



一种光波大气折射率剖面模型构建方法

陈祥明, 林乐科, 李若瑜, 赵振维, 王晓宾

A method of modeling optical atmospheric refractivity profile

CHEN Xiangming, LIN Leke, LI Ruoyu, ZHAO Zhenwei, and WANG Xiaobin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

ERA-I数据在南海大气折射率环境中的应用评估

Evaluation on the application of atmospheric refractive index from ERA-I data over the South China Sea

电波科学学报. 2020, 35(6): 885–895

俯视电波折射修正及其在俯视雷达信号接收中的应用

Refraction correction for downlooking radio wave and its application in the signal reception for downlooking radars

电波科学学报. 2020, 35(6): 902–907

近地面1 km高度处折射率梯度与地面气象参数统计关系的研究

The statistical relationship between refractivity gradient in the lowest 1 km near the ground and ground meteorological parameters

电波科学学报. 2020, 35(6): 896–901

面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望

Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication

电波科学学报. 2021, 36(3): 323–339

低太赫兹频段ITU大气吸收模型伪线谱的修正研究

Correction of pseudo-line of ITU atmospheric absorption model in low terahertz band

电波科学学报. 2021, 36(4): 524–531

大气折射对我国近地面无线电视距的影响分析

Effects of the atmospheric refraction on radio line-of-sight distance near the ground in China

电波科学学报. 2018, 33(1): 14–20



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈祥明, 林乐科, 李若瑜, 等. 一种光波大气折射率剖面模型构建方法[J]. 电波科学学报, 2024, 39(1): 128-133. DOI: 10.12265/j.cjors.2023016
CHEN X M, LIN L K, LI R Y, et al. A method of modeling optical atmospheric refractivity profile[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(1): 128-133.
(in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023016

一种光波大气折射率剖面模型构建方法

陈祥明^{1*} 林乐科^{1,2} 李若瑜¹ 赵振维¹ 王晓宾^{1,2,3}

(1. 中国电波传播研究所, 青岛 266107; 2. 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107;
3. 云南昆明电磁波环境国家野外科学观测研究站, 曲靖 655500)

摘 要 根据经典光波折射率计算公式和 ITU-R 建议书中水汽密度经验公式, 给出了一种新的光波大气折射率计算公式; 借鉴 Hopfield 折射率静力项剖面模型和 ITU-R 建议书中水汽密度剖面模型, 给出了一种基于历史气象探空数据构建光波大气折射率剖面模型的方法。以青岛地区为例, 通过对 1986—1995 年历史气象探空数据的处理并结合参考标准大气, 建立了适合当地的光波大气折射率剖面模型; 统计剖面模型预测折射率剖面与实测折射率剖面的均方根误差, 结果表明: 构建的剖面模型具有较好的预测精度, 这对光学外测设备的折光修正数据处理具有很好的参考价值。

关键词 光波大气折射率; 大气静力学方程; Hopfield 模型; 折光修正; 参考标准大气

中图分类号 TN012

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)01-0128-06

DOI 10.12265/j.cjors.2023016

A method of modeling optical atmospheric refractivity profile

CHEN Xiangming^{1*} LIN Leke^{1,2} LI Ruoyu¹ ZHAO Zhenwei¹ WANG Xiaobin^{1,2,3}

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao 266107, China; 3. Yunnan Kunming Electromagnetic Environment National Observation and Research Station, Qujing 655500, China)

Abstract According to the typical formula of group optical atmospheric refractivity and the empirical formula of water vapor density in ITU-R recommendation, a new formula for calculating the optical atmospheric refractivity is given. Besides, by referring to the hydrostatic component of Hopfield refractivity model and the empirical model of water vapor density in ITU-R recommendation, a method of modeling optical atmospheric refractivity profile model is developed by using the historical radiosonde data. Take Qingdao area as an example, a local optical atmospheric refractivity profile model is established, and the key parameters in the model are derived from the local historical radiosonde data from 1986 to 1995 and the reference standard atmospheres. The comparison shows that the established model is more consistent with the radiosonde data than those calculated by the general Hopfield model. This method of modeling optical atmospheric refractivity profile will be beneficial to improve the accuracy of optical atmospheric refraction error correction in the data processing of trajectory measurement.

