

文章编号: 2095-4980(2020)04-0660-05

一种消除紧缩场测试中多径效应的方法

樊 勇¹, 何子远^{*2}, 雷世文², 杨世伟²

(1.北京空间飞行器总体设计部 电子信息事业部, 北京 100094; 2.电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 610073)

摘要: 在天线方向图测试中, 紧缩场测试(CATR)是远场测试的一种有效替代手段, 但多径效应的存在, 会显著影响紧缩场测试的精确度。本文提出一种能在紧缩场测试中有效消除多径效应的方法。该方法把待测天线(AUT)沿任意特定方向等距移动, 进行多次测量, 不同位置测得的多径信号会有不同的相移因子, 利用这些相移因子构造一范德蒙特矩阵, 对该范德蒙特矩阵直接求逆, 可得到被测单元对所有信号的响应输出, 其中, 零度方向的响应输出即为待测单元的方向图。仿真及测试数据偏差均小于 0.5 dB, 表明该方法可以对多径效应进行有效的消除。

关键词: 紧缩场测试; 多径信号; 等距移动; 范德蒙特矩阵

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019192

A method to cancel the stray signals in compact antenna test range

FAN Yong¹, HE Ziyuan^{*2}, LEI Shiwen², YANG Shiwei²

(1. Electronic Information Division, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610073, China)

Abstract: Compact Antenna Test Range(CATR) is an effective alternative method to measure the antenna pattern, however, the existence of the stray signals would significantly degrade the measurement accuracy. The paper proposes an effective method which can effectively eliminate the influence of the stray signals. The proposed method measures the Antenna Under Test(AUT) repeatedly while moving the AUT along any straight line with equidistance. There are different phase factors for each stray signal at different displacements. A Vandermonde matrix can be constructed by using these phase factors. All responses, including the desired response, can be calculated by inverting the Vandermonde matrix. The deviations between the simulations and test data are less than 0.5 dB, which validates the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Compact Antenna Test Range; stray signal; equal displacement; Vandermonde matrix

理论上, 雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)及天线方向图测试, 需要满足远场条件, 因此针对大型设备, 需要较大的场地。但由于条件的限制, 往往用近场测量和紧缩场(CATR)测量替代远场测量。紧缩场采用反射面把来自馈源的球面波在静区变换为近似平面波^[1-3]。在暗室中, 通常放置有吸波材料, 但在实际中总是存在多径效应。这种多径效应会对紧缩场的静区场造成扰动, 从而造成测试误差^[2-4]。为了提高测试精确度, 研究人员进行了大量研究, 提出了多种方法。具体地, 反卷积法^[5], 首先测试静区数据, 然后从待测天线(AUT)的测试数据中减去静区的测试数据, 就能获得需要测试的结果; 也有用算法估计多径信号的入射角^[6-7], 但文献[6]没有给出仿真或测试结果, 效果无法评估, 文献[7]能估计出多径信号方向及幅度, 但没有提出如何消除误差; 虚拟阵技术^[8-10], 其本质和文献[11]一致, 因此和文献[11]存在同样的问题; 时域门法^[7-8]对 AUT 进行扫频测试, 把测试数据变换到时域, 利用直达波时间最短, 设定时间门, 消除其他多径效应, 然后把时域滤波后的信号再反变换到频域, 得到 AUT 的测试结果。该算法有效性主要依赖于直达波和多径效应在时间上的可靠分离。平面波谱法和自适应空域滤波技术^[7-9], 也是一种消除多径的方法, 但它对近旁轴的多径不能有效消除。

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-07-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费基金资助项目(ZYGX2018J021)

作者简介: 樊 勇(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器系统级辐射特性测试。email:158112696@139.com

