

耦合目标近场散射外推技术研究

党娇娇^{1,2}, 李南京², 胡楚锋², 宋祖勋²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072; 2. 西北工业大学无人机特种技术重点实验室, 陕西西安 710065)

摘要: 针对具有多次散射的耦合目标在不满足远场条件下测量的散射方向图发生畸变的问题, 通过分析耦合目标的近场-远场转换关系, 提出一种“多发多收”模式的近场散射外推方法. 在获得全角度的近场双站信息后, 对各角度近场接收的散射数据进行外推处理, 然后根据互易定理, 将外推后的数据等效为“远场发射、近场接收”数据. 接下来对该数据再进行一次外推, 满足“远场发射、远场接收”的条件, 最后取出对角线上的元素获得各角度的远场 RCS (Radar Cross Section, RCS). 通过建立存在强耦合机制的二面角和腔体结构模型, 利用 FEKO 和 MATLAB 软件对方法进行仿真, 将“多发多收”外推的结果与远场 RCS 进行比对. 结果表明: 该方法得到的结果与远场 RCS 方向图吻合良好, 全角度均值误差小于 1dB, 验证了方法的有效性.

关键词: 近场散射; 远场 RCS; 耦合目标; 外推方法

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1327-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.007

Near-Far Field Extrapolation Technique for Coupling Targets

DANG Jiao-jiao^{1,2}, LI Nan-jing², HU Chu-feng², SONG Zu-xun²

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

2. Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: In allusion to the problem that the scattering pattern of coupled target is distorted under the conditions of distance not satisfy the far field. By analyzing the relationship between near-field and far-field of coupling targets, an extrapolation method of “multiple-transmitter and multiple-receiving” is proposed. Firstly, the bistatic data of near-field at each angles are measured and extrapolated. Then the extrapolated data can be equivalent to “far-field transmitting, near-field receiving” data by the reciprocity theorem. Secondly, these data should be extrapolated again due to meet the “far-field transmitter, far-field receiving” conditions. Finally, diagonal elements is selected to be the monostatic radar cross section (RCS) at each angles. By creating a dihedral angle model which has strong coupling mechanisms, through the simulation with FEKO and MATLAB, the far-field RCS is compared with the result of extrapolation by multiple-transmitter and multiple-receiving. The results obtained by this method show a good agreement with the RCS of the far-field, and the average error is less than 1dB, which verifies the method is effectiveness.

Key words: near-field scattering; far-field RCS; coupled target; extrapolation method

1 引言

雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS) 是反映目标电磁特性的重要特征参数, 也是评价目标隐身性能的重要指标之一^[1]. 研究目标 RCS 的方法主要包括理论分析和测量技术. 其中, 测量技术是最有效、快捷和准确的手段. 通过对各种目标的实际测量, 不仅可以了解基本的散射现象, 检验理论分析的结果, 而且可以获得

大量的目标特征数据, 建立目标特性数据库, 雷达目标的 RCS 值最终以测试结果确定. RCS 测量根据测试系统及场地的不同, 一般可分为紧缩场测量、近场测量、外场测量. 其中, 近场测量具有系统简单、测试精度较高等优点, 非常适用于武器装备的出场检测和使用保障阶段, 因而具有重要的研究意义^[2].

近场测量的基础是建立近场散射和远场 RCS 之间的关系, 由近场测量的散射信息外推获得远场 RCS. 因

此近场散射外推技术是近场测量的关键技术^[3]. 美国是最早开展该技术研究的国家, 早在上世纪七十年代, Georgia 工学院向空军航空电子技术实验室提交的一份报告中就提到了这项技术^[4]. 1989 年, 美国 Georgia 工学院的 B. J. Cown 发表了“通过近场散射测量确定复杂目标 RCS”的论文^[5], 但文中未给出理论计算和测试结果. 以 I. J. LaHaie 为代表的团队长期从事该技术的研 究, 取得了大量的成果^[6,7], 但其研究主要针对满足孤立点模型的散射目标所提出的外推方法, 在计算复杂耦合目标时误差较大. 除此之外, 日本^[8]、德国^[9]、比利时^[10]、土耳其^[11] 等国的学者均开展了相关的研究, 但均未涉及耦合目标的近场散射外推. 国内方面, 西安电子科技大学于上世纪八十年代后期开展了由平面近场测量确定目标散射特性的研究^[12,13], 提出了基于综合平面波的近场测量理论, 对于耦合目标的外推进行了一些探讨, 但系统实现具有一定的困难. 北京航空航天大学提出了近场-远场之间的链条关系式^[14], 证明了对于任意形状目标的远场 RCS 均可由完备的近场双站信息获得. 除此之外, 航天 802 所、207 所均开展了近场散射外推技术的研究^[15]. 西北工业大学研究了基于表面电流和基于合成孔径的两大类外推方法^[16], 但对于耦合目标的外推均不适用.

