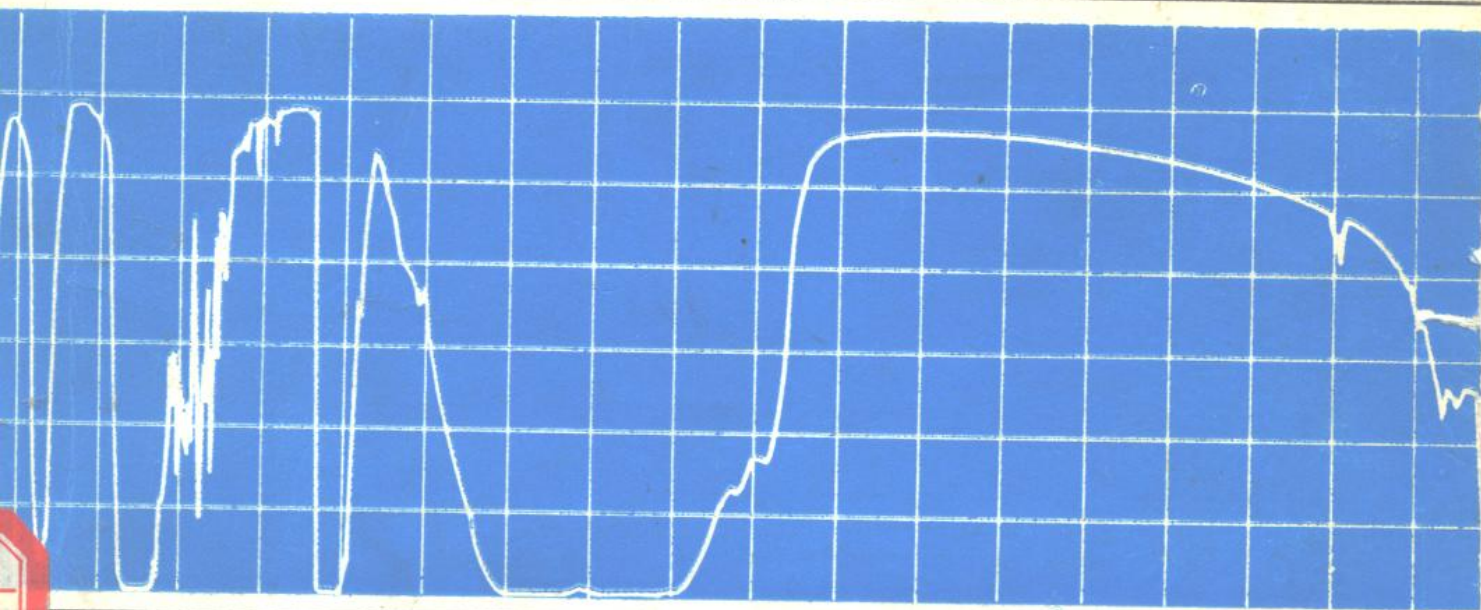


宋正方 编著

应用大气光学基础



气象出版社

P427.1

SZF

应用大气光学基础

——光波在大气中的传输与遥感应用

宋正方 编著

TW27 / 2

气象出版社

内 容 介 绍

本书系统地介绍了光波在大气传输中与大气相互作用所出现的一系列线性效应(折射、吸收、散射和湍流效应等)和非线性效应(大气击穿、热晕与受激喇曼散射等),详细论述了依据传输效应所提供的信息进行遥感探测的基本原理和广泛应用的实例。书中概括了国内外直到最近为止在这方面的主要成就,并附有大量图表与参考文献。

本书可供从事大气光学、大气物理学、环境科学、遥感技术,特别是激光与红外工程的科技人员参考,也适合作为高等院校上述专业的研究生和大学教材或参考书。

应用大气光学基础

宋 正 方 编 著

责任编辑 陶 国 庆

* * *

气象出版社 出版发行

(北京西郊白石桥路 46 号)

安徽省建筑设计院电脑印刷部印刷

* * *

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 15 字数: 368 千字

1990 年 10 月第一版 1990 年 10 月第一次印刷

印数: 1—1000 定价: 10.00 元

ISBN7-5029-0605-3/P · 0336

前 言

将近 30 年来激光在通信、雷达、测距、遥感和监测等方面的大量应用有力地促进了光波在大气中传输特性的研究,而大气传输研究成果又为提高原有激光应用项目的能力和开拓新的应用领域作出了重要贡献。在过去的书刊中往往把激光大气传输和激光大气探测分成两个学科分支加以研究,事实上两者的关系正如上述是十分密切的,之所以如此是因为它们有着共同的物理基础,这就是辐射与大气相互作用过程。一方面相互作用过程中所产生的吸收、散射与湍流效应等现象影响了激光在大气中应用,而另一方面正是这些现象提供了大气物理性质的丰富信息,成为遥感探测的基础。同时激光应用成果又有助于更深入地了解光波与大气相互作用的本质。因此统一地对这一物理问题的两个方面加以研讨更为合适。撰写本书的目的之一就是对此进行初步的尝试,并冒昧以“应用大气光学”命名之,以区别于以可见光现象为主要研究对象的经典大气光学。

顾名思义,应用大气光学是以应用为目的而研究大气光学现象的,因此本书以较多的篇幅详细讨论光波与大气相互作用所产生的一系列效应,这包括线性效应和非线性效应两大方面。线性效应主要是:(1)大气折射率高度分布不均匀导致的光束折射——大气折射;(2)大气分子与气溶胶粒子对辐射的吸收与散射,造成辐射能量损失——大气衰减;(3)湍流对光束的扰动导致闪烁、漂移、扩展与抖动等现象——湍流效应。非线性效应虽然主要发生在高功率、大能量激光的传输过程中,但也是线性效应的延伸与发展,也许不久还有可能发展成用于遥感的手段,因此本书也以一定篇幅加以介绍。非线性效应的范围十分广泛,但有重要影响的是大气击穿、热畸变效应和受激喇曼散。上述内容组成了本书的第一部分(前四章),而第二部分(后三章)则介绍利用激光进行遥感探测的基本原理和方法,以及应用于大气的实例。

