

# 复杂环境地区电波折射修正中的折射率精确获取方法

张瑜,李海涛,李爽

(河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007)

**摘要:**雷达电波射线上大气折射率的准确性是提高电波折射误差修正精度的关键因素之一.对下垫面复杂地区的雷达系统,常用的大气球面分层法因没有考虑大气水平方向变化使得电波射线上的折射率具有较大的误差,从而影响了电波折射误差修正精度.针对下垫面复杂地区的三维大气结构,提出了获得电波射线上大气折射率的组合方法,即在雷达所在地采用直接探测法,在其他电波射线上,先计算出射线点的位置,然后再利用已建立的全国大气剖面模型数据库得到该位置的大气折射率,从而较为精确地获得电波射线上的大气折射率.经实验验证,采用组合法获得的电波射线上的折射率不仅具有较好的精度,而且可有效地提高电波折射误差修正精度,进而提高下垫面复杂地区的雷达探测精度.

**关键词:**雷达;折射误差修正;下垫面复杂地区;电波射线;折射率

**中图分类号:** TN011

**文献标志码:** A

随着电子器件精度的进一步提高,以及信号与数据处理方法的进一步发展和优化,作为现代战争中不可或缺或雷达系统的探测精度受制于电波折射误差修正精度的程度越来越高<sup>[1-3]</sup>.电波折射误差主要是由于雷达的电波通过不均匀的大气而产生的.根据目前的电波折射误差修正研究和实际应用情况,电波折射误差计算公式本身的精度较高,主要影响其修正精度的关键因素是电波射线上大气折射率的精确度<sup>[2-5]</sup>,因此要提高电波折射误差修正精度的关键是要提高测算电波射线上的大气折射率的准确度.

对流层大气中的折射率主要由直接探测法、统计法、公式法和反演法 4 种方法获得<sup>[4-8]</sup>.直接探测法是利用“五九”型探空仪、电子探空仪、ADAS 探测系统等探测仪进行不同高度处的大气温度、气压和湿度等参数探测,然后利用大气折射率与温度、气压和湿度的函数关系计算出对应高度处的大气折射率值,进而得到雷达所在地的大气折射率剖面.它是一种由高度和折射率组成的离散剖面.统计法是通过大量的雷达所在地的大气折射率剖面的统计,给出一种大气折射率的数学模型.目前该模型精度最高的是分段模型<sup>[9]</sup>.公式法是利用国际上给出的 Hopfield, Saastamoinen 等公式计算大气折射率剖面<sup>[10-11]</sup>.反演法是利用微波辐射计或 GPS 等在雷达所占地进行测量,进而反演出该地的大气折射率剖面<sup>[12-13]</sup>.就获得大气折射率剖面的精度而言,这 4 种方法中直接探测法的精度最高,其次是统计法.直接探测法获得的大气折射率剖面是实时测量,基本上不存在大气的时变误差.统计法是根据本地的大气折射率实测剖面进行统计,尽管它具有一定的误差,但建立的模型更有利于电波折射误差计算.而公式法中的公式参数是利用国外的气象参数统计得到,国外的气象条件与我国的存在差异,因此该方法在我国应用会产生较大的误差.利用微波辐射计或 GPS 的反演法由于存在反演的精度和仪器本身的误差,其精度也较低.

在下垫面平坦地区,大气折射率在水平方向上的变化很小,折射率在水平方向的变化比垂直方向低 1~3 个数量级,可假设大气只在垂直方向上变化,因此可将大气折射率视为只随高度变化的一维剖面,即将大气视为球面分层大气.这种情况下,电波射线任意位置的折射率只要利用直接探测法实测雷达所在地相同高

收稿日期:2018-08-27;修回日期:2019-01-13.

基金项目:国家自然科学基金(61077037);河南省科技攻关计划项目(172102210046).

作者简介:张瑜(1963-),男,河南沁阳人,河南师范大学教授,主要从事电磁场与微波技术理论与应用研究,E-mail:hsdzhangyu@126.com.

通信作者:李爽,E-mail:1085178269@qq.com.

