

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415751

# 一种表面波衰减率测量方法研究

李业华 刘政 聂秉毅

(中国航发北京航空材料研究院 北京 100095)

**摘要:**介绍了雷达吸波材料表面波衰减率的重要性以及测量方法,从雷达方程入手分析出近场条件下测量雷达散射截面(RCS)的各影响因素,通过分析得出发射天线和接收天线的波束宽度和间距成为近场测量RCS的重要误差来源。提出了增大方向图1 dB波束宽度并减小发射天线和接收天线间距来减小测量误差的方案,设计制作了8~12 GHz圆锥喇叭天线,具有良好的圆对称性,1 dB波束宽度达到22°。组建了近场RCS测试系统,以金属立方体作为目标开展了测试系统验证试验,与理论值相比RCS曲线峰值之差小于0.5 dB,平均值之差小于0.2 dB,具有较高的测量精度。使用组建的近场RCS测试系统开展表面波衰减率测量试验,与紧缩场测量结果之差为0.38 dB,实现了近场条件下表面波衰减率的准确测量。

**关键词:**表面波衰减率;近场测量;圆锥喇叭天线

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Research on a surface wave attenuation rate measurement method

Li Yehua Liu Zheng Nie Bingyi

(AECC Beijing Institute Of Aeronautical Matreials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** This paper introduces the importance of surface wave attenuation rate of radar absorbing materials and its measuring method. Using the radar equation, this paper analyzes the influencing factors by the measurement of radar scattering cross section under near-field conditions. The antenna beam width and spacing between transmitting antenna and receiving antenna are important error sources of radar cross section measurement. A scheme is proposed to reduce the measurement error by increasing the 1 dB beam width of the direction diagram and reducing the distance between the transmitting antenna and the receiving antenna. The 8 ~ 12 GHz conical horn antenna is designed and manufactured. The antenna has good circular symmetry, and the 1 dB beam width reaches 22°. A near-field RCS measurement system is set up, validation experiments of the system is conducted with metal cube. Compared to theoretical values, the difference of the RCS curve peak values are less than 0.5 dB, and the difference of the RCS curve average values are less than 0.2 dB. It can be seen that the system has a relatively high measurement accuracy. Then the surface wave attenuation rate experiments are conducted with the near-field RCS measurement system, the difference of the measurement result between near-field RCS measurement system and compact range is 0.38 dB, so the measurement method of this paper can accurately measure surface wave attenuation rate under near-field conditions.

**Keywords:** surface wave attenuation rate; near field measurement; conical horn antenna

## 0 引言

随着电子信息技术的发展,吸波材料的应用越来越广泛,在雷达探测领域吸波材料可以有效吸收目标反射的雷达波降低目标体的雷达散射截面(radar cross section, RCS),在电子仪器应用中吸波材料可解决器件之间的电磁干扰问题。反射率是评估吸波材料性能的主要指标,反射率的常用测量方法是测量垂直或斜入射状态下吸波材料试板镜面

反射电磁波的功率与同状态同尺寸金属底板的反射电磁波功率,计算两种试板反射电磁波的功率比值得到吸波材料的反射率。反射率评估的是镜面反射状态下吸波材料对电磁波的吸收效果,在实际应用中天线或相关微波器件辐射的电磁波很少正对物体表面,文献[1]提出了电磁波延物体表面传播时在不连续处以及边缘会产生较强的后向反射波,这是现代飞行器外表面的重要散射源。由于反射率测量采集的是镜像反射的电磁波信号,不能准确评估斜入射

情况下吸波材料对后向反射波的吸收效果,相关研究人员提出了表面波衰减率的测量要求。

文献[2]记述了表面波的研究历程,1926年 Sommerfeld 和 Zenneck 发现了表面波现象;1954年 G. J. Rich 提出了一种辐射前端弯曲展开的表面波传输线,提高了表面波激励效率;1958年 В. И. ТалягоВ提出了基于矩形波导加载沟槽表面的表面波传输线结构;1993年电子科技大学赵柏林提出了基于平板模型计算表面波衰减率的公式;2020年北京环境特性研究所发布了《雷达吸波材料表面波衰减率测试方法》,设计的待测样板采用两边斜楔式结构,在上表面涂覆吸波材料,使用紧缩场测量样板在涂覆吸波材料前后最大行波散射角附近的 RCS 峰值,计算峰值之差与长度的比值得出表面波衰减率。北京环境特性研究所发布的测试方法得到了广泛的应用,但该方法需要在紧缩场中测试,对测试设备和环境提出了比较高的要求。本文研究了一种近场测量表面波衰减率的方法,与紧缩场相比达到了比较高的测量精度,降低了对测试环境和设备的要求,提高了测试效率。

