

P波段小尺寸平板RTM透波系数测试方法



赵健良, 吴昌英

西北工业大学, 陕西 西安 710129

摘要:在评估雷达透波材料(RTM)的透波性能时,透波系数作为一项核心指标,要求所采用的测量方法既简便易行,又确保高精度。传统时域方法通过对比RTM样板与空气状态下的散射参数测定透波系数,但在P波段,由于频段狭窄导致时域分辨率不足,易产生测量误差,且需大尺寸样板以减弱边缘效应,增加了制备与测试难度。为此,本文引入了一种基于交比不变理论的频域测试方法,采用直通和已知透波系数的平板材料作为校准件,有效消除了边缘效应,实现了小尺寸平板RTM透波系数的精确测量。通过构建测试系统仿真模型,并与传统方法及理论值对比分析,验证了该方法的优越性。在常规实验室条件下,对聚四氟乙烯(PTFE)及C夹层平板型天线罩进行测试,结果显示,该方法在P波段内对PTFE平板材料的RTM透波系数测试更接近理论预期,与仿真结果一致,且幅值误差不超过0.03 dB,相位误差不超过0.35°。对C夹层平板型天线罩的透波系数也表现出较好的预测能力。综上所述,该方法成功实现了P波段小尺寸平板RTM透波系数的精确测量,证明了其可行性、准确性及广泛适用性。

关键词:微波测量; 雷达透波材料; 交比不变理论; 透波系数; P波段

中图分类号: TN98

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.012

雷达透波材料(RTM)作为一类能够高效穿透电磁波而几乎不改变其特性的特殊材料^[1],在雷达天线罩、微波塔楼、微波中继站及通信天线等电磁防护领域发挥着举足轻重的作用^[2]。此类材料不仅能够有效保护雷达天线系统免受恶劣环境侵扰,还保障了雷达在各种工况下全天候的稳定运行。RTM材料展现出优异的电学性能,包括低介电常数和低损耗特性。同时,它们还需具备高强度、耐高温、阻燃及耐老化等多元性能^[3],以满足不同应用场景下的需求。

雷达系统在各类复杂环境中的广泛应用,对RTM的性能提出了更为严格的要求。RTM在生产完成后,必须经历严格的性能检测,其中,透波系数作为衡量其性能的关键指标,直接影响着雷达系统的运行效率^[4]。针对加工完成的透波材料实体,通常通过测量其透波系数的幅度与相位特性来评估其透波性能。

目前,透波系数测试的传统主流方法是时域法(可细分为聚焦透镜法和远场照射法),该方法涉及将频域数据通过傅里叶变换转换至时域。鉴于干扰信号与有效信号路径间

的差异,时域门技术被应用于辨识源自环境不同部分的各种干扰。然而,在P波段,由于频带较窄,转换至时域后的信号面临时间分辨率受限的问题,导致时域选通技术难以有效区分有效信号与干扰信号,进而造成测量精度下降。此外,为了减轻测试样板边缘效应^[5]的影响,聚焦透镜法和远场照射法均需采用大尺寸样板^[6],文献[7]明确指出样板尺寸应至少为天线接收口面的1.25倍,这在P波段显著增加了样板的制备难度。同时,在P波段透镜天线尺寸的增加将导致成本大幅提升,而远场照射法为满足远场条件还需较大的测试空间及复杂的测试环境,不仅成本高昂,而且测试流程烦琐。因此,传统法在实际应用中面临诸多限制。

鉴于P波段在雷达、通信、遥感等领域的广泛应用^[8-9],对透波材料在该频段透波性能的准确评估成为各国研究的热点。因此,寻求一种在P波段低成本、简单易用的RTM透波系数测试方法,具有重要意义。

交比不变原理作为射影几何中的重要理论,在微波测量领域广泛用于校准系统误差^[10-11]。然而,截至目前,尚未

收稿日期: 2024-12-25; 退修日期: 2025-02-13; 录用日期: 2025-03-31

基金项目: 航空科学基金(20230018053004)

引用格式: Zhao Jianliang, Wu Changying. Measurement method for wave transmittance of small-sized flat RTM in the P-band [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 96-103. 赵健良, 吴昌英. P波段小尺寸平板RTM透波系数测试方法[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 96-103.

有研究者将该原理应用在RTM透波率的测试中。因此,将交比不变原理应用在RTM透波率的测试当中,有很大的应用潜力,值得深入研究。

1 基本理论

1.1 透波系数的定义

RTM透波系数的定义为电磁波在给定波长和极化的条件下,从同一方向,以相同功率密度分别入射到雷达透波材料表面和空气介质的电场强度的比值,则有

$$T = \frac{E_a}{E_0} = |T|e^{j\theta} \quad (1)$$

式中, E_a 表示入射到RTM表面的电场强度, E_0 表示入射到空气介质的电场强度, $|T|$ 表示透波系数幅值, θ 表示透波系数相位。

1.2 透波系数的理论值

图1展示了电磁波垂直入射到RTM的情形,假定RTM两侧为空气介质,根据传输线理论,可以推导出相应的透波系数

$$T = \frac{(1-R^2)e^{-jkd}}{1-R^2e^{-2jkd}} \quad (2)$$

其中:

$$k = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

$$R = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

式中, R 为空气介质与待测RTM样板交界面处的反射系数, k 为RTM中的传播常数, k_0 为自由空间中的传播常数, ϵ_r 为RTM的相对介电常数, d 为RTM的厚度。

