

干旱地区大气折射对光电工程的影响

吕炜煜^{1,2}, 苑克娥¹, 胡顺星¹, 魏旭³, 喻刚³, 冯林¹, 王建国³

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 通过对干旱地区某地探空资料的分析, 拟合出不同季节条件下折射指数随高度变化的拟合公式, 利用拟合公式计算了光电跟踪设备使用不同波长跟瞄空间目标时的蒙气差、大气色散和测距修正量。结果表明: (1) 在相同视仰角的条件下, 冬季的蒙气差修正结果大于其余季节的结果, 且大于标准大气的计算结果, 而春、夏、秋季的蒙气差小于标准大气的计算结果; (2) 春季的 0.55 μm 与 1.3 μm 、3.9 μm 的大气色散较其余季节的结果为大, 对于 0.55 μm 与 1.3 μm 及 3.9 μm 之间的大气色散在视仰角大于 55° 条件下差别并不明显; (3) 不同季节、不同波长测距修正量的变化特点略有不同, 其中夏、秋季节特点较为相似, 3.9 μm 测距修正量受季节影响较 0.55 μm 与 1.3 μm 更为明显。所得结果可为该地区光电工程应用提供参考。

关键词: 折射指数; 光电工程; 蒙气差; 大气色散; 测距

中图分类号: TN012; P427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0291-07

Effect of atmospheric refraction on opto-electronic engineering in arid area

Lv Weiyu^{1,2}, Yuan Ke'e¹, Hu Shunxing¹, Wei Xu³, Yu Gang³, Feng Lin¹, Wang Jianguo³

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Based on the analysis of long-term sounding data in the arid environment, different seasonal fitting formulas on refractive index, which varied with heights, were obtained. The formulas were used to calculate atmospheric refraction, atmospheric dispersion and ranging of space target under the certain condition by the opto-electronic tracking equipments of different wavelengths. The results show that, for atmospheric refraction, the result of winter is greater than the result obtained by standard atmosphere, and is greater than the results of the remaining three seasons. For atmospheric dispersion, the difference between 0.55 μm and 1.3 μm , and the difference between 0.55 μm and 3.9 μm in spring are more than

收稿日期: 2014-05-21; 修订日期: 2014-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(41005015); 中国科学院知识创新方向性项目(KJCX2-EW-N07);

科技部基础性工作专项重点项目(2007FY110700)

作者简介: 吕炜煜(1974-), 男, 博士生, 主要从事激光和红外辐射传输应用方面的研究。Email: lwym@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 胡顺星(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达大气探测技术研究。Email: sxhu@aiofm.ac.cn

通讯作者: 苑克娥(1979-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事激光雷达的大气参数测量方面的研究。Email: keyuan@aiofm.ac.cn

the results of the other seasons. The differences between different wavelengths are small on condition that the elevation is larger than 55° . For ranging correction, the varied characteristics of different wavelengths in different seasons have slight differences, and the characteristics of summer and autumn are similar. The ranging value of $3.9 \mu\text{m}$ is more sensitive than other wavelengths. As a reference, the above results can be provided for certain applications on opto-electronic engineering.

Key words: refractive index; opto-electronic engineering; atmospheric refraction; atmospheric dispersion; ranging

0 引言

在光电工程应用中, 往往要考虑地球大气的影响。地球大气作为包围地球由多种气体和悬浮其中的固体粒子或液体粒子组成的混合物^[1-2], 由于受到地球引力作用, 地面的大气密度最大, 离地面高度越高, 大气密度越小, 整个大气层呈现出上疏下密的状态。当光波在大气中传输时, 由于大气密度发生变化, 会造成光波偏离先前传输方向的现象出现, 此种现象称为大气折射。为研究大气折射问题方便起见, 一般作如下假设^[3]:

(1) 将地球大气视为静止的连续介质, 其主要光学特性是各种成分的含量、密度及对应的折射率空间分布稳定, 不考虑局部起伏问题。

(2) 将大气作为环绕地球的球对称介质, 大气按一定的高度层水平分布均匀, 在规定的高度层内, 密度是不变化的。高度层发生变化时, 密度发生变化, 则大气折射率发生变化。

根据如上假设, 可以进一步开展研究光波在大气传输时因折射率发生变化时对光电工程的可能影响, 特别是在空间目标识别、激光通信等方面, 其影响主要有:

(1) 大气蒙气差 大气折射使空间目标的视方向偏离真实位置, 自地球表面向大气外界发射的光线偏离预定目标, 使得地面观察到的大气外目标的视天顶角小于实际天顶角, 此种现象称为大气蒙气差。

(2) 大气色散(蒙气色差) 由于大气折射率与光波波长有关, 因而来自同一目标不同波长的光波穿过大气时, 其偏折程度有所不同, 这种现象称为大气色散。在地面向空间目标发射的激光中, 如果跟瞄使用波长与发射激光的波长不一致, 则会带来跟瞄方向与发射方向的偏差。

(3) 测距误差 大气折射使得光程加长, 引起测量距离的误差。

在实际应用中, 为简便起见, 经常使用按照标准大气格式建立的应用大气模式来进行蒙气差和大气色散的修正^[4], 但是由于这些大气模式往往是一定地理环境条件下的平均结果, 模式不能代表当地当时的具体情况^[5]。特别是国内地域变化复杂, 建立典型地区的大气折射模式可为光电工程应用提供有益参考。

文中通过使用干旱地区长期(2003~2012年)探空气球资料, 对测量的温度、湿度、气压数据经过甄选得可靠数据 1 077 份, 数据量约 36 万余条, 对甄选所得数据使用折射指数计算模型计算得到该地区不同季节的实际折射指数, 通过采用三阶拟合的方式得到该地区不同季节的大气折射指数高度分布模型, 利用局地折射指数模式计算了不同仰角条件下的蒙气差、大气色散、测距修正量, 指出这些计算结果对工程应用可能带来的影响。

1 基本理论

在将大气看作球面分层的假设下, 可认为大气是按密度的大小、呈同心球层围绕地球均匀分布(如图 1 所示)。设将大气分成很多足够薄的气层, 使各气层内的空气近似可视为等密度的, 这样光波的折射只会出现在球层的分界面上。各气层的折射率为 n_1, n_2, n_3, \dots ; 光波在各气层界面的入射角设为 i_1, i_2, i_3, \dots ; 折射角为 j_1, j_2, j_3, \dots ; 各气层下界面的曲率半径设为 r_1, r_2, r_3, \dots 。在正常情况下, 愈近地面空气密度越大, 故从 p 处发出的光线, 愈向上愈弯向地面。设 n_l 为第 l 层的空气折射率, j_l 为折射角, r_l 为该折射点距地心的距离, 根据 Snell 定律, 大气光路方程为 $n_l r_l j_l = C$ (C 为常数)^[6-8]。通过逐层计算, 得到光束

的实际传输方向和路径,即可得到大气蒙气差和距离修正。考虑到大气折射率与波长有关,可以通过计算不同波长的蒙气差来计算两个波长的蒙气差差值,得到大气色散算值。

图 1 中 Φ_1 为地心张角, ε_y 表示蒙气差(即测点 p 到空间目标 T 处的视仰角 E_c 与真实仰角 \bar{E}_1 的差值), R_i 为测点 p 到空间目标 T 处的视距离, \bar{R}_i 为真实距离,测距修正量为 R_i 与 \bar{R}_i 的差值。 Φ_1 、 R_i 、 \bar{E}_1 、 \bar{R}_i 分别满足^[9-10]:

$$\Phi_1 = A_1 \int_{r_0}^{r_T} \frac{dr}{r \sqrt{n^2 r^2 - A_1^2}} \quad (1)$$

$$R_i = \int_{r_0}^{r_T} \frac{n^2 r}{r \sqrt{n^2 r^2 - A_1^2}} dr \quad (2)$$

$$\bar{E}_1 = \arctan \frac{(r_0 + h_T) \cos \Phi_1 - r_0}{(r_0 + h_T) \sin \Phi_1} \quad (3)$$

$$\bar{R}_i = \sqrt{(r_0 + h_T)^2 - r_0^2 \cos^2 \bar{E}_1} - r_0 \sin \bar{E}_1 \quad (4)$$

式中: $r_0 = a + h_0$, $a = 6\,371\,003.7$ m, h_0 为观测点海拔高度; $A_1 = n_1 r_0 \cos E_c$; h_T 为目标的真实地面高度; $r = r_0 + h$, h 为光波传播路径上任意一点到地面的距离; r_T 为目标到地心的距离; n 为大气折射率。

