

基于全波形计量的毫米波数字调制 OTA 测试技术

张亦弛¹ 张欣¹ 刘潇¹ 田飞¹ 张子龙¹ 赵巍¹

(1.中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 针对当前 OTA 测试方案无法模拟通信系统的真实工作状态、OTA 测量技术不能有效解决数字调制溯源的关键技术问题, 本案例提出了基于频域全波形计量的天线系统 OTA 测试新方法, 面向典型的“毫米波 5G 频段、宽带数字调制”应用场景, 采用毫米波数字调制信号替代传统的单频点测试激励, 形成基于 EVM 参数的通信质量测评方法, 表征天线系统在不同姿态下的传输特性。

关键词 全波形计量; 毫米波数字调制; OTA; 天线测试

中图分类号: TN98

文献标识码: A

Millimeter-wave Digital Modulation OTA Test Method based on Full Waveform Metrology

ZHANG Yichi, ZHANG Xin, LIU Xiao, TIAN Fei, ZHANG Zilong, ZHAO Wei

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Current over-the-air (OTA) test methods can neither simulate the realistic operation scenarios of communication systems or sub-systems, nor accomplish traceable measurements of digitally modulated signals. In response to these issues, this work presents a novel OTA test approach based on the frequency-domain measurement technique for full waveform metrology. Targeting typical "millimetre-wave 5G frequency band, broadband digital modulation" application scenarios, millimetre-wave digitally modulated signals are used to replace traditional continuous wave stimuli in this work, to develop an EVM-based test method for evaluating communication quality, so that the transmission characteristics of antenna systems in different postures can be characterized.

Keywords: full waveform metrology; millimeter-wave digital modulation; over-the-air; antenna test

1 背景介绍

随着 5G 移动通信技术的快速发展, 传统的微波段频谱资源逐渐无法满足未来应用需求。因此, 以 3GPP FR2 为代表的毫米波频段成为了重点开发对象, 从而充分利用其超宽的工作频段实现高速通信。考虑到毫米波 5G 的通信带宽将突破百 MHz 量级, 其对相应测量仪器设备的研发和校准提出了全新的挑战, 同时暴露了面向毫米波数字调制信号的测量标准及量值溯源体系缺失的关键问题。此外, 受限于传统的无线电计量技术和测量方法, 现有的天线测试和定标普遍基于单频点的连续波信号, 通过扫频实现宽带、稳态特性提取 (如增益、方向图), 但不具备表征宽带调制信号以及时域动态特性的能力, 无法提供面向通信质量测评

的量值参数（如 Error Vector Magnitude, EVM），难以满足“毫米波通信频段、宽带数字调制”应用场景下 5G 终端的测试评估和计量溯源需求。

为支撑本国仪器厂家的毫米波测试设备校准和量值溯源需求，美国国家标准与技术研究院（NIST）于 2015 年率先提出了全波形计量（Full Waveform Metrology）的发展理念，其采用基于取样示波器的时域测量方法，通过对被测 64-QAM 信号的波形向量整体进行表征，在业内首次实现了 EVM 参数向脉冲波形基准的量值溯源，填补了毫米波数字调制参数测量标准的技术空白^[1]。作为时域全波形计量研究成果的深化，NIST 于 2020 年发表了基于数字调制激励的毫米波天线测试研究^[2]，提出将被定标的毫米波数字调制信号作为空口参考（Over-The-Air Reference），应用到天线系统的 OTA 测试，给出调制域和数字域的性能分析和评价。可以看到，建立毫米波调制信号测量标准不仅能实现仪器层面的参数校准和量值溯源，还能够凭借技术优势形成先进的 5G OTA 测试解决方案，具有突出的研究意义和应用价值。

针对 NIST 时域方案在动态范围和测量复杂性方面的不足，中国计量科学研究院于 2020 年提出了毫米波数字调制信号的频域测量方法，可以通过“幅度谱+相位谱”表征实现等效的全波形计量^[3]，将 EVM 量值可溯源到国家功率和衰减基准。该频域方法基于矢量网络分析仪（Vector Network Analyzer, VNA）构建精确相位同步的测量系统，脱离于商用矢量信号发生器（Vector Signal Generator, VSG）和矢量信号分析仪（Vector Signal Analyzer, VSA），完成对毫米波 64-QAM 信号的自定义发生、频域定标、波形重构和数字解调，在测量不确定度达到 NIST 水平的同时，形成了我国主导的频域全波形计量方案。针对 NIST 在 OTA 测试方面的最新进展，中国计量科学研究院于 2021 年深入挖掘了频域全波形计量的技术潜力，凭借其在高动态范围和扫频测量方面的特有优势，初步实现了面向带内全双工天线系统表征的 OTA 测试应用^[4]。

