

# 时频域全波形计量标准装置和毫米波数字调制量值溯源

张亦弛<sup>1</sup>, 袁国平<sup>2</sup>, 杨保国<sup>2</sup>, 何昭<sup>1</sup>, 聂梅宁<sup>1</sup>, 张子龙<sup>1</sup>, 田飞<sup>1</sup>

(1.中国计量科学研究院, 北京 100029; 2.中电科思仪科技股份有限公司, 青岛 266555)

**摘要:** 针对我国毫米波数字调制信号测量标准缺失的关键问题, 该案例提出了一种基于全波形计量技术的时频域混合定标系统, 一方面在国产矢量网络分析仪硬件平台基础上构建精确相位同步的频域全波形计量系统, 实现毫米波数字调制信号的自定义发生和频域表征, 另一方面采用高速实时示波器作为时域测量手段进行定标结果的量值核验。该时频域全波形计量标准装置脱离于商用矢量信号发生器和矢量信号分析仪形成测量能力, 不仅解决了毫米波数字调制量值溯源的计量难题, 还摆脱了技术方法和核心仪器设备的对外依赖。

**关键词:** 全波形计量;毫米波;数字调制;测量标准

## Millimeter-wave Digital Modulation Standard based on Time- and Frequency-domain Full Waveform Metrology

Zhang Yichi, Yuan Guoping, Yang Baoguo, Nie Meining, Zhang Zilong, Tian Fei

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; Ceyear Technologies Co., Ltd, Qingdao 266555. China)

**Abstract:** To solve the key problem of the lack of measurement standards for millimetre-wave digital modulation signals, this case demonstrates a hybrid time- and frequency-domain characterization system based on the technique of full waveform metrology. On the one hand, a frequency-domain measurement system with precise synchronization is built on the basis of the domestic commercial vector network analyser, to achieve user-defined generation and characterization of millimetre-wave digital modulation signals under test. On the other hand, a high-speed real-time oscilloscope is also used as a time-domain approach to verify the calibration results. This hybrid time- and frequency-domain characterization system, without the utilization of commercial vector signal generator and vector signal analyzer, not only solves the traceability issue of millimetre-wave modulated parameters, but also avoids the dependence on foreign methods and core instruments.

**Keywords:** full waveform metrology; millimeter-wave; digital modulation; measurement standard

# 1 背景介绍

随着 5G 通信和智能汽车领域的飞跃式发展，传统的 Sub-6GHz 微波频段逐渐无法满足高速移动通信和先进智能制造产业对频谱资源的迫切需求<sup>[1]-[6]</sup>，从而推动了以 3GPP FR2（24.25–52.6 GHz）和车载雷达（76–81 GHz）为代表的毫米波频谱资源的开发和利用<sup>[7]-[10]</sup>。实际上，美国联邦通信委员会早在 2003 年就开始了对于 71–76，81–86，92–95 GHz 等典型毫米波频段的规划部署<sup>[11]</sup>。在可预见的未来五到十年间，全面覆盖 24–95 GHz 超宽频段的毫米波技术势必成为电子信息产业的研究热点<sup>[12]-[16]</sup>。然而作为支撑毫米波技术研究和行业标准制定的基础，国内外共同面临的计量问题是毫米波调制信号的测量标准缺失，即缺少参数和量值层面的评价认证体系<sup>[17]</sup>。

在模拟调制时期，以欧美发达国家和中日韩为代表各国计量机构均建立了完善的调幅（AM）、调频（FM）参数测量标准<sup>[18]</sup>，为广播通信、无线电航空导航等领域的量值准确和统一提供了关键的技术保障。然而随着无线通信进入数字时代，产业界对建立数字调制参数测量标准的需求一度变得不再迫切，因此在以 2G/3G/4G 为代表的“低频、低速”时代，全世界范围内都没有及时建立数字调制信号的测量标准<sup>[18]</sup>，主要依赖商用仪器的性能指标保证量值准确。随着商用仪器的性能与时俱进，数字调制信号测量标准缺失的情况延续至今，直到 5G 通信将“高频（毫米波）、高速（宽带）”确定为典型应用场景。

对于 Sub-6GHz 的微波频段，以美国 Keysight、德国 R&S、日本 Anritsu、中电科 Ceyear 为代表的国内外知名仪器产品具有较高的技术指标，性能参数始终领先于 2G/3G/4G 的工业需求，足以保证产业内的量值准确。因此，国内外声称建立了 GSM / CDMA / TD-SCDMA / WCDMA / LTE 等数字调制测量能力的检测机构和实验室，实际上普遍依赖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）形成测量能力<sup>[19]-[23]</sup>。作为能力验证的唯一技术方案<sup>[24][25]</sup>，目前只能通过“VSG 和 VSA 互测比较”的方式进行“性能一致性验证”，缺少更高级别的测量标准实现参数校准和量值溯源。然而对于 24–95 GHz 毫米波频段，特别是在调制带宽超过百 MHz 的情况下，商用 VSG 和 VSA 产品的性能显著下降并且一致性变差，使得基于“互测验证”的测试方法不足以满足高准确度测量的需求——无法验证 VSG 和 VSA 哪个更准（甚至都不准）。因此，凸显和暴露了数字调制信号测量标准缺失带来的问题和挑战，短期内难以通过商用仪器产品的性能提升来解决。