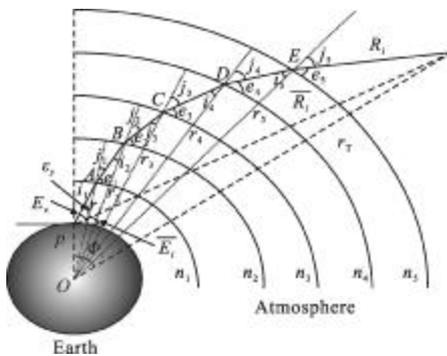


图 1 大气折射示意图

Fig.1 Schematic of atmospheric refraction

2 计算模型

2.1 大气折射指数计算模型

大气折射指数 N 作为光波波长和大气状态参数的函数,与大气折射率 n 的关系为:

$$N(\lambda, T, p, e) = [n(\lambda, T, p, e) - 1] \times 10^6 \quad (5)$$

式中: λ 为真空光波长, μm ; T 为大气温度, K ; p 为大气压强, hPa ; e 为水汽压, hPa 。 $N(\lambda, T, p, e)$ 与 λ, T, p, e

的关系满足^[11]:

$$N = 0.269\,6 N_0(\lambda) \frac{p}{T} - 1.26 \frac{e}{T} \quad (6)$$

式中: $N_0(\lambda)$ 为标准大气条件下(气压 $p = 1.013\,25 \times 10^3$ hPa, 温度 $T = 288.15$ K, 水汽压 $e = 0$ 和 CO_2 含量为 300 ppm) 的折射指数, 满足:

$$N_0(\lambda) = 287.604 + 4.886\,4/\lambda^2 + 0.068/\lambda^4 \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(6)得:

$$N = \frac{1}{T} [(77.538 + 1.317\,4/\lambda^2 + 0.018/\lambda^4)p - 1.26e] \quad (8)$$

与计算公式(6)相类似的折射指数计算公式由于工程研究运用已发展有多种^[12-16], 在所关注的光波段利用这些公式得到的计算结果相差不大, 并且在不考虑水汽吸收的情况下, 由计算公式(6)得到的公式(8)可以完全满足计算需求。

2.2 大气折射指数高度分布模型

文中指出光波大气折射指数由光波波长和大气状态参数决定, 则光波大气折射指数的高度分布显然也取决于这些环境参数的高度分布, 如果能够知道任意高度的环境参数, 则该高度的大气折射指数不难得到。一般采用如下方法获取折射指数的高度分布情况:

(1) 利用实时获取大气环境参数(或者折射指数), 通过一定的平滑办法得到任意高度的折射指数。但因实际各种条件的局限性, 实时获取大气环境参数有时较为困难。

(2) 使用局地长期的探空资料所获取的温度、湿度、气压数据通过公式(8)可得到折射指数的时空变化结果, 经过平滑拟合, 得到符合局地条件环境条件的折射指数空间分布计算模型, 然后根据该模型计算出探空极限高度内任意高度上的折射指数。该方法可以较为方便地给出符合局地地理特征的折射指数分布特点, 文中也是采取该种办法。

从大气的平均状态考虑, 线性模型、指数模型、分段模型、双指数模型、双四次方模型等折射指数高度分布模型陆续得到应用^[8-9, 17], 上述模型中或是存在误差较大、或是存在使用不够方便的问题。由于大气环境参数受到地理环境的影响很大, 具有季节性变化特点, 考虑到计算精度和使用便利, 对折射指数高度分布模型采用三阶拟合公式:

$$N(h) = N_0 + A_1 h + A_2 h^2 + A_3 h^3 \quad (9)$$

式中： N_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 均为拟合参数，根据季节调节， h 为海拔高度； $N(h)$ 为探空气球释放到极限高度下任意高度上的大气折射率。对于极限高度上的折射率分布，考虑到 30 km 的大气占整个大气层质量的 99%，所以极限高度上的折射率分布采用标准大气模式(或伽马分布模型)也不会对测量精度产生大的影响。