考虑到更多领域读者的需要,尤其是从事激光与红外工程技术应用的广大科技工作者的需要,我们在内容的取舍上尽可能注意理论基础的实用性,大部分内容都辅以必要的图表,以方便读者借鉴和引用。在叙述方式上以讲清物理概念为主,所涉及的数学问题只作简单的引述,感兴趣的读者可以在相应的参考文献中找到详细论证。为求全书规格的统一,符号和定义尽可能保持前后一致。

本书力图反映国内外有关激光在大气中传输与遥感应用的最新进展,尤其注意反映国内的研究成果,其中包括已出版的有关专著很少提及或尚未提及过的问题,例如大气效应的补偿,反射光路湍流效应的特性,以及利用湍流效应的遥感等等。但本领域发展迅速,文献浩瀚,选材不当、挂一漏万之处在所难免,恳请读者多加指正。

本书承蒙刘长盛教授审阅并提出宝贵意见,作者深表谢忱。

作者

1988年4月于合肥

目 录

第一章 光波在大气中的折射	(1)
1.1 空气折射率	(1)
1.1.1 折射率公式	(1)
1.1.2 折射率的高度分布	(2)
1.2 大气折射与修正	(3)
1.2.1 近地面折射	(3)
1.2.2 大气折射修正	(6)
参考文献	(10)
第二章 大气的吸收与散射效应	(11)
2.1 辐射传输概述	(11)
2.1.1 基本定义	(11)
2.1.2 布给定律	(12)
2.2 大气的结构与组成	(13)
2.2.1 大气层结构	(13)
2.2.2 大气成分	(14)
2.2.3 气溶胶和粒子	(16)
2.3 辐射在大气中的吸收	(20)
2.3.1 气体分子吸收光谱	(22)
2.3.2 大气主要成分对激光的吸收特性	(31)
2.4 辐射在大气中的散射	(37)
2.4.1 分子散射	(37)
2.4.2 微粒散射	(40)
2.4.3 非弹性散射	(46)
2.4.4 多次散射	(50)
2.5 实际大气中辐射的衰减	(52)
2.5.1 霾的衰减	(52)
2.5.2 雾的衰减	(52)
2.5.3 云的衰减	(54)
2.5.4 雨和雪的衰减	(56)
2.5.5 斜程衰减	(58)
2.5.6 常用激光在大气中衰减的比较	(60)
2.5.7 红外辐射的大气衰减	(61)
参考文献	(63)
第三章 湍流大气中光的传输	(67)
3.1 大气湍流概要	(67)
3.1.1 大气湍流的基本模型	(68)
3.1.2 近地面湍流的特性	(69)

3.1.3	湍流的高度分布	(69)
3.2	湍流介质中光波的传播理论	(71)
3.2.1	小扰动近似	(71)
3.2.2	马尔柯夫近似	(74)
3.3	强度起伏	(77)
3.3.1	对数强度起伏方差	(77)
3.3.2	空间协方差	(79)
3.3.3	闪烁的时间频谱	(80)
3.3.4	光强的概率分布	(82)
3.3.5	孔径平滑效应	(85)
3.3.6	倾斜光程上的闪烁	(86)
3.4	相位起伏	(88)
3.4.1	光束的相位起伏	(88)
3.4.2	到达角起伏	(92)
3.5	有限光束的扩展与漂移	(95)
3.5.1	平均强度	(95)
3.5.2	光束扩展	(98)
3.5.3	光束漂移	(100)
3.6	折叠式光路上的湍流效应	(103)
3.6.1	强度起伏	(103)
3.6.2	孔径平滑效应	(107)
3.6.3	光束扩展	(108)
3.6.4	光束抖动	(109)
3.6.5	光程长度起伏	(110)
3.7	湍流效应对若干光学工程的影响	(112)
3.7.1	大气闪烁对激光雷达的影响	(112)
3.7.2	大气闪烁对光通信的影响	(114)
3.7.3	大气中相干性损失	(115)
3.7.4	大气湍流对图像分辨率的影响	(117)
3.8	湍流效应的补偿	(118)
3.8.1	多元变形镜自适应技术	(119)
3.8.2	相位共轭补偿技术	(121)
	参考文献	(123)
第四章	大气中强激光传输的非线性效应	(126)
4.1	高功率激光的大气击穿效应	(126)
4.1.1	击穿机理	(126)
4.1.2	击穿阈值	(128)
4.1.3	击穿区域的若干特征	(130)
4.2	高能激光束在大气中的热畸变	(131)
4.2.1	基本方程组	(131)
4.2.2	连续波稳态热晕	(132)
4.2.3	单脉冲热晕	(136)
4.2.4	脉冲列热晕	(139)

