

# 基于格点化大气参数廓线模式的低仰角 大气折射修正方法

武鹏飞<sup>1</sup>, 李玉剑<sup>2</sup>, 邵士勇<sup>1</sup>, 康德永<sup>2</sup>, 陈嘉鸿<sup>2</sup>, 李学彬<sup>1</sup>, 魏合理<sup>1</sup>, 饶瑞中<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214400

**摘要** 高精度低仰角大气折射修正方法是提高海陆域光电测控系统全方位测控能力的重要保证。利用光线追迹方法, 建立了一种考虑大气空间不均匀性的低仰角大气折射修正方法; 对修正方法的影响因素及误差进行了深入分析, 包括大气空间不均匀性和湍流对低仰角大气折射修正的影响; 给出了不同折射修正精度对应的大气折射率高度分布所要满足的最大误差, 修正方法的数据基础为自主建立的基于实测廓线数据的三维空间格点化大气参数高度分布模式。利用建立的修正模型和格点化大气参数廓线模式对典型大气状况下的折射修正结果进行了分析。

**关键词** 大气光学; 大气折射修正; 低仰角; 大气不均匀性; 大气模式

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0601004

## Low Elevation Atmospheric Refraction Correction Method Based on Gridding Atmospheric Parameter Profile Mode

Wu Pengfei<sup>1</sup>, Li Yujian<sup>2</sup>, Shao Shiyong<sup>1</sup>, Kang Deyong<sup>2</sup>, Chen Jiahong<sup>2</sup>,  
Li Xuebin<sup>1</sup>, Wei Heli<sup>1</sup>, Rao Ruizhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin, Jiangsu 214400, China

**Abstract** High precision and low elevation atmospheric refraction correction method is an important assurance for improving omnibearing measurement ability of optic-electronic measuring and control system both in sea and land. According to the light tracing method, a low elevation atmospheric refraction correction method considering inhomogeneous of atmospheric space is proposed. The error and the effect factors of the correction method are analyzed thoroughly, including the effects of atmospheric space inhomogeneous and turbulence on low elevation atmospheric refraction correction, and the maximum error of atmospheric refractivity height distribution under different refraction correction precisions is provided. The data base of the correction method is the autonomously established three-dimensional space gridding atmospheric parameter height distribution mode based on measured profile data. The refraction correction results under typical atmospheric condition are analyzed by the proposed correction method and the gridding atmospheric parameter profile mode.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric refraction correction; low elevation; atmospheric inhomogeneous; atmospheric mode

**OCIS codes** 010.1290; 010.1285; 010.1300

## 1 引 言

当在海陆域对卫星和载人飞船等空间飞行器的轨道进行跟踪测量时, 不可避免地会出现 5° 以下低仰角跟踪的情况。在低仰角跟踪情况下, 大气折射误差可能会大于设备的测量误差。开展高精度低仰角大气折

收稿日期: 2016-11-23; 收到修改稿日期: 2017-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61403421)、中国科学院科技创新基金(CXJJ)、飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金(FOM2015OF002)

作者简介: 武鹏飞(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事辐射大气传输方面的研究。E-mail: wupengfei@aiofm.ac.cn

射修正方法的研究在提高系统测控能力、延长对飞行器的跟踪弧度和提高观测数据的利用率等方面具有重要的工程应用价值。

传统的折射积分修正方法首先以光线传播路径上的地心距为积分变量来获取观测站和目标之间真实的地心夹角,然后根据折射的几何关系计算出真实的测距和仰角,最后计算出大气折射修正量<sup>[1-3]</sup>。然而,传统的积分修正方法在观测站的视仰角比较小时,地心夹角积分中被积函数的分母趋近于0,导致修正误差较大,不能满足低仰角折射修正精度的要求。为解决上述问题,张瑜等<sup>[4]</sup>采用数学变换,利用分部积分法解决了低仰角时分母为0而无法计算的问题。张玉祥<sup>[5]</sup>提出以观测站至目标的光线几何距离为积分变量的修正方法,确定了由观测站至目标的光线路径,从而计算出大气折射修正量,有效地解决了低仰角修正时积分奇异性导致修正误差扩散的难题。然而,为了保证修正精度,该方法要求取足够小的积分步长,这大大降低了积分运算效率,很难应用于实时目标跟踪数据处理。段成林等<sup>[6-7]</sup>对上述算法进行了改进,提出了一种基于光线传播几何路径迭代的快速有效的低仰角折射修正方法,迭代步长取较大值时仍可保证修正精度,解决了修正精度和实时性不能兼顾的问题。然而,上述方法采用的大气参数高度分布模型有些为简易的大气高度分布模型,如线性模型、指数模型和 Hopfield 模型等<sup>[2,6]</sup>,这些模型由于与实际大气条件具有明显差异,在实际应用中存在一定的局限性;观测站单个位置的实测高度分布<sup>[5]</sup>虽然更接近实际大气条件,但是由于低仰角观测时光线传输路径较长且覆盖的区域很广,大气不均匀性对修正结果的影响较大。综上考虑,本文基于大范围长时间较高精度实测数据,建立了格点化大气高度分布模式,并计算低仰角下的大气折射修正量。

## 2 基于格点化大气参数廓线分布的低仰角大气折射修正模型

传统折射修正方法多采用观测站单个位置处的大气高度分布,但是考虑到低仰角测控中目标光线实际传输路径较长且覆盖的区域较广,尤其是当目标高度较高时,单点的大气高度分布并不能代表整个长距离光线传输路径中的大气状况,大气不均匀性的影响将会使传统方法的修正精度受到限制。因此,高精度低仰角大气折射修正方法必须考虑大气不均匀性。基于此,根据目标、地球及观测站之间的几何关系、光波传播定律以及三维空间格点化大气高度分布形式,利用光线追迹<sup>[8-9]</sup>建立了低仰角大气折射修正方法。

