

文章编号:1005-6122(2007)04-0024-04

基于扫频时域法测量的 RCS 外推技术研究*

李南京 许家栋 张麟兮 胡楚峰

(西北工业大学无人机特种技术国防科技重点实验室, 西安 710072)

摘要: 大目标的室内 RCS 测量不易满足远场条件, 外推技术可将测试距离大幅度缩短, 从而克服此缺陷。针对点频连续波方法测试 RCS 精度很有限, 致使外推结果精度不高, 本文提出基于扫频的时域法 RCS 外推技术。扫频测试能得到高精度的时域测试数据, 通过对时域数据进行有效的变换, 获取准确的频域幅相信息, 从而外推出较高精度的远场 RCS, 实现大目标的 RCS 测量。通过对金属圆柱的测试, 验证了该技术的优越性。

关键词: 雷达散射截面, 时域, 扫频, 外推

Investigation on RCS Extrapolation Technique Based on Time-Domain Method

LI Nan-jing, XU Jia-dong, ZHANG Lin-xi, HU Chu-feng

(UAC Special-Technical Key Laboratory of National Defense Technology, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Indoor RCS measurement of large target is hard to meet the far-field condition, however, extrapolation technique can overcome the disadvantage by shortening the required distance greatly. The CW RCS measurement technique has a limited precision, which affects the extrapolating results indirectly. In this paper, a new extrapolation technique based on time-domain method by frequency-sweeping measurement is put up. By processing RCS data on time-domain effectively, accurate frequency-domain RCS information can be obtained, and then be extrapolated into far-field RCS pattern. Thus the RCS measurement of large target is realized. Measurement results of a cylinder show the advantages of the new technique.

Key words: Radar cross section (RCS), Time-domain, Frequency-sweeping, Extrapolation

引言

雷达散射截面(RCS)的测试方法有外场测试和内场测试, 外场测试可以直接得到目标 RCS, 但保密性不好、易受气候的影响, 并且费人费力; 内场测试是通过紧缩场测量系统将球面波变成平面波来测试目标, 但紧缩场测量系统代价非常高昂, 而且对大型目标的测试也存在一定困难。外推技术^[1-5]可用于不满足远场条件的室内 RCS 测量, 从而代替 RCS 外场测试和室内紧缩场测量, 经济地实现了暗室内直接测试较大目标的散射。

文献[1,2]讨论了一种较为有效的将中场(即菲涅耳场区)RCS 测量外推至远区场的算法。该外推算法基于物理光学模型, 估计入射场在散射体表面感应的面电流, 并通过与该面电流相关的加权傅立叶变换来计算中场和远场的散射。

采用外推技术, 可以大大缩短测试距离, 如表 1 所示, 中场外推技术能比远场测试缩短几倍至几十倍的距离。

表 1 口径 $D=2\text{m}$ 目标所需的远场测试距离
和进行外推的中场测试距离比较

频点(GHz)	远场 R_{\min} (m)	中场 R_{\min} (m)	距离缩短至
1	26.7	3.2	12%
2	53	4.5	8.5%
5	133	7.2	5.4%
10	267	10.0	3.8%
18	480	13.6	2.8%

所以, 中场的外推工作对于分析飞行器等装备的隐身性能提供了代价低廉、易于操作的解决方案, 对 RCS 的测试技术和研究也是一种大的推动。

外推技术的基础, 是点频的 RCS 中场测试数

* 收稿日期:2006-02-06; 定稿日期:2006-05-26

据,传统的方法是采用点频连续波测试系统。对散射较低的被测目标,测试系统中需添置复杂的对消系统,可使暗室背景再下降 20dB 左右。但这时系统稳定性较差,而且放置目标后使后墙产生遮挡,原有后墙的反射很难对消,从而产生系统误差;另外,目标相位中心很难与转台转轴重合,导致转动时目标与后墙干涉起伏。所以点频测试系统精度较有限,特别是对尺寸大散射又低的目标,系统误差较大,很难提高测试精度^[6]。

基于扫频的时域法 RCS 测量技术^[7],以矢量网络分析仪为核心部件构建 RCS 扫频测试系统,能实现误差模型修正,通过正确灵活的设置和数据处理,使测试精度得到巨大提高,而且搭建的测试系统较为简化,测试速度快,信息量大。

若能将时域数据变换为准确的频域数据,用于外推则可大大提高外推的效果,目前,国内尚未有文献报道这方面的工作。所以,本文旨在应用时域法 RCS 测量技术得到大尺寸目标的时域中场 RCS,之后通过有效的变换方法,得出准确的频域信息,从而外推得到远场准确的 RCS 散射图。实验证明了这种尝试的有效性。

