# 一种复杂结构天线罩相位误差补偿算法

陈 祎,袁 伟,蒋 驰,吴迎春,张晓丽 (上海无线电设备研究所,上海 201109)

摘 要:在某些雷达应用领域,天线罩的气动外形严重影响其电磁特性,从而对雷达系统测向性能造成恶劣影响。针对一种复杂结构天线罩,分析其透波率和额外引入的相位误差对雷达测向系统造成的恶劣影响;采用动态查表法实现目标角度粗搜索,并基于均匀圆阵提出长短基线结合聚类寻优的改进干涉仪测向算法,从而实现天线罩补偿后相位数据的精确测向。该算法操作简便,具有较高的运行效率,且能在宽频段、大角度范围内实现对天线罩的相位误差高精度补偿。实验结果表明:该方法能有效地解决非均匀天线罩引起的测向失败问题,具有较强的工程指导意义。

关键词:天线罩;相位误差;补偿;改进测向算法

中图分类号: TN 953<sup>+</sup>.5 文献标志码: A

# A Phase Error Compensation Algorithm for Radome with Complex Structure

CHEN Yi, YUAN Wei, JIANG Chi, WU Yingchun, ZHANG Xiaoli (Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In some radar application fields, the aerodynamic outline of the radome seriously affects its electromagnetic characteristics, which greatly affects the direction finding performance of the radar system. In this paper, the effects of the transmissivity and the extra phase error of a radome with complex structure on the direction finding system are analyzed. The dynamic lookup table method is used to achieve the rough search of the target angle, and an improved interferometer direction finding algorithm with long and short baselines combined with clustering optimization is proposed based on a uniform circular array, so that the accurate direction finding of the phase data after the radome compensation can be achieved. The algorithm is simple in operation, has high operation efficiency, and can achieve high-precision compensation for the radome phase error in a wide frequency band and large angle range. The experimental results show that the method can effectively solve the problem of direction finding failure caused by nonuniform radome, and has strong engineering guiding significance.

Key words: radome; phase error; compensation; improved direction finding algorithm

### 0 引言

在雷达工程应用领域,天线罩一般放置在雷达 天线阵面前端或四周,主要起到保护雷达系统的作 用。对雷达系统来说,总是希望天线罩是一种"有 似于无"的存在,即希望天线罩对雷达系统无影响, 或影响尽可能少。不同体制雷达所使用的天线罩 特性需求往往不尽相同,如某些地面雷达天线罩需 满足防雨、防风、防沙等特性;某些飞行类雷达天线 罩需考虑气动外形、热力学、耐腐蚀等特性;而某些 光学雷达天线罩需满足轻薄、透光等特性[1-6]。对于复合体制雷达天线罩来说,往往只能顾全某一体制雷达电性能参数,而另外体制雷达电性能参数很难保证。在复合体制雷达应用领域,天线罩技术指标严重制约着复合体制雷达总体性能,成为一个急需解决的关键性技术问题。

**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.06.019

更改设计、加工、制造及材料配比方法,可从源 头上解决天线罩对雷达性能的影响。但天线罩的设 计、加工及制造是一门综合性很强的系统工程,各项 技术指标之间相互制衡,往往很难顾全所有,只能依 照系统要求选择一些重要参数进行折衷考虑和优化 设计,即放大天线罩的保护作用,缩小天线罩对雷达 系统电气特性的影响。目前国内外天线罩设计水平 还不能满足所有特性指标要求。针对这些影响,目 前主流的方法是进行天线罩参数补偿,雷达系统关 注的天线罩的电性能指标主要包括:透波率、瞄准线 误差、瞄准线误差斜率、相位误差、频带宽度等[2]。 对于均匀介质结构天线罩,可以采用数据拟合或插 值计算的方法获取的补偿数据会非常有效;而对于 非均匀介质结构天线罩,补偿方法十分有限[3,6]。本 文针对非均匀复杂结构天线罩,首先在带罩和不带 罩条件下测量出天线罩引入的相位误差数据表,采 用动态查表法实现目标角度粗搜索:其次利用改进 测向算法实现带罩补偿数据精确测角,大大降低了 天线罩对雷达系统性能的影响。