度折射率即可得到。

在下垫面复杂地区,尤其是起伏较大的山区或者海路交界处等地,由于大气折射率在水平方向上变化较大,只考虑垂直方向上变化会产生较大的误差,因此大气折射率应采用三维大气剖面。事实上,大气在水平方向上的变化很难获得,如果采用在电波射线经过区域进行有限数量的大气折射率直接探测,不仅成本高,而且定位精度差,难以得到精确水平变化特征。

为了提高下垫面复杂地区电波折射误差修正精度,本文提出了在工程上容易实现的组合大气测量方法,即在雷达所在地采用直接探测法,在电波射线上其他位置的大气折射率则通过事先由统计法建立的大气剖面数据库获得。

## 1 大气剖面数据库建立

为了建立全国大气折射率剖面数据库,根据我国地理位置范围(经、纬度)和无线电气象环境变化的特点<sup>[6]</sup>,采用大气环境栅格技术将全国划分成 1 840 个栅格。目前我国能够常年进行大气参数探测的气象站共有 100 多个。这样绝大多数栅格内没有探空数据,只有少量的栅格内有实测探空数据。当栅格内没有探空数据时,选用相邻有探空站的 4 个栅格内的同时间数据,利用拉格朗日插值公式求得该栅格内的同时间大气剖面,这样就使得各个栅格内都具有大气剖面数据。

在对流层大气折射率的诸多模型中,分段模型具有较高精度<sup>[6]</sup>。其模型为

$$N(h) = \begin{cases} N_0 + G(h - h_0), & h_0 \leq h \leq (h_0 + 1 \text{ km}), \\ N_1 \exp[-c(h - h_0 - 1)], & (h_0 + 1 \text{ km}) < h \leq 9 \text{ km}, \\ N_9 \exp[-c_9(h - 9)], & 9 \text{ km} < h < 60 \text{ km}, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $h_0$  为地面海拔高度;  $N_0$  为地面大气折射率;  $G$  为地面到 1 km 高度的折射率梯度;  $N_1$  为距地面 1 km 高度上的大气折射率;  $N_9$  为海拔 9 km 高度上的大气折射率;  $c$  为地面 1 km 至海拔 9 km 大气层的衰减系数;  $c_9$  为海拔 9 km 以上高度大气层的衰减系数。

利用 20 年全国大气探空数据对每个栅格内进行分月份统计,各个探空站每天都有 2 次大气剖面实际探测数据,则每个栅格内每月共有 1 200 组探空数据。在这些数据中除去特殊天气外的数据后按(1)式进行统计,可得到约 1 200 个参数  $N_{0i}, G_i, c_i, c_{9i}$ 。再将  $N_{0i}$  与  $G_i, N_{0i}$  和  $c_i$  进行回归统计,就可建立各个栅格内每个月的  $G$  与  $N_0, c$  与  $N_0, c_9$  与  $N_0$  的关系式,最后建立由栅格(经纬度),地面高度  $h_0$ ,月份,  $G$  与  $N_0, c$  与  $N_0, c_9$  与  $N_0$  的回归系数等组成的大气剖面模型数据库<sup>[14]</sup>。

在实际应用中,只要确定月份,再通过插值方法得到每个栅格内的地面折射率  $N_0$ ,利用该数据库就可得到  $G_i, c_i, c_{9i}$ ,进而利用(1)式得到该区域内的大气折射率模型  $N(h)$ 。

## 2 电波射线上大气折射率获取方法

电波折射误差修正采用目前公认精度最高的射线描述法。雷达电波射线的开始位置是在雷达所在的栅格内,大气折射率剖面由直接探测方法得到。当电波射线落到其他栅格内时则通过数据库得到该栅格内的大气折射率剖面,用此折射率剖面进行折射误差计算,从而减小电波射线上的折射率误差。

### 2.1 电波射线点位置的计算

采用大气坐标系( $L, B, h$ )和空间大地直角坐标系( $X, Y, Z$ )来描述电波射线上的任意点。它们是同一点的 2 种坐标表示方式,如图 1 所示。

在空间大地直角坐标系中,地球中心  $O$  为坐标的原点;  $Z$  轴是地球(椭球)的旋转轴,指向地球自转轴方向;  $X$  轴指向起始大地子午面与赤道的交点(经度零点);  $Y$  轴与  $X, Z$  轴构成右手坐标系,  $X, Y$  轴构成赤道面。

空间的一点  $P$  在大地坐标系中用大地经度  $L$ 、大地纬度  $B$  和大地高度  $h$  表示,其中,过  $P$  点大地子午面与起始大地子午面的夹角为大地经度;  $P$  点对椭球面的法线与赤道面的夹角为大地纬度;  $P$  点沿法线至椭球面的距离为该点的大地高度。

假设雷达探测到的视在距离、仰角和方位角分别为  $R_e, \theta_e$  和  $\varphi_e$ , 其中, 由于大气的水平方向变化很小, 方位角产生的折射误差很小, 可以忽略不计. 假设雷达电波射线的起始点的大地坐标为  $(L_0, B_0, h_0)$ , 空间大地直角坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ . 在电波射线描述时一般都是设定高度步长为  $\Delta h$ , 则电波射线上任意一点  $i$  的离  $(X_0, Y_0, Z_0)$  地高度  $h_i = h_{i-1} + \Delta h$ .

