

折射率湿项对靶场经纬仪测高精度的影响分析

韩先平 陈祥明

Analysis of influence of refractivity wet term on height measurement accuracy of cinetheodolite

HAN Xianping, CHEN Xiangming

引用本文:

韩先平, 陈祥明. 折射率湿项对靶场经纬仪测高精度的影响分析[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 790–795. DOI: 10.5768/JAO202445.0403004

HAN Xianping, CHEN Xiangming. Analysis of influence of refractivity wet term on height measurement accuracy of cinetheodolite[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 790–795. DOI: 10.5768/JAO202445.0403004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机载光电系统目标定位大气折射修正研究

Research on atmospheric refraction correction of airborne electro-optical system target location

应用光学. 2022, 43(4): 641–647 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401008>

基于傅里叶变换频谱分析的液体折射率实时测量系统

Real-time measuring system for liquid refractive index based on Fourier transform spectrum analysis

应用光学. 2023, 44(5): 1061–1067 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503001>

螺旋形塑料光纤表面等离子体共振折射率传感器

Plasmon resonance refractive index sensor of spiral-shaped plastic optical fiber surface

应用光学. 2023, 44(1): 226–233 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108002>

空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究

Package of hollow micro-bottle resonator and refractive index sensing properties

应用光学. 2022, 43(5): 1001–1006 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508002>

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462–468 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

太赫兹飞行时间测厚法在大气环境中的应用

Applications of thickness measurement method based on terahertz time-of-flight in atmospheric environment

应用光学. 2023, 44(4): 809–815 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 04-0790-06

折射率湿项对靶场经纬仪测高精度的影响分析

韩先平¹, 陈祥明²

(1. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘要: 针对部分靶场经纬仪外测数据处理时常忽略折射率湿项对大气折射效应影响的现状, 基于 2019 年环渤海某地区 626 组气象探空数据, 利用射线描迹法计算了考虑折射率湿项和忽略折射率湿项两种情况下大气折射导致的经纬仪测高偏差。通过统计全年内不同仰角、不同高度等情况下折射率湿项对测高精度的影响, 结果表明: 折射率湿项是构成靶场经纬仪测高残差的一个重要误差源, 对于目标高度测量有较高精度要求的试验任务, 特别是在低仰角测量的情况, 不能忽略折射率湿项的影响。

关键词: 光波大气折射率; 折射率湿项; 折光修正; 射线描迹; 测高误差

中图分类号: TN012

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0403004

Analysis of influence of refractivity wet term on height measurement accuracy of cinetheodolite

HAN Xianping¹, CHEN Xiangming²

(1. Unit 92941 of the PLA, Huludao 125000, China; 2. Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: The influence of refractivity wet term on atmospheric refraction effect is often ignored during the measurement flight data processing of partial cinetheodolites. Based on the 626 sets of radiosonde data in a certain area around the Bohai Sea in 2019, the deviation of height measurement by theodolite caused by atmospheric refraction was calculated with and without the consideration of refractivity wet term by using the ray-tracing algorithm. According to the statistics of the influence of refractivity wet term on the accuracy of height measurement at different elevation angles and different heights throughout the year, the results show that the refractivity wet term is an important source of height measurement residual errors. For the test tasks with high precision requirements for target height measurement, especially in the case of low elevation angle measurement, the influence of the refractivity wet term cannot be ignored.

Key words: optical wave atmospheric refractivity; refractivity wet term; optical wave refraction correction; ray tracing; height measurement error

引言

靶场经纬仪交会测量空间飞行目标轨迹时, 大气折射效应会影响经纬仪对目标俯仰角的测量精度, 从而影响目标飞行高度的解算结果^[1]。在高精度靶场外测数据处理中, 需要对大气折射引起的测量误差进行有效剔除, 即进行折光修正数据处理^[2]。

对靶场外测数据进行折光修正数据处理, 首先要获取光波传播链路上大气折射率的分布^[3]。目

前认为, 精确的光波大气折射率剖面是利用探空气球采集的气象参数剖面换算得到的。在靶场试验任务中, 一般在任务前后进行气象探空, 采集当地的气象数据(含高度、气温、湿度、气压等参数信息)剖面, 换算得到光波大气折射率剖面^[4]。由于水汽在对流层大气中所占比重很小, 仅为 0.1%~3%^[5], 使得折射率湿项占光波大气总折射率的比重较小, 因此在部分靶场数据处理或弹道解算时, 会

