

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104253

宽频段雷达天线罩电厚度反射测试探头设计*

郭利强^{1,2} 王克先³ 陈 宁³ 宗 浩²

- (1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 电子测试技术重点实验室 青岛 266555;
2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266555;
3. 航空工业济南特种结构研究所 高性能电磁窗航空科技重点实验室 济南 250023)

摘 要:在雷达天线罩电厚度反射测试中,针对测试探头与被测天线罩的失配反射限制测量范围,以及传统校准方法只适用于特定单一工作频率的问题,采用波导魔 T 和半星形截面的介质柱相结合,设计了一种消除波导探头与天线罩外壁失配影响的贴合式探头,优化提升了测试信号相位与天线罩插入相位变化的映射线性度,无需校准即可实现宽频段测量。在 X 波段方波导 8~12 GHz 全频段范围内,探头对测试端口失配抑制可达 30 dB。利用该探头,可以方便地将反射测试信号转化为传输信号,而且仅通过简单的相位比对,即可获取天线罩电厚度信息,并可以直接实现不同工作频率下的测试。

关键词: 天线罩;电厚度;反射测试;魔 T;测试探头

中图分类号: TM931 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of electric thickness reflex test probe for wideband radar radome

Guo Liqiang^{1,2} Wang Kexian³ Chen Ning³ Zong Hao²

- (1. The 41st institute of CETC, Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China;
2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China;
3. The Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite AVIC, The Aeronautical Science Key Lab for High Performance Electromagnetic Windows, Ji'nan 250023, China)

Abstract: Aiming at the issues such as measurement ability limitation caused by the mismatch between the test probe and the radome under test, as well as the traditional calibration methods apply only for a particular single operating frequency, one kind of radome electrical thickness reflection test probe is proposed innovatively by use of magic-T and half-star cross section prism. By which, the mismatch suppression can be up to 30 dB within 8~12 GHz full frequency range of X band, and the linearity of the phase mapping between the test signal and insertion phase difference of radome is optimized, and with no calibration required. Using this probe, the reflection test signal can be easily converted into transmission signal, the thickness information of the radome can be obtained by simple phase comparison, and the probe can be used at different operating frequencies at same time.

Keywords: radome; electrical thickness; reflex test; magic-T; test probe

0 引 言

天线罩是保护天线系统正常工作的“电磁窗”^[1],在保证天线免受外部环境影响的同时,还要具有良好的电磁波穿透性。天线罩对电磁波传输相位扰动的局部不理

想,就有可能严重影响天线辐射方向图形状甚至主瓣指向,降低雷达、通信等电子系统的整体性能,需要在天线罩的设计制造中进行测量控制^[2]。天线罩对传输相位的影响,体现为同样几何厚度下,电磁波穿越不同介质材料制作的罩体的波数不同,即电厚度不同。

天线罩电厚度测量主要包括透射测试和反射测试两

种方法^[3],而天线罩由于制造工艺原因不能在内部放置测试天线时,则只能采用反射测试方法^[4-6]。常用的方法是将微波测试探头直接贴合在天线罩壳体的外表面上,将电磁波辐射透入天线罩,经放置在内表面的共形反射面反射回探头,利用探头测量得到反射系数相位,获得天线罩电厚度信息。

天线罩的贴合式反射测量有效保证了测量电路的距离精度和测量面积分辨率^[3,7],但是也存在测试探头与天线罩失配而导致的外表面反射干扰测试的问题,体现为反射系数相位与电厚度呈现复杂的非线性关系,甚至出现非单调性区域而无法测量^[3,8]。

通过渐变介质填充或调谐补偿等适当的探头设计,可以在特定工作频率下实现探头与天线罩的匹配,得到反射系数相位与天线罩电厚度的线性映射关系^[8-11],但仍然难以解决宽频段雷达天线罩的多频点或者宽频带测量问题。本文提出一种半星形截面的介质负载与魔 T 相结合的反射测试探头结构设计^[12],无需调节即可在全频段内有效消除天线罩外表面反射影响,并将反射系数相位测量转化为传输系数相位测量,通过简单的相位比较即可实现电厚度信息测量^[13-18],有效解决了宽频段雷达天线罩电厚度测量瓶颈。

