

激光与光电子学进展

对流层大气折射率剖面模型研究

杨明珊, 周慧妍, 刘璐, 杜晓燕*

郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 基于中国地区 11 个 IGS 观测站的对流层天顶延迟和气象环境等实测数据, 分析了国内外常用的三种对流层折射率剖面模型的预测精度, 重点研究了三种模型在高海拔地区的适用性和随季节变化的适用性。结果表明: 在高海拔地区, 指数模型和分段模型精度较高, Hopfield 模型在除高海拔外的地区, 表现出更大的优势; 总体来看, 分段模型和 Hopfield 模型的精度在春、冬季较高, 夏、秋季较差, 指数模型精度与季节关系不大。该结论对于对流层折射误差修正模型的应用研究具有重要参考价值。

关键词 大气光学; 折射率剖面模型; 天顶延迟; 射线描述法; 折射误差修正; 高海拔地区

中图分类号 TN011.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0701001

Study on Tropospheric Atmosphere Refractive Index Profile Model

Yang Mingshan, Zhou Huiyan, Liu Lu, Du Xiaoyan*

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract Herein, the prediction accuracy of three tropospheric refractive index profile models commonly used at home and abroad was analyzed using the measured data of the tropospheric zenith delay and meteorological environment obtained from 11 international global positioning system service stations in China. Moreover, the applicability of the models was evaluated in high altitude areas and with seasonal changes. Results show that the exponential and segmented models achieve a higher accuracy at high altitude areas, while the Hopfield model shows greater advantages in areas other than high altitudes. Generally, the accuracy of the segmented and Hopfield models is higher in spring and winter and lower in summer and autumn. The accuracy of the exponential model shows a negligible relation with the season. The findings of this study have important reference values for the application research of the tropospheric refraction error correction model.

Key words atmospheric optics; refractive index profile model; zenith delay; ray tracing method; refraction error correction; high altitude area

1 引言

无线电波在对流层大气中传播时受到不均匀介质的影响而产生折射, 使得雷达对高空目标的定位和测距都产生较大误差^[1-2], 因此对折射误差进行修正是很有必要的。对折射误差进行修正的重要途径之一就是提高大气折射率的预估精度。

目前常用的大气折射率预测模型主要是分段模型、Hopfield 模型和指数模型。1969 年 Hopfield^[3]首次提出 Hopfield 模型, 吴必军等^[4]对 Hopfield 模型进行了改良, 使其精度提高; 张瑜等^[5]对 Hopfield 模型在中国部分站点进行了精度分析。1978 年濮祖荫^[6]推导出了折射率指数模型的计算方法, 1993 年, 制定了指数模型、分段模型

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-08-26

通信作者: *15713830138@163.com

的标准形式^[7]。近年来,为满足日益增长的应用需求,折射率模型研究多集中于模型优化、修正等方面^[8-14]。而关于三种折射率模型在中国高海拔地区适用性和随季节变化适应性的研究则严重滞后,限制了折射率模型的应用进程。本文对三种折射率模型在中国不同海拔的 11 个观测站的适用性及季节变化进行了分析。

2 大气折射率模型

无线电波在真空中的传播速度与无线电波在介质中的传播速度的比值记为 n , n 为大气无线电折射指数^[15], 计算公式为

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

式中: N 为无线电折射率, 它是关于大气压强、温度、水汽压的函数。可以表示为

$$N = 77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \cdot \frac{e}{T^2}, \quad (2)$$

式中: P 是大气压强, 单位为 hPa; T 是空气热力学温度, 单位为 K; e 是水汽分压强, 单位为 hPa。

对于大气折射率的研究, 可以建立折射率剖面模型, 常用的大气折射率剖面模型有指数模型、分段模型和 Hopfield 模型。

2.1 指数模型

指数模型^[16]是地面海拔高度 60 km 范围内整个低层大气的简化平均模式, 海拔高度 h 处的折射率为

$$N(h) = N_s \exp[-C_e(h - h_s)], \quad (3)$$

式中: N_s 为地面无线电折射率; C_e 为指数衰减率, 中国地区的指数衰减率平均值为 0.1404 km^{-1} ; h_s 为地面海拔高度, 单位为 km。指数模型适用于整个对流层, 并可延伸到平流层直至电离层底部。