### 2.1 三维空间格点化大气参数廓线模式

目前,应用较多的大气高度分布模式是美国标准大气扩展委员会(COESA)给出的美国标准大气<sup>[10]</sup>、美国空军地球物理实验室(AFGL)给出的大气模式、国际空间研究委员会(COSPAR)给出的国际参考大气(CIRA)<sup>[11]</sup>和美国海军研究实验室(NRL)给出的基于质谱仪和非相干散射雷达数据的大气经验模式(NRLMSISE-00)<sup>[12]</sup>等,几种常用的国外大气高度分布模式如表1所示,这些模式的数据源受限于有限的探测区域和探测时间以及较慢的更新速度,具有时空分辨率不高和精度不明确等缺点,并不完全符合当前全球局部的实际地理和大气状况,若直接予以采用,则修正结果会受限于上述国外大气模式。因此,考虑到全球局部地理和大气状况的复杂性,必须建立在数据积累、统计分析、模式构建、精度分析与验证更新等方面具有自主可控性的大气高度分布模式,以满足低仰角测控的精度需求。

三维空间格点化大气高度分布模式是低仰角折射修正模型的数据基础。在不考虑折射修正精度对模式时空格点间隔限制的情况下,建立了纬度( $1^\circ$ ) $\times$ 经度( $1^\circ$ )的格点化大气参数廓线模式,模式构建总体流程如图1所示。

对全球地区的大气实测廓线数据进行收集,并形成数据库,主要数据源包括气球探空<sup>[13]</sup>和卫星观测数据<sup>[14]</sup>,观测站点需尽可能多,站点覆盖地区需尽可能大,数据精度需尽可能高,且要有长期的数据积累。目前,气球探空是获得中低层高精度大气参数廓线数据(包括温度、湿度和压强等)的主要且最直接的手段,搭载于美国水(aqua)卫星上的大气红外探测仪(AIRS)、热层-电离层-中间层能量和动力学(TIMED)卫星上的多通道宽带辐射计(SABER)是目前可获得长期较高精度大气参数廓线数据的仪器。图2为部分全球探空站点地理位置分布示意图。

研究了格点化大气参数廓线模式的构建算法,主要包括数据质量控制、基于海量数据的统计分析处理,以及基于稀疏非规则时空数据构建具有一定经纬格点空间分辨率和时间分辨率的大气参数模式的数据同化等。下面简单介绍格点化大气参数廓线模式构建算法的思想。

表 1 几种常用的国外大气高度分布模式  
Table 1 Atmospheric height distribution modes used commonly in abroad

Name	Affiliation	Version	Spatial-temporal resolution
US standard atmosphere mode	US COESA	Old: 1962, 1966; New: 1976	Temporal resolution: year (1962 and 1976 versions) January, July (1966 version); Spatial resolution: 45°N (1962 and 1976 versions) 15°N, 30°N, 45°N, 60°N, 75°N (1966 version)
AFGL atmosphere mode	US AFGL	New: 1986	Temporal resolution: summer (July), winter (January); Spatial resolution: tropic (15°N), midlatitude (45°N), subarctic (60°N)
CIRA	COSPAR (committee on space research)	Old: CIRA-1961, CIRA-1965, CIRA-1972, CIRA-1986; New: CIRA-2012	Temporal resolution: month (CIRA-1986); Spatial resolution: 5° (80°N-80°S) (CIRA-1986)
NRLMSISE-00	US NRL	Old: MSIS-77, MSIS-83, MSIS-86, MSISE-90; New: NRLMSISE-00	

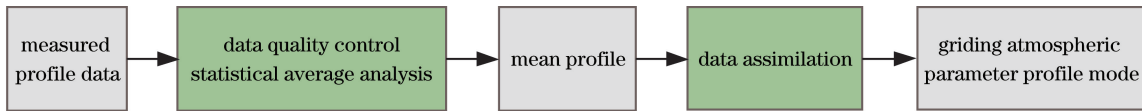


图 1 基于格点化大气参数廓线模式构建的算法流程图

Fig. 1 Flowchart of algorithm based on grid atmospheric parameter profile mode

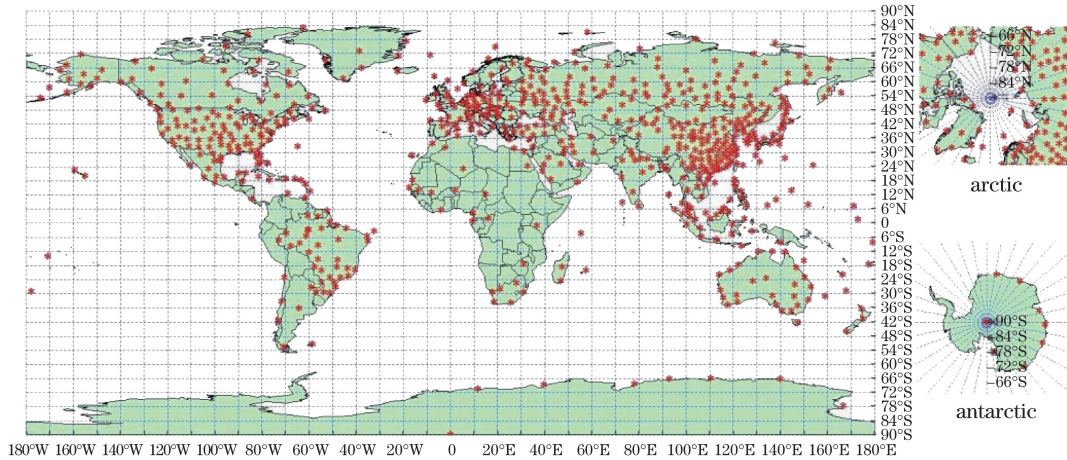


图 2 部分全球探空站点地理位置分布

Fig. 2 Geographic position distribution of partial global radiosonde sites

1) 数据质量控制

依据 NRLMSISE-00 大气参数廓线经验模式,将实测大气参数廓线数据与经验模式值进行对比,当二者相差较大且超过阈值  $\xi(h)$ 时,认为该测量数据是异常的,具体有效判断依据可表示为

$$\left| \frac{V_e(\theta, \varphi, t, h) - V_m(\theta, \varphi, t, h)}{V_m(\theta, \varphi, t, h)} \right| \leq \xi(h), \quad (1)$$

式中  $\theta$  为纬度,  $\varphi$  为经度,  $t$  为时间,  $h$  为高度,  $V_e(\theta, \varphi, t, h)$  为有效值,  $V_m(\theta, \varphi, t, h)$  为模式值。

