

# 一种基于曲线拟合的相控阵天线相位校准方法\*

唐山东, 张斌, 吴德伟

(空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

**摘要:** 分析了相控阵天线中相位误差来源; 以线阵为例, 详细讨论了网络相差对天线波束指向和副瓣电平的影响; 提出了一种基于正弦曲线拟合的相位校准方法。通过仿真实验证明该方法能够克服网络相差的影响, 提高天线波束指向精度, 抑制寄生副瓣。

**关键词:** 相控阵天线; 网络相差; 相位校准; 曲线拟合

中图分类号: TN821.8 文献标志码: A

## A Phase Calibration Method for Phased Array Antenna Based on Curve Fitting Technique

TANG Shandong, ZHANG Bin, WU Dewei

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The phase error sources of phased array antennas were analyzed in this paper. As an example of phased array antennas, influences of the network's phase error on the line array antenna's beam pointing and the level of sidelobe were particularly discussed. Grounded on the analysis, a phase calibration method based on sinusoidal curve fitting was given. Simulation shows that the phase calibration method can minimize phase error of the network while improve antenna's beam pointing and restrain parasitic sidelobe.

**Keywords:** phased array antenna; phase error of the network; phase calibration; curve fitting

### 1 引言

相控阵天线在工作过程中会受到多种误差因素的影响, 这些误差因素不仅会降低天线的激励精度, 使其方向性下降, 而且会带来波束指向误差, 产生较高的副瓣电平。在设计方向性要求高、副瓣影响低的相控阵天线时, 消除这些误差因素的影响是非常重要的。

文中以MLS的一维线性相控阵天线为例, 讨论如何消除相控阵天线中由馈相网络引起的相位误差的影响; 并在传统校准方法的基础上提出了一种带正弦曲线拟合的相位校准方法; 最后通过仿真检验了该方法的可行性。

### 2 相控阵天线的相位误差分析

#### 2.1 相位误差因素

均匀线阵的远场阵列因子为:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^N I(i) e^{[j\varphi_i + (i-1)\Delta\varphi]} \quad (1)$$

式中:  $I(i)$ 、 $\varphi_i$  分别为第  $i$  个天线单元激励电流的峰值和相位,  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta$  是相邻两天线单元间的波程差引起的相位差。当阵元存在相位误差时, 其在远场产生的方向性图可表示成:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^N I(i) e^{[j(\varphi_i + \delta_i) + (i-1)\Delta\varphi]} \quad (2)$$

$\delta_i$  是第  $i$  个天线单元的电流相位误差。

实践证明, 阵元相位误差  $\delta_i$  的来源主要有两种: 第一, 是来自移相器的量化误差。由于受位数限制, 移相器不能提供连续相移, 而只能将所需要的相位值按其最小相移量  $\Delta = 2\pi/2^k$  的整数倍进行量化, 这就使得实际值与理想值之间存在一定的偏差, 即量化误差 (phase quantization error)。这是一种原理性的误差, 它对波形的影响程度与采用的馈相算法有关, 采用随机馈相算法

\* 收稿日期: 2007-05-25

基金项目: 军队专项科研基金资助

作者简介: 唐山东(1983—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 研究方向: 无线电导航系统。

则可以有效降低量化误差的影响。第二,是由阵列上的非理想元件和信号分配网络造成的随机和空间上相关的误差,称为网络相差。该类误差大小与元件参数、接入性能、电路的传输线长度以及环境有关,是随机变化的。但是,如果元件确定且工作环境稳定,则可认为它是一个定值。图 1~图 3 显示了在不考虑量化误差的前提下,由馈相网络产生的均值为 0、标准差为 15° 的相位误差,对具有 60 个阵元的 MLS 方位扫描天线的波束指向和副瓣电平的影响情况。

由图 1 可以看出,馈相网络的相位误差造成了明显的与扫描角度相关的波束指向误差,扫描角度值越大,对应的指向误差也越大,这是由于各阵元辐射的信号在空间合成过程中,相位误差受

