

基于射线描迹法微分形式的大气折射误差修正方法研究

卫佩佩^{*①} 杜晓燕^② 江长荫^③

^①(解放军信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

^②(郑州大学 郑州 450002)

^③(中国电波传播研究所 新乡 453003)

摘要: 大气折射误差是影响各类无线电系统同步、跟踪、导航、定位精度的一个主要误差源。射线描迹法利用几何光学原理可以实现对该误差的精确修正。针对传统射线描迹法无法处理异常大气折射误差修正的问题, 该文推导了射线描迹法的微分形式, 并基于此提出适用于任意大气的折射误差修正方法。选取某地面测控站对目标的跟踪数据, 验证了所提方法的可行性。此外, 利用该方法对比分析了蒸发波导环境和标准大气环境对大气折射误差的影响。结果表明: 完全陷获在蒸发波导内部的电波引入的大气折射误差是最显著的。所提方法为提高无线电系统在任意大气环境下的测量精度提供一种新的技术支持。

关键词: 大气折射误差; 射线描迹法; 射线描迹法微分形式; 任意大气环境

中图分类号: P225

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1838-09

DOI: 10.11999/JEIT171131

Atmosphere Refractive Error Correction Method Based on Ray Tracing Differential Form

WEI Peipei^① DU Xiaoyan^② JIANG Changyin^③

^①(School of Information Systems Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

^②(Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

^③(China Research of Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Atmosphere refraction error is a main error factor to affect synchronization accuracy, tracing accuracy, navigation accuracy and positioning accuracy for various radio systems. On the basis of geometrical optics, the ray tracing method can precisely make this error correction. For the problem that traditional ray tracing method can not deal with the abnormal atmosphere, ray tracing differential form is derived and then a correction method suitable for arbitrary atmosphere is proposed. The tracing data from ground station are taken to test this method. In addition, the refractive error in evaporation duct is compared with that in standard atmosphere. The results show that the refractive error of radio wave trapped entirely in the duct has the biggest influence. The proposed method provides technique support for improving the measurement precision of radio system in arbitrary atmosphere.

Key words: Atmosphere refractive error; Ray tracing; Ray tracing differential form; Arbitrary atmosphere environment

1 引言

电波在大气中传播时, 大气折射效应会导致电波轨迹发生弯曲及电波传播速度不能按光速传播。该现象会引入大气折射误差, 严重影响各个无线电系统探测定位性能, 比如: 卫星导航系统 GNSS(Global Navigation Satellite System)定位精

度^[1-4]、雷达探测系统对目标的跟踪精度以及通信系统时间同步精度^[5]。此外, 大气折射误差导致的信号时延还可用于反演大气折射率剖面^[6]及监测电离层电子浓度(Total Electronic Contents, TEC)^[7]。因此, 大气折射误差的研究对于无线电物理、地球物理、大地测量学、气象学、大气遥感等学科都具有非常重要的意义。为了提高各个无线电系统的测量精度, 需要了解大气折射误差的修正方法。

收稿日期: 2017-12-04; 改回日期: 2018-04-23; 网络出版: 2018-06-07

*通信作者: 卫佩佩 18563113879@163.com

现有关于折射误差的修正方法主要有：射线描迹法或射线追踪法^[8-12]、简化修正法^[13-17]和新方法^[18,19]。射线描迹法从射线方程出发，严格推导得到各个物理量的折射误差计算公式，精度较高。多篇文献对该方法的效果进行了验证^[4,20,21]，并提出了一些基于射线描迹法的快速算法^[22,23]。相比于射线描迹法，其它两种方法做了近似和简化处理，计算复杂度低。简化修正法主要分为两类：一类是经验模型，比如ITU-R P.834-8中的大气折射距离误差修正模型^[12]；另一类是基于天顶延迟(Zenith Tropospheric Delay, ZTD)的映射函数转换斜延迟法^[14-17]。这种简化方法较多地应用于高仰角条件下的大气折射误差修正，尤其是第2类简化方法。ZTD数据一方面可以通过全球GPS站和IGS提供，另一方面可以利用气象资料计算，为斜延迟的预测建立良好基础^[17]。新方法主要有微波辐射计法^[18]和针对电离层提出的实时修正方法^[19]，该方法的优点是实时性好，缺点是会引入其它测量系统误差。综上，虽然大气折射误差修正已经开展了大量的理论和实验研究，并取得了一些研究成果，但这些方法皆是针对标准大气环境提出的，无法直接应用于非标准大气环境。因此，异常大气(比如：大气湍流、对流层波导)环境的大气折射误差问题亟待解决。

为解决该问题，本文开展任意大气环境折射误差修正方法研究。首先，在第2节对大气折射误差涉及的折射率模型和传统射线描迹法进行了简单介绍，并基于几何光学原理给出大气折射误差修正方法中涉及到的物理量的计算公式；针对该方法的局限性，本文在第3节基于传播射线描迹法推导了射线描迹法微分形式，并基于此提出了适用于任意大气折射误差修正方法；此外，利用测试数据对该方法的可行性进行了验证；最后在第4节以蒸发波导为例开展了异常大气折射误差的仿真分析。

