

引用格式:张瑜,李爽,李海涛.高精度大气折射率插值方法研究[J].电光与控制,2019,26(7):65-69. ZHANG Y, LI S, LI H T. Research on high-precision atmospheric refractive index interpolation method[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7):65-69.

高精度大气折射率插值方法研究

张瑜, 李爽, 李海涛
(河南师范大学电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 高精度的电波折射误差修正是提高雷达探测精度的关键因素之一,而雷达电波射线上大气折射率的准确性又对电波折射修正精度具有很大影响。针对目前大气折射率的线性插值方法引起电波射线上折射率出现较大误差情形,根据大气折射率变化规律,提出了分段大气插值方法,即第一段大气采用线性插值方法,第二段大气采用指数插值方法。利用大气折射率实际探测数据对线性插值和分段插值两种方法得到的电波射线上折射率进行比较,证明了分段插值方法具有较高的精度;利用两种方法得到的大气折射率进行电波折射误差计算,经与雷达实际测量数据比较,证明了分段大气插值方法可有效地提高电波折射修正精度,进而可确保雷达的高精度探测。

关键词: 雷达; 折射误差修正; 折射率; 插值

中图分类号: TN011 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.013

Research on High-Precision Atmospheric Refractive Index Interpolation Method

ZHANG Yu, LI Shuang, LI Hai-tao

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

Abstract: High-precision correction of radio wave refraction error is one of the key factors for improving the accuracy of radar detection. The accuracy of atmospheric refractive index on radar radio wave ray has a great influence on the accuracy of radio wave refraction correction. In view of the fact that the current linear interpolation method of atmospheric refractive index causes a large error in the refractive index on the radio wave ray, a piecewise atmospheric interpolation method is proposed according to the law of the variation of atmospheric refractive index, in which the linear interpolation method is used on the first section of the atmosphere, and the exponential interpolation method is employed on the second section of the atmosphere. The actual detected data of the atmospheric refractive index is used to compare the refractive indices on the radio wave ray obtained by linear interpolation and piecewise interpolation, and it is proved that the piecewise interpolation method has higher accuracy. The atmospheric refractive index obtained by the two methods is used to calculate the radio wave refraction error. It is proved that the piecewise atmospheric interpolation method can effectively improve the accuracy of radio wave refraction correction, and thus ensure the high-precision detection of the radar.

Key words: radar; refraction error correction; refractive index; interpolation

0 引言

众所周知,雷达是现代战争中不可或缺的一种探测设备。高精度的雷达不仅可以对目标进行精确的定

位和测速,而且能够对目标进行准确识别,从而为攻击和防御系统的有效运行奠定坚实基础。

在雷达从地面对空中目标的探测中,雷达无线电信道是空中大气。由于空中大气是折射率不等于1的不均匀媒质,因此雷达在工作中,其电波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等,最终导致雷达在对目标探测中产生折射误差^[1-3]。为了提高雷达的探测精度,必须对大气引起的折射误差进行修

收稿日期:2018-08-27

修回日期:2018-09-10

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,学士,教授,高工,研究方向为电磁场与微波技术应用。

正。其中,大气折射误差修正精度将直接影响雷达对目标的定位和测速精度。

针对对流层电波传播,决定大气折射误差修正精度的主要因素有两个:一个是电波折射修正算法误差,称为公式误差;另一个是电波折射修正中采用的空中大气折射率剖面(随高度变化)误差,称为大气折射率误差。而在电离层影响大气折射修正误差的主要因素为电子密度的获得^[4]。经过几十年的研究,电波折射修正的公式误差已很小,常采用雷达所处的大气折射率来预测电波传播的大气剖面,再经过电波射线描迹法推出电波折射,此修正算法已具有很高的精度^[5-7]。目前限制电波折射误差修正精度的主要因素是大气折射率误差,这就需要在实际应用中精确获得雷达电波射线处的大气折射率。