## 1 表面波衰减率

表面波衰减率是评估雷达吸波材料对沿着目标体表面传播的表面波吸收衰减效果,在国内外研究中相关研究人员提出了表面电流测试法、基于光调制电磁表面波测试法、非接触式光电场传感器测试法等<sup>[3]</sup>,目前国内雷达吸波材料领域通用的表面波衰减率测试方法是以图1所示楔形金属板为标准板,在与标准板相同尺寸的金属板表面涂敷吸波材料作为表面波材料样板,涂敷位置如图2所示,分别测量标准板和材料样板 HH 极化的点频 RCS,分别找出距离最大后向表面波散射角最近的 RCS 峰值,通过式(1)计算出表面波衰减率<sup>[4]</sup>,因此表面波衰减率本质上是对特定形状目标体测量 RCS 进行计算。

$$\alpha = \frac{\sigma_s - \sigma_t}{L} \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 为表面波衰减率, $\sigma_s$ 为表面波标准板在最大后向表面波散射角附近的 RCS 峰值, $\sigma_t$ 为涂敷吸波材料的试板在最大后向表面波散射角附近的 RCS 峰值, $L$ 为表面波标准板的长度。

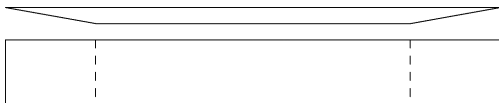


图1 表面波标准板结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of surface wave stand plate

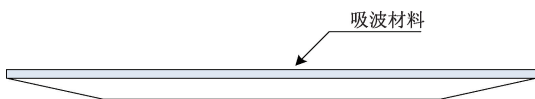


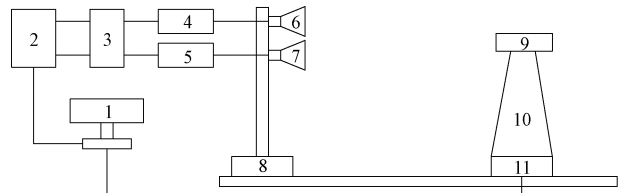
图2 表面波材料板结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of surface wave material plate

测量目标体 RCS 的方法比较多,应用广泛的是紧缩场 RCS 测试系统,紧缩场可在室内有限的空间内形成平面波,达到远场测量的效果,测量结果准确,可以全天候运行,紧缩场适用的目标体比较广泛,但造价昂贵。外场测试占地面积大,建设成本高,受气候影响严重,保密性差,目前只在少数大型装备部件的测量中使用,应用相对较少。近场 RCS 测试系统适用的目标体尺寸与测试距离相关,由于无法形成平面波,原始测试数据处理得到的 RCS 与紧缩场测量结果相比存在一定的误差,经过综合平面波方法和近远场变换处理可减小误差达到较为准确的程度<sup>[5]</sup>,室内近场可全天候测试,保密性好,建设成本低,是近年来的重点发展方向<sup>[6]</sup>。由于测量表面波衰减率采用的目标体形状、尺寸、姿态和测量的极化状态比较明确,本文研究近场测量方法,分析近场测量 RCS 的影响因素,设计测试系统实现表面波衰减率准确测量。

## 2 近场 RCS 测试误差因素

近场 RCS 测试系统通常包括矢量网络分析仪、发射天线、接收天线、转台、吸波材料、电脑、测试软件等组成,为了增大系统的动态范围和测量目标体的尺寸,系统中采用发射天线和接收天线分离,并增加功率放大器、低噪声放大器、脉冲调制器等部件<sup>[7]</sup>。近场 RCS 测试系统结构如图3所示。功率放大器可增加发射天线的辐射电磁波能量,使目标在更远的距离能够接收到辐射波,低噪声放大器可以将接收的反射波功率放大,确保采集和处理的接收信号能够达到阈值。脉冲调制器可控制发射和接收链路按设定时序通断,将发射天线与接收天线的耦合信号以及目标区域以外的其他反射信号截除,达到比较干净的测试背景。



1 电脑、2 矢量网络分析仪、3 脉冲调制器、4 功率放大器、  
5 低噪声放大器、6 发射天线、7 接收天线、8 天线支架、  
9 被测目标体、10 目标体支架、11 转台