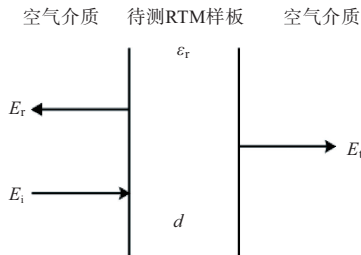


图1 电磁波垂直入射RTM示意

Fig.1 Schematic representation of electromagnetic wave normally incident on RTM

三个校准件包括一个直通件和两个厚度不同的平板材料。直通件相当于发生全透射,其透波系数理论值等于1。而另外两个校准件的透波系数的理论值基于式(2)计算得到。将这些透波系数的理论值作为后续仿真和实际测试时的参考标准。

1.3 基于交比不变理论的校准方法

设有4个共面点 A 、 B 、 C 和 D , 其交比(记作 $CR(A, B; C, D)$)定义如下

$$CR(A, B; C, D) = \frac{(A-C)(B-D)}{(A-D)(B-C)} \quad (5)$$

交比不变原理指复平面中4个不同点的交比在这些点经由分式线性变换到另一复平面内相对应的4个点时保持不变^[12]。

首先假设两个复平面 T 和 V , 它们之间满足如下的分式线性变换关系

$$T = \frac{aV+b}{cV+d} \quad (6)$$

式中, a 、 b 、 c 和 d 是与 T 和 V 无关的复系数。

如果 T 平面的4个点 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 通过式(7)变换到 V 平面的4个点 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 , 则在分式线性变换下 V 平面内的4个点的交比与变换前的 T 平面内的4个点的交比是相等的^[13]。则有

$$\frac{(V_1-V_2)(V_3-V_4)}{(V_2-V_3)(V_4-V_1)} = \frac{(T_1-T_2)(T_3-T_4)}{(T_2-T_3)(T_4-T_1)} \quad (7)$$

如果 T_1 、 T_2 和 T_3 分别表示三个校准件的透波系数理论值, 这些值根据式(2)计算得到; 同时 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 分别表示三个校准件及待测RTM样板的透波系数测量值, 这些测量值基于仿真或实际测试所得的散射参数 S_{21} 来确定。根据交比不变原理, 计算出待测RTM样板的透波系数

$$T_4 = T_1 + \frac{(T_3-T_1)(T_1-T_2)}{M(T_2-T_3)+(T_1-T_2)} \quad (8)$$

其中:

$$M = \frac{(V_1-V_2)(V_3-V_4)}{(V_2-V_3)(V_4-V_1)} \quad (9)$$

2 仿真验证

为了验证在P波段下基于交比不变理论的小尺寸平板RTM透波系数测试方法的可行性, 首先明确仿真条件, 包括收发天线距离、金属屏以及待测RTM样板的尺寸; 然后利用某电磁仿真软件搭建模型, 并完成仿真验证。

2.1 仿真模型

本节搭建了测试系统的仿真模型。该测试系统包括双脊喇叭天线、金属屏、待测RTM样板及三个校准件。测试系统仿真模型如图2所示。

在传统法的透波系数仿真测试中, 透波系数的计算依赖于读取待测RTM样板与直通状态的 S 参数仿真结果, 并根据式(1)将两者相除获得。然而, 该方法易受到待测样板与金属屏边缘效应的影响, 从而导致测量结果的精确度受

限,甚至不准确。

在交比不变方法的透波系数仿真测试中,需要读取待测RTM样板和三个校准件的 S 参数仿真结果,再利用式(2)得出的三个校准件的透波率理论值,最后根据交比不变原理,即式(8),计算出待测RTM样板的透波系数。

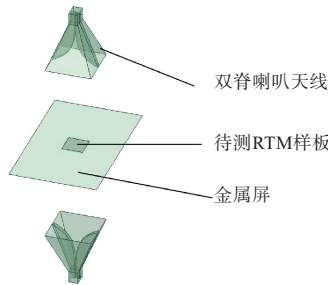


图2 测试系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of the testing system

2.2 仿真条件的确定

首先,需明确收发天线间的距离,具体为发射天线至所设定的相位参考面(即待测RTM样板所在平面)的间距。针对双脊喇叭天线,分析其近场辐射的相位分布情况,结果如图3所示。由于待测样板的尺寸最大为500 mm×500 mm,结果表明,在距离双脊喇叭天线2 m的位置处,待测RTM样板所在区域的相位变化在 $\pm 4.5^\circ$ 之间,这表明在此位置可近似实现平面波照射的效果。据此,确定发射天线至相位参考面的距离为2 m,即收发天线之间的总距离为4 m。

