

吸波涂层雷达反射率原位测量技术

陈雪飞¹, 张云鹏², 李灿平¹, 冯凯², 袁滔¹

(1. 成都恩驰微波科技有限公司, 成都 611731; 2. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: **目的** 为满足吸波涂层在装机条件下雷达反射率原位测量的迫切需求, 提出一种基于天线近场测试的雷达反射率原位测量技术。**方法** 设计小型化超宽带天线、收发去耦结构以及屏蔽罩, 构建原位测量探头, 并与微波扫频模块和数据处理模块集成, 研制出雷达反射率手持式宽频测量仪并。**结果** 经对比验证, 在 $-17\sim 0$ dB 反射率范围以及 2~18 GHz 频率范围内, 该测量仪测量结果与弓形系统测量结果偏差小于 1.5 dB。**结论** 该测量仪适用于厚度为 1.5 mm 以内已涂覆涂层雷达反射率的准确测量。

关键词: 吸波涂层; 雷达反射率; 近场反射; 原位测量

中图分类号: TM931 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0112-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.014

In-situ Measurement Technology of Radar Reflectivity of Microwave Absorbing Coatings

CHEN Xue-fei¹, ZHANG Yun-peng², LI Can-ping¹, FENG Kai², YUAN Tao¹

(1. Chengdu Enchi Microwave Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an in-situ measurement technology of radar reflectivity, which is based on the antenna near-field measurement, so as to meet the urgent requirements for in-situ measurement of radar reflectivity of microwave absorbing coatings under installation conditions. A miniaturized ultra-wideband antenna, a decoupling structure, and a shielding cover were designed, and an in-situ measurement probe was constructed. By integrating the probe with a microwave frequency scanning module and a data processing module, a handheld broadband radar reflectivity measuring instrument was developed. Through comparison and verification, the deviation of its measurement result from the arch system was less than 1.5 dB in the reflectivity range of -17 to 0 dB and the frequency range of 2 to 18 GHz. The instrument is suitable for accurate measurement of radar reflectivity of coatings with a thickness of less than 1.5 mm.

KEY WORDS: microwave absorbing coating; radar reflectivity; near-field reflection; in-situ measurement

吸波涂层具有高性能、施工便捷等优点, 是目前应用较广、较为有效的隐身技术手段之一^[1]。吸波涂层在服役过程中, 受外部寒热、雨雪、盐雾、光照等环境和自身寿命等多种复杂因素影响, 雷达反射率会发生变化^[2]。因此, 对已涂覆吸波涂层进行雷达反射率原位跟踪测量, 判断是否需要维修更换, 成为了材

料研究人员和地勤维护人员长期关注的难题。

实验室条件下可采用标准方法, 通过制样对涂层雷达反射率进行测试^[3-4]。但在服役阶段, 受涂层无法取样的限制, 标准方法无法适用。为实现原位测量, 常规手段采用同轴探头^[5-6]或波导探头^[7-8]与待测涂层表面紧贴进行测量。该方法中探头无法与涂层下方的金属基底电

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(62201130); 中国博士后科学基金(2021M690540)

作者简介: 陈雪飞(1985—), 男, 硕士。

通信作者: 张云鹏(1990—), 男, 博士。

接触, 使得探头开口处除导行波外还存在辐射波, 探头边缘效应会引入较大误差, 尤其在高频下。为减小探头边缘效应的影响, 吴亮等^[9-10]提出了 H 面扇形喇叭探头, 该探头作用于待测涂层表面上的场可近似等效为远场平面波, 具有更低的边缘效应。郭寅生等^[11]将 H 面扇形喇叭探头与六端口反射计集成, 实现了反射率的便携式测量。尽管 H 面喇叭探头在原位测量中具备体积小、稳定性高等优势, 但仍存在单个探头带宽窄(与矩波导对应)、微波反射率测量结果与实际远场雷达波作用下的真实值偏差较大等问题, 这限制了其在原位条件下的应用。

近年来, 基于天线近场作用对材料进行微波无损检测的技术得到了快速发展^[12-14]。通过对天线和微波传输环境进行优化设计, 能实现将近场辐射能量集中在一个较小的波束空间中, 并在近场获得接近远场平面波的场分布特性^[15]。相较于传输线探头开口处的辐射场, 上述天线近场区的辐射场更能够模拟雷达波照射状态, 从而简化了涂层雷达吸波性能测试物理模型。王慷等^[16]设计了准 TEM 波天线和龙伯透镜天线, 在天线近场对吸波材料反射率进行了测量, 其反射率测量结果与远场测量结果具有可比性。寇彬彬等^[17]基于自由空间单反射模型, 利用点聚焦透镜天线结合定向耦合器及隔离器将天线收发信号进行有效分离, 对材料的反射特性进行了测量。此外, Compass 公司于 2017 年推出了一款手持式反射率测量仪^[18], 其探头为基于小型化介质天线的单天线探头, 通过与矢量反射测量模块集成, 实现了反射率的超宽带测量。