2) 统计平均分析

对全球实测大气参数廓线的有效数据进行统计平均,得到平均大气参数廓线,再依据数据统计特征剔除离群数据。离群数据是与平均值相差较大的数据,采用三倍标准偏差( $3\sigma$ )作为离群数据的判断依据,即

$$|O(h) - \bar{x}(h)| > 3\sigma(h), \quad (2)$$

$$\sigma(h) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [x_i(h) - \bar{x}(h)]^2}, \quad (3)$$

$$\bar{x}(h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(h), \quad (4)$$

式中  $O(h)$  为离群值,  $\bar{x}(h)$  为参与统计平均的  $N$  条廓线的平均值,  $x_i(h)$  为第  $i$  条廓线值,  $\sigma(h)$  为标准偏差。去除离群数据后重新对大气参数廓线数据进行统计平均,得到平均大气参数廓线。

3) 数据同化

利用数据同化方法,根据稀疏、非规则分布的全球站点的大气参数平均廓线得到格点化大气参数廓线模式。对某分析格点 $(\theta_o, \varphi_o)$ ,通过将一定影响半径即经纬度范围 $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ 内  $M$  个站点的大气参数平均廓线  $\bar{x}_j$  进行线性加权平均,得到该格点的大气参数廓线模式  $\bar{x}_o$ ,即

$$\bar{x}_o = \sum_{j=1}^M \omega_j \bar{x}_j, \quad (5)$$

式中  $\omega_j$  为权重函数。综合考虑时空距离和数据误差等的影响程度,将权重函数表示为站点 $(\theta_j, \varphi_j)$ 与分析格点 $(\theta_o, \varphi_o)$ 的间距 $\sqrt{|\theta_j - \theta_o|^2 + |\varphi_j - \varphi_o|^2}$ 和误差方差  $\sigma_j^2$  的函数,即

$$\omega_j = \frac{c \exp(-\sqrt{|\theta_j - \theta_o|^2 + |\varphi_j - \varphi_o|^2})}{\sigma_j^2}, \quad (6)$$

式中  $c$  为归一化常数,满足所有权重系数的总和为 1,即  $\sum_{j=1}^M \omega_j = 1$ 。

由(6)式可以看出权重函数具有如下特征:权重随着站点与分析格点之间间距的增大而变小,即分析格点间距小的数据的权重大于分析格点间距大的数据的权重;权重随着站点测量值误差方差的增大而减小,即给予精确数据的权重大于不精确数据的权重;同一站点的权重大小与参数类型有关,而与测量值无关。

图 3 为依据上述格点化大气参数廓线模式构建算法建立的格点 $(20 \sim 21^\circ\text{N}, 110 \sim 111^\circ\text{E})$ 1月中旬的大气参数(温度  $T$ 、压强  $P$ 、水汽体积混合比  $W_{\text{MR}}$ 和折射模数  $k$ )廓线模式,其中  $k = (n-1) \times 10^6$ ,  $n$  为大气折射率。

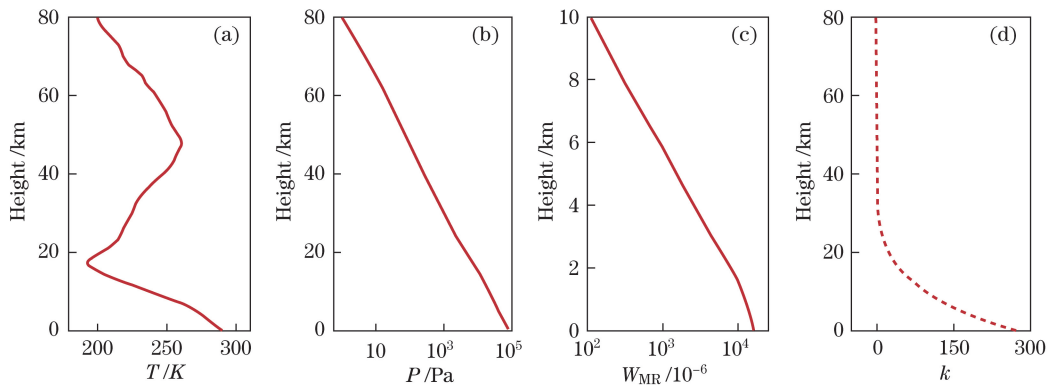


图 3 格点 $(20 \sim 21^\circ\text{N}, 110 \sim 111^\circ\text{E})$ 1月中旬大气参数廓线模式。(a) 温度;(b) 压强;(c) 水汽体积混合比;(d) 折射模数

Fig. 3 Atmospheric parameter profile modes of grid  $(20 \sim 21^\circ\text{N}, 110 \sim 111^\circ\text{E})$  in middle of January.

(a) Temperature; (b) pressure; (c) water vapor volume mixing ratio; (d) refractive modulus



### 2.2 低仰角大气折射修正方法

考虑目标光线在大气中的传播轨迹,如图 4 所示。通常根据光波在大气中的传输机理及大气传输路径方程,将大气分成无数的薄球面层,假设每一球层内具有相同的密度,则光线只在相邻层的界面上发生折射,并遵循 Snell 折射定律。图 4 中  $\theta_i$  和  $\beta_i$  分别为光线在相邻两层界面处的入射角和折射角,  $n_i$  为高度  $h_i$  处的大气折射率值,  $h_i$  为地心距,  $\alpha_i$  为光线进入大气层后对应的地心夹角,下标  $i$  的范围为  $(1, m)$ ,  $m$  为大气层数,  $\theta_a$  和  $\theta_t$  分别为观测目标视仰角和真实仰角,  $\theta_R$  为光线总折射角,  $L_t$  为观测站到目标的真实距离,  $\alpha_m$  为整条光线对应的地心夹角。