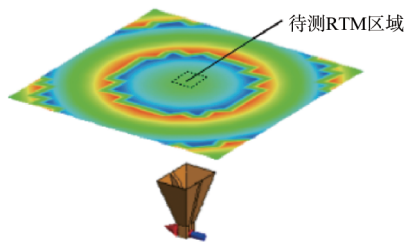


图3 双脊喇叭天线近场辐射相位分布

Fig.3 Near-field radiation phase distribution of a bi-ridged horn antenna

文献[6]指出,测量过程中被测材料的尺寸需足够大,以确保喇叭天线辐射的电磁波至少覆盖一个菲涅尔带,从而降低测量误差。因此,金属屏的设计必须覆盖第一菲涅尔带,旨在削弱抵达接受天线的不必要信号。前文已确定收发天线的间距为4 m,据此可计算出第一菲涅尔带的半径为1.25 m,进而确定金属屏的适宜尺寸至少为2.5 m×2.5 m。

在仿真中,双脊喇叭天线的口径面尺寸为1 m×1 m,为尽量降低边缘效应对仿真结果的影响,依据文献[7]计算得

出待测样板的尺寸至少为1.25 m×1.25 m。而基于交比不变原理的RTM透波系数测试方法可以通过多个校准件的测试,有效校准并消除样板边缘散射所带来的影响。因此,即便在采用较小尺寸的测试样板时,该方法仍然能够获得相当精确的结果。

在仿真试验中,采用8 mm厚的聚四氟乙烯(PTFE)平板作为待测样板,并分别设置其边长为200 mm、300 mm和500 mm。基于交比不变原理的仿真结果如图4所示。

结果表明,当待测样板的边长为200 mm时,由于其尺寸相对较小,边缘效应显著,导致仿真结果误差较大。相比之下,边长为300 mm和500 mm的待测样板,仿真值均与理论值接近,误差微小,尤其是以500 mm作为边长的待测样板效果最佳。鉴于实际实验环境难以完全模拟理想的仿真条件,综合考虑后,选定500 mm×500 mm作为待测样板尺寸,此时边缘效应对结果产生的影响可忽略不计。

2.3 仿真结果及分析

待测样板选用尺寸为500 mm×500 mm×8 mm的PTFE平板,三个校准件分别为直通件和两个PTFE板(与待测样板的尺寸相同,厚度分别为5 mm和10 mm)。在待测样板透波率的仿真过程中,将交比不变方法与传统方法进行对比,结果如图5所示。图5表明,本文提出的交比不变方法在幅值与相位结果上相较于传统方法具有显著优势,且与理论值更为接近。具体而言,该方法实现的幅值最大误差低至0.002 dB,相位最大误差仅为0.004°,而传统方法则分别达到0.7 dB和6.1°。

随后将PTFE板的厚度更换为12 mm,采用的三个校准件不变,重复仿真测试过程,将交比不变方法与传统方法进行对比,结果如图6所示。图6表明,测试不同厚度的PTFE平板,仍然可以得出与图5相同的结论。

为验证交比不变方法的广泛适用性,将仿真待测样板更换为FR4平板,其尺寸为500 mm×500 mm×7 mm,将交比不变方法和传统方法进行对比,结果如图7所示。图7表明,与传统法相比,交比不变方法仍然能够准确校准FR4平板,误差远小于传统方法。说明交比不变方法可以准确校准不同RTM的透波率,体现了其广泛适用性。

2.4 存在反射面时仿真结果及分析

在仿真研究中,向测试环境中引入反射面,模拟了实验室内常见的复杂环境(如地面、墙壁等)。所构建的仿真模型如图8所示。两个反射面的尺寸为2 m×3 m,距离中心各1.7 m。同样将反射面存在时的交比不变方法与传统法进行对比,结果如图9所示。

