

数字多波束天线测试研究

王金华¹,韦欣荣²

(1. 中国人民解放军 61081 部队,北京 100094; 2. 北京飞行器总体设计部,北京 100094)

摘要 探讨数字多波束天线的测试方法,对于数字多波束天线远场、近场测试的基本原理及优缺点进行了研究。详细分析了近场环境下数字多波束天线测试误差,研究了误差消除的方法。通过对误差的修正,得到较好的测试效果,从而得出数字多波束天线在近场测试结果完全可以代替远场测试的结论。

关键词 数字多波束天线 近场测试 远场测试 误差分析

中图分类号 IN821 文献标识码 A 文章编号 1003-3106(2007)07-0037-04

Research on the Test Technology for Digital Beam Forming Antenna

WANG Jin-hua¹,WEI Xin-rong²

(1. The Unit 61081 of PLA, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract This paper discusses the test method for digital beam forming(DBF) antennas, analyzes the principle of far-field test and near-field test and the advantages and disadvantages of them. The error of near-field test is analyzed and the results of them are compared, it is concluded that as to DBF antennas, the result of near-field test can substitute far-field test.

Key words DBF(Digital Beam Forming) test; far-field test; near-field test; error analysis

0 引言

数字多波束天线阵列广泛应用于导航和通信地面站系统中,它采用软件无线电技术实现数字信号处理,在基带形成天线波束,每个天线单元向空间发射和接收波束,控制基带的波束合成算法,实现在空间合成发射和接收多个指向不同目标的天线波束。数字多波束天线的实现特点决定了它的测试不同于传统天线,因此有必要对数字多波束天线的测试方法进行研究,应用先进的测试技术和测试设施,验证数字多波束天线是否满足设计指标,并且帮助改进设计。目前应用最广的天线测试方法为远场法、近场法和紧缩场法^[1]。它们都属于自由空间测试场,能有效消除或抑制地面的、周围环境及外来干扰等影响,能完整地反映天线的辐射特性。本文结合数字多波束天线对远场法和近场法进行研究,以选择适合数字多波束天线的测试方案和方法。

1 数字多波束天线测试方法

数字多波束天线的测试项目包括波束指向、波束宽度、天线增益、系统 EIRP 值、旁瓣位置及旁瓣电平、波瓣图、极化、跟踪范围、跟踪精度、跟踪方式

和相位中心等天线的基本特性,这主要结合天线测试技术进行,下面分别描述远场近场测试原理。

1.1 远场测试原理

人们总是对远场的辐射特性感兴趣,通常也总是测量远场,在数字多波束天线的测试中,远场测试采用高架天线测试场的形式,远场测试距离必须大于远近场分界点,即 $R = \frac{2D^2}{\lambda}$ 。式中,D 为天线物理口径的最大尺寸; λ 为波长; R 为待测天线至远场区之内边界的距离。远场测试原理如图 1 所示。

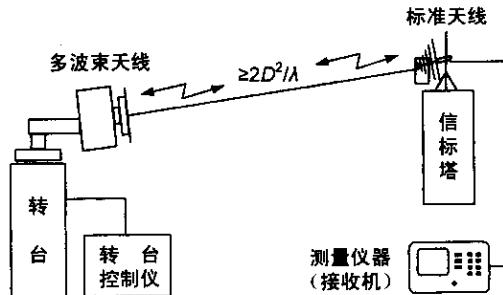


图 1 远场测试原理

收稿日期 2007-01-19

1.2 近场测试原理

文献[2]详细描述了近场测试的理论基础,如图2所示。若已知在闭合表面上由待测天线所产生的辐射场,就能计算出在该表面外空间的任何点处的场,于是从近场的测量入手就能计算远场波瓣图。

远场波瓣图和一维口径分布之间存在傅里叶变换对的关系^[3]为:

$$E(\sin(\phi)) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(x_\lambda) e^{j2\pi x_\lambda \sin\phi} dx_\lambda, \quad (1)$$

$$E(x_\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\sin\phi) e^{-j2\pi x_\lambda \sin\phi} d(\sin\phi). \quad (2)$$

