

结构变形对测向天线精度的影响

刘国玺 毛贵海

中国电子科技集团公司第 54 研究所

摘要 本文主要研究了结构变形对测向精度的影响。分析了测向天线的测向算法，给出了天线变形计算，对于天线受力变形所引起的测向误差也给出了结果。为今后对测向天线进行机电综合分析提供了一种方法。

关键词 干涉仪 相位差 变形 误差

1 前言

在无线电导航、电子侦察、电子跟踪和电子对抗等电子系统中，一个很重要的任务是测定目标的方位^[1]。测向的方法和种类很多，按天线的方向图大体可分为两类：一种是利用简单振子或天线阵列的一定方向性来测向；另一类是利用系统功能来测向，而对天线方向图没有特殊要求。前者如由垂直振子天线与环形天线组合的复合天线，这个复合天线将会产生一心形方向图。通过旋转天线可找出某一方位天线感应电压最小。这种方式的测向其优点是：天线结构简单，尺寸小。缺点是：工作带宽窄，测向精度低。而这一类采用干涉仪测向体制，具有适用于任意形状的天线阵列、测向精度高等优点，广泛应用于无线电通信侦察、电磁频谱监测、导航、射电天文等领域。其中，圆形阵列是目前应用最普遍的干涉仪测向体制。

评价测向系统性能的主要技术指标是灵敏度、测向精度和抗干扰性能。

2 测向原理

2.1 干涉仪原理

干涉仪原理是利用信号到达固定间距天线阵列中不同天线振子的时间先后所形成的相位差来判断来波方位的一种测向方法。它是目前世界上最先进的测向机制。

(接第 498 页)

参考文献

- [1] 章日荣. 反射镜天线及高效率馈源. 北京: 人民邮电出版社, 1977
- [2] 杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代面天线新技术. 北京: 人民邮电出版社, 1993

作者简介

张文静 1984 年 7 月获西安电子科技大学电磁场工程系学士学位，现为中国电子科技集团公司第五十四研究所天线伺服专业部高级工程师。目前主要从事现代面天线技术、宽频带多频段波纹喇叭研究等。曾获省、部级科技进步奖 3 项。

许德森 1982 年 1 月获北京理工大学无线工程系学士学位，1987 年 1 月获中国电子科技集团公司第五十四研究所电磁场与微波技术硕士学位。现任中国电子科技集团公司第五十四研究所副总工程师、天线伺服专业部主任，河北远东通信系统工程有限公司天线自控分公司总经理，研究员，硕士生导师，中国电子学会高级会员，IEEE 会员，《无线电工程》杂志副主任委员。目前主要从事研究的方向为：现代面天线技术，低副瓣天气雷达天线的设计与研究等。曾获省、部级科技进步奖 4 项，发表多篇专业论文。