本文基于天线近场反射理论开展吸波涂层雷达反射率原位测量技术研究, 设计一种双槽对踵 Vivaldi 天线作为近场测量天线, 将天线收发分置并引入去耦及屏蔽结构, 构建原位测量探头, 与微波扫频模块、数据处理模块和电源模块集成, 研制出雷达反射率手持式宽频测量仪; 采用匹配-短路校准结合时域选通的信号提取技术, 解决收发串扰及背景干扰等问题; 通过对多种涂层及胶板材料进行测量, 并与标准弓形系统测量结果进行比对, 验证本文所提方法的可行性以及所研究设备的测量准确性。

1 测量模型与计算方法

为在超宽频带内实现高的反射率测量动态范围, 本文采用天线收发分置配置^[19-20]进行反射测量。垂直入射下, 收发分置配置的信号流如图 1 所示。 a_0 和 b_1 分别为发射天线馈电处和待测涂层表面处的入射波, b_0 和 a_1 分别为接收天线馈电处和待测涂层表面处的反射波, E_d 为方向性误差, E_r 为传输/反射追踪误差, E_s 为失配误差。对于收发分置, 天线间的串扰是 E_d 的主要来源, 只要天线探头组成结构保持稳定, E_d 基本不变; E_r 来自测量系统的频率响应; E_s 来自天线和待测涂层间的多重反射。根据信号流图, 天线馈电处的反射系数 Γ_m 可通过上述误差项以及待测涂层

处的反射系数 Γ_a 来表示, 见式 (1)^[21]。

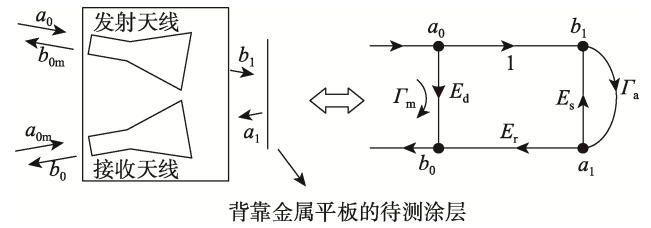


图 1 收发分置配置示意及其信号流
Fig.1 Configuration of transceiver antennas and its signal flow

$$\Gamma_m = \frac{b_0}{a_0} = E_d + \frac{E_r \Gamma_a}{1 - E_s \Gamma_a} \quad (1)$$

根据式 (1), 为求解 E_d 、 E_r 和 E_s 3 个误差项, 需通过 3 个已知反射系数的不同校准件进行误差项求解, 并带入式 (1), 最终可由测试量 Γ_m 计算出所需量 Γ_a , 见式 (2)。

$$\Gamma_a = \frac{a_1}{b_1} = \frac{\Gamma_m - E_d}{E_r + E_s(\Gamma_m - E_d)} \quad (2)$$

针对上述校准, 传统方法采用短路终端 ($\Gamma_a = -1$)、匹配终端 ($\Gamma_a = 0$) 和短路补偿终端 ($\Gamma_a = e^{j\pi(1-4d/\lambda)}$, d 为位移量) 进行校准。对于原位测量, 前 2 项校准均容易实现, 而短路补偿校准由于对天线探头移动定位要求较高, 同时需移动多个距离来覆盖宽频带校准, 实现难度较大。实际情况中, 可采用时域选通技术对天线和待测涂层之间的多重反射进行有效抑制, 因此在时域选通下可令 $E_s = 0$ 。仅采用匹配终端和短路终端即可完成校准, 这不但简化了操作流程, 也避免在执行短路补偿校准时带来的误差, 保证了校准精度。

根据式 (1), 误差项 E_d 和 E_r 可通过式 (3) 来确定。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\text{free}} \\ \Gamma_{\text{metal}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 Γ_{free} 和 Γ_{metal} 为匹配终端和短路终端下对应的反射系数测量值。最终待测涂层实际反射系数可表示为式 (4)。

$$\Gamma_a = \frac{\Gamma_m - \Gamma_{\text{free}}}{\Gamma_{\text{free}} - \Gamma_{\text{metal}}} \quad (4)$$

2 测量装置

2.1 天线设计

原位测量要求天线具有小型化超宽带等特点。作为一种宽带端射天线, Vivaldi 天线具有尺寸小、质量小、方向性好等优点。基于此, 本文设计了一种工作在 2~18 GHz 频段的双槽对踵 Vivaldi 天线, 该天线由 2 个非对称的对踵 Vivaldi 天线单元构成, 由 T 型功分器进行馈电。每一单元包括短内脊和长外脊, 其脊曲线为指数渐变线。天线外脊外侧开有锥形椭圆槽结构, 其能够在低频段提高天线增益, 并改善端口匹

