

大气折射误差快速修正方法研究

韩先平

(中国人民解放军 92941 部队 葫芦岛 125000)

摘要: 大气折射误差对靶场外弹道测量精度影响非常大,特别是低仰角远距离目标。针对海上靶场气象特点和多年实测试验数据统计结果,基于大气折射指数经验公式,推导出了具体的电波折射误差修正模型。经多次试验任务检验,该误差修正模型测距修正精度小于 0.5 m,仰角修正精度小于 5 s,且模型简单,直接套用易于计算,修正后满足靶场外弹道精度要求,可应用于实时数据处理。

关键词: 大气折射;折射指数;修正模型;残差;精度

中图分类号: P401 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3060

New method for the atmospheric refraction error correction in the range

Han Xianping

(Unit 92941, PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: Atmospheric refraction errors significantly affect the accuracy of the exterior trajectory measurement in the range, especially for low elevation angle and distant targets. Based on characteristics of marine meteorological in the range and real test data of years, and the empirical formula of error correction for atmospheric refraction, we deduce specific refractive error correction model. Through a number of real experiment test, we conclude that the correction accuracy of the distance is less than 0.5 m, and the elevation angle less than 5 s. The model is simple, applied directly, and easy to calculate. The correction output matches the accuracy requirement of measurement of the exterior trajectory in the range, and thus can be applied to real-time data processing.

Keywords: atmospheric refraction; refractive index; correction model; residuals; accuracy

1 引言

雷达在靶场试验任务中对目标引导、飞行轨迹定位、测速、多目标跟踪等方面发挥着重要作用,是靶场主要的外弹道测量手段。但由于雷达无线电波在大气传播过程中受到大气水平不均匀性、时变特性等影响,产生的电波折射效应对雷达定位精度影响较大^[1],特别是跟踪测量低仰角、远距离目标时,当目标测距站超过 100 km 时,测距折射误差会超过 20 m,俯仰折射误差会超过 1 mrad^[2]。随着距离的增加,甚至带来几十米的误差^[3],如若不修正这个误差,将会严重影响试验结论的鉴定^[4]。

目前靶场电波折射修正使用的是实测气象参数分层修正法^[5],该修正模型虽然被广泛认可,但针对高远程弹道的修正并不适用,其迭代时间长,计算繁琐,而且往往测控站点无法按要求提供相关时段的高空分层气象参数^[6]和大气折射指数,因此就更不能适用于实时计算。针对这个问题,本文根据国内外大量有关资料及经验数据^[7-8],结合海上靶场试验多年实测任务,在简化大气指数模型的基础上,推导

出了具体折射误差修正模型,提出一套行之有效的实时电波折射误差修正方案,既省去了测控站点提供分层气象参数提高了计算效率,又满足外测数据高精度处理的要求。

2 大气折射误差快速修正方案

2.1 大气折射指数模型

大气中任一点的折射指数 N 等于真空中波速与该点大气中波速的比值。目前对折射指数已经确定了一个合理、精确的表达式^[9]:

$$N = 1 + \left(\frac{77.6P}{T} + \frac{4810e}{T^2} \right) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: T 是测量站点位置的温度(K); e 是测量站点位置水蒸气局部压力(mbar); P 是测量站点位置当地的大气压强(mP)。

在对仰角数据作折射修正之前,用探空气球或其他气象观测设备测出大气不同高度 h_i (m) 对应的气压 P_i (mb)、温度为 t_i (°C)、相对湿度 B_i (%)。

将湿度量纲%转换成 mb:

$$e_i = 6.11 \times 10^{\frac{b}{h_i}} \times B_i \begin{cases} t \geq 0 & b = 237.5 \\ t < 0 & b = 265.5 \end{cases} \quad (2)$$