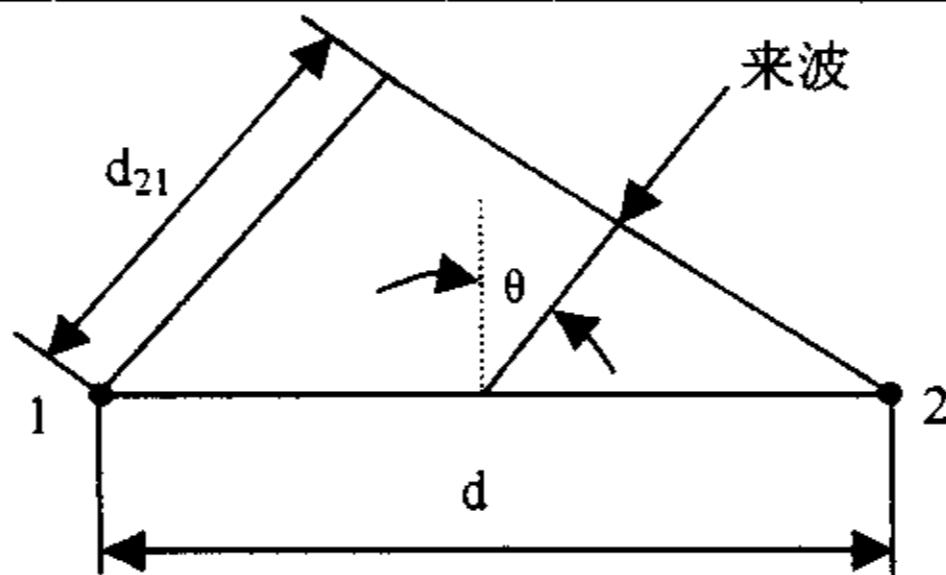


图 1 测向原理图

如图 1 所示，间隔为 d （称为基线）的两个偶极子天线 1 和 2，来波方向与 d 的垂直平分线的夹角为 θ ，此时信号到达两个天线振子时就会有相位差，如以天线 1 为计算相位差的基准天线，波程差与相位分别为：

$$d_{21} = d \sin \theta \quad (1)$$

$$\phi_{21} = (2\pi d / \lambda) \sin \theta \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) 中， d_{21} 和 ϕ_{21} 分别表示天线 2 相对于天线 1 的波程差和相位差， λ 为来波波长。令：

$$n = d / \lambda \quad (3)$$

由式 (2) 可得：

$$\theta = \arcsin(\phi_{21} / 2n\pi) \quad (4)$$

由式 (4) 可知 n 值越大， ϕ_{21} 对 θ 的灵敏度就越高，测向精度也越高。但是， n 值越大， θ 值越容易超过 2π 的范围，从而引起测量相位差的模糊。为了解决解相位值模糊这一矛盾，可增加单元天线组数。