*通信作者: 何子远 email:zyhe@uestc.edu.cn

还有一种是方向图比较法^[10-15]，该方法在静区不同位置测试 AUT，把测试数据求平均值，最后获得真实的方向图。也可通过在反射面的焦点附近移动馈源位置，测试相关数据^[12]。当多径信号从较小的角度入射，AUT 位置需要做较大的移动，甚至要求移出静区，从而限制了该类方法的使用。针对该问题，本文提出了一种新的算法，可以有效解决移动距离大的问题。

1 理论分析

多路径干扰如图 1 所示，除了 FAP 为直达波外，FDP,FCP,FBP,FP 均为干扰信号的传播路径。以线性阵为例，建立坐标如图 2 所示， $X'ON$ 为天线坐标系， XOZ 为测试坐标系。设天线口径分布为 $A(x')$ ，从角度 θ 入射的入射场为 $I(x',\theta)$ ，则 AUT 在 θ 方向的测试数据为：

$$F(\theta) = \int A(x')I(x',\theta)dx' \tag{1}$$

式中 $F(\theta)$ 为 AUT 位于姿态 θ 时的测试数据。

入射波 $I(x',\theta)$ 在天线坐标系和测试坐标系之间的关系由下式表示：

$$I(x',\theta) = I(x,z) = I(x'\cos\theta,x'\sin\theta) \tag{2}$$

把式(2)带入式(1)，得

$$F(\theta) = \int A(x')I(x'\cos\theta,x'\sin\theta)dx' \tag{3}$$

如果 AUT 沿着角度 $\tilde{\theta}$ 平移距离 d ，则有：

$$F(\theta,d) = \int A(x')I(x'\cos\theta + d\sin\tilde{\theta},x'\sin\theta - d\cos\tilde{\theta})dx' \tag{4}$$

式中 $F(\theta,d)$ 表示 AUT 位于姿态 θ 、沿角度 $\tilde{\theta}$ 平移 d 时的测试数据。假定有 M 个多径信号，设 $\bar{a}_m = a_m e^{j\phi_m}$ 为第 m 个多径信号，其中 a_m 和 ϕ_m 是第 m ($m=1,2,\dots,M$) 个多径信号在原点的幅度和相位，则式(4)变为：

$$F(\theta,d) = \sum_{m=0}^M \int A(x')\bar{a}_m e^{jkx'\sin(\theta_m-\theta)} e^{jkd\cos(\theta_m-\tilde{\theta})} dx' \tag{5}$$

式中： j 为虚数单位； k 为空间波数。 $m=0$ 时，入射角为 0° ，即为需要测试的信号。为简单起见，假定 AUT 沿 X 轴平移，即令 $\tilde{\theta}=90^\circ$ ，则式(5)变为：

$$F(\theta,d) = \sum_{m=0}^M \int A(x')\bar{a}_m e^{jkx'\sin(\theta_m-\theta)} e^{jkd\sin\theta_m} dx' \tag{6}$$

式(6)可以进一步表示为：

$$F(\theta,d) = \sum_{m=0}^M E(d,\theta_m)F_m(\theta) \tag{7}$$

$$F_m(\theta) = \int A(x')\bar{a}_m e^{jkx'\sin(\theta_m-\theta)} dx' \tag{8}$$

$$E(d,\theta_m) = e^{jkd\sin\theta_m} \tag{9}$$

式中： $F_m(\theta)$ 表示当 AUT 的测试姿态为位于 θ 时第 m 个多径信号的测试数据； $E(d,\theta_m)$ 是移相因子，表示在位置 d 时第 m 个多径信号相对于参考位置的相移。

假设多径信号的数目为 M ，等间距平移，平移间距为 d ，用矩阵表示式(7)，得：

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{M} \tag{10}$$

式(10)中的列矢量 \mathbf{F} 的第一个元素 $F_0(\theta)$ 即为需要测试信号，其余均为多径信号。其中，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & E(d,\theta_1) & \dots & E(d,\theta_M) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & E(Md,\theta_1) & \dots & E(Md,\theta_M) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\mathbf{F} = [F_0(\theta) \quad F_1(\theta) \quad \dots \quad F_M(\theta)]^T \tag{12}$$

$$\mathbf{M} = [F(0,\theta) \quad F(d,\theta) \quad \dots \quad F(Md,\theta)]^T \tag{13}$$