在这些研究的基础上, 本论文主要针对具有多次散射的耦合目标, 提出了一种新的近场散射外推方法. 以全角域双站采集的近场散射数据为基础, 首先对近场接收的数据进行一次外推处理, 然后根据互易定理, 将“近场发射、远场接收”的数据等效为“远场发射、近场接收”的数据, 接下来, 进一步对数据进行一次外推处理, 最终获得“远场发射、远场接收”的散射数据. 利用这种方法对二面角及腔体目标模型进行了外推仿真, 将外推获得的远场 RCS 与目标模型仿真的远场 RCS 进行对比, 吻合良好, 验证了该方法的有效性.

2 耦合目标近场外推方法

2.1 耦合目标外推双站信息的完备性

通过耦合目标近场散射的测量数据能够推算出目标的远场 RCS, 两者关系的推导过程分两步^[3,14]: 首先研究单发多收的情况, 如图 1 所示. 假设照射角 θ 及散射角 θ' 方向为零, 则发射天线 I 的平面波谱为 $S_I(\phi)$, 接收天线 II 的平面波谱为 $S_{II}(\phi')$, 目标在单平面波照射下的远场散射系数为 $S_0(\phi|\phi')$, β 为双站角.

如图 1 所示, 接收天线对应不同的双站角 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$, 它们只接收单一方向的平面波, 得到形状相同的 双站散射响应. 这样共接收到 N 条离散谱线, 每条谱都类似对应于一个理想天线, 表示为:

$$\delta_n(\phi') = \begin{cases} a_n, & \phi' = \phi'_n, \\ 0, & \phi' \neq \phi'_n, \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

根据卷积公式, 对任何单元理想天线 i , 输出可以表示为:

$$S_{Ni}(\phi|\phi'_i) = \int S_0(\phi|\phi' - \tau) \delta_i(\tau) = S_0(\phi|\phi') * \delta_i(\phi') \quad (2)$$

其中, $S_{Ni}(\phi|\phi'_i)$ 为接收天线的输出, 即近场散射响应. 则接收天线的输出为 N 个单元理想天线输出之和:

$$S_N(\phi|\phi') = S_0(\phi|\phi') * \sum_{i=1}^N \delta_i(\phi') = S_0(\phi|\phi') * S_{II}(\phi') \quad (3)$$

在此基础上, 进一步考虑多发多收情况下, 近场散射与远场 RCS 之间的关系. S_{0i} 为不同方向入射时目标的远场双站散射系数, 对每个子平面波, 由式(3)可知:

$$S_{Ni}(\phi|\phi') = S_{0i}(\phi_i|\phi') * S_{II} \quad (4)$$

将上式进行合成, 得到的结果为

$$S_N = (S_{01} + S_{02} + \dots + S_{0N}) * S_{II} \quad (5)$$

由互易定理, 在每个照射方向上对应单发多收的情况可得:

$$\sum_{i=1}^N S'_{0i}(\phi'|\phi_i) = S'_0(\phi'|\phi) * S_I(\phi) \quad (6)$$

其中, S'_{0i} 代表从 ϕ' 方向照射, 在 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ 方向接收的目标远场双站散射系数.

将上式代入式(5), 可以导出远场散射系数与近场散射系数之间的关系式:

$$S_N(\phi|\phi') = S'_0(\phi'|\phi) * S_I(\phi) * S_{II}(\phi') \quad (7)$$

由式(7)可知, 任意形状的近区散射场外推需要完备的双站信息.