2 基于传统射线描迹法大气折射误差修正方法

电波在非自由空间中传播时，会产生大气折射效应。该效应是由于实际大气球面分层和水平非均匀特性造成。大气层分为对流层、平流层、电离层和磁层。其中对流层和平流层为60 km以下的大气层，被称为中性大气层。不同大气层折射率空间分布不同。考虑到大气折射率是影响折射误差的一个重要参数，关于折射率获取方法的研究从未中断。利用观测站长期积累的气象数据建立折射率模型是获取折射率的一种普遍使用方法。本文研究过程中即选取典型的折射率模型进行大气环境模拟。由于异常大气通常指对流层大气中异常折射率分布，因此本文主要探讨对流层大气中折射误差修正。

2.1 折射率模型

现有中性大气层的折射率模型主要有：线性模型、指数模型、ITU-R指数模型^[13]、双指数模型、分段模型和Hopfield模型^[4]。其中使用较广的是分段模型和Hopfield模型。分段模型可以更全面地描述大气层折射率 N 特性，它与高度的关系可以表示为

$$N(h) = \begin{cases} N_s + (h - h_s) \Delta N, & h_s \leq h \leq h_s + 1 \text{ km} \\ N_1 e^{-c_1(h-h_s-1)}, & h_s + 1 \leq h \leq 9 \text{ km} \\ N_9 e^{-c_9(h-9)}, & 9 \text{ km} \leq h \leq 60 \text{ km} \end{cases} \quad (1)$$

其中， N_s 为地表面折射率， h_s 为地表面海拔高度， ΔN 为1 km以内折射率梯度， N_1 和 N_9 分别为海拔1 km和9 km处的修正折射率， c_1 为地面以上1 km至海拔9 km的指数衰减率， c_9 为海拔9 km至60 km的指数衰减率。

再由大气折射率和折射指数 $n(h)$ 的关系，可计算得到大气折射指数：

$$N(h) = [n(h) - 1] \times 10^6 \quad (2)$$

Hopfield模型将折射率分为湿项和干项部分^[4]，研究过程中利用该模型的优点是可以分别考虑它们对电波传播的影响。该模型和分段模型都能较好地描述实际大气折射率特性，本文在研究过程中选用分段模型。

2.2 基于传统射线描迹法大气折射误差修正方法

大气折射误差是指观测站测得的目标视在物理量和真实物理量的差值，其中包括：距离误差、高度误差和角度误差。图1给出了电波传播轨迹示意图，A和B分别为观测站和目标位置，C为地心。A到B沿着射线轨迹 s 的视在距离 R_a (单位为km)为

$$R_a = c \int_s \frac{ds}{c/n} = \int_{h_A}^{h_B} n \csc \theta dh \quad (3)$$

其中， c 为光速， θ (单位为 $^\circ$)为传播路径高度 h 处

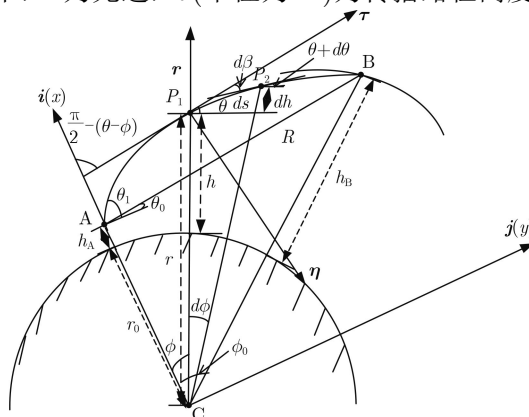


图1 射线传播轨迹示意图

的本地仰角, n 为电波传播路径上任意高度 h 处的折射指数, h_A (单位为km)和 h_B (单位为km)分别为观测站和目标的海拔高度。

球坐标系下的射线描述法为

$$n(r_0 + h) \cos \theta = n_A(r_0 + h_A) \cos \theta_A \quad (4)$$

其中, n_A 为高度 h_A 处的折射指数, $r_0 = 6370$ km为地球半径, θ_A (单位为 $^\circ$)为视在仰角。

$$R = \sqrt{(r_0 + h_A)^2 + (r_0 + h_B)^2 - 2(r_0 + h_A)(r_0 + h_B) \cos \phi_T} \quad (6)$$

ϕ_T 为观测站和目的地心角。

根据射线描述法和图1中射线传播轨迹, ϕ_T 为

$$\phi_T = \int_{h_A}^{h_B} \frac{\cot \theta}{r_0 + h} dh = n_A(r_0 + h_A) \cos \theta_A \int_{h_A}^{h_B} \frac{dh}{(r_0 + h) \sqrt{n^2(r_0 + h)^2 - n_A^2(r_0 + h_A)^2 \cos^2 \theta_A}} \quad (7)$$

距离误差 ΔR 为

$$\Delta R = R_a - R = R_a - \sqrt{(r_0 + h_A)^2 + (r_0 + h_B)^2 - 2(r_0 + h_A)(r_0 + h_B) \cos \phi_T} \quad (8)$$

A到B的高度误差 Δh (单位为km)为

$$\Delta h = h_a - h_B = \sqrt{(r_0 + h_A)^2 + R_a^2 + 2(r_0 + h_A) R_a \sin \theta_A} - r_0 - h_B \quad (9)$$

A到B的仰角误差 $\Delta \theta$ (单位为 $^\circ$)为

$$\Delta \theta = \theta_a - \theta_T = \theta_a - \arctan \left(\cot \phi_T - \frac{r_0 + h_A}{r_0 + h_B} \csc \phi_T \right) \quad (10)$$