由雷达测量参数可以得到电波射线上任意一点上的空间大地直角坐标为

$$\begin{cases} X_i = X_{i-1} + D_i \cos \varphi_e, \\ Y_i = Y_{i-1} + D_i \sin \varphi_e, \\ Z_i = Z_{i-1} + h_i \sin \theta_i, \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $i = 1, 2, 3, \dots$ .

根据电波传播理论可以得到

$$\theta_i = \frac{n_0 r_0 \cos \theta_e}{n_i (r_0 + r \Delta h)}, \quad (3)$$

$$D_i = \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{n_0 r_0^2}{(r_0 + i \Delta h) \sqrt{n_i^2 (r_0 + i \Delta h)^2 - (n_0 r_0 \cos \theta_e)^2}} dh, \quad (4)$$

式中,  $n_0, n_i$  分别为地面和高度  $i$  处的大气折射率,  $r_0$  为雷达到地心的距离.

为了从全国大气剖面模型数据库中选择电波射线上任意点所对应的位置, 应将空间大地直角坐标转换成大地坐标系对应参数  $(L_i, B_i)$ , 即

$$\begin{cases} L_i = \arctan\left(\frac{Y_i}{X_i}\right), \\ B_i = \arctan\left[\frac{Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} \left(1 + \frac{ae^2}{Z_i} \cdot \frac{\sin B_i}{W}\right)\right], \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_i}$ , 地球参考椭球体长半轴  $a = 6\,378\,140$  m; 地球参考椭球体第一偏心率的平方  $e^2 = 0.006\,694\,384\,875\,25$ .

## 2.2 电波射线点大气折射率获取

在电波折射误差计算中, 电波射线点上大气折射率采用如下方法获得.

1) 雷达电波射线开始点处采用当地直接探测到地面大气折射率  $n_0, n_0 = 1 + N_0 \times 10^{-6}$ .

2) 由(2)~(5)式得到电波射线任意点的大地坐标  $(L_i, B_i)$ .

3) 根据  $(L_i, B_i)$  判别该点所处的栅格. 当该点处于雷达所在地的栅格时, 采用该地直接探测的大气折射率剖面; 当该点处于其他栅格时, 先利用水平插值方法获得该栅格的地面大气折射率  $N_0$ , 再利用全国大气剖面模型数据库该栅格建立的剖面模型进行高度插值获得电波射线处的大气折射率值.

## 3 实验与分析

为了验证本文提出的利用组合方法获得电波射线上大气折射率对电波折射误差修正的效果, 利用某基地地面雷达对目标的实际测量参数和目标的真实位置, 以及当时实测雷达处的大气剖面 and 全国大气折射率剖面模型数据库进行折射误差的计算和比对.

试验中, 目标是一个携带有 GPS 的飞机, 它能给出目标的真实位置, 其目标飞行航线如图 2 所示. 目标逐渐远离雷达, 使得仰角从约  $60^\circ$  逐渐减小到  $5^\circ$  左右, 距离则逐渐增加. 根据雷达测量参数可以计算出目标飞行高度大约都在海拔 8 km.

将目标(飞机)上带有的 GPS 参数作为目标的真实位置, 利用该目标真实位置和雷达的地理位置计算出

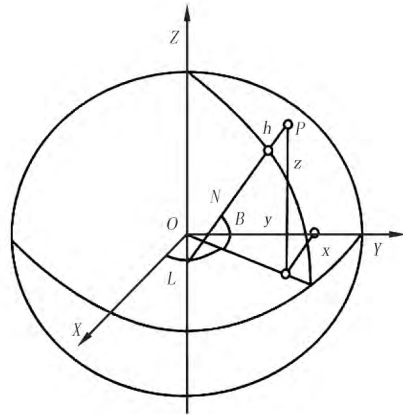


图1 大地坐标系与空间大地直角坐标系

Fig.1 Geodetic coordinate system and space geodetic rectangular coordinate system

雷达到目标的真实距离  $R_0$  和仰角  $\theta_0$ .将雷达实测的视在距离  $R_e$  和视在仰角  $\theta_e$  减去相应的真实量,可得到电波折射引起的真实距离误差  $\Delta R_0 = R_e - R_0$  和真实仰角误差  $\Delta\theta_0 = \theta_e - \theta_0$ .