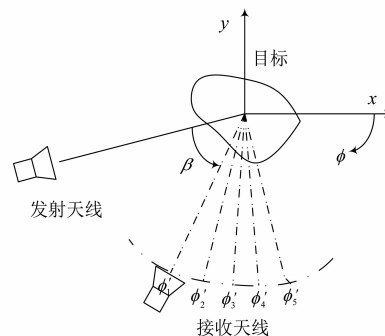


图1 单发多收的关系

2.2 “多发多收”外推方法

根据上小节对近区散射场和远区散射场关系的讨论, 针对耦合目标提出一种“多发多收”近场散射数据, 外推远场 RCS 的方法.

数据采集示意图如图 2 所示, 天线在这一点处进行发射, 同时在距离目标 R 远的圆周上按照采样间隔进

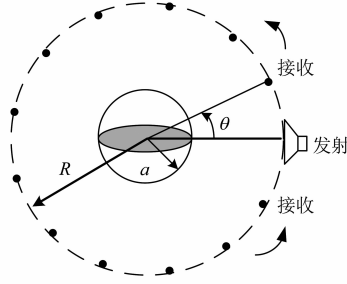


图2 双站的近场数据采集

行接收. 以此类推, 天线在圆周上逐点轮流进行“单发多收”采集, 从而得到完备的近场双站数据, 记为 $E^{NN}(\theta_{iN}, \theta_{rN})$. 其中, 上标 NN 表示“近场接收, 近场发射”, θ_{iN} 表示各发射角度, θ_{rN} 表示各接收角度.

方法处理流程如图 3 所示, 对每一次“单发多收”得到的近场数据 $E^{NN}(\theta_{iN}, \theta_{rN})$ 作外推处理, $t = 1, 2, \dots, n$. 然后将所有角度下的外推远场数据进行整理, 作为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 全角域下“近场发射、远场接收”的结果 $E^{NF}(\theta_{iN}, \theta_{rF})$, 以矩阵形式来表示, 其中每一行代表“单发多收”情况下的外推结果. 根据互易定理, 此数据等效为“近场接收、远场发射”的数据, 记为 $E^{FN}(\theta_{iN}, \theta_{rF})$. 利用该等效关系, 将每转角下“单发多收”数据进行同样处理, 提取出矩阵的每一列, 即得到某一角度下的“近场接收、远场发射”的数据 $E^{FN}(\theta_{iN}, \theta_{rF})$, $t = 1, 2, \dots, n$, 并对其进行外推处理, 得到“远场发射、远场接收”的数据. 从而得到 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 全角域下“远场发射、远场

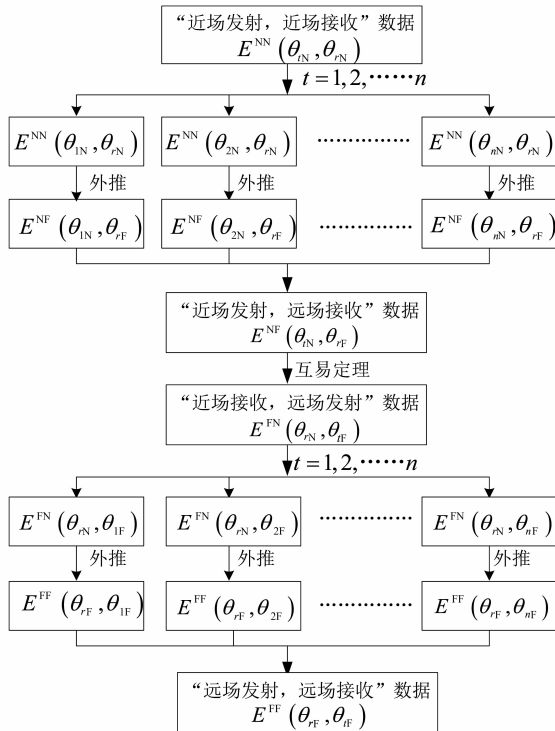


图3 方法处理流程

接收”的 RCS 数据 $E^{FF}(\theta_{rF}, \theta_{iF})$. 最后, 提取矩阵对角线分布数据, 即为各角度下的后向单站 RCS.