## 1 天线罩对雷达系统的影响

对于电子侦察系统而言,天线罩影响主要包括两个方面。一方面由于罩体复合材料对电磁波的吸收损耗,使得电磁波透射效率降低,增益下降;另一方面由于罩体外形曲率变化以及电磁波不同入射角,导致天线透射口径场的相位发生改变,进而导致远场方向图畸变,相位分布有差异,不再是等相位面[8-10]。结合透射系数的公式,可以发现,其幅度主要导致增益下降,相位导致方向图畸变。当然方向图畸变也意味着系统的方向性系数下降,而增益又是方向性系数和效率的乘积,因此一定程度上

也会影响增益[7]。

本文所涉及的复杂结构天线罩外形尺寸如图 1 所示。它不仅会对接收信号产生绕射、折射、漫反射,造成信号能量损耗的同时也会产生瞄准误差;还会因为介质材料的非均匀分布,使得天线罩不同位置对信号能量的吸收或反射不同,不同的传输损耗直接影响雷达系统方向图。以上这些特性都会造成接收信号质量严重降低,并直接影响雷达系统性能。

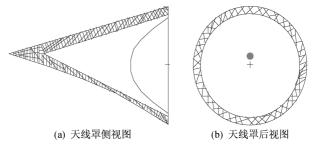


图 1 天线罩外形结构

Fig.1 Schematic diagram of the outline structure of radome

对于均匀介质材料天线罩,其透波率和相位误差均在很小的区间变化,故信号从不同方向入射,由天线罩引入的幅度相位误差均是一致的[11-17]。因此,可以不用考虑天线罩对信号幅度相位信息的影响,或者采用数据拟合和插值的方法能够消除这种影响。对于本文所讨论的复杂结构天线罩,信号从天线罩不同角度入射,其对应的透波率和相位误差均是恶劣变化的,这种变化会直接影响接收信号的幅度和相位,从而影响雷达系统灵敏度和测向精度。该复杂结构天线罩在不同角度下透波率和相位误差的变化曲线如图2所示。

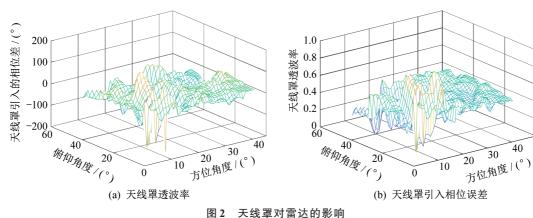


图 2 大线阜刈苗込的影响

Fig. 2 Influence of radome on radar

由图 2 可以知,信号在不同角度下入射,该异形结构天线罩引入的相位误差及透波率均是恶劣变化

的。在某些角度位置处,透过天线罩的电磁波功率 甚至仅为入射功率的一半;而罩某些角度位置处微 小的目标角度变化,天线罩引入的相位误差甚至会超过100°,这种影响对雷达系统来说显然是不可接受的。天线罩具有"相位突变"性质的这种影响也不

能利用传统的数据拟合或插值的方法予以消除。

利用经典的多基线干涉仪测向算法,在带罩和 不带罩情况下的仿真曲线如图3所示。

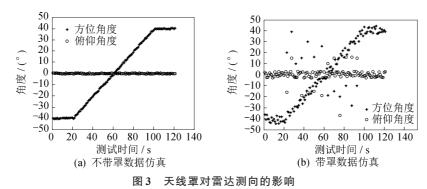


Fig. 3 Influence of radome on radar direction finding

由图 3 可以知,虽然带罩情况下目标角度测量 大趋势是正确的,但目标角度测量误差较大,且存 在较多的模糊角度,若不对接收信号相位进行校 正,雷达系统测向结果是不可信的。