利用大气球面分层法和组合法进行获得电波射线上的大气折射率进行折射误差计算,得到的距离折射误差分别为  $\Delta R_1, \Delta R_2$ , 仰角误差分别为  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ .将 2 种计算出的折射误差减去真实折射误差,即  $\Delta R_1 - \Delta R_0$  与  $\Delta R_2 - \Delta R_0, \Delta\theta_1 - \Delta\theta_0$  与  $\Delta\theta_2 - \Delta\theta_0$ , 称为残差,可得到 2 种不同大气折射率获取方法对电波折射误差修正精度的影响,如图 3 所示.

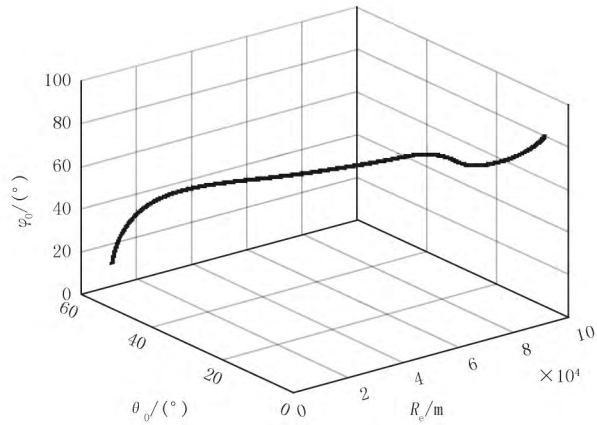


图2 目标飞行航线  
Fig.2 Target flight route

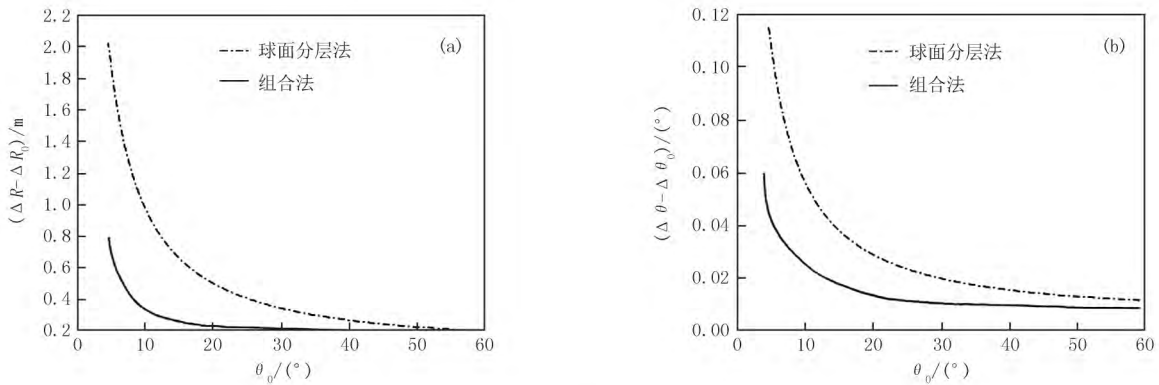


图3 2种大气折射率剖面获取方法对电波折射误差修正的残差比较  
Fig.3 Residual error comparison of two atmospheric refractivity profile acquisition methods for correction of radio refraction error