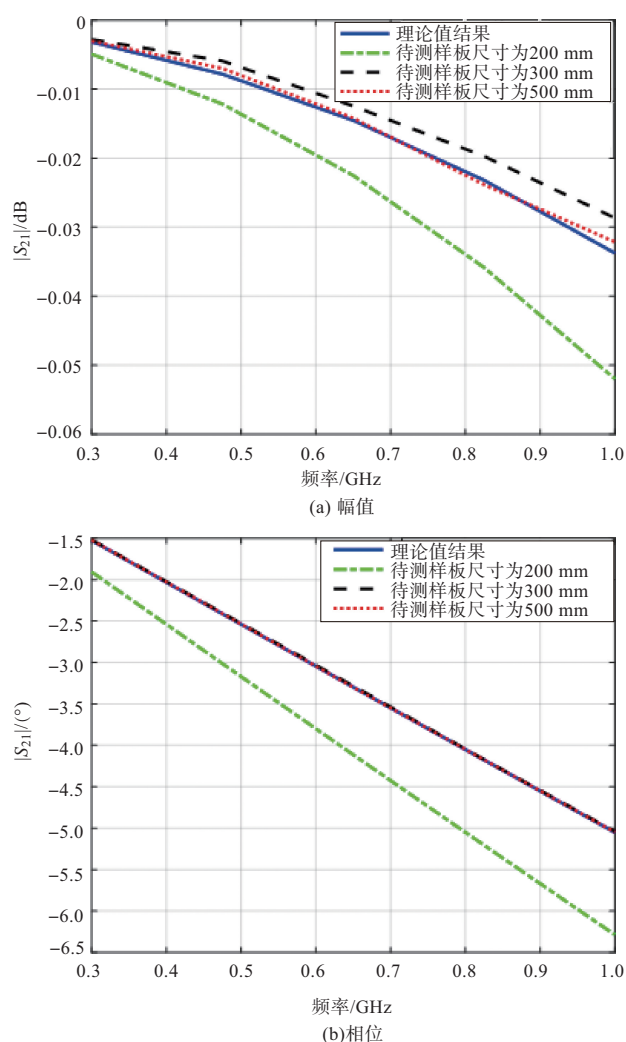


图4 不同尺寸的样板交比不变方法仿真结果

Fig.4 Simulation results of different-sized templates based on the principle of cross ratio invariance

结果表明,即便测试环境中存在散射源,采用交比不变方法获得的RTM透波系数的结果的准确度虽有轻微下降,但与理论值的误差依然保持在较低水平。这证明了交比不变方法所得RTM透波系数的结果的高度可靠性及其对测试环境的良好鲁棒性。反观传统测试法,与图5中的传统法结果相比,当引入反射面后,幅值的最大误差增至1.15 dB,相位的最大误差增至9.5°。这是由于P波段时域分辨率不足及测试空间内多径散射的相互干扰,无法准确获取RTM透波系数,因此,传统法在此类环境下不再适用。

3 实物测试

基于交比不变理论的平板RTM透波系数测试方法能够实现对环境参数的精确校准,从而使得该方法的测试系统得

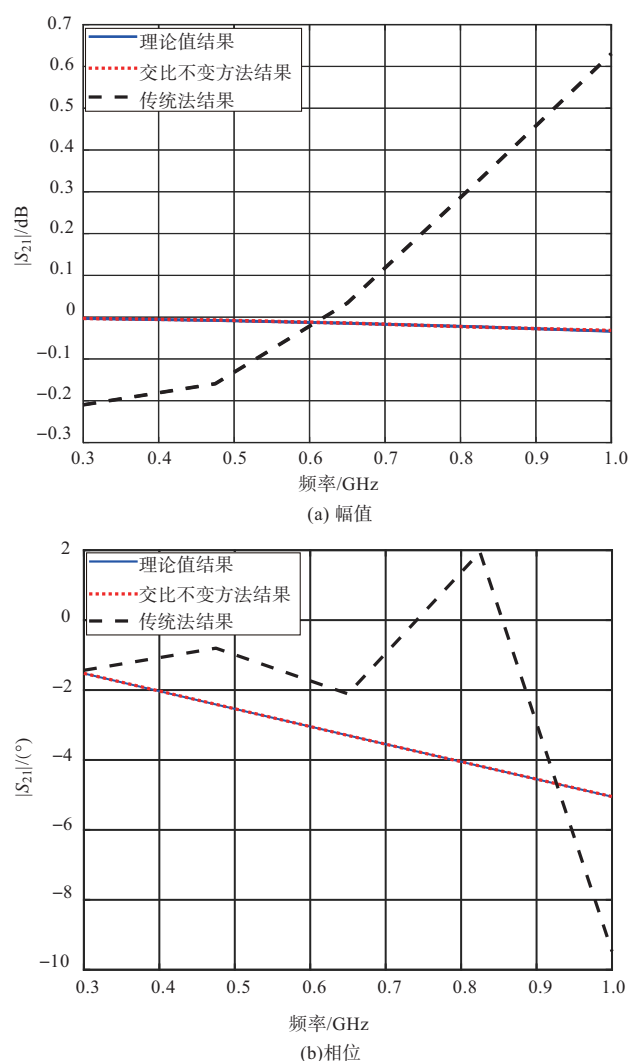


图5 PTFE 平板(8mm)的交比不变方法与传统法对比结果

Fig.5 Comparison results between the cross ratio invariance method and the traditional method of the PTFE plate(8mm)

以在常规实验室内搭建。搭建的测试系统如图10所示。测试用的PTFE样板和C夹层平板型天线罩如图11所示。

3.1 PTFE 样板的透波率测试

与仿真设置相仿,收发天线间距为4 m,金属屏的尺寸为3 m×1.9 m,其中心窗的尺寸为440 mm×440 mm,便于放置待测RTM样板或校准件。待测样板选用尺寸为500 mm×500 mm×8.8 mm的PTFE平板,而三个校准件分别为直通件及两个PTFE平板(尺寸与待测样板相同,厚度分别为5 mm和10 mm)。将交比不变方法与传统法的实测结果进行对比,如图12所示。