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2023-11-02

基金项目: 张明高院士工作室基金 (A332103Y12)

作者简介: 韩先平 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事靶场外弹道测量数据处理研究。E-mail: hanxianping894@163.com

忽略折射率湿项对折射误差的影响^[6-7]。

随着靶场对外弹道测量精度需求的不断提高, 在一些靶机校飞或精度试验任务中, 对目标飞行高度的考核非常严苛, 要求处理后目标高度精度达到米级, 这就需要更有效地剔除大气环境引起的经纬仪测量误差^[8]。本文以环渤海某地区为例, 基于当地 2019 年 626 组实测气象探空数据, 利用射线描迹法计算了考虑折射率湿项影响和忽略折射率湿项影响的两种情况下, 由大气折射引起的中波红外经纬仪测高误差, 并统计了两组偏差的均方根误差, 分析了折射率湿项对高精度折光修正精度的影响, 最后结合统计分析结果给出了工程建议。

1 光波大气折射率

1963 年, 在伯克利召开的国际大地测量与地球物理协会 (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) 会议上, 建议采用式(1)计算光波大气群折射率^[9-10]:

$$N = \frac{f(\lambda)}{1 + \alpha t} \times \frac{P}{1013.25} - \frac{4.125 \times 10^{-2}}{1 + \alpha t} \times e \quad (1)$$

式中: $f(\lambda) = 287.604 + \frac{4.8864}{\lambda^2} + \frac{0.0680}{\lambda^4}$, λ 为光波波长, 单位 μm ; 常数 $\alpha = 1/273.15 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; t 为气温, 单位 $^\circ\text{C}$; P 为气压, 单位 hPa ; e 为水汽压, 单位 hPa 。

式(1)右边第一项称为光波大气折射率静力项, 第二项称为光波大气折射率非静力项, 工程中常称为折射率湿项, 本文沿用折射率湿项称法。其中, 水汽压 e 可以由气温 $t(^\circ\text{C})$ 和相对湿度 $H_R(\%)$ 换算得到^[11-12]:

$$e = a \exp\left[\frac{(b - t/c)t}{t + d}\right] \times \frac{H_R}{100} \quad (2)$$

式中: 系数 a , b , c 和 d 的取值分别如表 1 所示^[11-12]。

表 1 系数 a , b , c 和 d 的取值

Table 1 Values of coefficients a , b , c and d		
系数	平冰面	平液面
a	6.111 5	6.112 1
b	23.036	18.678
c	333.7	234.5
d	279.82	257.14

2 大气折射测高误差

目前, 靶场经纬仪数据进行折光修正的常用方

法是射线描迹法。该方法是基于 Fermat(费尔马)原理和 Snell(斯奈尔)定律这两个几何光学原理推导出来的, 适用于大气球面分层假设条件下的大气折射误差计算^[2-4]。大气层中光波的传播轨迹示意图如图 1 所示。

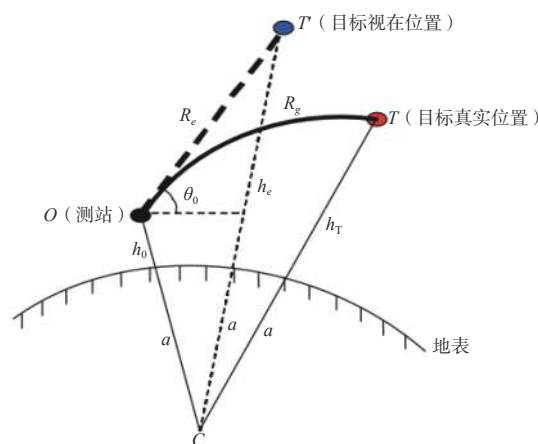


图 1 球面分层大气折射效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical wave atmospheric refraction around earth

图 1 中, a 为地球半径, h_0 为测站的高度, θ_0 为经纬仪测得的目标仰角(称为目标视在仰角), R_e 为经纬仪测量的目标距离(称为目标视在距离), h_e 为经纬仪测量的目标高度(称为目标视在高度), h_T 为目标真实高度, R_g 为光波在大气层中的实际传播轨迹。

