

文章编号:1007-5321(2011)06-0121-04

# 改进的干涉式天线阵及其测向误差分析

贺 庆, 刘元安, 黎淑兰, 于翠屏

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

**摘要:**为了解决干涉式测向机中天线阵孔径与准确度之间的矛盾,提出了一种新型天线阵和基于该天线阵的测向方法。该天线阵基于十字形正交四元阵,通过在阵中心增加1个基准天线,可使天线阵孔径增大,从而减少随机干扰的影响。基于新天线阵的补偿方法,理论上可以完全抵消整个测向机的系统误差。通过模拟真实信号进行仿真,验证了该方法的优势和可行性。

**关 键 词:**相关干涉式; 测向算法; 天线阵; 补偿算法; 系统误差

中图分类号: TM92 文献标志码: A

## An Improved Analyses on Interferometer Antenna Array and Errors of Direction-Finding

HE Qing, LIU Yuan-an, LI Shu-lan, YU Cui-ping

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** For solving the contradiction between aperture size and accuracy in the interferometer direction-finding machine, a novel antenna array and its direction-finding approach are proposed. The array is based on the cross four-element antenna array. By placing a reference antenna in the center of the array, the aperture size can be enlarged so that the influence of random noise will be reduced. The corresponding compensate method can counteract system errors of the whole direction-finding machine in theory. The advantage and feasibility of the new approach are demonstrated by matlab software based simulations.

**Key words:** correlation interferometer; direction-finding algorithm; antenna array; compensate algorithm; system error

常用的测向体制包括比幅法、沃特森-瓦特测向法、多普勒测向法、干涉式测向法和空间谱估计法等<sup>[1]</sup>。目前便携式测向机大多是采用比幅机制,而本文涉及一种利用相关干涉机制实现的便携式测向机。干涉式测向是根据位于不同波前的天线所接收到的信号之间存在相位差,通过测量相位差计算获得电磁波的来波方向<sup>[2]</sup>。两天线间的基线距离不得大于 $\lambda/2$ ( $\lambda$ 为信号波长),否则会发生结果模糊的

情况<sup>[3-4]</sup>。而天线间距太近时,又会影响测向准确度和灵敏度。相关干涉法是在干涉式基础上,建立来波方向与相位差之间的映射样本集,将测量得到的相位差与样本进行相关运算,求出相关系数最大的样本所对应的来波方向便是测量结果<sup>[5-6]</sup>。

相关干涉测向仪具有测向准确度高、灵敏度高、时效性强等优点。但要求接收机各信道间相位延迟一致,给研发造成较大难度。笔者通过天线阵设计

收稿日期: 2011-03-17

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX03005-002-02, 2010ZX03007-003-04); 国家自然科学基金项目(61001060, 60873190, 60973111); 广东省产学研项目(2009B090300105)

作者简介: 贺 庆(1982—), 男, 博士生, E-mail: bomb\_82@163.com; 刘元安(1963—), 男, 教授, 博士生导师。

和补偿算法解决了这些问题。

## 1 新天线阵设计及其相关算法

为了满足便携式小型化的要求,天线个数和间距尺寸都必须有所限制。因此设计了一种五元天线阵,各天线为鞭状天线,其排列如图1所示。

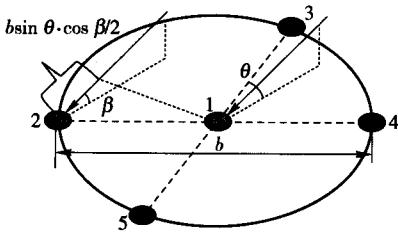


图1 新天线阵与来波角度关系

图1中的圆点代表天线位置,  $b$  为天线阵的孔径,  $\theta$  为来波方向角,  $\beta$  为仰角。对于大部分地面超短波辐射源,可认为仰角  $\beta$  为  $0^\circ$ ,即  $\cos \beta = 1$ 。采用这种天线阵的主要原因为:①天线阵基线垂直,便于制造,相比其他五元天线阵<sup>[7]</sup>,减少了结构不精确造成的误差;②方便折叠,缩小体积,易于携带;③天线位置对称,便于实现补偿。