大气折射率剖面的获取方法较多,按种类划分主要包括直接探测法、模式法和反演法等3种^[6,8-9]。直接探测法主要是在雷达所在地采用五九型探空仪、电子探空仪、ADAS探测系统等进行不同高度处的大气温度、气压、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,从而获得雷达所在地的大气折射率剖面,称为离散剖面;模式法是对雷达所在地的大气折射率剖面进行多次探测,然后对这些数据进行统计,获得该地的大气折射率模型,如建立大气折射率与测角之间的数学模型后,再进行折射修正^[10];反演法是利用微波辐射计或GPS等在雷达所在地进行测量,进而反演出该地的大气折射率剖面^[11-12]。这3类方法相比较,直接探测法获得大气折射率剖面的精度最高,这也是高精度电波折射修正中采用该方法获得大气折射率剖面的缘故。

在大气折射率的直接探测法中,探测器一般由氢气球或氦气球携带自由升空,探测器每隔10s左右发出一组大气参数,因此,采用直接探测法获得的大气折射率剖面是不等高度间隔的离散数据,即不同的离地高度与相应高度处的大气折射率值。在电波折射修正中,为了确保计算精度,一般描述电波射线的步长很短,这样电波折射计算中用到的各点处大气折射率需要通过已获得的大气离散剖面进行插值得到。目前在应用于电波折射修正的大气折射率的所有插值方法中,都采用线性插值算法,即没有实测值的折射率由该高度前后两个相邻的实测值进行线性插值得到。根据大气折射率随高度的变化规律可知,大气折射率随高度一般分为3段变化。第1段(地面到离地1km范围)的大气折射率随高度呈线性衰减,第2段(地面1km到海拔9km范围)和第3段(海拔9km到对流层顶60km)的大气折射率

随高度呈指数衰减,但是这两段大气的指数衰减系数不同。如果在电波折射修正中,第1段大气电波射线上的折射率采用线性插值的精度是较高的,但是若在第2或第3段大气采用线性插值,由于大气直接探测得到的离散数据的相邻高度一般都在几百米或几千米,线性插值与实际大气折射率变化规律不相符,因此会产生较大的误差,进而影响电波折射修正精度,最终影响雷达的探测精度。

本文通过对不同的分段大气采用不同的插值方法,比较与直接采用线性插值获得电波射线上大气折射率的精度。同时,对利用两种插值方法得到的电波射线上折射率进行电波折射误差计算的比较,以确定两种插值方法对电波折射误差修正精度的贡献。

1 电波射线大气折射率插值方法

目前公认电波折射误差修正精度最高的是射线描迹法。在利用射线描迹法进行折射误差计算时,需要用很小的步长计算出电波射线经过的路径,这就需要利用很小高度步长,以及它对应的大气折射率值。由于直接探测法得到的大气折射率剖面是高度相距较大的离散数据,因此在相邻高度之间的折射率需要进行插值获得。

1.1 大气折射率线性插值方法

假设电波折射误差修正中需要高度 h_i 处的大气折射率 N_i ,而 h_i 处于实测大气折射率剖面中的高度 h_j 和 h_{j+1} 之间,它们对应的大气折射率分别为 N_j 和 N_{j+1} ,则采用线性插值可得^[13-14]

$$N_i = N_j + \frac{N_{j+1} - N_j}{h_{j+1} - h_j} \times (h_i - h_j) \quad (1)$$

利用式(1)对所有的大气折射率实测剖面进行计算,可以得到不大于实测大气折射率剖面最大高度 h_T 以内的各个高度上的大气折射率值。

当需要超过高度 h_T 以外的各个高度 h_i 处的大气折射率 N_i 时,可用外推方法得到,即

$$N_i = N_{T-1} + \frac{N_T - N_{T-1}}{h_T - h_{T-1}} \times (h_i - h_{T-1}) \quad (2)$$

这样,利用式(1)和式(2)可以得到电波折射误差修正中所需任意高度处的大气折射率。

1.2 大气折射率分段插值方法

全国大量探测数据统计表明,大气折射率随高度呈现不同的变化规律。在地面到离地1km范围的呈线性衰减,地面1km到海拔9km和海拔9km到海拔60km高度范围呈不同的指数衰减,这样为了提高插值精度,采用分段插值方法获得电波折射误差修正需要不同高度处的大气折射率。