4.2.5	非均匀光程上脉冲激光的热晕	(141)
4.3	随机介质中强激光的热晕	(142)
4.3.1	混合湍流对光束热散焦的影响	(143)
4.3.2	窄光束在热散焦情况下的强度起伏	(144)
4.3.3	热晕状态下宽光束的强度起伏	(145)
4.3.4	热晕状态下脉冲辐射的起伏	(146)
4.4	热晕的抑制与补偿	(147)
4.5	受激喇曼散射	(149)
4.5.1	大气中的受激喇曼散射	(150)
4.5.2	受激转动喇曼散射阈值	(153)
	参考文献	(155)
第五章	激光遥感的原理与方法	(157)
5.1	后向散射技术	(158)
5.1.1	后向散射激光雷达方程	(158)
5.1.2	激光雷达方程的解	(160)
5.1.3	若干因素的影响	(162)
5.1.4	重迭系数	(165)
5.2	差分吸收技术	(166)
5.2.1	差分吸收激光雷达方程	(167)
5.2.2	探测灵敏度	(168)
5.2.3	误差分析	(168)
5.3	荧光技术	(173)
5.3.1	荧光激光雷达方程	(173)
5.3.2	误差分析	(175)
	参考文献	(176)
第六章	大气环境监测	(178)
6.1	气溶胶性质的探测	(178)
6.1.1	衰减系数与后向散射系数的测量	(179)
6.1.2	浓度的测量	(180)
6.1.3	尺度分布的反演	(181)
6.1.4	混合层观察	(183)
6.1.5	平流层气溶胶测量	(184)
6.2	气体浓度与分布的监测	(186)
6.2.1	差分吸收法探测	(186)
6.2.2	喇曼散射法探测	(192)
6.3	高层大气成分的遥感	(194)
6.3.1	碱金属原子的遥感	(194)
6.3.2	羟基的遥感	(197)
	参考文献	(198)
第七章	激光雷达在气象上的应用	(202)
7.1	大气温度、密度和气压的探测	(202)
7.1.1	大气密度与气压的探测	(202)
7.1.2	大气温度的探测	(205)

7.2	大气水汽的测量	(209)
7.2.1	差分吸收法测量水汽	(210)
7.2.2	喇曼散射法遥测大气水汽	(211)
7.3	激光雷达测风	(211)
7.3.1	多普勒测风法	(212)
7.3.2	随机信号相关测风法	(213)
7.4	大气湍流的遥感探测	(214)
7.4.1	后向散射法测量湍流	(215)
7.4.2	闪烁特性反演湍流	(216)
7.5	能见度的测量	(218)
7.5.1	能见度理论	(219)
7.5.2	能见度探测技术	(220)
7.6	云雾探测	(222)
7.6.1	云的宏观特征观测	(223)
7.6.2	云的生消过程观测	(224)
7.6.3	云的偏振特性探测	(224)
7.7	降水遥感	(225)
7.7.1	后向散射法测雨	(226)
7.7.2	闪烁法测量降雨强度与雨滴谱	(226)
	参考文献	(228)

第一章 光波在大气中的折射

光线在水平方向或垂直方向通过大气层传播时受到大气的折射,这种现象以及由此引起的折射量统称为大气折射。人们对于光线折射的认识由来已久。约在公元前2世纪,希腊的波西东尼乌斯发现了大气折射对测量的影响,我国晋代的姜岌是最先提到大气折射的学者。十七世纪G. D. 卡西尼首先建立了大气折射理论,此后不少学者对大气折射进行过研究。一些基本问题已有了成熟的理论,这方面的知识已成为有关大气光学书籍的必要组成部分。激光的出现以及激光应用工程的发展对大气折射研究提出了新的要求,最明显的例子就是激光测距,尤其是对于月球和人造卫星的测量,已提出了测量精度达到1 cm量级的要求。这种几乎是极限精度的要求推动了测量技术的发展,而对大气中光波折射的研究无疑也是个有力的推动。

本章不准备全面涉及经典意义上的折射问题,主要就应用工程比较关注的空气折射率以及折射修正问题展开讨论。

1.1 空气折射率

1.1.1 折射率公式

经典电磁理论已经证明,介质在波长 λ 处的折射率具有下列的普遍形式:

$$n^2 = 1 + \sum a_i \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_i^2), \quad (1.1)$$

a_i 为某一常数, λ_i 是与原子或分子的共振线相对应的波长。一般情况下常使用下述以多项式表达的公式

$$n = A + B\lambda^{-2} + C\lambda^{-4} \quad (1.2)$$

式(1.1)和(1.2)分别称为 Sellmeier 型和 Cauchy 型公式,其中常数是由实验测定的。

本世纪初期以来已陆续提出了数以10计的具有不同常数的折射率公式,这些公式的精度是与当时的测量技术水平相适应的。目前认为下述公式具有较高的精度:

1. Sellmeier 型^[1]

$$N_0(\lambda) = 80.6051 + \frac{24809.90}{132.274 - \lambda_0^{-2}} + \frac{174.557}{39.32957 - \lambda_0^{-2}} \quad (1.3)$$

2. Cauchy 型^[2]

$$N_0(\lambda) = 272.5794 + 1.5832\lambda_0^{-2} + 0.015\lambda_0^{-4} \quad (1.4)$$

N_0 为标准大气条件下(气压 $p = 1.01325 \times 10^5$ Pa, 温度 $T = 288.15$ K, 水汽压 $e = 0$ 和 CO_2 含量为300ppm)的折射率模数($N_0 = n - 1$),以 10^{-6} 为单位, λ_0 为真空波长,以 μm 为单位。式(1.3)在 $\lambda = 0.23 \sim 1.695 \mu\text{m}$ 范围内具有 2.3×10^{-9} 的精度,这是迄今为止适用波长范围最明确、实验数据最完整的一个公式,其中部分数据引自前人的工作,但已对因当时条件所限而存在的误差作了修正。式(1.4)在 $\lambda = 0.339 \sim 1.695 \mu\text{m}$ 范围内也具有 9×10^{-9} 的精度。上述公式都没有考虑水汽吸收问题,因此在具有水汽吸收线的波长上,精度将有很大的降低。

折射率 n 与干空气压力 p_d , 水汽压力 e , 其他气体分压力 p_c 以及环境温度 T 的关系为

$$n = C_1 \frac{p_d}{T} + C_2 \frac{e}{T} + C_3 \frac{e}{T^2} + C_4 \frac{p_c}{T} \quad (1.5)$$

