文章编号：2095-4980(2026)01-0013-06

面向太赫兹频段的自动化测量与控制系统

王　正，曹浩一，王炜鹏，黄　林，曾泓鑫，张雅鑫
(电子科技大学 电子科学与工程学院，四川 成都 611731)

摘　要：太赫兹射频器件及通信系统典型工作带宽可达数GHz至数十GHz，频带内工作特性差异大，其性能测试面临诸多挑战。为此，本文提出一种面向太赫兹频段的自动化测量方法，设计了一种能够满足太赫兹射频器件与链路测试、信号处理算法测试、远距离的太赫兹信道测试、太赫兹天线远场测试等多种测试应用需求的通用化自动测试系统。测量结果表明，该系统能够高效、精准地完成上述多种太赫兹频段的测试内容，不仅提升了测试效率，还为相关研究和应用提供了可靠的数据支持。

关键词：太赫兹射频器件；自动化测量；太赫兹通信系统；测试平台
中图分类号：TN98；TN928　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024509

Automated measurement and control system for terahertz band

WANG Zheng，CAO Haoyi，WANG Weipeng，HUANG Lin，ZENG Hongxin，ZHANG Yaxin
(School of Electronic Science and Engineering，University of Electronic Science and Technology of China，Chengdu Sichuan 611731，China)

Abstract: Terahertz Radio Frequency(RF) devices and communication systems typically exhibit operating bandwidths ranging from several GHz to tens of GHz, with substantial variations in operating characteristics across the band, presenting numerous challenges for performance testing. To address this, this paper proposes an automated measurement method for the terahertz band and designs a versatile automated test system capable of meeting diverse testing requirements, including terahertz RF device and link testing, signal processing algorithm testing, long-distance terahertz channel measurement, and terahertz antenna far-field testing. Measurement results demonstrate that the system can efficiently and accurately complete these various terahertz band testing tasks, not only improving testing efficiency but also providing reliable data support for related research and applications.

Keywords: terahertz radio frequency device; automated measurement; terahertz communication system; testbed

随着电子通信技术的飞速进步，5G、物联网等新兴通信技术的兴起，对射频器件和系统的性能要求越来越高[1]。在微波和毫米波频段，特别是在太赫兹频段(100 GHz以上)，射频设备的性能测试面临诸多挑战：太赫兹射频器件及通信系统普遍具有数GHz至数十GHz的工作带宽[2]，由于太赫兹波长短，太赫兹射频器件受加工精确度的影响大，导致工作频带内射频参数特性波动大[3-4]；射频测量的指标繁多，其测量规模十分庞大，因此需要一种高测试效率、低测试成本与误差的测量技术；此外，对于太赫兹通信系统中涉及的信道[5]、大规模超高速信号处理算法等方面的测试与验证也存在远距离测试的需求[6]。

为此，本文提出一种面向太赫兹频段的自动化测量与控制方法，设计了一种能够满足多种测试与优化应用需求的通用化自动测量与控制系统。该系统包括桌面自动化测量和远程自动化测量两种架构，结合射频仪器和数字信号测试设备，能够高效地完成太赫兹射频器件、通信系统以及信道等各类测试任务。

收稿日期：2024-08-22；**修回日期：**2024-12-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61931006；62101111；82071940；61921002；62301112；62305051；62331015)
引用格式：王正,曹浩一,王炜鹏,等. 面向太赫兹频段的自动化测量与控制系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2026,24(1):13-18. DOI:10.11805/TKYDA2024509.
Citation format: WANG Zheng,CAO Haoyi,WANG Weipeng,et al. Automated measurement and control system for terahertz band[J]. Journal of Terahertz Science and Electroinc Information Technolgy, 2026,24(1):13-18. DOI:10.11805/TKYDA2024509.

