

# 大气折射误差修正研究现状与展望

张瑜<sup>a,b</sup>,甘利萍<sup>a</sup>

(河南师范大学 a.电子与电气工程学院;b.河南省高等学校电磁波特征信息  
探测重点学科开放实验室,河南 新乡 453007)

**摘要:**雷达是测量目标位置和速度的常用手段之一.为了提高雷达的测量精度,需要对因大气折射效应而产生的雷达测量误差进行修正.首先简要给出了雷达系统中大气折射误差的问题描述及进行误差修正的思路.然后不仅详细阐述了目前常用的电波射线描迹法、近似修正法和新型修正法等电波折射误差修正技术在雷达定位中的研究和应用现状,而且也阐述了几种用于对雷达测速折射误差修正方法的研究和应用现状,同时,对各种方法的使用范围及其优缺点也进行了简单的分析.最后,给出了雷达系统大气折射误差修正技术在今后的研究方向.

**关键词:**雷达;折射误差;修正;定位;测速

**中图分类号:** TN011

**文献标志码:** A

目前,作为探测目标主要手段之一的雷达已在各行各业得到了广泛的应用,尤其在军事领域,各种体制的雷达已成为现代战争中不可或缺的探测设备之一.雷达探测目标的机理是由发射机发射电波到目标,电波经目标散射后回到接收机,接收机根据回波的信息获得目标有关信息,如距离、俯仰角、方位角和径向速度等参数,从而实现雷达对目标的定位和测速功能.

一般情况下,大气是雷达探测信道.由于空中大气是折射率不等于1的不均匀媒质,依据折射定理,雷达电波射线必定会产生折射效应,从而使得电波射线产生弯曲、传播速度小于光速、多普勒频率不再正比于目标的径向速度,最终导致雷达在对目标定位和测速中产生折射误差<sup>[1-2]</sup>.

雷达技术发展早期,因为组成雷达的硬件设备精度较低,且雷达信号处理方法也还不太完善,因此相比较而言误差较小的大气折射误差基本上可以不予考虑,雷达技术的大量研究工作都放到了提高雷达设备和信息处理的精度上.随着科学技术发展和对雷达精度的进一步提高,目前的雷达设备精度有了很大提高,信号处理方法也得到了很大的优化.相比较而言,大气折射误差已成为较大的雷达误差来源,且已成为限制雷达测量精度进一步提高的瓶颈.为了提高雷达的测量精度,对大气引起的雷达定位测速误差必须进行折射误差修正<sup>[3-4]</sup>,为此雷达系统中的大气折射误差修正方法得到了更广泛的关注和重视.

雷达系统的体制不同,探测目标的机理和参数也不尽相同,因此大气折射误差修正的方法也有较大的差别,各种方法的精度和复杂程度也不相同.本文阐述了目前在雷达定位测速中的主要大气折射误差修正方法的研究和应用现状,同时也简要指出了今后的研究方向.

## 1 问题描述

单站雷达在测量目标时,其测量参数一般是距离 $R_r$ 、俯仰角 $\theta_r$ 、方位角 $\phi_r$ 和径向速度 $v_r$ (常称为距离变化率 $\dot{R}_r$ ),多站雷达系统的测量参数一般是单站雷达测量参数的某几个或变形<sup>[2]</sup>.为了不失一般性,这里以单站雷达为例给出了大气折射示意图,如图1所示.

由于大气媒质使得雷达的电波产生折射效应,使得实际的电波射线不按直线,而按曲线传播,也就是说

收稿日期:2016-03-07;修回日期:2016-05-21.

基金项目:国家自然科学基金(61077037)

第1作者简介(通信作者):张瑜(1963-),男,河南沁阳人,河南师范大学教授,主要从事雷达技术及应用研究,  
E-mail:hsdzhangyu@126.com.

实际电波射线是一个曲线. 因为在对流层大气(这里指地面到 60 km 高度内的大气层)中折射率  $n$  大于 1, 电波传播速度  $v = \frac{c}{n}$ ; 在电离层大气中折射率  $n$  小于 1, 其电波传播速度  $v = nc$ , 因此电波在大气层中的传播速度都小于真空中的光速  $c$ , 也就是电波会产生时延现象. 电波射线弯曲使得雷达测量到的距离、俯仰角、方位角和距离变化率等参数都包含了大气折射误差, 电波的时延只使得距离参数包含大气折射误差. 一般将这种包含折射误差的参数称为视在参数, 即雷达测量到的参数为视在距离  $R_e$ 、视在俯仰角  $\theta_e$ 、视在方位角  $\phi_e$  和视在距离变化率  $\dot{R}_e$ . 要提高雷达的定位和测速精度, 就必须将大气折射误差从雷达测量参数中滤除, 即得到不含折射误差的精确参数  $R_0, \alpha_0, \phi_0$  和  $v_0$  (或  $\dot{R}_0$ ) (称为雷达的真实参数). 大气折射误差修正就是利用已知的大气折射率  $n$  剖面 and 雷达测量的视在参量, 通过一定计算得到雷达测量目标的真实参数. 用这些不含大气折射误差的雷达测量的真实参数进行定位和测速解算, 就可以提高雷达的定位和测速精度.