系数 C_i ($i=1, \dots, 4$) 为常数。Owens^[3] 详细讨论了这些系数在不同环境下的数值。由于实际所能达到的气象参数测量精度的限制, 况且空气成分变化所导致的折射率在不同地点、不同时间中的变异性, 很可能使实验测量出现 10^{-9} 量级的系统误差, 因此极高精度的公式并没有多大实用价值。实际上广泛使用的任意气象条件下的折射率公式是:

1. 光波^[4]

$$N(\lambda) = 2.8438 \times 10^{-3} N_0(\lambda) \frac{p}{T} - 0.1127 \frac{e}{T} \quad (1.6)$$

2. 射频频^[5]

$$N = 0.776 \frac{p + 4810e/T}{T} \quad (1.7)$$

式(1.6)中的 $N_0(\lambda)$ 由式(1.3)或(1.4)给出, 与精确公式相比, 精度好于 1×10^{-7} 。式(1.7)对 30GHz 以下的射频频在 $-50 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内的精度为 0.5%, 但在水汽和氧的谐振频率处存在较大的误差。

对公式(1.6)的误差分析表明, 当 $\Delta T = 0.1^\circ\text{C}$, $\Delta p = 40\text{Pa}$, $\Delta e = 260\text{Pa}$ 时, 可以分别产生 1×10^{-7} 的误差。显然, 除了水汽压以外, p 和 T 的测量精度一般也就是这么高, 此外还考虑到水汽含量通常不大, 所以下面的具有适中精度的比较简便的公式可能更为适用^[2]。

$$N(\lambda) = 0.7748 \frac{p}{T} (1 + 0.006063\lambda^{-2}) \quad (1.8)$$

对于可见光波段, 上式可以简化为

$$N = 0.79 \frac{p}{T} \quad (1.9)$$

同精确公式相比, 式(1.9)在上述波长范围内的误差不超过 3%, 湿度的影响在一般情况下小于 1%, 也即可以精确到几个 N 单位。

在实际应用中由于光波并非是纯粹的单色光, 尤其是脉冲波更为如此, 光波将以群速传播, 所以应使用群折射率 N_G 。 N_G 与 N 的关系为

$$N_G = - \frac{1}{\lambda} \frac{dN}{d\lambda} \quad (1.10)$$

利用前面介绍的 $N(\lambda)$ 的公式, 很容易求得 N_G 。

1.1.2 折射率的高度分布

前面已经指出空气折射率是由气压、温度和湿度决定的, 折射率的高度分布显然也取决于这些环境参数的高度分布。从大气的平均状态而言, 大气密度呈指数规律递减, 因而可以预计折射率剖面一般也应具有

$$N(h) = N_s \exp\left(-\frac{h}{H_N}\right) \quad (1.11)$$

的形式, N_s 为地面折射率, H_N 为大气折射率标高。在美国无线电波的平均模型^[6]中, $N_s = 313$, $H_N = 6.95\text{km}$ 。

我国目前尚未建立标准大气,我们利用 McClatchey 等^[6]提出的“模式大气”计算了三类气候带共五种气候的折射率,结果见表 1.1^[7]。用指数模式对表 1.1 中的全球平均折射率分布进行拟合,得到 $N_s=359.9, H_N=6.84\text{km}$, 这同文献[5]的模式相比,两者在高度依赖性上基本一致。

指数模式有很大的方便性,但实际上可能存在较大的误差。这是因为模式中可调整的参数较少,而比较合适的公式可能是三参数的伽马分布模式:

$$N(h) = ah^b \exp(-ch) \quad (1.12)$$

对表 1.1 所列全球分布拟合的结果为:

$$a=300, \quad b=-0.001, \quad c=1.25 \times 10^{-4}\text{m}.$$

图 1.1 给出这两种分布与模式大气折射率的比较。图上表明指数模式在 $h < 5\text{km}$ 时误差较大,而伽马模式在 $h < 20\text{km}$ 范围内拟合得很好。众所周知, 5km 以下大气的贡献约占整层的一半,而 20km 以上的贡献仅占整层的 5% 左右,因此伽马模式显然具有较高适用性。

应该指出,上述公式代表的是大气折射率剖面的一般情况,可以用于估计折射率对光波传播的平均影响。不同地区 and 时间的实际分布可能与平均模式有一定的差别,但这种差别主要表现在低空。根据气候和地理位置较特殊的昆明 1958 ~ 1975 年的资料统计, 4km (海拔高度) 以上与全球平均模式已没有多大差别。

前面只讨论了折射率的垂直分布,而未涉及水平分布问题。一般而言气象要素在水平方向的不均匀性,除了在水陆交界面、山区以及存在一些天气过程的地区以外,同垂直不均匀性相比,通常要小几个数量级。即使在那些特殊区域,在一定高度以上(一般是离地面 500m 以上)水平方向也将趋向均匀化。因此许多实际问题中认为大气是水平或球面分层是合理的。