经纬仪测量的目标视在距离 R_e 在数值上等于光速与传播时间的乘积, 用积分形式可表示为^[13]

$$R_e = \int_{r_0}^{r_T} n \csc \theta_0 dr \quad (3)$$

式中: r 为地心距, $r = a + h$; r_0 为测站的地心距; r_T 为目标处的地心距; n 为光波大气折射指数, 与光波大气折射率 N 之间的换算关系为

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (4)$$

由 Snell 定律可知:

$$nr \cos \theta = n_0 r_0 \cos \theta_0 = \text{const} \quad (5)$$

式中: n_0 为测站处的光波大气折射指数; const 代表常数, 将该常数记为 A_0 , 由三角函数公式得:

$$\csc \theta_0 = \frac{nr}{\sqrt{n^2 r^2 - A_0^2}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3), 得:

$$R_e = \int_{r_0}^{r_T} \frac{n^2 r}{\sqrt{n^2 r^2 - A_0^2}} dr \quad (7)$$

在 $\triangle COT$ 中, 由余弦定理得:

$$(a + h_e)^2 = R_e^2 + r_0^2 - 2R_e r_0 \cos(\theta_0 + 90^\circ) \quad (8)$$

进一步可得,目标视在高度 h_e 为

$$h_e = \sqrt{R_e^2 + r_0^2 + 2R_e r_0 \sin \theta_0} - a \quad (9)$$

由于大气折射引起的测高误差为目标视在高度与目标真实高度的差^[2],记为 Δh ,即:

$$\Delta h = h_e - h_T \quad (10)$$

3 测高误差偏差计算与统计

以环渤海某地区为例,选用2019年历史气象探空数据626组(常规的气象探空在每天世界时间0时和12时进行,对应北京时间为每天8时和20时,每天采集2组,实际中可能由于种种原因导致部分时刻气象探空数据缺失),经纬仪波长选择中波红外波长,取4 μm ,计算并统计分析折射率湿项(水汽)对经纬仪测高精度的影响。

3.1 折射率湿项对总折射率的影响

图2为该地区全年实测地面折射率湿项占光波大气总折射率的百分比。其中,横轴为年累积日(该天为本年度从1月1日起计算的天数)。

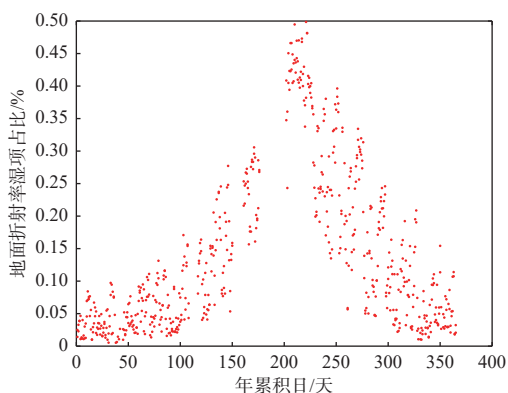


图2 折射率湿项占总折射率的百分比

Fig. 2 Percents of wet term in total optical wave atmospheric refractivity

从图2中可以看出,中波红外地面折射率湿项占光波大气总折射率的比重很小,都在0.5%以下。相比而言,夏季比重较大,冬季比重较小,这主要是由于夏季空气中水汽含量较大,冬季空气干燥、水汽含量低。

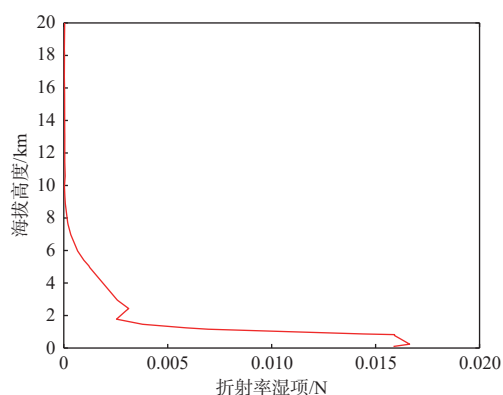
表2给出了地面折射率湿项占总折射率比重的最小值和最大值,以及对应的气象探空数据采集时刻。图3分别给出了2019年2月7日8时和2019年8月9日20时两个时刻地面至20 km高度处的折射率湿项剖面,以及不同高度处折射率湿项占光波大气总折射率的百分比分布情况。从图3

可以看出,整个探空高度范围内,中波红外折射率湿项占光波大气总折射率的比重都很小。随着海拔高度的增加,折射率湿项以及折射率湿项占光波大气总折射率的百分比迅速减小,在对流层顶^[4]高度以上几乎为0。