配特性。天线内脊分布在基板两面, 2个内脊直边的边缘有部分重叠, 并通过一排金属通孔短接。短路结构令天线具有更好的环路特性, 也令天线的低频品质因数得以降低, 从而进一步改善天线端口匹配特性。此外, 为了获得更好的近场窄波束特性, 天线前方增加了一个半圆形介质引向器。天线结构示意图如图 2a 所示, 长度为 16 cm(不含同轴接头), 宽度为 7.5 cm。天线基板选用 Rogers RT4350, 厚度为 0.762 mm, 表面涂覆绿油, 加工实物如图 2b 所示, 采用 SMA 同轴接头进行馈电, 其在 2~18 GHz 频带内驻波比均小于 2, 具有良好的宽带阻抗匹配特性。

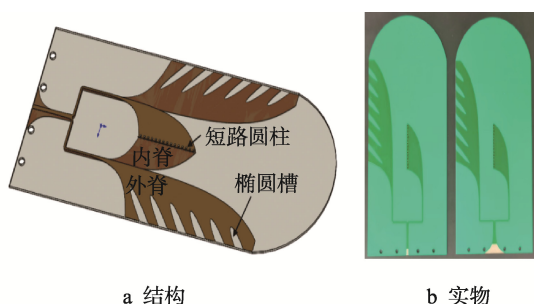


图 2 双槽对踵 Vivaldi 天线结构示意图及实物
Fig.2 Structural diagram and physical photo of a double-slot antipodal Vivaldi antenna

图 3 给出了天线在 4、8、12、16 GHz 4 个频点下的电场能量近场仿真结果, 场强以 dB 表示, 并以最大值进行归一化。从图 3 中可以看出, 天线辐射能量沿轴线未有明显扩散, 具有较好的方向性。

2.2 测量探头设计

天线测量探头由收发分置天线构成, 发射天线和接收天线沿 H 面对称放置, 如图 4 所示。为降低背景环境对天线辐射波束的影响, 需要对波束作用的区域范围作进一步限制。本文采用 PC/ABS 改性工程塑料制作了包围收发天线的介质筒, 其直径为 110 mm, 壁厚为 2 mm。该介质筒使待测涂层表面与天线的垂直距离恒为 70 mm。此外, 在介质筒与待测涂层接触的一端包围一圈吸波材料, 可以增强介质筒内部和外部的电磁屏蔽性能。天线辐射波束会因介质筒与吸波材料的引入而受到影响, 尤其在低频段, 因此, 吸波

材料的高度不能过大, 需在减小背景干扰和影响天线辐射特性之间进行权衡。

为提高测试稳定性, 收发天线需进一步固定。本文将开有定位槽的 2 个定位板相互平行安装于收发天线两侧, 并与收发天线垂直, 如图 4 所示。考虑介质筒的直径不能过大, 收发天线之间的间距设置约为最大工作波长的二分之一, 即 70 mm。该间距下, 耦合波和待测涂层的反射回波会进行矢量叠加, 从而影响测试准确度。本文从硬件和软件两方面来解决互耦问题。在硬件方面, 为最大程度地抑制互耦信号, 在收发天线之间平行地设置一个去耦屏, 如图 4 所示。去耦屏由 1 片覆铜板和 2 片吸波胶板组成, 覆铜板可对收发天线之间的耦合信号进行有效隔离, 而覆铜板两侧的吸波胶板可减小覆铜板对天线波束的扰动。去耦屏前端具有锯齿结构, 可有效降低其对反射回波的二次散射。去耦屏越长, 去耦效果越好, 但对天线辐射波束的扰动也越大。实际中通过仿真和实验进行协同优化, 得到去耦屏最佳长度为 105 mm。

图 5 给出了在 2~18 GHz 频段内有无去耦屏时收发天线间的互耦影响。在增加去耦屏后, 在 2~4 GHz 低频段收发天线间的互耦强度(匹配状态下的 S_{21} 参数)从 -20 dB 左右下降至 -30 dB 左右, 测试动态范围(匹配终端和短路终端对应 S_{21} 参数的差值)增大了约 10 dB。同时, 增加去耦屏后, 有效信号和互耦信号的矢量叠加效应减弱, 其对应的 S_{21} 参数曲线(实线)波动更小。4 GHz 以下的低频段, 在无去耦屏的情况下, S_{21} 参数曲线存在严重重叠的现象; 而增加去耦屏后, 这种重叠现象被消除了, 显著提高了测试精度。