1 自动化测量与控制系统

1.1 概述

为满足待测对象从射频器件到集成模块再到整体系统的射频性能和超高速数字信号的测试需求，硬件测试平台采用测量仪器与模块化控制设备，可满足多种指标的射频测试与数字信号测试需求；软件平台基于Matlab平台开发，实现射频仪器控制、数据采集与处理、数据可视化与存储等功能。

自动化测量与控制系统包括桌面自动化测量和远程自动化测量两种架构，如图1所示。

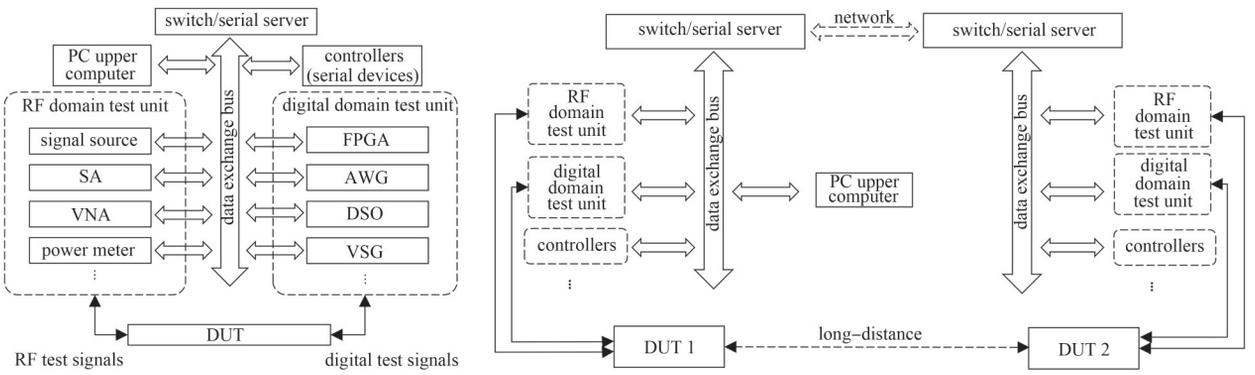


Fig.1 Architecture diagram for automated measurement

图1 自动化测量架构图

1.2 硬件架构

桌面自动化测量架构中，测量设备包括射频信号源(RF signal source)、频谱分析仪(Spectrum Analyzer，SA)、矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer，VNA)、功率计等，通过以太网交换机实现仪器之间的数据交换和控制。同时还包括现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array，FPGA)、任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator，AWG)、矢量信号源(Vector Signal Generator，VSG)、数字示波器(Digital Storage Oscilloscope，DSO)等数字信号测试设备，用于测量待测对象的数字信号响应。此外，还连接了云台、转台等运动控制设备，通过串口服务器(serial server)控制这些设备。上位机软件运行在PC端，利用Matlab平台的上位机实现仪器控制、数据采集、处理、可视化等功能。该架构通过模块化设计，能够灵活组合各类仪器设备，满足不同测试应用的需求。同时，网络和串口接口的统一控制，大幅提高了系统的可扩展性和兼容性。

远程自动化测量架构在桌面架构的基础上，增加了远程控制和监测的功能。通过组网设备将上位机软件与多个远程测量单元连接，实现远程控制和数据传输。在待测试远端，除了测量设备还包括云台、转台等运动控制设备，可对远端设备进行远程操控。远程监测功能可实时查看待测对象的测试状态和测量数据。

1.3 测试仪器设备

上述两种自动化测试系统架构涵盖了多种测量仪器与设备，利用可编程仪器标准命令接口(Standard Commands for Programmable Instruments，SCPI)协议，能够高效控制各类主流测试仪器，包括是德科技(Keysight)、罗德与施瓦茨(Rohde & Schwarz)、中电科思仪(Ceyear)和普源科技(RIGOL)等品牌的仪器设备。此外，测试系统还具有较强的灵活性，能够通过相应的设备命令控制多种非标准仪器与设备，如VDI(Virginia Diodes Inc)的Erickson PM5B太赫兹功率计以及多种云台和转台伺服设备。

这种多样化的支持使测试系统的功能能够适应不同的应用场景。为清晰地了解这些功能，表1列出了文中测量系统应用中所使用的主要测试仪器设备参数。

1.4 上位机软件

上位机自动化测试软件主要基于Matlab平台开发，利用虚拟仪器软件结构(Virtual Instrument Software Architecture，VISA)库通过SCPI协议与各测量仪器进行通信和控制。Matlab作为上位机软件的选择，一方面得益于其强大的信号处理和分析能力，可充分利用Matlab的成熟算法库完成对数字信号以及测量结果的处理和分析。另一方面，Matlab提供了友好的可视化界面，便于操作和查看测试结果。该上位机软件根据软件系统工程的模块化设计方法，可根据不同的测试应用需求，灵活地进行功能配置和扩展。其主要功能包括：