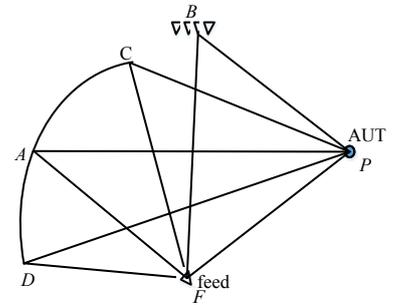


Fig.1 Schematic diagram of stray signals
图 1 多路径干扰示意图

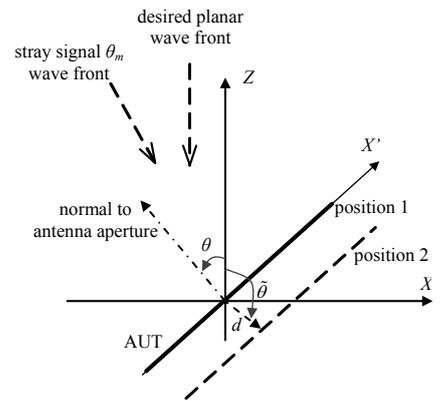


Fig.2 Relationship between test coordinate system and antenna coordinate system
图 2 测试坐标系与天线坐标系

式(12)和式(13)中的上标 T 表示转置运算。 \mathbf{M} 的第一元素是 AUT 在参考位的测试数据,第 m 个元素表示 AUT 移动距离为 md 时的测试数据。同时,由于有 $E(nd, \theta_m) = E^n(d, \theta_m)$, 所以矩阵 \mathbf{A} 是一个 $(M+1) \times (M+1)$ 的范德蒙特矩阵。对式(10)直接求逆,取第一项得:

$$F_0(\theta) = (\mathbf{F})_1 = (\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M})_1 = \sum_{j=1}^{M+1} (\mathbf{A}^{-1})_{1j} \mathbf{M}_j \quad (14)$$

如果令 $a_1 = 1, a_2 = E(d, \theta_1), \dots, a_k = E(d, \theta_{k+1}), \dots, a_{M+1} = E(d, \theta_M)$, 利用范德蒙特矩阵的求逆公式^[15], 则式(14)可以进一步表示为:

$$F_0(\theta) = - \sum_{j=1}^{M+1} \frac{(-1)^j \prod_{k=1, k \neq j}^{M+1} a_k}{\prod_{k=1}^{j-1} (a_j - a_k) \prod_{k=j+1}^{M+1} (a_k - a_j)} \mathbf{M}_j \quad (15)$$

2 仿真与试验

2.1 仿真一

考虑一阵元间距为 $\lambda/2$ 的 48 阵元线阵,其口径分布为 -40 dB 副瓣的泰勒分布。设多径信号分别从 $-75^\circ, -6^\circ, 20^\circ, 50^\circ$, 进入 AUT, 其归一化的幅度分别为 -20 dB, -20 dB, -30 dB, -20 dB。仿真结果如图 3 所示。在该仿真中, AUT 的位移 $d = \lambda/8$, 即 AUT 相对于参考位置, 分别移动了 $\lambda/8, \lambda/4, 3\lambda/8$ 和 $\lambda/2$ 。从仿真结果来看, 该算法有效地消除了多径信号, 校正后的方向图和理论方向图吻合得很好。

2.2 仿真二

仿真一考虑的是一窄波束低副瓣的例子, 为了验证算法的有效性, 这里考虑宽波束高副瓣的情形。设阵元间距为 $\lambda/2$, 阵元数为 4 的线阵, 其口径分布为均匀分布, 此时波束宽度为 26.2° , 副瓣电平为 -11.3 dB。设多径信号分别从 $20^\circ, -5^\circ$ 和 30° 进入 AUT, 其归一化的幅度分别为 0 dB, 0 dB 和 -10 dB。仿真结果如图 4 所示。