1 RCS 外推算法——加权傅立叶变换

如图 1 所示,圆柱散射体的中心位于三维直角坐标系的原点, z 轴穿过散射体中心,并平行于散射体表面的法方向。

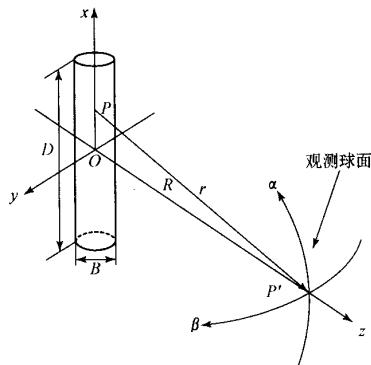


图 1 目标散射测试

图 1 中, R 为观测球面半径, α 和 β 为观测角, D 和 B 分别为圆柱的高度和直径。利用物理光学模型估计照射场中散射体的感应面电流为:

$$\mathbf{J} = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i \quad (1)$$

式中, \mathbf{n} 表示目标表面的单位法方向, \mathbf{H}_i 为入射磁

场。从而,由通过散射体的面电流 \mathbf{J} 在观测点 \mathbf{P}' 产生的矢量磁位为

$$\mathbf{A}(\mathbf{P}') = \int \mathbf{J}(\mathbf{P}) G(\mathbf{P}, \mathbf{P}') d\mathbf{s} \quad (2)$$

上式沿着整个散射体表面进行积分,其中 $G(\mathbf{P}, \mathbf{P}') = \exp(ikr)/4\pi r$ 为格林函数, $r = |\mathbf{P} - \mathbf{P}'|$ 。

文献[1]讨论了中场外推至远场的加权 FFT 算法,为了利用快速傅里叶变换计算矢量磁位 \mathbf{A} ,须将式(2)转换为加权傅立叶积分形式。为此,使用菲涅耳逼近(二次方逼近)来简化格林函数,并应用近轴约束得到所需的傅立叶积分形式。文献提出倾斜因子 $\mathbf{O}_e(x, y)$ 的概念,表征了平面目标与实际目标的一个等效关系。当散射体的结构形状、大小等先验信息未知时,该等价倾斜因子能够消除测量时的目标模糊性。最终得到单站矢量磁位 \mathbf{A}_m 为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_m(R, \alpha, \beta) = & [2H_0 \exp(+i2kR)/4\pi R] \cdot \\ & \iint \mathbf{O}_e(x, y) \exp[+ik(x^2 + y^2)/R] \cdot \\ & \exp(-i2kx \sin \alpha - i2ky \sin \beta) dx dy \end{aligned} \quad (3)$$

等价倾斜因子可以表示为单站矢量磁位 \mathbf{A}_m 的逆傅立叶变换:

$$\begin{aligned} \mathbf{O}_e(x, y) = & [4\pi R g \exp(-i2kR)/2H_0] \\ & \exp[-ik(x^2 + y^2)/R] \cdot \\ & \iint \mathbf{A}_m(R, \alpha, \beta)/R \exp[+i2kx \sin \alpha + i2ky \sin \beta] \cdot \\ & d(2k \sin \alpha) x d(2k \sin \beta)/(2\pi)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

根据上式,利用测得的中场单站矢量磁位 \mathbf{A}_m 就可以估计出等价倾斜因子。单站散射场与单站矢量磁位 \mathbf{A}_m 关系为: $\mathbf{E}_m \approx -(120\pi)ik\mathbf{A}_m$ 。

所以,外推算法分为 3 步:首先,利用散射电磁场的中场测量数据推导单站矢量磁位 \mathbf{A}_m ;然后,对该矢量磁位进行逆傅立叶变换,并将其结果乘以一个特殊的加权函数,由此估计出等价倾斜因子 \mathbf{O}_e (见(4)式);最后,由再次加权后的倾斜因子的傅立叶变换就可得出远场散射方向图(见(3)式)。

2 基于扫频的时域法 RCS 测量技术

经过大量的实验工作总结,克服了许多测试工程技术难题,构建出基于扫频的时域法 RCS 测试系统。采用理论分析及时域加门技术获取了准确的频域幅相信息。从而为 RCS 外推提供了更加有效的数据。

2.1 时域法 RCS 测试系统的构建

矢量网络分析仪的扫频法时域测量功能与时域反射计量术相似,即模拟传统的时域反射计量技术,

通过观察反射波形来确定电传输线的特性。借助响应的形状和位置,可以确定到不连续性处的距离。

传统的时域反射计发出实际脉冲信号或阶跃信号并观察反射能量。矢量网络分析仪不能发出实际入射脉冲或阶跃信号,而代之以进行扫频响应测量。利用频率响应数据,依据所选择的变换,对器件脉冲响应进行计算。测试框图见图 2。