另一方面, 本文从软件上采用时域选通技术对测量数据进行滤波。时域选通技术是将输入信号从频域转换到时域进行分析, 然后利用时域选通函数滤除干扰信号, 最后将结果转换回频域。当有效信号和干扰信号传播时间满足一定时差时, 时域选通技术可以有效滤除干扰信号的影响^[22]。图 6 给出了当测量探头紧贴金属平板时, 通过频域-时域转换获得的 S_{21} 参数的时域响应, 其校准参考面为天线端口。可以看出, I 区的主峰为有效信号, 其余时间区对应的峰值为干扰信号; 其中, II 区的干扰信号来自收发天线间的残余耦合, III 区的干扰信号对应多路径反射。为了滤除干

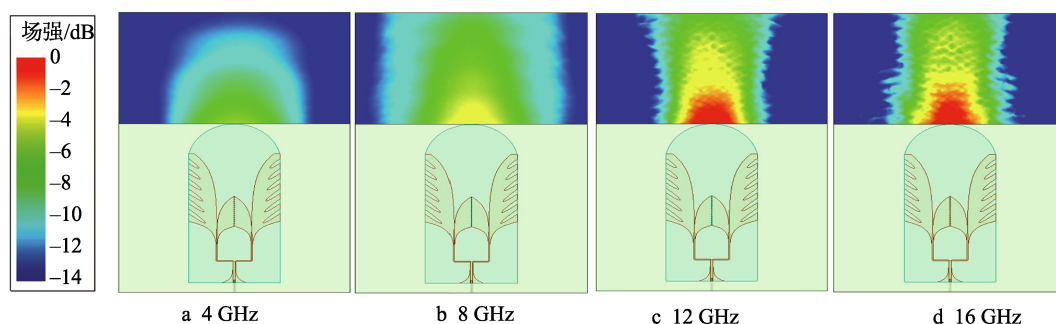


图 3 不同频点电场能量近场仿真结果
Fig.3 Near-field simulation results of electric-field energy at different frequency points

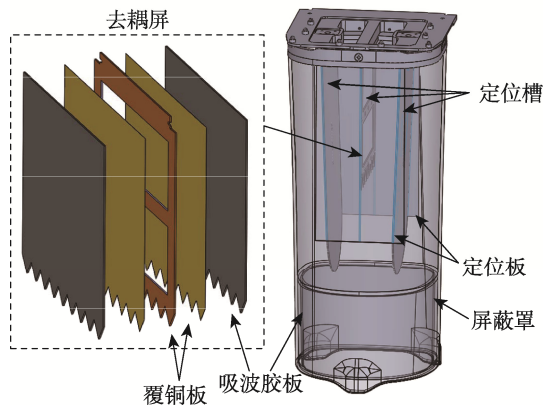


图 4 天线测量探头示意图
Fig.4 Schematic diagram of antenna measuring probe

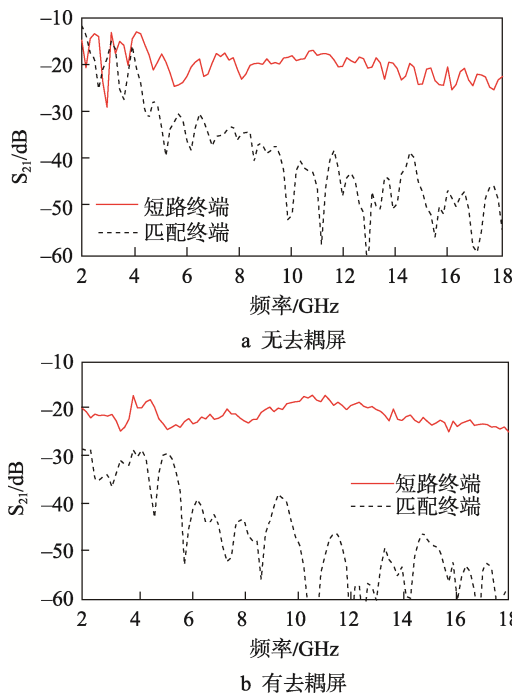


图 5 有无去耦屏时收发天线间互耦影响
Fig.5 Mutual coupling effect between transceiver antennas with or without decoupling screen

扰信号分量, 设置时域门的起点和终点在有效信号主峰的底部, 将时域门与时间响应相乘后, 可以在保留主峰的同时对干扰信号进行滤波。基于时域选通技术对图 5b 的曲线进行滤波处理 (取时域门宽为 400 ps) 后, 得到终端匹配和终端短路下收发天线间 S_{21} 参数的频率响应, 如图 7 所示。可以看出, 时域选通后曲线更为平滑, 曲线上由于有效信号和干扰信号矢量叠加造成的周期波动消失, 同时天线间的互耦得到了进一步抑制。