AUT 相对于参考位置, 分别移动了 $\lambda/8, \lambda/4$ 和 $3\lambda/8$ 。由于从 -5° 入射的多径信号已落入阵列波束范围内, 且信号强度和 0° 入射波一样大, 因此测试结果明显偏离理论结果。从仿真结果来看, 该算法有效地消除了多径信号, 校正结果和理论结果完全一致。

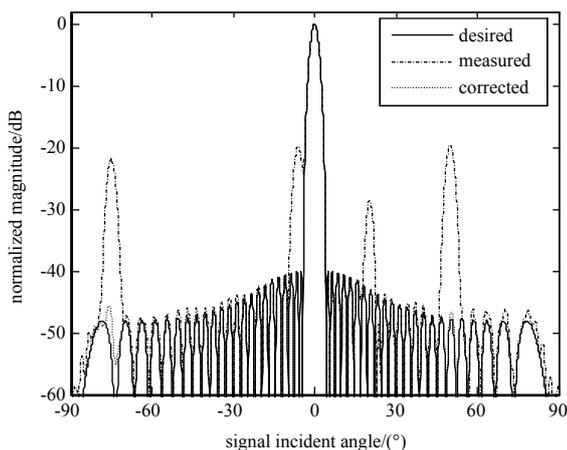


Fig.3 Simulated results when stray signals are $-75^\circ, -6^\circ, 20^\circ$ and 50°
图 3 多径信号角度为 $-75^\circ, -6^\circ, 20^\circ$ 和 50° 仿真结果

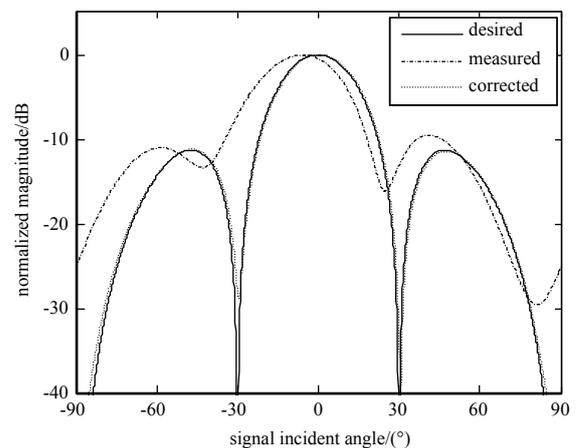


Fig.4 Simulated results when stray signals are $-20^\circ, -5^\circ$ and 30°
图 4 多径信号角度为 $-20^\circ, -5^\circ$ 和 30° 仿真结果

2.3 仿真三

本仿真用商业电磁仿真软件 FEKO 计算实验数据。在该 FEKO 模型中, 用一焦距为 85 cm 的抛物面做紧缩场反射面, 该抛物面口径尺寸为 $163.5 \text{ cm} \times 144 \text{ cm}$ 。被测天线阵由 32 个偶极子天线组成, 线阵大小为 46.5 cm, 阵元间距为 1.5 cm。仿真模型见图 5。用平面波模拟多径信号, 并分别从 $5^\circ, 35^\circ, 65^\circ$ 入射。

结果如图 6 所示: 由于反射面边沿效应, 5° 方向的多径信号的“真实”的入射角变为 6° 。在该实验中,

待测天线分别移动了 $\lambda/4$, $\lambda/2$ 和 $3\lambda/4$ 。图 6 显示，在主波束左右两侧，校正后的方向图有一定程度的恶化，其原因是反射面的边沿的散射和绕射效果造成，是紧缩场物理结构所决定的。总体而言，本文设计的消除方法能够对紧缩场多径效应进行较好的抑制。