图12表明,相较于理论值,本文所提出的基于交比不变理论的频域测试方法在P波段所获取的RTM透波系数的结果展

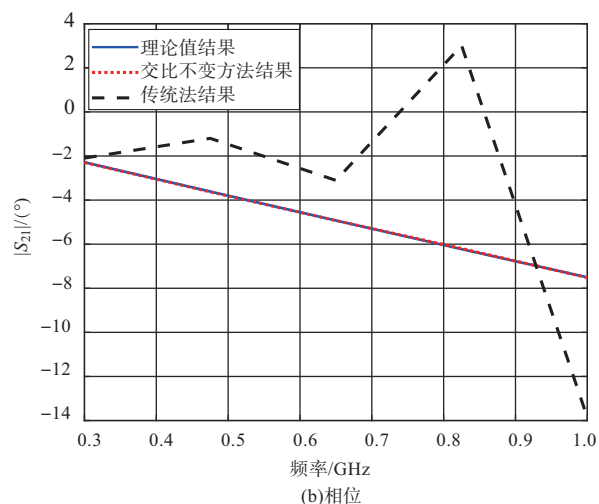
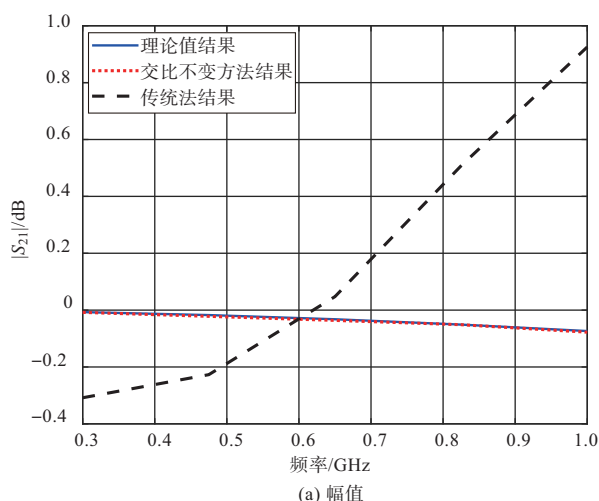


图6 PTFE平板(12 mm)的交比不变方法与传统法对比结果

Fig.6 Comparison results between the cross ratio invariance method and the traditional method of the PTFE plate (12 mm)

现出更高的接近度,其中幅值的最大误差未超过0.03 dB,相位的最大误差也未超过0.35°。相比之下,传统方法所得结果的波动较大,与理论值相比,其幅值最大误差达到0.5 dB,相位最大误差则为2.8°,其误差明显高于交比不变方法。

3.2 C夹层平板型天线罩的透波率测试

对尺寸为500 mm×500 mm×14 mm的C夹层平板型天线罩进行了透波系数测试。将交比不变方法的结果与传统方法的结果进行对比,结果如图13所示。

结果表明,针对该C夹层平板型天线罩,交比不变方法预测其透波系数的起伏较小,而传统方法则因波动过大而无法有效预测其透波系数。这进一步表明了交比不变方法相较于传统方法的广泛适用性和显著优越性。

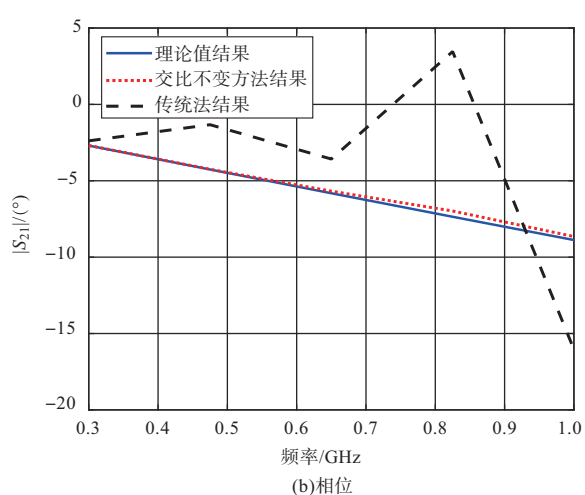
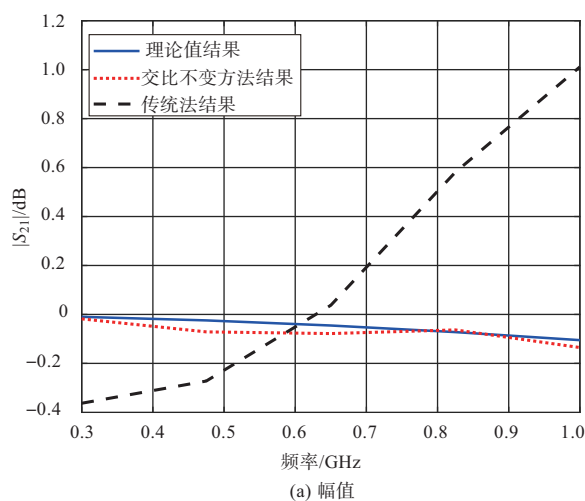