1) 数据测试功能：通过 VISA 库控制各测量仪器，实现待测对象的射频信号或数字信号测量。
2) 控制与优化功能：通过测量模块与仪器的数据反馈，调整各项参数，实现对待测系统性能的优化。
3) 测量数据处理功能：对采集的原始测量数据进行处理和分析，包括数据校正、滤波、曲线拟合等。
4) 数据可视化功能：以图形化的方式展示测试结果，包括各类射频参数曲线、数字解调星座图等。
5) 原始数据存储功能：将测试过程中采集的原始数据保存至文件中，以便于后续分析和比对。

表1 主要测试仪器设备

Table 1 Main test instruments

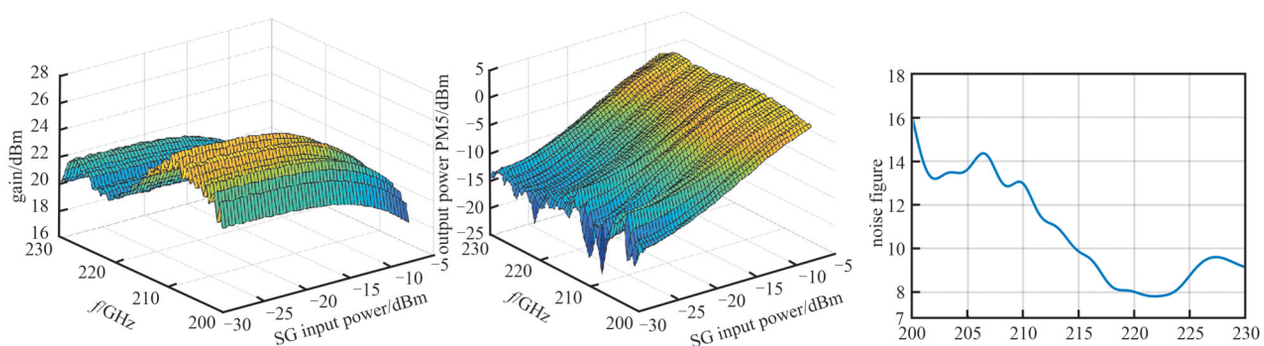
classification of instrument	model of the instrument	main indicators
signal generator	Keysight E8257D	range: 100 kHz~20 GHz; resolution: 0.001 Hz
signal generator	Rohde& Schwarz SMA100B	range: 100 kHz~40 GHz; resolution: 0.001 Hz
signal analyzer	Keysight N9030A	range: 3 Hz~50 GHz; amplitude accuracy:±0.19 dB
signal analyzer	Rohde& Schwarz FSV3044	range: 10 Hz~44 GHz; analysis bandwidth: 200 MHz
power meters	VDI Erickson PM5B	range: 75 GHz~3 THz; input power range: 1 μW~200 mW
DC power supply	RIGOL DP932E	programming resolution: 10 mV/10 mA; response time＜50 μs
gimbal	ZK-BY020W-G	accuracy: 0.01°; scanning range: 0~360°(azimuth), ±45°(elevation)

2　自动化测量系统应用与结果

2.1　自动化测量应用

基于上述自动化测量与控制系统，开展以下几类太赫兹频段测试应用：

1) 太赫兹射频器件链路测试：通过使用射频信号源、频谱分析仪、功率计等设备，对太赫兹射频器件的关键参数如增益、噪声系数、输出功率等进行自动化测量。通过桌面自动化测量系统，测量了一只 220 GHz 频段的太赫兹低噪声放大器。在 200~230 GHz 频段、–30~–8 dBm 工作条件下，通过自动化测量系统，获取了其详细的输入输出特性曲线和噪声系数参数，如图 2 所示。对于输入输出特性的频率–功率三维特征，系统完成了 3 416 个采样点的测量，整个过程仅耗时 5 min。



(a) characterization of gain　(b) characterization of input and output　(c) noise figure