Keywords optical atmospheric refractivity; the equation for hydrostatic equilibrium; Hopfield model; optical atmospheric refraction error correction; reference standard atmosphere

0 引 言

地球周围大气不同于真空, 光波在其中传播时

发生大气折射效应, 引起光波传播时延和路径弯曲 (亦称蒙气差), 其是外弹道测量精度的一个重要误差源。对外弹道光学测量设备进行折光修正, 首先

收稿日期: 2023-02-08

资助项目: 张明高院士工作室基金(A332103Y12); 国家自然科学基金面上项目(61971385)

通信作者: 陈祥明 E-mail: chenxm@crirp.ac.cn

要获取传播链路上的大气折射率分布。工程中常用的调制光波大气折射率 N 的计算公式如下^[1-2]:

$$N = 80.343f(\lambda)\frac{P}{T} - 11.268\frac{e}{T} \quad (1)$$

式中: $f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$, λ 为光波的波长 (μm); P 为气压 (hPa); T 为开氏气温 (K); e 为水汽压 (hPa)。

在靶场外弹道事后数据处理中常利用气象探空采集的气象参数剖面, 根据式 (1) 换算得到光波大气折射率剖面^[3], 而完成一次气象探空需要 30 min 以上, 且不是所有地区都具备气象探空的条件。

在电波大气折射误差修正数据处理中, 对于无法获取实测探空剖面的情况, 常利用大气(折射率)剖面模型预测电波大气折射率剖面, 国内外学者在电波大气折射率剖面模型方面取得了诸多研究成果^[4], 而光波大气折射率剖面模型方面的研究成果相对较少。文献 [5-6] 提出先构建气压和气温剖面模型, 再换算得到光波大气折射率剖面的方法, 是一种间接对光波大气折射率建模的方法; 文献 [7] 建议用分段模型(也称三段模型)来预测光波大气折射率剖面, 其是一种直接对光波大气折射率建模的方法, 该模型根据大气折射率随高度的统计变化趋势构建, 是电波大气折射误差修正工程应用中一种常用的剖面模型^[4], 但缺乏物理基础。

根据经典光波大气折射率计算公式和 ITU-R 建议书中水汽密度经验公式^[8], 借鉴 Hopfield 折射率静力项剖面模型^[9]和 ITU-R 建议书中水汽密度剖面模型^[8], 给出一种光波大气折射率剖面模型构建方法。将电波大气折射率剖面模型方面的部分优秀研究成果引用到光波领域, 为仿真和评估光波大气折射效应的工程应用(如光学精密测量、光学测控与定位等)提供了技术参考, 尤其对不具备气象探空条件的情况。

1 光波大气折射率剖面模型

ITU-R P.835 建议书中给出水汽压 e 与水汽密度 $\rho_w(\text{g/m}^3)$ 的经验换算公式如下^[8]:

$$e = \frac{\rho_w T}{216.7} \quad (2)$$

记 $k = 80.343f(\lambda)$, 根据式 (1) 和 (2) 可以将调制光波大气折射率计算公式改写为

$$N = k\frac{P}{T} - 0.052\rho_w = N_h - N_w \quad (3)$$

式中: N_h 为折射率静力项; N_w 为折射率湿项。

1.1 光波大气折射率静力项剖面模型

根据大气静力学方程^[10]

$$dP = -\rho g dh \quad (4)$$

结合干空气的状态方程

$$P = \rho R_d T \quad (5)$$

得到大气折射率静力项^[9]表达式为

$$N_h = kR_d\rho \approx k\frac{P}{T} \quad (6)$$

式 (4)~(6) 中: ρ 为大气密度 (g/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); R_d 为干空气气体常数, $R_d = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