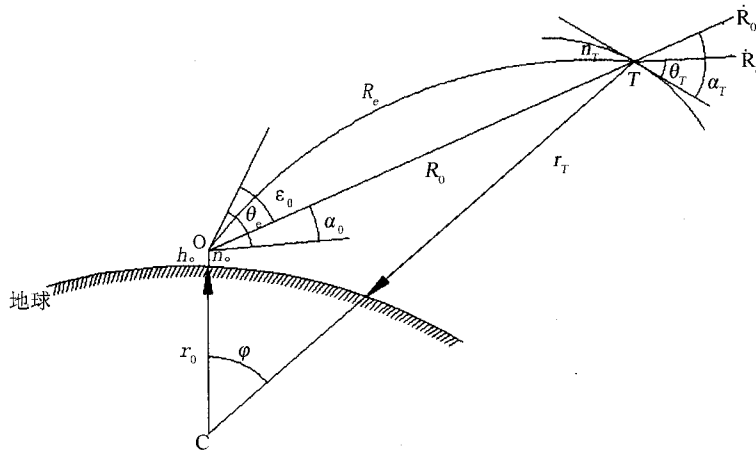


图1 大气折射示意图

## 2 雷达定位参数折射误差修正

雷达主要实现对目标的定位和测速功能, 当然现代雷达也可实现对目标的识别功能<sup>[1-2]</sup>. 实现雷达定位功能的参数是距离量、俯仰角和方位角等 3 个参量. 实现速度测量的参数是多普勒频率. 由于多普勒频率与雷达测量目标的径向速度有关, 因此也可以认为雷达测速参数是目标的径向速度, 也称为距离变化率. 大气对电波形成的折射效应不仅对雷达定位产生折射误差, 也对雷达测速产生折射误差. 由于定位折射误差与电波的射线弯曲和时延都有关, 而测速折射误差只与电波射线弯曲有关, 因此一般常将这 2 种折射误差分别进行修正.

雷达大气折射误差修正方法主要有 3 种分类方法: 1) 依据雷达的体制进行分类, 一般分为单站雷达系统、三站雷达系统、多站雷达系统、全测速雷达系统、光学雷达系统等<sup>[1-2]</sup> 大气折射误差修正方法. 不同体制雷达的测量参数不尽相同, 因此其折射误差修正方法也有较大的差别. 2) 依据雷达给出的反应时间进行分类, 一般分为事后和实时 2 种大气折射误差修正方法, 其中, 事后修正是指雷达执行任务后需要对其精度进行检验的折射误差修正方法. 它常用于靶场和相关的试验基地. 该方法有足够的时间保证获得精确的大气环境参数和进行大气折射误差精确计算, 因此这种方法能够提高大气折射误差修正的精度. 实时修正是指需要雷达立即进行折射误差修正的方法, 也称为在线修正, 它常用于在役和机动雷达系统. 由于它没有足够的时间来保证获得精确的大气环境参数, 且需要对精确的折射误差修正方法进行简化以保证计算速度, 因此其折射误差修正的精度较低<sup>[5-6]</sup>. 3) 依据算法进行分类, 一般可分为射线描述法、近似修正法和新型修正法 3 种. 根据雷达实际应用, 这里依据常用的折射误差修正算法的分类进行阐述.

### 2.1 射线描述法

利用射线描述法进行折射误差修正的基础是射线理论的费马原理. 它对任何大气结构都适用. 常用的折

射误差修正的射线描述法主要有 2 种情形:1)针对不考虑大气水平方向变化,只考虑大气随高度变化,即球面分层大气情形下的射线描述法;2)考虑大气三维变化,即任意大气情形下的射线描述法。