其中, θ_T 为真实仰角, 它可根据图1中射线几何示意图得到。

以上即为基于传统射线描述法的大气折射误差修正方法, 该方法利用几何光学原理, 有严格的数学推导, 不涉及任何近似, 有多篇文献验证了该方法的有效性。但该方法仅适用于标准大气环境下折射误差修正, 对于异常大气, 比如对流层波导, 传播路径上射线的高度并不总是随射线轨迹长度增大而增大^[24], 视在距离及地心仰角不能简单地通过积分求得, 使得式(5)和式(7)失效。因此, 针对该问题, 在下一节推导射线描述法微分形式下大气折射误差, 并提出利用迭代的方法计算大气折射误差。

3 基于射线描述法微分形式的大气折射误差修正方法

3.1 基于传统射线描述法大气折射误差修正方法

基于第2节中传统射线描述法(式(4)), 推导射线描述微分形式的大气折射误差修正方法。

式(4)两边分别对高度 h 求微分可得

$$\frac{dn}{dh} (r_0 + h) \cos \theta + n \cos \theta - n(r_0 + h) \sin \theta \frac{d\theta}{dh} = 0 \quad (11)$$

利用式(4), 式(3)可重新写为

$$R_a = \int_{h_A}^{h_B} \frac{n^2(r_0 + h)}{\sqrt{n^2(r_0 + h)^2 - n_A^2(r_0 + h_A)^2 \cos^2 \theta_A}} dh \quad (5)$$

由于目标的真实位置往往是未知的, 可通过视在距离反求目标的真实高度 h_B 。

A到B的真实距离 R (单位为km)为

$$R = \sqrt{(r_0 + h_A)^2 + (r_0 + h_B)^2 - 2(r_0 + h_A)(r_0 + h_B) \cos \phi_T} \quad (6)$$

ϕ_T 为观测站和目的地心角。

根据射线描述法和图1中射线传播轨迹, ϕ_T 为

$$\phi_T = \int_{h_A}^{h_B} \frac{\cot \theta}{r_0 + h} dh = n_A(r_0 + h_A) \cos \theta_A \int_{h_A}^{h_B} \frac{dh}{(r_0 + h) \sqrt{n^2(r_0 + h)^2 - n_A^2(r_0 + h_A)^2 \cos^2 \theta_A}} \quad (7)$$

距离误差 ΔR 为

$$\Delta R = R_a - R = R_a - \sqrt{(r_0 + h_A)^2 + (r_0 + h_B)^2 - 2(r_0 + h_A)(r_0 + h_B) \cos \phi_T} \quad (8)$$

A到B的高度误差 Δh (单位为km)为

$$\Delta h = h_a - h_B = \sqrt{(r_0 + h_A)^2 + R_a^2 + 2(r_0 + h_A) R_a \sin \theta_A} - r_0 - h_B \quad (9)$$

A到B的仰角误差 $\Delta \theta$ (单位为 $^\circ$)为

$$\Delta \theta = \theta_a - \theta_T = \theta_a - \arctan \left(\cot \phi_T - \frac{r_0 + h_A}{r_0 + h_B} \csc \phi_T \right) \quad (10)$$

则

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{dn}{dh} \frac{\cot \theta}{n} + \frac{\cot \theta}{r_0 + h} \quad (12)$$

式(12)即为射线描述法的微分形式。

基于式(12)和图1中射线的几何关系:

$$\frac{dh}{ds} = \sin \theta \quad (13)$$

$$\frac{d\phi}{ds} = \frac{\cos \theta}{r_0 + h} \quad (14)$$

大气折射误差修正可通过以下步骤步进迭代求解。

步骤1 初始化各物理量。初始位置处视在距离 $R_{a,0} = 0$; 本地仰角 $\theta_0 = \theta_A$; 地心角 $\phi_0 = 0$; 高度 $h_0 = h_A$ 。

步骤2 计算第 k ($k = 1, 2, \dots, K$)步各物理量的值。固定射线轨迹长度步长 Δs , 则由式(3)可得

$$R_{a,k} = R_{a,k-1} + \Delta R_{a,k} = R_{a,k-1} + n_{k-1} \Delta s \quad (15)$$

由式(13)可得

$$h_k = h_{k-1} + \Delta h_k = h_{k-1} + \Delta s \sin \theta_{k-1} \quad (16)$$

由式(14)可得

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \Delta \phi_k = \phi_{k-1} + \frac{\cos \theta_{k-1}}{h_{k-1} + r_0} \Delta s \quad (17)$$

由式(12)—式(14)可得

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta_k$$

$$= \theta_{k-1} + \left[1 + \frac{h_{k-1} + r_0}{n_{k-1}} \left(\frac{dn}{dh} \right)_{h_{k-1}} \right] \Delta\phi_k \quad (18)$$

步骤3 设置迭代结束的目标函数：

$$K = \arg \min_k \varphi \{ R_{a,k}, R_a \} \quad (19)$$

利用2阶范数作为该问题的目标函数：

$$\varphi = \left\| R_{a,k} - R_a \right\|^2 \quad (20)$$

步骤4 调整步骤2中k的值，利用步骤2计算 $R_{a,k}$ ，直至目标函数式(20)达到最优。

步骤5 计算大气折射误差。当目标函数式(20)达到最优时，迭代步数 $k = K$ ，此时目标真实高度 $h_B = h_K$ ，真实仰角 $\theta_T = \theta_K$ ，地心仰角 $\phi_T = \phi_K$ 。由此，可计算得到大气折射误差，并对其进行修正。