假定对流层中气温随高度近似线性变化, 即

$$T = T_s + \beta h \quad (7)$$

式中: T_s 为海平面处的开氏气温 (K); β 为气温随高度的变化梯度 (K/km)。

进一步, 可推导出 Hopfield 折射率静力项剖面模型为

$$N_h(h) = N_h^s \left(\frac{H_h - h}{H_h} \right)^\eta \quad (8)$$

式中: $N_h^s = kP_s/T_s$ 为海平面折射率静力项 (N 单位); $H_h = -T_s/\beta$ 为静力项等效高度 (km); 幂指数 $\eta = -1 - g/(R_d\beta)$ 。

取 $\beta = -6.81 \text{ K/km}$ 、 $g = 9.806 \text{ m/s}^2$, 则 $\eta = 4.02 \approx 4$, 并以地面海拔高度 h_0 为起始高度, 即得通用 Hopfield 折射率静力项剖面模型^[11]为

$$N_h(h) = \begin{cases} N_h^0 \left(\frac{H_h - h}{H_h - h_0} \right)^4 & h \leq H_h \\ 0 & h > H_h \end{cases} \quad (9)$$

式中: N_h^0 为地面折射率静力项 (N 单位); h_0 为地面海拔高度 (km); 静力项等效高度 $H_h = 40.136 + 0.14872t_0$ (km), t_0 为地面摄氏气温 ($^\circ\text{C}$)。

由式 (9) 可以看出, 通用 Hopfield 折射率静力项模型未考虑同温层(即 $\beta=0$)的情况。由式 (4)~(6) 可推导出该种情况下折射率静力项剖面模型^[12]为

$$N_h(h) = N_h^i \exp\left(-\frac{h - h_i}{H_i}\right) \quad (10)$$

式中: N_h^i 为同温层起始高度处的折射率静力项 (N 单位); h_i 为同温层起始高度 (km); $H_i = R_d T_i / g$ 为同温层特征高度 (km), T_i 为同温层气温 (K)。

综上, 根据气温随高度的变化梯度是否等于 0, 可得如下光波大气折射率静力项剖面模型:

$$N_h(h) = \begin{cases} N_h^i \left(\frac{H_h^i - h}{H_h^i - h_0^i} \right)^{\eta_i} & \beta_i \neq 0 \\ N_h^i \exp\left(-\frac{h - h_i^i}{H_i^i}\right) & \beta_i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: i 为高度分层第 i 层; h_0^i 和 h_i^i 为第 i 层起始高度 (km); N_h^i 和 N_h^i 为起始高度处的折射率静力项 (N 单

位); H_h^i 和 H_t^i 分别为第 i 层静力项等效高度和同温层特征高度 (km); η_i 为各非同温层剖面模型中的幂指数; β_i 为第 i 层气温随高度变化梯度 (K/km)。

1.2 光波大气折射率湿项剖面模型

ITU-R P.835 建议书给出水汽密度 ρ_w 随高度变化的统计模型如下^[8]:

$$\rho_w(h) = \rho_w^0 \exp[c(h - h_0)] \quad (12)$$

式中: ρ_w^0 为地面水汽密度 (g/m^3); c 为水汽密度随高度的指数衰减系数 ($1/\text{km}$)。

结合式 (3), 得到如下光波大气折射率湿项剖面模型:

$$N_w = \begin{cases} 0.052 \rho_w^0 \exp[c(h - h_0)] & h \leq h_t \\ 0 & h \geq h_t \end{cases} \quad (13)$$