## 2 改进干涉仪测向算法

相位干涉仪测向具有机理简单、计算量小的特点,因此被广泛应用于雷达探测、电子侦察等工程应用领域<sup>[4-5]</sup>。但是在低频段,相位干涉仪存在测向精度不足的缺点;而在高频段,又存在测向模糊的问题。如果利用多组天线综合测向,由于各天线之间的相位差测量相互独立,且各组天线的模糊多值相差较大,而真值是每组天线共有的,且其误差应该在一定范围之内。基于此,本文采用一种横向、纵向长短基线相结合的改进测向算法进行测向。下面以均匀N元圆阵为例对其原理进行介绍,其阵列结构如图4所示。

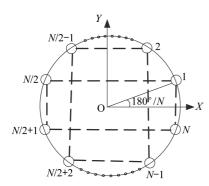


图 4 N 阵元均匀圆阵结构模型

Fig. 4 Structure model of the N-element uniform circular array

经计算,以上N个天线坐标位置分别为

$$\begin{cases} x_{k} = r \cos\left\{\frac{\pi}{N} + \frac{2(k-1)\pi}{N}\right\}, k = 1, 2, \dots, N \\ y_{k} = r \sin\left\{\frac{\pi}{N} + \frac{2(k-1)\pi}{N}\right\}, k = 1, 2, \dots, N \end{cases}$$
(1)

式中:r为均匀圆阵半径。

假定波长为 $\lambda$ 电磁波入射的方位角为 $\alpha$ ,俯仰角为 $\beta$ ,则对空间中任意位置的两个天线 $P(x_P,y_P,0)$ 和 $Q(x_Q,y_Q,0)$ ,两者的相位差为

$$\phi_{PQ} = \phi_{OP} - \phi_{OQ} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ (x_P - x_Q) \sin \beta \cos \alpha + (2) \right]$$

$$(y_P - y_Q) \sin \beta \sin \alpha$$

式中: $\phi_{OP}$ 、 $\phi_{OQ}$ 分别为P点、Q点相对于坐标原点O的相位差。

选取图4中4条水平基线,于是有

$$\begin{cases} \phi_{2(\frac{N}{2}-1)} + \phi_{(\frac{N}{2}+2)(N-1)} = 4x_2 \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \\ \phi_{1\frac{N}{2}} + \phi_{N(\frac{N}{2}+1)} = 4x_1 \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \end{cases}$$
(3)

设 $A = \sin \beta \cdot \cos \alpha$ ,利用式(3)可计算出带模糊多值的一组数据 $A_1$ 和 $A_2$ ,利用最小距离原则通过聚类获得 $A_1$ 和 $A_2$ 中共同含有的数据项 $A_0$ ,即寻找向量 $A_1$ 和 $A_2$ 中距离最近的项,并将两者的均值记为 $A_0$ ,从而有

$$A_0 = \sin \beta \cdot \cos \alpha \tag{4}$$

选取图4中4条竖直基线,从而有

$$\begin{cases} \phi_{1N} + \phi_{(\frac{N}{2})(\frac{N}{2}+1)} = 4y_1 \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \\ \phi_{2(N-1)} + \phi_{(\frac{N}{2}-1)(\frac{N}{2}+2)} = 4y_2 \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \end{cases}$$
 (5)

设 $B = \sin \beta \cdot \sin \alpha$ ,利用式(5)可计算出带模糊多值的一组数据 $B_1 \pi B_2$ ,利用最小距离原则通过聚类获得 $B_1 \pi B_2$ 中共同含有的数据项 $B_0$ ,即寻找向量 $B_1 \pi B_2$ 中距离最近的项,并将两者的均值记为 $B_0$ ,从而有

$$B_0 = \sin \beta \cdot \sin \alpha \tag{6}$$

反解式(4)和式(6),于是有

$$\begin{cases} b = a \sin(\sqrt{A_0^2 + B_0^2}) \\ a = a \tan(B_0, A_0) \end{cases}$$
 (7)