图7 FR4平板(7 mm)的交比不变方法与传统法对比结果

Fig.7 Comparison results between the cross ratio invariance method and the traditional method of the FR4 plate(7 mm)

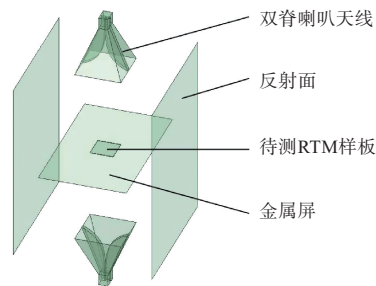


图8 存在反射面时的仿真模型

Fig.8 Simulation model in the presence of reflective surfaces

4 结束语

本文提出了一种基于交比不变理论的P波段小尺寸平板RTM透波系数的频域测试方法,有效解决了传统时域测试在低频段内因时间分辨率不足及待测样板尺寸需求过大

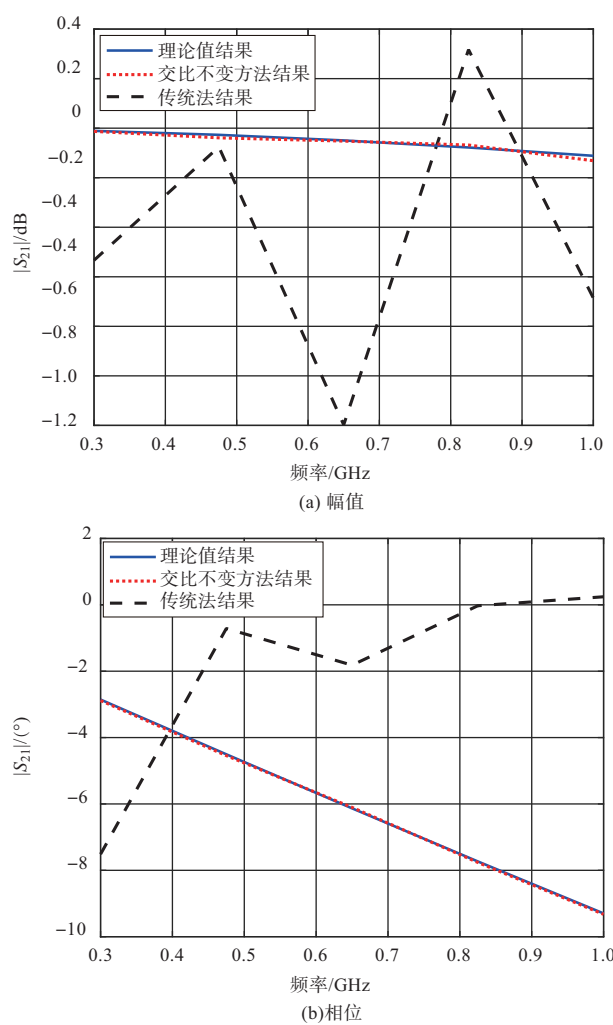


图9 误差对比结果

Fig.9 Error comparison results

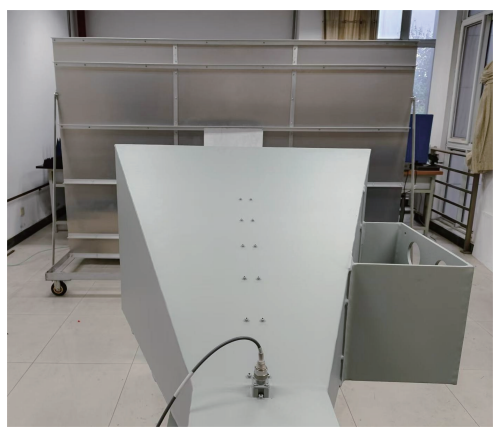


图10 搭建的测试系统实物图

Fig.10 Physical setup diagram of the constructed testing system

而导致的失真问题。通过采用多个已知透射系数的校准件,有效消除了样板边缘散射的影响,确保即使在测试样品

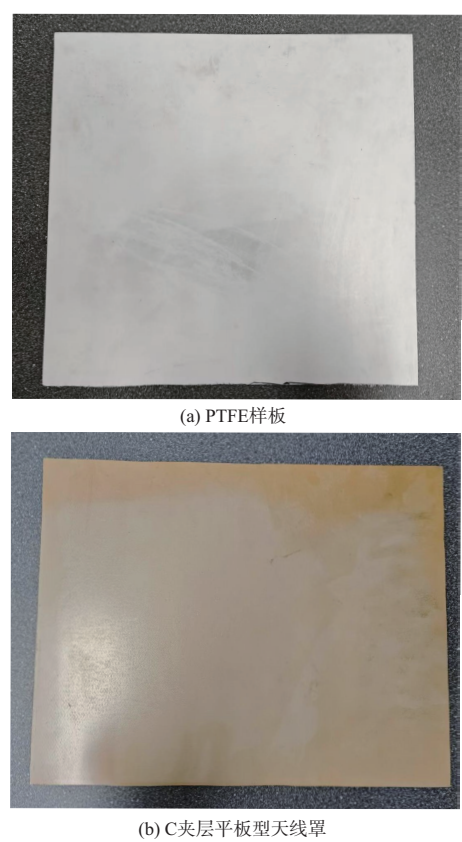


图11 待测样板

Fig.11 The samples to be tested

尺寸较小的情况下也能实现高精度测量。

仿真模拟了RTM透波系数测试过程,结果显示,该交比不变方法的测试结果与理论值高度接近,并且明显优于传统方法。特别是在测试环境周围存在不规则散射源时,交比不变方法依然能够取得良好的测试结果。搭建了现场测试环境,对PTFE样板及C夹层平板型天线罩进行了测试。测试结果表明,对于PTFE样板,实际测量结果与仿真结果相吻合,其中,该方法与理论值的幅值最大误差未超过0.03 dB,相位最大误差未超过0.35°。对于C夹层平板型天线罩,该方法能够较好预测其透波系数。