通过如上做法，得到符合局地大气条件下的折射指数时空分布模型，进而讨论蒙气差、色差、测距的变化情况。

春季：

$$\begin{cases} N_{0.55}(h)=280.99532-0.02542h+7.83088\times 10^{-7}h^2-8.09975\times 10^{-12}h^3 & R=0.99948 \\ N_{1.3}(h)=268.02795-0.02425h+7.46894\times 10^{-7}h^2-7.72497\times 10^{-12}h^3 & R=0.99948 \\ N_{3.9}(h)=265.70812-0.02404h+7.40435\times 10^{-7}h^2-7.65814\times 10^{-12}h^3 & R=0.99948 \end{cases} \quad (10)$$

夏季：

$$\begin{cases} N_{0.55}(h)=268.02472-0.02333h+6.89957\times 10^{-7}h^2-6.84218\times 10^{-12}h^3 & R=0.99881 \\ N_{1.3}(h)=255.64570-0.02225h+6.58005\times 10^{-7}h^2-6.52459\times 10^{-12}h^3 & R=0.99881 \\ N_{3.9}(h)=253.43415-0.02205h+6.52299\times 10^{-7}h^2-6.46789\times 10^{-12}h^3 & R=0.99881 \end{cases} \quad (11)$$

秋季：

$$\begin{cases} N_{0.55}(h)=270.94155-0.02372h+7.05790\times 10^{-7}h^2-7.03120\times 10^{-12}h^3 & R=0.99895 \\ N_{1.3}(h)=258.43048-0.02263h+6.73123\times 10^{-7}h^2-6.70509\times 10^{-12}h^3 & R=0.99895 \\ N_{3.9}(h)=256.19539-0.02243h+6.67288\times 10^{-7}h^2-6.64686\times 10^{-12}h^3 & R=0.99895 \end{cases} \quad (12)$$

冬季：

$$\begin{cases} N_{0.55}(h)=292.30650-0.02755h+8.93936\times 10^{-7}h^2-9.83488\times 10^{-12}h^3 & R=0.99891 \\ N_{1.3}(h)=278.81395-0.02628h+8.52614\times 10^{-7}h^2-9.37973\times 10^{-12}h^3 & R=0.99891 \\ N_{3.9}(h)=276.40360-0.02605h+8.45236\times 10^{-7}h^2-9.29851\times 10^{-12}h^3 & R=0.99891 \end{cases} \quad (13)$$

对于标准大气，也可以采用类似的拟合公式得到在极限高度下标准大气折射率的空间分布情况，

标准大气：

$$\begin{cases} N_{0.55}(h)=287.29824-0.02659h+8.39344\times 10^{-7}h^2-8.87557\times 10^{-12}h^3 & R=0.99991 \\ N_{1.3}(h)=274.04387-0.02537h+8.00622\times 10^{-7}h^2-8.46610\times 10^{-12}h^3 & R=0.99991 \\ N_{3.9}(h)=271.67586-0.02515h+7.93703\times 10^{-7}h^2-8.39294\times 10^{-12}h^3 & R=0.99991 \end{cases} \quad (14)$$

3.2 蒙气差分析

在使用拟合公式获取得到极限高度以下各高度的折射指数分布情况的基础上，根据视仰角、目标高度等参数便可得到蒙气差。假设空间目标距离地表平均高度为 300 km (目标与地心的距离保

3 计算结果分析

3.1 折射指数时空分析

根据上文的数据处理方法，使用公式(9)，选择 0.55 μm 、1.3 μm 、3.9 μm 三种波长讨论该地区折射指数的时空分布情况。公式(10)~(13)给出了测量地区春、夏、秋、冬四季以及标准大气的折射指数三阶拟合公式的拟合参数。四个季节的拟合参数均是基于折射指数的原始数据进行拟合得到，所有拟合公式与原始结果的相关度均在 0.99875 以上，满足精度要求。

公式(14)给出三种波段在标准大气中传输时的折射率变化。

持 6 671 003.7 m 不变)，以跟瞄光波长选择 0.55 μm 为例，图 2 给出不同仰角当地四个季节蒙气差的变化情况以及当地大气与标准大气的蒙气差作差后差值变化情况，其中标准大气的起始点海拔高度取 1 100 m。