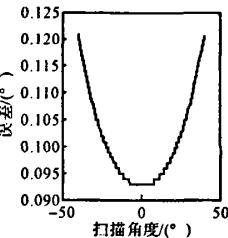


图 1 波束指向误差

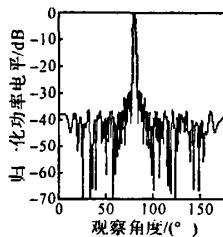


图 2 无相位误差  
时副瓣电平

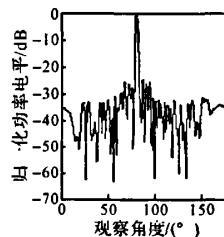


图 3 有相位误差  
时副瓣电平

到  $f(\sin\theta)$  函数的加权;图 2 和图 3 的比较则证明相位误差带来了较高的寄生副瓣,使得峰值副瓣电平和平均副瓣电平升高。

## 2.2 克服网络相差的方法

对于由馈相网络产生的相位误差,可采用两种方法来克服。一是固定补偿值法,此方法是在天线的标准工作环境下,通过实际测量获得一组补偿值,然后在馈相时将这组值对应加到理想值上。该方法工作量较大,而且不够灵活,通常不单独使用。另一个是采用软件流程校准的方法。即通过软件控制,在线对相位进行校准,获得当前状态的补偿值。该方法对使用者来说操作简单,灵活性也比较大,更换元件或改变工作环境后只要重新校准即可获得有效的补偿值。文中主要对后一种方法进行详细讨论。

## 3 基于正弦曲线拟合的相位校准方法

如果式(2)中的阵元馈相误差  $\delta_i$  只是在馈相网络中产生,则可通过软件校准的方法来修正。其原理就是由软件控制,不断进行迭代校准,获得对  $\delta_i$  的精确补偿值,并将它作为一个初始值对各单元相位进行补偿。

### 3.1 校准流程

采用软件在线校准的过程是先确定一个校准角度,并控制移相器按该角度下的理想馈相值进行布相,再对所有阵元进行逐个校准。例如,对第  $p$  个阵元相位的校准过程为:将该阵元对应的移相器的值从 0 开始,以最小相移量为步径累加至  $2\pi$ ,即式(2)中的  $\varphi_i$  按照  $0, \Delta, 2\Delta, \dots, 2\pi$  的规律变化,每改变一次移相值,就可从校准角度上监测到一个电场的幅值,该幅值随  $\varphi_i$  的变化而变化。 $\varphi_i$  的值变化  $m = 2^k$  次( $k$  为数字移相器位数),就得到了  $m$  个监测值  $y(1), y(2), \dots, y(m)$ 。如果其他移相器的值保持不变,  $y$  与  $\varphi_i$  的关系可由式(2)变形得到:

$$y(k) = I(p) e^{j[\varphi_p(k) + \delta_p]} + c \quad (3)$$

式中: $c = \sum_{i=1}^{p-1} I(i) e^{j[\varphi_i + \Delta p]} + \sum_{i=p+1}^N I(i) e^{j[\varphi_i + \Delta p]}$  为常数。

由式(3)可以看出,  $y$  是  $\varphi_i$  的正弦函数。因此,可以用这  $m$  个离散的点拟合出一条正弦曲线来。通过曲线的峰值点,就可以找到第  $p$  个阵元的最佳馈相值,该值减去理想值就得到第  $p$  个阵元的补偿值。最后,将最佳馈相值量化后送入对应移相器,再进行下一个阵元的校准,直到所有阵元支路都校准一遍。

通常来说,只校准一遍而得到的补偿值是不精确的。因此,需要进行多次校准,即把上面的过程重复执行多次。显然,校准的次数越多,其补偿值就越精确,但是其带来的运算量也就越大。因此,需要选择合适的校准次数。文中在后面将通过仿真给出合适的校准次数。

### 3.2 正弦曲线拟合

上面已经提到,在相位校准过程中要进行正弦曲线拟合。正弦曲线拟合是指对已知坐标的若

干个点(多于3个),用一条正弦曲线 $f(t) = A\sin(\omega t + \theta) + a$ 来逼近它们,使得这些点与其在曲线上的对应点之间的残差平方和:

$$\rho(A, \omega, \theta, a) = \sum_{k=1}^m [y(k) - A\sin(\omega t(k) + \theta) - a]^2 \quad (4)$$