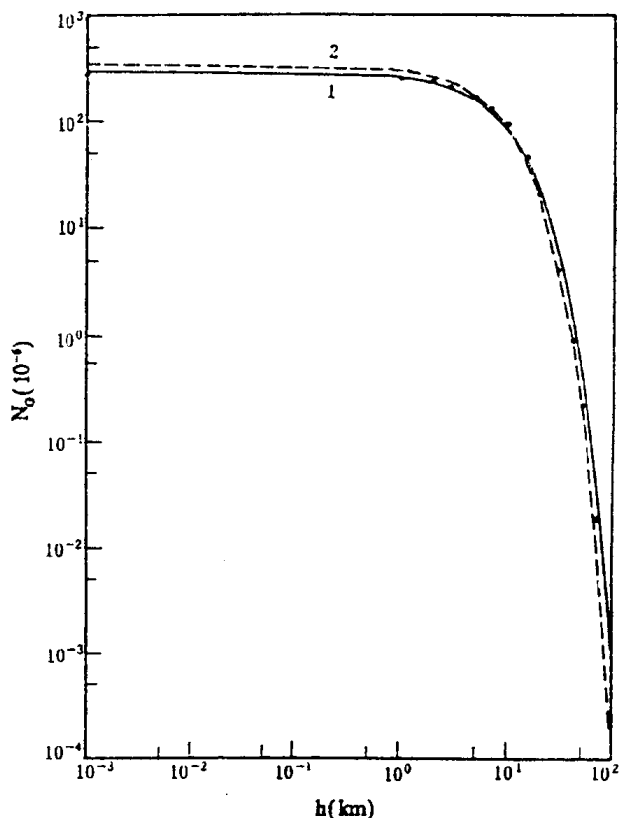


图 1.1 大气折射率的高度分布

1—伽马模型; 2—指数模型; ...—模式大气

1.2 大气折射与修正

1.2.1 近地面折射

由于地面呈球形,位于高度 h 处的光线可以照射地面目标的距离 L 是有限的。从简单的几何关系可以证明,最大照射距离为

$$L = (2R_e h)^{1/2} \approx 3.57 \times 10^3 h^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (h \ll R) \quad (1.13)$$

这时的俯角 ε 为

表 1.1 折射率的高度分布($\lambda = 1.0648\mu\text{m}$, N_0)

高度 (km)	亚北冬季	亚北夏季	中纬度冬季	中纬度夏季	热带	全球平均
0	3.101E+02	2.764E+02	2.942E+02	2.703E+02	2.646E+02	2.831E+02
1	2.697E+02	2.497E+02	2.627E+02	2.442E+02	2.412E+02	2.535E+02
2	2.391E+02	2.253E+02	2.343E+02	2.211E+02	2.194E+02	2.279E+02
3	2.117E+02	2.031E+02	2.086E+02	2.001E+02	1.978E+02	2.043E+02
4	1.885E+02	1.821E+02	1.871E+02	1.809E+02	1.797E+02	1.837E+02
5	1.685E+02	1.637E+02	1.674E+02	1.632E+02	1.628E+02	1.651E+02
6	1.502E+02	1.471E+02	1.494E+02	1.468E+02	1.466E+02	1.480E+02
7	1.334E+02	1.321E+02	1.330E+02	1.314E+02	1.322E+02	1.324E+02
8	1.180E+02	1.182E+02	1.180E+02	1.080E+02	1.190E+02	1.182E+02
9	1.025E+02	1.054E+01	1.043E+02	1.053E+02	1.061E+02	1.047E+02
10	8.760E+01	9.362E+01	9.198E+01	9.409E+01	9.495E+01	9.245E+01
11	7.488E+01	8.043E+01	7.894E+01	8.350E+01	8.459E+01	8.045E+01
12	6.434E+01	6.914E+01	7.771E+01	7.408E+01	7.482E+01	7.602E+01
13	5.470E+01	5.945E+01	5.805E+01	6.521E+01	6.599E+01	6.068E+01
14	4.676E+01	5.105E+01	4.980E+01	5.573E+01	5.845E+01	5.236E+01
15	3.995E+01	4.371E+01	4.267E+01	4.735E+01	5.091E+01	4.492E+01
16	3.425E+01	3.776E+01	3.656E+01	4.043E+01	4.433E+01	3.867E+01
17	2.935E+01	3.245E+01	3.133E+01	3.460E+01	3.781E+01	3.311E+01
18	2.513E+01	2.790E+01	2.681E+01	2.957E+01	3.119E+01	2.812E+01
19	2.152E+01	2.398E+01	2.296E+01	2.520E+01	2.581E+01	2.389E+01
20	1.842E+01	2.059E+01	1.963E+01	2.147E+01	2.147E+01	2.032E+01
21	1.575E+01	1.773E+01	1.674E+01	1.832E+01	1.790E+01	1.729E+01
22	1.347E+01	1.524E+01	1.429E+01	1.563E+01	1.496E+01	1.472E+01
23	1.151E+01	1.311E+01	1.221E+01	1.332E+01	1.269E+01	1.257E+01
24	9.838E+00	1.123E+01	1.045E+01	1.136E+01	1.078E+01	1.073E+01
25	8.403E+00	9.591E+00	8.882E+00	9.727E+00	9.148E+00	9.150E+00
30	3.714E+00	4.485E+00	4.016E+00	4.437E+00	4.136E+00	4.158E+00
35	1.664E+00	2.105E+00	1.789E+00	2.093E+00	1.942E+00	1.919E+00
40	7.517E-01	1.021E+00	8.183E-01	1.015E+00	9.445E-01	9.101E-01
45	3.544E-01	5.196E-01	3.925E-01	5.127E-01	4.720E-01	4.503E-01
50	1.735E-01	2.803E-01	2.019E-01	2.710E-01	2.488E-01	2.351E-01
55	1.286E-02	2.575E-02	1.592E-02	2.421E-02	2.080E-02	1.991E-02
70	1.124E-04	1.124E-04	1.123E-04	1.124E-04	1.124E-04	1.123E-04
100						

$$\varepsilon = \tan^{-1}\left(\frac{L_{\max}}{R_e}\right) \approx 0.0321h^{1/2} \quad (d) \quad (h \ll R) \quad (1.14)$$

R_e 为地球半径, h 以 m 计。

实际上由于大气折射的原因, 光线不是直线传播, 能够照射的最大距离要比式(1.13)预计的还远一些, 加长的数值由光线的弯曲度也即曲率 C 决定。从几何光学理论得知, 光线曲率决定于折射率的垂直梯度:

$$C = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} = -0.79 \left(\frac{1}{T} \frac{\partial p}{\partial h} - \frac{p}{T^2} \frac{\partial T}{\partial h} \right) \times 10^{-6} \quad (1.15)$$