图3 近场 RCS 测试系统

Fig. 3 Near field RCS testing system

目标体 RCS 的定义式<sup>[8]</sup>如式(2),其测量方法是基于雷达测距方程式<sup>[9]</sup>如式(3),在测试系统的线性动态范围内分别测量定标体和目标体的反射波,结合定标体的 RCS 理论计算和式(3)得到目标体的 RCS<sup>[10]</sup>。

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|\vec{E}_s|}{|\vec{E}_i|} \quad (2)$$

其中, $\sigma$ 为雷达散射截面, $R$ 为天线到目标体的距离, $E_s$ 为目标反射雷达波的电场, $E_i$ 为目标接收雷达波的

电场。

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2 G_t G_r \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3)$$

其中,  $P_t$  为系统发射雷达波的功率,  $P_r$  为系统接收雷达波的功率,  $\lambda$  为雷达波的波长,  $G_t$  为发射天线的增益,  $G_r$  为接收天线的增益。

RCS 是在距离  $R$  无限大的等效值, 实际测量时距离有有限值, 通常大于距离  $R$  满足式(4)时即认为达到远场条件<sup>[11]</sup>。远场距离计算式(4)是根据天线的辐射特性提出的, 计算模型如图 4 所示, 这个模型有 2 个假设条件: 1) 天线发射的波束为球面波, 发射波在目标体上的相位差是由圆弧几何关系计算得到; 2) 当被测目标最大尺寸在辐射区域的相位变化小于  $\pi/8$  时认为相位误差可以忽略<sup>[12]</sup>。

$$R = \frac{2L_m^2}{\lambda} \quad (4)$$

其中,  $L_m$  为目标的最大尺寸。

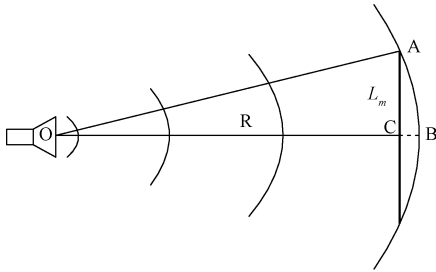


图 4 远场距离计算模型

Fig. 4 Calculation model of far-field distance

在近场的目标体区域, 发射和接收天线的增益随偏离天线指向而降低, 如图 5 所示, 此时雷达测距方程使用式(5)计算更为准确。

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2 G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_r, \varphi_r) \sigma}{(4\pi)^3 D_t^2 D_r^2} \quad (5)$$

其中,  $G_t(\theta_t, \varphi_t)$  为发射天线的功率增益,  $G_r(\theta_r, \varphi_r)$  为接收天线的功率增益,  $\theta_t$  为目标体上散射点与发射天线的夹角,  $\theta_r$  为目标体上散射点与接收天线的夹角,  $\varphi_t$  为目标体上散射点在发射天线辐射区域的方位角,  $\varphi_r$  为目标体上散射点在接收天线辐射区域的方位角。

假设测试系统使用的发射和接收天线参数相同, 可进一步处理得到式(6):

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2 G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_t + \Delta\theta, \varphi_t + \Delta\varphi) \sigma}{(4\pi)^3 D_t^2 D_r^2} \quad (6)$$

对于既定的测试系统和目标体上的一个微小散射单元,  $P_t, \lambda, \sigma, D_t, D_r$  为确定值,  $P_r$  仅与  $G_t(\theta_t, \varphi_t), G_r(\theta_t + \Delta\theta, \varphi_t + \Delta\varphi)$  相关, 如果使用的发射和接收天线方向图具有圆对称性, 则天线增益与方位角无关, 接收功率  $P_r$  进一步表示为式(7):

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D_t^2 D_r^2} [G_t^2(\theta_t, \varphi_t) + G_t(\theta_t, \varphi_t) \frac{\partial G_r(\theta_t, \varphi_t)}{\partial \theta} \Delta\theta] \quad (7)$$