2.3 基于合成孔径成像的外推方法

上述流程中采用基于成像的外推算法. 在散射中心高频近似的前提下, 近场的雷达回波信号为^[3,7]:

$$E_s^N(k, \phi) = \iint_{\Omega} \psi(\mathbf{r}') \cdot \frac{e^{-jk|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|}}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|^2} d\mathbf{r}' \quad (8)$$

其中, \mathbf{r}' 表示目标上的任意位置, $\psi(\mathbf{r}')$ 为目标像函数, 即散射强度的空间分布函数, 积分在目标空间内进行, \mathbf{R}_0 表示测试距离. 波前沿相位差小于 $\pi/8$ 时, 球面波可以近似认为是平面波, 因此当散射源高度满足相位近似条件时, 可将上式整理为二维自由空间格林函数的形式:

$$E_s^N(k, \mathbf{R}_0) = \iint_{\Omega} \frac{\sqrt{k} \cdot \psi(\mathbf{r}')}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|^{3/2}} \frac{e^{-jk|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|}}{\sqrt{k|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|^{1/2}}} d\mathbf{r}' \quad (9)$$

用 Hankel 函数加法定理展开:

$$\begin{aligned} \frac{e^{-jk|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|}}{\sqrt{k|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|^{1/2}}} &\approx H_0^{(2)}(k|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_n^{(2)}(kR_0) J_n(kr') e^{jn(\varphi_0 - \varphi)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $H_n^{(2)}$ 为 n 阶 Hankel 函数, J_n 为 n 阶 Bessel 函数. 将式(10)代入式(9), 则

$$\begin{aligned} E_s^N(k, \mathbf{R}_0) &= \iint_{\Omega} \frac{\sqrt{k}\psi(\mathbf{r}')}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|^{1/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_n^{(2)}(kR_0) J_n(kr') e^{jn(\varphi_0 - \varphi)} d\mathbf{r}' \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ H_n^{(2)}(kR_0) e^{jn\varphi_0} \left[\iint_{\Omega} \frac{\sqrt{k}\psi(\mathbf{r}')}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|^{1/2}} J_n(kr') e^{jn\varphi} d\mathbf{r}' \right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

若 $R_0 \gg r'_{\max}$, 则式(11)中的 $\sqrt{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}'|}$ 可以近似为 $\sqrt{|\mathbf{R}_0|}$, 则上式变为:

$$E_s^N(k, \mathbf{R}_0) \approx \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{R_0}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n^k H_n^{(2)}(kR_0) e^{jn\varphi_0} \quad (12)$$

其中, $\iint_{\Omega} \psi(\mathbf{r}') J_n(kr') e^{-jn\varphi} d\mathbf{r}' = S_n^k$. 并对上式进行傅立叶变换, 可以得到:

$$\frac{\sqrt{k}}{\sqrt{R_0}} S_n^k H_n^{(2)}(kR_0) = \int E_s^N(k, \mathbf{R}_0) e^{-jn\varphi_0} d\varphi_0 \quad (13)$$

当 R_0 足够大时, 根据 Hankel 函数的大宗量近似:

$$\lim_{kR \rightarrow \infty} H_n^{(2)}(kR) = \sqrt{\frac{2}{\pi kR}} \exp\left[j\left(-kR + \frac{\pi}{4}\right)\right] \exp\left(jn \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

则由式(12)可得远场表达式为:

$$E_s^F(k, \mathbf{R}) \approx \frac{1}{R} \sqrt{\frac{k}{\pi}} e^{j\left(-kR + \frac{\pi}{4}\right)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n^k e^{jn\left(\varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)} \quad (15)$$

结合式(13)和式(15),可推出:

$$\begin{aligned} E_s^F(k, R) &\approx \int E_s^N(k, \mathbf{R}_0) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn(\varphi-\varphi_0)}}{H_0^{(2)}(kR_0)} d\varphi_0 \\ &= E_s^N(k, \mathbf{R}_0) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn(\varphi_0)}}{H_0^{(2)}(kR_0)} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)即为近场外推至远场的变换公式.

3 仿真分析

3.1 二面角反射器

如图4所示,在 FEKO 软件环境下,建立一个直二面角模型,各边长度 $a=0.5\text{m}$,两平板之间的夹角等于 90° ,在距离二面角中心距离 2m 处放置一喇叭天线进行照射.仿真模型图中喇叭所在位置为起始点 0° ,喇叭天线的发射频率为 1.645GHz ,波长 λ 为 0.1824 .根据远场测量条件,当 $R>5\text{m}$ 时,对应图4中喇叭天线到目标的距离可近似作为远场距离.而当 R 的取值满足 $R<5\text{m}$ 时,对应图4中喇叭天线到目标的距离属于近场照射.