式中, $E(x_\lambda)$ 为一维口径分布; $E(\sin\phi)$ 为远场分布的角频谱; x_λ 为 x/λ ; ϕ 为扫描角。

2 近场测试误差分析

2.1 近场测试理论分析

近场测试是用一个特性已知的探头,抽测天线近区某一表面上辐射场的幅、相分布,通过严格的数学变换式确定天线的远场特性,测量面通常取为平面、球面或圆柱面,相应地称为平面扫描的近场测量技术、柱面或球面扫描的近场测量技术。该法的基本思想是把待测天线在空间建立的场展开成为平面波函数(或柱面波函数、球面波函数)之和,展开式中的加权函数包含着远场图的完整信息,根据近场测量数据算出加权函数,进而确定天线的远场方向图。完成这种测量一般要求以下3个主要步骤:(1)对探头的特性进行校准,即测出探头的方向图;(2)在待测天线近区某一选定的表面上,用探头2种独立的取向(例如相互正交的2种取向),以合适的间隔抽样测量其切向场分布;(3)完成天线远场方向图的计算,通常用快速傅里叶变换(FFT)完成这一步。

如图2所示,近场测试原理可表述为:

$$B'_0(P) = F' a_0 \int t_{10}(K) \cdot s'_{02}(K) e^{jrd} e^{jK \cdot P} dK; \quad (3)$$

$$B''_0(P) = F'' a_0 \int t_{10}(K) \cdot s''_{02}(K) e^{jrd} e^{jK \cdot P} dK. \quad (4)$$

式中, $B'_0(P)$ 、 $B''_0(P)$ 代表2个正交极性的探头天线幅度与相位的输出; F' 、 F'' 为各自探头天线相对负载的阻抗失配因子, $F' = \frac{1}{1 - \Gamma_l \Gamma_p'}$, $F'' = \frac{1}{1 - \Gamma_l \Gamma_p''}$; $t_{10}(K)$ 为传输系数; $s'_{02}(K)$ 、 $s''_{02}(K)$ 分别代表2个探头天线的平面波接收因子; a_0 为AUT输入参数,AUT为待测天线的简写; P 为扫描面 z 方向为常数 d 的矢量; K 为待测天线面位置矢量,可表示

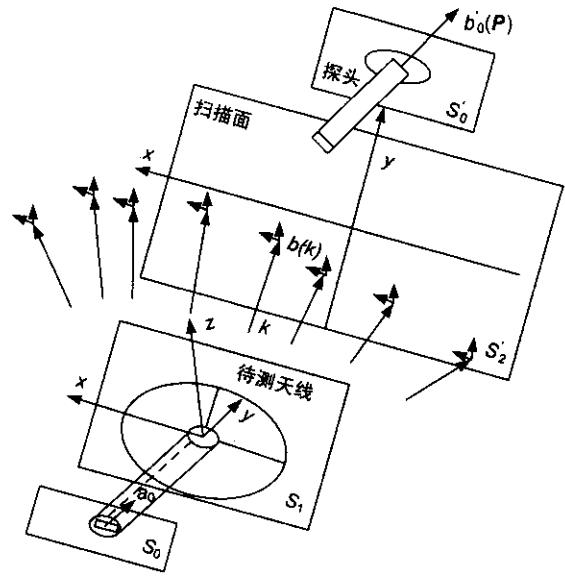


图2 近场测试原理

为 $k_x \hat{x} + k_y \hat{y}$ 。

通过对经过探头校正后的测得的参数进行傅里叶变换得到角频谱 $D'(K)$ 、 $D''(K)$:

$$D'(K) = t_{10}(K) \cdot s'_{02}(K) = \frac{e^{-jrd}}{4\pi^2 F' A'} [B'_0(P) e^{-jK \cdot P}] dP; \quad (5)$$

$$D''(K) = t_{10}(K) \cdot s''_{02}(K) = \frac{e^{-jrd}}{4\pi^2 F'' A''} [B''_0(P) e^{-jK \cdot P}] dP. \quad (6)$$

