

一种基于功率测量的相控阵天线校准方法

敬红勇 李正军 田步宁

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

摘要 文章研究了一种基于功率测量的相控阵天线校准方法, 该方法要求探头和被测天线固定, 在移相器状态切换的条件下, 利用测量探头接收的微波信号功率, 测定出各单元初始激励的相对幅度和相对相位。由于不需要相位测量, 可以保证测量稳定进行, 尤其可以解决高频时相位测量精度问题。最后模拟了应用该方法对相控阵天线进行校准的全过程, 模拟结果表明, 该方法是正确有效的。

关键词 相控阵天线 校准方法 功率测量

0 引言

相控阵天线中许多器件的制造和组装都有公差, 以及天线单元间互耦的影响, 常常使各通道呈现出相当大的幅相误差, 从而引起相控阵天线增益的下降和副瓣的升高。因此, 在研制过程中需要知道天线各通道的幅度和相位值, 以便对通道的幅相误差进行补偿, 来获得理想的天线增益和副瓣电平。此外, 相控阵天线在长期工作时, 由于组件老化、热变形和元件更换造成天线各通道的幅相误差, 这种误差需要进行校准和补偿。所以, 相控阵天线的测量校准是相控阵天线研制过程中一个必不可少的环节, 也是相控阵天线研究的热点问题之一。

目前, 关于相控阵天线测量校准的外场方法中, 存在原理不同的两种方法^[1]。第一种方法, 探头相对天线移动并测量在某一表面的近场空间分布或者测量方向图, 根据测量结果由线性方程组评估单元的激励振幅, 这属于电动力学的逆问题, 仍有很多问题需要解决; 第二种方法, 在各种不同的配相状态用固定探头测量场, 又可分为调制法和换相法。文章所提的方法就是换相法的一种, 其优点在于只需进

行幅度测量, 便可得到阵列单元激励的相对幅度和相对相位, 并完成相控阵天线的检测校正^[2]。

1 校准原理及数学模型

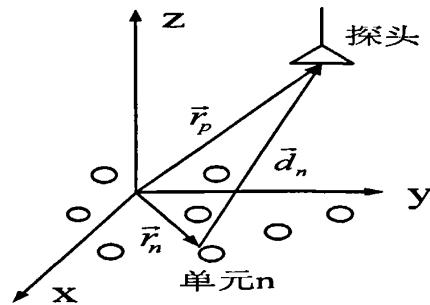


图1 校准方法示意图

图1所示为基于功率测量的相控阵天线校准方法示意图。测量时, 探头处于单元的远场区, 阵列的近场区, 被测天线和探头均保持不动, 根据场的叠加原理, 探头接收到的信号可以表示为如下形式:

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n \quad (1)$$

$$c_n = \frac{1}{d_n} e^{-jkd_n} f_n(\hat{d}_n) \cdot f_p(-\hat{d}_n) \quad (2)$$

式中, w_n 表示第 n 个单元的激励复振幅, r_n 表示第 n 个单元的中心位置矢, r_p 为探头的位置矢, $d_n = |r_p - r_n|$, $\hat{d}_n = (r_p - r_n)/d_n$ 是从 r_n 指向 r_p 的单位矢, r_p

是探头的远场方向图, f_n 是第 n 个单元受单位激励而其他单元接匹配负载时天线远区方向图函数, 常称为第 n 个单元在阵中的方向图函数。 c_n 可以根据探头和阵列的先验信息计算出来, 也可以直接通过测试得到。

由(1)式可知, 总的传输系数可以表示为各通道的传输系数 x_n 之和, 并且对每一个通道传输系数可有 L (移相器的状态数)个值, $x = x_n(l) \equiv x_{nl}$ ($l = 0, 1, \dots, L-1$)。更进一步, 相控阵天线和探头输入端之间的传输系数可以表示如下:

$$y_{nl} = \sum_{n=1}^N x_{nl} = \sum_{n=1}^N w_{nl} c_n = \sum_{n=1}^N w_{nl} \frac{1}{d_n} e^{-jkd_n} f_n(\hat{\alpha}_n) \cdot f_p(-\hat{\alpha}_n) \quad (3)$$