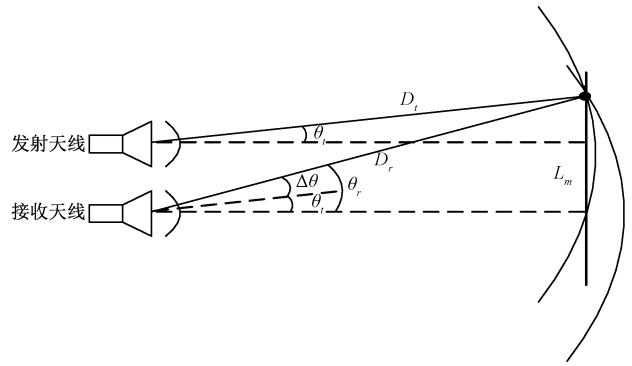


图 5 近场中天线指向示意图

Fig. 5 Schematic diagram of near-field antenna pointing

测量 RCS 应使目标位于天线波束的主瓣内, 并且天线主瓣内幅度相位应尽量均匀, 幅度随着偏离天线指向的夹角增大而降低<sup>[13]</sup>, 这种情况下  $\frac{\partial G_r(\theta_t, \varphi_t)}{\partial \theta} < 0$ , 因此当  $\Delta\theta = 0$  时接收功率  $P_r$  最大, 此时发射和接收天线重合为一个天线, 这种情况下需要借助环形器或单刀双掷的高速射频开关实现。由于环形器的隔离度有限, 通常在 30 dB 以内<sup>[14]</sup>, 通过环形器实现发射天线和接收天线共用的方法难以形成比较大的动态范围。目前单刀双掷射频开关的功率容量较小, 并且两个通道的切换时间数量级在  $ns \sim \mu s$ <sup>[15]</sup>, 通常不低于 10 ns, 在测试距离较近的情况下发射链路末端单刀双掷的高速射频开关的切换时间与发射波从目标反射回天线的的时间相近, 这种方法难以实现天线在发射链路和接收链路之间的切换。因此要想增大接收功率  $P_r$  需要减小  $\frac{\partial G_r(\theta_t, \varphi_t)}{\partial \theta}$  和  $\Delta\theta$  来实现, 即增大主波束的宽度减小增益随  $\theta$  角度的降低速率, 同时减小天线的尺寸。

### 3 圆锥喇叭天线设计

圆锥喇叭天线是圆波导开口形成的喇叭天线, 具有方向图圆对称性好、增益高、频带宽、功率容量大、构造简单、加工难度低等优点<sup>[16]</sup>。本文设计了变张角圆锥喇叭天线, 由传统的直线喇叭壁变成带指数曲线的喇叭壁, 可以使喇叭天线在较宽的带宽内实现平坦的增益和基本恒定的波束宽度, 通过调整喇叭壁曲线、喇叭口直径、锥段长度可以改变设计频段内的方向图及增益<sup>[17]</sup>。本文设计的 8~12 GHz 的圆锥喇叭天线如图 6 所示, 10 GHz 的方向图仿真结果如图 7 所示, 在  $-60^\circ \sim 60^\circ$  范围内 E 面与 H 面的方向图基本完全重合, 具有良好的圆对称性。制作的天线实物如图 8 所示, 喇叭口面直径为 76 mm 高度为 45 mm, 经过实测, 天线驻波  $< 1.6$ , 增益 12.5~13.9 dB, 1 dB 波束宽度为  $22^\circ$ , 10 GHz 的实测方向图如图 9 所示, 与仿真结果高度一致, 在方位角方向实现了均匀辐射。

### 4 近场 RCS 测试系统调试

在一厂房内组建近场 RCS 测试系统开展试验如图 10

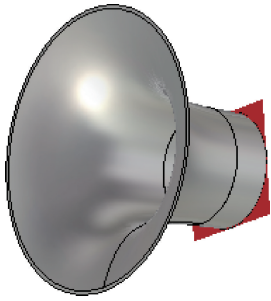


图6 圆锥喇叭天线仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of conical horn antenna