式中: h_t 为对流层顶高度 (km)。

2 剖面模型参数获取方法

由式 (11) 和 (13) 可以看出光波大气折射率剖面模型的关键参数有: 不同高度分层及其对应的气温随高度变化梯度和水汽密度指数衰减系数。

地面至 60 km 之间高度区域大气层中气温、气压和大气密度的大致变化趋势如图 1 所示^[8]。

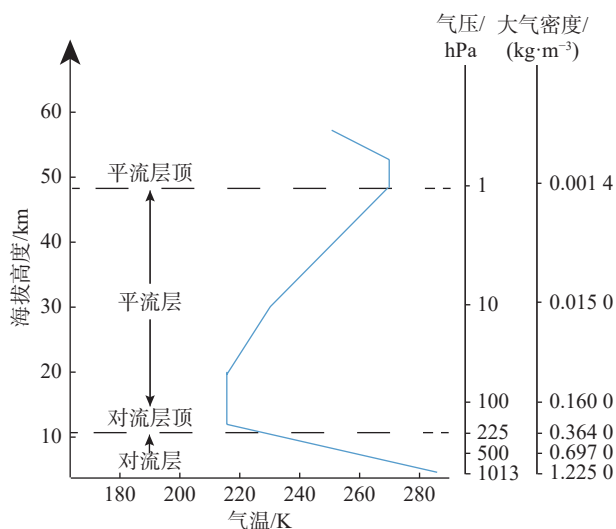


图1 气温、气压和大气密度参考剖面

Fig. 1 Reference profile of temperature, pressure and air density

2.1 最大探空高度以下剖面模型参数

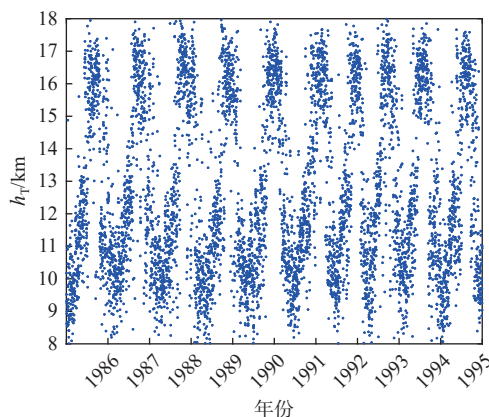
常规的气象探空的最大探测高度一般在 30 km 左右, 最大探空高度以下剖面模型参数可以从气象探空数据中提取。

利用青岛地区 1986—1995 年的历史特性层^[13]气象探空数据, 提取各气象探空剖面的对流层顶高度 h_t 、对流层气温随高度变化梯度 (记为 β_t)、逆温

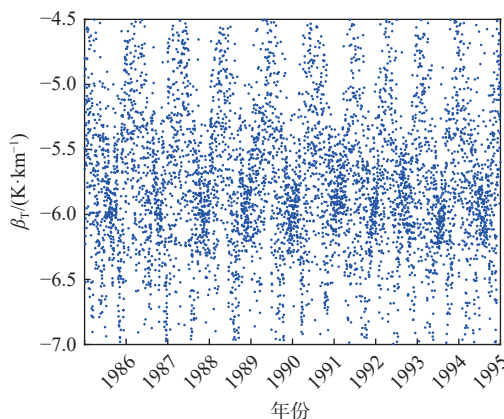
层气温随高度变化梯度 (记为 β_i) 和水汽密度指数衰减系数 c , 这些剖面模型参数随时间的变化情况如图 2 所示。

从图 2 可以看出各剖面模型参数具有较强的年度周期变化规律, 可用形如式 (14) 的逐日变化统计模型表征^[14]:

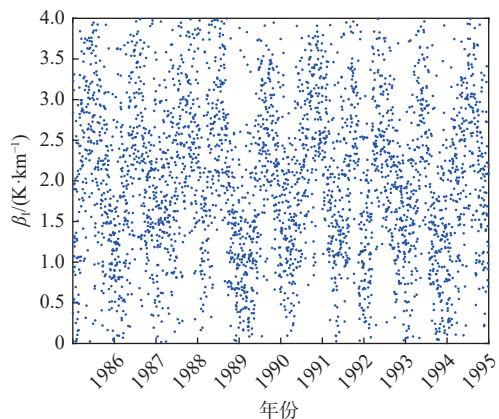
$$\xi(\text{DoY}) = \xi_0 + \Delta\xi \cos\left(2\pi \frac{\text{DoY} - \text{DoY}_0}{365.25}\right) \quad (14)$$