2.1.1 球面分层大气的射线描述法

基于大气球面分层的射线描述法不仅是目前最常用的大气折射误差修正方法,而且也是目前业内公认的精度和实用性很好的折射修正方法<sup>[7-8]</sup>。这是因为一般情况下大气折射率在垂直方向的变化远远大于它在水平方向的变化,因此可以将大气折射率在水平方向视为均匀分布<sup>[9]</sup>,此时可以认为雷达测量的方位角没有折射误差。大气球面分层下的射线描述法就是在大气球面分层条件下,利用费马原理导出电波射线满足的 Snell 定理,然后再根据雷达、目标的几何关系和 Snell 定理推导出电波射线描述基本公式,从而得到大气折射误差计算公式<sup>[2,9]</sup>。

大气球面分层假设应符合 2 个条件:1) 雷达对电波折射误差修正精度的要求不是太高,2) 雷达系统所处的下垫面较为光滑、平坦。如果雷达精度要求很高,或者雷达系统处于下垫面复杂地区时,由于大气折射率水平变化较大,此时应考虑大气折射率的三维结构,进而考虑方位角的折射误差<sup>[10]</sup>。

2.1.1.1 单站雷达系统

射线描述法最常用于单站雷达系统,这种方法的关键有 2 点,第 1 点是根据雷达测量到的视在距离  $R_e$  和大气折射率剖面  $n$ (它是大气到地心的距离  $r$  的函数),采用迭代法获得目标到地心的的真实距离  $r_T$ ,第 2 点是计算出雷达与目标之间的地心张角  $\varphi$ ,即

$$R_e = \begin{cases} \int_{r_0}^{r_T} \frac{n^2 r dr}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta_0}}, r_T \leq r_1, \\ \int_{r_0}^{r_1} \frac{n^2 r dr}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta_0}} + \int_{r_1}^{r_T} \frac{r dr}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta_0}}, r_T > r_1, \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi = n_0 r_0 \cos \theta_0 \int_{r_0}^{r_T} \frac{dr}{r \sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta_0}}, \quad (2)$$

式中,  $r_0$  为雷达天线中心到地心的距离,  $n_0$  为  $r_0$  处的大气折射率,  $\theta_0$  为电波射线的初始仰角,  $r_1$  为对流层顶到地心的距离,  $n$  为  $r$  处的大气折射率。

基于射线描述法的单站雷达系统的电波折射误差修正方法已在许多领域得到了应用,并取得了较好的效果<sup>[11-14]</sup>。大气球面分层的射线描述法是将地球视为圆地球,对于雷达在极低仰角测量目标情况,由于电波射线在近地空间传播的距离较远,圆地球假设会产生较大的误差,因此一些研究者将地球视为椭圆地球进行处理,也取得了较好的结果<sup>[15]</sup>。

2.1.1.2 多站雷达系统

射线描述法有时也会用于各雷达站之间相距较近、且下垫面较为平坦的多站雷达系统,各个雷达站进行大气折射误差修正时采用相同的大气剖面。有时对于下垫面复杂的多站雷达系统,为了提高电波折射误差修正精度,也常采用准三维大气方法,即各个雷达站采用本站测量出的大气参数进行折射误差计算<sup>[2,9]</sup>,如 3RR 和连续波干涉仪系统。3RR 系统由 3 个雷达组成,测量的参数主要是目标到 3 个雷达的视在距离和视在距离变化率,没有角度信息。在折射误差计算中,采用迭代方法进行目标位置坐标求解,即把 3 个视在距离  $R_{e_i}$  作为真实距离  $R_{0i}$  的近似值  $R_{0i}^{(j)}$ ,再利用三个雷达站的坐标  $X_{0i}$  求得近似目标位置坐标  $X_T^{(j)}$ 。

$$(X_T^{(j)} - X_{0i})(X_T^{(j)} - X_{0i})^T = (R_{e_i}^{(j)})^2. \quad (3)$$

再利用雷达到目标的方向余弦循环计算真实仰角近似值、视在仰角近似值、视在距离近似值,经过多次迭代最终得到目标的精确位置。

连续波干涉仪系统的折射误差修正方法与 3RR 系统相似,只是连续波干涉仪系统测量的参数为 1 个距离和  $S_e$ , 2 个距离差  $P_e, Q_e$ ,因此只需改变求解近似目标位置坐标  $X_T^{(j)}$  的方程,其他步骤与 3RR 系统相同。

目前,利用射线描述法进行折射误差修正绝大多数是地对空雷达体制(或称为仰视雷达)。在空对地雷达(或称为俯视雷达)中的折射误差修正方面研究的较少。文献[16]针对机载与星载雷达给出了 12 种不同大气折射情形下的折射误差修正方法。文献[17]给出了俯视雷达在对流层内的大气折射误差修正方法,文献[18]给出了俯视雷达在电离层内的大气折射误差修正方法,文献[19-20]对俯视雷达工作时的临界俯角特

性进行了研究.