1 电厚度反射测试失配分析

电厚度定义为任意测试入射角下,在天线罩介质层法线方向上的波数^[19],一个波数对应于 2π 的电磁波传输相位延迟,也用插入相位变化或插入相位延迟(insertion phase delay, IPD),表达:

$$\varphi_{\text{IPD}} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta} \quad (1)$$

式中: d 为天线罩的几何厚度; λ 为电磁波的真空波长; ε_r 为天线罩材料的相对介电常数; θ 为入射角。对于贴合式反射测试,入射角为 0,式(1)简化为:

$$\varphi_{\text{IPD}} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r} \quad (2)$$

在确定的介质材料下,电厚度正比于几何厚度。理想的反射测试应使反射系数的相位与 φ_{IPD} 成线性关系,即与天线罩厚度 d 呈线性关系。

在以往的贴合式反射测量中,近似认为测试信号从探头穿越进出天线罩后不会产生强度的变化,而只是在界面产生固定的相位跳变^[4-5],因此反射系数的相位变化与天线罩的电厚度线性相关,如图 1 所示。

然而,由于从测量探头到天线罩的传输结构和介质的双重突变,探头输出的测试激励信号将分解为端口直接反射信号和进入天线罩后的反射信号两部分,探头测量得到的反射系数是二者叠加形成的^[8,10],如图 2 所示。

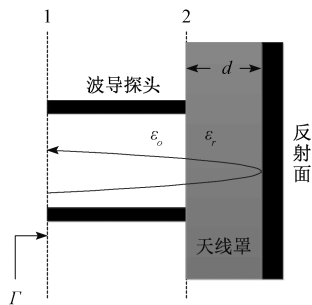


图 1 反射测试信号流近似

Fig. 1 Approximation of reflection test signal flow

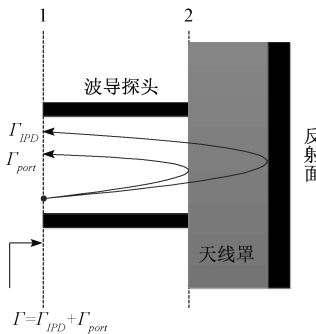


图 2 反射系数的分解

Fig. 2 Decomposition of reflection coefficient

$$\Gamma = (S_{11} + S_{12}S_{21}D_{11}) - \frac{D_{12}D_{21}S_{12}S_{21}}{1 + D_{22}} =$$

$$\Gamma_{\text{port}} + \Gamma_{\text{IPD}} \approx \Gamma_{\text{port}} + A_{\text{IPD}} e^{-j2\varphi_{\text{IPD}}} \quad (3)$$

其中, Γ_{IPD} 与被测 IPD 相关,不考虑探头近场效应以及天线罩内部的多次反射,其相位变化等于天线罩电厚度变化的两倍; Γ_{port} 与 IPD 无关,但叠加在 Γ_{IPD} 上会导致反射系数 Γ 的相位与天线罩电厚度映射呈现非线性。特别的,当 $|\Gamma_{\text{port}}| > |\Gamma_{\text{IPD}}|$ 时,甚至出现非单调映射,导致测量失效。

2 魔 T 测量探头设计

对于特定的测试端口和被测天线罩材料,失配造成的 Γ_{port} 是确定的,相当于测量无内部反射的无限大厚度天线罩得到的反射系数。如果建立一路补偿信号抵消 Γ_{port} ,就可以实现只测量 Γ_{IPD} 效果。

为此,以波导魔 T 为核心设计了一种新型反射测量探头,如图 3 所示。用魔 T 的一个对称臂作为测试端口,记为端面 2;另一个对称臂用于提供抵消信号,记为端面 3;“和”端口用于测试信号输入,记为端面 1;“差”端口作为输出端口,记为端面 4。