Fig.2 Automated measurements of a terahertz low-noise amplifier

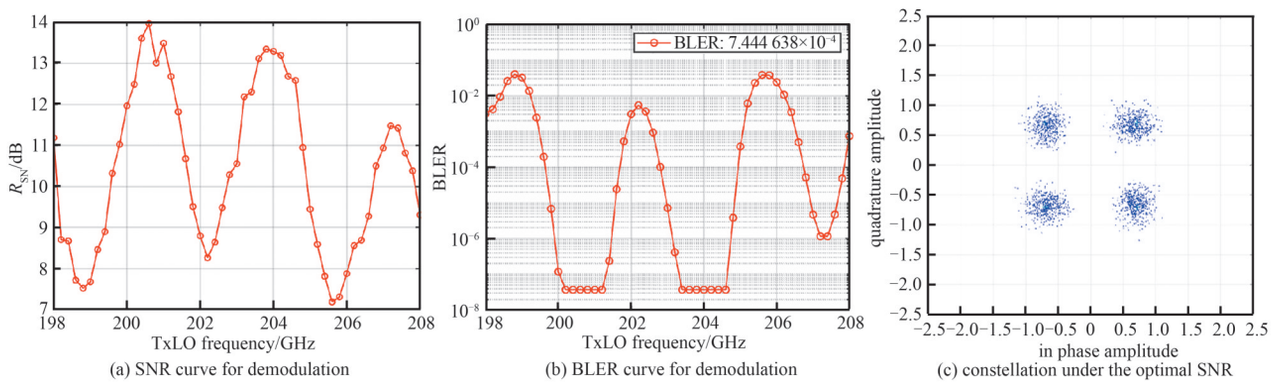
图 2　太赫兹低噪声放大器的自动化测量结果

这种全面、高效率的自动化测试方法，可很好地评估太赫兹射频器件的性能。根据测量数据，建立了该低噪声放大器的拟合输出表征模型，为后续的器件优化和系统设计提供了重要依据。

2) 太赫兹通信系统远距离测试：利用 FPGA 或矢量信号源和实时示波器对太赫兹通信系统的基带信号处理算法、调制解调性能等进行测试验证。该系统支持远距离测试，为太赫兹通信系统的开发和优化提供便捷有效的验证条件。

利用远程自动化测量系统在 1 km 距离下对一款工作在 200 GHz 频段的太赫兹发射机和接收机进行了部分性能测量与优化工作，结果如图 3 所示。

在射频测试中，上位机通过远程测量系统控制射频信号源和程控电源，调整收发机的工作频点和状态，根据接收端测量的载噪比作为反馈，优化选择出 198~208 GHz 的合适射频工作范围。在数字信号测试中，远程测量系统控制发射端 FPGA 产生带宽 800 MHz 的正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying，QPSK)调制信号，并获取接收端 FPGA 的解调结果，测量不同射频状态下的解调性能。通过这种自动化测试方法，最终确定了该套太赫兹通信系统在 1 km 距离下的正常工作范围。图 3(a)~(b)展示了不同射频条件下的解调性能信噪比(Signal to Noise Ratio，SNR)和误块率(Block Error Rate，BLER)变化，图 3(c)为最佳信噪比条件下的解调星座图。



(a) SNR curve for demodulation (b) BLER curve for demodulation (c) constellation under the optimal SNR

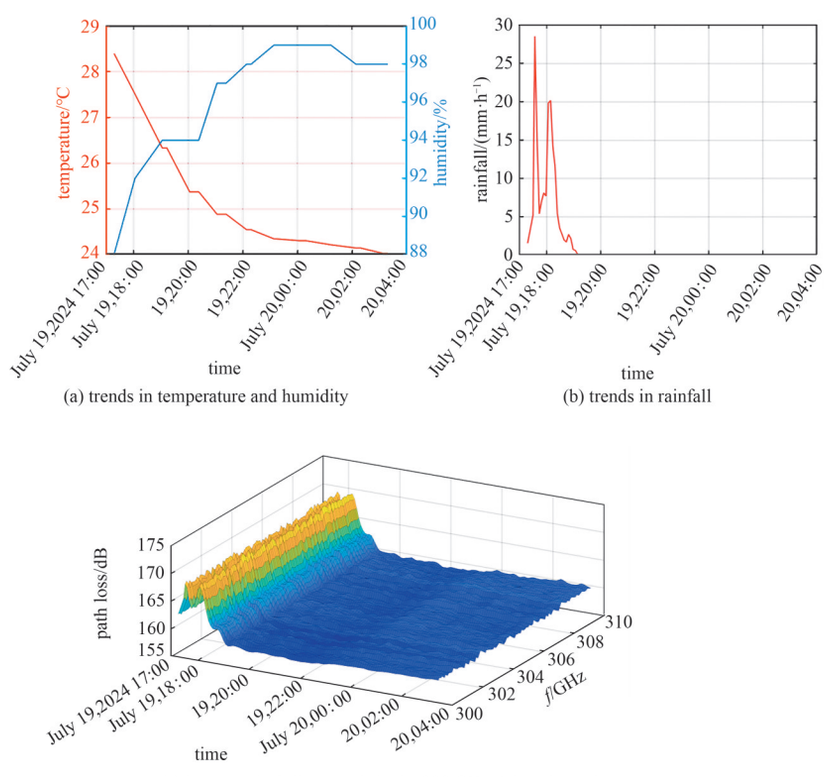
Fig.3 Results of automated measurements over long distances for terahertz communication systems