在实际应用中,分别计算出外围天线(2、3、4、5)和中心基准天线1之间的相位差  $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$ 、 $\varphi_5$ 。理论上,各相位差与  $\theta$  之间的对应关系为

$$\varphi_2 = b \sin \theta (\pi / \lambda) \quad (1)$$

$$\varphi_3 = b \sin (3\pi/2 + \theta) \pi / \lambda \quad (2)$$

$$\varphi_4 = b \sin (\pi + \theta) \pi / \lambda \quad (3)$$

$$\varphi_5 = b \sin (\pi/2 + \theta) \pi / \lambda \quad (4)$$

根据选定  $\theta$  的多个样本值,可求得对应的一组相位差  $\phi_i = [\varphi_{2i}, \varphi_{3i}, \varphi_{4i}, \varphi_{5i}]$ ,将测量结果  $\phi = [\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5]$  与样本集  $\phi_i$  依次进行相关处理,求出相关系数的计算式为

$$\rho_i = \frac{E\{[\phi - E(\phi)][\phi_i - E(\phi_i)]\}}{\sqrt{D(\phi)} \sqrt{D(\phi_i)}} \quad (5)$$

最大相关系数所对应的  $\theta$  即为电磁信号的来波方向。在一定条件下,样本数  $i$  越大,测向精度越高,相应所需的计算时间也越长。研究中,每隔  $1^\circ$  选取 1 个样本值,即 360 个样本。

该天线阵形式类似于 4 单元阿德考克天线阵<sup>[4]</sup>,不同的是在中心增加了一个基准天线。由于受干涉式原理所限,阿德考克阵基线长度不得大于  $\lambda/2$ 。而由于新天线阵增加了基准天线,所以阵孔径  $b$  增加了 1 倍。增加天线间的距离,可以有效减小天

线间的互耦、间距误差和随机干扰的影响<sup>[8]</sup>。

## 2 误差分析及处理办法

基于本天线阵和相关算法的测向准确度,只与测量得到的各天线间的相位差有关,而与各天线接收到的信号强度无关。由于在任一时刻,接收信号的即时频率相同,所以此算法也不受频率稳定度的影响。实际中,测量引入的误差包括系统误差和随机误差两方面,因此测得的天线间相位差可表示为

$$\varphi_2 = \varphi_{2\text{real}} + s_2 + R[1] \quad (6)$$

$$\varphi_3 = \varphi_{3\text{real}} + s_3 + R[2] \quad (7)$$

$$\varphi_4 = \varphi_{4\text{real}} + s_4 + R[3] \quad (8)$$

$$\varphi_5 = \varphi_{5\text{real}} + s_5 + R[4] \quad (9)$$

其中,  $\varphi_{2\text{real}}, \varphi_{3\text{real}}, \varphi_{4\text{real}}, \varphi_{5\text{real}}$  分别为当前天线间各相位差的真实值;  $s_2, s_3, s_4, s_5$  分别为各相位差测量的系统误差;  $R[i]$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 为一组随机数,它表示各相位差测量的随机误差。

### 2.1 随机误差

产生随机误差的主要原因为外界环境变化、天线阵晃动、测量精度、电磁波的调制影响和电磁波发生频偏、折射、衍射等随机变化。增加天线阵孔径可以大大减小随机误差的影响<sup>[8]</sup>。以基线 2-1 段为例进行说明。由式(1)两边求偏微分可知

$$\partial \varphi_2 = \frac{b\pi}{\lambda} \cos \theta \partial \theta \quad (10)$$

$$\text{即} \quad \frac{\partial \theta}{\partial \varphi_2} = \frac{\lambda}{b\pi \cos \theta} \quad (11)$$

可见,当信号波长  $\lambda$  一定时,孔径  $b$  越大,测向偏差  $\partial \theta$  受随机干扰  $\partial \varphi$  的影响越小,同时,受不同来波方向  $\theta$  的影响也不相同。由基线长短不同而造成整体测向误差的对比仿真如图2所示。由图可见,在接收信号的信噪比  $S$  相同时,基线增长 1 倍后,测向结果误差明显减少,测量准确度更高。