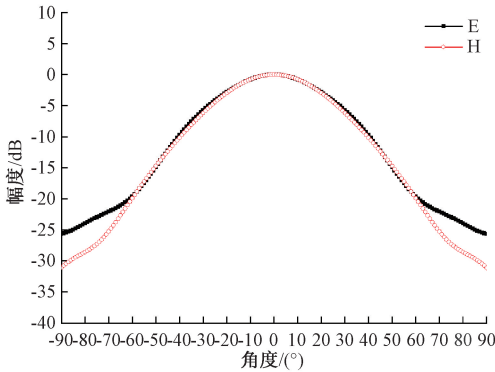


图7 圆锥喇叭天线 10 GHz 方向图仿真结果

Fig. 7 Directional pattern simulation results at 10 GHz of conical horn antenna

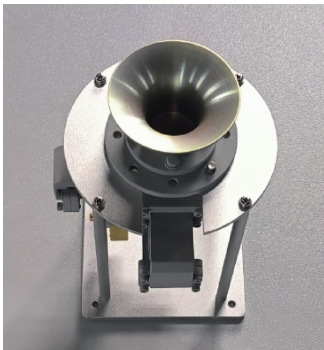


图8 圆锥喇叭天线实物图

Fig. 8 Physical picture of conical horn antenna

所示,发射天线与接收天线的口面中心距离为 100 mm,天线口面中心高度 1.90 m,距离转台中心 7.60 m,在天线与转台中间位置使用吸波屏阻挡地面产生的多路径反射。RCS 测量采用转角扫频模式,发射和接收链路使用脉冲调制,经过矢量对消处理,测试系统在目标区域得到了非常干净的背景,直径 300 mm 的金属定标球一维成像如图 11 所示,横坐标为 14.07 m,信噪比 $\geq 27.62$  dB,在其前后各 1.5 m 的距离内无干扰信号,测试场地 8~12 GHz HH 极化背景 RCS 如图 12 所示,整体在 $-50$  dBsm 以下。以棱长 200 mm 的金属立方体作为目标体测量 RCS 检验设计

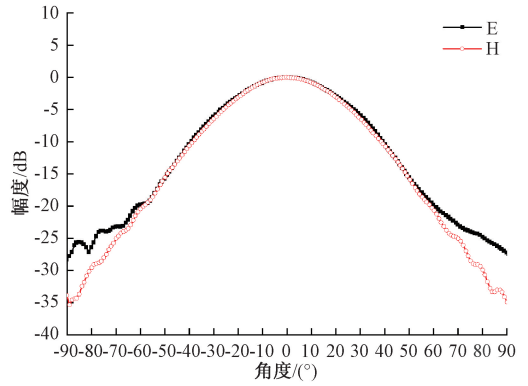


图9 圆锥喇叭天线 10 GHz 方向图实测结果

Fig. 9 Pattern test results at 10 GHz of conical horn antenna

的近场 RCS 测试系统精度,测量立方体 10 GHz 的 RCS,并与仿真结果对比,如图 13 所示,近场 RCS 测试系统的测量结果与仿真结果高度一致,两种极化 RCS 曲线的各个峰值相差都小于 0.5 dB, $-45^\circ \sim 45^\circ$  的 RCS 平均值之差都小于 0.2 dB,可见设计的近场 RCS 测试系统达到了较高的测量精度,达到了预期效果。



图10 近场测量表面波衰减率现场

Fig. 10 Test site of surface wave attenuation for near field

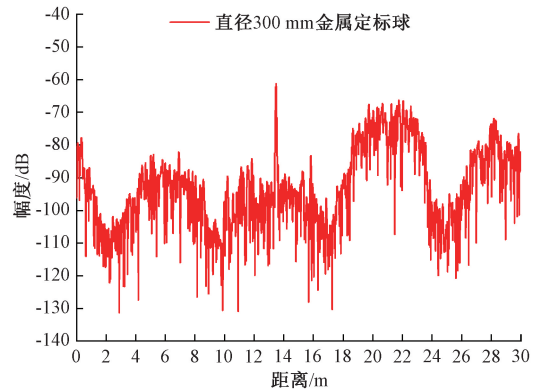


图11 直径 300 mm 金属定标球一维成像图

Fig. 11 One-dimensional imaging map of metal calibration ball with diameter of 300 mm

## 5 近场表面波衰减率测量

选取长 500 mm 宽 100 mm 厚 6 mm 两端倾角  $5.7^\circ$  的

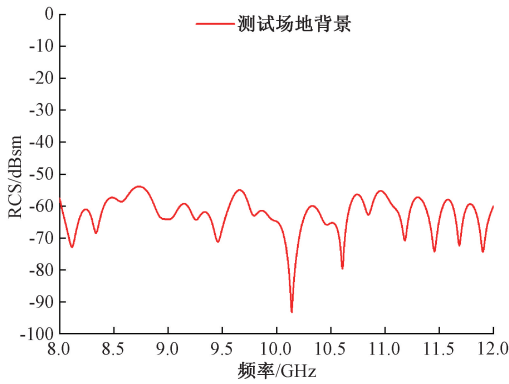
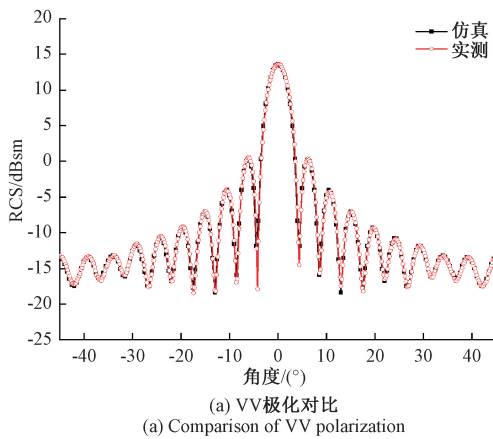