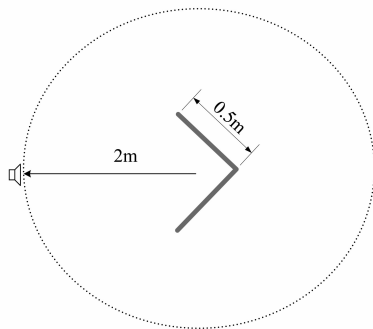


图4 仿真模型及俯视效果图

当 $R>5\text{m}$ 时,利用平面波方式激励照射二面角,在 FEKO 环境下,入射角零度位于二面角反射器的内夹角平分线处,扫描接收取值范围从 $-180^\circ \sim 180^\circ$,取步进角度为 1° ,此时共得到的 361 组数据即为二面角模型的远场 RCS 方向图.如图5中实线所示,在 $\varphi = \pm 45^\circ$ 处产生尖峰,这表示单个平板的一次镜面反射,两峰之间

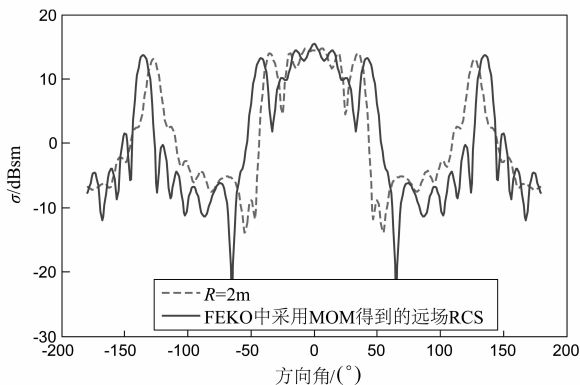


图5 二面角近场散射及远场RCS比较

宽阔的强回波是由于两个平面间二次镜面反射的结果.

在本仿真中 $R=2\text{m}$ 时,满足近场散射测量距离,首先喇叭天线在 0° 发射,并在 0° 接收,以此类推,天线在 $R=2\text{m}$ 圆周上逐点轮流进行采集,步进为 1° ,得到 361 个数据,即为二面角模型的近场散射方向图,如图5中虚线所示.近场散射值的旁瓣峰值点稍有偏移,主要由于近场有视角差,峰值点对应二面角平板的中心法向,而二面角的中心在角上,与平板面的中心不重合.由于近场球面波照射的影响,近场散射值中心主瓣峰值下降,与远场值相比误差较大.

根据第2.2节中的外推方法,将某一角度下采集的 361 组近场数据进行外推运算.以此类推,直到求得正负范围内各点的第一次外推数据.然后取出每一列,并将各角度下的 361 个值分解为幅度和相位后,对其再进行外推计算.最后将各点的外推结果组成新的矩阵 (361×361),取出矩阵对角线的值,得到最终结果即远场 RCS,如图6所示.

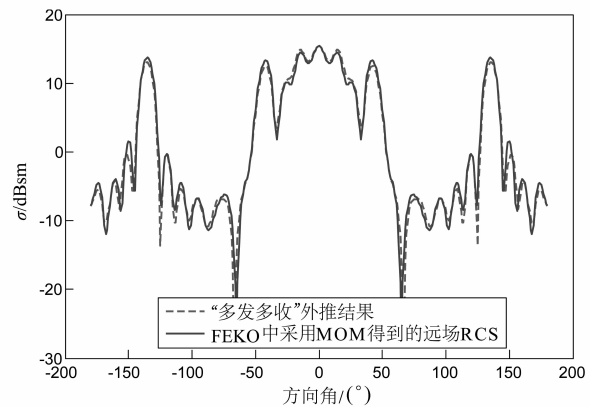


图6 “多发多收”模式外推图与远场方向图比较

上图中虚线表示 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 范围内,对双站近场散射信息采样后,经过两次外推后得到的远场 RCS.与 FEKO 中采用矩量法(MOM)计算的二面角远场 RCS 相比,两者吻合良好,最大误差不超过 2dB ,均值误差不超过 0.3dB .

3.2 腔体目标

在电磁散射特性分析中,开口空腔同样作为一种典型的耦合目标结构,因为进入空腔的入射波在腔内壁会经历多次反射或绕射.