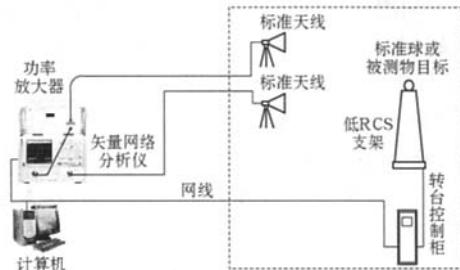


图 2 远场 RCS 扫频测试方案(虚线内为暗室)

测试过程中应用了误差修正模型,如图 3 所示。

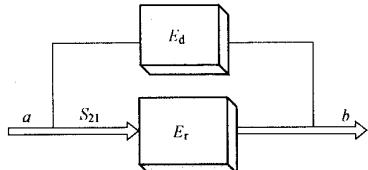


图 3 误差模型

测试步骤如下:

1) 在测试前,先测一次空暗室的背景,将其数据临时存储,此即隔离误差 E_d ;

2) 然后再放定标球,根据测试误差模型,测得:

$$S_{21_sphere} = E_d + S_{21_0} * E_r \quad (5)$$

E_r 是频率响应误差, S_{21_0} 对应球的 RCS;

3) 第 3 步,放被测件,测得:

$$S_{21_target} = E_d + S_{21_1} * E_r \quad (6)$$

S_{21_1} 即对应目标的 RCS。从式(5)、(6)解出:

$$S_{21_1} = S_{21_0} \cdot \frac{S_{21_target} - E_d}{S_{21_sphere} - E_d} \quad (7)$$

此即为考虑误差模型的测量结果, $|S_{21_1}|^2$ 就是目标 RCS 值。

另外,采取多次平均和加时间窗的办法可提高信噪比。理论上取 100 次平均,信噪比可提高约 20 dB。加时间窗,仅保留目标区域的暗室纵向响应,从而有效地除去了收发天线耦合和暗室后墙等一些较大的反射干扰。

2.2 准确频域信息的获取

利用 FFT 逆变换,将测得的扫频数据变换到时

域,得到暗室的时域响应。然后计算波程时延时间,在目标回波的时延前后加时间窗(注意把目标的绝大部分散射能量卡在门内),之后再进行 FFT,变换回频域即为目标对应全频段的 RCS。实验表明,加窗对去除其它干扰非常有效(如图 4,图 5 所示)。

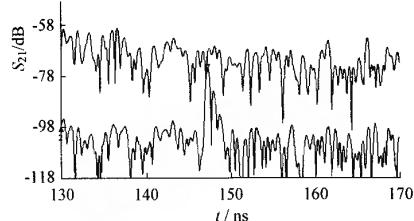


图 4 暗室的时域响应和金属球作为被测体的修正的 RCS 时域响应

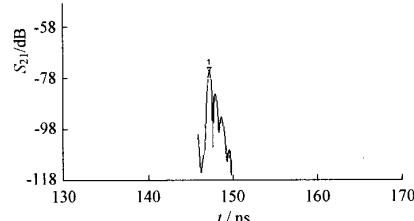


图 5 加门后球的时域响应

图 4 中上面的曲线显示了暗室的时域响应,它代表隔离误差与时间(或距离)的关系。暗室的响应来自于地面、天花板和墙的反射。

从球的测试中减去空暗室的影响,图 4 中下面的曲线显示了一个直径 80mm 的金属球作为被测目标的修正的 RCS 时域响应。可见,矢量相减极大地降低了各种干扰和杂波的影响,清楚地显示暗室响应被消除,减后的目标响应从淹没变得非常突出,标记指示主要的反射来自于球的正面,后面的次峰值直观地显示了目标球的两次爬行波绕射。

使用加门的特性可进一步降低剩下的反射的影响。门是一种带通式的时间滤波器,它可以用来观察时域响应中的某一部分。然后变换回频域,那么就只能看到门内反射产生的效果。图 5 是对目标球进行加窗的结果,已经把目标球的绝大部分散射能量卡在门内。

在图 5 中,加上门之后,门之外的反射的影响被消除了,经过 FFT,得到非常平滑的频域响应(如图 6)。此时的频域响应非常接近理论上的球的 RCS 响应(如图 7),表明扫频测试能够最终很精确地得到目标各频点的 RCS 值。