### 2.1.2 任意大气的射线描述法

对于下垫面复杂的雷达系统,或者雷达仰角很低的情形,由于雷达电波经过的大气环境的水平不均匀性较大,为了提高折射误差修正精度,需要考虑大气折射率的水平变化,即采用任意大气(或三维大气)模型进行折射误差修正.

由于任意大气层中的电波射线不再满足 Snell 定理,因此必须采用其他方法确定电波射线的轨迹.常用的任意大气的射线描述法主要有两种:基于费马原理的射线方程法和基于电波传播速度的射线规范方程法.

射线方程法的依据是费马原理,根据费马原理可以得到大气层中两点间的电波射线沿所需时间最小的路径,即该路径上时间的变分等于 0,其数学表达式为

$$\delta t = \delta \left( \frac{1}{c} \int_{R_g} n dR_g \right) = 0, \quad (4)$$

式中, $c$ 为光速, $n$ 为路径上的大气折射率, $R_g$ 为传播路径.

通过求解该变分方程就可以得到电波射线方程,再利用雷达测量的视在量就可获得折射误差<sup>[9]</sup>.

射线规范方程法是通过引入各向同性媒质中波的法向矢量概念,利用电波传播速度与大气折射率的关系来确定射线轨迹方程,再利用雷达测量的视在量获得折射误差<sup>[8-9,21]</sup>.

由于任意大气层电波折射误差修正方法较为复杂,且建立任意大气时需要的人力、物力很大,因此该方法在实际工程中的应用很少.

## 2.2 近似修正法

只要能够准确获得大气折射率剖面,利用射线描述法进行电波折射误差修正的精度很高.但是在实际工程应用中,一是射线描述法需要多次迭代积分,需要的计算时间较长,二是大气折射率剖面的精确获得不易,因此常常采用近似的折射误差修正方法.近似的方法主要分为 2 类:1) 在线算法,它是将现有的射线描述法进行数学上的优化处理,且采用统计出的大气折射率模型,在稍微降低折射误差修正精度的同时,尽力提高计算速度,减少处理时间.2) 简化算法,它是根据实际应用的具体情况对折射误差修正公式进行不同方式的简化,尽管这种简化方法的精度较低,但是其实时性和针对性较好.在实际应用中,每种方法的选用需根据实际的精度、时间、环境、计算机性能等要求综合考虑.

### 2.2.1 在线算法

雷达折射误差在线算法主要在确保修正精度的前提下尽力提高计算速度,以实现实时修正的功能.射线描述法的精度是目前公认的高精度方法,因此在线算法主要致力于射线描述法具体计算过程的优化.目前在线算法主要采用 2 类方式对射线描述法进行近似:1) 对折射误差修正公式中的积分计算进行相关处理或近似,2) 将积分形式变换为微分形式进行处理和近似.

积分形式的射线描述法是目前雷达折射误差修正的常用方法,对于实际应用它存在 2 个明显的局限性:1) 复杂的被积函数使得积分计算需要的处理时间较大,2) 雷达初始仰角接近于  $0^\circ$  时会使得积分方程出现计算的奇点,如积分中的分母近似为 0 情况.

对于第一个情况,常对积分形式的折射误差修正公式进行优化和近似,以实现快速积分计算.目前实现快速积分计算的方法主要有 2 种.1) 是将积分形式近似为累加形式,从而提高积分的计算速度,但是这种方法的关键在于累加步长的选取<sup>[22]</sup>.如果步长较大,在提高计算速度的同时会降低修正精度,反之亦然.因此,这种方法在实际应用中需要根据修正精度和计算速度综合选择累加步长.2) 首先由雷达测量的视在参数计算出目标近似高度.这样雷达天线中心到目标近似高度可以用一次积分完成.目标近似高度与目标真实高度之间的积分采用变步长迭代方法.这种方法可大量减少迭代次数,提高计算速度,且能够保证修正精度<sup>[23]</sup>.对于第二个情况,目前的处理方法不多,文献[24]给出了通过分部积分法处理这一问题的方法,文献[25]给出了以测站至目标的射线几何路径为积分变量的处理方法.

为了避开折射误差修正中积分计算的局限,提高计算速度,可采用将积分计算变换为微分计算的方法来实现这一目的<sup>[26]</sup>.折射误差修正的微分计算实际上就是一种基于光电传播几何路径的迭代算法.首先在传播几何路径上取微元,建立射线在微元下的几何关系,再利用微分形式下的 snell 定律就可以建立射线的微

分方程.这种基于微分方程的折射误差修正方法不仅具有较高的精度,而且计算速度也较快,即可解决修正精度和实时性相互兼顾问题<sup>[27-28]</sup>.