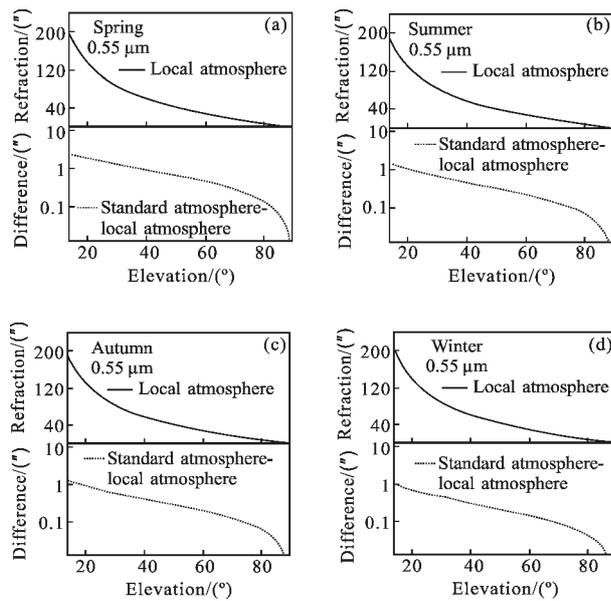


图 2 不同季节与标准大气的蒙气差(0.55 μm)

Fig.2 Refraction of different seasons and standard atmosphere (0.55 μm)

据图 2 可知:该地区四个季节的 0.55 μm 蒙气差具有较为明显的差异,在相同视仰角的条件下,冬季的蒙气差修正最大,其次为春季,再次为秋季,夏季最小;在高仰角的条件下,即使在天顶附近,蒙气差仍大于 1";与标准大气的蒙气差相比,除冬季外,该地区其余季节的蒙气差修正值小于标准大气的修正值;在视仰角为 70°时,夏季和秋季的蒙气差与标准大气的蒙气差的差值仍能达到 1",视仰角小于 70°时,该项差值能达到 10"以上;春季与冬季的蒙气差与标准大气的蒙气差较为接近,其中春季的结果最为接近,在视仰角大于 38°时,春季与标准大气的结果已小于 1"。因此,在该地区使用中心波长为 0.55 μm 的光波跟瞄空间目标时,即使使用标准大气模式,为提高精度起见,也要考虑到季节因素和仰角因素带来的修正影响。

若是跟瞄波长选择 1.3 μm、3.9 μm,则根据公式(3)可知,1.3 μm、3.9 μm 蒙气差小于 0.55 μm 蒙气差,根据拟合公式的计算结果,两种红外波段的蒙气差表现出类似 0.55 μm 蒙气差的变化特点,说明即使 1.3 μm 和 3.9 μm 两种波段的蒙气差小于 0.55 μm 蒙气差,在高仰角的情况下,其蒙气差修正结果对于高精度跟瞄要求仍具有重要影响。如果仅从大气蒙气差修正的角度考虑选择跟瞄波长,由于 3.9 μm 蒙

气差修正量明显最小,宜选择作为跟瞄波长。

3.3 大气色散分析

在实际光学工程应用中,要将多种波长共同使用,则要考虑大气色散的修正,继续采用上文中假设目标高度的参数,表 1、2 给出当地条件下不同仰角时的大气色散修正情况。

表 1 不同视仰角 0.55 μm 与 1.3 μm 的大气色散
Tab.1 Atmospheric dispersions of 0.55 μm and 1.3 μm varies with elevations

Elevation / (°)	Spring	Summer	Autumn	Winter
15	9.91	8.14	8.23	9.13
25	5.59	4.76	4.80	5.26
40	3.08	2.66	2.69	2.92
55	1.80	1.56	1.58	1.72
70	0.94	0.81	0.82	0.89
85	0.23	0.20	0.20	0.21

表 2 不同视仰角 0.55 μm 与 3.9 μm 的大气色散
Tab.2 Atmospheric dispersions of 0.55 μm and 3.9 μm varies with elevations

Elevation / (°)	Spring	Summer	Autumn	Winter
15	11.43	9.61	9.70	10.62
25	6.48	5.61	5.67	6.17
40	3.58	3.14	3.17	3.44
55	2.10	1.85	1.86	2.02
70	1.09	0.96	0.97	1.05
85	0.26	0.23	0.23	0.25