2.2 分段模型

分段模型将对流层按高度分为三段, 能更精确地描述整个折射率剖面。它的具体形式为

$$N(h) = \begin{cases} N_0 - \Delta N_1(h - h_s), & h_s \leq h \leq h_s + 1 \\ N_1 \exp[-c_1(h - h_s - 1)], & h_s + 1 < h \leq 9, \\ N_9 \exp[-c_9(h - 9)], & 9 < h < 60 \end{cases} \quad (4)$$

式中: c_1 为地面上空 1 km 至海拔 9 km 的指数衰减率, 单位为 km^{-1} ; 中国地区全年的 c_1 值变化较小, 为减少计算量, 拟采用全国的年平均值, 为 0.1285 km^{-1} ; c_9 为海拔 9~60 km 的指数衰减率, 其年均值为 0.1432 km^{-1} 。

2.3 Hopfield 模型

Hopfield 提出了基于对流层温度随高度在一定梯度上衰减的双四次折射率模型, 并从大气静力学方程推导出理论模型, 用来描述整个中性大气的折射率分布, 该模型可表示为

$$\begin{cases} N(h) = N_d(h) + N_w(h) \\ N_i(h) = N_{i0} \left(\frac{H_i - h}{H_i - h_0} \right)^4, & i = d, w, h \leq H_i, \\ N_i = 0, & i = d, w, h > H_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: 下标 d, w 分别表示干、湿分量; H_d 和 H_w 分别是使折射率干、湿分量衰减到零的等效高度, H_d 取值为 $40.136 + 0.14872t \text{ km}$ (t 为温度, $^\circ\text{C}$), H_w 取值为 11 km。

3 电波传播理论方法

目前, 基于大气折射率分布研究电波传播特性的理论计算方法主要有: 射线描述法和抛物方程法。

3.1 射线描述法

射线描述法是目前计算大气折射误差精度较高的一种方法^[17]。其简化示意图如图 1 所示。在图 1 中, 点 O 为地心, 点 A 为雷达测站, 点 B 为待测目标; θ_0 表示视在仰角, θ_B 表示目标真实仰角, θ 表示射线上高度 h 处的本地仰角; $a = 6370 \text{ km}$ 为地球半径; R 为观测站到目标的真实距离; R_g 为观测站到目标的空间射线轨迹; n_A, h_A 分别表示测站 A 处的大气无线电折射指数和海拔高度, 相应的 n_B, h_B 则分别表示目标 B 处的大气无线电折射指数和海拔高度; ϕ_B 表示观测站与目标位置间的地心张角。

对流层距离误差为

$$\Delta R = R_a - R = \int_{h_A}^{h_B} \frac{n^2(a+h)}{\sqrt{n^2(a+h) - n_A^2(a+h_A)^2 \cos^2 \theta_0}} dh - \sqrt{(a+h_A)^2 + (a+h_B)^2 - 2(a+h_A)(a+h_B) \cos \phi_B}, \quad (6)$$