### 2.2.2 简化算法

射线描述法和在线算法中因为有积分或微分计算存在,使得很难满足雷达要求折射误差修正的实时性,并且计算也较为复杂.为了实现计算简便,且具有很高的计算速度,实际应用中常采用折射误差修正的简化算法,或称为简化模型.折射误差修正的简化算法很多,目前主要应用的有天文折射法、等效地球半径法、统计回归法、经验模型法、Hopfield法等.

#### 2.2.2.1 天文折射法

天文折射法是一种较原始和古老的折射修正方法<sup>[9]</sup>.它适用于目标足够高、仰角较大、修正精度要求不高的情况下.为了扩大应用范围,文献[29]给出了改进和变形的天文折射公式.目前常用的是将电波斜路径的时间延迟产生的折射误差看成天顶延迟的折射误差与映射函数的乘积.文献[30]给出了多种天顶延迟的计算和改进模型,文献[31]给出了多种映射函数的计算和改进模型.这些模型都是只考虑了电波射线延时折射误差,而没有考虑射线弯曲折射误差,因此其精度较低,不适合低仰角和低目标情形下的应用.

#### 2.2.2.2 等效地球半径法

大气折射效应使得雷达电波传播的射线为一曲线,此射线弯曲是相对地球半径而言.如果从射线曲率半径的定义出发,建立等效地球,使得在等效地球半径下,电波射线为一直线,这对于折射误差的计算就变得非常方便,这一思想即为折射误差修正的等效地球半径法.由于该方法的精度有限,因此常用于折射误差修正精度要求不太高的场合<sup>[7,32-33]</sup>.

#### 2.2.2.3 统计回归法

统计回归法是根据某地区历史上的大气参数和利用射线描述法计算出来的折射误差进行统计和回归,最终形成简便实用的折射误差修正公式<sup>[34-35]</sup>.这种方法得到的有关公式尽管简便,但是只能对于典型的地区有较高的精度,对于其他地区则误差较大,且不同的统计回归方法得到的有关公式也不尽相同.

#### 2.2.2.4 经验模型法

经验模型法就是针对以前简化公式的不足,增加一定的修正因子来提高修正精度.同样,增加修正因子的方法不同、选择的雷达体制不同,建立的经验模型也不尽相同<sup>[36-38]</sup>,但目的都是为了在一定程度上提高折射误差修正精度或扩大其应用范围.

#### 2.2.2.5 Hopfield法

为了提高大气剖面模型的精度,且简化折射误差修正的计算,有些学者常利用将折射率的干、湿项分离的四次方形式的Hopfield大气模型来进行折射误差修正<sup>[39-40]</sup>.由于Hopfield大气模型是利用全球有限的的数据得到,它对于我国的实用会有一些误差,在使用时需要有关参数进行校正或修订<sup>[41-42]</sup>.

## 2.3 新型修正法

除了依靠大气剖面的实际探测数据进行的射线描述方法,以及对利用大气统计模型、简化折射误差计算公式等的近似方法外,目前常用的较为新型的折射误差修正方法主要有3种:1)利用高灵敏度噪声接收机实时探测大气辐射亮温的辐射计法;2)利用GPS接收机获得大气参数的折射误差修正方法,简称GPS法;3)最近几年才提出的嵌入式电波折射修正仪法,简称电修仪法.这3种方法都是根据现实的需要而研究的实时折射误差修正方法.

### 2.3.1 辐射计法

引起雷达折射误差的关键因素是大气折射率,利用探空法可以获得较精确的大气折射率剖面,但是该方法存在成本高、受大气时变特性、电波射线上折射率代表性误差等影响<sup>[43]</sup>;大气折射率模型法尽管可以简化折射误差计算,且具有普适性,但是其精度不高,不能满足各种雷达系统精度要求.为了解决这些问题,近十几年来,许多研究者利用微波辐射计进行了实时折射误差修正技术研究.辐射计法主要针对相对于折射率干项变化大的折射率湿项进行折射误差修正.它主要分成2方面进行研究:1)根据单或多通道微波辐射计测量到的大气辐射亮温直接进行折射率湿项的折射误差修正.它是根据大气中的水汽含量不仅与折射率湿项引起的折射误差有关,而且又与大气的辐射亮温有关,从而建立辐射亮温与折射误差的关系.这种方法只能对

无穷远目标的距离量进行折射误差修正,对于近目标的折射误差修正精度较低,而且也无法对俯仰角和速度量进行折射误差修正<sup>[44-45]</sup>. 2)由辐射亮温经过各种方法反演出大气的折射率剖面,然后利用此折射率剖面根据射线描述法进行折射误差修正.这种方法可以对雷达的各种测量量进行折射误差修正,关键是要高精度地反演出大气折射率剖面.这是目前的研究热点之一<sup>[46-47]</sup>.