图3 太赫兹通信系统远距离自动化测量结果

基于远程自动化测量系统的方法，可以评估太赫兹收发机的关键性能指标，如射频特性、数字解调性能等，为系统优化设计提供验证与指导。

3) 太赫兹信道测试：通过使用已知性能的射频前端设备，对不同气象条件下远距离的太赫兹信道参数大尺度进行远距离自动化测量。

如图4所示，利用远程自动化测量系统可监测300~310 GHz频段、收发端相距1 km、不同气象条件下太赫兹信道的大尺度衰落特征。图4(a)~(b)反映了测试期间温度、湿度和降雨量的实时变化情况，图4(c)展现了经过暴雨天气时，由于太赫兹频段对水汽的敏感性很高，太赫兹路径损耗发生的剧烈变化。



(a) trends in temperature and humidity (b) trends in rainfall

(c) large-scale fading trends in the 300 GHz ,1 km channel

Fig.4 Automated measurement results of 300 GHz terahertz channel at 1 km distance

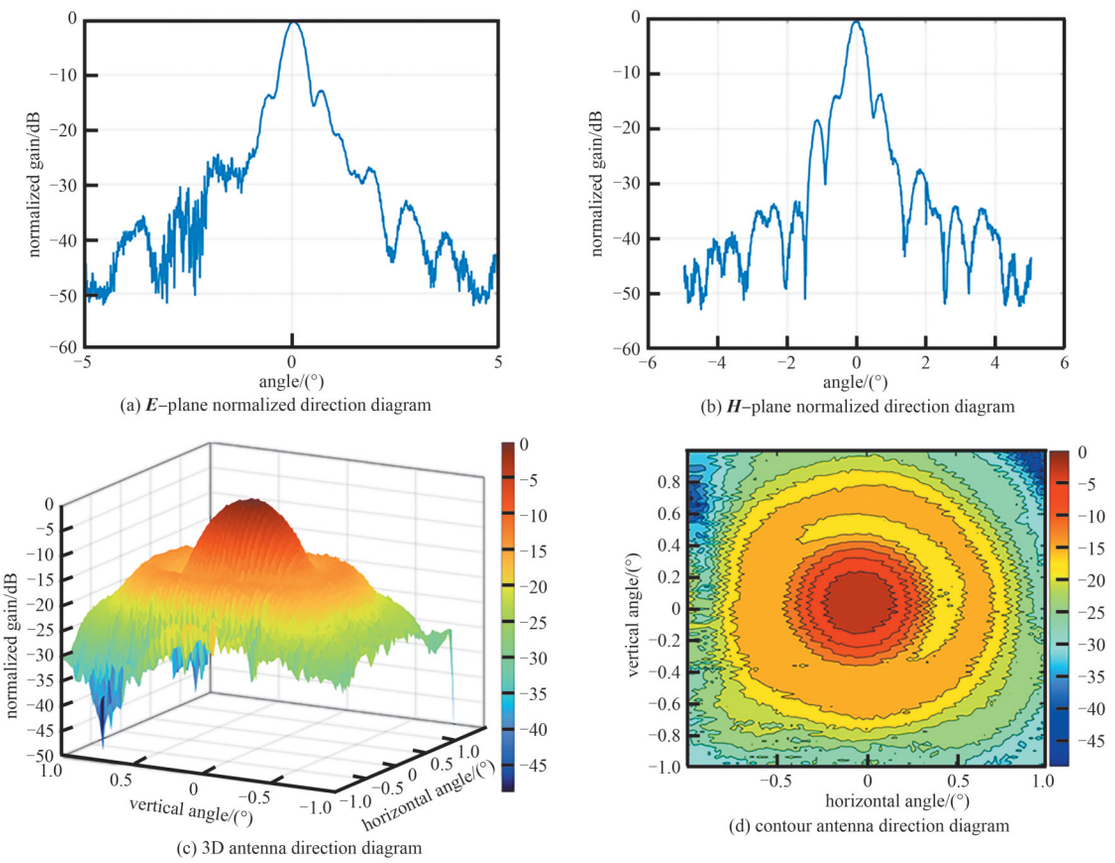
图4 1 km 距离下,300 GHz太赫兹信道自动化测量结果

通过分析温度、湿度、降雨量等气象参数与太赫兹路径损耗之间的关系，可以验证和优化太赫兹大气衰减和雨衰等相关传播模型。这种基于远程自动化测量系统的方法，可以长期连续监测太赫兹信道在不同气象条件下的大尺度衰落特性，获取大量的实测数据，为理论模型的建立和验证提供可靠的依据。

4) 太赫兹天线远场测试：结合云台、转台等运动控制设备，对太赫兹天线进行远场自动化测试，评估天线的辐射特性。

通过远程自动化测量系统，在 1 km 距离下对一款 140 mm 口径、增益为 50 dBi@300 GHz 的自行设计加工的卡塞格伦天线进行远场方向图测试，获取了–5°~5°范围内天线的 ***E*** 面和 ***H*** 面的归一化方向性系数，如图 5 所示。为提高测试精确度，以 0.02°为扫描步进，对俯仰角±1°和水平角±1°，共计 10 201 个采样点位置进行了细致的角度测试，整个测试过程耗时 20 min。