图 12 测试场地 8~12 GHz HH 极化背景图

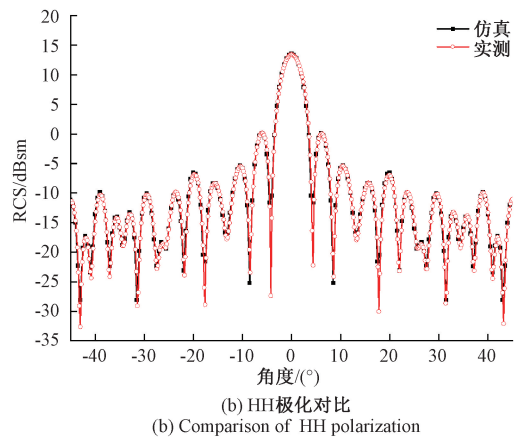
Fig. 12 HH polarization RCS at 8~12 GHz of test site

楔形标准板开展近场 RCS 测量试验,采用转角扫频模式测量 8~12 GHz HH 极化 RCS,对比试验采用了紧缩场实测值和使用口径 163 mm×123 mm 角锥喇叭天线的实测值,该角锥喇叭天线的 1 dB 波束宽度为 4°,发射天线和接收天线距离 200 mm。

取 10 GHz 频点的 RCS 进行对比如图 14 所示,表面行波引起的反射峰值都在 79°左右,角锥喇叭天线测量的表面波峰值比仿真计算值偏低,这是因为天线波束较窄,在目标区域偏离天线指向的角域,部分反射波未被有效接收。使用圆锥喇叭天线测量数据处理的原始 RCS 曲线在 5°~87°与紧缩场测量值高度一致,在 79°与紧缩场测量值相差 0.02 dB;角度为 0°时楔形标准板在电磁波发射方向的投影宽度为 0.50 m,位于圆锥喇叭天线 1 dB 波束宽度内,但由



(a) VV极化对比  
(a) Comparison of VV polarization



(b) HH极化对比  
(b) Comparison of HH polarization

图 13 棱长 200 mm 金属立方体 10 GHz RCS 对比

Fig. 13 RCS comparison at 10 GHz of metal cube with edge length 200 mm

于发射电磁波在标准板偏离中心的区域发生斜入射和镜像反射,仍然有部分反射波未被有效接收,导致 RCS 曲线低于紧缩场测量值。对目标近场测量数据做远场变换可以推算出目标的远场 RCS<sup>[18]</sup>,经过近远场变换处理,在 0~30°范围 RCS 曲线达到了与紧缩场测量结果一致,而在 30~90°范围 RCS 曲线渐渐发生偏离,可见近远场变换处理难以在全角度范围实现 RCS 测量结果优化。借助 IASR 二维成像可观察目标区域的弱散射信号<sup>[19]</sup>,使用圆锥喇叭天线测量楔形标准板在 79°的二维成像如图 15 所示,坐标(0,0)点为转台中心,目标区域除了楔形标准板之外没有其他反射信号,测试系统形成的背景环境非常干净。

为检验组建的近场 RCS 测试系统测量表面波衰减率的精度,在标准楔形板上表面涂覆一种吸波涂料,厚度 0.5 mm,采用紧缩场和近场 RCS 测试系统测量对比,如图 16 所示,表面行波引起的反射峰值在 80°左右,近场 RCS 测试系统测量的峰值与紧缩场测量值之差为 0.21 dB。按照式(1)计算表面波衰减率如表 1 所示,近场 RCS 测试

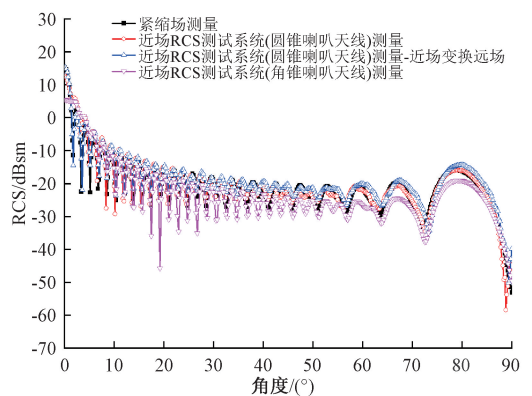


图 14 楔形标准板 10 GHz HH 极化 RCS 曲线

Fig. 14 HH polarization RCS curve at 10 GHz of wedge-shaped standard plate

系统测量的表面波衰减率为 37.68 dB/m,紧缩场测量的结果为 38.06 dB/m,差值为 0.38 dB,可见将设计的圆锥喇叭天线应用于近场 RCS 测试系统实现了近场条件下表面波衰减率的准确测量。