### 2.3.2 GPS法

十几年前,许多学者就将GPS中的折射误差计算方法应用于雷达领域,并取得了许多科研成果.在这些研究成果中,一部分是利用GPS接收信号直接进行电波折射误差修正的,但一般大都是用于电离层的折射误差修正,用于对流层的则较少<sup>[48-49]</sup>.另一部分是利用GPS信号进行大气折射率剖面的反演,从而实现折射误差修正<sup>[50-51]</sup>.

### 2.3.3 电修仪法

为了实现真正意义上的实时折射误差修正,提高在役雷达系统的精度,近几年提出了一种用于可嵌入到雷达系统中的电波折射误差修正仪.该设备的主要部件是高精度、快速折射误差修正软件和全国大气参数关系型数据库.只要确定雷达系统的地理位置和工作时间,就可实现实时折射误差修正的功能<sup>[52-53]</sup>.

## 3 雷达测速折射误差修正

目前国内外在雷达系统定位参数(距离、俯仰角和方位角)的折射误差修正方面研究的很多,对测速参数的折射误差修正技术的研究相对较少.大气对雷达电波的折射效应不仅引起定位误差,也引起测速误差.除位置外,目标的速度量也是确定其状态的重要参量,因此对于雷达的测速参量也需要进行折射误差修正.

目前测速折射误差修正应用最多的场合是单站雷达系统,其中的基于球面分层大气的雷达测速折射误差修正最为常用.在实际应用中,绝大多数是以相邻两点间距离折射误差的变化 $\Delta(\Delta R)$ 的时间差分来进行速度折射误差估算,即距离变化率(即速度的径向分量,也是雷达实际测量的速度参数)的折射误差<sup>[2,6,9]</sup>

$$\Delta \dot{R} = \frac{d(\Delta R)}{dt} \approx \frac{\Delta(\Delta R)}{\Delta t} \quad (5)$$

然而,由于距离折射误差 $\Delta R$ 有残差存在,且受限于雷达信号采样时间的差分时间 $\Delta t$ 也不可能很小.这样,用该方法进行速度折射误差修正不仅其精度较低,而且受差分时间的影响很大,因此这种方法或应用于精度要求较低的雷达系统,或需要通过大量的数据平滑后应用<sup>[54]</sup>.为了适合单站雷达系统的高精度速度折射误差修正,文献<sup>[55]</sup>利用方向余弦的思想给出了实用的速度折射误差修正方法.这种方法具有高精度、实用性和有效性,但其计算较为复杂.

多站雷达体制的速度折射误差修正方法较多,有些已在实际工程中得到了应用,如基于球面分层大气的3RR系统、干涉仪系统的测速折射误差修正方法<sup>[9,56]</sup>,基于任意大气的多站雷达测速折射误差修正方法<sup>[16,21]</sup>.

近年来,全测速体制雷达因其具有构成简单、误差源少、测量精度高、机动性强、布站方便等优点,已成为高精度测量领域的新选择<sup>[57]</sup>.该系统改变了以往雷达系统“测距——测速”的混合体制,测量参数只是一个或几个速度参量,形成“全测速”体制.目前,文献<sup>[58-59]</sup>尽管给出了单站测速体制雷达的测速折射误差修正方法,但是它的初值需要其他外测设备精确给出.这还不太适合全测速体制雷达实际工程应用.传统体制下的测速折射误差修正方法完全依赖高精度测距数据,如何找出全测速条件下的电波折射修正方法已成为目前全测速体制雷达中的关键技术之一.

## 4 展 望

以国防应用为主的雷达系统要实现高精度测量功能.为了提高探测空中目标的雷达系统测量精度,必须进行大气折射误差修正.针对现代国防建设的需要,今后的雷达大气折射误差修正技术主要应从以下几个方面进行研究:

1) 目前,低空和超低空飞行目标的高精度探测是雷达领域的研究重点之一,如何对该类目标实现快速

的高精度折射误差修正是提高雷达精度的关键因素。

2) 雷达在低角探测时,其回波信号是一个复杂的混合信号,包含多径、折射和其他干扰信号,如何分离这些信号,并进行折射误差修正是今后研究方向之一。另外,低角雷达测量远距离目标时,将地球再视为圆球会产生较大的误差,因此应研究真实地球坐标下的折射误差修正技术。