图 3(a)和图 3(b)分别运用球面分层法和组合法对电波折射误差的距离残差和仰角残差随仰角变化的仿真结果对比.利用目标(飞机上)带有 GPS 参数,当目标逐渐远离雷达,使得仰角从约  $60^\circ$  逐渐减小到  $5^\circ$  左右.随着仰角的增大,球面分层法和组合法这两种大气折射率剖面获取方法都使得电波折射误差修正的精度逐渐增高,即残差逐渐减小.低仰角时,用组合法获得大气折射率引起的残差远远小于球面分层法.在仰角  $\theta_0 = 4.5^\circ$  时其距离残差  $\Delta R_2 - \Delta R_0$  只是球面分层法  $\Delta R_1 - \Delta R_0$  的 37.5%, 仰角残差  $\Delta\theta_2 - \Delta\theta_0$  只是球面分层法  $\Delta\theta_1 - \Delta\theta_0$  的 35.3%.可以预见,当雷达仰角更低时,组合法比球面分层法获得的大气折射率剖面更能有效地降低折射误差的残差,更能有效地提高电波折射误差修正的精度.在实际工程应用中,当雷达系统的下垫面复杂时,为了提高电波折射误差修正精度,当雷达仰角小于  $30^\circ$  时,最好采用组合法获得电波射线上的大气折射率剖面,当雷达仰角大于  $30^\circ$  时,为了简化计算,可以采用球面分层法获得电波射线上的大气折射率剖面.

### 4 结 论

下垫面复杂地区的折射率剖面变化较大,采用大气球面分层方法建立雷达测量区域的折射率剖面会产生较大的误差,进而影响电波折射误差修正精度.采用在雷达所在地的大气剖面直接探测法与利用栅格技术建立全国大气折射率剖面模型数据库形成的组合法,可以有效提高电波射线上折射率的准确度,进而提高电波折射误差修正的精度.尽管在下垫面复杂地区可以通过布设大量的探空站进行雷达电波射线经过区域的三维大气测量,但是这种方法不仅会极大增加人力物力,而且由于同型号的探空仪探测中需要解决同频干

扰问题,在技术上不易实现.同时,受下垫面地理环境的影响,各个探空站之间毕竟不能相距很近.另外,采用大气剖面的直接探测法时一般探空仪都是由氢气或氦气携带的自由升空,它会受到风的影响产生漂移.所有这些因素都会影响建立的三维大气剖面的精度,本文的组合方法可以有效减少因上述问题产生的雷达探测误差.

### 参 考 文 献

- [1] Merrill I S.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,甘利萍.大气折射修正研究现状与展望[J].河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(4):43-52.
- [3] 李雪萍,王立,甘利萍,等.基于电阻加载技术的超宽带天线系统设计与实验[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(2):29-34.
- [4] 黄婕.电波大气折射误差修正[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [5] 詹华伟,詹海潮,赵勇.基于RSSI极大似然估计定位算法的改进与实现[J].河南师范大学学报(自然科学版),2018,46(5):37-41.
- [6] 张瑜.电磁波空间传播[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [7] 范建业.大气波导探测方法研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Hopfield H S, Anguileppan P V. Improvements in the Tropospheric Refraction Correction for Range Measurement[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1980, 294: 341-352.
- [11] Saastamoinen J H. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bulletin Geodesique, 1973, 105: 279-298.
- [12] 李江漫,郭立新,林乐科,等.微波辐射计与GPS联合反演大气折射率[J].微波学报,2013,29(4):43-47.
- [13] 廖麒麟,石汉青,俞宏,等.低高度角地基GPS联合反演大气折射率廓线[J].气象科学,2016,36(1):128-133.
- [14] 甘利萍.全国对流层大气折射率剖面建模研究[D].新乡:河南师范大学,2016.

## A method for accurately obtaining refractive index of radio wave refraction correction in complex environment

Zhang Yu, Li Haitao, Li Shuang

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** The accuracy of atmospheric refractive index on radar wave is one of the key factors to improve the of correction accuracy of radio wave refraction error. For radar systems in complex areas of underlying surface, the atmospheric spherical stratification method does not take the variation of horizontal direction of atmosphere into account, which makes the refractive index of radio wave ray have a large error, thus affecting the correction accuracy of radio wave refraction error. In view of the three-dimensional atmospheric structure in the complex area of the underlying surface, a combined method for obtaining the atmospheric refractive index on the radio wave ray is proposed, that is, the direct detection method is used in the radar location, and the position of the ray point is first calculated on the other radio wave rays. Then the atmospheric refractive index of this position is obtained by using the established national atmospheric profile model database, and the atmospheric refractive index on the radio wave ray is obtained more accurately. It is verified by experiments that the refractive index obtained by the combination method not only has better accuracy, but also can effectively improve the correction accuracy of the radio wave refraction error, and then improve the radar detection accuracy in the complex area of the underlying surface.

**Keywords:** radar; correction of refractive error; complex area of underlying surface; radio wave; refractive index

[责任编辑 杨浦 王凤产]