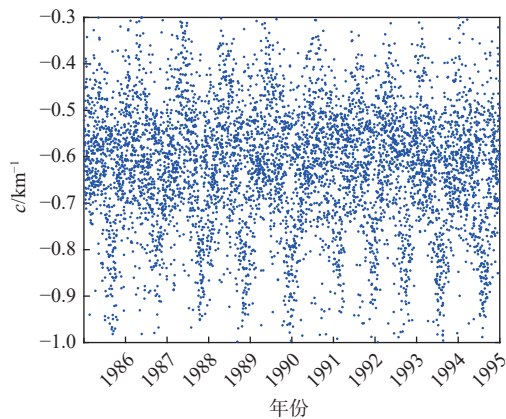
(a) 对流层顶高度
(a) Tropopause heights



(b) 对流层气温随高度变化梯度
(b) Tropospheric temperature lapse rates



(c) 逆温层气温随高度变化梯度
(c) Inversion layer's temperature lapse rates



(d) 水汽密度指数衰减系数
(d) Water vapor density exponential decrease rates

图 2 青岛地区各气象剖面参数随时间的变化
Fig. 2 Meteorological parameters vs. time in Qingdao

式中: ξ 为剖面模型参数 (h_T 、 β_T 、 β_l 和 c); ξ_0 为剖面模型参数均值; $\Delta\xi$ 为剖面模型参数变化幅度; DoY 为年积日; DoY₀ 为剖面模型参数最小值对应的年积日。

表 1 给出的是 1986—1995 年青岛地区各剖面模型参数的统计系数, 取 DoY₀=10。

表 1 1986—1995 年青岛地区各剖面模型参数的统计系数
Tab. 1 Coefficients of profile model parameters in Qingdao (1986—1995)

模型参数	ξ_0	$\Delta\xi$
h_T/km	12.681	-2.806
$\beta_T/(\text{K}\cdot\text{km}^{-1})$	-5.650	0.425
$\beta_l/(\text{K}\cdot\text{km}^{-1})$	2.095	-0.853
c/km^{-1}	-0.619	0.058

2.2 最大探空高度以上剖面模型参数

统计表明^[4]: 30 km 高度以上空域常年比较稳定。参考标准大气中给出的参考值^[8]见表 2。

表 2 30 km 以上气温随高度变化梯度参考值
Tab. 2 Reference temperature lapse rates above 30 km

高度层/km	气温随高度变化梯度/(K·km ⁻¹)
32~47	2.8
47~51	0
51~71	-2.8

利用中国电波传播研究所激光雷达 2008—2009 年在青岛地区采集的中层大气观测数据, 统计得到了青岛地区中层大气平均温度与参考标准大气的对比曲线^[15], 如图 3 所示。

从图 3 可以看出 30 km 以上高度的平均气温随高度的变化曲线与参考标准大气的曲线基本平行, 说明该高度层中气温随高度的变化梯度与参考标准大气相当。由此, 对于 30 km 以上高度区域, 剖面模

型参数可以采用参考标准大气的参考值。

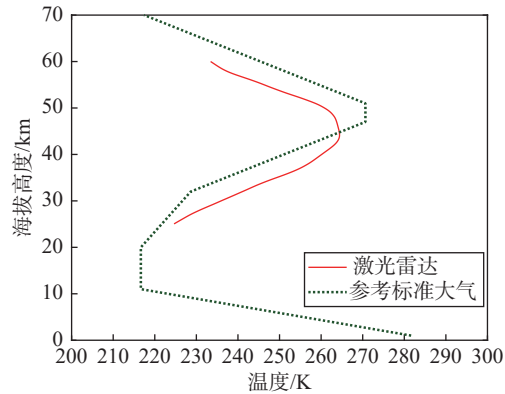


图 3 青岛地区中层大气平均温度变化趋势 (2008—2009 年)
Fig. 3 Average temperature variation trend of middle atmosphere in Qingdao(2008—2009)