记魔 T 的四端口散射系数矩阵为 $[s_{ij}]$,对于良好设

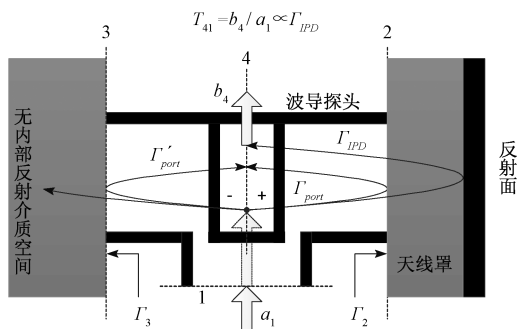


图 3 魔 T 反射探头

Fig. 3 Magic-T reflection probe

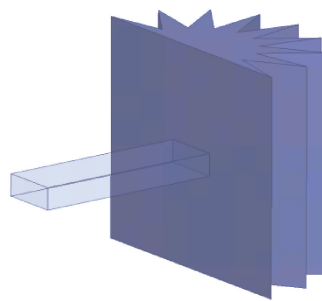


图 4 半星形截面介质柱体

Fig. 4 Semi-star cross section dielectric prism

计的魔 T, 有 $s_{14} = s_{41} \rightarrow 0, s_{23} = s_{32} \rightarrow 0, s_{12} = s_{13}, s_{21} = s_{31}, s_{42} = -s_{43}, s_{24} = -s_{34}$ 的特点, 并可以有意识地设计为 $s_{ii} \rightarrow 0, \Gamma_4 \rightarrow 0$, 有:

$$T_{41} = \frac{b_4}{a_1} = s_{21}s_{42}(\Gamma_{port} + \Gamma_{IPD} - \Gamma'_{port}) = T_{port} + T_{IPD} - T'_{port} \quad (5)$$

显然, 魔 T 探头可以将测试反射系数分量等比例地转化为从端口 1 到端口 4 的传输系数, 并保留了各自的相位线性关系。如果端面 3 能够提供与被测天线罩同样的接触界面反射, 并且不产生其它的反射信号, 则有 $T_{port} = T'_{port}$, 测量端口的失配信号将自然抵消, 并且不受限于工作频率, 从而 $T_{41} \propto T_{IPD}$, 只与含有 IPD 信息的反射系数 Γ_{IPD} 线性相关。这样, 不但避免了端口失配的影响, 而且消除了反射信号分离的方向性难题, 将反射系数测量转化为更容易实现的传输系数测量。

3 等效反射体设计

利用魔 T 进行天线罩 IPD 反射测量, 将失配影响问题转化成了图 3 中端面 3 的反射系数生成问题。可以想象, 与天线罩相同材料的无限大介质板可以满足这个要求, 但工程应用中并不实用。

文献[10]给出的半星形截面介质柱体, 可以作为半空间无限大介质板的有效工程替代。等效体与天线罩壳体采用相同介质材料, 如图 4 所示, 同时用半透明色绘制出了测试探头波导管的对接方式。星形齿形成的渐变过渡, 实现了介质中的电磁波向周围空间的无反射耗散, 从而大幅度降低内部反射信号。

对于半星形截面柱体与介质半空间的等效性, 本文利用 ANSYS HFSS (V19.2) 进行了高频结构仿真验证, 模型剖面如图 5 所示。将波导管右端口紧贴在半空间介质板 (图 5(a)) 或半星形截面体 (图 5(b)) 上, 仿真软件可以直接根据模型的空间结构给出左端口看入的反射系数。

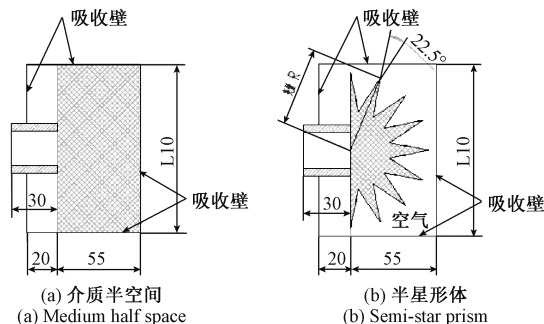


图 5 反射系数比对仿真模型

Fig. 5 Simulation model for reflection coefficient comparison

以 X 波段测试为例, 设置天线罩常用的介质材料, 相对介电常数为 3.2, 取星形截面的半径 $R = 50 \text{ mm}$, 在 8~12 GHz 全波导频率范围仿真得到的复反射系数如图 6 (a) 所示, 显然, 半星形体高质量地等效了介质半空间的端口反射效应。图 6(b) 进一步给出了反射系数矢量误差幅度随频率的分布, 均在 0.015 之下, 几乎全频段的抵消效果都可以达到 30 dB 以上。