从而得到真实目标角度位置。对于N为奇数的情况,将其中一个天线放置在直角坐标系Y轴,分别选取几条水平和竖直基线,采用以上相同方法也可获得目标角度。

### 3 天线罩补偿算法

通过以上分析可知,天线罩对雷达系统测向性能有较大影响,必须将天线罩的影响消除或降低到最低才能保证雷达系统测向信息准确。本文采用动态查表法结合改进测向算法对天线罩实施补偿校准。

不带罩条件下,在空间中记录下各个目标角度位置上N个接收天线接收到的相位差并记为 $\varphi_1[i][j][k]$ 。其中 $i=1,2,\cdots,81,i$ 为方位角度索引; $j=1,2,\cdots,81,j$ 为俯仰角度索引; $k=1,2,\cdots,N,k$ 为天线位置索引。空间角度变化范围为 $-40^\circ\sim40^\circ$ ,步长为 $1^\circ$ 。同理,带罩条件下,在空间中记录下各个目标角度位置上N个接收天线接收

到的相位差,记为 $\varphi_2[i][j][k]$ 。计算两者之间的相位差,即

 $\varphi_0[i][j][k] = \varphi_2[i][j][k] - \varphi_1[i][j][k](8)$ 

假设带罩条件下,各天线接收到某未知角度入射信号,获取其对应相位差为 $\varphi[n], n=1, 2, \dots, N$ 。

以  $\delta$ ° 为粗搜索步长,查询  $\varphi_2[i][j][k]$ 中与  $\varphi[n]$ 距离最近的索引  $(i_1,j_1)$ ,于是可获得粗搜索目 标角度为

$$\begin{cases} \alpha_1 = i_1 - 40 \\ \beta_1 = j_1 - 40 \end{cases} \tag{9}$$

根据粗搜索测量结果,调取带罩补偿数据表 $\varphi_0[i][j][k]$ 中第 $(i_1,j_1)$ 项,并更新接收信号相位数据

$$\psi[n] = \varphi[n] - \varphi_0[i_1][j_1][k] \qquad (10)$$

式中: $\phi[n]$ 为消除天线罩引入相位误差的真实目标相位。

利用 $\varphi[n]$ 并结合上述改进测向算法,可获得一组新的目标角度位置( $\alpha_2$ , $\beta_2$ )。 计算( $\alpha_1$ , $\beta_1$ )和( $\alpha_2$ , $\beta_2$ )之间的差值。若小于 $\delta$ °,则将( $\alpha_2$ , $\beta_2$ )作为最终的目标角度测量结果输出;若大于 $\delta$ °,则更新粗搜索查表步长为 $\delta$ °/2,重复式(9)以后的步骤,直到找到符合要求的目标角度。若经过多次迭代计算,均不能找到符合要求的目标角度,则将当前目标角度输出结果保持为上一次目标角度测量结果。本文采用的信号处理流程如图5所示。

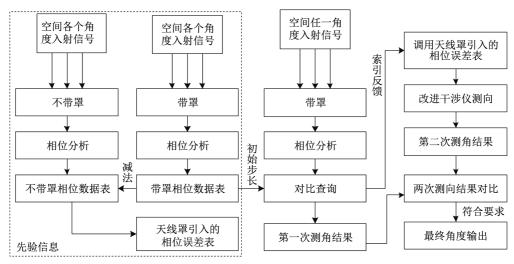


图 5 信号处理流程

Fig. 5 Flow block diagram of signal processing

首先,在带罩和不带罩条件下计算获取天线罩引入的相位误差数据表;其次,采用动态查表法实

现目标角度粗搜索;最后,利用长短基线结合聚类寻优的改进干涉仪测向算法实现天线罩补偿后相

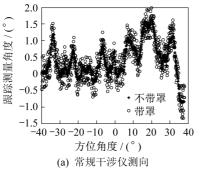
位数据的精确测向。

## 4 仿真结果分析

测试天线采用均匀八元圆阵排列,在6.5 GHz 条件下模拟空间中各个目标角度下带罩和不带罩 表,利用这些数据进行仿真计算。
在目标跟踪情况下,利用普通干涉仪测向算