大气折射率随高度分布的模型为^[15]

$$N(h) = \begin{cases} N_s + G(h - h_s) & h_s \leq h \leq h_s + 1 \text{ km} \\ N_1 \exp[-C_1(h - h_s - 1)] & h_s + 1 < h \leq 9 \text{ km} \\ N_9 \exp[-C_9(h - 9)] & 9 \text{ km} < h < 60 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $N(h)$ 为海拔 h 处的大气折射率； N_s, h_s 分别为地面大气折射率和海拔高度； G 为 h_s 到 $h_s + 1$ 之间的大气折射率垂直梯度，单位 $1/\text{km}$ ； N_1 为 $h_s + 1$ 高度处的大气折射率； C_1 为 $h_s + 1$ 与海拔 9 km 之间大气衰减系数，单位 $1/\text{km}$ ； N_9 为海拔 9 km 高度处的大气折射率； C_9 为海拔 9 km 以上高度大气衰减系数，单位 $1/\text{km}$ 。

在地面到离地 1 km 范围，大气折射率呈线性衰减，在这一范围内的折射率可采用线性插值方法得到；在地面 1 km 到海拔 9 km 和海拔 9 km 到海拔 60 km 高度范围内，大气折射率都呈指数衰减，在这一范围内的折射率可采用指数插值方法得到。

电波折射误差修正中需要不同高度对应的折射率插值的过程如下所述。

1) 当需求高度为离地 1 km 范围内时，根据实测探空离散数据由式(1)的线性插值法得到该范围内不同高度对应的大气折射率。注意：实测探空离散数据取到大于离地 1 km 处的第一个数据为止，同时计算出离地 1 km 处的大气折射率 N_1 ，其对应的海拔高度为 h_T 。

2) 当需求高度为离地 1 km 到最大实测探空离散数据最高处 h_T 范围内时，假设大于 $h_s + 1$ 高度的第一个实测大气折射率剖面的高度为 h_{k+1} ，对应的大气折射率为 N_{k+1} ，在 $h_s + 1$ 高度处的大气折射率为 $N_k, N_k = N_1$ ，对应的高度为 $h_k = h_s + 1$ 。则首先计算出实测探空离散数据中相邻两高度 h_k 和 h_{k+1} 之间的衰减系数 C_k ，即

$$C_k = -\frac{\ln N_{k+1} - \ln N_k}{h_{k+1} - h_k} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

对于两高度 h_k 和 h_{k+1} 范围内不同高度对应的大气折射率 N_i ，可得

$$N_i = N_k e^{-C_k(h_i - h_k)} \quad (5)$$

3) 当需求高度大于实测探空离散数据最高处 h_T 时，由于此部分没有实测数据，只能用全国大气探测数据统计结果，即 $C_9 = 0.1424$ 。对于该部分大气折射率，首先由式(4)和式(5)计算出海拔 9 km 高度处的大气折射率 N_9 ，然后根据如下算式计算电波折射误差修正需要高度的大气折射率 N_i ，即

$$N_i = N_9 e^{-C_9(h_i - 9)} \quad (6)$$

通过以上3步可以计算出完整的电波折射误差修正所需要的各高度上的大气折射率值。

2 仿真分析

为了验证分段大气折射率插值方法的精度以及它

对电波折射误差修正精度的影响，采用某地区7月份的一个典型的大气折射率实测剖面进行比对。

2.1 大气折射率实测剖面

利用一个五九型探空仪在某地区进行大气探测。五九型探空仪探测数据是不同高度对应的大气温度、气压和相对湿度等参数，再利用式(7)、式(8)计算不同高度对应的大气折射率，即

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (7)$$

式中： N 为大气折射率； p 为大气压强，单位 hPa ； T 为空气热力学温度，单位 K ($T = 273 + t$, t 为空气摄氏温度，单位 $^\circ\text{C}$)； e 为大气中水汽分压强，单位 hPa 。大气折射率实测结果如表1所示。

$$e = a \cdot \exp\left(\frac{b \cdot t}{c + t}\right) \cdot \frac{R_{RH}}{100} \quad (8)$$