固定常用测试频率如 9.37 GHz, 在 30~50 mm 改变星形体半径, 也可以仿真得到等效误差约为 0.015^[10]。

4 魔 T 探头性能验证

用图 4(b) 的半星形截面柱体代替图 3 中端口 3 的半介质空间, 可以数值仿真得到魔 T 测量探头的应用效果。仍然设介质材料介电常数为 3.2, 设置被测天线罩介质板厚度从 20 变化到 40 mm, 利用 ANSYS HFSS (V19.2) 在 8~12 GHz 全波导频段内仿真计算传输系数 T_{41} 的相位, 结果如图 7 所示。图 7 以介质板厚度为 20 mm 时的传输系数相位为参考进行了对齐。

可以看出, 对于每一个测量频率点, 传输系数相位都随介质板厚度的增加呈现出良好的线性滞后特性。同时看出, 对于同样厚度的介质板, 传输系数相位滞后也随着测试频率的增加而线性增加, 而且厚度越大, 斜率越大,

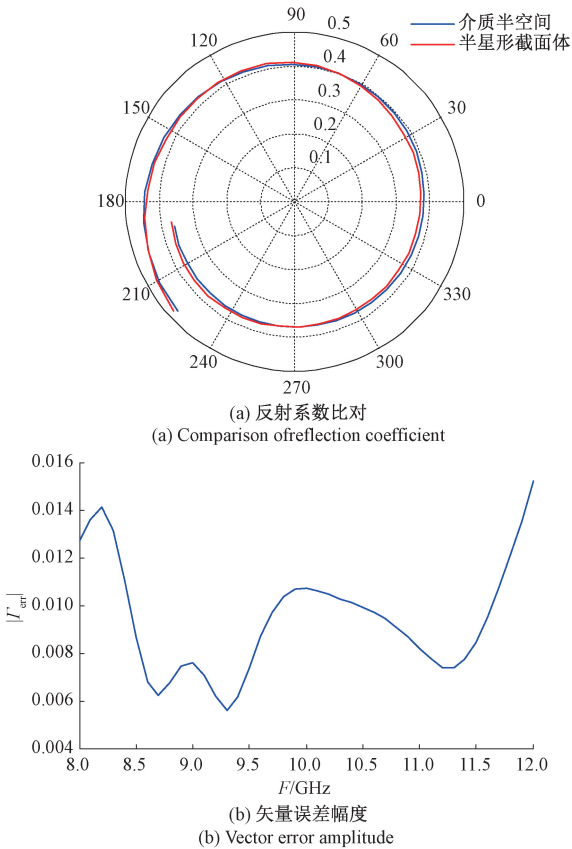


图 6 等效性分析对比
Fig. 6 Analysis and comparison of equivalence

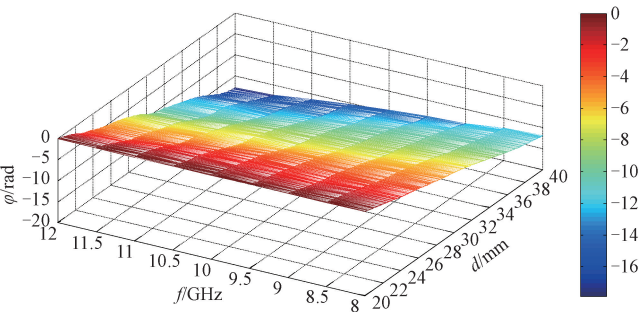


图 7 魔 T 测试探头的宽频段特性
Fig. 7 Broadband characteristics of magic T probe

与理论预期相符合。与文献[10]每次校准只能在一个特定频率点实现线性映射关系相比,基于魔 T 的 IPD 反射测量探头无需校准就可以在整个波导工作频段内建立线性映射关系,充分体现了宽频段适用性。