这种远程自动化测量方法，可以全面、高效地评估太赫兹天线的辐射特性，测试数据为后续天线优化设计提供了重要的参考依据。



(a) ***E***–plane normalized direction diagram　(b) ***H***–plane normalized direction diagram

(c) 3D antenna direction diagram　(d) contour antenna direction diagram

Fig.5 Automated measurements of the directional map of the terahertz Cassegrain antenna

图 5　太赫兹卡塞格伦天线方向图的自动化测量结果

2.2 自动化测量系统优势

针对太赫兹频段的射频器件、模块和系统测试任务，传统测量方式依赖操作人员的测试经验，手动控制测试设备逐一调节仪器参数设置，并记录每个参数下的性能数据。依靠操作人员手动记录测量数据，容易导致人为错误，同时也使数据处理效率低下。此外，传统测试设备通常只能执行特定功能，无法同时进行多项测试和批量测试，同样影响测试效率。

与传统的测量技术相比，本文提出的自动化测试系统具有显著优势。首先，自动化系统通过减少人工干预，显著提高了测试效率和数据采集的准确性，能够在短时间内完成大量的测量任务；其次，系统的灵活性和可扩展性使其能够适应多种应用场景，从太赫兹射频器件的链路测试到远距离通信系统的性能评估，均能提供有效的解决方案。此外，基于远程控制的自动化测量方法，可在长距离条件下稳定运行，减少人为因素对测试结果的影响，确保数据的可靠性和一致性。系统测试结果的实时反馈使在测试过程中能够即时调整和优化测试条件，进一步提高了测试的精确度和有效性。这些优势使本文的自动化测试系统在现代太赫兹技术的研究和应用中，表现出更高的效率和更强的适应能力。由于篇幅有限，本文仅展现几种典型的太赫兹测试应用，表 2 总结了该自动化测量与控制系统的相关测试能力。