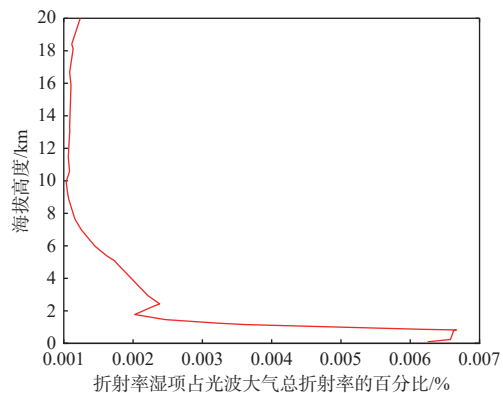
表2 地面折射率湿项占总折射率比重极值

Table 2 Extreme values of percentage of wet term in total atmospheric refractivity

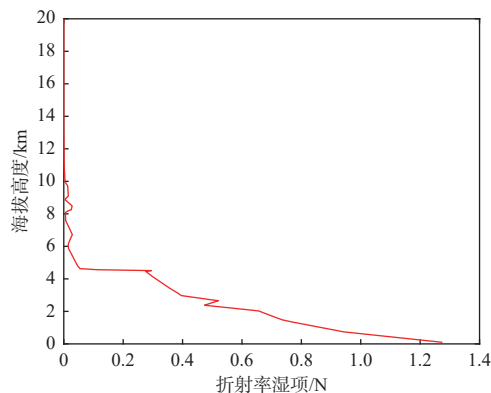
	折射率湿项占比最小值	折射率湿项占比最大值
时刻(北京时间)	2019年2月7日8时	2019年8月9日20时
比重/%	0.005	0.499



(a) 2019年2月7日8时折射率湿项剖面



(b) 2019年2月7日8时折射率湿项占总折射率百分比



(c) 2019年8月9日20时折射率湿项剖面

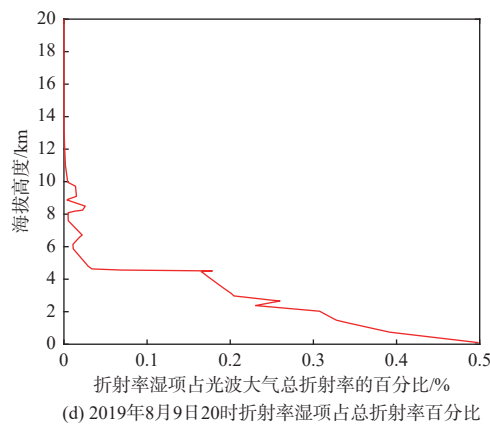


图3 典型折射率湿项剖面及不同高度处折射率湿项占光波大气总折射率的百分比

Fig. 3 Percentage of typical refractivity wet term profile and wet term at different heights in total refractivity of optical wave atmosphere

3.2 折射率湿项对测高精度的影响

基于当地历史探空剖面, 光波大气折射率选用式(1)得到的光波大气折射率剖面, 利用第2章所述射线描述法计算了大气折射引起的测高误差(即考虑折射率湿项影响的测高误差)。另外, 光波大气折射率只保留静力项剖面, 利用第2章所述射线描述法计算了该种情况下大气折射引起的测高误差(即忽略折射率湿项影响的测高误差)。图4给出了当目标高度为10 km, 视在仰角为1°时, 以上两种情况下测高误差的偏差^[14]。

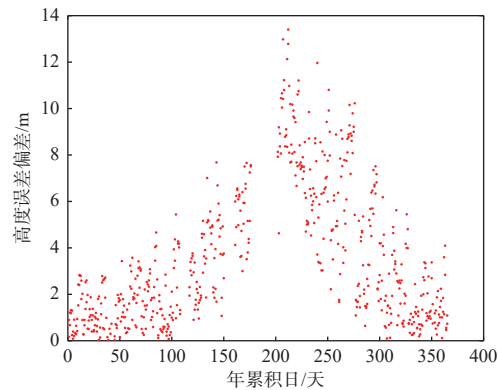


图4 折射率湿项对测高精度影响的年度分布

Fig. 4 Annual distribution of influence of refractivity wet term on height measurement precision

