和精度，对地面和空间的量测都是如此(Mueller, 1981)。仪器准度的极限已经低于大气构成的限度，而大地测量

折射求解的精度要求将进入一个新的量级范围。

3 内容编排

本专辑共有9篇独立的论文,分成三个主要部份:(i)仪器方面的解决方法[第二至第五章];(ii)大气效应模拟[第六至第九章];(iii)理论上的发展(第十章)。这些论文具有科学发展水平评论的性质,集中讨论了在范围相当狭窄的研究领域内所取得的进展。为了对大地测量折射这个总课题有一个简明而良好的通盘了解,请读者们参考Hotine的著作(1969)第24节。伊索托夫(1975)已提出了未来研究工作的一个远景。

在第二章内,Williams和Kahmen对用专门仪器来确定大地测量方向观测中的大气效应的双色波法的发展提出了广泛的评论。文章讨论了本法的优点及其局限性,特别是关于大气的不均匀性与水汽含量的影响。介绍了著名的双色波仪器设计的原理。数年来在本项研究领域内取得了许多进展,同时也研制出了一些各类形式的样机。总结了试验结果。但在有强烈大气湍流的时限内进行可靠的观测,似乎还存在着问题。

在第三章内,Prilepin研究了大气湍流对地面干涉测量结果的不利影响。对采用干涉测法的双波长角度折射法的设计原理,作出了某些结论。应当指出,甚至用于解决大地测量折射问题的多波长法也只能部份地改正随机折射的影响,因为沿着空间分开的光径,折射率的波动是部份抗相关的。关于在地面高精度大地测量中应用干涉仪的总的情况,Prilepin曾作过报导(1981)。

EDM必须进行沿波道的全折射率值的改正。多波长EDM是用仪器方法来解决本项问题的基本思想。几年来已取得相当大的进展,其结果是今天可以从市场上得到一种此类仪器。至于其它类型的仪器正在研制中。Levine在第四章中讨论了用三种不同波长同时观测以确定大气折射率的方法的一般特征。他对多波长EDM所达到的精度以及本法对大气湍流和闪光的敏感度进行

估计。提出了样机的设计方案。

目前,似乎 VLBI 观测与利用 GPS 的干涉测量将成为用于地壳形变研究的未来方法,而且用于基线测定的设想精度优于 1 cm。这些方法的主要精度限制,是对观测时间内水汽分布所造成的传播延迟还不充分了解。最有希望的方法是用无源微波辐射计进行观测以便计算沿视线的水汽延迟。在第五章中, Resch 提出了水汽辐射测量在理论背景、仪器设计原理和可能达到的精度方面完全独立的评论。他证明,这些仪器能够估算来自水汽含量的射线延迟,具有 1 ~ 2 cm 的准确度,在大多数天气条件下有 0.2 cm 的精度。

另一种仪器的解决方法,是采用常规的大地测量仪器(单波长)并对大气影响建立某种模式来加以改正。目前,差不多所有的地面及空间测量都需要此类模式。当然,这些模式要求对基础的大气形成的过程有很好的了解。此外,看来极其重要的是,大地测量折射的影响与大气边界层的基本物理性质是有关的。

在第六章中, Webb 回顾了当前有关大气边界层中温度及湿度结构的知识。对于地面大地测量来说,数十米厚度的地面大气层起着主要作用。湍流波动的平均量和性质的垂直剖面强烈地取决于垂直热通量与风速。他讨论了高达 1.5 km 左右处的边界层剩余部份的结构与动态。

Brunner 在第七章中评述了地面网观测的模型研究,特别是关于 EDM 及竖直角观测。他对为估计大气效应而建立的整体模型与周边模型的主要特征,就其在大地网的应用方面作了讨论。他指出,把大气效应中的确定性部份与随机性部份分离开来,对模型的建立起着重要的作用。他研制了一种称为技巧的指示符,将用来检验模型的有效性。

EDM 比例法的外业测量获得令人鼓舞的结果,该法可能用来消去大气对 EDM 观测影响中的主要部份。一种特殊的观测方法与利用未知的站点折射系数,可获得模拟竖直折射影响的最佳