2.2 测向算法

实际测向天线采用五阵元体制，如图 2 所示，边长为 d ，则各单元天线之间的波程差为：

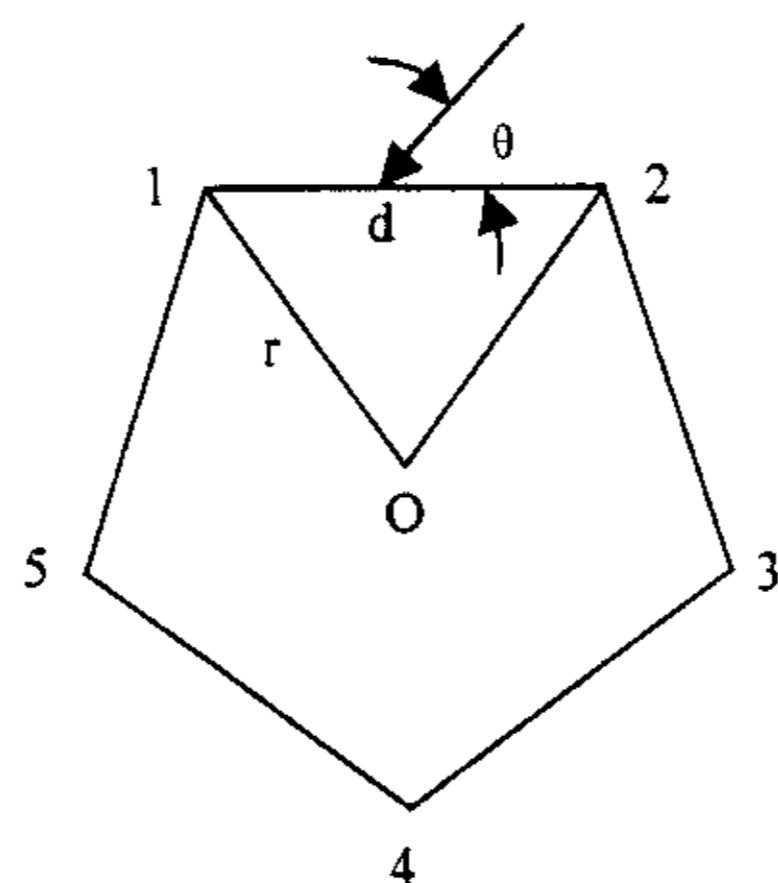


图 2 五阵元测向体制图

$$d_{12} = d \sin(\theta) \quad (5)$$

$$d_{32} = d \sin(\theta - 72^\circ) \quad (6)$$

$$d_{43} = d \sin(\theta - 2 \times 72^\circ) \quad (7)$$

$$d_{54} = d \sin(\theta - 3 \times 72^\circ) \quad (8)$$

$$d_{15} = d \sin(\theta - 4 \times 72^\circ) \quad (9)$$

各单元天线相对应的相位差为：

$$\phi_{21} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta) \quad (10)$$

$$\phi_{32} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta - 72^\circ) \quad (11)$$

$$\phi_{43} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta - 2 \times 72^\circ) \quad (12)$$

$$\phi_{54} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta - 3 \times 72^\circ) \quad (13)$$

$$\phi_{15} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta - 4 \times 72^\circ) \quad (14)$$

由式(10)~(14)可以看出：各单元天线的间距将影响天线的测向精度。因此，有必要分析间距误差对相位的影响。

3 受力与误差分析

3.1 受力分析

一般情况下，天线所受的载荷主要包括：自重和风负荷。自重主要引起各单元天线在垂直平面内的微小位移，但我们注意到：各单元天线为全向。因此，自重变形不会对天线的测向精度产生影响。风负荷则不同，它将影响天线的测向精度。

风力计算的公式可写为：

$$F = \frac{1}{16} v^2 C_F A \quad (15)$$

式(15)中， v 为风速， C_F 为风力系数， A 为物体的特征面积。风力作用于各基线的横向力分别为：

$$F_1 = F \cos(\theta - 36^\circ) \quad (16)$$

$$F_2 = F \cos(\theta - 108^\circ) \quad (17)$$

$$F_3 = F \cos(\theta) \quad (18)$$

$$F_4 = F \cos(\theta - 72^\circ) \quad (19)$$

$$F_5 = F \cos(\theta - 144^\circ) \quad (20)$$

对于各集合线的载荷集度为：

$$q_i = \frac{F_i}{r} \quad i=1, 2, 3, 4, 5 \quad (21)$$

式(21)中 F_i 为各基线所受的横向力， r 为基线半径。基线受力示意图如图3所示。

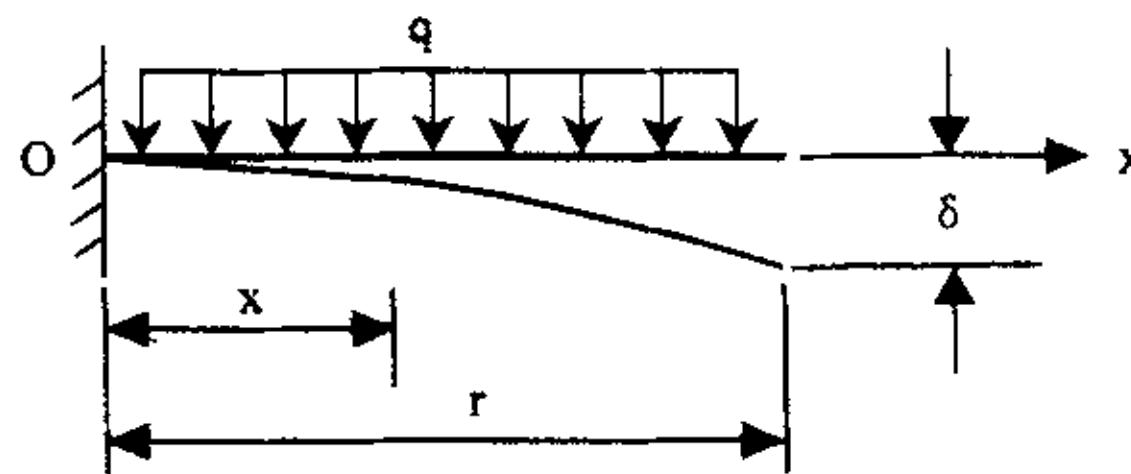


图 3 基线受力示意图

则距离原点为 x 的截面的弯矩为:

$$M = \frac{qr}{2}x - \frac{qx^2}{2} \quad (22)$$

根据变形物体的挠曲线微分方程, 可得:

$$EI\delta'' = M = \frac{qr}{2}x - \frac{qx^2}{2} \quad (23)$$

式 (23) 中 E 为弹性模量, I 为惯性矩, δ'' 为变形的两阶导数。

经过两次积分可得:

$$EI\delta' = \frac{qr}{4}x^2 - \frac{q}{6}x^3 + C \quad (24)$$

$$EI\delta = \frac{qr}{12}x^3 - \frac{q}{24}x^4 + Cx + D \quad (25)$$

再由边界条件原点处的转角和挠度应等于零, 即: 当 $x=0$ 时, $\delta'=0$, $\delta=0$, 则式 (24)、式 (25) 中的常数 C 、 D 均为零。式 (25) 变为:

$$EI\delta = \frac{qr}{12}x^3 - \frac{q}{24}x^4 \quad (26)$$

由式 (26) 可以看出当给定 r 时, 即可求出该处的挠度。

3.2 变形计算

现以某工程的测向天线为例来计算单元振子之间的间距误差。取 1 号和 5 号基线为例。由式 (26) 可得出 $\delta_1=0.071\text{mm}$, $\delta_5=0.054\text{mm}$ 。再经过转化振子间的距离为 $x=0.11\text{mm}$ 。