但考虑到释放探空气球涉及人员和大量经费的投入,有时测控站无法按处理要求提供相关时段高空分层的大气参数^[10]。因此本文采用大气折射指数简化的经验公式取而代之,以此建立的电波折射指数计算方法和误差修正算法,可以实现测量数据的快速处理,并满足外测数据高精度折射修正的需要。

由于海天背景大气结构相对其他地域较有规律,大气折射指数 N 随着高度 h 变化的折射指数模型可用如下经验公式^[11]来表示:

$$N(h) = 313.0 \times e^{-0.14385h_0} \quad (3)$$

式中:系数 313.0 为经验数据, h_0 是测量站点海拔高度(km)。为保证此经验公式的通用性,此经验数据亦可用 N_0 表示。那么,假设当测控站设备中心距海平面高度为 h_0 ,测控站地面的大气折射指数为 $N(h_0)$ 时。这样,距海平面高度 h 处任一节点的大气折射指数 $N(h)$ 和折射率 $n(h_i)$ 可表示为:

$$N(h) = N_0 \times e^{-0.14385h} = (N_0 \times e^{-0.14385h_0}) \times e^{-0.14385(h-h_0)} = N(h_0) \times e^{-0.14385(h-h_0)} \quad (4)$$

$$n(h_i) = 1 + 10^{-6} N(h_i) = 1 + 10^{-6} N(h_0) \times e^{-0.14385(h_i-h_0)} \quad (5)$$

此节点处的大气折射指数是距测控站点的相对高度 $h-h_0$ 和测控站地面的大气折射指数为 $N(h_0)$ 的函数。由于测控站地面的气象参数不难测到,可以任务开始前测量好,误差也相对更小,所以根据上式计算的各高度节点的折射指数是非常简便和高效的。

2.2 大气折射误差修正

下面假设雷达实测目标仰角为 E_c ,而目标相对该站真实仰角为 E 。将目标高度 h 与测站高度 h_0 之间分成 s 个小区间,根据式(4)和(5)可以较细的划分节点 h_i ($i=1,2,\dots,s$),从而提高折射误差的修正精度,再采用数值积分的方法计算得真实仰角 E 。真实仰角的计算公式为:

$$E = \arctan \frac{h \cos \phi(h) - h_0}{h \sin \phi(h)} \quad (6)$$

式中:目标高度 h (或节点高度 h_i) 可表示为:

$$h = \sqrt{R^2 + R_0^2 + 2RR_0 \sin E} - R_0 \quad (7)$$

式中: R_0 是地球半径,可取 6 371.3 km。 $\phi(h)$ 为地心张角,其表达式为:

$$\phi(h) = \int_{h_0}^h \frac{h_0 n(h_0) \cos E_c}{\sqrt{n(h_i)^2 h_i^2 - n(h_0)^2 h_0^2 \cos E_c}} dh_i \quad (8)$$

其仰角的折射修正量为: $\Delta E = E_c - E$ 。

同理,假设经纬仪实测目标距离为 R_c ,而目标相对该站真实距离为 R 。则:

$$R = R_c(h) \sin[E - \phi(h)] - h_0 \sin E \quad (9)$$

式中: R_c 为目标视在斜距,其表达式为:

$$R_c = \int_{h_0}^h \frac{h_i^2 n(h_0)}{\sqrt{n(h_i)^2 h_i^2 - n(h_0)^2 h_0^2 \cos E_c}} dh_i \quad (10)$$

积分计算式(8)和(10),将结果代入式(9)得到真实径

向距离 R ,则测距的折射误差修正量为: $\Delta R = R_c - R$ 。

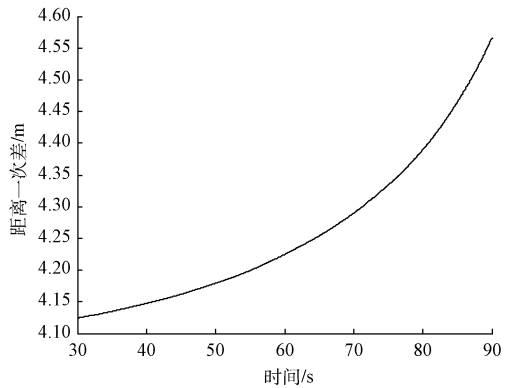
综上,经推导电波折射误差修正模型可具体表示为:

$$\Delta E = N(h_i) - \frac{\cos E \left(\frac{N(h_i)^2}{2} + n(h_i)(1 - e^{-h_i}) \right) - N(h_i) \sin E}{\sqrt{\sin^2 E + 2h_i/R_0 - \sin E + N(h_i) \cos E}} \quad (11)$$

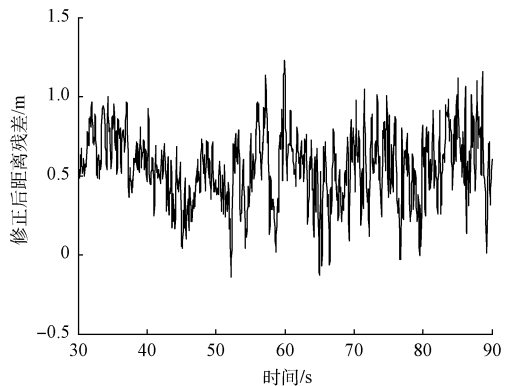
$$\Delta R = \frac{N(h_i)}{\cos E} + \frac{N(h_i)R_0}{2} (n(h_i) \cos E - N(h_i) \sin E) - R \frac{(\Delta E - N(h_i))^2}{2} \quad (12)$$

3 试验验证

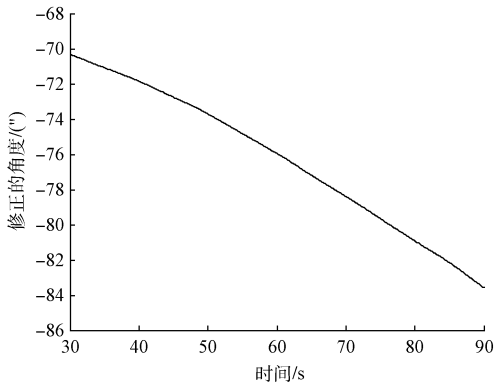
以某次靶机飞行试验任务为例,对雷达测量数据用本文折射修正模型做电波折射快速修正^[12]。靶机上装有 GPS 测量系统,采用载波相位差分进行高精度解算, GPS 数据转换到测控站点的测角精度为 0.01 mrad,动态测距精度为 0.2 m^[13]。GPS 定位采用的是 WGS-84 坐标系,把 GPS 定位结果数据转换到某雷达站点的测量坐标系,其俯仰角 E 和距离 R 做分析的真值。由于试验任务中靶机盘旋飞行,本试验数据选取靶机距光测站点 7~24 km 起飞段,采样频率为 20 帧/s,约记录 5 万个数据。下面分析此次试验任务雷达测量数据经本文算法电波折射修正前后的差值结果,以及修正后数据与真值比对的残差结果,如图 1 所示。其中图 1(a)和(b)表示本文算法对距离修正的结果,图(c)和(d)表示对俯仰角度修正的结果。



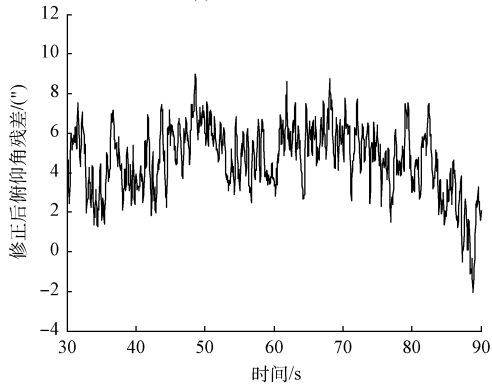
(a) 修正前后距离一次差结果曲线



(b) 折光修正后距离残差曲线



(c) 折射修正角度曲线



(d) 折光修正后俯仰角残差曲线

图1 本文算法折光修正结果

表1 折射修正后与真值比对结果

残差类型	均值	均方差
测距修正残差/m	0.508 895	0.222 501
测角修正残差/($''$)	4.648 816	1.711 261

根据靶场多次试验任务,空中飞行目标距雷达测站不同高低角和不同距离的实际情况,采用本文修正模型进行实时折射修正计算,修正结果及与GPS真值比对后剩余残差统计结果如表2所示。