在 FEKO 软件环境下,建立一个直腔结构模型,计算模型尺寸如图7所示,口面长 0.68m ,宽 0.44m ,直腔深度为 0.61m .为满足近场测试条件,在距离直腔中心距离 2m 处放置一个喇叭天线进行照射,入射波为垂直极化.该喇叭天线频率为 1.5GHz ,波长 $\lambda=0.2$.

首先喇叭天线在 0° 发射,在正负 180° 范围内进行接收,间隔为 1° ,然后喇叭旋转到 1° 发射,正负 180° 接

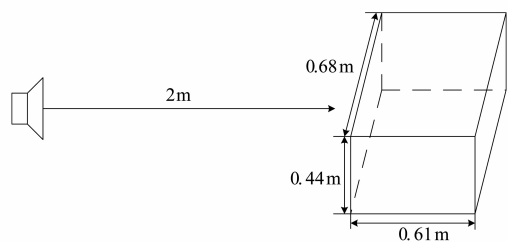


图7 矩形直腔的几何模型

收,以此类推,直到 180° 发射,得到直腔结构完备的双站近场散射信息. 如图 8 所示,近场散射与目标远场 RCS 误差较大,尤其是中心强散射区域的峰值下降,这是由于近场球面波入射进入空腔时,经内壁和终端的多次反射,以及开口边缘的绕射场所造成的.

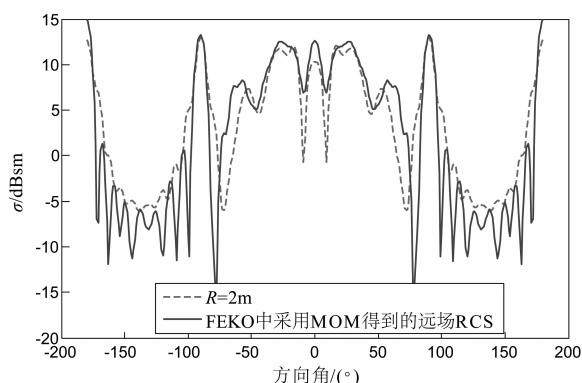


图8 腔体近场散射与远场RCS比较

对近场散射数据进行两次外推,得到矩形直腔的远场 RCS 方向图,如图 9 中虚线所示. 图中实线为直腔体远场 RCS,两者吻合良好,均值误差为 0.75dB ,重合度也很高. 与图 8 所示的近场散射方向图比较,证明了“多发多收”外推方法的有效性.

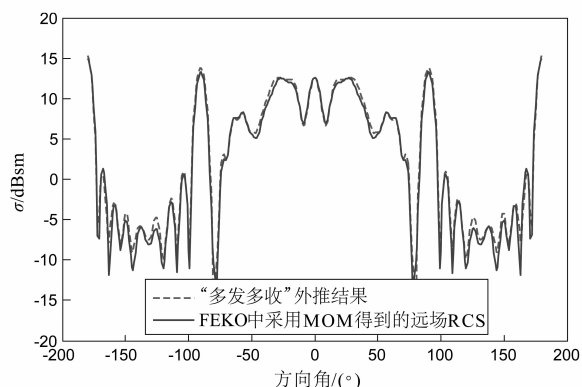


图9 矩形直腔的远场RCS与外推结果比较

4 测量区域和采样间隔分析

4.1 测量区域

由近场测量理论可知,为了能够精确获得待测目

标的远场方向图,需要采集目标全角域范围的信息. 而在实际测量中,扫描面是有限的并且随着测试距离的增加,所需的近场双站数据在不断地减少,因此,只有位于一定角域范围内的双站数据才是有用的.

当截断角域略大于目标最大尺寸与测试距离形成张角时,得到的外推结果与理论值误差较小^[17]. 截断角域 $\beta = 2(\sin^{-1}(\rho_i/\rho_c))$, 其中 ρ_i 为目标最大口径尺寸的一半, ρ_c 表示测试距离.