补偿数据,并计算获取天线罩引入的相位误差数据

在目标跟踪情况下,利用普通干涉仪测向算法,可得天线罩补偿前后目标角度测量对比结果,如图6所示。



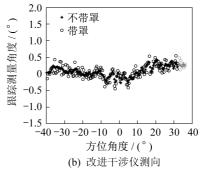


图 6 测向算法性能对比图

Fig. 6 Performance comparison diagram of the direction finding algorithm

经计算,利用常规干涉仪测向算法,带罩补偿后目标角度测量结果与补偿前目标角度测量结果之间的归一化均方根误差为0.417°;利用本文改进的干涉仪测向算法,带罩补偿后目标角度测量结果与补偿前目标角度测量结果之间的归一化均方根误差为0.263°。可以看出,天线罩补偿取得了较好的效果,即在误差允许范围内,将带罩信息补偿为了不带罩信息。由图6结果也可以看出,本文改进的干涉仪测向算法能够获得更高的目标测量精度,算法选取是天线罩补偿的关键。

空间中各个目标角度位置下,天线罩补偿前后 的测向误差结果见表1。

#### 表 1 天线罩补偿前后测向误差对比

Tab. 1 Comparison of direction finding errors before and after radome compensation

分类		方位-40°	方位0°	方位 40°
不带罩 测向误差	俯仰-40°	1.04°	0.71°	1.03°
	俯仰 0°	0.89°	0.02°	0.60°
	俯仰 40°	1.01°	0.59°	0.93°
查表法初次 测向误差	俯仰-40°	2.91°	1.87°	3.04°
	俯仰 0°	1.79°	0.89°	1.96°
	俯仰 40°	2.89°	1.79°	2.94°
改进算法二次 测向误差	俯仰-40°	0.35°	0.12°	0.30°
	俯仰 O°	0.19°	0.08°	0.17°
	俯仰 40°	0.32°	0.17°	0.31°

由表1可以看出,在不带罩条件下,测向精度优于1°,采用动态查表法可测向精度为3°,在此基础上调取新的带罩补偿校准数据,并利用改进测向算法,对更新的相位数据进行测向,测向结果与不带罩的情况相当,可见该天线罩补偿及测向算法均取得了较好的效果。也可以看出,改进测向算法较常规干涉仪测向算法测向精度有了较大提高。

### 5 结束语

本文针对一种非均匀复杂结构天线罩,首先分析其对雷达测向系统造成的恶劣影响;其次在带罩和不带罩条件下计算获取天线罩引入的相位误差数据表,采用动态查表法实现目标角度粗搜索,并基于均匀圆阵提出利用长短基线结合聚类寻优的改进干涉仪测向算法;最后利用该改进算法实现天线罩补偿后相位数据的精确测向。该方法操作简便,计算量小,且能够在宽频段、大角度范围内对天线罩的高精度补偿。实测数据仿真结果表明,该方法处理方便高效,能有效地解决非均匀天线罩引起的测向失败问题。

#### 参考文献

- [1] 蒋学金,沈扬.一种多基线相位干涉仪设计方法[J].电子信息对抗技术,2008,23(7):39-41.
- [2] 李高生,徐弘光,曹群生.天线罩相位误差研究[J].装备环境工程,2014(1):39-44.
- [3] DU Y W. The electrical design method of radomes