以上步骤即为本文基于射线描述法微分形式提出的大气折射误差修正方法。相对第2节的传统射线描述法，该方法不仅适用于标准大气环境的折射误差修正，也适用于异常大气环境的折射误差修正，在下一节对该方法进行验证。

3.2 试验验证

利用文献[21]中的测试数据，对本文所提大气

折射误差修正方法进行验证。该数据来源于地面测站对某高空目标的跟踪，角度范围是 $3^\circ \sim 26^\circ$ ，通过对测试数据和精确轨道数据的处理，可得到每个仰角条件下测站与目标的真实距离、真实仰角及大气折射引入的误差值。信号传播的大气环境对中性大气层采用折射率分段模型(式(1))进行拟合，模型参数为 $N_s = 333.23$, $\Delta N = -60.17$ km, $c = 0.1227$ km, $c_0 = 0.1432$ km，得到60 km以下的大气折射率剖面如图2(a)所示；电离层采用测站位置处实测的电子浓度反演大气折射率，得到的折射率剖面如图2(b)所示。

基于以上的折射率剖面，分别利用第2.2节(式(3)—式(10))和第3.1节中的大气折射误差修正方法详细步骤计算距离和仰角误差，计算结果如图3所示。利用图3的计算结果对测试数据中折射误差(图4中实线)进行修正，结果如图4所示。图3(a)和图3(b)分别给出了距离和仰角的误差，两种方法的计算结果具有较好的一致性。图4(a)和图4(b)分别给出了距离和仰角误差修正后的结果，距离误差修正后的残差在10 m左右，仰角误差修正后的残差在 0° 左右。分析以上结果可以得出：基于射线描述法微分形式的大气折射误差修正方法与基于传统射线描述法的大气折射误差修正方法具有较好的一致性。

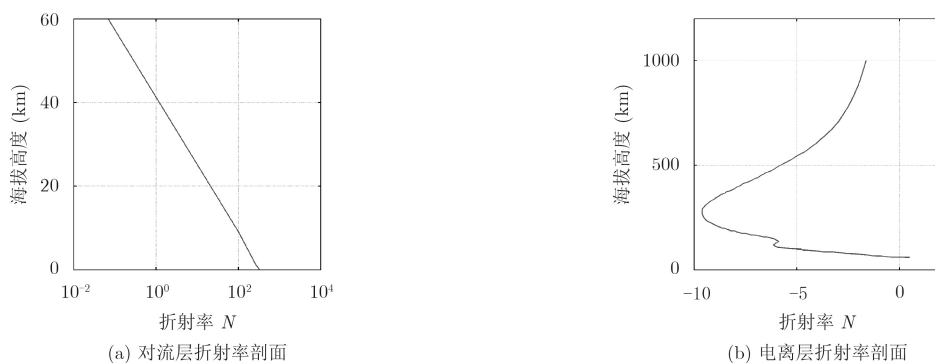


图2 大气折射率剖面

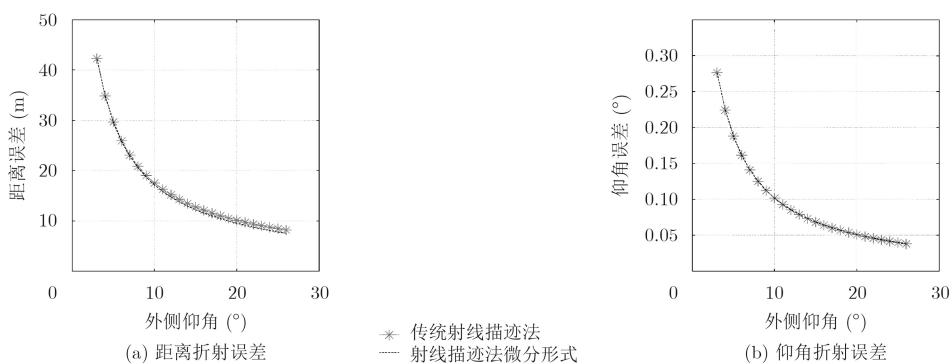


图3 大气折射误差分布图

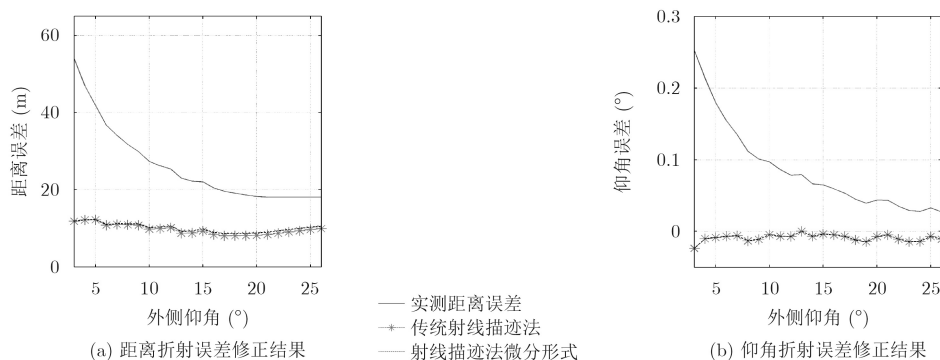


图4 大气折射误差修正结果

此外,针对传统射线描述法无法修正异常大气折射误差的问题,本文利用第3.1节的方法对蒸发波导条件下大气折射误差进行仿真分析。

4 蒸发波导环境大气折射误差仿真分析

蒸发波导是海上对流层波导中出现概率最高的波导类型,本文以其为例探讨海上波导环境对大气折射误差的影响。

4.1 蒸发波导

Paulus-Jeske提出的单参数蒸发波导模型^[25],简称为PJ模型,该模型应用最为广泛,其修正折射率 M 对应的解析式为

$$M(h) = M_0 + 0.13 \left(h - h_d \ln \left(\frac{h + z_0}{z_0} \right) \right) \quad (21)$$