2.3 手持测量仪集成

本文基于构建的天线测量探头, 对手持测量仪进行集成。测量仪主要由测量探头、扫频模块、控制

处理模块、电源模块、外壳把手五部分构成, 各部分连接示意如图 8a 所示, 实物如图 8b 所示。收发天线通过半刚性电缆连接下后方的扫频模块, 扫频模块通过串口与其上方的控制处理模块进行通信; 控制处理模块通过按键输入指令, 通过屏幕和 SD 卡显示, 并导出测试数据; 电源模块位于下方把手底部, 为扫频模块和控制处理模块供电, 其电池可快速拆卸及充电。

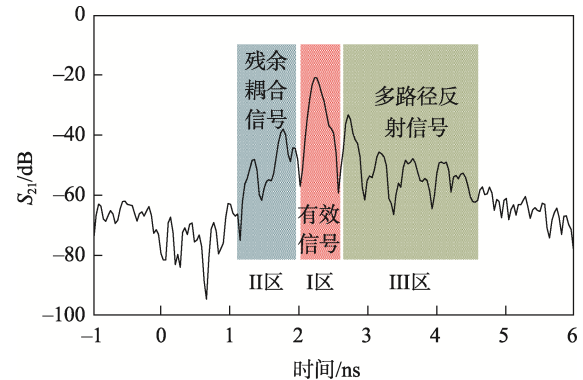


图 6 短路终端加载下测量探头 S_{21} 参数的时域响应
Fig.6 Time-domain response of measuring probe S_{21} under short-circuit terminal loading

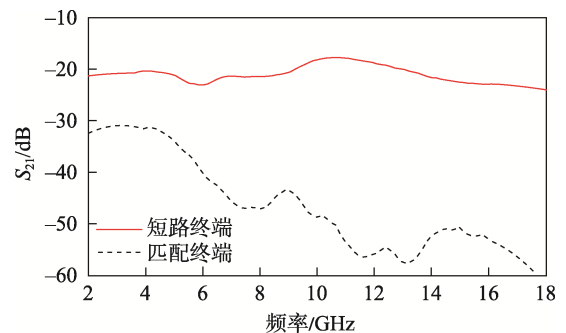
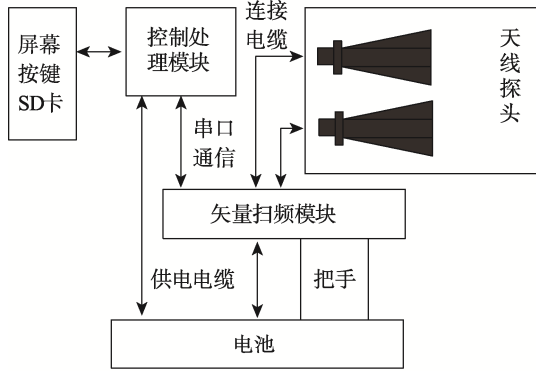


图 7 时域选通下收发天线间互耦频响曲线
Fig.7 Frequency-response curves of mutual coupling between transceiver antennas under time-domain gating

为实现手持测量仪的小型化, 本文采用 Measall Technology 公司的 901R 便捷模块作为扫频模块。控制处理模块采用单片机 STM32F4ZGT6 作为主控芯片, 实现对扫频模块的控制, 并对原始测量数据进行处理。单片机内嵌了校准程序和时域选通算法, 可自行处理和修正原始测量数据, 数据可实时显示并保存到 SD 卡。电源模块由 4 节 18650 锂电池构成, 能够保证 2 h 以上的续航时间。外壳把手采用注塑与铝合金结合的成型工艺, 能够对内部元器件进行密封保护。把手上设置“确认”自复位按键, 可通过“校准”和“测试”的开关切换执行相应确认操作。经测量, 手持测量仪外形尺寸为 310 mm×300 mm×120 mm, 质量为 2.6 kg, 满足手持使用要求。



a 结构框图



b 实物图

图8 手持测量仪结构及实物
Fig.8 Structural diagram and physical photo of handheld measuring instrument

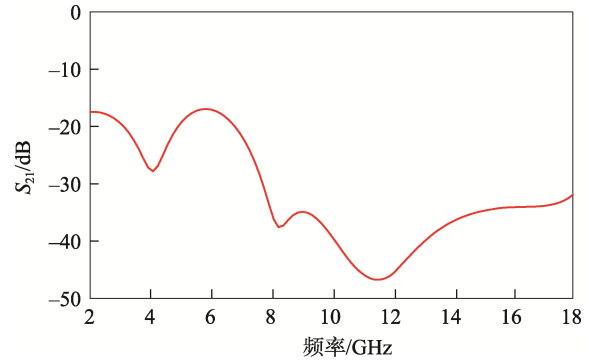


图9 手持测量仪反射率动态范围
Fig.9 Dynamic range of reflectivity of handheld measuring instrument