计算结果表明:在四个季节中,0.55 μm 与 1.3 μm、3.9 μm 的大气色散以春季为最大,其次为冬季,再次为秋季,夏季为最小;波长间隔越大,大气色散的修正量越大,即 0.55 μm 与 3.9 μm 的大气色散要大于 0.55 μm 与 1.3 μm 的大气色散;大气色散之间差异(即 0.55 μm 与 1.3 μm 的大气色散和 0.55 μm 与 3.9 μm 的大气色散的差异)受季节影响并不明显,只与仰角的关系较为密切,如在低仰角(15°)的情形下,0.55 μm 与 1.3 μm、3.9 μm 大气色散之间的差值可到 1.5",在

高仰角(85°)的情形下,0.55 μm 与 1.3 μm、3.9 μm 大气色散之间的差值小于 0.1”。

根据分析结果可知,如果仅从大气色散修正的角度选择工作波长,0.55 μm 与 1.3 μm 的大气色散小于 0.55 μm 与 3.9 μm 的大气色散,较为适合作为工作波长。但是在较高仰角(大于 55°)情形下,这种大气色散的差异已经并不明显。

3.4 测距修正量分析

按照上文中假设目标高度的参数,计算在当地条件下使用三种波长在不同仰角(15°~89°)对目标测距时的视距离与真实距离的差值分析修正量的变化情况。

图 3 给出在当地不同季节使用不同波长、不同仰角测距修正量的变化情况以及不同波长、不同仰角测距修正量作差 (R0.55-R1.3; R3.9-R1.3; R0.55-R3.9,若后者大于前者,则交换相减次序,所有差值均取正值)的差值变化情况。由图 3 可知:不同季节使用不同波长在不同仰角条件下的测距修正量位于 2~10 m 之间,仰角越小,修正量越大,其中春季不同波长测距修正量的差别要比其余季节明显;不同季节相同波长的测距修正量相差并不明显,其中 0.55 μm 在秋季的平均修正量(15°~89°)较其余季节略大,1.3 μm 在冬季的平均修正量 (15°~89°) 较其余季节略大,3.9 μm 在春季的平均修正量(15°~89°)较其余季节略大,0.55 μm 和 1.3 μm 在四个季节不同仰角条件下修正量的平均值相差最大也不足 1 m,而 3.9 μm 在四个季节不同仰角条件下修正量的平均值最大相差近 2 m;夏、秋季节不同波长测距修正量之差的变化特点基本一致,0.55 μm 和 3.9 μm 的修正量均大于 1.3 μm 的修正值,0.55 μm 和 3.9 μm 测距修正量的差值在 23°出现“拐点”,仰角小于 23°时 0.55 μm 的测距修正量小于 3.9 μm,仰角大于 23°时 0.55 μm 的测距修正量大于 3.9 μm。

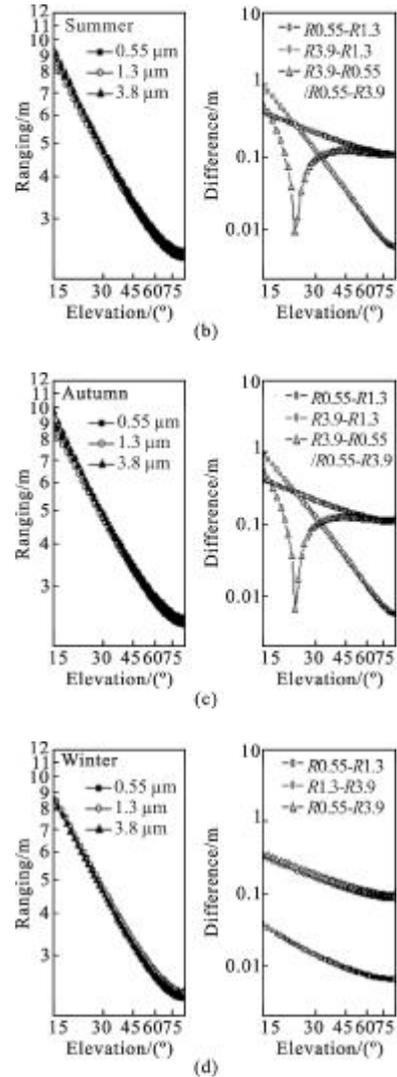
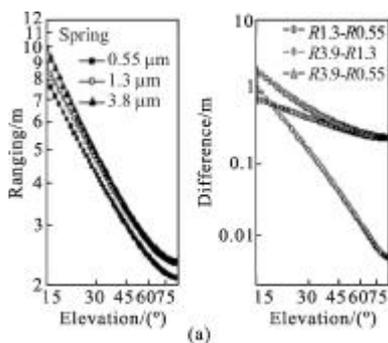