$$R_a = \int_{h_A}^{h_B} n \csc \theta dh, \quad (7)$$

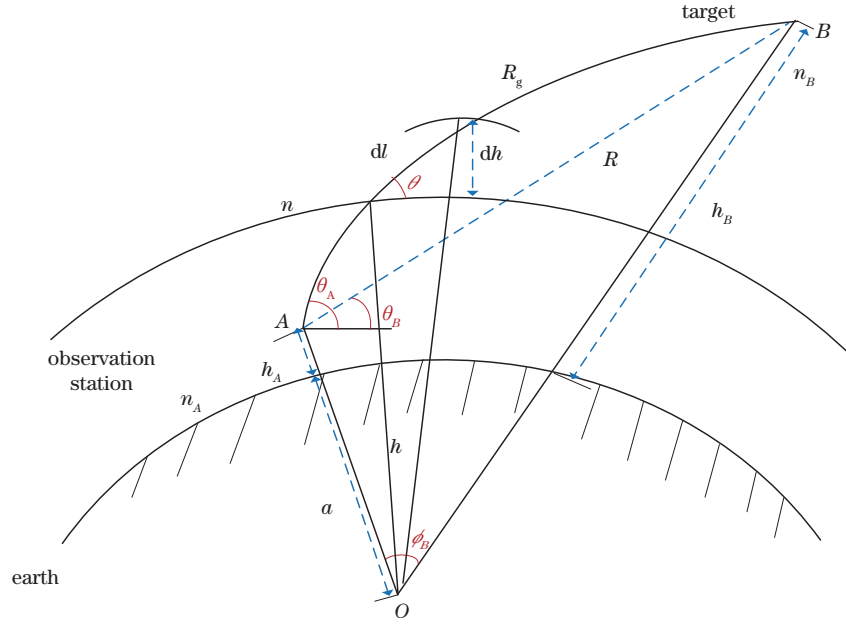


图 1 射线描述法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ray tracing method

$$\phi_B = A_0 \int_{h_A}^{h_B} \frac{dh}{(a+h) \sqrt{n^2(a+h)^2 - A_0^2}}, \quad (8)$$

$$A_0 = (a + h_A) n_A \cos \theta_{0o}. \quad (9)$$

3.2 抛物方程法

抛物方程根据电波传播的波动方程近似导出, 抛物方程法则是利用抛物方程求解空间传播场的前向全波分析法。

抛物方程法只考虑电波的前向传播特性, 忽略后向传播, 抛物方程的一般形式为

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -ik(1 - Q)u, \quad (10)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n'^2}, \quad (11)$$

式中: \$k\$ 为电波波数; \$x\$ 为水平传播距离, 单位为 m; \$u\$ 为电场或磁场的标量函数; \$n'\$ 为考虑地球曲率后的大气无线电折射指数, 满足近似关系 \$n'^2 \approx n^2 + \frac{2z}{a}\$,

\$n' \approx n + \frac{z}{a}\$; \$z\$ 为海拔高度, 单位为 m; \$Q\$ 为伪微分算子, 在实际应用中, 根据实际需要, 对伪微分算子 \$Q\$ 进行不同方式的近似, 再求解即可。

抛物方程法多用于计算任意不规则地形和非均匀大气折射率环境下的电波传播问题, 计算过程繁琐; 而标准大气环境下电波传播的求解问题, 不需要求出整个面的所有参数, 只需要知道传播轨迹, 为了更简单高效的计算, 采用射线描述法更为

合适。所以本文研究过程中采用射线描述法开展折射率剖面模型特性的探讨。

4 实验验证

4.1 实验数据

研究过程中应用的 IGS (International GPS Service) 观测站信息和天顶延迟 (ZD) 数据可分别从网站 <http://www.igs.org/network> 和 https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GNSS 下载^[18]。该网站提供的数据包含 2002~2021 年每天 4 个时刻的 ZD 数据, 每个时刻的数据中包含 3 个气象数据。本文以 11 个站点 (其信息详见表 1) 为例, 选取了 2017 年每天 1 个时刻 (UTC0:00) 的数据, 由此可获得共计 \$365 \times 1 \times 11 = 4015\$ 个时刻的对流层大气折射率剖面。