表2 自动化测量系统测试能力总结

Table2 Summary of test capabilities for automated measurement systems

test category	parameter	involved testing equipment	description
terahertz RF device test	gain/loss, *S*-parameter, output power, IIP3, efficiency, 1 dB compressed point, etc.	VNA, SA, signal source, power meter, DC supply	automated measurement of key parameters, obtaining input-output characteristics of terahertz component such as mixer, frequency doubler and amplifier
terahertz RF link test	output power, sensitivity, NF, SNR, dynamic range, etc.	SA, signal source, noise cource, power meter	testing the cascaded performance of terahertz transmitter links or receiver links and frequency doubler links
terahertz system test	SNR, BLER, sensitivity, dynamic range operating frequency, etc.	FPGA, VSG, AWG, DSO, SA, signal source	verification of baseband signal processing algorithms and modulation performance, optimization of RF operating range
terahertz channel test	path loss, frequency response, delay spread, *K*-factor, etc.	gimbal, turntable, VNA, SA, signal source, power meter	monitoring fading characteristics of terahertz channels indoor or outdoor
terahertz antenna test	gain, directionality, etc.	gimbal, turntable, SA, signal source	evaluation of antenna radiation characteristics, obtaining normalized directionality coefficients for ***E*** and ***H*** planes

3 结论

本文提出了一种面向太赫兹频段的自动化测量方法，设计了一种通用的自动化测试系统。该系统包括桌面自动化测量和远程自动化测量两种架构，采用模块化硬件设计，通过网络交换机实现仪器控制与数据交换，结合射频仪器和数字信号测试设备，能够满足太赫兹射频器件、通信系统以及信道等多种测试应用需求。上位机软件采用Matlab平台，利用VISA库通过SCPI协议控制测量仪器，实现数据测试、处理、可视化及存储等功能。

基于该自动化测试系统，完成了太赫兹射频器件的链路测试、基带信号处理算法测试、太赫兹通信系统的远距离测试、远距离的太赫兹信道测试、太赫兹天线远场测试等。测量结果表明该自动化测试系统能够高效、准确地完成各类太赫兹频段测试任务，验证了该系统的通用性和实用性。

参考文献：

[1] 张蕾,傅海鹏,孟凡易,等. 硅基太赫兹技术及未来趋势[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(5):753-768. (ZHANG Lei, FU Haipeng, MENG Fanyi, et al. Silicon-based terahertz technologies and future trends[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(5):753-768.) DOI:10.11805/TKYDA2021252.

[2] 曹浩一,董亚洲,王正,等. 太赫兹通信芯片关键技术与系统发展浅析[J]. 数据与计算发展前沿, 2021,3(5):82-97. (CAO Haoyi, DONG Yazhou, WANG Zheng, et al. Analysis of key technology of terahertz communication chip and development of communication system[J]. Frontiers of Data and Computing, 2021,3(5):82-97.) DOI:10.11871/jfdc.issn.2096-742X.2021.05.006.

[3] 卢旭阳,毛军发,吴林晟,等. 太赫兹射频器件与集成技术研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(4):393-436. (LU Xunyan,MAO Junfa,WU Linsheng,et al. Research on terahertz radio frequency devices and integrated technologies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(4):393-436.) DOI:10.11805/TKYDA2023045.

[4] MITTLEMAN D M. Perspective:terahertz science and technology[J]. Journal of Applied Physics, 2017,122(23):230901. DOI:10.1063/1.5007683. DOI:10.1063/1.5007683.

[5] HAN Chong,WANG Yiqin,LI Yuanbo,et al. Terahertz wireless channels:a holistic survey on measurement,modeling,and analysis[J]. IEEE Communications Surveys&Tutorials, 2022,24(3):1670-1707. DOI:10.1109/COMST.2022.3182539.

[6] NAGATSUMA T,HORIGUCHI S,MINAMIKATA Y,et al. Terahertz wireless communications based on photonics technologies[J]. Optics Express, 2013,21(20):23736-23747. DOI:10.1364/OE.21.023736.

作者简介：

王 正(1999-)，男，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹通信系统及信道技术研究.email:zhengwang_uestc@163.com.

曹浩一(2000-)，男，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹通信技术.

王炜鹏(1999-)，男，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹通信技术.

黄 林(1987-)，男，博士，副教授，主要研究方向为微波热声成像技术及太赫兹高速通信技术.

曾泓鑫(1990-)，男，博士，副教授，主要研究方向为太赫兹超材料平面阵列器件及通信技术.

张雅鑫(1980-)，男，博士，教授，主要研究方向为太赫兹超构集成电路射频芯片和器件技术.