式中, $A' = a_0/b'_0(P_0)$ 为常数; $A'' = a_0/b''_0(P_0)$ 为常数。

$$t_{10m}(K) = \frac{\frac{D'(K)}{s'_{02m}(K)} - \frac{D''(K)}{s''_{02m}(K)} \rho'(K)}{1 - \rho'(K)/\rho''(K)}; \quad (7)$$

$$t_{10c}(K) = \frac{\frac{D''(K)}{s''_{02c}(K)} - \frac{D'(K)}{s'_{02c}(K)} \rho''(K)}{1 - \rho'(K)/\rho''(K)}. \quad (8)$$

把最大幅度点 P_0 作为参考点,近场幅度图和相位图通过和参考点的测量值比较得到 m 和 c 下标分别代表矢量 $t_{10}(K)$ 和 $s_{10}(K)$ 的2个正交部分。它们表示主要部分和正交部分,为了与极化比的定义一致, m 表示垂直方向或者右旋极化部分, c 代表对应的正交部分,包括水平方向或者左旋极化部分,一般原则是,第1根探头主要用来耦合 m 部分分量,第2根探头主要用来耦合 c 分量。

2.2 近场测试误差分析及其校正

近场测试的误差来源^[5]可以分为理论计算和测量2部分。

理论误差包括由于计算方法引起的准确度误

差,经过几十年研究理论的发展,可以发现这些由于理论近似所引起的误差要么是可以忽略的,要么是可以理解为测量误差。例如传输方程表达式(3)和式(4)是在线性、单频的自由空间中由麦克斯韦方程推导出来的,并且假设AUT和探头天线的多反射可以忽略,其中线性、单频的自由空间的环境条件可以看成可以忽略的误差,而由AUT和探头天线引起的多反射可以看成是测量误差,通过对探头天线的校准可以对这种测量误差进行补偿,从而提高测量的准确性。

测量误差是数字多波束测试误差的主要来源,测量误差大致可以分为2类:(1)由于探头参数的不定度所引起增益、极化、方向图测量误差,从而影响 $s_{02}(K)$ 的正确获取;(2)近场测量数据误差,影响数据 $B'_0(P), B''_0(P), A', A''$ 和各种不同的反射因子的正确取得,从而影响角频谱 $D'(K), D''(K)$ 的正确获取。

探头参数错误影响取决于探头相对于AUT的极化,主要包括探头的相对类型、探头极化比、探头增益测量和探头排列,假设第1个探头和AUT的主瓣耦合,第2个探头和AUT的正交部分耦合,从而AUT和探头的极化满足:

$$\left| \frac{s'_c(K)s''_m(K)}{s'_m(K)s''_c(K)} \right| = \left| \frac{\rho'_{sl}(K)}{\rho''_{sl}(K)} \right| \ll 1; \quad (9)$$

$$|\rho'_{sl}(K)p_u(K)| \ll 1. \quad (10)$$

对于所有的 K ,上面等式都满足,式中, ρ'_{sl}, ρ''_{sl} 和 $p_u(K)$ 分别表示第1个探头、第2个探头和AUT的极化,其中,

$$p_u(K) = t_c(K)/t_m(K) \quad (11)$$

探头校正方程为:

$$t_m(K) = \frac{D'(K)}{s'_m(K)}; \quad (12)$$

$$t_c(K) = \frac{D''(K)}{s''_c(K)} - \frac{D'(K)}{s'_m(K)\rho''_{sl}(K)}. \quad (13)$$

分别对式(12)、(13)求导,有式(14)、(15),表示校正后的相对偏差,对 $s'_m(K), s''_c(K)$ 进行调整,使得相对误差满足系统精度要求,从而得到各个方向的探头校准量 $s'_m(K), s''_c(K)$,完成对探头的校准。

$$\frac{dt_m(K)}{t_m(K)} = \frac{dD'(K)}{D'(K)} - \frac{ds'_m(K)}{s'_m(K)}; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{dt_c(K)}{t_c(K)} &= \left(1 + \frac{1}{p(K)\rho''_{sl}(K)} \right) \cdot \\ &\left(\frac{dD''(K)}{D'(K)} - \frac{ds''_c(K)}{s''_c(K)} \right) + \frac{1}{p(K)\rho''_{sl}(K)} \cdot \\ &\left(\frac{d\rho''_{sl}}{s''_c(K)} - \frac{dD'(K)}{D'(K)} + \frac{ds'_m(K)}{s'_m(K)} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