其中, M_0 为地表面折射率, h_d 为蒸发波导高度, $z_0 = 0.00015 \text{ m}$ 为粗糙度因子。

利用式(22)可以将大气修正折射率转化为折射率^[26]:

$$N(h) = M(h) - 0.157h \quad (22)$$

4.2 仿真分析

基于蒸发波导环境折射率模型(式(21)),且考虑到全球统计资料给出的蒸发波导高度变化范围 $0 \sim 40 \text{ m}$,本文分别选取两个波导高度 $h_d = 20 \text{ m}$ 和 $h_d = 30 \text{ m}$,探讨蒸发波导环境下的大气折射误差,并将其与标准大气环境下的仿真结果作对比。标准大气的折射率模型参见式(1),其中各个参数取文献^[8]给出的全国平均值: $\Delta N = -39.4 \text{ km}$, $c = 0.1258 \text{ km}$, $c_9 = 0.1434 \text{ km}$ 。仿真中雷达天线高度设置为 $h_A = 15 \text{ m}$,位于蒸发波导内部。由于波导环境对陷获角度的限制,应用于该环境电波传播特性研究的天线波束宽度都比较小。为确保电波射线仰角在 1° 以内,本文研究过程选取仰角分别为 -0.15° , 0° 和 0.15° 3种情况。

根据以上条件,利用第3.1节中式(15)–式(18),绘制固定视在距离 100 km 时,蒸发波导和标

准环境条件下,在直角坐标系中的电波传播轨迹图,结果如图5所示。由该图可以直观看出,大气环境和仰角对电波传播轨迹的影响是非常显著的。相比标准大气环境,蒸发波导环境中的电波传播轨迹更加多样化,并不简单随高度增大电波轨迹背离地球表面传播;当仰角为 0° 时(虚线),电波被陷获在波导内部向前传播,且波导高度越高,陷获越强。这种电波传播特性的不同必然会导致两种大气环境下大气折射误差结果的差异。因此,为进一步定量分析大气环境对大气折射误差的影响,利用第3.1节中的方法步骤及第2节中折射误差的定义,图6—图8分别仿真了固定视在距离,两种环境、3个仰角条件下的距离误差、高度误差和仰角误差。这3个图中的横坐标均表示视在距离。此外,图9对视在距离 100 km 时的结果进行了统计。

由图6可以得出:两种大气环境均表现出随视在距离增大,距离误差增大的规律;相同条件下,标准大气引入的距离误差大于蒸发波导(图9(a)),这是由于电波受波导影响,射线在波导内变化比较平缓导致的(如图5所示)。此外,蒸发波导环境中,电波被陷获越强,距离误差越大。

相比距离误差,大气环境和仰角变化对高度和仰角误差的影响更为显著和复杂。分析图7的仿真结果:当仰角大于等于 0° 时,高度误差随视在距离的增大而增大,蒸发波导环境大气折射导致的高度误差远大于标准大气。比如图9(b)中对于蒸发波导环境,高度误差在 0° 仰角时近 800 m ,而标准大气为 200 m 左右。仰角小于 0° 时,在视在距离较小的情况下,视在高度小于目标真实高度,随视在距离增大,视在高度大于真实高度,相应的高度误差也反向增大,蒸发波导环境这种变化规律比较明显。

通过分析图8可以得出:当仰角大于等于 0° 时,仰角误差随视在距离的增大而增大,蒸发波导环境大气折射导致的仰角误差远大于标准大气。比如图9(c)中对于蒸发波导环境,仰角误差在 0° 时