其中负号的意义是规定曲率以折射率随高度增加而降低为正值, 这时光线向下弯曲。在海平面标准大气条件下, $\partial p / \partial h \approx 1.21 \times 10^4 \text{ Pa/km}$, 并且基本上是个常数。这样光线曲率就直接与温度梯度有关。我们用 Γ 表示温度梯度, 且以温度随高度增加而降低为正值, 公式(1.15)便简化为

$$C = -33.17 + 0.964\Gamma \quad (1.16)$$

若 Γ 以 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 为单位, 则 C 的单位为 $\mu\text{rad}/\text{km}$ 。

由式(1.16)可知, 当 $\Gamma = 34.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 时, $C = 0$, 这时光线作直线传播。在温度梯度大于或小于此值时光束即向下或向上弯曲。在一定条件下温度梯度可能异常, 这时将出现超折射现象——“上现蜃景”或“下现蜃景”。

在光束曲率变化的情况下, 发射角度不变的光束在目标处的投影将随着偏离它原来的位置, 偏离的数值 l 可由公式^[4]

$$l = \frac{1}{2} CL \quad (l \ll L) \quad (1.17)$$

给出, 由此造成的角度误差为

$$\alpha = CL \quad (1.18)$$

而距离误差 ΔL 可由下式计算:

$$\Delta L = \frac{1}{24} (4C^2 - C_0^2) L^3 \quad (1.19)$$

式中 $C_0 = (R_e + h)^{-1}$, h' 为光源和目标的平均高度。上述公式在光源和目标的高度相差不大的情况下是适用的。

实际上瞄准角度是随光束曲率而改变的, 这时距离的曲率修正值应为

$$\Delta L = \frac{1}{24} (C^2 + C_0^2) L^3 \quad (1.20)$$

大气的温度梯度是因时因地而异的, 难以获得普遍的变化规律。就一般情况而言, 冬夏晴天正午前后(10~15时)近地面温度梯度随高度的变化大致有如图 1.2 的趋势^[4]。某些情况下尤其是夜间温度在一定高度上可能出现随高度增加而增加的情况, 这称为逆温。逆温最强烈时 Γ 的绝对值可以和白天正午同高度上的值相当, 有时还可能更大些。在日出和日落前后的一、二小时内温度梯度明显减弱, 在某一时刻某个高度范围内出现 $\Gamma = 0$, 此后温度梯度的方向逆转。图 1.3 就是这样的一个例子, 这是用 1.2m 和 2.4m 高度上测量的温度计算的。图上同时画出了

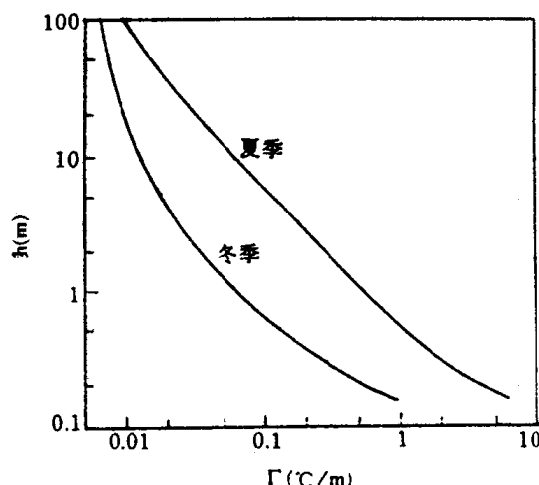


图 1.2 均匀地面上空正午温度梯度的高度分布

He-Ne 激光在 1km 处的光斑平均位置的垂直偏离量 l 。可以看到 l 和 Γ 的变化相当一致。 l 的变化范围为 $0 \sim \pm 30\text{cm}$ ，平均值为 12cm 。按公式(1.17)计算的平均值为 11cm 。这个例子表明上述理论公式正确地描述了近地面水平光路上的光束折射问题。

由公式(1.17)和(1.18)以及上述的 l 变化范围可以推知角度误差可达 $120''$ ，平均为 $48''$ 。这同 Shelf 地区在水面数米高处测到的数值相符^[9]。

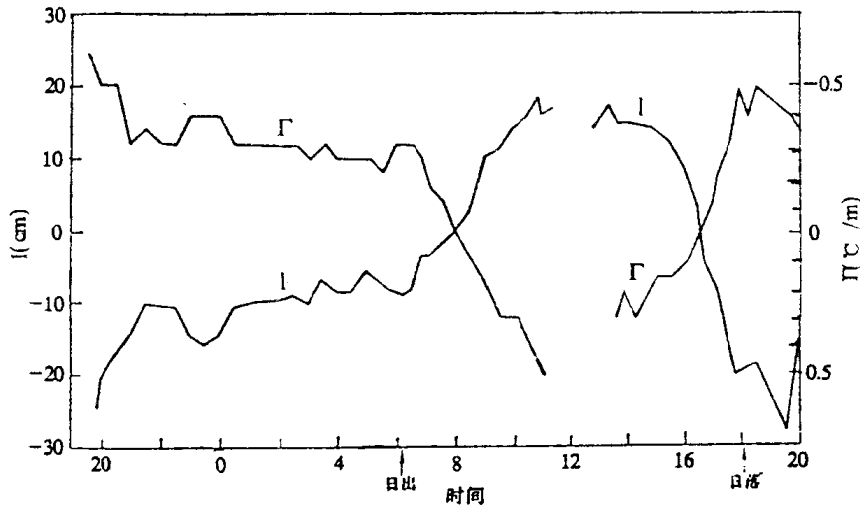


图 1.3 温度梯度和光斑垂直位置的周日变化
(1973 年 10 月 17 ~ 18 日)