从图4可以看出, 折射率湿项引起的测高误差偏差夏季较大, 冬季较小, 春秋季居中, 其中夏季偏差最大值超过了10 m。

表3给出了当目标高度为10 km, 视在仰角为1°时测高误差偏差的最小值和最大值, 以及对应的

气象探空数据采集时刻。

表3 折射率湿项对测高误差偏差的极值

Table 3 Extreme values of refractivity wet term on height error deviation

	测高误差偏差最小值	测高误差偏差最大值
时刻(北京时间)	2019年2月14日20时	2019年7月31日20时
偏差/m	0.03	13.40

3.3 不同仰角折射率湿项对测高精度的影响

将利用光波大气总折射率计算的测高误差视为“真值”, 统计忽略折射率湿项计算的测高误差与“真值”的均方根误差:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (D_i - Z_i)^2} \quad (11)$$

式中: E_{RMS} 为统计均方根误差; m 为统计样本个数; D_i 表示忽略折射率湿项计算的测高误差; Z_i 表示考虑折射率湿项计算的测高误差。

假定被测飞行目标高度为30 km, 利用射线描述法计算了考虑折射率湿项影响和忽略折射率湿项影响两种情况下的测高误差。图5给出了1°~90°仰角时两种情况的测高误差偏差的统计均方根误差。

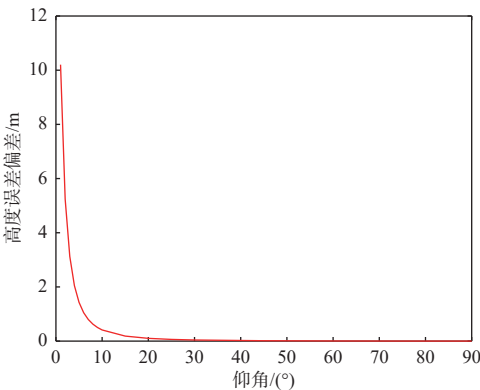


图5 30 km 高度时不同仰角测高误差的均方根误差

Fig. 5 RMSE of height measurement errors at different elevation angles at 30 km altitude

从图5可以看出, 忽略折射率湿项引起的高度误差偏差的均方根误差, 随着仰角的增大而减小。对于30 km高度处的目标, 在1°仰角时高度误差偏差的均方根误差为10.20 m, 在10°仰角时高度误差偏差的均方根误差为0.41 m, 在20°以上仰角时高度误差偏差的均方根误差降至0.10 m以下。

3.4 不同目标高度折射率湿项对测高精度的影响

同样采用式(9)的均方根误差统计方法, 假定

目标的视在仰角为 1° , 利用射线描迹法计算了考虑折射率湿项影响和忽略折射率湿项影响两种情况下的测高误差。图 6 给出了 60 km 以下高度两种情况的测高误差偏差的统计均方根误差。

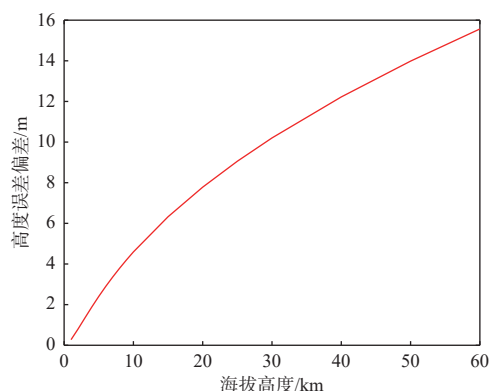


图 6 1° 仰角时不同高度的测高误差的均方根误差

Fig. 6 RMSE of height measurement errors at different heights at 1° elevation angle

从图 6 可以看出, 忽略折射率湿项引起的高度误差偏差, 随着目标高度的增加而增大。当视在仰角为 1° 时, 目标在 1 km 时高度误差偏差的均方根误差为 0.28 m, 目标在 10 km 时高度误差偏差的均方根误差为 4.59 m, 目标在 60 km 时高度误差偏差的均方根误差可达 15.57 m。

4 结论

以环渤海某地区为例, 基于 2019 年的实测气象探空数据, 计算了折射率湿项在光波大气总折射率中的占比, 并统计了不同仰角、不同目标高度情况下, 折射率湿项对靶场经纬仪测高精度的影响。从统计结果可以看出, 虽然折射率湿项在光波大气总折射率的占比很小, 几乎都在 0.5% 以下, 但对于测量仰角较低、目标高度较高的情况, 折射率湿项引起的测高误差统计偏差超过了 10 m, 这对某些测高精度要求在米级的工程来说是很严重的。