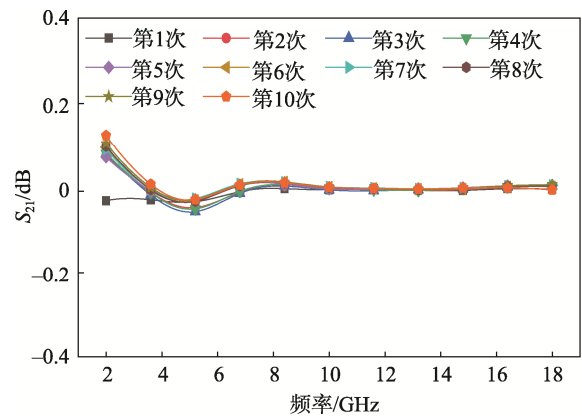


图10 金属平板反射率重复性测量结果
Fig.10 Repeatability measurement results of reflectivity of metal plate

3 结果与分析

3.1 手持测量仪性能评估

首先对手持测量仪的动态范围进行评估。利用测量仪对自由空间的反射率和一大金属平板的反射率进行测量。自由空间对应最小可接收信号，金属平板对应最大可接收信号，两者之差即为动态范围。取时域门宽为 400 ps，得到测量仪动态范围如图 9 所示。可以看出，全频带动态范围为-17~0 dB，能够覆盖大多数吸波涂层反射率范围。

其次对手持测量仪测量重复性进行评估。采用一足够大金属平板，以该平板校准后对该平板进行 10 次连续测量，每次测量位置相同，获得重复性测量结果如图 10 所示。可以看出，10 次测量结果重复性良好，偏差小于 0.2 dB。

最后对待测涂层区尺寸的影响进行分析。针对已涂覆涂层，测量区可能处于涂层边缘。本文模拟了该情形下涂层边缘对天线探头的影响，测试对象为边长为 300 mm 的方形吸波胶板，如图 11 所示。采用与吸波胶板相同横向尺寸的方形金属平板进行校准，选择平板正中部为校准区域，校准之后将吸波胶板置于金属平板上方且边缘对齐。测量时，分别改变探头

与胶板边缘的距离 d_1 和 d_2 ，观察测试曲线变化情况，如图 12 所示。可以看出，随着测量探头逐渐靠近边缘，吸波胶板的反射率曲线未出现明显变化，探头位于中部 ($d_1=d_2=100$ mm) 和边缘 (d_1 或 $d_2=0$ mm) 时对应的反射率偏差小于 0.5 dB。上述结果表明包围有屏蔽罩的天线测量探头具有良好的位置适应性，能够有效减小背景环境对测量的影响。



图11 手持测量仪探头与涂层边缘位置关系
Fig.11 Position relationship between handheld measuring instrument probe and coating edge

3.2 典型吸波样板测量比对

本文采用与标准弓形系统比对的方法对手持测量仪测量精度进行验证。待测样板选用厚度为 0.3 mm 的吸波涂层、0.8 mm 的吸波复材板、1.0 mm 的吸波胶板以及 1.5 mm 的吸波胶板, 4 种样板如图 13 所示,

样板横向尺寸均为 200 mm×200 mm。对同一样板分别采用标准弓形系统和本文研制的手持测量仪进行比对测量, 结果如图 14 所示。从比对结果可以看出, 在-17~0 dB 反射率范围内, 本文提出的手持测量仪测量结果与弓形系统测量结果偏差小于 1.5 dB, 两系统测得的反射率曲线具有良好的一致性。

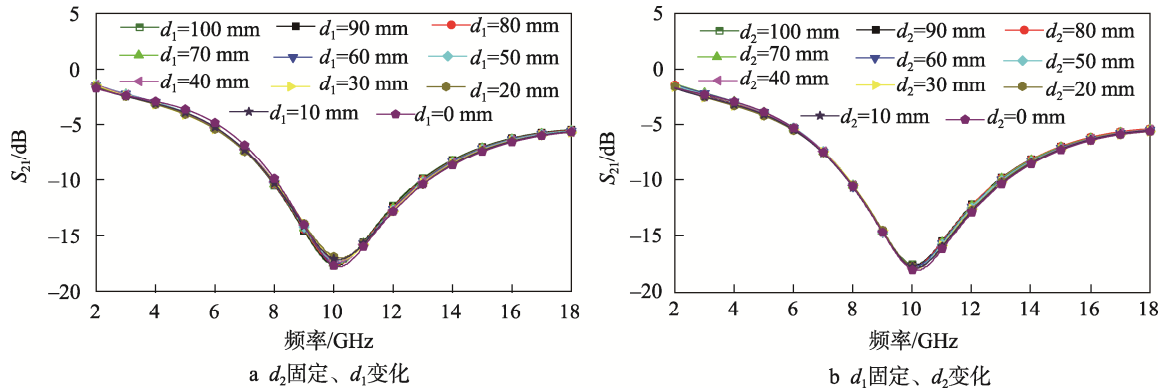


图 12 探头与吸波胶板边缘不同距离下的反射率曲线
Fig.12 Reflectivity curves at different distances between probe and absorbing rubber plate edge