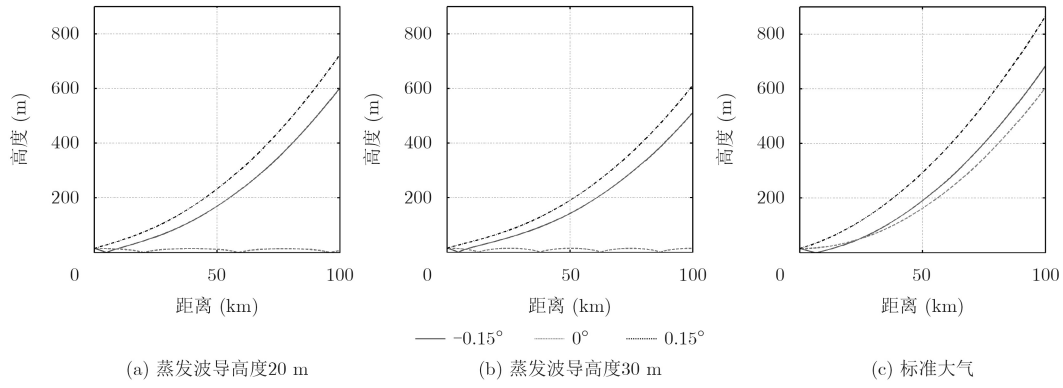


图5 电波传播轨迹

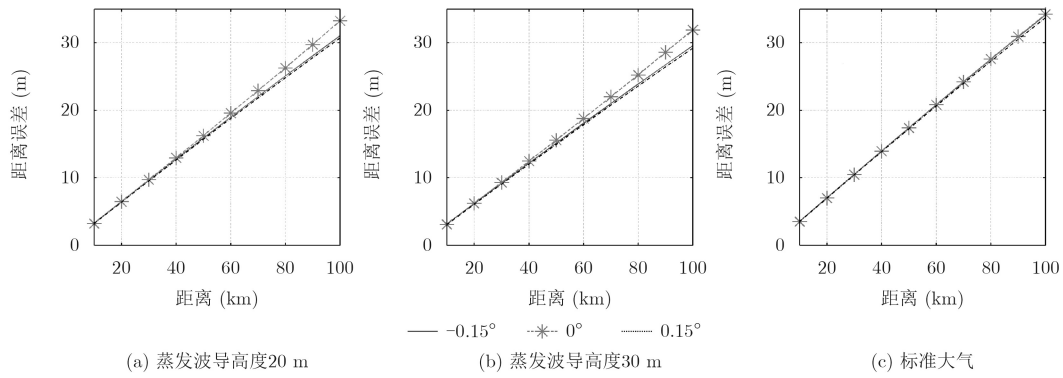


图6 距离误差

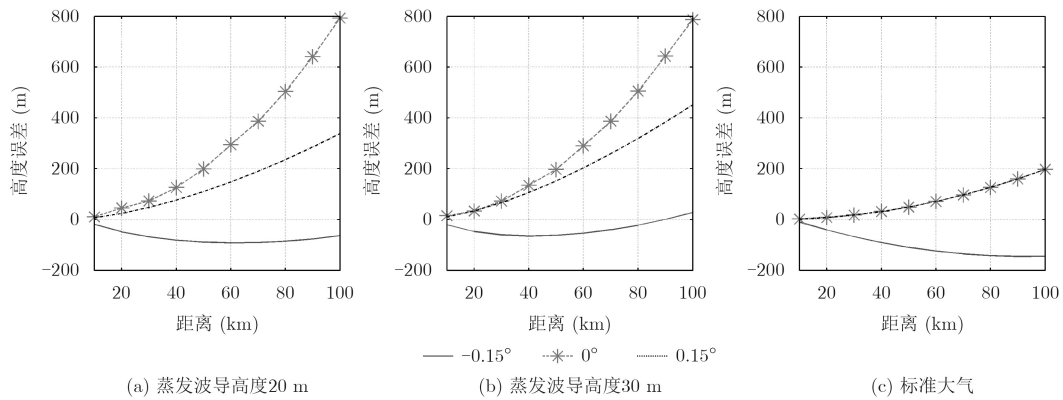


图7 高度误差

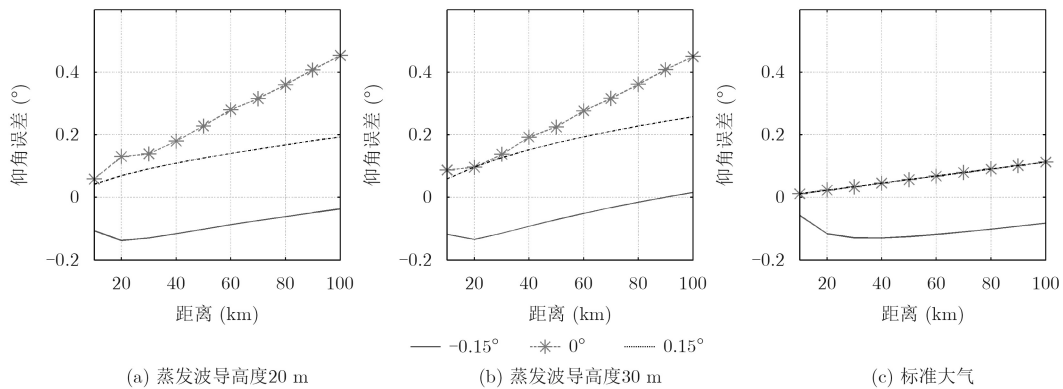


图8 仰角误差

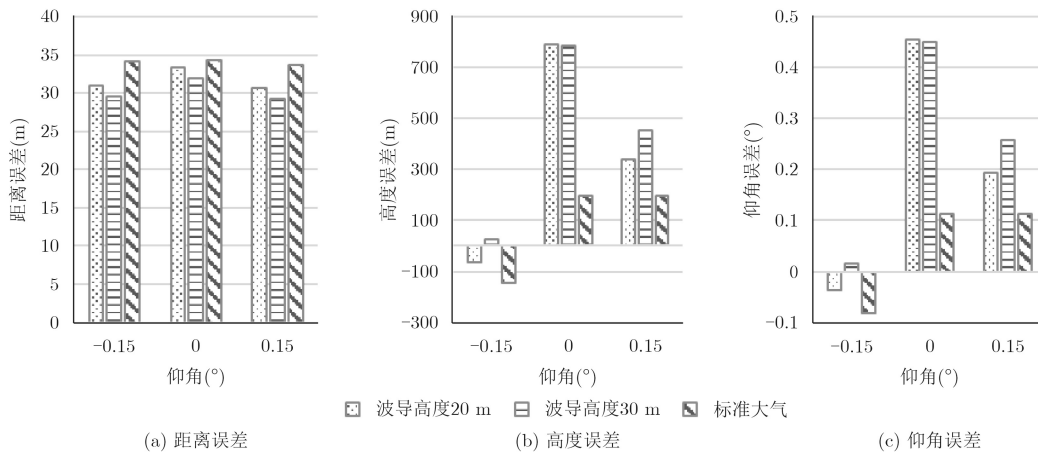


图9 视在距离100 km时大气折射误差统计图

为 0.45° ，而标准大气为 0.11° 。仰角小于 0° 时，随视在距离的增大，受目标高度变化的影响，仰角误差的变化也呈现与高度误差相同的规律。

综上，由图6—图9可以得出：完全陷获在蒸发波导内部的电波引入的大气折射误差是最显著的；考虑到影响蒸发波导大气折射误差的因素多，相比标准大气，该环境下的大气折射误差修正问题更为严峻。

5 结束语

为解决传统射线描述法无法处理异常大气折射误差的问题，本文推导了射线描述法的微分形式，并基于此提出了一种可以计算任意大气环境折射误差修正方法。该方法通过数值迭代和优化的过程，给出目标真实位置相关的物理量，进而对目标的视在位置进行修正。利用某地面测控站的试验数据对该方法进行了验证，结果显示：距离误差修正后的残差在10 m左右，仰角误差修正后的残差在 0° 左右。

此外，本文还以蒸发波导为例探讨了异常大气对大气折射误差的影响。通过仿真分析，得出：完全陷获在蒸发波导内部的电波引入的大气折射误差是最显著的；考虑到影响蒸发波导大气折射误差的因素多，相比标准大气，该环境下的大气折射误差修正问题更为严峻。

综上，本文所提方法能够较好地解决任意大气折射误差的修正问题，是现有大气折射误差修正方法的一个补充，为提高无线电系统在任意大气环境下的测量精度提供一种新的技术支持。

参考文献

- [1] ZUS F, DICK G, HEISE S, *et al.* A forward operator and its adjoint for GPS slant total delays[J]. *Radio Science*, 2015, 50(5): 393–4052. doi: [10.1002/2014RS005584](https://doi.org/10.1002/2014RS005584).