从图1及表1,表2可以看出,应用本文电波修正方法取得了较好的效果。随着目标距测站高低角度的增加,距离的加大,修正误差量随之减小,残差减小;反之,则误差将不断增大。与GPS真值比对结果看,测距修正后精度在0.5s以内,测角修正后精度不大于 $5''$,说明本文的折光修正模型比较准确,修正方案能够满足靶场高精度测量的要求。同时,由于此修正模型不需要测量站点提供大气分层气象参数,从而减少了计算的复杂度,更提高了计算的速度。

4 结 论

本文针对靶场海上气象环境的特点,结合具体的试验任务需求及采用测量站点实测大气数据的方式^[14],提出了一套大气折射快速修正方案。此方案不但提高了靶场测量精度而且为一些不具备提供分层气象参数条件的试验任务

表2 电波折射修正误差结果统计

高低角/($^{\circ}$)	视在距离/ m	修正的距离 误差/m	修正的角度 误差/($^{\circ}$)	修正后距离 残差/m	修正后角度 残差/($^{\circ}$)
-0.384 521	74 316.400	24.125	0.116 449	0.344 988	0.002 887 9
-0.424 011	85 506.880	27.938	0.133 576	0.391 132	0.003 165 7
-0.294 220	112 571.390	36.139	0.178 055	0.542 085	0.004 433 5
0.016 260	197 207.664	56.634	0.251 919	0.855 173	0.006 247 6
0.750 994	196 876.564	48.264	0.211 301	0.699 828	0.004 247 2
3.092 502	195 533.760	31.535	0.148 138	0.381 574	0.001 955 4
6.201 546	193 676.903	20.075	0.106 937	0.204 765	0.001 101 4
8.230 262	192 567.413	15.959	0.089 643	0.148 418	0.000 878 5
11.398 30	191 089.247	11.844	0.070 801	0.099 489	0.000 580 5
15.227 429	189 834.892	9.037 7	0.055 813	0.073 205	0.000 407 4
21.012 247	189 345.977	6.678	0.041 583	0.048 749	0.000 257 8
25.776315	190 469.685	5.599	0.033 869	0.038 073	0.000 193 1
38.788 223	202 301.232	3.857	0.021 108	0.023 371	0.000 099 2
49.221 108	225 164.493	3.169	0.014 885	0.013 309	0.000 059 5
57.553 886	275 050.716	2.824	0.011 070	0.009 601	0.000 039 9

提供了行之有效的电波修正技术手段。其中本文建立的折射误差修正模型还可以直接应用于靶场的实时大气误差修正计算,为靶场航区气象资源建立大数据库^[15]提供便捷手段。其计算效果接近靶场目前使用的实测气象参数分层修正方法,但计算简单,效率高,因此具有较大的应用推广价值。