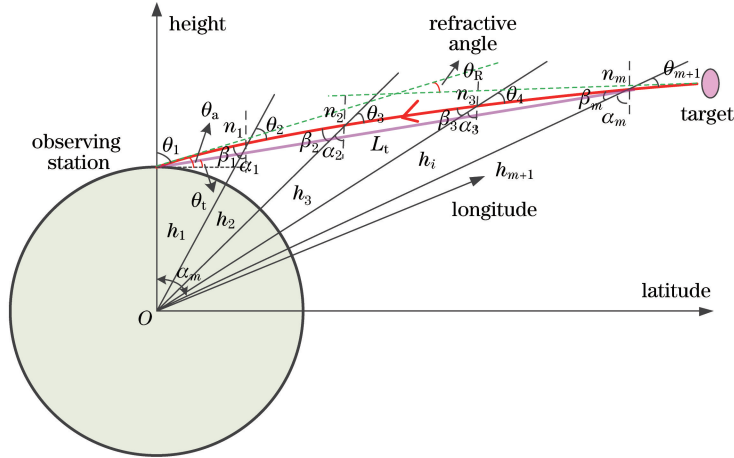


图 4 目标光线在大气中的传播轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of propagation path of target light in atmosphere

根据图 4 中几何关系,得到进入大气层后整条光线对应的地心夹角为

$$\alpha_m = \sum_{i=1}^m (\theta_i - \beta_i). \quad (7)$$

由 Bouquer 公式<sup>[8]</sup>可知,在整个传输光线上,光线的切向矢量  $s$  (其方向就是光的传播方向)与矢径  $r$  的矢量积为常数(记为  $C_{\text{const}}$ ),即  $r \times ns = C_{\text{const}}$ ,结合光线 Snell 折射定律,可分别得到每个界面层对应的入射角和折射角为

$$\theta_i = \arcsin[n_1 h_1 \sin \theta_1 / (n_i h_i)], \quad (8)$$

$$\beta_i = \arcsin[n_1 h_1 \sin \theta_1 / (n_i h_{i+1})]. \quad (9)$$

将(8)、(9)式代入(7)式可得

$$\alpha_m = \sum_{i=1}^m \{ \arcsin[n_1 h_1 \sin \theta_1 / (n_i h_i)] - \arcsin[n_1 h_1 \sin \theta_1 / (n_i h_{i+1})] \}. \quad (10)$$

根据图 4 中的几何关系,可得观测目标的真实仰角为

$$\theta_t = \arcsin\left[-\frac{h_1^2 + L_t^2 - h_{m+1}^2}{2h_1 L_t}\right], \quad (11)$$

式中  $L_t = (h_1^2 + h_{m+1}^2 - 2h_1 h_{m+1} \cos \alpha_m)^{1/2}$ 。观测目标的仰角修正量  $\Delta\theta$  为

$$\Delta\theta = \theta_a - \theta_t. \quad (12)$$

此外,光线经过大气传输后总的折射角可表示为

$$\theta_R = \theta_{m+1} + \alpha_m - \theta_1 = \sum_{i=2}^{m+1} \arcsin[n_1 h_1 \sin \theta_1 / (n_i h_i)] - \sum_{i=2}^m \arcsin[n_1 h_1 \sin \theta_1 / (n_i h_{i+1})]. \quad (13)$$

由(11)~(13)式可以看出,观测仰角修正量、光线总折射角都与观测仰角及大气折射率的高度分布有关。大气折射率不仅与温度、和气压(即大气密度)有关,还与水汽压和波长有关。在可见光和近红外波段,结合水汽压和波长的折射率计算公式,采用 Stone 等<sup>[15-16]</sup>在 2001 年对 Edlen 结果的修正公式,可以得到

$$\begin{cases} n_{\text{tpe}} - 1 = n_{\text{tp}} - 1 - 10^{-6} \frac{292.75}{T + 273.15} p' [3.7345 \times 10^{-4} - 4.01 \times 10^{-6} (1/\lambda)^2] \\ n_{\text{tp}} - 1 = \frac{P(n_s - 1)}{96095.43} \cdot \frac{1 + P(0.601 - 0.00972T) \times 10^{-8}}{1 + 0.0036610T} \\ n_s - 1 = 10^{-6} \left[ 83.4254 + \frac{24061.47}{130 - (1/\lambda)^2} + \frac{159.98}{38.9 - (1/\lambda)^2} \right] \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $p'$  为水汽压,  $\lambda$  为波长,  $n_s$  为 15 °C、1013.25 hPa 下的干空气折射率,  $n_{\text{tp}}$  为任意温度和气压下的干空气折射率,  $n_{\text{tpe}}$  为湿空气的折射率。

在低仰角观测中, 光线实际传输路径较长, 偏离了观测站处的垂直上空。因此, 在上述低仰角折射修正模型中, 考虑大气不均匀性产生的影响以及三维空间格点化大气高度分布形式, 结合光线传输路径, 选取不同空间格点处对应高度上的大气参数值作为不同高度处的大气参数, 如图 5 所示。

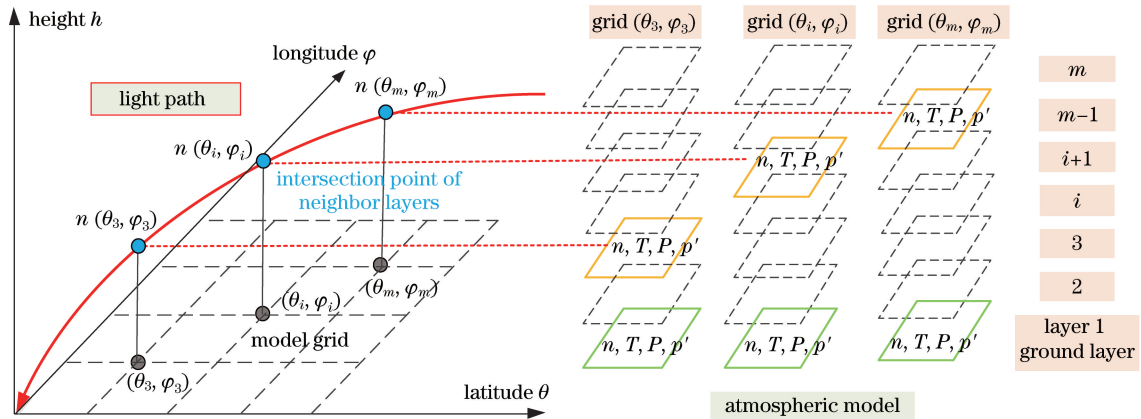


图 5 不同空间格点的不同高度大气参数选取

Fig. 5 Selection of atmospheric parameters of space grid points at different heights