3) 大量的折射误差修正方法都是研究雷达进行地对空测量的情形,而今后雷达空对地的情形会很多,因此为了实际应用,也应研究各种空中雷达系统在空对地情况下的折射误差修正方法。

4) 为了实现折射误差的实时修正,应对在线修正方法继续研究,以实现综合提高修正精度和处理速度的功能。

5) 针对新型的全测速体制雷达,无论是单站或多站体系,都尽力寻求不依靠其他测距设备的速度折射误差修正方法,以提高雷达测速精度。

6) 对辐射计应用于折射误差修正方面应注重直接方法的深入研究,因为先反演获得大气剖面,再进行折射修正会降低处理的速度,影响应用的实时性。另外,需加强新型折射误差修正技术研究。

### 参 考 文 献

- [1] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 王 军,林 强,米慈中,等译. 2版. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] 张 瑜. 电磁波空间传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [3] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [4] 刘丙申,刘春魁,杜海涛,等. 靶场外测设备精度鉴定[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [5] 焦培南,张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [6] 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.
- [7] Bean B R, Dutton E J. Radio meteorology[M]. New York: Dover Publications, Inc, 1968.
- [8] 雷达电波传播折射与衰减手册:GJB/Z 87-97[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,1997.
- [9] 黄 捷. 电波大气折射误差修正[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [10] 张 瑜,胡笑君. 雷达方位角折射误差修正方法研究[J]. 现代雷达,2008,30(12):9-11.
- [11] 张洁寒,张新新,秦争艳,等. 卫星测控系统中的大气折射在线修正模型研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2011,39(1):65-68.
- [12] 杨豪强,贺秋瑞,漆世错,等. 水下目标定位中的声线折射修正方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2012,40(1):36-39.
- [13] 朱庆林,吴振森,赵振维,等. 单台地基卫星导航接收机测量对流层斜延迟[J]. 电波科学学报,2010,25(1):37-41.
- [14] 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):25-28.
- [15] 唐学海,刘伯阳. 一种基于椭球分层模型的电波折射修正算法[J]. 电子与信息学报,2015,37(6):1507-1512.
- [16] JIANG Changyin, WANG Beide. Atmospheric refraction corrections of radiowave propagation for airborne and satellite-borne radars[J]. Science in China(Series E), 2001,44(3):280-290.
- [17] 张 瑜,马耀庭. 空对地雷达精确定位的电波折射误差修正方法[J]. 电光与控制,2007,14(4):74-101.
- [18] 张洁寒,张 颖,闫 宇,等. 高空俯视雷达的大气折射修正与定位误差模型[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2014,42(6):47-50.
- [19] 张 瑜,杨成利,孙宏林. 计算俯视雷达临界俯角的经验公式[J]. 电波科学学报,2003,18(1):107-110.
- [20] 郭 丽,吴希德,王彰云. 低层大气折射对俯视雷达入射角的影响[J]. 雷达科学与技术,2003,1(1):26-29.
- [21] 江长荫,黄 捷. 任意大气层折射误差的实用修正方法[J]. 电子学报,1999,27(3):45-48.
- [22] 祝转民,李恒年,黄永宣,等. 电波折射误差修正的精确模型与在线算法[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(3):287-289.
- [23] 刘玉梅,陈祥明,赵振维,等. 高精度折光修正系统射线描述在线算法[J]. 电波科学学报,2015,30(4):123-127.
- [24] 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.
- [25] 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):16-17.
- [26] SHKAROFSKY I P, NICKERSON S R. Review of ray tracing techniques[J]. Radio science,1982,17(5):133-158.
- [27] 史水娥,杨豪强. 电波折射误差快速修正方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2012,40(4):168-171.
- [28] 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.
- [29] 谢益溪. 预报高空目标对流层折射的新公式[J]. 空间科学学报,1990,10(2):149-154.
- [30] 张捍卫,郑 勇,马高峰. VLBI中性大气折射延迟的研究进展——天顶延迟的改正模型[J]. 测绘科学,2003,28(2):53-57.
- [31] 张捍卫,郑 勇,马高峰. VLBI中性大气折射延迟的研究进展——映射函数的改正模型[J]. 测绘科学,2003,28(4):22-26.
- [32] BEAN B R. Tropospheric Refraction[J]. Advance in Radio Research,1964(1):59-62.
- [33] 刘永兰,刘进忙,贺正洪. 基于3R及大气折射修正的目标高度定位精度研究[J]. 计算机工程与科学,2012,34(11):190-196.
- [34] 杨志强,陈祥明,赵振维. 对流层电波折射误差修正经验模型研究[J]. 电波科学学报,2008,23(3):580-584.
- [35] HAN W J, ZHENG Y J, ZHANG W L. A new method for predicting tropospheric range error[J]. J Electronics, 1992,9(3):233-237.