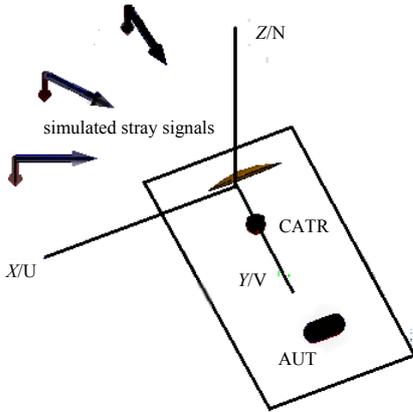


Fig.5 Model with FEKO
图 5 FEKO 仿真模型

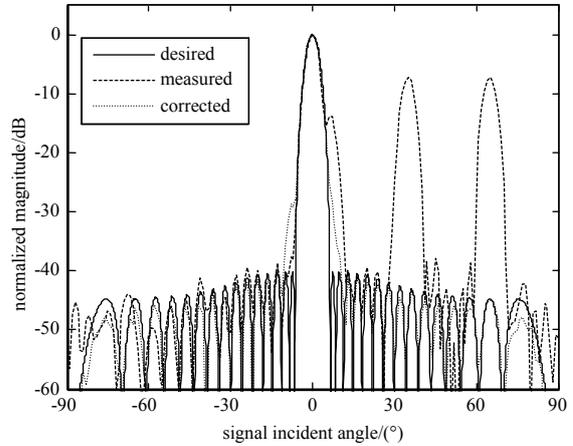


Fig.6 Processing result with FEKO simulated data when stray signals are from 5°, 35° and 65°
图 6 基于 FEKO 仿真数据处理结果，多径信号入射角为 5°、35°和 65°

2.4 试验

本次实验为实测数据。实验在北京空间飞行器总体设计部紧缩场实验室完成，被测天线为 1.8~2.6 GHz 频段标准喇叭天线，测试频率为 2.5 GHz。首先，在未加干扰源的情况下对待测天线进行测试；然后在馈源端加一喇叭天线提供干扰信号，并重新对待测天线进行测试，测试示意图如图 7 所示。

待测天线除在参考位置进行一次测试外，还沿着 X 轴方向，即与紧缩场来波方向垂直，在静区内移动半波长进行再次测试，测试结果及校正后结果如图 8 所示。图 8 中的实线是无干扰测试结果，短截线为外加一干扰源测试结果，干扰源入射角约为 40°，在主波束右侧约为 30°的地方造成约 3 dB 的测试误差，而在 60°误差约为 5 dB。图 8 中的点划线为通过本文所设计的方法进行校准后的结果，最大误差为 0.5 dB。