探头处的接收功率为测量量, 可表示为:

$$P_{nl} = |\eta_n|^2 + |x_n|^2 + 2|\eta_n||x_n| \cos \varphi_{nl} \quad (4)$$

式中, $l = 0, 1, \dots, L-1$, 为测量时第 n 个通道移相器所处的状态, η_n 为除被切换通道 n 外的所有通道的和传输系数, $\varphi_{nl} = \arg x_{nl} - \arg \eta_n$ 为通道 n 的信号和其余通道的和信号之间的相移。

定义第 n 个单元激励的相对幅度 K_n 和相对相位 X_n 如下:

$$K_n e^{jX_n} = \frac{w_{n0}}{y_0} \quad (5)$$

式中, $y_0 = \sum_{n=1}^N x_{n0} = \sum_{n=1}^N w_{n0} c_n$, 表示相控阵天线初始状态时天线和探头之间的传输系数, 并作为求相控阵天线相对激励的参考信号。相控阵天线校正的目的就是要求 K_n 和 X_n , 以此确定相控阵天线的幅相一致性, 并做出相应的校正。

测量时, 连续改变被测通道移相器的状态, 在接收处采集得到一组功率值, 为了得到被测通道激励的相对幅度和相对相位, 须作如下假设:(1)通道传输系数的模与移相器状态无关, 即 $|x_{nl}| = a_n$; (2)移相器产生的相移是已知的, 且有 $\varphi_{nl} - \varphi_{n0} = \frac{2\pi}{L}l$ 。此时, 方程(4)可以写成如下形式:

$$P_{nl} = a_n^2 + b_n^2 + 2a_n b_n \cos(\varphi_{n0} + \frac{2\pi}{L}l) \quad (6)$$

式中, $b_n = |\eta_n|$ 。

对于 m bit 的数字移相器, 存在 $L = 2^m$ 种相位状态, 移相器的低位离散量记为 $\delta = 2\pi/L$ 。令

$$g_n = \sum_{l=0}^{L-1} P_{nl} \cos(l\delta) \quad (7)$$

$$s_n = \sum_{l=0}^{L-1} P_{nl} \sin(l\delta) \quad (8)$$

$$\alpha_n = \sum_{l=0}^{L-1} P_{nl} \quad (9)$$

由以上几式可得:

$$\left. \begin{aligned} a_n^2 + b_n^2 &= \frac{\alpha_n}{L} \\ a_n b_n &= \frac{1}{L} (g_n^2 + s_n^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

设 $a_n^2 + b_n^2 = C$, $a_n b_n = D$, 则可得到:

$$\left. \begin{aligned} a_n &= (\sqrt{C+2D} + \sqrt{C-2D})/2 && \text{当 } a_n > b_n \text{ 时} \\ b_n &= (\sqrt{C+2D} - \sqrt{C-2D})/2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} a_n &= (\sqrt{C+2D} - \sqrt{C-2D})/2 && \text{当 } a_n < b_n \text{ 时} \\ b_n &= (\sqrt{C+2D} + \sqrt{C-2D})/2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

最终得到两组解, 当被测通道在接收处产生的信号小于其余所有通道产生的和信号时, 选择式(12)作为解; 否则, 选式(11)作为解^[3]。实际上, 对于单通道激励相比其余通道激励不是太大的情况下, 在测试中总可以选择合适的探头位置保证单通道产生的信号小于其余所有通道产生的和信号, 这样就能消除解的模糊性。另一方面, 为了使换相时接收信号变化敏感并节省测量时间, 可考虑选取 4 个正交相位状态($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270°)进行测量。