4.2 实验步骤

步骤 1: 将 3.1 节从网站下载的气压、温度、水汽压等数据分别代入 (3)~(5) 式, 得到各站点沿高度变化的大气无线电折射指数 \$n\$。

步骤 2: 将步骤 1 计算所得大气无线电折射指数 \$n\$ 代入 (6)~(9) 式, 得到各个折射率剖面模型相应的天顶延迟。

步骤 3: 将步骤 2 计算所得天顶延迟与 IGS 网站下载的实测 ZD 数据进行对比, 并对各观测站天顶延迟的偏差值和均方根 (RMS) 值做统计分析。

表 1 观测站信息
Table 1 Observation station information

Serial number	Observation station	Latitude / (°)	Longitude / (°)	Orthometric height / m	Location
1	LHAZ	29.66	91.10	3622	Lasa
2	GUAO	43.47	87.17	2049.2	Urumqi
3	KUNM	25.03	102.80	2019.1	Kunming
4	URUM	43.59	87.63	917.9	Urumqi
5	XIAN	34.37	109.22	498.5	Xi'an
6	CHAN	43.79	125.44	253.7	Changchun
7	TWTF	24.95	121.16	184.0	Taoyuan
8	BJFS	39.61	115.89	98.3	Beijing
9	TCMS	24.80	120.99	77.3	Xinzhu
10	WUHN	30.53	114.36	42.6	Wuhan
11	SHAO	31.10	121.20	22.1	Shanghai

4.3 实验结果与分析

按照 4.2 节的实验步骤对表 1 中 11 个观测站进行误差计算, 计算结果见表 2 和表 3。

偏差值可以反映计算值对实测值的离散程度, RMS 值可以用来评判模型的可靠性。由表 2 和表 3 得出: 三个模型中 Hopfield 模型显示出更大的优势, 分段模型误差最大, 指数模型处于两者之间。但是 Hopfield 模型在高海拔地区 (大于 1000 m), 比如 LHAZ、GUAO、KUNM 站点, 优势并不明显, 可靠

性比不上指数模型和分段模型; 指数模型的精度与观测站海拔关系不是很大, 随海拔变化未呈现出明显规律。

为进一步分析各模型的差异, 给出 LHAZ 站、KUNM 站、BJFS 站和 WUHN 站全年 ZD 分布图, 如图 2 所示。

由图 2 可知: 1) ZD 的值随着季节的变化而变化。ZD 值夏、秋季较大, 春、冬季较小。2) 高海拔情况下, 如 LHAZ、KUNM 站, Hopfield 模型偏离实