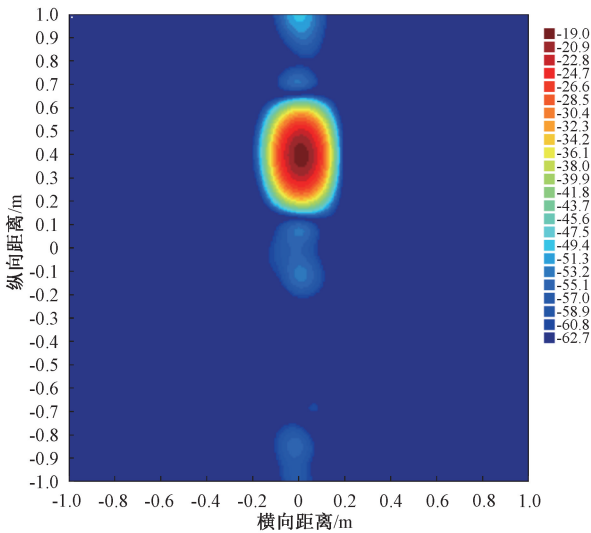


图 15 楔形标准板二维成像图

Fig. 15 Two dimensional imaging of wedge-shaped standard plate

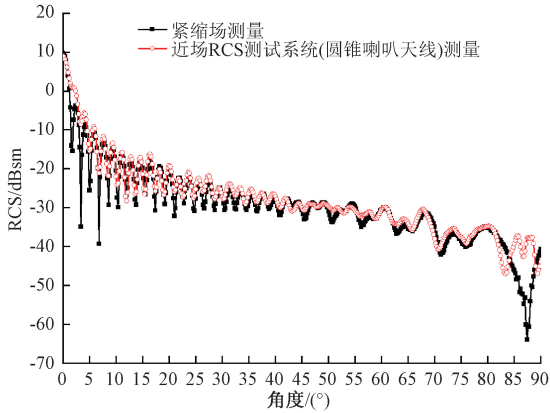


图 16 楔形涂层板 10 GHz HH 极化 RCS 曲线

Fig. 16 HH polarization RCS curve at 10 GHz of wedge-shaped coated plate

表 1 楔形涂层板 10 GHz 表面波衰减率计算

Table 1 Surface wave attenuation rate calculation at 10 GHz of wedge-shaped coated plate

测试设备	楔形标准板 RCS/ dBsm	楔形涂层板 RCS/ dBsm	楔形板长度/ m	表面波衰减率/ (dB·m <sup>-1</sup> )
紧缩场 RCS 测试系统	-15.93	-34.96	0.50	38.06
近场 RCS 测试系统	-15.91	-34.75	0.50	37.68

## 6 结 论

本文分析了表面波衰减率的测量方法以及近场测试系统的影响因素,提出了设计宽波束小尺寸天线减小 RCS 测试误差的方案,制作了圆锥喇叭天线,在一简易厂房内

组建了近场 RCS 测试系统,对金属立方体测量 RCS 检验了测试系统精度,通过楔形标准板和涂层板 10 GHz HH 极化 RCS 测量以及计算,在未经过近远场变化处理的情况下,本文设计方案测量的表面波衰减率与紧缩场测量计算结果相比差值为 0.38 dB,达到了比较高的测量精度,证实了本文提出的表面波衰减率测试方法准确可行。

## 参考文献

[1] 余龙舟,黄江涛,钟世东,等. 电磁不连续和缺陷结构的表面波散射特性研究[J]. 航空学报,2023, DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.29467.  
YU L ZH, HUANG J T, ZHONG SH D, et al. Study on surface wave scattering characteristics of electromagnetic discontinuities and defects[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2023, DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.29467.

[2] 赵鑫. 吸波材料表面波衰减率便携检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.  
ZHAO X. Research on portable detection technology of surface wave attenuation rate of absorbing materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.