### 2.3 折射修正模型误差分析

低仰角大气折射修正方法是基于光线追迹方法建立的, 模型的计算误差主要包括下面几个部分。

1) 采用折射率离散化的有限层代替折射率连续变化的无限层所产生的误差

该误差为修正模型的固有误差, 可通过仿真模拟确定。图 6 为取有限层数时仰角修正量与取近似无限多层时修正量之间的折射修正误差。可以看到, 该误差随着计算层数的增多而减小, 当计算层数超过  $5 \times 10^3$  层时, 误差在  $0.1''$  以内。在海口 1 月上旬的平均大气条件下进行模拟, 目标高度为 100 km, 波长为 550 nm, 仰角为  $5^\circ$ 。

2) 输入参数不准确产生的误差

修正模型的输入参数主要是大气折射率高度分布, 即温度、压强和水汽高度分布。输入大气参数高度分

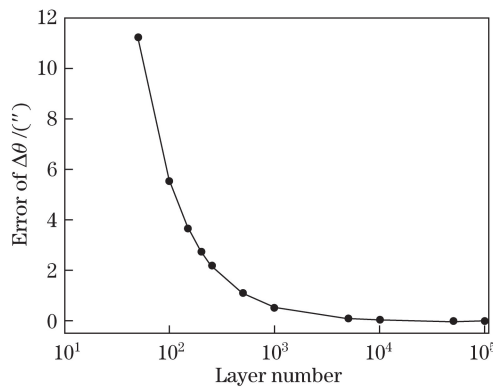


图 6 取不同计算层数时的折射修正误差

Fig. 6 Refraction correction error with different computing layers

布与实际大气高度分布的差异将会引入修正误差。通过仿真模拟分析了大气参数(包括大气折射模数、温度、压强和水汽压)高度分布误差对折射修正误差的影响,如图 7 所示。具体仿真计算条件为(计算层数取  $10^4$ ):海口 1 月上旬平均大气条件,目标高度为 100 km,波长为 550 nm。可以看到折射修正误差随着大气参数误差的减小而减小,其中温度和压强的影响较大,而水汽压的影响相对较小。

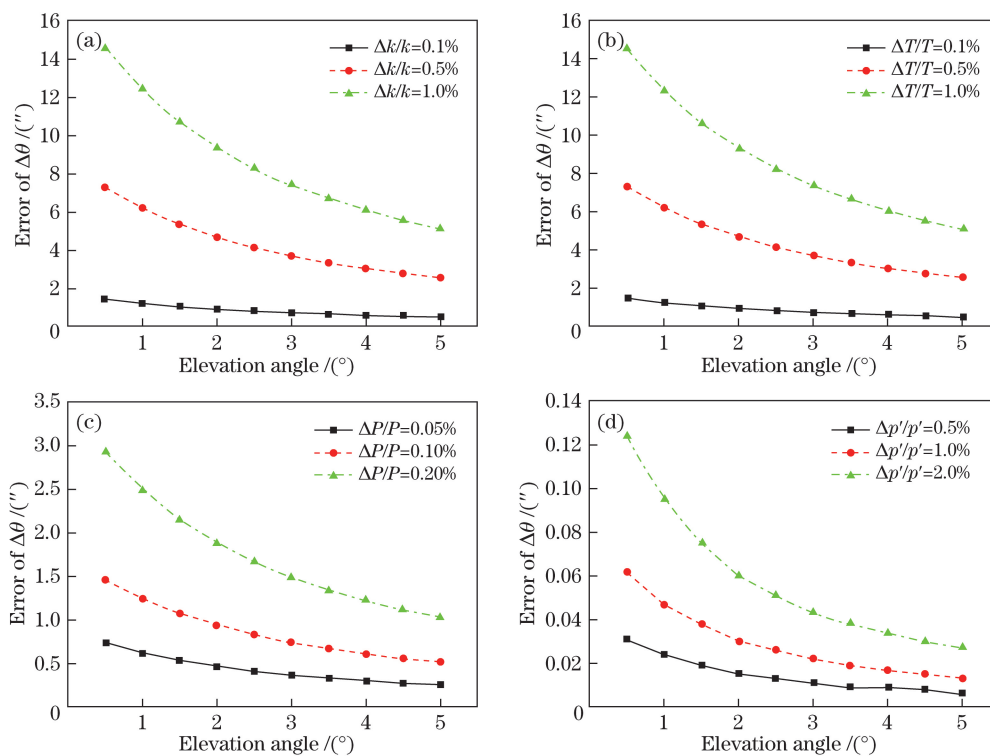


图 7 不同大气参数高度分布误差对折射修正误差的影响。(a) 折射模数; (b) 温度; (c) 压强; (d) 水汽压  
Fig. 7 Effect of height distribution error of different atmospheric parameters on refraction correction error.

(a) Refractive modulus; (b) temperature; (c) pressure; (d) vapor pressure

综上所述,当计算层数较少时,大气折射修正模型的误差主要取决于模型的固有误差和输入大气参数的高度分布误差,而当计算层数较多时,大气折射修正模型的误差主要取决于输入大气参数的高度分布误差。如当目标高度为 100 km、观测仰角为  $5^\circ$ 、计算层数取  $10^4$  时,模型固有误差的贡献小于  $0.1''$ ,而大气参数高度分布误差贡献  $2.6''$  ( $\Delta T/T=0.5\%$ )、 $0.5''$  ( $\Delta P/P=0.1\%$ ) 和  $0.01''$  ( $\Delta p'/p'=1\%$ )。