- [2] 赵章明, 冯径, 洪亮. 卫星定位中对流层延迟模型对比分析[J]. *测绘通报*, 2016(11): 18–21. doi: [10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0356](https://doi.org/10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0356).
- [3] 袁运斌, 霍星亮, 张宝成. 近年来我国GNSS电离层延迟精确建模及修正研究进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1364–1378.
- [4] HU Guojun, ZHANG Li, LI Gang, *et al.* Research on error analysis and correction technique of atmospheric refraction for InSAR measurement with distributed satellites[J]. *Journal of Computer & Communications*, 2016, 4(15): 142–150. doi: [10.4236/jcc.2016.415014](https://doi.org/10.4236/jcc.2016.415014).
- [5] 陈西宏, 刘赞, 刘继业, 等. 低仰角下对流层散射延迟估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(2): 408–412. doi: [10.11999/JEIT150628](https://doi.org/10.11999/JEIT150628).
- [6] LIN Leke, ZHAO Zhenwei, ZHANG Yerong, *et al.* Tropospheric refractivity profiling based on refractivity profile model using single ground-based global positioning system[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(1): 7–11. doi: [10.1049/iet-rsn.2009.0167](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2009.0167).
- [7] 韩玲. 区域GPS电离层TEC监测、建模和应用[D]. [硕士学位论文],