参考文献

- [1] 王大勇,赵朝锋,彭建怡,等.微波测距仪测距精度误差因素的影响分析[J].电子测量技术,2010,33(4):42-44.
- [2] 严蓉,陈伟民,章鹏,等.温度对相位法微波测距测相精度的影响研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(2):192-195.
- [3] 施东炜.基于地球球面和折射分析地形对雷达的遮挡[J].电子测量技术,2011,34(7):40-42.
- [4] 陈曦,张中兆,韩帅.大气折射对跟踪天线指向的影响及修正方法[J].电子测量与仪器学报,2009,23(8):61-65.
- [5] 张瑜,亦娜.光学雷达大气折射误差修正方法研究[J].电光与控制,2009,16(5):16-19.
- [6] 高善清,魏新亮.气压测高误差分析及修正[J].电子测量技术,2012,35(9):60-63.
- [7] 罗毅,施云波,渠立亮,等.谐波分析及交流比较的高空温度探测方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(4):725-727.
- [8] 尹英杰,徐德,张正涛,等.基于单目视觉的平面测量[J].电子测量与仪器学报,2013,27(4):347-350.
- [9] 陈俊斌,朱霞,赵昊立,等.大气对流层气压公式推导的新方法及对国际气压方程的修正[J].后勤工程学院学报,2011,27(4):82-86.
- [10] 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):48-50.
- [11] 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):73-75.
- [12] 赵乐至,武昱,唐佩佳,等.雷达大气折射误差修正快速算法[J].2012,33(5):104-105.
- [13] 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.
- [14] 贺晓雷,迟晓珠,唐胜武,等.一种新型高精度大气压力传感器的研究[J].电子测量技术,2012,35(6):1-4.
- [15] 谢红星,景博,姜兴旺.大气数据计算机远程测试系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2009,28(5):68-71.

作者简介

韩先平,工学硕士,工程师,主要研究方向为靶场外弹道测量数据处理,大气波导及折射修正等。
E-mail:hanxianping894@163.com

(上接第56页)

- [5] 聂世雄,孙兆龙,马伟明,等.大功率直线感应电动机推力脉动研究[J].电机与控制学报,2015,19(5):1-6.
- [6] 鲁军勇,马伟明,李朗如.高速长初级直线感应电动机纵向边端效应研究[J].中国电机工程学报,2008,28(30):73-78.
- [7] 徐伟,李耀华,孙广生,等.短初级单边直线感应电机新型等效电路[J].中国电机工程学报,2009,29(9):80-86.
- [8] 李硕,范瑜,吕刚.非磁性次级直线感应电机力特性及涡流损耗分析[J].电机与控制学报,2014,18(4):1-5.
- [9] AMIRI E, MENDRELA E A. A novel equivalent circuit model of linear induction motors considering static and dynamic end effects[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(3): 8200409-8200409.
- [10] WORONOWICZ K, SAFAEE A. A novel linear induction motor equivalent-circuit with optimized end effect model[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2014, 37(1): 34-41.
- [11] 张明元,马伟明,何娜,等.长初级直线电动机分段供电技术综述[J].中国电机工程学报,2013,33(27):96-104.
- [12] 崔小鹏,王公宝,马伟明,等.直线电机分段供电故障诊断研究[J].电机与控制学报,2013,17(8):9-14.
- [13] 孙兆龙,马伟明,鲁军勇,等.长初级双边直线感应电动机静态纵向边端效应及阻抗矩阵研究[J].中国电机工程学报,2010,30(18):72-77.
- [14] 许金,马伟明,鲁军勇,等.分段供电直线感应电机气隙磁场分布和互感不对称分析[J].中国电机工程学报,2011,31(15):61-68.
- [15] 李卫超,胡安,马伟明,等.新型长定子直线感应电机闭环控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(S1):226-231.
- [16] 顾亚文,黄磊,张静,等.采用不同次级结构的单边直线感应电机性能分析[J].电工电气,2014(4):15-18.
- [17] 金晓华.基于ANSYS的永磁直线同步电机的电磁仿真与分析[J].南京工程学院学报,2012,10(2):1-5.
- [18] 吴苏敏,董立威,刘洋,等.基于气隙磁密波形优化的永磁同步电机结构[J].电机与控制应用,2014,41(3):12-16.

作者简介

蒋映,1990年出生,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。
E-mail:jy090672@qq.com

石景波,1953年出生,研究员,研究方向为电力电子与电力传动。