近场测试数据误差,主要是归一化常量,阻抗匹

配因子,AUT排列误差,数据处理的字节效应,测量区域的截取效应,探头的位置误差,探头和AUT的多反射,接收天线的动态范围,幅度非线性,由于接收机、连接电缆、旋转关节、温度变化引起的相位误差,微波暗室的漫反射,微波泄漏和交调,幅度和相位测量中的随机误差,这些误差会对角频谱 $D'(K), D''(K)$ 的测量引入误差,可以通过对标准天线做近场试验和远场试验的方法进行数据比对,分别获取各个项目的误差。

总的来说,近场测试误差包括系统误差也包括随机误差,这些系统误差相互独立,按照 3σ 原则以 σ_i 为中心正态分布,根据中心极限定理,复合的总误差满足高斯分布,可以通过式(16)来进行归一化处理,从而得到总共的误差:

$$\epsilon_T = \sqrt{3\sigma_R^2 + \sum_i \epsilon_i^2}. \quad (16)$$

式中, ϵ_T 为总误差; ϵ_i 为各个部分最大系统误差; σ_R 为随机误差的标准差。

NSI公司应用近场技术测量全球星的卫星天线,其增益不准确度为0.15 dB,EIRP不准确度为0.18 dB,偏离主瓣峰值-10 dB处不准确度为0.21 dB,-20 dB处为0.50 dB,-30 dB处为1.57 dB,-40 dB处为5.75 dB,获得较高的测量精度。

3 数字多波束天线测试方法比较

远场测试最大程度反映天线的真实情况。测出的结果最具有说服力,具有以下优点:

- ① 最大程度模仿天线的实际工作情况;
- ② 测量方法直观简便。

远场测量的缺点主要体现在以下几个方面:

- ① 天线之间所必需的距离要求远,使用场地大;
- ② 要建标校塔,塔高一般不能满足波束宽度要求,多径影响严重;
- ③ 容易受到外界电磁干扰的影响;
- ④ 一般不能测相位方向图;
- ⑤ 不易保密。

相对而言,近场测试的优点很明显,体现在以下几个方面:

- ① 近场测量法节省时间、成本低,得到的远场方向图的精度与远场测量精度相当或更好一些;
- ② 可以确定天线远场特性的完整信息,包括辐射场的振幅、相位和极化的空间分布特性;
- ③ 消除了远场尺寸的限制、运输和安装问题以

及大尺寸转台的机械误差；

④ 近场测量可以在室内进行 ,这不仅使工作人员得到了舒适的工作场所 ,更易于保密 ,更重要的是提供了一个可以控制的测试环境和全天候工作条件。

当然 近场测试的也不是很完美 还有以下缺点：

① 测量系统复杂 ,制造成本昂贵；

② 在近场测量中 ,对探头的校准比在远场测量中对辅助天线的校准要更加精确、更全面 ,以便对探头的影响进行补偿；

③ 由近场测量数据确定天线远场方向图 ,需要借助计算机完成大量计算 ,因而计算机软件起着重要的作用；

④ 待测天线的方向图不能实时地获得；

⑤ 这种方法的适用频段也有一定限制 频率太低时 ,吸收材料成本高 ,测试结构的尺寸也过大 ;而频率太高时 ,测相位的精度受限。

近场法所需的测试系统复杂 ,测试所用的设备比较昂贵 ,对探头的校准比远场测试中对标准天线的校准要严格得多 ,只有精确知道探头的特性 ,才有可能对探头的影响进行补偿。随着几十年来近场测试技术的发展 ,以上的难题已经得到比较完美的解决。而且数字多波束系统频率为 L 波段 ,吸波材料