利用电科思仪公司研制的 3672C 型矢量网络分析仪,测量魔 T 从“和”端口到“差”端口的传输系数 T_{41} ,实验验证 IPD 测试效果,实验装置如图 8 所示。

将魔 T 测试端口贴合在天线罩介质板上,介质板背面敷设金属膜;在介质板与测试端口之间插入介质片,每

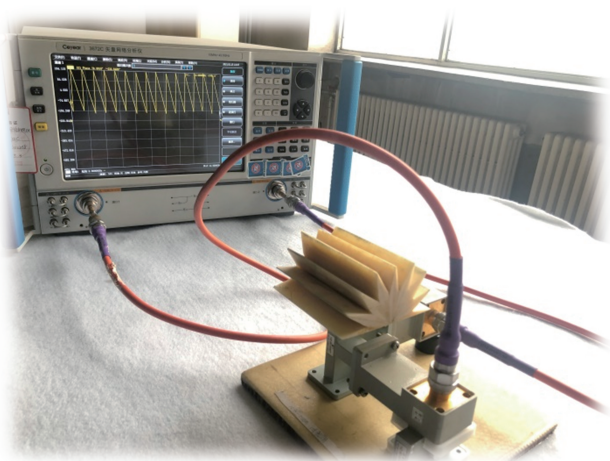


图 8 魔 T 测试探头实测验证
Fig. 8 Experimental verification of magic-T probe

层约 0.6 mm,等效改变天线罩电厚度。在 9.37 GHz 工作频率,测量由魔 T“和”端口到“差”端口的传输系数,如图 9 所示。

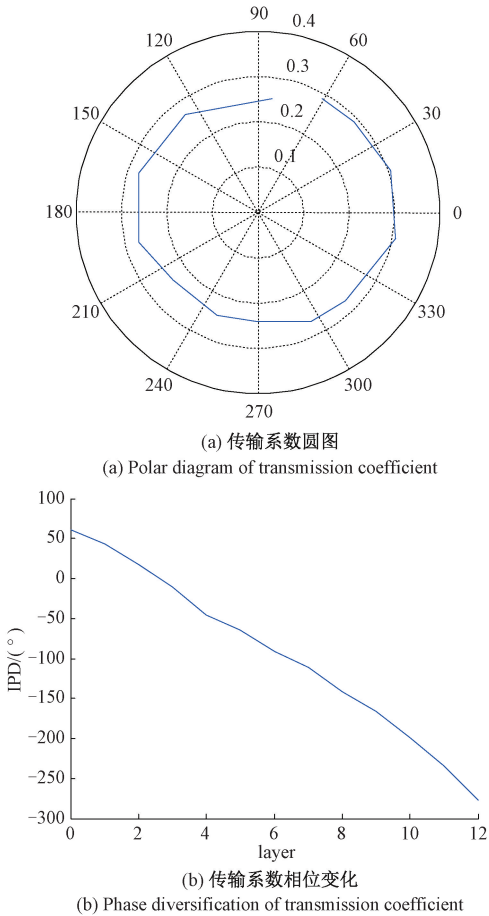


图 9 魔 T 测量探头实测数据
Fig. 9 Measured data of magic-T probe

显然,相位变化与介质片导致的介质板厚度变化保持了很好的线性映射关系。在9~10 GHz 频率范围内的实测结果如图10所示,充分体现出传输系数相位随介质板厚度和测试频率的线性变化关系,与图7给出的仿真结果一致,进一步验证了魔T探头的宽频段测试有效性,可以用传输系数相位测量代替反射系数测量,实现式(2)定义的天线罩电厚度测试。