本文主要统计了目标仰角不低于 1° 时的测高误差偏差, 而在靶场外弹道测量中, 常遇到目标仰角比 1° 还小的情况。此时, 折射率湿项引起的测高误差的偏差将更大。究其原因, 主要是由于折射率湿项的垂直变化梯度较大, 影响了经纬仪的测角精度^[15], 从而引起了测高误差的偏差。

因此, 对于精度要求较高的光学测量工程而言, 折射率湿项的影响是不可忽略的。换言之, 折

射率湿项的影响是否可以忽略, 应根据测量精度需求而定。同时, 本文的统计分析结果也可为其他需要考虑光波大气折射效应影响的光学测量领域提供参考。

参考文献:

- [1] 周慧, 赵满庆. 靶场光学测量数据大气折射修正研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(9): 6-9.
ZHOU Hui, ZHAO Manqing. Study on correction of atmospheric refraction error of optical measurement data in navy range[J]. Computer Simulation, 2012, 29(9): 6-9.
- [2] 刘利生. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 100-105.
LIU Lisheng. Accuracy analysis and evaluation for exterior ballistic measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 100-105.
- [3] 黄捷. 电波大气折射误差修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 7-26.
HUANG Jie. Correction for atmospheric refractive error of radio wave[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 7-26.
- [4] 刘玉梅, 陈祥明, 赵振维, 等. 高精度折光修正系统射线描迹快速算法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(4): 749-753.
LIU Yumei, CHEN Xiangming, ZHAO Zhenwei, et al. High-precision fast ray-tracing algorithm used in optical wave refraction error correction system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(4): 749-753.
- [5] 陈佑淑, 蒋瑞宾. 气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1989: 26-36.
CHEN Youshu, JIANG Ruibin. Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1989: 26-36.
- [6] 李双刚, 聂劲松. 大气折射对光电探测定位的影响[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 170-173.
LI Shuanggang, NIE Jinsong. Influence of atmospheric refraction on photoelectric detection and positioning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 170-173.
- [7] ITU. Propagation data required for the design of earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz: Recommendation ITU-R P.1621[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2015.
- [8] 王艳丽, 孙克显, 金淑英, 等. 全波段多角度光学成像大气折光误差分析研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), (2022-10-18)[2023-11-02]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210080>.

- WANG Yanli, SUN Kexian, JIN Shuying, et al. Atmospheric refraction error analysis for visual and infrared multispectral sensor in multi-angle imaging[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, (2022-10-18)[2023-11-02]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210080>.
- [9] BARRELL H, SEARS J E. The refraction dispersion of air for the visible spectrum[M]. London: Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1939: 1-64.
- [10] RÜEGER J M. Electronic distance measurement: an introduction[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990: 54-55.
- [11] ITU. The radio refractive index: its formula and refractivity data: Recommendation ITU-R P.453-10[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [12] 陈祥明, 赵振维. 对流层折射修正中水汽压公式对比研究[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(6): 479-483.
- CHEN Xiangming, ZHAO Zhenwei. Comparison of water vapor pressure formulas used in tropospheric refraction correction[J]. Journal of Spacecraft TT& C Technology, 2013, 32(6): 479-483.
- [13] 王冠, 王惠林, 蹇琨, 等. 机载光电系统目标定位大气折射修正研究[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 641-647.
- WANG Guan, WANG Huilin, QIAN Kun, et al. Research on atmospheric refraction correction of airborne electro-optical system target location[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 641-647.
- [14] 王伟超, 甘世奇, 刘爽, 等. 拍星残差数据相关性分析的大气折光差修正[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 262-269.
- WANG Weichao, GAN Shiqi, LIU Shuang, et al. Correction of atmospheric refraction error based on correlation analysis of star measurement residual data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(4): 262-269.
- [15] 陈祥明, 刘玉梅, 赵振维, 等. 水汽对折光修正精度的影响分析[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(6): 501-505.
- CHEN Xiangming, LIU Yumei, ZHAO Zhenwei, et al. Analysis of the impact of water vapor on the accuracy of optical wave refraction correction[J]. Journal of Spacecraft TT& C Technology, 2014, 33(6): 501-505.