如果测量时间允许,随机误差可通过多次测量取平均的方法改善。经  $N$  次独立测量后取平均,误差方差变为原来的  $1/N$ ,即  $D(\bar{X}) = D(X)/N$ 。

当  $b/\lambda = 1/2$  时,不同信噪比下,平均前后的误差对比如图3所示。由图可见,较高的信噪比可以使测向结果更加准确,因此需要接收机有较好的噪声系数和灵敏度。同时,多次平均也有助于减小误差。

### 2.2 系统误差

系统误差主要是由各通道间相位延时不平衡、

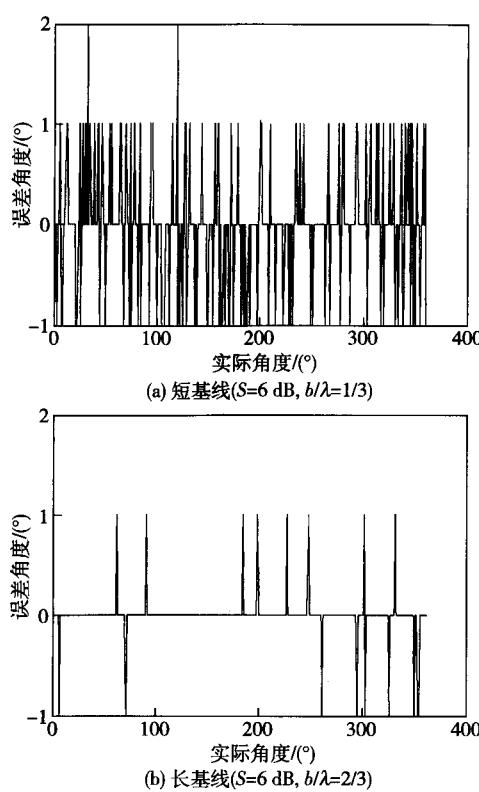


图2 短基线与长基线误差角度对比

天线不一致性和天线间互耦等原因造成的,其中各

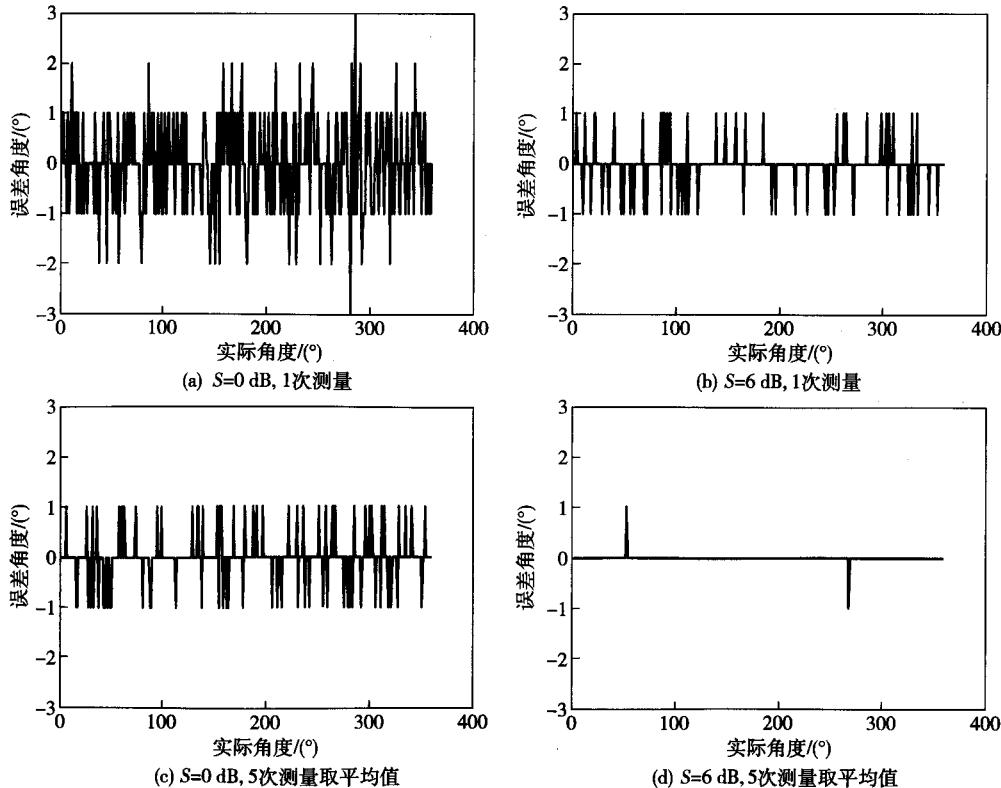


图3 不同信噪比下,1次测量与5次平均的误差角度对比

信道间不平衡问题对测量结果影响最大,可事先通过校准件来修正。如果修正后的系统误差仍对测向结果造成较大影响,可通过以下补偿方法完全消除。

首先按照之前的方法进行1次测量,得到天线间相位差  $\phi = [\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5]$ ,然后将天线阵顺时针转动  $90^\circ$ ,变为如图4所示的位置,再进行1次测量得到相位差  $\phi' = [\varphi'_2, \varphi'_3, \varphi'_4, \varphi'_5]$ 。

由于天线阵采用十字形正交结构,所以可以精确地进行  $90^\circ$  翻转。由图4可知,在假定旋转前后系统误差不变的前提下,旋转后的相位差可表示为

$$\varphi'_2 = \varphi_{2\text{real}} + s_2 + R[5] \quad (12)$$

$$\varphi'_3 = \varphi_{3\text{real}} + s_3 + R[6] \quad (13)$$

$$\varphi'_4 = \varphi_{4\text{real}} + s_4 + R[7] \quad (14)$$

$$\varphi'_5 = \varphi_{5\text{real}} + s_5 + R[8] \quad (15)$$