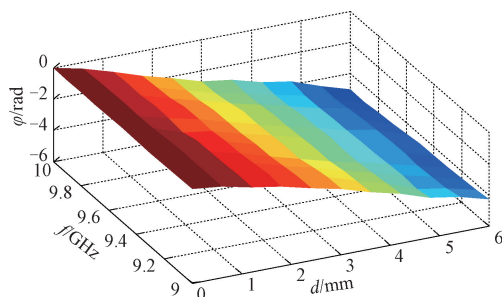


图10 魔T探头宽频段实测验证

Fig. 10 Broadband verification of magic T probe

5 结 论

本文利用波导魔T将天线罩电厚度测试探头的反射信号转化为传输信号,极大地方便了信号的分离提取;设计提出的半空间等效负载,巧妙抵消了测试端口失配影响,实现了检测信号相位与被测电厚度信息的线性映射。借助魔T和半球形介质柱体组合形成的测试探头,使用简单的相位比较装置就可以实现雷达天线罩电厚度的反射测量。由于魔T结构的对称性,探头对测试端口的失配抵消作用与工作频率无关,具备宽频带测试应用优势。

高频结构仿真和实物测试均验证了测试探头的有效性,特别是宽频段测试适用性。基于魔T的IPD反射探头结构简单,无需额外校准、使用方便,测试数据线性度好,并且可以实现宽频段测试,方便了便携式IPD反射测试装置设计和雷达天线罩现场测试检验。利用魔T结构的对称性,只要能够精密控制相对距离^[20],测试探头可以不必紧密贴合在天线罩表面使用,对于生产线自动测试系统设计应用也具有很大的潜力。

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.
ZHANG M X, XUAN L X. The key technologies in designing and fabricating high performance radome[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(8): 13-18.
- [2] 张生芳, 郭东明, 贾振元, 等. 天线罩制造中的电厚度测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S4):

34-37.

ZHANG SH F, GUO D M, JIA ZH Y, et al. Measuring technology of electrical thickness in radome manufacture[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S4): 34-37.

- [3] 郭利强, 王克先, 冷朋. 天线罩插入相位变化测试方法的研究综述[J]. 测控技术, 2020, 39(11): 1-6, 12.

GUO L Q, WANG K X, LENG P. A review of the insertion phase difference measurement of radome[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(11): 1-6, 12.

- [4] 柴永伟, 王克先, 刘尚吉. 基于复反射系数法的介质结构功能厚度测量技术研究[J]. 科技视界, 2020(11): 39-41.

CHAI Y W, WANG K X, LIU SH J. Research on measuring technology of functional thickness of medium structure based on the method of complex reflection coefficient[J]. Science Technology Vision, 2020(11): 39-41.

- [5] 韦高, 许家栋, 温浩, 等. 一种测量天线罩微波电厚度的简便方法[J]. 微波学报, 2005, 21(4): 51-53.

WEI G, XU J D, WEN H, et al. A simple method for measuring the electrical thickness of radome reflection coefficients[J]. Journal of Microwaves, 2005, 21(4): 51-53.

- [6] 曾照勇, 赵立, 彭思平, 等. 导弹天线罩IPD测量仪研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1582-1586.

ZENG ZH Y, ZHAO L, PENG S P, et al. Research on IPD measuring instrument for missile radome[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1582-1586.

- [7] 王克先, 郭利强. 一种相位测试用曲面天线的设计与应用[J]. 微波学报, 2020, 36(6): 76-79.

WANG K X, GUO L Q. The design and application of phase test with curved opening antenna[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(6): 76-79.

- [8] 郭利强, 王克先, 柴永伟, 等. 一种基于介质填充的天线罩电厚度反射测试波导探头[J]. 微波学报, 2021, 37(1): 1-6.

GUO L Q, WANG K X, CHAI Y W, et al. A dielectric filling based waveguide probe for reflection measurement of electrical thickness of the radome[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(1): 1-6.

- [9] 郭利强, 吴强, 冷朋. 一种电厚度贴合式反射测试用介质填充波导探头设计方法[P]. 中国, CN201910737416.4, 2019.08.12.