综上所述,通过仿真分析与实测试验,所提出的基于交比不变理论的P波段小尺寸平板RTM透波系数频域测试方法展现出良好的可行性和准确性。同时,该方法也适用于其他更高频段的透波系数的高精度测量,展现出广泛适用性。 **AST**

参考文献

[1] 张明习,轩立新. 高性能雷达罩设计与制造关键技术分析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(8): 13-18.

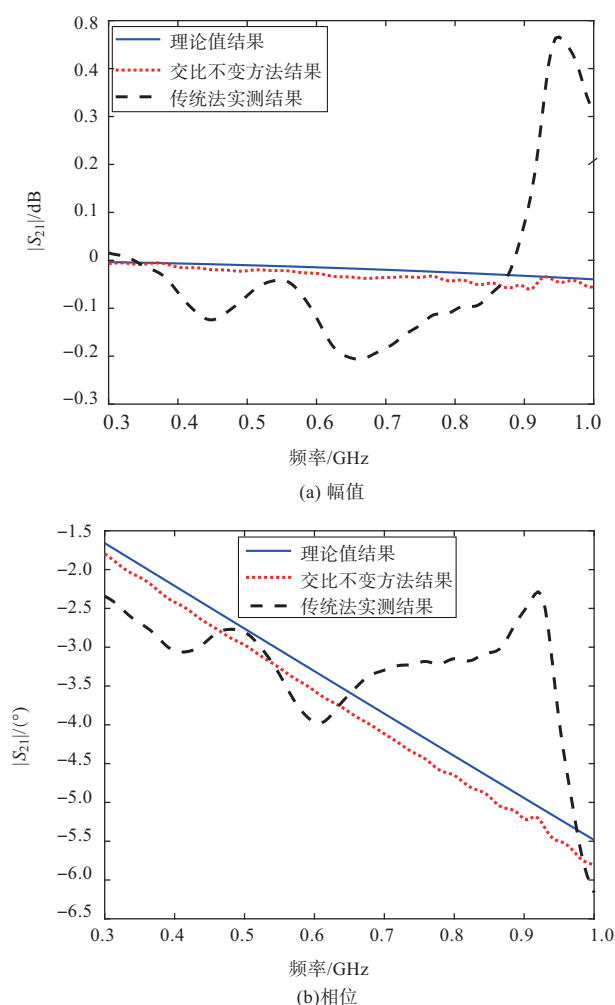


图12 PTFE平板(8 mm)的交比不变方法与传统法测量对比结果

Fig.12 Measurement comparison results between the cross ratio invariance method and the traditional method of the PTFE plate(8 mm)

Zhang Mingxi, Xuan Lixin. Analysis of key technologies in the design and manufacture of high-performance radomes[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(8): 13-18. (in Chinese)

- [2] 刘汉旭. 天线罩力学电磁性能综合设计研究[J]. 航空科学技术, 2012, 23(4): 73-75.

Liu Hanxu. Research on the integrated design of mechanical-electromagnetic performance of radomes[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 23(4): 73-75. (in Chinese)

- [3] Dong Guangyu, Li Wei. Microwave dielectric properties of Al_2O_3 ceramics sintered at low temperature[J]. Ceramics International, 2021, 47(14): 19955-19958.