针对当前 OTA 测试方案无法模拟通信终端或系统的真实工作状态、OTA 测量技术不能有效解决数字调制溯源的关键技术问题，本案例拟提出基于频域全波形计量的天线系统 OTA 测试新方法，面向典型的“毫米波 5G 频段、宽带数字调制”应用场景，形成“以全波形计量标准装置为基础的天线系统 OTA 测试平台”和“以 EVM 参数为核心的天线系统通信质量测评方法”，实现 EVM 量值溯源和对 5G 终端测评的扁平化量传。

2 基于频域全波形计量的毫米波数字调制 OTA 测试

2.1 频域全波形计量标准装置

本案例基于前期研究构建的频域全波形计量标准装置，如图 1 所示，由国产四端口矢量网络分析仪 Ceyear 3672E、本振信号发生器 Ceyear 1465L-V 和高速任意波形发生器 Tektronix AWG70002 构成。一方面脱离于商用 VSG 实现宽带数字调制中频信号的自定义发生以及毫米波上变频，另一方面借助矢量网络分析仪的同步接收机完成频域“幅度谱+相位谱”表征，脱离于商用 VSA 形成测量和解调分析能力，如图 2 所示。相应的同步信号发生、频域幅度和相位校准、时域波形重构和数字解调等方法详见文献[3]-[6]。