GUO L Q, WU Q, LENG P. Design method of dielectric-filled waveguide probe for electric thickness

- fitting reflection type test [P]. China, CN201910737416.4, 2019.08.12.
- [10] 郭利强, 王克先, 付启航, 等. 天线罩电厚度反射测试探头失配补偿与校准[J]. 现代雷达, 2021, 43(3): 8-13.
- GUO L Q, WANG K X, FU Q H, et al. Compensation and calibration of probe mismatch for radome electrical thickness measurement [J]. Modern Radar, 2021, 43(3): 8-13.
- [11] 郭利强, 吴强, 冷朋. 一种可调节的电厚度贴合反射测试波导探头设计方法[P]. 中国, CN201910737423.4, 2019.08.12.
- GUO L Q, WU Q, LENG P. Design method of adjustable electric thickness fitting reflection test waveguide probe[P]. China, CN201910737423.4, 2019.08.12.
- [12] 郭利强, 吴强, 冷朋. 一种宽工作频段反射式电厚度测试方法[P]. 中国, CN201910737419.8, 2019.08.12.
- GUO L Q, WU Q, LENG P. Wide-working-frequency-band reflective electrical thickness test method [P]. China, CN201910737423.4, 2019.08.12.
- [13] 杜念文, 郭利强, 冷朋. 傅里叶展开技术在 IPD 测试仪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(S): 180-185.
- DU N W, GUO L Q, LENG P. Application of Fourier transform in IPD tester [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2005, 19(S): 180-185.
- [14] 杜念文, 郭利强. 傅里叶展开法测相位的误差分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(1): 15-19.
- DU N W, GUO L Q. Error analysis of phase measurement using Fourier transform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2007, 21(1): 15-19.
- [15] 田园, 郭利强. 插入相位延迟测试新方法[J]. 电子测量技术, 2007, 30(11): 118-129.
- TIAN Y, GUO L Q. New method of radome IPD tester[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(11): 118-129.
- [16] 徐从裕, 胡宗久, 杨雅茹, 等. 基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 180-186.
- XU C Y, HU Z J, YANG Y R, et al. Method of ultrasonic phase difference detection based on FFT and IFFT [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5): 180-186.
- [17] 彭钰钦, 涂亚庆, 杨辉跃. DFT 算法频率和相位差测量不确定度评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 17-22.
- PENG Y Q, TU Y Q, YANG H Y. Uncertainty evaluation of DFT frequency and phase difference measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 17-22.
- [18] 苏江涛, 郭庭铭, 杨保国, 等. 基于回波替代的毫米波矢量网络测试校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 77-84.
- SU J T, GUO T M, YANG B G, et al. Novel calibration method for mm-wave VNA measurement and calibration based on reverse signal substitution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 77-84.
- [19] 王克先, 王云香. 机载天线罩电厚度测量与校正方法[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2015.
- WANG K X, WANG Y X. Measurement and calibration methods for the electrical thickness of airborne radomes[S]. Beijing: AVIC Research Institute for Integrated Technology, 2015.
- [20] 房新蕊, 刘晓春, 王克先, 等. 天线罩电厚度测试系统试件安装定位精度检测方法[C]. 2019 年全国天线年会论文集. 北京: 中国电子学会, 2019: 1906-1908.
- FANG X R, LIU X CH, WANG K X, et al. The detection method of the installation and positioning accuracy of radome electrical thickness testing system test piece[C]. Proceedings of the 2019 National Antenna Conference. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2019: 1906-1908.

作者简介



郭利强, 1990 年于武汉大学获得学士学位, 1993 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 2008 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为中电科思仪科技股份有限公司首席专家, 研究员级高工, 主要研究方向为微波与电磁场技术、电子测试技术、自动测试技术。

E-mail: CETC41glq@sina.com

Guo Liqiang received his B. Sc. degree from Wuhan University in 1990, M. Sc. degree from Xidian University in 1993, and Ph. D. degree from Xidian University in 2008. Now he is a Chief Expert in Ceyear Technologies Co. Ltd. His main research interests include microwave and electromagnetic field technology, electronic testing technology, automatic testing technology.