最小。这是一种基于时域最小二乘误差分析的测量方法,它的实质就是通过这些已知的点按照残差平方和最小的原则来确定正弦函数 $f(t) = A\sin(\omega t + \theta) + a$ 中的4个参数 $A, \omega, \theta$ 和 $a$ 。

在对每个阵元支路进行校准时都监测回来 $m$ 个值,根据正弦曲线拟合的原理,假设这些值分布于一条正弦曲线上,则可以得到如下 $m$ 个测量方程:

$$\begin{aligned} y(1) &= A\sin(\omega\varphi_i(1) + \theta) + a \\ y(2) &= A\sin(\omega\varphi_i(2) + \theta) + a \\ \dots & \\ y(m) &= A\sin(\omega\varphi_i(m) + \theta) + a \end{aligned} \quad (5)$$

这是一个非线性的超定方程组,即方程个数大于未知量个数。根据残差平方和最小的原则,用最小二乘法对其进行求解,所以首先要对其进行线性化。目前使用最多的是泰勒级数展开的方法。该方法是一个不断进行迭代运算、逐渐逼近的过程:

1) 对方程的4个未知量进行初步估计,得到它们的初始估计值 $\mathbf{X}_0 = (A_0, \omega_0, \theta_0, a_0)^T$ ,然后将式(4)中的 $m$ 个方程用泰勒级数的方法在该点展开,忽略高次项,只保留一次项。于是,可以得到线性方程:

$$\Delta Y = C \Delta X \quad (6)$$

式中:

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} y(1) - f(\varphi_i(1)) \\ y(2) - f(\varphi_i(1)) \\ \vdots \\ y(m) - f(\varphi_i(1)) \end{bmatrix}$$

$$\Delta X = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} A - A_0 \\ \omega - \omega_0 \\ \theta - \theta_0 \\ a - a_0 \end{bmatrix}$$

$C$ 是参数矩阵,它是正弦函数在 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$ 处分别对各变量的偏导数:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\varphi_i(1))}{\partial A} & \frac{\partial f(\varphi_i(1))}{\partial \omega} & \frac{\partial f(\varphi_i(1))}{\partial \theta} & \frac{\partial f(\varphi_i(1))}{\partial a} \\ \frac{\partial f(\varphi_i(2))}{\partial A} & \frac{\partial f(\varphi_i(2))}{\partial \omega} & \frac{\partial f(\varphi_i(2))}{\partial \theta} & \frac{\partial f(\varphi_i(2))}{\partial a} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f(\varphi_i(m))}{\partial A} & \frac{\partial f(\varphi_i(m))}{\partial \omega} & \frac{\partial f(\varphi_i(m))}{\partial \theta} & \frac{\partial f(\varphi_i(m))}{\partial a} \end{bmatrix}_{x=x_0}$$

2) 求解方程(6)的最小二乘解。

$$\Delta X = (C^T C)^{-1} C^T \Delta Y \quad (7)$$

3) 由 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \Delta X$ 可以得到方程中变量的实际值,然后将该值替代式(5)中的 $\mathbf{X}_0$ 进行迭代运算,直到 $\Delta X$ 小于一定的误差门限 $\xi$ ,此时得到的参数解才是精确解。

正弦曲线拟合具有参数准确度高,稳定性好,复现性强,以及分辨力不受量化误差限制的优点。采用最小二乘法求解正弦函数的参数比较简单,但是,该方法对初始值比较敏感,如果估计的初始值与实际值差距较大,则很容易陷入局部最大值,从而得不到方程的最优解。为此,对监测回来的初始数据要进行一定的处理,以求获得与真实值最相近的初始值,这样不仅能提高解的精度,还可以减少迭代次数,加速收敛。

### 3.3 仿真分析

采用软件对校准过程进行建模仿真,在仿真过程中做如下设定:产生均值为0、标准差为15的随机数来模拟信号经过馈相网络所产生的相位误差;选定校准角度为 $10^\circ$ ;各阵元辐射信号的空间叠加电场由式(2)计算。仿真结果如图4所示。