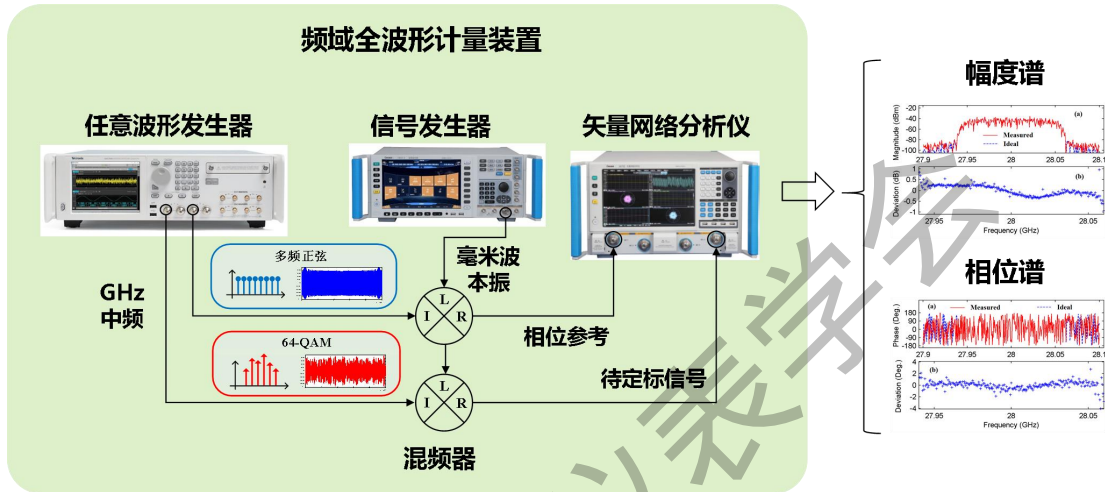


图 1. 基于矢量网络分析仪的频域全波形计量装置原理框图

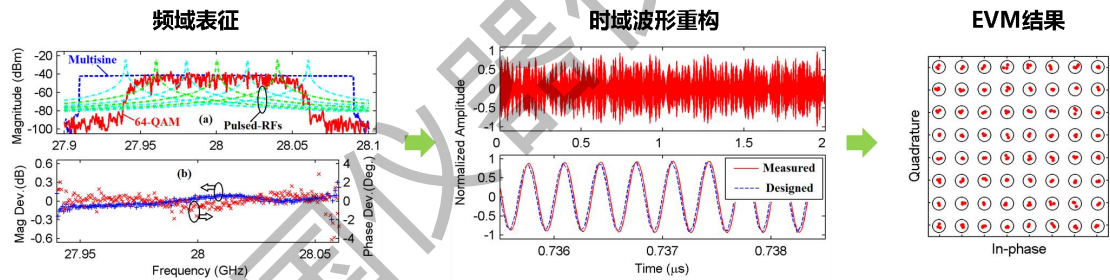


图 2. 频域全波形计量数据处理和量值传递

2.2 面向 OTA 测试的系统改进

在前期研究中，自定义信号发生和上变频过程中产生的带外干扰（如载波泄漏、混频镜像、谐波分量等）并不影响 EVM 的频域定标结果，无需特殊处理就可以实现对商用 VSA 的校准和测试验证，如图 3 所示。此外，由于上变频后的信号功率可以直接满足 VSA 的测试需求，同样无需进行额外的信号放大处理。因此，自定义产生的毫米波数字调制信号带内失真较小。然而对于 OTA 测试，带外频率分量可能影响天线系统的动态行为特性，需要通过带通滤波来实现干扰抑制。同时相较于导波测量，OTA 测试在接收端的信号功率显著降低，必须增加测试激励的发射功率来保证远场条件下的信噪比。因此，本案例需要在前期频域全波形计量标准装置的原基础上，额外进行信号链路和测量系统的改进，如图 3 所示，并引

入预失真技术补偿带通滤波和功率放大过程中的信号失真，从而获得低 EVM 值的测试激励用于天线系统 OTA 测试。

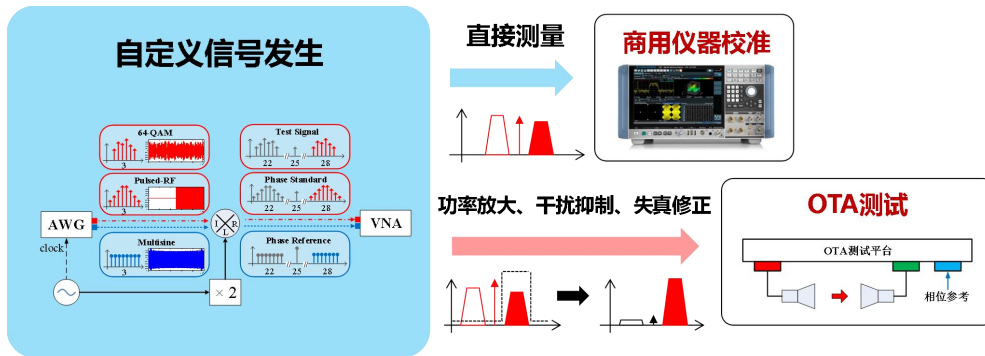


图 3. 面向 OTA 测试的信号链路和测量系统优化

1) 面向 OTA 测试的收发同步测量

如图 4 所示，本案例首先针对 OTA 测试“需同步观测收发两端信号”的实际需求，充分利用矢量网络分析仪的多接收机特性，在原有频域全波形计量标准装置的基础上引入了额外的测量通道 (b_2)。从而采用毫米波宽带数字调制信号作为测试激励，实现发射 (TX) 和接收 (RX) 天线的双端口同步测量，如图 5 所示。相比之下，NIST 基于时域全波形计量开展的 OTA 测试只能在不同连接状态下，“先后”表征激励和接收信号，无法完成同步测量。

