

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 胡楚锋

(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室内场测试,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;室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<sup>[1~5]</sup>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<sup>[6]</sup>。

基于扫频的时域法 RCS 测量技术<sup>[7]</sup>,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。

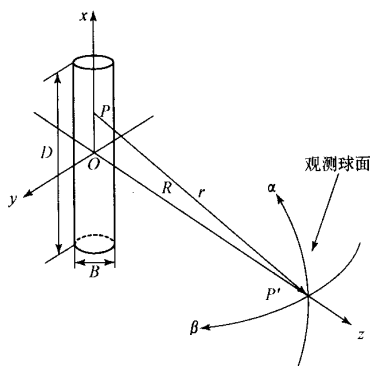


图 1 目标散射测试

图 1 中, $R$  为观测球面半径, $\alpha$  和  $\beta$  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  $O_e(x, y)$  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:

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

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:

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

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  $O_e$ 。(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。

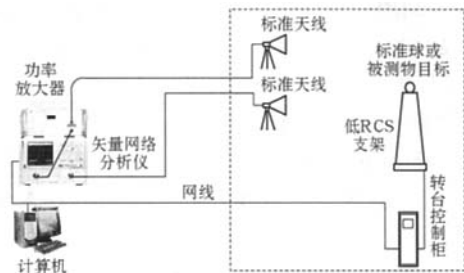


图2 远场 RCS 扫频测试方案(虚线内为暗室)

测试过程中应用了误差修正模型,如图3所示。

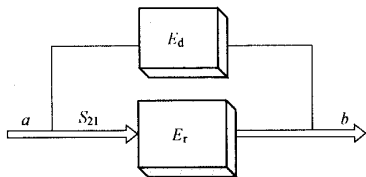


图3 误差模型

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:

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

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)。

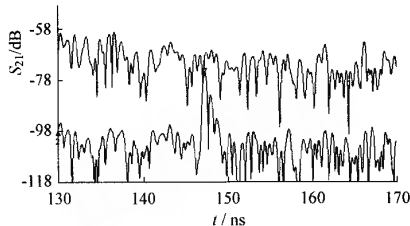


图4 暗室的时域响应和金属球作为被测体的修正的 RCS 时域响应

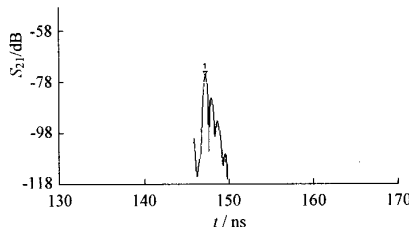


图5 加门后球的时域响应

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on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。

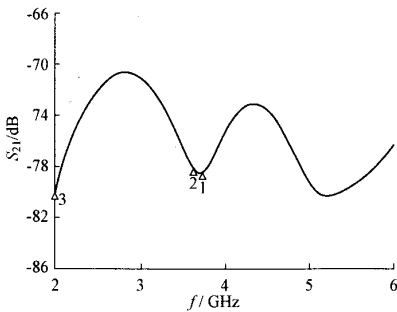


图 6 加门后球的频域响应

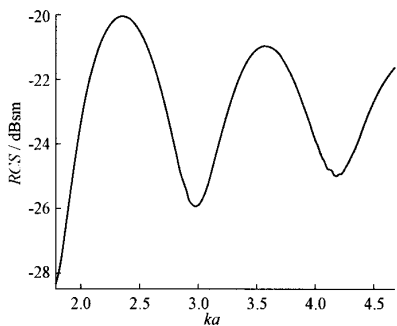


图 7 标准球背向散射特性

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 × Φ0.3m 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。

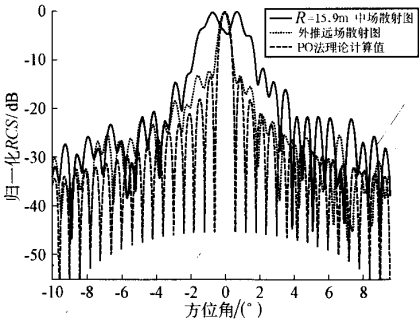


图 8 加权 FFT 外推中场测量的散射图结果

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。

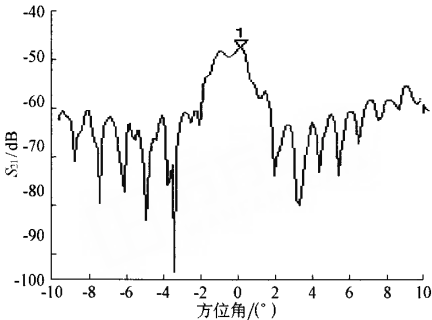


图 9 点频连续波方案的圆柱中场相对 RCS 图

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](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, 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/>