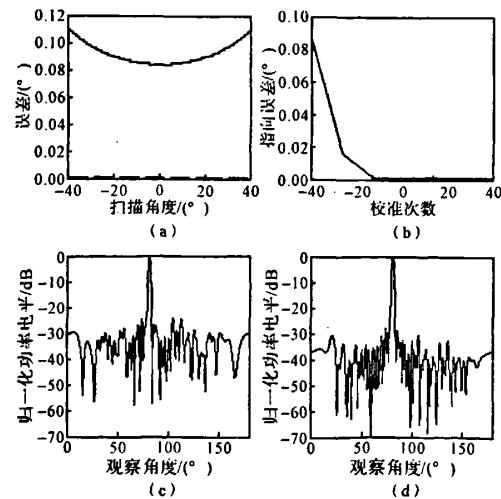


图4 校准前后波束指向误差和副瓣电平大小

图4(a)显示了校准前后不同扫描角度的指

向误差,实线表示校准前波束指向误差,虚线表示校准后指向误差。可以看出,经过相位校准,波束指向得到了明显改善。而且,校准后各扫描角度的误差趋于一致。图 4(b)统计了校准次数与指向误差的关系,由图中曲线看出,经前两次校准波束指向改善明显,第三次以后曲线趋于水平,误差改善不明显。考虑到量化及其它原因的影响,校准次数宜选在 3~4 次。图 4(c)和图 4(d)分别绘出了校准前后波瓣电平大小,通过比较可以明显看出,天线副瓣电平得到了有效地抑制,平均副瓣下降了约 5.5dB,峰值副瓣也有明显改善。这些都是由于通过相位校准获得了馈相网络的有效相位补偿值,使得天线各阵元间馈入的电流相位差接近于理想值。

## 4 结论

馈相网络造成的相位误差是相控阵天线相

(上接第 299 页)

形信号,上位机对信号进行分析、变换和显示<sup>[9]</sup>,如图 10 所示。

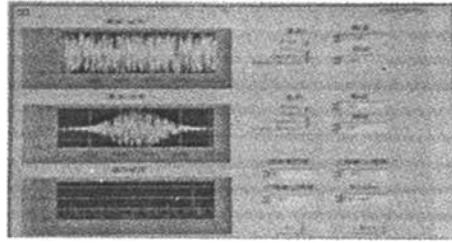


图 10 信号分析示意图

## 4 结束语

利用 LabWindows/CVI 语言实现了普通单片机实验板的虚拟仪器功能,提高了实验板的整体性能和应用范围。本实验板仍有很多性能可以开发,如通过外加 USB 口实现 PC 机对实验板的控制等。文中的设计方法为复杂虚拟仪器系统的实现可起到一定的借鉴作用。

位误差的主要来源之一,由它引起的波束指向误差和寄生副瓣较大地影响了相控阵天线的性能。仿真和实践证明,文中提出的基于曲线拟合的相位校准方法能够有效克服相控阵天线的网络相位误差,提高天线精度。

### 参考文献:

- [1] Robert J Mailloux. Phased array antenna handbook, Second Edition[M]. 北京:电子工业出版社,2007:278—296.
- [2] 沈文辉,周希朗,宫新保. 提高相控阵天线波束指向精度的方法[J]. 上海交通大学学报,2004,38(2):233—235.
- [3] 许化龙,袁晓峰,陈淑红. 正弦信号波形参数拟合求解的混合优化算法[J]. 电子测量与仪器学报,2004,18(4):1—4.
- [4] 梁志国,孙璟宇. 超低频正弦波形信号参数的精确评价[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4):34—36.

### 参考文献:

- [1] 王国权. 虚拟试验技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [2] 王建新,杨世风,隋美丽. LabWindows/CVI 测试技术及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 胡汉才. 单片机原理及其接口技术[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 石东海. 单片机数据通信技术从入门到精通[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [5] 周航慈. 单片机应用程序设计技术[M]. 北京:航空航天大学出版社,2002.
- [6] 刘君华. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [7] 宋宇峰. LabWindows/CVI 逐步深入与开发实例[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [8] 张凤均. LabWindows/CVI 开发入门和进阶[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [9] 张毅刚,乔立岩. 虚拟仪器软件开发环境 LabWindows/CVI 6.0 编程指南[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

## 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>