依据上述分析可以给出不同折射修正精度要求下大气折射模数高度分布所要满足的最大误差,图 8 为不同观测仰角下的计算结果。具体仿真计算条件为(计算层数取  $10^4$ ):海口 1 月上旬平均大气条件,目标高度为 100 km,波长为 550 nm。可以看出,对于同一折射修正精度,不同观测仰角对折射模数最大误差的要求不同,在修正精度较低时折射模数最大误差的差异表现明显,一般情况下,较大仰角对折射模数误差的要求较低。当修正精度为  $5''$  时,仰角为  $0.5^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $5^\circ$  时的折射模数最大误差分别约为  $0.3\%$ 、 $0.5\%$ 、 $0.9\%$ ;当修正精度为  $10''$  时,仰角为  $0.5^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $5^\circ$  时的折射模数最大误差约为  $0.6\%$ 、 $0.9\%$ 、 $1.7\%$ 。上述确定的大气折射模数最大误差决定了建立格点化高度分布模式的时空间隔的选取,即同一时空格点内大气折射模数误差不能超过最大误差。

大气不均匀性对折射修正误差的影响实际上就是输入大气参数与实际大气存在差异引起的修正误差。依据建立的基于格点化大气高度分布的低仰角大气折射修正方法,通过数值仿真分析考虑和不考虑大气空间不均匀性时的折射修正误差。具体仿真计算条件为(计算层数取  $10^4$ ):海口 1 月上旬平均大气条件,目标高度为 100 km,目标光线沿地球经线方向传输至观测处,波长为 550 nm,取观测地为  $0^\circ$  基准,且观测地位于格点中心,格点间隔为  $1^\circ$ ,观测仰角为  $2^\circ$  时光线轨迹覆盖的格点如图 9(a) 所示,可以看到光线传输过程中共跨越 9 个格点。相邻格点间温度、气压和水汽压的误差分别取  $0.1\%$ 、 $0.05\%$ 、 $0.5\%$  和  $0.5\%$ 、 $0.1\%$ 、 $1\%$ ,取  $0.5\%$ 、 $0.1\%$ 、 $1\%$  时不同地点相对于观测地的大气折射模数误差如图 9(b) 所示。

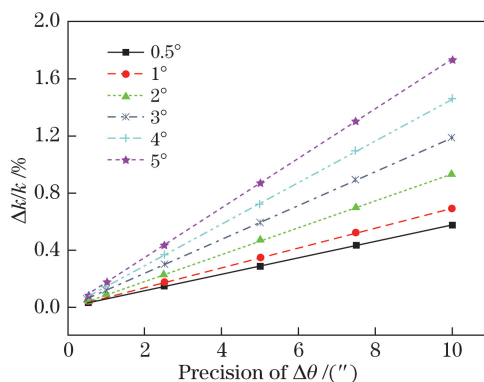


图 8 不同折射修正精度对应的大气折射模数高度分布误差

Fig. 8 Height distribution error of atmospheric refractive modulus corresponding to different refraction correction precisions

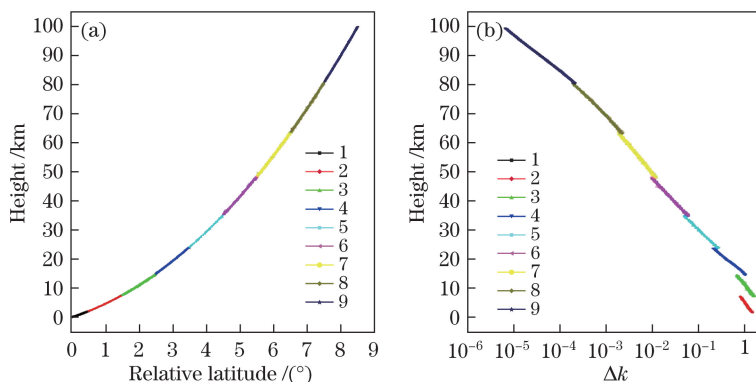


图 9 (a) 光线传输路径; (b) 相对于观测处的大气折射模数误差

Fig. 9 (a) Light propagation path; (b) refractive modulus error relative to observation point

图 10 为在上述仿真条件下,观测仰角为  $0.5^{\circ} \sim 5^{\circ}$  时,当分别考虑和不考虑大气空间不均匀性时的折射修正误差。可以看到观测仰角越低,折射修正误差越大,大气空间不均匀性的影响越大,尤其是在光线传输路径覆盖地域之间大气状况差异较大时大气空间不均匀性的影响较大。因此,在低仰角观测条件下,若仅采用观测处单个位置的大气参数高度分布代表整个长距离光线传输路径中的大气状况,将会产生较大的修正误差,为了达到较高的修正精度,必须要考虑大气空间不均匀性的影响,并采用基于格点化大气高度分布的折射修正模型。

### 3) 大气湍流产生的随机误差

当对目标进行测量时,大气湍流引起的光线漂移会给折射修正带来随机误差,目标观测仰角漂移均方差表示为<sup>[17]</sup>

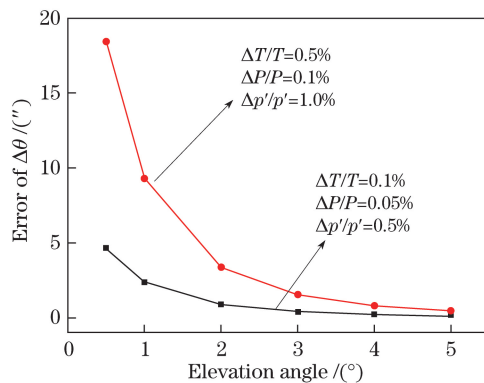


图 10 考虑和未考虑大气空间不均匀性时的折射修正误差

Fig. 10 Refraction correction error considering and not considering atmospheric inhomogeneous



$$\sigma_a^2 = 2.914D^{-1/3} \sum_{i=1}^m C_n^2(h_i) \left( \frac{h_{m+1} - h_i}{h_{m+1}} \right)^{5/3} \frac{h_{i+1} - h_i}{\{1 - (n_1 R_e \cos \theta_a)^2 / [n_i (h_i + R_e)]^2\}^{1/2}}, \quad (15)$$

式中  $D$  为探测器通光孔径;  $C_n^2(h_i)$  为大气湍流折射率结构常数高度分布;  $C_n^2$  为大气湍流的强度, 一般在近地面强湍流情况下约为  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ , 在弱湍流情况下约为  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 。可以看到, 目标观测仰角漂移量与波长无关, 即大气湍流对不同波长的折射修正影响相同。