1.2.2 大气折射修正

大气折射效应对天文和大地测量、雷达探测以及激光测距有一定的影响，在要求精度比较高时必须进行大气折射修正。

图 1.4 给出光波在地空之间传播轨迹的示意图。光线由位于高度 h_s 的测站 A 发出，射至位于 h 处的目标 B，A、B 之间的真实距离为 L_0 ，仰角为 β 。由于大气折射，视在距离为 L ，视仰角为 θ_s ，从而存在距离误差 $\Delta L = L - L_0$ ，仰角误差 $\alpha = \theta_s - \beta$ 。 α 又称为大气折射角。现在我们来讨论如何计算这两个值。

假定折射率分布是水平均匀的，即可以作为球形分层介质，于是 Snell 定律适用：

$$(R_c + h_s) n_s \cos \theta_s = (R_c + h) n \cos \theta \quad (1.21)$$

由图 1.4 所示的几何关系，不难求得

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\cos(\theta + \tau) / \cos \theta - n/n_s}{(n/n_s) \tan \theta_s - \sin(\theta + \tau) / \cos \theta} \right] \quad (1.22)$$

τ 为 AB 两点之间射线轨迹的弯曲度，也称为总折射角。由几何光学方程组可以导出

$$\tau = \int_0^\tau d\tau = - \int_{N_s}^N \cot \theta dN \quad (\mu\text{rad}) \quad (1.23)$$

距离修正值的表达式为

$$\Delta L = \int_{AB} dl - \int_{AB} dl = \int_{h_0}^h \frac{N \times 10^{-6}}{\sin \theta} dh + \left(\int \frac{dN}{\sin \theta} - L_0 \right) \quad (1.24)$$

式中第一项为与光的速度有关的误差,第二项为光程的几何长度与直线传播距离之差。

式(1.22)~(1.24)在折射率分布确定后即可解出。在一般情况下对精度的要求并不很高,这时可以作出某些近似。下面我们分别讨论仰角、距离和高度的订正问题,并给出它们的典型值。

1. 仰角订正^[10]

若起始仰角较大,对式(1.23)作分部积分,并略去二阶以上的项,得到

$$\tau = N_0 \cot \theta_0 - N \cot \theta \quad (\mu\text{rad}) \quad (1.25)$$

即总折射角可以由两端的折射率和仰角来确定。上式在 $\theta_0 > 5^\circ$ 时有足够的精度,仅当 $\theta \leq 5^\circ$ 时误差将超过 10%,且随 θ_0 的减小而迅速增大。

对于外层空间目标,式(1.25)简化为

$$\tau = N_0 \cot \theta_0 \quad (\mu\text{rad}) \quad (1.26)$$

这时 τ 称为天文折射角。

表 1.2 列出了按全球平均模式大气折射率分布计算的弯曲度, $h \rightarrow \infty$ 时 τ 的数值与文献 [11] 的结果相当一致。表 1.3 给出不同高度时大气折射角的数值。从该表可知仰角误差主要出现在低空和低仰角的情况下,这显然是由折射率高度分布的特点所决定的。

2. 距离修正

距离误差 ΔL 同样可以近似地求出。利用三角函数关系可以将式(1.24)改写为^[6]:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \csc \theta_0 \times 10^{-6} \int_{h_0}^h \frac{N dh}{1 - 2\sin^2\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right) + \cot \theta_0 \sin(\theta - \theta_0)} \\ &= \csc \theta_0 \times 10^{-6} \int_{h_0}^h N dh + \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i+1} \times 10^{-6} \int_{h_0}^h N [\cot \theta_0 \sin(\theta - \theta_0) \\ &\quad - 2\sin^2\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right)] dh \quad (\sin \theta < 2\sin \theta_0, \theta_0 > 0) \end{aligned} \quad (1.27)$$

在 $\theta_0 \geq 10^\circ$ 时上式右边级数项的贡献小于 3%,可以忽略不计,故有

$$\Delta L = \csc \theta_0 \times 10^{-6} \int_{h_0}^h N dh \quad (\text{m}) \quad (\theta_0 \geq 10^\circ) \quad (1.28)$$

表 1.4 给出 $\theta_0 = 10^\circ$ 时不同折射率分布模式下的距离修正值^[7]。可以看到,在通常的米级精度下也必须进行折射修正。若使用更精确的模式,可使订正后的残差达到分米至厘米的数量级。

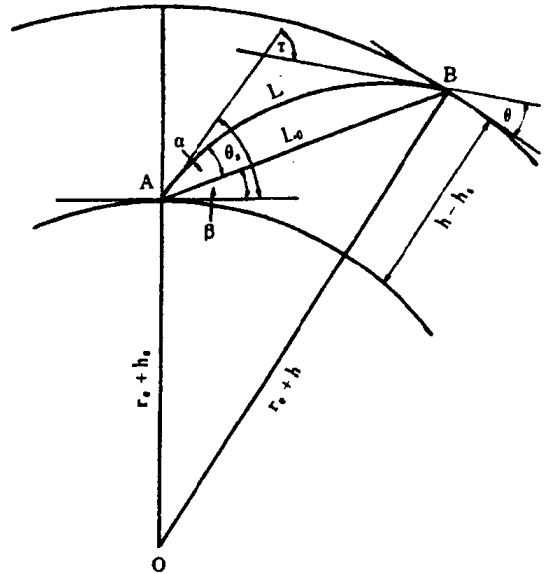


图 1.4 光波传播轨迹示意图

表 1.2 全球平均模式下的弯曲度 (d)

视仰角	目 标 高 度 (km)					
	1	5	10	20	30	∞
10°	0.0124	0.0468	0.0710	0.0902	0.0955	0.0975
20°	0.00588	0.0223	0.0340	0.0435	0.0462	0.0472
30°	0.00369	0.0140	0.0214	0.0274	0.0291	0.0298
40°	0.00254	0.00963	0.0147	0.0188	0.0200	0.0205
50°	0.00178	0.00678	0.0103	0.0133	0.0141	0.0144
60°	0.00123	0.00466	0.00711	0.00912	0.00969	0.00992
70°	0.00077	0.00294	0.00448	0.00575	0.00611	0.00626
80°	0.00037	0.00142	0.00217	0.00279	0.00296	0.00303