最后, 可以得到各通道传输系数与参考信号(初始各通道和传输系数)的比值:

$$R_n = \frac{x_{n0}}{y_0} = \frac{a_n e^{j\varphi_{n0}}}{a_n e^{j\varphi_{n0}} + b_n} = K_n e^{jX_n} c_n \quad (13)$$

由求得的各单元激励的相对幅度和相对相位就可以判断阵列各单元的幅相一致性, 并对畸变的单元激励进行校正。

2 计算机模拟

仿真中选取一个 16 元的线阵, 单元为沿 x 轴放置的半波振子, 探头为沿 x 轴放置的半波振子, 单元

间距 $\lambda/2$, 单元参考激励为第一幅瓣电平 $SLL_0 = -30\text{dB}$ 的 Chebyshev 分布, 具体模拟步骤如下:

(1) 根据阵列和探头的先验信息确定出各单元单位激励时的传输系数 c_n ;

(2) 产生一随机激励, 运用基于功率测量的相控阵天线校准方法, 求出各单元的激励相对参考信号的比值, 并将比值对第一个单元归一化;

(3) 将参考激励对第一单元归一化, 算出随机激励时的校正值;

(4) 画出随机激励时的阵列方向图及其校正后的阵列方向图。

模拟结果如图 2 所示, 可以看出, 校正后的方向图副瓣电平小于 -30dB , 与校正要求一致, 达到了很好的校正效果。

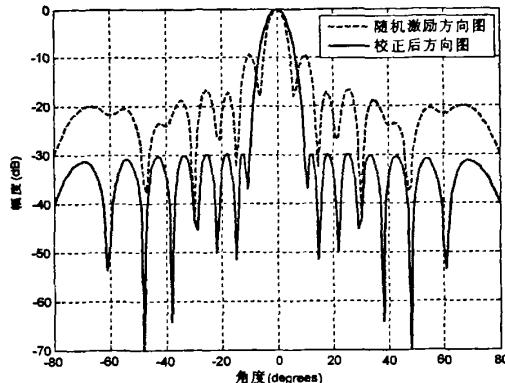


图 2 随机激励方向图和校正后方向图的比较

3 结论

文章对以功率测量为基础的相控阵天线校准方

法进行了研究, 并通过计算机模拟验证了该方法的正确性和有效性。由于测量时阵列所有单元都处于工作状态, 这样的测试结果包含了诸如互耦、制造公差及周围结构散射等所有对单元激励的影响因素; 此外, 由于只对阵列合成功率进行幅度测量, 不需要进行相位测量, 测量具有很高的稳定性, 尤其对相位变化敏感的高频, 测量具有很高的精度。

参考文献

- [1] 布勃诺夫, 尼库林. 相控阵天线特性换相测量法. 孙桂东, 张福康, 译. 南京: 电子工业部第十四研究所, 1996
- [2] Kojima N, Shiramatsu K, Chiba I, et al. Measurement and evaluation techniques for an airborne active phased array antenna [C]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996. 231~226
- [3] Liu Minggang, Feng Zhenghe. Combined rotating-element electric-field vector (CREV) method for nearfield calibration of phased array antenna [C]. ICMMT International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2007

作者简介

敬红勇 1982 年生, 在读硕士研究生。研究方向为相控阵天线及其测量。

李正军 1964 年生, 研究员。主要研究方向为空间天线技术。

田步宁 1970 年生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为空间天线技术。

A Calibration Method of Phased Array Antenna Based on Power Measurement

Jing Hongyong Li Zhengjun Tian Buning

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract A calibration method of phased array antenna is presented based on power measurement. When the antenna under test and the probe are stationary and the phase shifter state is changed, both the relative amplitude and phase of the element excitation can be obtained by amplitude measurement of the array combined power received by probe without phase measurement. Due to this characteristic, stable measurement is guaranteed even at high frequencies, where phase measurement accuracy is problematic. The simulation of the process indicates that this method is efficient and correct.

Key words Phased array antenna Calibration method Power measurement

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>