- 中国科学院上海天文台, 2006.
- HAN Ling. Regional GPS ionosphere TEC monitoring, modeling and application[D]. [Master dissertation], Shanghai Astronomical Observatory, 2016.
- [8] 江长荫, 张明高, 焦培南, 等. 雷达电波传播折射与衰减手册[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997.
- JIANG Changyin, ZHANG Minggao, JIAO Peinan, et al. Handbook of refraction and attenuation of radiowave propagation for radar[S]. Beijing: The Military Standard Publication Department of COSTIND, 1997.
- [9] 黄捷. 大气折射误差修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 65–137.
- HUANG Jie. Correction for Atmospheric Refractive Error of Radio Wave[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 65–137.
- [10] JIANG Changyin and WANG Beide. Atmosphere refraction corrections of radiowave propagation for airborne and satellite-borne radars[J]. *Science in China (Series E)*, 2001, 44(3): 280–290. doi: [10.1007/BF02916705](https://doi.org/10.1007/BF02916705).
- [11] HOFMISTER A and BÖHM J. Application of ray-traced tropospheric slant delays to geodetic VLBI analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(8): 945–964. doi: [10.1007/s00190-017-1000-7](https://doi.org/10.1007/s00190-017-1000-7).
- [12] 吴文溢, 陈西宏, 刘少伟. 低仰角对流层散射斜延迟实时估计方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1326–1332. doi: [10.11999/JEIT160776](https://doi.org/10.11999/JEIT160776).
- WU Wenyi, CHEN Xihong, and LIU Shaowei. Real-time estimation method for tropospheric scatter slant delay at low elevation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1326–1332. doi: [10.11999/JEIT160776](https://doi.org/10.11999/JEIT160776).
- [13] RECOMMENDATION ITU-R P.834-8. Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation[S]. 2016.
- [14] SAASTAMOINEN J. Contribution to the theory of atmospheric refraction[J]. *Bulletin Géodésique*, 1972, 105(1): 279–298. doi: [10.1007/BF02521844](https://doi.org/10.1007/BF02521844).
- [15] FOELSCH U and KIRCHENGAST G. A new “geometric” mapping function for the hydrostatic delay at GPS frequencies[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, 26(3): 153–157. doi: [10.1016/S1464-1895\(01\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00039-4).
- [16] 赵静昉, 宋淑丽, 陈钦明, 等. 基于垂直剖面函数式的全球对流层天顶延迟模型的建立[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3140–3153. doi: [10.6038/cjg20141005](https://doi.org/10.6038/cjg20141005).
- ZHAO Jingyang, SONG Shuli, CHEN Qinming, et al. Establishment of a new global model for zenith tropospheric delay based on functional expression for its vertical profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3140–3153. doi: [10.6038/cjg20141005](https://doi.org/10.6038/cjg20141005).
- [17] 陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 亚洲地区ECMWF/NCEP资料计算ZTD的精度分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1541–1548. doi: [10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011](https://doi.org/10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011).
- CHEN Qinming, SONG Shuli, ZHU Wenyao. An analysis of the accuracy of zenith tropospheric delay calculated from ECMWF/NCEP data over Asian area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(5): 1541–1548. doi: [10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011](https://doi.org/10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011).
- [18] 刘宗伟, 刘夫体, 甘友谊, 等. 微波辐射计在雷测数据折射误差修正中的应用[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1153–1157. doi: [10.13443/j.cjors.2011.06.010](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2011.06.010).
- LIU Zongwei, LIU Futi, GAN Youyi, et al. Application of microwave radiometer in the refractive error correction of radar measurement data[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(6): 1153–1157. doi: [10.13443/j.cjors.2011.06.010](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2011.06.010).
- [19] 王先毅, 孙越强, 杜起飞, 等. 一种实时双频电离层修正方法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(5): 992–995. doi: [10.3969/j.issn.1671-1815.2012.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2012.05.005).
- WANG Xianyi, SUN Yueqiang, DU Qifei, et al. A real-time dual-frequency ionospheric correction method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(5): 992–995. doi: [10.3969/j.issn.1671-1815.2012.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2012.05.005).
- [20] 赵军, 王西京, 张华, 等. 外测数据对流层折射误差修正及精度分析[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(1): 25–29. doi: [10.7642/j.issn.1674-5620.2014-01-0025-05](https://doi.org/10.7642/j.issn.1674-5620.2014-01-0025-05).
- ZHAO Jun, WANG Xijing, ZHANG Hua, et al. Correction of tropospheric refraction error of tracking data and error analysis[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2014, 33(1): 25–29. doi: [10.7642/j.issn.1674-5620.2014-01-0025-05](https://doi.org/10.7642/j.issn.1674-5620.2014-01-0025-05).
- [21] 李建儒, 刘玉梅, 赵振维, 等. 卫星测控电波折射修正效果分析[C]. 中国宇航学会飞行器测控专业委员会航天测控技术研讨会, 杭州, 2007: 135–138.
- LI Jianru, LIU Yumei, ZHAO Zhenwei, et al. Correction effect analysis of radio wave refraction for Satellite TT & C[C]. Space Flight Measurement and Control Technology Conference of Aerospace Institute of China Aerospace Science and Technology Specialized Committee, Hangzhou, 2007: 135–138.
- [22] 张美根, 程冰洁, 李小凡, 等. 一种最短路径射线追踪的快速算法[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1467–1474. doi: [10.3321/j.issn:0001-5733.2006.05.026](https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5733.2006.05.026).
- ZHANG Meigen, CHENG Bingjie, LI Xiaofan, et al. A fast algorithm of shortest path ray tracing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1467–1474. doi: [10.3321/j.issn:0001-5733.2006.05.026](https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5733.2006.05.026).
- [23] 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. doi: [10.13443/j.cjors.2014090102](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2014090102).
- LIU Yumei, CHEN Xiangming, ZHAO Zhenwei, *et al.* High-precision fast ray-tracing algorithm used in optical wave refraction error correction[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(4): 749–753. doi: [10.13443/j.cjors.2014090102](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2014090102).
- [24] 白璐, 张沛, 吴振森, 等. 海上对流层大气波导顶部电磁盲区研究[J]. 电波科学学报, 2016, 31(2): 278–283. doi: [10.13443/j.cjors.2015052201](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015052201).
- BAI Lu, ZHANG Pei, WU Zhensen, *et al.* Research of electromagnetic shadow zone in maritime tropospheric duct[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(2): 278–283. doi: [10.13443/j.cjors.2015052201](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015052201).
- [25] PAULUS R A. Evaporation duct effects on sea clutter[J]. *Antennas and Propagation*, 1990, 38(11): 1765–1771. doi: [10.1109/8.102737](https://doi.org/10.1109/8.102737).
- [26] YANG Shanbo, LI Xingfei, WU Chao, *et al.* Application of the PJ and NPS evaporation duct models over the South China Sea (SCS) in winter[J]. *Plos One*, 2017, 12(3): 1–11. doi: [10.1371/journal.pone.0172284](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172284).
- 卫佩佩: 女, 1990年生, 博士生, 研究方向为电波传播电磁计算及反演问题等.
- 杜晓燕: 女, 1975年生, 副教授, 主要从事电磁场、微波技术与天线等的教学和科研工作.
- 江长荫: 男, 1936年生, 研究员, 主要从事无线电波传播研究.