- [36] 武征,潘佳梁,胡梦中. 测量雷达对流层大气折射误差修正方法研究[J]. 无线电工程, 2014, 44(2): 73-76.
- [37] 胡绍林,牛晓雷,许爱华,等. 电波折射误差的经验-分层修正算法[J]. 中国空间科学技术, 2003, 23(4): 67-71.
- [38] ALTSHULER E E. Tropospheric range-error corrections for the global positioning system[J]. J IEEE Trans on AP, 1998, 46(5): 643-649.
- [39] HOPFIELD H S. Troposphere effect on electromagnetic measured range; Prediction from surface weather data[J]. Radio Science, 1979, 6(3): 357-367.
- [40] 孙进平,王彦平,洪文,等. 大气折射对高分辨率机载 SAR 性能的影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(4): 681-685.
- [41] 肖复何. 霍普菲尔德对流层大气折射改正模式述评[J]. 测绘工程, 1998, 7(3): 7-11.
- [42] 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.
- [43] 张瑜,杨伏林,吴希德,等. 五九型探空仪对折射修正精度的限制[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 404-408.
- [44] ROBINSON S E. The profile algorithm for microwave delay estimation from water vapor radiometer data[J]. Radio Science, 1988, 23(3): 401-408.
- [45] 程显海,金燕波,曹培培. 对流层电波折射误差高精度实时修正[J]. 微波学报, 2012, (s2): 443-446.
- [46] 刘宗伟,刘夫体,甘友谊,等. 微波辐射计在雷达数据折射误差修正中的应用[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1153-1157.
- [47] 王宁,林乐科,程显海,等. 基于微波辐射测量的电波折射修正技术[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(6): 506-510.
- [48] 姚忠鑫. 基于 GPS 双频接收机的实时电离层延迟模型[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(10): 58-61.
- [49] PENG Z K, PETER W T. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(5): 974-988.
- [50] 刘宗伟,刘夫体,胡亚男. GPS 反演技术用于电波折射误差修正精度分析[J]. 遥测遥控, 2014, 35(1): 69-72.
- [51] 林乐科,张业荣,赵振维,等. 基于支持向量机的地基单站 GPS 反演大气剖面[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, 29(4): 64-68.
- [52] 张瑜,李雪萍,张磊昂,等. 雷达嵌入式大气折射修正仪[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(4): 23-26.
- [53] 张瑜,张洁寒. 全国大气折射率剖面预测方法[J]. 电光与控制, 2011, 18(7): 46-48.
- [54] 贺明科,朱炬波,马顺南,等. 融合距离变化率的微分平滑[J]. 中国空间科学技术, 2003, 28(2): 11-14.
- [55] 张瑜,史莹莹,张洁寒. 单脉冲雷达速度量折射误差高精度修正方法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 530-534.
- [56] 孟庆海,张瑜. 3R 系统电波折射修正的实用方法[J]. 电波科学学报, 2003, 18(4): 437-439.
- [57] 郭军海,吴正容,黄学德,等. 多测速雷达弹道测量体制研究[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(3): 5-11.
- [58] 甘友谊. 全测速新体制下的电波折射修正方法研究与应用[J]. 导弹试验技术, 2005, (1): 46-49.
- [59] 李坦,郭军海,李明. 基于分段模型的测速雷达电波折射误差修正方法[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(3): 39-43.

## Current Status and Prospect of Researches on Atmospheric Refraction Error Correction Method in Radar System

ZHANG Yu<sup>a,b</sup>, GAN Liping<sup>a</sup>

(a. College of Electronic and Electrical Engineering; b. Henan Key Discipline Open Laboratory of Electromagnetic Wave Detecting, Henan Normal University, Xixiang 453007, China)

**Abstract:** Radar is one of common methods that measure the location and velocity of target and its measurement error needs to be corrected as a result of atmospheric refraction effect in order to improve the measurement accuracy of radar. To begin with, the problem description and corrected idea of atmospheric refraction error in radar system are given briefly in the paper. Next, the paper not only elaborates in detail the researches and application status of radio-wave refraction error correction technology in localization of radar which includes the ray tracing method, approximate correction method, new-type correction method and so on, but also elaborates the researches and application status of several refraction error correction methods on radar speed measurement. At the same time, the range of application, advantages and disadvantages of various refraction error correction methods are also analyzed briefly. Finally, the paper points out the future research direction of the atmospheric refraction error correction technology in radar system.

**Keywords:** radar; refraction error; correction; localization; speed measurement