表 1.3 全球平均模式下的折射角 (d)

视仰角	目 标 高 度 (km)					
	1	5	10	20	30	∞
10°	0.0761	0.0843	0.0890	0.0928	0.0942	0.0960
20°	0.0379	0.0415	0.0435	0.0452	0.0459	0.0466
30°	0.0248	0.0267	0.0278	0.0287	0.0291	0.0295
40°	0.0178	0.0188	0.0194	0.0199	0.0201	0.0204
50°	0.0131	0.0136	0.0139	0.0141	0.0142	0.0143
60°	0.00937	0.00958	0.00971	0.00981	0.00985	0.00989
70°	0.00609	0.00616	0.00619	0.00622	0.00623	0.00625
80°	0.00301	0.00302	0.00302	0.00303	0.00303	0.00303

表 1.4 不同模型下的距离修正量
($h_0=1m, \theta=10^\circ$)

目标高度 (km)	距 离 修 正 量 (m)		
	数值积分	伽马分布	指数分布
5	6.29	6.38	7.43
10	9.94	9.78	11.00
20	12.75	12.58	13.53
30	13.34	13.38	14.12
50	13.49	13.65	14.28
70	13.52	13.68	14.29

在测量月球、人造卫星等外层空间目标的距离时,可以认为这些目标位于大气边界上。将由 Snell 定律解出的 $\cos \theta$ 代入式 (1.24), 把被积函数按 $\cos \theta_0$ 的负幂级数展开, 然后利用理想气体定律、分压定律和流体静力学方程, 引入一个适当的折射率分布模型, 从而得到^[9]

$$\Delta L = \frac{f(\lambda)}{F(\alpha, h_0)} \frac{A+B}{\sin \theta_0 + [B/(A+B)]/(\sin \theta_0 + 0.01)} \quad (\theta_0 \geq 10^\circ) \quad (1.29)$$

$$f(\lambda) = 0.9650 + 0.0164\lambda^{-2} + 0.000228\lambda^{-4}$$

$$F(\alpha, h_s) = 1 + 0.0026 \cos 2\alpha - 0.00031h_s$$

$$A = 2.357 \times 10^5 p_s + 1.41 \times 10^{-6} e_s$$

$$B = 1.084 \times 10^{-10} p_s T_s K + 4.734 \times 10^{-12} \frac{p_s^2}{T_s} \frac{2}{3 - K^{-1}}$$

$$K = 1.163 + 0.00968 \cos 2\alpha - 0.00104 T_s + 1.435 \times 10^{-7} p_s$$

α 为测站的余纬度, 带有下标“s”的量均为地面测站处的参数, h_s 的单位为 km, λ 以 μm 计。

上式用来修正卫星数据是很方便的, 只需代入地面参数即可求得 ΔL , 订正后的残差可以达到厘米量级。这个精度已由相对比较所证实。目前许多测月、测卫工作已采用此式进行修正。

Gardner^[2] 针对该模式中的大气水平分布是均匀的假设提出了改进意见。在考虑了水平折射率梯度后修正的精度又有所提高。

3. 高度修正^[10]

在如图 1.5 所示的情况中测量点 B 的高度 h 时也因大气折射而产生误差。在处理这个问题时可以引用等效地球半径 $R_{e\sigma}$ 的概念, 即在这种等效地球上光线将以直线传播。由图 1.5 的几何关系和等效地球半径, 可以证明

$$\Delta h \approx \frac{h^2 \cot^2 \theta_s + h_s}{2(R_e + h_s)} (1 - k_e^{-1}) \quad (1.30)$$

$k_e = R_{e\sigma}/R_e$, 称为等效折射系数, 由下式确定:

$$k_e = \left(1 + R_e \cos \theta_s \frac{dn}{dh}\right)^{-1} \quad (1.31)$$

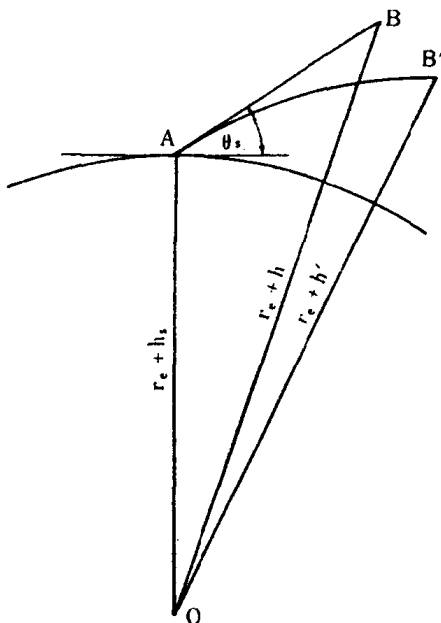


图1.5 高差修正示意图

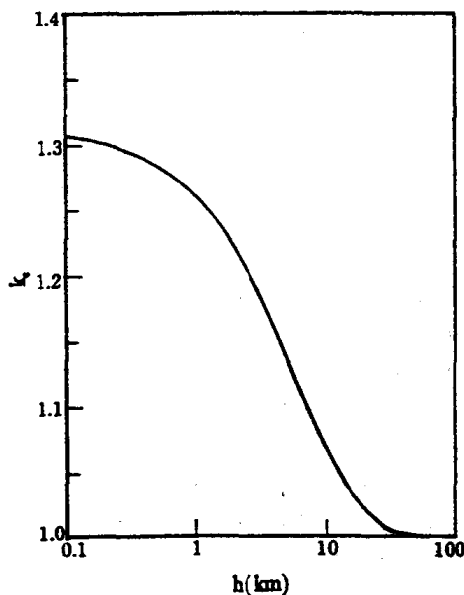


图1.6 等效折射系数与高度的关系