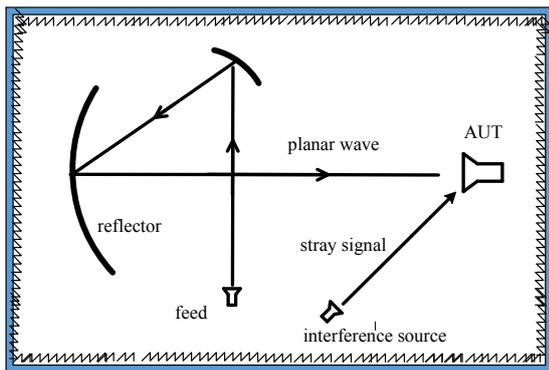


Fig.7 Sketch of test scenario
图 7 测试场景示意图

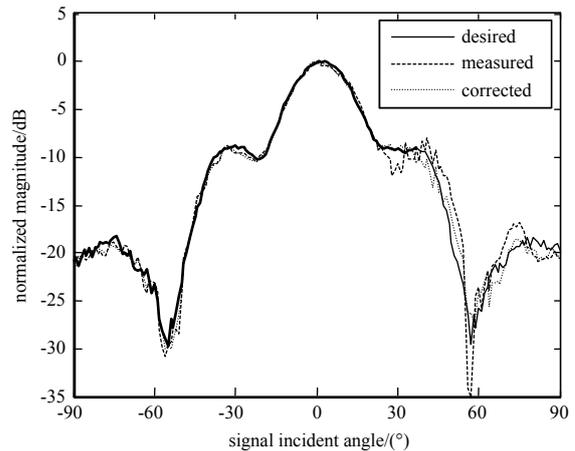


Fig.8 Processing result with measured data
图 8 基于实测数据处理结果

3 结论

本文针对紧缩场测试中由于多径效应的存在而引起测试误差的问题，提出一种有效的消除多径影响的测试方法。该方法基于多径信号为平面波的假定，通过移动待测天线，改变待测天线的相位中心，利用产生的不同相移因子，构造一范德蒙特矩阵，通过范德蒙特矩阵的特殊结构可以直接对待测天线的方向图进行直接求解。利用该方法可获得无干扰时待测天线的方向图的显示表达式，从而能够有效消除多径信号的不利影响。仿真及实测结果偏差在 0.5 dB 以内，证明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 何国瑜. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. (HE Guoyu. Calculation and measurement of electromagnetic scattering[M]. Beijing:Beihang University Press, 2006.)
- [2] 张领飞,秦顺友. 太赫兹高增益天线测量技术的可行性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):184-188. (ZHANG Lingfei,QIN Shunyou. Feasibility analysis of high-gain antenna measurement techniques at THz band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):184-188.)
- [3] GREGSON S F,PARINI C G. Examination of the effect of common CATR quiet zone specifications on antenna pattern measurement uncertainties[C]// Loughborough Antennas & Propagation Conference. Loughborough,UK:[s.n.], 2017:1-5.
- [4] GREGSON S F,NEWELL A C,PARINI C G. Verification of feed spillover reduction using FF-MARS in a CATR using computational electromagnetic simulation[C]// 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego,CA,USA:IEEE, 2017:1935-1936.
- [5] GARCIA P L,CANO J L,TORRES R. A deconvolution method for correcting antenna measurement errors in compact antenna test range[C]// Proceedings of the 17th Annual Antenna Measurement Techniques Association(AMTA) Meeting and Symposium. [S.l.]:AMTA, 1995:509-514.
- [6] PINCHUK G,GERSHKOVICH B,BRAUN R,et al. Stray signals suppression in far field antenna measurement range[C]// 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems(COMCAS). Tel-Aviv,Israel:IEEE, 2017:1-5.
- [7] DIRIX Marc,HEBERLING Dirk. Full-sphere angle of arrival detection using CMRCLEAN[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(5):2769-2772.
- [8] MA Yifei,YAO Yuan,YANG Cheng,et al. Virtual array based APC for a tri-reflector CATR[C]// 2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Beijing,China:IEEE, 2016:898-900.
- [9] 全绍辉,何国瑜,徐永斌. 紧缩场干扰波的时域分析[J]. 电波科学学报, 2003,18(4):389-392. (QUAN Shaohui,HE Guoyu,XU Yongbin. CATR extraneous waves analysis using time domain approach[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003,18(4):389-392.)
- [10] VIIKARI V,KOLMONEN V,SALO J,et al. Antenna pattern correction technique based on an adaptive array algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(8):2194-2198.
- [11] HANSEN T B,MARR R A,HSIA J S,et al. Methods for locating stray-signal sources in anechoic chambers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008,57(3):480-489.
- [12] BURNSIDE W D,GUPTA I J. Method to reduce stray signal errors in antenna patten measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994,42(3):399-405.
- [13] LEATHERWOOD D A,JOY E B. Plane wave pattern subtraction range compensation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001,49(12):362-368.
- [14] VIIKARI V,HÄKLI J,ALA-LAURINAHO J,et al. A feed scanning based APC technique for compact antenna test ranges[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005,53(10):3160-3165.
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (ZHANG Xianda. Matrix analysis and applications[M]. Beijing:Tsinghua Press, 2004.)