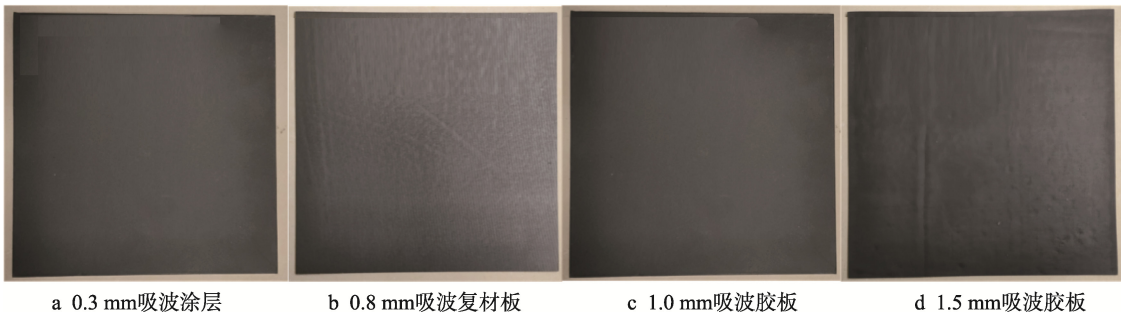


图 13 待测吸波样板
Fig.13 Absorbing sample plates under test

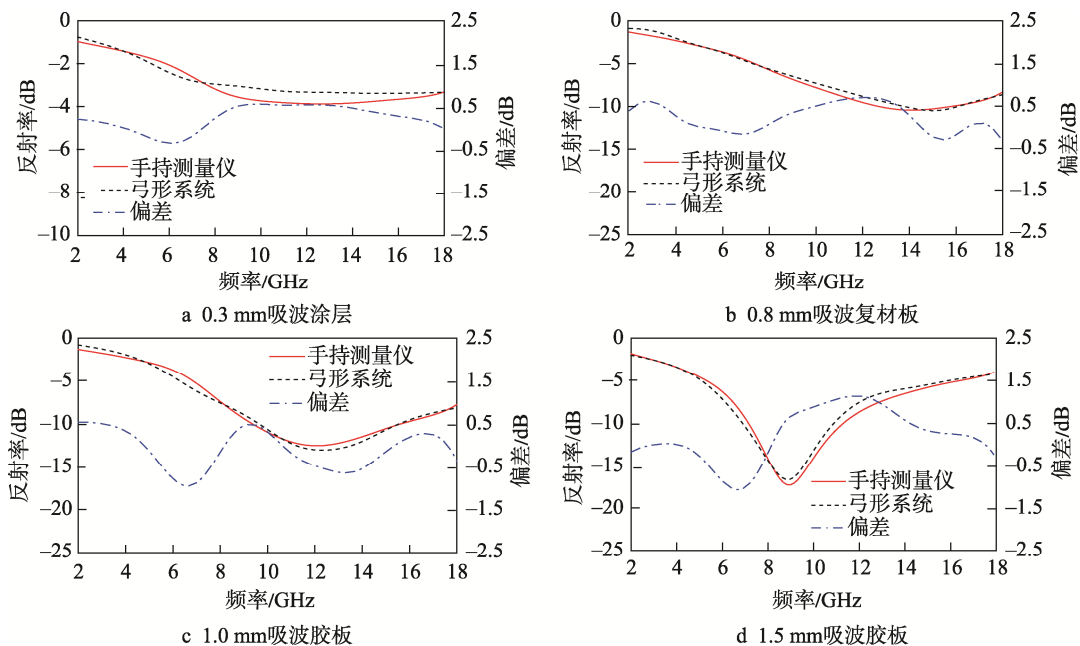


图 14 4 种吸波样板测量比对结果
Fig.14 Measurement and comparison results of four kinds of absorbing sample plates

4 结语

本文提出了一种基于收发天线近场反射测量的涂层反射率原位获取技术,详细介绍了该方法的理论模型、算法实现,以及测量装置的研制与实验等内容。相较于传统传输线探头测量法,该方法在测量带宽、测量准确度等方面具有突出优势,单个设备带宽覆盖范围为2~18 GHz。在-17~0 dB反射率范围内,对厚度不超过1.5 mm的同一样板,所提设备测量结果与标准弓形系统测量结果偏差小于1.5 dB。所提设备适用于涂层、胶板、复材板等薄层吸波材料雷达反射率的现场检测,能够为服役条件下涂层材料雷达吸波性能的跟踪及损伤评估提供重要技术支撑。

参考文献:

- [1] 李言荣. 电子材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
LI Yan-rong. Electronic Material[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [2] 殷宗莲, 周学梅, 王俊芳. 吸波涂层失效因素研究[J]. 表面技术, 2015, 44(7): 76-80.
YIN Zong-lian, ZHOU Xue-mei, WANG Jun-fang. Study on Factors Leading to Failure of Electromagnetic Wave Absorbing Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(7): 76-80.
- [3] IEEE Std 1128-1998(R2012), IEEE Recommended Practice for Radio-Frequency (RF) Absorber Evaluation in the Range of 30 MHz to 5 GHz[S].
- [4] GJB 2038A—2011, 雷达吸波材料反射率测试方法[S].
GJB 2038A—2011, The Measurement Methods for Reflectivity of Radar Absorbing Material[S].
- [5] BAKER-JARVIS J, JANEZIC M D, DOMICH P D, et al. Analysis of An Open-ended Coaxial Probe With Lift-off for Nondestructive Testing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(5): 711-718.
- [6] 花国良. 开口同轴探头法电磁参数测量系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
HUA Guo-liang. Research on Electromagnetic Parameter Measurement System with Open Coaxial Probe Method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [7] HYDE M W, HAVRILLA M J. Broadband, Nondestructive Characterization of PEC-Backed Materials Using a Dual-Ridged-Waveguide Probe[J]. IET Science Measurement and Technology, 2014, 9(1): 56-62.
- [8] 邓乐武, 魏平, 吴杰. 吸波涂层反射率原位测试技术研究[J]. 现代雷达, 2014, 36(8): 50-53.
DENG Le-wu, WEI Ping, WU Jie. A Study on Reflectivity In-Situ Test of Radar Absorbing Coating[J]. Modern Radar, 2014, 36(8): 50-53.
- [9] 吴亮, 于海涛, 宋烈浦. 一种雷达吸波涂层的在线测量方法[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(1): 15-18.
WU Liang, YU Hai-tao, SONG Lie-pu. An On-Site Measurement Technique of Radar Absorbing Coatings[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(1): 15-18.
- [10] 管绍朋, 李大社. 雷达吸波材料反射率的小型测试仪设计[J]. 兵工自动化, 2006, 25(8): 69-70.
GUAN Shao-peng, LI Da-she. Miniaturization Apparatus Design for Radar Absorbing Materials Reflection[J]. Ordnance Industry Automation, 2006, 25(8): 69-70.
- [11] 郭寅生, 颜锦奎, 徐得名, 等. 雷达吸波材料反射率的现场测量[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, 18(3): 251-255.
GUO Yin-sheng, YAN Jin-kui, XU De-ming, et al. Field Measurement of Reflection Coefficient of Radar Absorbing Material[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2012, 18(3): 251-255.
- [12] SHI D, WANG C, GAO Y. A New Permittivity Measurement Method for Walls in Indoor Scenes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2118-2129.
- [13] LI L, HU H, TANG P, et al. Compact Dielectric Constant Characterization of Low-Loss Thin Dielectric Slabs with Microwave Reflection Measurement[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(4): 575-578.
- [14] GERYAK R D, SCHULTZ J W. Extraction of Magneto-Dielectric Properties from Metal-Backed Free-Space Reflectivity[C]// Antenna Measurement Techniques Association Symposium, San Diego, USA, 2019.
- [15] BUFFI A, NEPA P, MANARA G. Design Criteria for Near-Field-Focused Planar Arrays[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(1): 40-50.
- [16] 王慷. 电磁场近场测试技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 51-75.
WANG Kang. Research on Electromagnetic Near-field Test Technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 51-75.
- [17] 寇彬彬. 分层材料介电性能变温测试技术研究[D].

- 成都: 电子科技大学, 2013: 9-18.
- KOU Bin-bin. Study on Temperature-Varying Testing Technology for Dielectric Properties of Layered Materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 9-18.
- [18] SCHULTZ J W. Microwave Material Measurements without Cables[J]. Microwave Journal, 2017, 60(8): 66-78.
- [19] POMETCU L, SHARAIHA A, BENZERGA R, et al. Method for Material Characterization in a Non-anechoic Environment[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(16): 161604.
- [20] MIKHNEV V A, VAINIKAINEN P. Single-reference Near-field Calibration Procedure for Step-frequency Ground Penetrating Radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(1): 75-80.
- [21] ZHANG Y, LI E, GAO C, et al. Portability Improvement for Free-Space Reflectivity Measurement[J]. Measurement, 2020, 157: 107686.
- [22] 周忠元. 电缆及其连接器的电磁防护技术基础研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
- ZHOU Zhong-yuan. Basic Research on Electromagnetic Protection Technology of Cables and Their Connectors[D]. Nanjing: Southeast University, 2008.

责任编辑: 曾钰婵