图 11(a) 为通过数值仿真分析得到的不同大气湍流强度高度分布下目标观测仰角漂移均方根  $\sigma_a$ 。具体仿真计算条件为(计算层数取  $10^4$ ): 海口 1 月上旬平均大气条件, 目标高度为 100 km, 探测器孔径为 0.5 m, 大气湍流强度高度分布采用 Hufnagel-Valley 5/7 模型<sup>[8]</sup> 和 10 倍的 Hufnagel-Valley 5/7 模型, 模型表达式为

$$C_n^2 = 3.6 \times 10^{-23} h^{10} \exp(-h) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1.5) + 1.7 \times 10^{-4} \exp(-h/0.1)。 \quad (16)$$

大气湍流强度高度分布曲线如图 11(b) 所示。

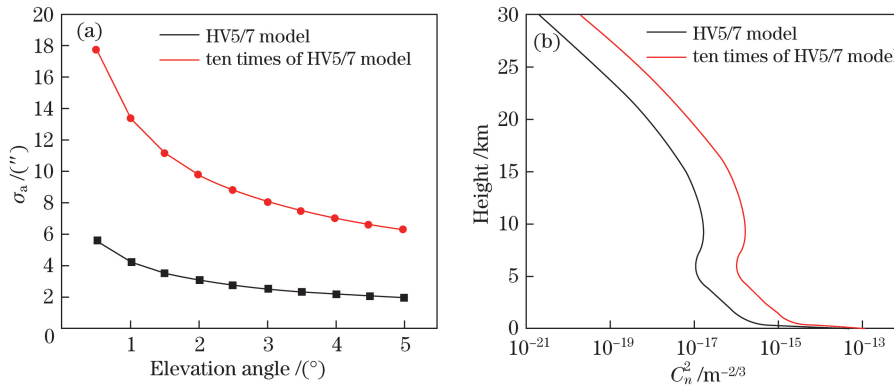


图 11 (a) 目标观测仰角漂移均方根; (b) 大气湍流强度高度分布

Fig. 11 (a) Root mean square of target observation elevation angle drift;  
(b) height distribution of atmospheric turbulence intensity

由图 11 可以看到大气湍流会对低仰角目标观测修正产生较大影响, 这是因为低仰角条件下光线经过低层大气的距离较长, 受湍流的影响较大, 这也是目前低仰角目标观测折射修正的难点, 自适应光学技术的发展和运用将是大气湍流随机漂移实时修正的一种潜在途径。

为了验证所提方法的正确性和有效性, 针对实际光电测控场景, 根据文献[17]给出的 2011 年 9 月 29 日某目标飞行器入轨前青岛航天测控站跟踪时的光电经纬仪外测数据, 得到测量数据。利用所提方法得到的大气层内修正数据与全球定位系统精确弹道反算结果之间的残差如图 12 所示。可以看到, 虽然只进行了大气层内的折射修正, 观测仰角已得到了较好的修正, 当考虑大气层外目标飞行高度时, 对观测仰角再次修正的残差将会进一步降低。

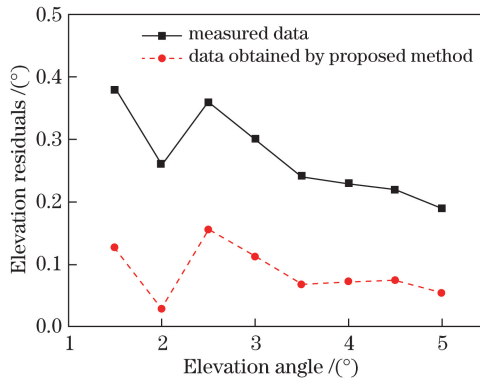


图 12 目标观测仰角修正残差

Fig. 12 Correction residual of target observation elevation angle

### 2.4 典型大气状况下低仰角折射修正结果

依据建立的基于三维空间格点化大气高度分布的低仰角大气折射修正方法,分析了不同地区不同时间典型大气状况下的低仰角大气折射修正量,如图 13 所示,具体仿真计算条件为(计算层数取  $10^4$ ):1、7 月上旬平均大气条件,目标高度为 100 km,目标光线沿地球经线方向传输至观测处,波长为 550 nm。可以看到随着观测仰角逐渐减小,即观测方向趋于水平方向,折射修正量显著增加,其中仰角为  $0.5^\circ$  时的修正量约为仰角为  $5^\circ$  时的 3 倍。此外,不同大气状况下的折射修正量存在差异,1 月份要比 7 月份的差异更为明显,在我国典型地区,北部地区比南部地区的折射修正量大,冬季要比夏季的修正量大。

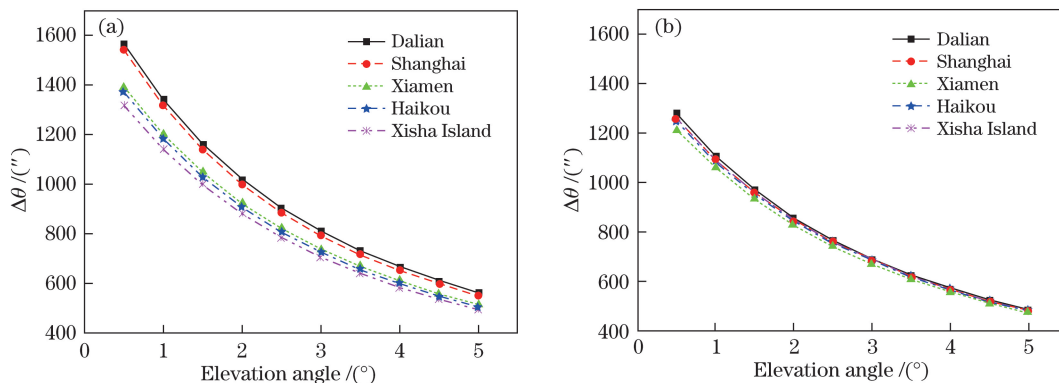


图 13 典型大气状况下的折射修正结果。(a) 1 月; (b) 7 月

Fig. 13 Refraction correction results under typical atmospheric conditions. (a) January; (b) July