4.2 采样间隔

Nyquist 采样定理指出实信号的采样频率必须大于信号谱的最高频率的 2 倍. 它描述了空间频率分量的选取准则,可以采用小于最高空间频率半周期相位差所对应的距离间隔进行信号的抽取. 当散射体旋转到某一角度下,它到天线的距离发生改变,相位同样也随之改变,但这一变化也需要满足相位采样要求,因此应用相位变化每 2π 周期采样一次的采样标准,得到采样间隔至少为 $\Delta\theta = \lambda/2D$.

4.3 仿真结果

根据目标结构的几何物理特性,验证近场双站测量角域与目标的耦合区尺寸相关,从而减小近场扫描面角域.

对上述二面角模型进行截断角域仿真验证. 二面角的最大口径为 0.71m , 它在 2m 处的张角 $\beta = 2(\sin^{-1}(0.355/2)) = 0.36\text{rad}$, 约为 21° . 由采样定理求得角度间隔至少为 $\Delta\theta = \lambda/2D = 0.128\text{rad}$, 即 7.3° , 仿真中选取间隔 7° . 下图虚线为有效角域范围内,在方位面上接收天线间隔 7° 进行近场测量,通过外推得到远场 RCS,与目标的远场 RCS 比较,在耦合区域的平均误差为 0.41dB .

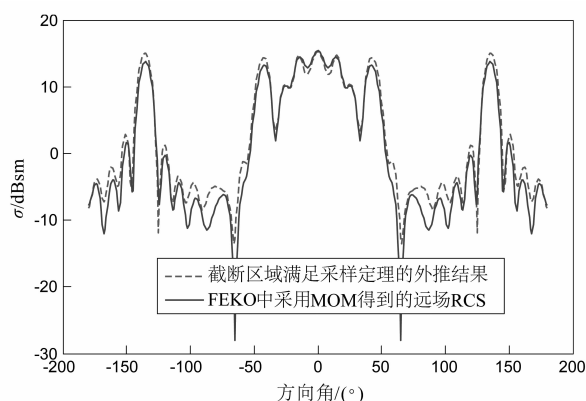


图10 二面角在截断区域满足采样定理的外推结果与远场RCS比较

同样对上述腔体目标模型进行截断角域仿真,它在 2m 的张角 $\beta = 2(\sin^{-1}(0.405/2)) = 0.407\text{rad}$, 约为 23° . 由采样定理求得角度间隔至少为 $\Delta\theta = \lambda/2D = 0.123\text{rad}$, 即 7.07° , 仿真中选取间隔 6° . 得到的结果如图 11 所示,其中虚线为有效角域范围内满足采样定理

并外推得到的远场 RCS,与目标的远场 RCS 比较,在耦合区域的平均误差为 1.35dB.

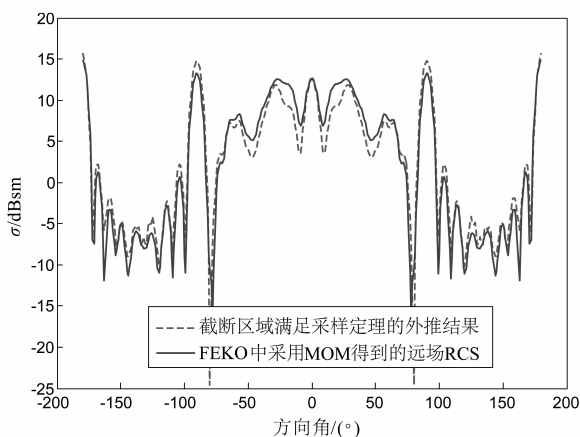


图11 腔体在截断区域满足采样定理的外推结果与远场RCS比较

5 结论

由于耦合目标反射器具有多种散射机理,如一次反射,两次反射,三次反射和边缘绕射反射等.因此,对于类似的耦合目标来说,考虑到散射体其它方向散射场的波谱对某个方向散射总场的贡献,提出“多发多收”模式.通过对二面角和腔体目标结构的仿真,证明了“多发多收”模式下经过两次外推的方法,对于具有多次散射的复杂目标 RCS 计算具有较高的精度.

采用该方法,可以实现高速高精度的 RCS 近场远场外推,解决针对具有强耦合机制目标,如飞行器的进气道(或尾喷口),侧翼与机身、立尾与机身,坦克、装甲车的底座与车身、底座与地表等存在多处角反射器.该方法可应用于大型目标的近场测试,准确获取目标的远场 RCS.