3 结果与分析

取 $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$, 将利用实测探空数据换算的折射率剖面视为真实剖面。将折射率静力项采用式 (9) 通用 Hopfield 静力项剖面模型、折射率湿项采用式 (13) 剖面模型的预测剖面模型, 简称为通用 Hopfield 模型; 折射率静力项采用式 (11) 剖面模型、折射率湿项采用式 (13) 剖面模型的预测剖面模型, 简称为本文模型, 分别统计两种模型预测剖面与真实剖面的均方根误差 (root mean square error, RMSE):

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{M}}^i - P_{\text{R}}^i)^2} \quad (15)$$

式中: E_{RMS} 为统计 RMSE (N 单位); n 为实测探空高度点的数目; P_{M}^i 和 P_{R}^i 分别为模型预测剖面 and 实测探空剖面。

青岛地区不同月份两种模型预测剖面与实测探空剖面的 RMSE 统计结果如图 4 所示。

取 500 m 为一个高度步长, 统计了地面至 35 km 高度范围内两种模型预测剖面与实测探空剖面的 RMSE 结果, 如图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出:

- 1) 两种剖面模型在夏季的预测精度优于其他季节;
- 2) 通用 Hopfield 模型假定 H_0 高度以下气温均线性递减, 导致在对流层顶高度以上, 随着高度的增加, 预测精度有所降低;
- 3) 本文模型在对流层顶高度以下利用了当地的剖面模型参数模型, 在对流层顶高度以上根据气温随高度变化特征进一步分层建模, 使得本文模型具有更高的预测精度。

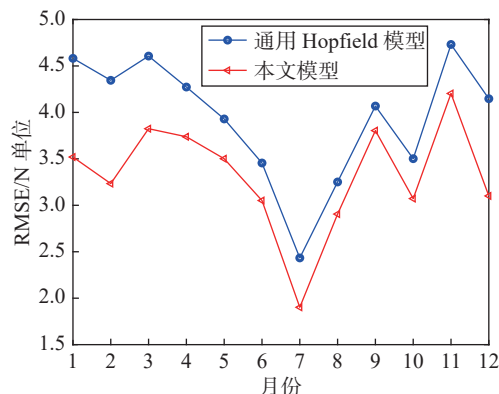


图 4 青岛地区不同月份两种模型预测剖面 and 实测剖面的统计 RMSE (1986—1995 年)

Fig. 4 RMSE of predicted and measured profile comparison by 2 models in different months in Qingdao(1986—1995)

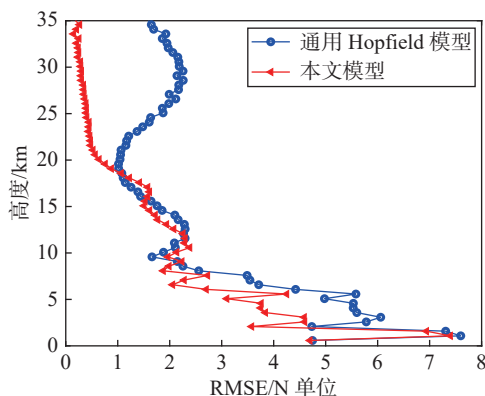


图 5 青岛地区不同高度两种模型预测剖面 and 实测剖面的统计 RMSE (1986—1995 年)

Fig. 5 RMSE of predicted and measured profile comparison by 2 models at different heights in Qingdao(1986—1995)

4 结 论

根据经典光波折射率计算公式和 ITU-R 建议书中水汽密度经验公式,给出了一种新的光波大气折射率计算公式形式;同时,借鉴 Hopfield 折射率静力项剖面模型和 ITU-R 建议书中水汽密度剖面模型,给出了一种基于历史气象探空数据构建光波大气折射率剖面模型的方法,构建的模型是一种有一定物理基础的半理论模型。以青岛地区为例,利用历史气象探空数据并结合参考标准大气,构建了适合当地的光波大气折射率剖面模型,通过统计模型预测剖面与实测探空剖面的 RMSE,验证了建模方法的可行性和有效性需要说明的是:

1) 青岛地区的剖面模型参数是基于 1986—1995 年特性层的历史气象探空数据获得的,数据源不同,得到的各模型参数会有所不同;