- [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 365-395.
- [4] 龚亨铱,袁俊泉,苏令华.基于相位干涉仪阵列多组解 模糊的波达角估计算法研究[J].电子与信息学报, 2006,28(1);55-58.
- [5] 石荣. 单基线干涉仪无模糊测向理论研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2012,7(3):270-273.
- [6] GUO J L. Broadband omnidirectional antennas and electromagnetic analysis of radomes[D]. Xi'an; Xidian University, 2005.
- [7] 李鹏,许万业.大型介质夹层天线罩的电性能补偿方法 [J].西安电子科技大学学报,2013,40(6);79-84.
- [8] 许海深.导弹导引头天线罩误差斜率补偿研究[D].哈 尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [9] 杨绍华,张福顺,焦永昌.天线罩电磁特性的仿真分析 [J].西安电子科技大学学报,2004,31(6):873-876.
- [10] 杨冬,吴秉横,张谟杰.一种改进的天线罩瞄准线误差 计算方法[J].制导与引信,2011,32(3):32-35.

- [11] 于冰洋, 阙肖峰, 聂在平. 电大尺寸天线罩电磁特性高效数值仿真技术[J]. 上海航天, 2020, 37(6): 40-44.
- [12] 刘晓春.雷达天线罩电性能设计技术[M].北京:中航出版传媒有限公司,2017.
- [13] 陈伟,张敏,郭玉霞,等.一种基于缝隙电磁耦合馈电的印刷振子阵列天线研究[J]. 航空兵器,2021,28(1):93-97.
- [14] GUO J L, LI J Y, LIU Q Z. Analysis of arbitrarily shaped dielectric radomes using adaptive integral method based on volume integral equation [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2006, 54(7):1910-1916.
- [15] 宗睿.导引头天线罩误差及相控阵导引头波束指向误差在线补偿方法研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [16] 姚宝国.天线罩几何参数测量原理及关键技术研究 [D].大连:大连理工大学,2003.
- [17] 薛飞, 稂华清, 杨丽娜. Ka 波段基片集成波导罗特曼透镜多波束阵列天线[J]. 航空兵器, 2019, 26(3): 56-61.

#### (上接第147页)

- [5] SANTOS MO, BATALHA GF, BORDINASSIEC, et al. Numerical and experimental modeling of thermal errors in a five-axis CNC machining center [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018 (5/6/7/8): 2619-2642.
- [6] MIN X, JIANG S. A thermal model of a ball screw feed drive system for a machine tool[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225: 186-193.
- [7] 何震. 机床滚珠丝杠系统热特性分析及其热变形补偿 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [8] 李龙刚.高速机床热特性及其滚珠丝杠热变形研究 [D].西安:陕西科技大学,2011.
- [9] 缪亚雄,孙蓓蓓.滚珠丝杠系统的热特性建模与分析研究[J].中国制造业信息化,2008(3):46-48,54.
- [10] 张励,田义,洪泽华,等.战术导弹仿真技术发展分析与

- 思考[J].上海航天(中英文),2019,36(4):9-18.
- [11] 孙浩,崔恩强,张娜,等.ZL205合金舱体低压工艺设计 及数值仿真应用[J].上海航天(中英文),2019,36(2): 131-135.
- [12] 顾森东,石晓强,徐涛.超薄钛内衬复合材料高压气瓶 力学特性分析[J].上海航天(中英文),2020,37(4): 74-78,95.
- [13] 王金明,翟师慧.舱段结构热振耦合环境下仿真分析 [J].上海航天(中英文),2020,37(3):126-132.
- [14] 肖磊.中空滚珠丝杠进给系统综合性能建模仿真研究 [D].武汉:华中科技大学,2016.
- [15] 雷默涵,姜歌东,梅雪松,等.高速球轴承微接触弹流摩擦及生热分析[J].西安交通大学学报,2016,50(4):81-88.
- [16] 韩军,张玲聪,李明亚.螺母副摩擦热对高速空心滚珠 丝杠热特性影响分析[J].机械设计与制造,2015(12): 221-225,229.