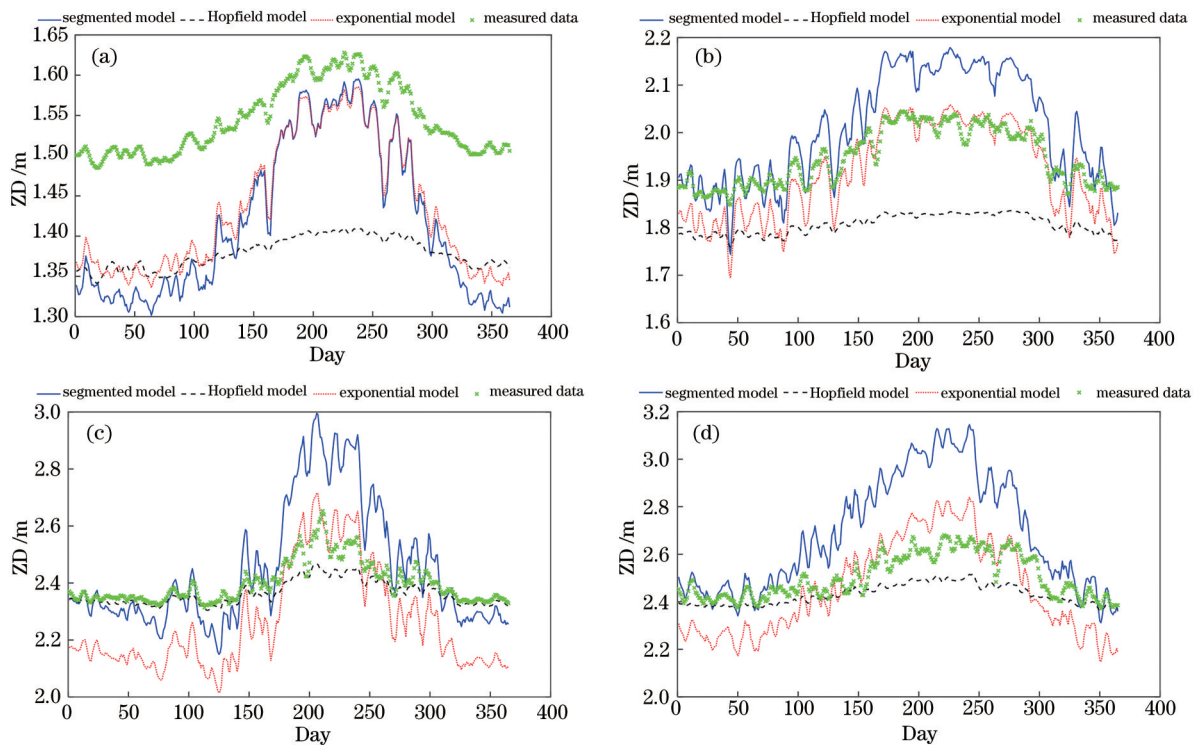


图 2 四个观测站全年 ZD 分布图。(a) LHAZ; (b) KUNM; (c) BJFS; (d) WUHN

Fig. 2 Annual ZD distribution of four observation stations. (a) LHAZ; (b) KUNM; (c) BJFS; (d) WUHN

表 2 11 个观测站的偏差值
Table 2 Bias values of 11 observation stations

Station	Model		
	Segmented model	Hopfield model	Exponential model
LHAZ	11.318	16.612	9.846
GUAO	7.427	10.448	12.684
KUNM	-6.759	13.688	2.657
URUM	7.857	6.901	19.268
XIAN	-6.213	7.713	11.017
CHAN	-5.502	2.222	9.390
TWTF	-22.527	7.868	0.553
BJFS	-6.603	1.978	12.185
TCMS	-26.309	7.096	-1.905
WUHN	-14.573	7.502	7.718
SHAO	-20.675	4.316	5.420

表 3 11 个观测站的均方根值
Table 3 RMS values of 11 observation stations

Station	Model		
	Segmented model	Hopfield model	Exponential model
LHAZ	12.528	16.783	10.624
GUAO	8.993	10.499	13.280
KUNM	8.664	14.482	4.706
URUM	9.540	7.042	19.703
XIAN	13.010	9.362	14.417
CHAN	14.993	3.163	13.363
TWTF	24.658	9.917	7.483
BJFS	19.220	2.661	18.493
TCMS	27.823	9.614	6.779
WUHN	19.140	10.121	11.392
SHAO	25.222	7.609	10.640

测数据较为严重,尤其在 LHAZ 站,全年误差均比较大。指数模型在这些站点误差较小,在实际应用中可优先选用此模型。3)分段模型和 Hopfield 模型在 LHAZ 站以外的站点,均表现出春、冬季精度较高,夏、秋季精度较差的规律;指数模型精度随季节变化无明显规律。

5 结 论

本文详细分析了三种折射率模型的差异,并指出了 Hopfield 模型在应用中的缺陷。由于 Hopfield 模型主要是依据欧洲地区对流层气象数据统计得出的,而在中国高原地区,气候比较复杂,温度的衰减率并不是按照正常规律变化,因此在应用过程中

出现较大误差。分段模型和指数模型的指数衰减率是根据中国地区的平均气象数据统计得出的,所以在高原区的表现优于 Hopfield 模型。在实际应用中,应根据当地的地理环境选择合适的折射率模型,减小折射误差,提高定位精度;计算高原地区的折射率剖面时,应优先选用指数模型,非高原地区优先选用 Hopfield 模型。尽管三种模型随季节和站点海拔变化精度产生差异,但是均可以满足折射误差修正的基本要求,为折射误差修正模型的选择提供一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Cheng Y, Wang X Y, Sheng W D, et al. Atmospheric refractivity estimation method based on stellar light deflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0701001.
程煜, 王雪莹, 盛卫东, 等. 一种基于恒星光线偏折的大气折射率估计方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0701001.
- [2] Wang W J, Wang M J. Effect of point-array coherent sound source on scintillation index of light wave in atmospheric turbulence transmission[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0101001.
王文静, 王明军. 点阵列声源激发大气湍流特性对光波传输闪烁指数特性的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 0101001.
- [3] Hopfield H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1969, 74(18): 4487-4499.
- [4] Wu B J, Chen H B. Characteristics and correction model of neutral atmospheric zenith delay over the Tibetan Plateau[C]//*Proceedings of the 10th Academic Conference of Space Exploration Committee of the Chinese Society for Space Science*. Beijing: Chinese Society of Space Research, 1997: 98-111.
吴必军, 陈洪滨. 青藏高原中性大气天顶延迟特征及其修正模式[C]//*中国空间科学学会空间探测专业委员会第十次学术会议论文集*. 北京: 中国空间科学学会, 1997: 98-111.
- [5] Zhang Y, Wei S C. Accuracy analysis of Hopfield troposphere model[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, 2005, 33(4): 46-49.
张瑜, 魏山城. Hopfield 大气模型的精度分析[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 46-49.
- [6] Pu Z Y. The effects of atmospheric refraction on propagation of L. F. sky-wave[J]. *Acta Scientiarum*