参考文献

- [1] 张福顺,焦永昌,马金平.辐射、散射近场测量及近场成像技术的研究进展[J].西安电子科技大学学报,1999,26(5):651-656.
Zhang Fu-shun, Jiao Yong-chang, Ma Jin-ping. The state of the art of near field techniques for radiation, targets scattering measurements and object imaging[J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(5): 651-656. (in Chinese)
- [2] 张福顺,焦永昌,毛乃宏.天线近场测量的综述[J].电子学报,1997,25(9):74-77.
Zhang Fu-shun, Jiao Yong-chang, Mao Nai-hong. An outline of near field antenna measurement[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(9): 74-77. (in Chinese)
- [3] 何国瑜,卢成才,洪家才,邓辉.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.
- [4] D T Patis. Basic theory of probe-compensated near-field measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, 26(3): 373-379.
- [5] B J Cown. Near-field scattering measurements for determining complex target RCS [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(5): 576-585.
- [6] S A Rice, I J LaHaie. A partial rotation formulation of the circular near-field to far-field transformation (CNFFFT) [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(3): 209-214.
- [7] I J LaHaie. Overview of an image-based technique for predicting far-field radar cross section from near-field measurement [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(6): 159-169.
- [8] O Andrey, K Hirokazu. An improved image-based circular near-field to far-field transformation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(2): 989-993.
- [9] V Thomas, F E Thomas. Comparison and application of near-field ISAR imaging techniques for far-field radar cross section determination [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 144-151.
- [10] E V Lil, J D Bleser. On the efficient computation of near-field radar cross sections [A]. The 8th European Conference on Antennas and Propagation [C]. The Hague: IEEE, 2014. 1174-1177.
- [11] O Tulgar, A Arifergin. Improved pencil back-projection method with image segmentation for far-field/near-field SAR imaging and RCS extraction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2572-2584.
- [12] 张晓苗.平面近场散射测量关键问题研究[D].西安:西安电子科技大学,1998.
Zhang Xiao-miao. Study on Several Key Problems for Planar Near-field Scattering Measurements [D]. Xi'an: Xidian University, 1998. (in Chinese)
- [13] 张福顺,焦永昌,刘其中,毛乃宏.减小平面测量中多次反射误差的新方法[J].电子学报,2001,29(7):1003-1005.
Zhang Fu-shun, Jiao Yong-chang, Liu Qi-zhong, Mao Nai-hong. New approach for reducing the multiple reflection errors in planar near-field measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 1003-1005. (in Chinese)
- [14] 何国瑜,陈海波,苗俊刚,李志平.近场散射与远场 RCS 的链条关系[J].微波学报,2006,22(4):1-4.
He Guo-yu, Chen Hai-bo, Miao Jun-gang, Li Zhi-ping. Chain relation of the near field scattering and far field RCS [J]. Journal of Microwaves, 2006, 22(4): 1-4. (in Chinese)
- [15] 童广德,徐秀丽,李加亮.基于目标 ISAR 图像的 RCS 数据外推方法[J].制导与引信,2007,28(2):28-31.
Tong Guang-de, Xu Xiu-li, Li Jia-liang. RCS data extrapolation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(1): 1-10.

- lation technology based on target's ISAR image [J]. Guidance & Fuze, 2007, 28(2): 28 - 31. (in Chinese)
- [16] 张麟兮, 李南京, 胡楚锋, 李萍. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [17] O M Bucci, M D Migliore. Effective of 2-D monostatic radar cross sections from near-field measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(2): 750 - 752.

作者简介



党娇娇 女, 1989年3月出生于陕西省渭南市, 现为西北工业大学电子信息学院博士研究生, 研究方向: 散射测量及外推算法研究.
E-mail: 15202442839@163.com

李南京 男, 1976年出生于江西省, 现为西北工业大学无人机重点实验室高级工程师, 研究方向: 散射测量技术、微波成像.
E-mail: linanjing76@163.com

胡楚锋 男, 1982年出生于湖北省, 现为西北工业大学无人机重点实验室副教授, 研究方向: 微波遥感、散射测试与成像技术.
E-mail: huchufeng@nwpu.edu.cn

宋祖勋 男, 1964年出生于陕西省, 现为西北工业大学无人机所研究员, 研究方向: 无人机测控数据链、电磁兼容、无线电综合测试技术.