式中： a, b, c 分别为与空气温度有关的系数^[15](见表2)； R_{RH} 为空气相对湿度，单位 $\%$ 。

表1 大气折射率实测剖面

Table 1 Measured section of atmospheric refractive index

序号	海拔高度/m	气压/hPa	温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/ $\%$	折射率/ N
1	42	999	26.6	44	323.5
2	1439	850	15.0	54	271.1
3	3050	700	4.4	24	205.8
4	5719	500	-9.3	29	151.6
5	7405	400	-20.7	19	124.1
6	9457	300	-38.3	24	99.4
7	10684	250	-47.9	36	86.3
8	12125	200	-57.1	33	71.9
9	13952	150	-55.3	29	53.5
10	16521	100	-57.9	28	36.1
11	18770	70	-57.5	28	25.2
12	20904	50	-55.3	25	17.9
13	24183	30	-52.3	23	10.6
14	26825	20	-48.7	24	7.0

表2 系数 a, b 和 c 值

Table 2 Values of coefficients a, b and c

系数	$t, t_d \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t, t_d < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
a	6.1121	6.1115
b	17.502	22.452
c	240.97	272.55

2.2 折射率线性与分段插值方法的误差比较与分析

将表1中的实测大气折射率剖面分别用常用的线性插值和本文给出的分段插值进行计算，同时随机挑选出几组实测数据作为真值，这几组实测数据作为未知量进行插值。将插值得到的这几组数据中的高度对应的折射率与真值进行比对，结果如表3所示。

表3 大气折射率插值误差

Table 3 Atmospheric refractive index interpolation error

序号	海拔高度/ km	实测折射 率/N	线性插值折射率			分段插值折射率		
			插值/N	误差/N	比率/%	插值/N	误差/N	比率/%
1	0.042	323.5	-	-	-	-	-	-
2	1.439	271.1	-	-	-	-	-	-
3	3.050	205.8	226.1	20.3	9.864	217.9	12.1	5.88
4	5.719	151.6	-	-	-	-	-	-
5	7.405	124.1	133.1	9.0	4.252	125.3	-1.2	-0.967
6	9.457	99.4	-	-	-	-	-	-
7	10.684	86.3	86.8	0.5	0.579	85.6	-0.7	-0.811
8	12.125	71.9	-	-	-	-	-	-
9	13.952	53.5	57.0	3.5	6.542	54.9	1.4	2.524
10	16.521	36.1	-	-	-	-	-	-
11	18.770	25.2	26.8	1.6	6.349	25.2	0.0	0.0
12	20.904	17.9	-	-	-	-	-	-
13	24.183	10.6	11.9	1.3	12.264	10.6	0.0	0.0
14	26.825	7.0	-	-	-	-	-	-

由表3数据可见,除个别点外,由实测大气折射率剖面进行线性插值比分段插值得到的折射率误差都大。在海拔3 km左右,利用线性插值得到的折射率的误差率达到10%左右,对应的折射率为20左右,而采用分段插值得到的折射率的误差率只有6%左右,对应的折射率为12左右。在海拔高度十几公里以上时,分段插值获得大气折射率几乎没有误差,而线性插值方法则有10%左右的误差,这也是此高度上的大气折射率是按指数衰减的缘故。因此,在高精度的电波折射误差修正中最好采用分段插值方法获得电波射线上的大气折射率。

2.3 仿真对比

为比较折射率线性插值和分段插值两种插值方法获得电波射线上的大气折射率对电波折射误差修正精度的影响,利用地面雷达对目标的实际测量和目标的真实位置,以及表1给出的大气实测折射率剖面数据(雷达测量时的实测大气剖面)进行折射误差的计算和比对。

本文的目标是一架携带GPS的飞机,它能给出目标的真实位置,其飞行航线如图1所示。目标朝着雷达方向飞行,雷达测量的距离逐渐减小,仰角逐渐增大(从11°增加到75°)。

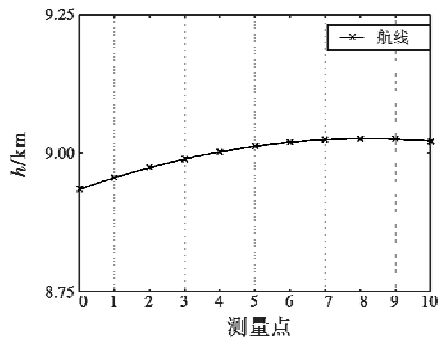


图1 目标飞行航线

Fig. 1 Target flight route

由图1可见,飞机几乎处于在9 km高度处平飞状态,因此,需要的大气折射率在10 km高度以下范围有效,10 km以上高度的大气折射率则对于本次试验中的折射误差计算不起作用。