2) 在实际工程应用中,如果没有当地的历史气象探空数据,可以利用附近气象观测站点的探空数

据进行建模;

3) 如果既没有当地或附近站点的历史气象探空数据,又未知当地的各模型参数的参考值,可以考虑用参考标准大气中的模型参数参考值建模或利用通用 Hopfield 模型预测光波大气折射率剖面。

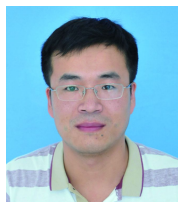
参考文献

- [1] MARINI J W, MURRAY C W. Maryland: NASA Technological report. X-591-73-351[R], 1973.
- [2] GARDNER C S, ROWLETT J R. Atmospheric refraction errors in laser ranging systems[R]. Maryland: NASA, Goddard Space Flight Center Greenbelt, 1976.
- [3] 刘利生, 吴斌, 吴正容, 等. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [4] 黄捷, 张仁芳, 胡大璋. 电波大气折射误差修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] 李双刚, 聂劲松. 大气折射对光电探测定位的影响. 红外与激光工程, 2008, 37(Sup.): 170-173.
LI S G, NIE J S. Effect of atmospheric refraction to electro-optical reconnaissance and orientation[J]. Infrared and laser engineering, 2008, 37(Sup.): 170-173. (in Chinese)
- [6] 杨玉峰, 宋宁宁, 韩香. 基于NCEP数据库的星光大气折射修正模型研究[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 1801002.
YANG Y F, SONG N N, HAN X. Research on starlight atmospheric refraction correction model based on NCEP database[J]. Acta optica sinica, 2023, 43(18): 1801002. (in Chinese)
- [7] 中国人民解放军总装备部. GJB 2234A-2014 光电经纬仪事后数据处理方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2015.
- [8] Recommendation ITU-R P. 835-6 Reference standard atmospheres[S]. Geneva: ITU, 2017.
- [9] HOPFIELD H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data[J]. Journal of geophysical research, 1969, 74: 4487-4499.
- [10] HALTINER G, MARTIN F L. Dynamical and physical meteorology[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1957.
- [11] HOPFIELD H S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range Prediction from surface weather data[J]. Radio science, 1971, 6(3): 357-367.
- [12] SAASTAMOINEN J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites[J]. The use of artificial satellites for geodesy, geophysical monograph series, 1972, 15: 247-251.
- [13] 顾钧禧. 大气科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [14] Recommendation ITU-R P. 834-9 Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation[S]. Geneva: ITU, 2017.

- [15] 王晓宾,孙树计,陈春,等. 青岛上空中层大气密度和温度的激光雷达探测[J]. *空间科学学报*, 2011, 31(6): 778-783.

WANG X B, SUN S J, CHEN C, et al. Lidar observations of middle atmospheric density and temperature over Qingdao[J]. *Chinese journal of space science*, 2011, 31(6): 778-783. (in Chinese)

作者简介



陈祥明 (1983—), 男, 山东人, 中国电波传播研究所高级工程师, 硕士, 主要从事电波传播理论研究及应用方面的工作。
E-mail: chenxm@crip.ac.cn



林乐科 (1972—), 男, 山东人, 中国电波传播研究所研究员, 博士, 研究方向为电波环境与传播特性。E-mail: llk22s@163.com

李若瑜 (1999—), 女, 甘肃人, 中国电波传播研究所在读硕士研究生, 研究方向为中性大气对无线电波传播的影响。E-mail: 1281243114@qq.com



赵振维 (1965—), 男, 河北人, 中国电波传播研究所研究员, 博士, 中国电子科技集团公司首席科学家, 享受国务院政府特殊津贴, 现为中国电子学会高级会员、中国宇航学会飞行器测控委员会委员, 长期从事电波环境及其传播特性方面的工作。
E-mail: zhaozw22s@163.com

王晓宾 (1981—), 男, 河南人, 中国电波传播研究所高级工程师, 硕士, 主要从事空间大气环境的探测及研究。E-mail: wangxb@crip.ac.cn