图 3 不同季节测距修正量变化情况
Fig.3 Different seasonal ranging variations

根据分析结果可知,不同波长的测距修正量随季节不同,其修正量变化有所区别,其中 3.9 μm 受季节影响较为明显。

4 结论

根据局地温度、湿度、气压的气球探空资料,拟合得到精度较高的 0.55 μm、1.3 μm、3.9 μm 的折射指数空间变化公式,以此为基础计算出一定高度空间目标的蒙气差、大气色散、测距修正量,指出季节差异对计算结果的影响程度。蒙气差的计算结果表明:与标准大气的计算结果相比,冬季的蒙气差大于标准大气的计算结果,而春、夏、秋季的蒙气差计算结果小于标准大气的计算结果;对于 0.55 μm 与 1.3 μm



及 $3.9\ \mu\text{m}$ 之间的大气色散在视仰角大于 55° 条件下差别并不明显, 在四个季节中, 春季的 $0.55\ \mu\text{m}$ 与 $1.3\ \mu\text{m}$ 、 $3.9\ \mu\text{m}$ 的大气色散为最大; 不同季节、不同波长测距修正量的变化特点略有不同, 其中夏、秋季的特点较为相似, 三种波长中, $3.9\ \mu\text{m}$ 测距修正量受季节影响略敏感。

上述计算结果可以为在该地区开展跟瞄工作提供参考, 但在高精度跟瞄的应用中, 一方面要考虑到大气季节性变化的影响需采用合适的模式, 另一方面则可考虑利用光学器件进行补偿来减少大气折射的影响。

参考文献:

- [1] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peiking University Press, 2003. (in Chinese)
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [2] Zhou Xiuji, Tao Sahnchang, Yao Keya. Advanced Atmospheric Physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. (in Chinese)
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [3] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Numerical calculation and results analysis for atmospheric refraction and atmospheric dispersion[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(2): 1-5. (in Chinese)
张学军, 姜文汉. 大气折射和大气色散的数值计算及结果分析[J]. 光电工程, 2002, 29(2): 1-5.
- [5] Rao Ruizhong, Qiao Yanli, Wei Heli, et al. Research and application on optical properties of atmosphere in typical regions of china [J]. Journal of Atmospheric and Enviromen, 2007, 2(6): 401-408. (in Chinese)
饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 401-408.
- [6] Zhang Yixin, Chi Zeying. Light Wave Propagation and Imaging in Atmosphere [M]. Beijing: Industry of National Defence Press, 1997. (in Chinese)
张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [7] Wan Min, Su Yi, Zhang Wei. The influence of atmospheric dispersion on application of beacon [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6): 776-778. (in Chinese)
万敏, 苏毅, 张卫. 大气色散效应对信标应用的影响研究 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 776-778.
- [8] Song Zhengfang. Fundamentals of Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. (in Chinese)
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [9] Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Gong Zhiben. The refraction correction of optical measurement to satellite [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(6): 560-565. (in Chinese)
翁宁泉, 曾宗泳, 龚知本. 卫星目标光学测量大气折射修正[J]. 量子电子学报, 2001, 18(6): 560-565.
- [10] Huang Jie. Atmospheric Refraction Error Correction of Radio Wave [M]. Beijing: Industry of National Defence Press, 1999. (in Chinese)
黄捷. 电波大气折射误差修正 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [11] Li Jingzhen. Handbook of Optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2010. (in Chinese)
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010.
- [12] Ciddor P E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared [J]. Applied Optics, 1996, 35(9): 1566-1573.
- [13] Owens J C. Optical refractive Index of air: dependence on pressure, temperature and composition [J]. Applied Optics, 1967, 6(1): 51-59.
- [14] Peck E R, Reeder K. Dispersion of air [J]. JOSA, 1972, 62(8): 958-962.
- [15] Edlen B. The refractive index of air[J]. Metrologia, 1966, 2(2): 71-80.
- [16] Birch K P, Downs M J. Correction to the updated Edlen equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1994, 31: 315-316.
- [17] Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo, et al. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0401004-1-0401004-7. (in Chinese)
袁宏武, 梅海平, 黄印博, 等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0401004-1-0401004-7.