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雷达到目标的真实距离 R_0 。将雷达实测的视在距离 R_s 减去相应的真实量,可得到电波折射引起的真实距离误差 $\Delta R_0 = R_s - R_0$ 。

根据表1的实测大气折射率剖面 and 雷达对目标的实测视在距离 R_s 和视在仰角 θ_s ,利用线性插值和分段插值两种插值方法获得的电波射线上的大气折射率进行折射误差修正,获得的距离折射误差分别为 $\Delta R_1, \Delta R_2$ 。将两种计算出的折射误差减去真实折射误差 ΔR_0 ,可得到电波射线上大气折射率的不同插值方法对电波折射误差修正精度的影响,即 $\Delta R_1 - \Delta R_0, \Delta R_2 - \Delta R_0$,称为残差,其仿真结果如图2所示。

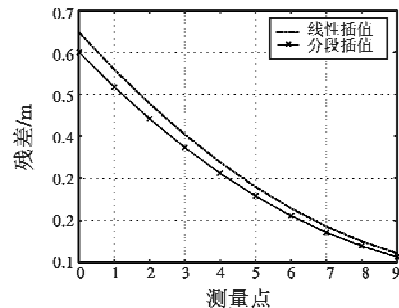


图2 不同插值方法对电波折射误差修正的残差

Fig. 2 Residual of different interpolation methods for radio wave refraction error correction

图2所示为目标高度在9 km左右,随着仰角增大(从11°增加到75°),电波折射误差修正的精度逐渐增高,即残差逐渐减小;大气折射率的分段插值与线性插值引起电波折射误差修正的残差也都逐渐减小。

低仰角时,大气折射率的分段插值比线性插值对提高电波折射误差修正精度更为明显,在 11° 仰角时其残差降低了10%左右,高仰角时则较小。可以预见,当雷达仰角更小时,采用大气折射率的分段插值可以更有效地降低其残差,提高电波折射修正的精度。

由于目标的高度只有9 km左右,在 11° 仰角时其电波折射误差一般为几米。当目标高度增大时,电波折射误差也增大,如当雷达测量目标为几百公里时,电波折射误差一般为几十米到百米,则利用大气折射率的分段插值比利用线性插值对电波折射误差修正的精度提高更多。

3 结论

在电波折射修正中,精确地获得电波射线上的大气折射率对提高雷达探测精度有着重要的作用。因此,针对目前大气折射率的线性插值方法的不足,提出分段插值方法,通过利用线性和分段插值两种方法进行电波射线上折射率计算的比较,以及它们对应的电波折射误差计算的比较可知,分段插值法可使电波射线上折射率获得精度更加提高10%以上,大气折射率的分段插值比线性插值对提高电波折射修正精度更明显,在 10° 以上角度可使残差降低10%以上,因此,利用分段插值方法进行大气折射率剖面的处理,可有效提高电波折射误差修正精度,最终进一步提高雷达探测精度。

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,甘丽萍. 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] 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.
- [4] AFRAIMOVICH E I, ASTAFYEVA E, DEMYANOV V V, et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena[J]. Journal of Space Weather and Space Climate, 2013, 3: A27-1-A27-19.
- [5] 张瑜. 电磁波空间传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [6] 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):74-76,101.
- [7] 黄婕. 电波大气折射误差修正[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [8] 程显海. 大气折射误差的高精度修正[J]. 电子科技大学学报,1996,26(s2):214-218.
- [9] 韩先平,周慧. 低仰角大气折射的高精度修正方法研究[J]. 光电技术应用,2008,23(1):24-26.
- [10] 范建业. 大气波导探测方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 史莹莹. 雷达测量中的速度折射误差修正方法研究[D]. 新乡:河南师范大学,2016.
- [14] 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.
- [15] 军用雷达标准化技术委员会. GJB/Z 87-1997 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.