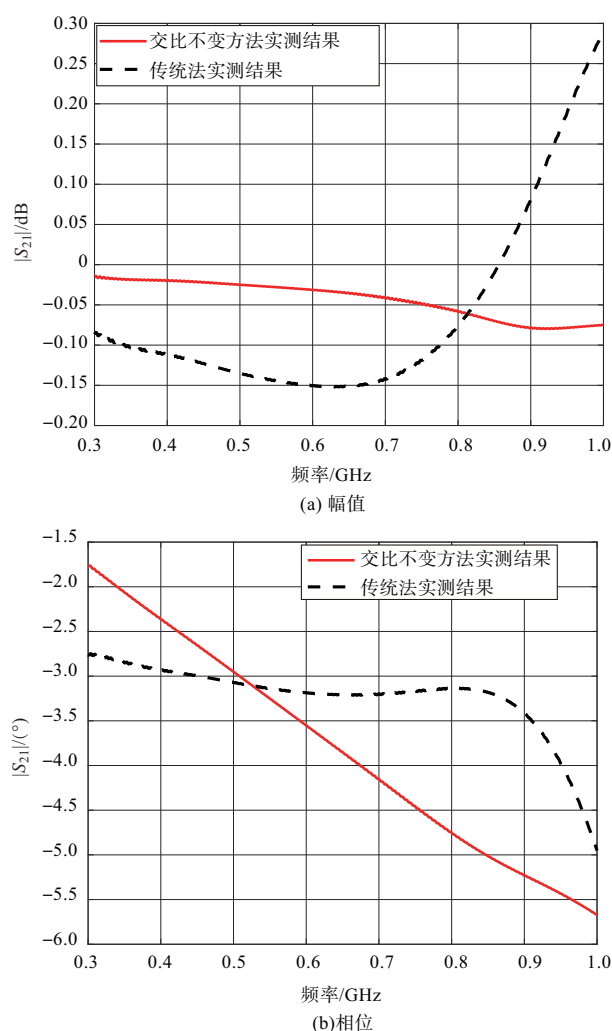


图13 夹层平板型天线罩(14 mm)的交比不变方法与传统法测量对比结果

Fig.13 Measurement comparison results between the cross ratio invariance method and the traditional method of the planar C-sandwich radome(14 mm)

- [4] Rambabu K, Thiart H A, Bornemann J. Casing effects on the radiation performance of a circularly polarized patch antenna [C]. IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004: 475-478.
- [5] Ghodgaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(6): 789-793.
- [6] Hiatt E. A study of VHF absorbers and anechoic rooms[M]. Michigan: The University of Michigan, 1963.
- [7] GJB 7954—2012 雷达透波材料透波率测试方法[S]. 北京: 中

- 国航天科工集团二院207所,2012.
- GJB 7954—2012 Test method for transmittance of radar transmittance materials[S]. Beijing: The 207th Institute of CASIC's Second Academy, 2012.(in Chinese)
- [8] Wang Liansheng, Xia Dongyan, Fu Quanhong. An electrically switchable wideband metamaterial absorber based on graphene at P band[J]. Open Physics, 2021, 19(1): 460-466.
- [9] Li Jinhui, Ji Yifei, Zhang Yongsheng, et al. Effects of polarimetric dispersion on future spaceborne P-band ultra-wideband SAR[J]. Electronics Letters, 2018, 54(22): 1292-1294.
- [10] Beatty R W, Macpherson A C. Mismatch errors in microwave power measurements[J]. Proceedings of the IRE. 1953, 41(9): 1112-1119.
- [11] Davis J B, Hempstead C F, Leed D, et al. 3700-4200MHz Computer-operated measurement system for loss, phase, delay and reflection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1972: 21(1): 24-37.
- [12] Kerns D M. Determination of efficiency of microwave bolometer mounts from impedance data[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1949, 42(6): 579-585.
- [13] Beatty R W, Macpherson A C. Mismatch errors in microwave power measurements[J]. Proceedings of the IRE, 1953, 41(9): 1112-1119.

Measurement Method for Wave Transmittance of Small-sized Flat RTM in the P-band

Zhao Jiangliang, Wu Changying

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

Abstract: The transmittance of Radar Transparent Materials (RTM) is a crucial metric for evaluating their wave-transmitting performance, necessitating both simplicity and precision in measurement methods. Traditional time-domain methods determine transmittance by comparing the scattering parameter ratios of RTM samples to those in air states. However, in the P-band, narrow bandwidth results in insufficient time-domain resolution, often leading to measurement errors. Furthermore, large sample sizes are required to mitigate edge effects, posing challenges for preparation and testing. To address these issues, a frequency-domain testing method based on the theory of cross-ratio invariance is introduced. This method uses a straight-through calibration piece and a flat material with a known transmission coefficient to effectively eliminate edge effects, enabling accurate measurements of small-scale flat RTM panels. By constructing a simulation model of the testing system and conducting comparative analyses with traditional methods and theoretical values, the superiority of this method is verified. Under typical laboratory conditions, tests were conducted on Polytetrafluoroethylene (PTFE) and unknown flat materials. The results indicate that for PTFE flat materials within the P-band, the RTM transmittance measured by this frequency-domain method is closer to theoretical expectations, consistent with simulation results, and exhibits an amplitude error not exceeding 0.03 dB and a phase error not exceeding 0.35° compared to theoretical values. The method also exhibits good predictive capability for the transmittance of C-sandwich flat radomes. In conclusion, this method has successfully achieved precise measurement of the wave transmittance of small-sized flat RTM in the P-band, demonstrating its feasibility, accuracy, and broad applicability.

Key Words: microwave measurement; radar transparent material; principle of cross ratio invariance; transmittance; P-band

Received: 2024-12-25; **Revised:** 2025-02-13; **Accepted:** 2025-03-31

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20230018053004)