天线阵旋转前后对应的天线相位差相减可得

$$\varphi_2 - \varphi'_2 = \varphi_{2\text{real}} - \varphi_{3\text{real}} + R[9] \quad (16)$$

$$\varphi_3 - \varphi'_3 = \varphi_{3\text{real}} - \varphi_{4\text{real}} + R[10] \quad (17)$$

$$\varphi_4 - \varphi'_4 = \varphi_{4\text{real}} - \varphi_{5\text{real}} + R[11] \quad (18)$$

$$\varphi_5 - \varphi'_5 = \varphi_{5\text{real}} - \varphi_{2\text{real}} + R[12] \quad (19)$$

将所得的新数组  $[\varphi_2 - \varphi'_2, \varphi_3 - \varphi'_3, \varphi_4 - \varphi'_4, \varphi_5 - \varphi'_5]$  与对应的样本集  $[\varphi_{2i} - \varphi_{3i}, \varphi_{3i} - \varphi_{4i}, \varphi_{4i} - \varphi_{5i}, \varphi_{5i} - \varphi_{2i}]$  进行相关运算,最大相关系数所对应的  $\theta$

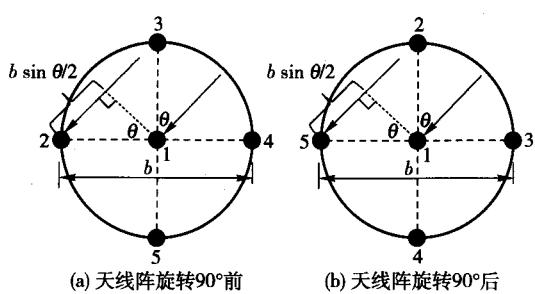


图4 旋转前后天线阵位置示意图

即为所求。

从式(16)~式(19)可以看出,使用这种补偿方法,系统误差被完全抵消掉,不会对测试结果有任何影响。因此会大大提高测量准确度。假设系统误差为 $s_2=40^\circ$ , $s_3=-20^\circ$ , $s_4=10^\circ$ , $s_5=-40^\circ$ ,则在不同入射角度下,该系统误差对测量结果的影响和补偿后的误差如图5所示。由图可见,未补偿系统误差时,最大误差角度为 $\pm 12^\circ$ ;采用补偿算法后,测向机完全消除了系统误差的影响。对于全方位的入射角,最终测量误差在 $\pm 1^\circ$ 以内。