[3] 王超. 雷达吸波材料表面波抑制测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.  
WANG CH. Research on surface wave suppression measurement technology of radar absorbing material[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

[4] 中国航天科工集团第二研究院二零七所,中国航空工业集团公司北京航空材料研究院. 雷达吸波材料表面波衰减率测试方法:GJB 9885-2020[S]. 北京:国家军用标准出版发行,2021: 1-4.  
207 Institute, Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, AECC Beijing Institute Of Aeronautical Materials. Test method for surface wave attenuation rate of radar absorbing materials: GJB 9885-2020 [S]. Beijing: Publication and Distribution of National Military Standards, 2021: 1-4.

[5] 高超,陈文强,王洪叶,等. 一种 RCS 近场测量中天线方向图补偿方法[J]. 北京理工大学学报,2019, 39(1):58-63.  
GAO CH, CHEN W Q, WANG H Y, et al. Antenna compensation in near field RCS measurement [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(1): 58-63.

[6] 张澎,车理论,马永利,等. 国外隐身飞机 RCS 近场测试技术[J]. 飞机设计,2019,39(4):15-19.  
ZHANG P, CHE L L, MA Y L, et al. Foreign RCS

- near-field measurement technology for stealth aircraft[J]. Aircraft Design, 2019, 39(4):15-19.
- [7] 郭娇,申庆茂,刁桂杰,等. 雷达制导武器极化识别于扰仿真试验方法研究[J]. 系统仿真技术, 2023, 19(4):352-357.
- GUO J, SHEN Q M, DIAO G J, et al. Study on simulation test methods of polarization identification interference for radar guided weapon [J]. System Simulation Technology, 2023, 19(4):352-357.
- [8] 姚伦标,杜凯,李宁,等. 火焰稳定器修形对发动机后向 RCS 的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(4):570-577.
- YAO L B, DU K, LI N, et al. Influence of flame stabilizer modification on aero-engine backward RCS[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(4):570-577.
- [9] 马捷,周世钢,施坤林,等. 近远场统一的广义 RCS 定义及其对雷达方程的拓展推导[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(6):1-9.
- MA J, ZHOU SH G, SHI K L, et al. Generalized RCS definition unifying the far-field and near-field and its extended derivation for radar equation[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(6):1-9.
- [10] 丁世敬,黄刘宏,李跃波,等. 宽带扫频 RCS 自动测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5):61-68.
- DING SH J, HUANG L H, LI Y B, et al. Design of broadband swept frequency RCS automatic measurement system [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(5):61-68.
- [11] 张雷,邓乐武,邓杰文,等. 近远场变换技术在目标特性测试中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(4):354-358.
- ZHANG L, DENG L W, DENG J W, et al. Application of near-far field transform technology in target characteristics test [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(4):354-358.
- [12] 余泽太. 复杂目标的近场电磁散射及 RCS 外推研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2016.
- YU Z T. Near-field scattering of complex target and its RCS extrapolation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] 赵元红. RCS 近场测量系统设计与软件开发[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016.
- ZHAO Y H. Design and software development of RCS near-field measurement system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [14] 石磊. 高性能旋磁铁氧体材料及其应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- SHI L. The research of high performance gyromagnetic ferrite materials and their applications [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [15] 耿红亮. 高线性宽带非对称 SPDT 射频开关设计[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- GENG H L. Design of high linearity broadband asymmetric SPDT RF switch chip [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [16] 许业林,黄艳云,郑杰. 圆锥喇叭天线关键制造技术[J]. 新技术新工艺, 2021(6):8-10.
- XU Y L, HUANG Y Y, ZHENG J. Key technology of precision manufacturing of tapered horn antenna [J]. New Technology & New Process, 2021(6):8-10.
- [17] 陈志强,何顺雨. X 波段圆锥喇叭天线的仿真与测试[J]. 电子测试, 2022, 24:44-46.
- CHEN ZH Q, HE SH Y. Simulation and test of X-band conical horn antenna [J]. Electronic Test, 2022, 24:44-46.
- [18] ZHANG Y X, JIAO Y CH, ZHU M D, et al. Wideband near-field RCS measurement techniques with improved far-field RCS prediction accuracies [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 72:1-4.
- [19] HU CH F, LI N J, CHEN W J, et al. High-precision RCS measurement of aircraft's weak scattering source [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 772-778.

## 作者简介

**李业华**(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达吸波材料及隐身材料测试技术。

E-mail: 751246399@qq.com

**刘政**, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达吸波材料及隐身材料测试技术。

E-mail: liuzhwengbiam@163.com

**聂秉毅**, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达吸波材料及隐身材料测试技术。

E-mail: K20019597@kcl.ac.uk