不同波长的光线经过大气传输后的折射偏移存在差异,这主要是因为不同波长下的大气折射率不同。图 14 为典型波长下的低仰角大气折射修正量,具体仿真计算条件为(计算层数取  $10^4$ ):海口 1 月上旬平均大气条件,目标高度为 100 km。可以看出,波长越短则折射修正量越大,此外,仰角越小则不同波长之间的折射修正误差越大,不同波长之间的折射修正差异对于宽波段探测系统或高精度探测条件尤为重要。当仰角为  $5^\circ$  时,550 nm 和 1300 nm 之间的折射修正误差为  $8.0''$ ,1300 nm 和 3900 nm 之间的折射修正误差为  $1.5''$ ;当仰角为  $0.5^\circ$  时,550 nm 和 1300 nm 之间的折射修正误差为  $22.9''$ ,1300 nm 和 3900 nm 之间的折射修正误差为  $4.3''$ 。

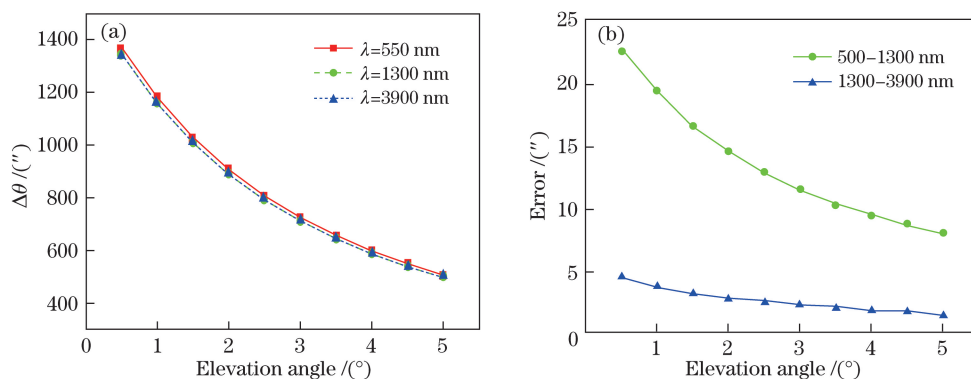


图 14 不同波长下的折射修正结果。(a)修正量;(b)修正误差

Fig. 14 Refraction correction results under different wavelengths. (a) Correction value; (b) correction error

## 3 结 论

低仰角折射修正的精度依赖于折射修正模型的精度以及大气参数高度分布的准确程度。考虑大气空间不均匀性并利用光线追迹方法,建立了一种高精度低仰角大气折射修正方法,并深入分析了其误差源,包括大气空间不均匀性和湍流对折射修正的影响。分析发现低仰角下光线在低层大气中的长距离传输使得大气湍流引起的随机漂移会对低仰角的目标观测产生较大影响,该影响的实时修正将是进一步提高低仰角折射修正精度的重要方面,也是一个技术难点。建立折射修正方法的数据基础为自主建立的基

于实测廓线数据的三维空间格点化大气高度分布模式。此外,给出了不同折射修正精度对应的大气折射率高度分布所要满足的最大限制误差,以及典型大气状况下的低仰角折射修正结果。基于格点化大气参数廓线模式的低仰角大气折射修正方法的提出为提高海陆域光电测控系统全方位测控能力提供了良好的基础。

## 参 考 文 献

- [1] Hu Shaolin, Xu Aihua, Guo Xiaohong, *et al.* Pulse radar tracking measurement data processing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.  
胡绍林, 许爱华, 郭小红, 等. 脉冲雷达跟踪测量数据处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] Li Zhengdong. Loss and refraction of laser transmitting in the atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 73-77.  
李正东. 激光在大气传输中的损耗和折射[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 73-77.
- [3] Han Xianping, Zhou Hui. Study of high accuracy adjust method of atmospheric refraction of low elevation[J]. Electro-optic Technology Application, 2008, 23(1): 24-26.  
韩先平, 周 慧. 低仰角大气折射的高精度修正方法研究[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 24-26.
- [4] Zhang Yu, Li Xueping, Li Li. Method of radio wave refraction error correction based on 0 deg and its nearby elevation angles[J]. System Engineering and Electronics, 2009, 31(4): 787-790.  
张 瑜, 李雪萍, 李 丽. 0度及其附近仰角的电波折射误差修正方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 787-790.
- [5] Zhang Yuxiang. A new adjust method of atmospheric refraction of low elevation[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 1999, 18(2): 15-19.  
张玉祥. 低仰角大气折射修正的新方法[J]. 飞行器测控学报, 1999, 18(2): 15-19.
- [6] Duan Chenglin, Ma Chuanling, Cao Jianfeng. A fast and efficient algorithm of tropospheric refraction correction at low elevation[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(22): 7-10.  
段成林, 马传令, 曹建峰. 低仰角对流层折射修正快速算法[J]. 现代电子技术, 2011, 34(22): 7-10.
- [7] Duan Chenglin, Ma Chuanling, Cao Jianfeng, *et al.* A new method on tropospheric refraction correction at low elevation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1195-1199.  
段成林, 马传令, 曹建峰, 等. 一种低仰角对流层折射修正的新方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1195-1199.
- [8] Rao Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [9] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, *et al.* Analysis on impact of atmospheric refraction on radiative transfer process at visible and infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0601005.  
胡 帅, 高太长, 李 浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601005.
- [10] National Geophysical Data Center. U. S. standard atmosphere 1976 [J]. Planetary and Space Science, 1992, 40(4): 553-554.
- [11] Rees D, Barnett J J, Labitzke K. COSPAR international reference atmosphere: 1986. Part II: Middle atmosphere models[J]. Advances in Space Research, 1990, 10(12): 357-517.
- [12] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(A12): SIA15.
- [13] Rocken C, Anthes R, Exner M, *et al.* Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D25): 29849-29866.
- [14] Remsberg E E, Marshall B T, Garciascomas M, *et al.* Assessment of the quality of the version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D17101.
- [15] Birch K P, Downs M J. An updated equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1993, 30(3): 155-162.
- [16] Birch K P, Downs M J. Correction to the updated Edlen equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1994, 31(4): 315-316.
- [17] Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Gong Zhiben. The refraction correction of optical measurement to the satellite[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(6): 560-565.  
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.