- Naturalum Universitatis Pekinesis, 1978, 14(2): 41-56.
濮祖荫. 低频天波大气折射效应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1978, 14(2): 41-56.
- [7] National Defense Science, Technology and Industry Committee. Tropospheric radio wave modified atmospheric model: GJB/Z 1655—1993[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department, Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1993.
国防科学技术工业委员会. 对流层电波修正大气模式: GJB/Z 1655—1993[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1993.
- [8] Si W T, Wang W C, Yuan G F, et al. Atmospheric refraction correction method based on angular intersection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130102.
司文涛, 王伟超, 袁光福, 等. 基于测角交汇的大气折射修正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130102.
- [9] Xu Y, Ma H Q, Li X. Analysis on angle/distance measurement error of medium/short range radar caused by atmospheric refraction[J]. Fire Control Radar Technology, 2018, 47(3): 10-12.
徐艳, 马汉清, 李鑫. 大气折射引起的中近程雷达测角测距误差分析[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(3): 10-12.
- [10] Zhou C C, Zhong S M, Li W, et al. A new inversion method of atmospheric refractivity index based on GNSS and radiosonde data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(2): 200-204.
周冲冲, 钟世明, 李薇, 等. 基于 GNSS 及探空仪数据的大气折射指数反演新方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(2): 200-204.
- [11] Zhang S Q, Guo F C, Zhang M, et al. Analysis and correction of the influence of atmospheric refraction on three dimensional TDOA localization error[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019, 35(4): 30-34.
张书强, 郭福成, 张敏, 等. 大气折射对 TDOA 三维定位误差影响分析及修正方法[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(4): 30-34.
- [12] Zuo W W. Research on tropospheric refractive index profile detection by single base station GNSS[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 7-9.
- 左文炜. 单基站 GNSS 探测对流层折射率剖面技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 7-9.
- [13] Lou G G, Li Y, Pu G Q. Research on atmospheric refraction correction technology of radar measurements based on satellite navigation system[C]//12th National Conference on Signal and Intelligent Information Processing and Application. Beijing: China High-tech Industrialization Association, 2018: 103-108.
娄广国, 李杨, 蒲国强. 基于卫星导航系统的雷达测量数据大气折射修正技术研究[C]//第十二届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集. 北京: 中国高科技产业化研究会, 2018: 103-108.
- [14] Zhang S Q, Zhang M, Guo F C, et al. Influence analysis of atmospheric refraction on TDOA and FDOA dual-station location error of air-to-ground and its correction[C]//2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), July 19-21, 2019, Wuxi, China. New York: IEEE Press, 2019: 756-760.
- [15] ITU-R. The radio refractive index: its formula and refractivity data[EB/OL]. (2015-07-01)[2021-05-08]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P-453-11-201507-S!!PDF-E.pdf.
- [16] National Defense Science, Technology and Industry Committee. Radar wave propagation refraction and attenuation manual: GJB/Z 87—1997[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1997.
国防科学技术工业委员会. 雷达电波传播折射与衰减手册: GJB/Z 87—1997[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997.
- [17] Li S. Research on high precision strategy of radar wave refraction correction[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2019: 21-39.
李爽. 雷达电波折射修正的高精度策略研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2019: 21-39.
- [18] Tang T, Liu G, Liu L. Numerical modeling the propagation path of radio waves with atmospheric refractivity[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(4): 1651-1655.