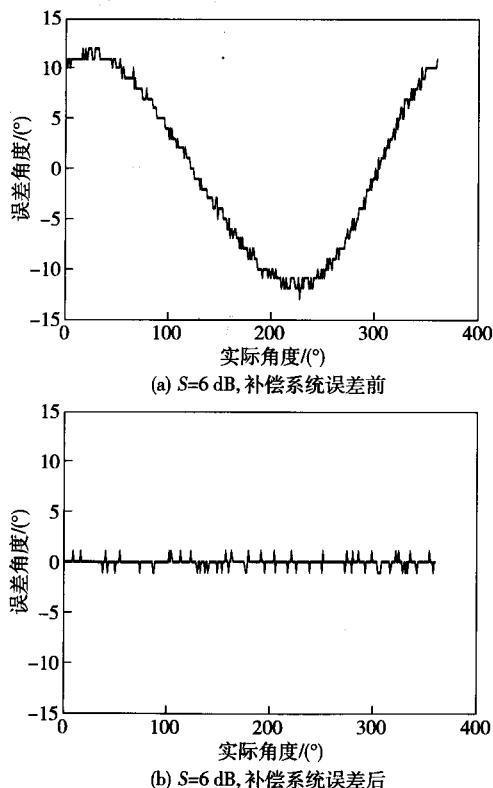


图5 补偿前后,系统误差对测向的影响

### 3 结束语

由于天线阵采用垂直基线设计,有利于减小支

架制作的结构误差,同时还具有便于折叠携带和便于实现补偿算法的优点。改进后的天线阵其孔径尺寸可比原来增大1倍,突破了干涉式测向中基线长度小于 $\lambda/2$ 的限制;增大了天线的间距和天线阵面积,减小了间距误差和受环境随机干扰的影响。

基于该天线阵的补偿算法,理论上可以完全抵消掉测向机的系统误差。同时,由于相关算法对随机干扰有很好的抑制作用,使得测向机即使在信噪比不高、通道相位不平衡的情况下,也可以取得准确度很高的示向度。在实际应用中,当不考虑时效性时,可通过多种算法提高测向的测量精度。

### 参考文献:

- [1] 杨忠. 一种基于干涉仪体制的机载测向技术研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(12): 58-60.  
Yang Zhong. Research on an airborne DF technique based on the interferometer [J]. Radio Engineering, 2010, 40(12): 58-60.
- [2] 朱庆厚. 无线电监测与通信侦察[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 277-243.
- [3] 袁孝康. 相位干涉仪测向定位研究[J]. 上海航天, 1999(3): 1-7.  
Yuan Xiaokang. Study on direction finding and position with phase interferometers [J]. Aerospace Shanghai, 1999(3): 1-7.
- [4] 徐子久, 韩俊英. 无线电测向体制概述[J]. 中国无线电管理, 2002(3): 29-35.  
Xu Zijiu, Han Junying. The summarization of the radio direction finding methods [J]. China Radio Management, 2002(3): 29-35.
- [5] Qin Ling, Jia Kexin, He Zishu. Performance analysis of correlative interferometer direction finder using cosine function [C] // 2010 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (IS-PACS2010). Chengdu: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [6] Wei Hewen, Shi Yungang. Performance analysis and comparison of correlative interferometers for direction finding [C] // 2010 International Conference on Signal Processing (ICSP2010). Beijing: IEEE Press, 2010: 393-396.
- [7] 谌丽, 陈昊, 肖先赐. 五元均匀圆阵干涉仪加权测向算法及解相位模糊的条件[J]. 电子对抗, 2004(1): 8-12.
- [8] 朱庆厚. 干涉仪测向体制的误差分析与对策[J]. 无线电工程, 1994, 24(2): 7-14.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>