对信号的影响很小 ,因此工作对本项目选择采用近场测试方法。

4 结束语

探讨了数字多波束天线常用的测试方法 ,阐述了远场、近场测试方法的原理 ,详细描述了近场测试的原理、误差来源 ,并进行了误差分析 ,针对近场测量误差 ,研究了误差消除的方法。研究了远场、近场测试的优缺点 ,最后通过比较得出结论 数字多波束天线可以用近场测试代替远场测试。◆

参考文献

- [1] 毛乃宏 . 天线测量手册 [M]. 北京 :电子工业出版社 , 1987 232 - 235.
- [2] YAGHJIAN A. An Overview of Near-Field Antenna Measurements [J]. IEEE Trans. Ants. Prop. , 1986 ,34 (1): 34 - 35.
- [3] KRANS J D , MARHEFKA R J. 天线 (下册) [M]. 章文勋译 .北京 :电子工业出版社 ,2005 53 - 55.
- [4] Nearfield Systems Inc. NSI2000 Software Users Manual [S] , 2002.
- [5] NEWELL A C. Error Analysis Techniques for Planar Near-field Measurements [J]. IEEE Trans. Ants. Prop. , 1988 ,36 (6): 754 - 768.

作者简介

王金华 男 (1977 -),电子科技大学通信与信息工程专业硕士 61081 部队助理工程师。主要研究方向 :卫星导航天线技术。

(上接第 16 页)

程序的方便 ,采用汇编语言和 C 语言相互嵌套的方法。为方便脱机工作和调试 ,还利用 ADSP2191 的 UART 端口和计算机的 RS - 232 接口 ,开发数字信号处理器 ADSP2191 的监控软件。通过监控软件 ,用户不但可以从 PC 机上读取、修改、搬移和保存 ADSP21 内部控制寄存器的值 ,判断接收系统的运行结果是否正确 ,还可以装载、运行 ADSP2191 一些独立的应用程序 ,如 FFT 、匹配滤波及功率谱分析等 ,这些应用程序都装在计算机内 ,使用时只需从计算机上下载 ,通过 RS232 接口和 UART 端口装入 ADSP2191 的程序区内运行即可。

4 结束语

论述了软件无线电数字前端的关键技术 ,提出了一种软件无线电中频接收机实现方案 ,对其多速率滤波器做了仿真。例举的设计方案扩展性和移植性好 ,对于 GSM 接收系统技术参数 ,通过 MATLAB 设计 ,用 CORDIC 算法进行数字下变频时 ,具有 16 级迭代 ,多速率滤波时 ,其速率转换因子为 13 ~ 15 比较合适。

软件无线电技术尽管有许多先进性 ,但它也有局限性 ,它直接对 RF 进行模数变换还无法实现 ,也无法实现超宽带(目前 FCC 开放的超宽带频段是 3.1 ~ 10.6 GHz 共 7.5 GHz 带宽) 通信。以软件无线电为扩展平台 ,近来又发展了认知无线电 (CR) ,CR 是一种新的智能无线通信技术 ,它可以感知周围环境特征 ,自适应调整通信参数(功率、频谱、带宽和调制编码方式等) 。构建一种生物感知超宽带无线通信系统模型 ,随之设计出一种低成本、低功耗的超宽带收发信机 ,这将加快无线通信技术的进一步发展。◆

参考文献

- [1] 杨小牛 ,楼才义 . 软件无线电原理与应用 [M]. 北京 :电子工业出版社 ,2001 .
- [2] LOHNING M ,HENTSCHEL T ,FETTWEIS G P. Digital Down Conversion in Software Radio Terminals. Proceedings of the 10th European Signal Processing Conference (EUSIPCO IX C). Tampere ,Finland ,2000 ,3 :1517 - 1520.
- [3] 杨小牛 ,邹少丞 . 软件无线电技术与实现 [M]. 北京 :电子工业出版社 ,2001 .

作者简介

张学毅 男 (1966 -),湖南工业大学副教授。主要研究方向 :高频电子线路教学、无线通信、数字电视。

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>