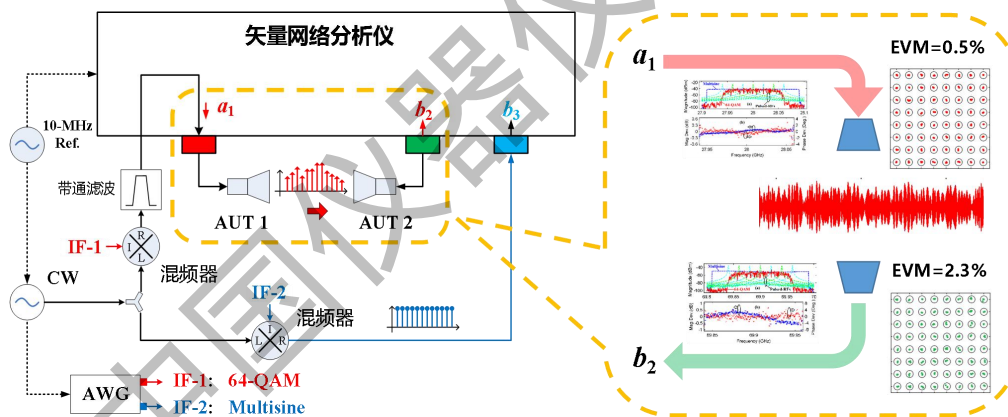


图 4. 收发同步测量的硬件扩展

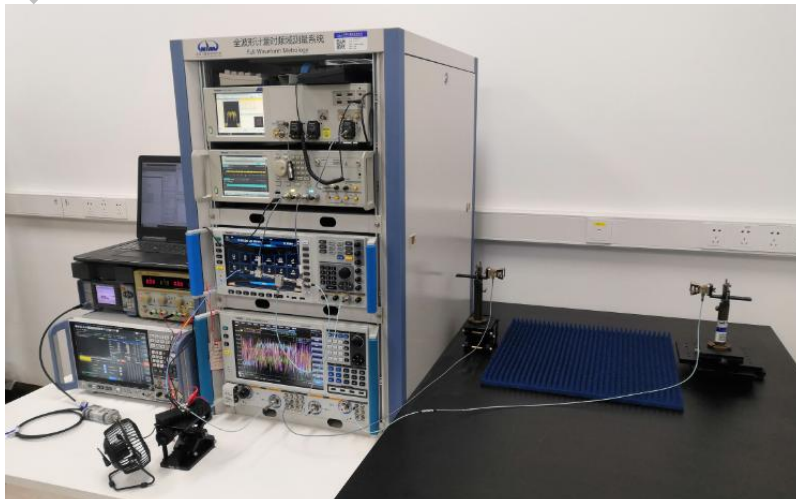


图 5. 实物照片

2) 信号放大和预失真修正

为满足 OTA 测试所需的远场条件及必要的信噪比要求，本案例如图 5 所示采用功率放大器提高毫米波 64-QAM 测试激励的发射功率，并额外引入带通滤波器对带外干扰进行有效抑制。这种情况下，需参考 NIST 的相关工作，引入预失真技术补偿带通滤波和功率放大过程中的信号失真，从而获得低 EVM 值的测试激励用于天线系统 OTA 测试。如图 6 所示，本案例目前采用迭代修正的预失真方法，补偿测量结果相对目标值的偏差。

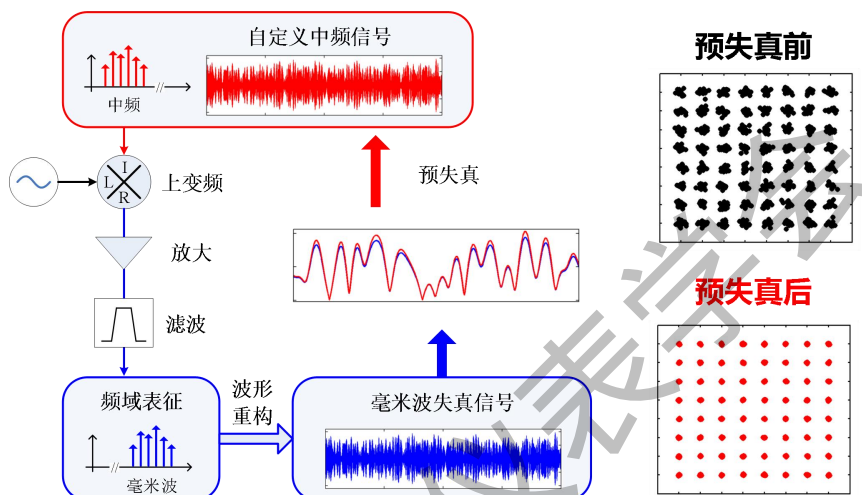


图 6. 预失真原理图及比较

2.3 OTA 测试方案

根据 NIST 的前期研究，天线姿态对于 EVM 的测量结果具有显著影响。因此，本案例拟以导波状态下的 EVM 测量结果为参照标准，测试不同角度和位置状态下的天线系统 EVM 劣化情况，如图 7 所示，并尝试引入“EVM 方向图或梯度图”评价天线姿态对通信质量的影响。包括但不限于：