4 测向误差

以 50MHz 为例来计算有间距误差和无误差时的相位曲线如图 4 所示, 变形引起的相位误差如图 5 所示。

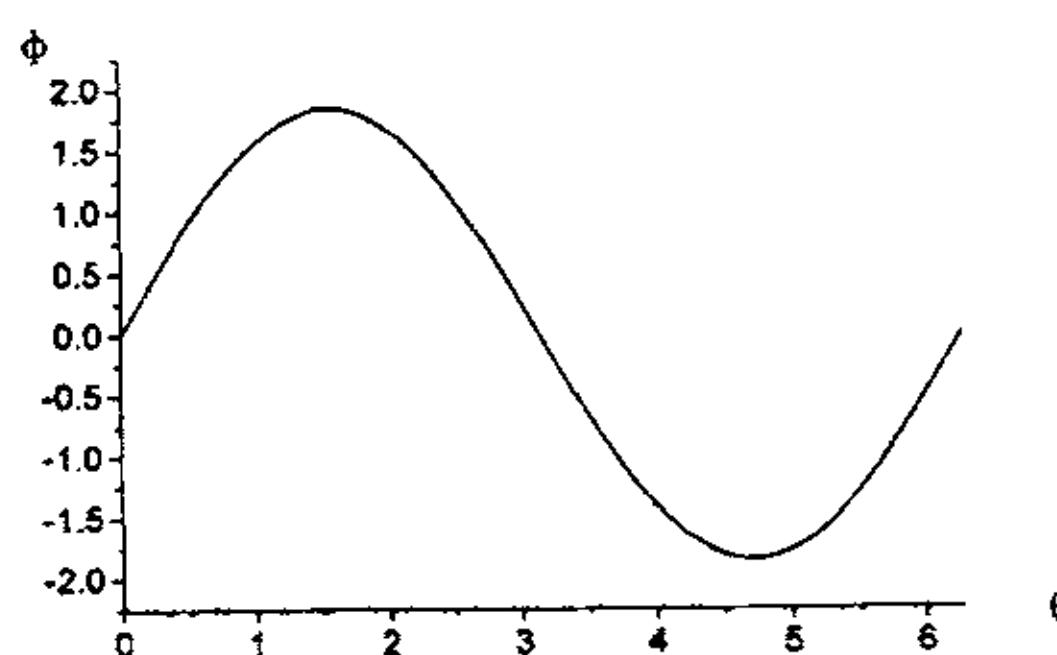


图 4 无误差时的相位差曲线

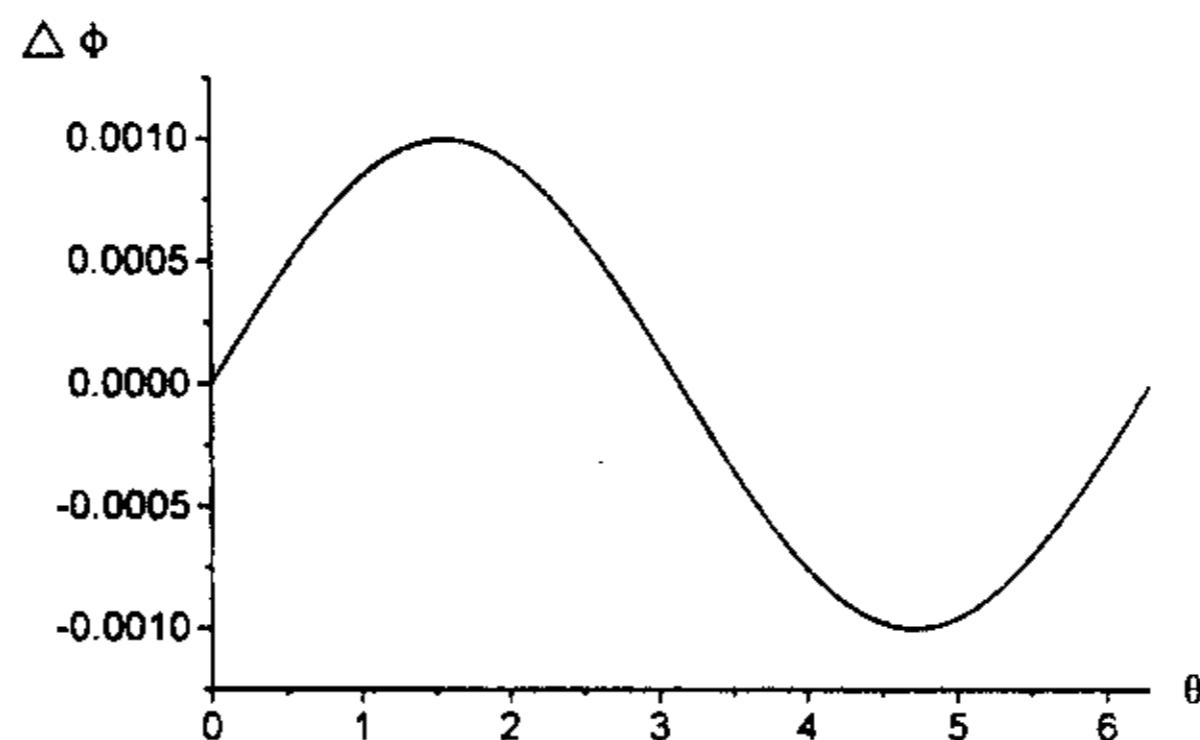


图 5 变形引起的相位误差

在图 4、图 5 中 θ 表示来波方位角, ϕ 表示理论相位差曲线, $\Delta\phi$ 表示基线在受力变形时与理论相位差之间的误差。

5 结论

通过计算不同风速时单元天线的变形, 进而得出修正后的各单元间的相位差, 这样可以作到有的放矢, 同时, 将各种情况加入到系统的相关表中, 来提高测向天线在不同工况时的测向精度。

参考文献

- [1] 林昌禄等. 天线工程手册. 北京: 国防工业出版社
- [2] 刘鸿有主编. 材料力学. 北京: 高等教育出版社
- [3] W. A. U. Titze, et al. Direction Finding System Using Symmetric-pair Antenna Arrays [J]. IEEE proc. Radar, Sonar Navig., 1995; 142(3): 130~136
- [4] A. W. 拉奇等. 天线设计手册. 北京: 解放军出版社

作者简介

刘国玺 (1970-) 硕士, 工程师, 主要从事天线结构及机电一体化方面研究。

毛贵海 (1970-) 学士, 高级工程师, 主要从事天线天线设计及相关电磁理论研究。

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)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)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)，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>