若将参考的目标球换成大尺寸的被测目标,就可得到精度良好的目标中场 RCS 频域数据。

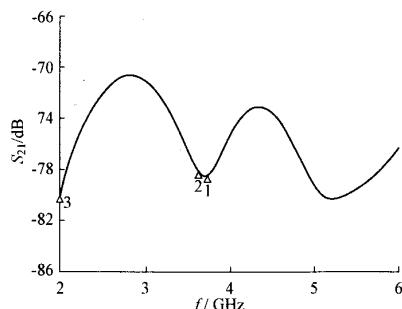


图 6 加门后球的频域响应

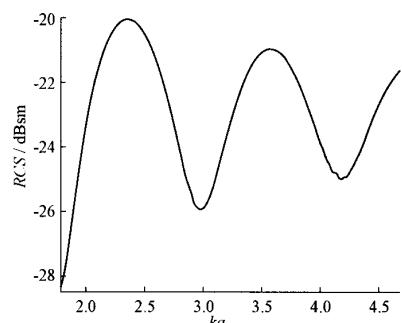


图 7 标准球背向散射特性

3 实验验证及结论

为了验证新方法的有效性,我们利用新的测试方案对金属圆柱进行中场散射测试。

测量时入射波垂直极化,目标是尺寸为 $0.9m \times \Phi 0.3m$ 的金属圆柱,扫频范围:12~18GHz,测试距离为 15.9m,观测方位角 $\beta = -10^\circ \sim +10^\circ$,步进 0.1° ,对测到的时域中场 RCS 数据进行变换加门处理,得到频域幅相数据。抽取 $f = 15\text{GHz}$ 频点的目标各角度中场散射幅相信息,进行外推,得到远场归一化散射图如图 8 所示。

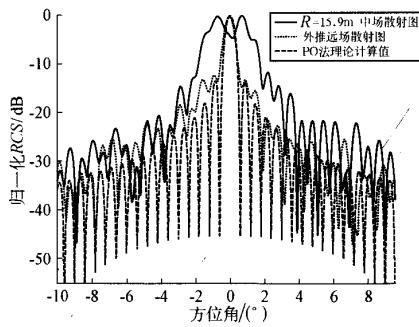


图 8 加权 FFT 外推中场测量的散射图结果

图 8 中,所有数据均为减去 RCS 最大值后的归一化数据。加权傅立叶变换外推后,远场散射图与

理论计算结果吻合良好,副瓣和零深已比较接近理论值。若采用点频连续波方案,目标能显现的观测角非常小,干扰多(如图 9),比图 8 中扫频测得的中场散射图粗糙,几乎无法进行外推。

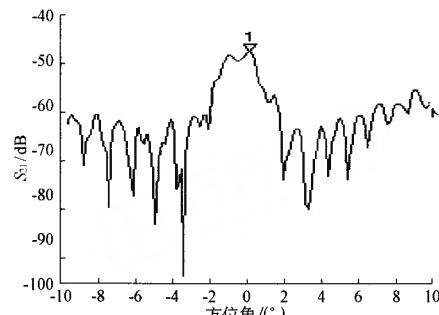


图 9 点频连续波方案的圆柱中场相对 RCS 图

另外,通过扫频测试,可对全频段 12~18GHz 内各频点数据进行外推,具有同样的精度。所以,基于扫频时域法的外推技术还具有信息量巨大、实用性强的特点。

参 考 文 献

- [1] Falconer D G. Extrapolation of near-field RCS measurements to the far zone. Proc IEEE Trans Antennas and Propagation, 1988, 36(6): 822~829
- [2] Falconer D G. Near-field statement of monostatic-bistatic theorem. In Abstracts 1988 URSI Nat Radio Science Meeting, Boulder, CO, 1988
- [3] Craig R Birtcher, Constantine A Balanis. RCS measurements, transformations and comparisons under cylindrical and plane wave illumination. Proc IEEE Trans Antennas and Propagation, 1994, 42(3): 329~333
- [4] Inasawa Y, Chiba I, Makino S. Prediction of far-field bistatic scattering cross section using spherical, cylindrical and planar scanned near-field data. Proc 11th Conf Antennas and Propagation, 2001. 599~602
- [5] Ying Z H. RCS calculation, transformations and comparisons under spherical and plane wave illumination. Proc IEEE Trans Antennas and Propagation, 1995. 1918~1921
- [6] 克拉特 E F, 等. 雷达散射截面——预估、测量和减缩. 阮颖铮, 等译. 北京:电子工业出版社, 1988
- [7] 梁步阁, 袁乃昌, 王建朋. 宽带 RCS 自动测试系统设计. 计算机测量与控制, 2004(1): 64~65

李南京 男,1976 年生,江西人,西北工业大学博士,工程师,研究方向为天线与散射技术、系统仿真。

E-mail: linanjing 76@163. com

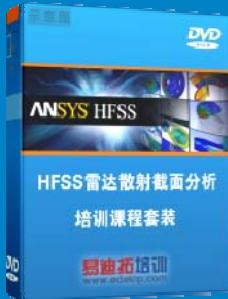
雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

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, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、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。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程:

● HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>