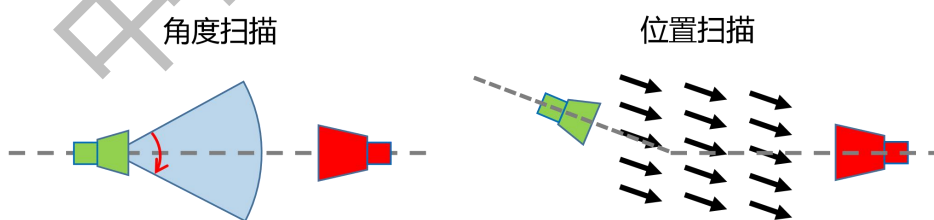


图 7. 典型 OTA 测试方案示意图

- 1) 比较导波（线缆直连）与轴向对准（On-Axis）条件下的 EVM 变化情况，提取由被测天线系统引起的 EVM 贡献，分析 EVM 变化与幅度谱、相位谱、时域包络变化的相关性；
- 2) 固定距离或位置，仅改变天线系统相对角度，基于 EVM 测量结果绘制“方向图”用于通信质量评测；在此基础上，以轴向对准（On-Axis）条件下的 EVM 测量结果为参照标准，分析提取天线系统相对角度变化时的 EVM 贡献；

3) 固定角度或姿态，仅改变天线系统相对位置，基于 EVM 测量结果绘制“梯度图或等高线图”用于通信质量评测；在此基础上，以轴向对准（On-Axis）条件下的 EVM 测量结果为参照标准，分析提取天线系统相对位置变化时的 EVM 贡献。

3 案例意义

3.1 建立 EVM 可溯源的 OTA 测试新方法

受限于传统的无线电计量技术和测量方法，现有的 OTA 测试手段普遍基于单频点的连续波信号，通过扫频实现宽带、稳态特性提取，无法有效模拟通信系统的真实工作状态，不具备面向通信质量评测的技术能力。得益于全波形计量在解决 EVM 量值溯源方面的关键技术突破，本案例通过采用其定标的毫米波宽带数字调制信号作为测试激励，并基于对频域全波形计量装置的扩展实现收发两端的同步测量，取代连续波稳态信号实现“宽带数字调制”场景下的 OTA 测试。相较传统的 OTA 测试手段，本案例提供了全新的天线表征技术，可以形成以 EVM 参数为核心的天线系统通信质量测评方法。

3.2 提升频域全波形计量的业内影响力

本案例所采用的 OTA 测试方案基于我国提出并主导的频域全波形计量技术体系，有望推进“十三五”研究成果的应用落地，为 5G 通信产业的系统和终端评测提供全新的测量技术支撑。相关技术方案完全独立于美国 NIST 的时域方法，摆脱了测量方法和核心设备的对外依赖，具备全面国产替代的技术基础（当前占比达 2/3）。相较美国 NIST 基于时域手段开展的 OTA 研究，本案例充分利用频域全波形计量标准装置的“多接收机”特性，业内首次实现了收发两端的同步测量，呈现出明显的技术优势。

致谢

本案例及相关频域全波形计量研究成果获得国家重点研发计划资助（2022YFF0604400、2017YFF0206202）。

参考文献

- [1] Remley K A, Williams D F, Hale P D, et al, Millimeter-wave modulated-signal and error-vector-magnitude measurement with uncertainty, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63 (5) : 1710–1720
- [2] P. Manurkar et al, “Precision Millimeter-Wave-Modulated Wideband Source at 92.4 GHz as a Step Toward an Over-the-Air Reference,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 68, no. 7, pp. 2644 - 2654, Jul. 2020.

- [3] Y. Zhang et al, "Precisely Synchronized NVNA Setup for Digitally Modulated Signal Generation and Measurement at 5G-Oriented Millimeter-Wave Test Bands," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 69, no. 1, pp. 833-845, Jan. 2021.
- [4] Y. Zhang, Z. He, M. Nie, J. Huang, and Z. Zhang, "NVNA Test Bench for Characterizing In-band Full Duplex Performance of Millimeter-Wave Antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 69, no. 11, pp. 7231-7242, Nov. 2021.
- [5] Y. Zhang et al, "Characterization of Millimeter-Wave Wideband FMCW Signals based on a Precisely Synchronized NVNA for Automotive Radar Applications," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 71, no. 1, pp. 250-262, Nov. 2021.
- [6] Y. Zhang et al, "Verification of Real-Time Oscilloscope for Millimeter-Wave Modulated-Signal Measurements Using an NVNA Test Bench," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., Online. 2023.

中国仪器仪表表学