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(National Institute of Standards and Technology, NIST)于2015年正式提出了全波形计量 Full Waveform Metrology 的技术发展理念<sup>[26]</sup>,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,在业内首次实现了误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, 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<sup>[27][28]</sup>。该时域全波形计量方案的两个关键技术突破在于:首先,脱离于商用 VSG 和 VSA 形成自定义信号发生和测量能力,从而跳出一直以来“VSG-VSA 互测验证”的逻辑闭环,实现 EVM 量值向国家基标准的有效溯源;其次,构建精确相位同步的测量系统,而非简单的 10 MHz 参考频率锁定,实现高准确度的毫米波调制信号测量。正是参考了 NIST 时域方法在这两方面的技术突破,中国计量科学研究院于 2021 年研究提出了基于“幅度谱+相位谱”表征的频域全波形计量方案<sup>[29]-[31]</sup>,可以实现等效的 EVM 定标和量值溯源,并在本案例中进一步结合高速实时示波器构建“时频域混合定标系统”,形成面向商用 VSA、VSG 测试和校准的计量能力。

## 2 时频域全波形计量装置

### 2.1 基于国产矢量网络分析仪的频域全波形计量技术

如图 1 所示,本案例基于国产四端口矢量网络分析仪 Ceyear 3672E、本振信号发生器 Agilent E8257D 和高速任意波形发生器 Tektronix AWG70002 构建精确同步的频域全波形计量装置<sup>[29]</sup>,借助矢量网络分析仪的逐频点比值测量功能实现相位谱的有效测量,从而完成频域“幅度谱+相位谱”的完整表征,脱离于商用 VSG 和 VSA 形成毫米波宽带数字调制信号的自定义发生和测量能力。具体包括:

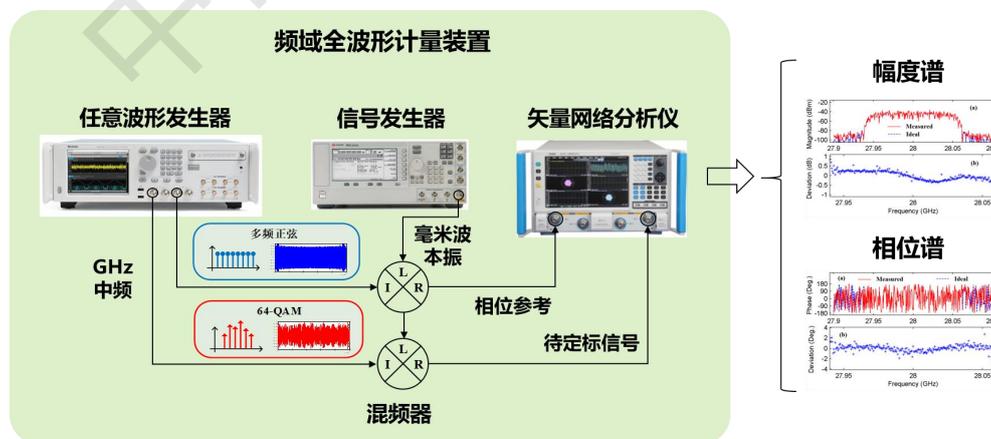


图 1 基于矢量网络分析仪的频域全波形计量装置原理框图

- 1) 毫米波宽带数字调制信号的自定义发生

参考美国 NIST 的时域方法，本案例采用高速任意波形发生器在 GHz 载波上自定义编辑并合成 64-QAM 数字调制中频信号，进而借助毫米波本振信号和混频器将其上变频到目标的毫米波频段，作为待定标的毫米波数字调制信号。在射频带宽方面，该自定义信号发生方案“向下”可实现百 MHz 载波频率，“向上”可以直接覆盖最高 70 GHz 的频率范围，并具备进一步拓展至太赫兹频段的可信性（需配套额外的矢量网络分析仪和信号发生器扩频模块）。在调制带宽方面，本案例选用的高速任意波形发生器的采样率最高 25 GSamples/s（模拟带宽可达 8 GHz），可以轻松实现 0.1~2 GSymbols/s 符号速率的 64-QAM 信号发生，能够满足百 MHz 到 2 GHz 调制带宽的 5G 测量需求。

## 2) 相位参考信号和精确相位同步

为实现被测 64-QAM 信号“相位谱”的频域表征，需要同时提供一个相位参考信号，进而借助矢量网络分析仪的“比值”测量功能，获得被测信号和相位参考信号间逐频点的相位差，消除扫频过程中随机本振相位的干扰<sup>[29]</sup>。如图 1 所示，本案例采用同一个高速任意波形发生器，同步生成被测 64-QAM 信号和多频正弦相位参考信号，从而保证各中频信号间的精确同步。此外，还必须采用同一个本振信号发生器实现两路信号的上变频，从而建立毫米波测试信号间的相干机制，降低相位波动和漂移的影响。基于上述测量原理，未校准的频域测量结果  $X^{Raw}$  如式（1）所示，其中  $a$  为测量 64-QAM 信号的接收机矢量结果， $R$  为测量相位参考信号的接收机矢量结果。

$$X^{Raw}(f) = a(f) \cdot \frac{|R(f)|}{R(f)} = |a(f)| \angle [a(f)/R(f)] \quad (1)$$

## 3) 功率校准、相位校准以及频域表征

为修正幅度谱和相位谱测量过程中的各种系统误差（包括但不限于：矢量网络分析仪的接收机频率响应、通道延迟和相位参考引入的相位误差等），上述频域全波形计量装置需要引入功率校准和相位校准，具体流程可参见文献[31]。其中，功率校准用于获得逐频点的幅度测量偏差，即幅度修正因子  $A^{Cal}$ ；相位校准用于获得逐频点的相位测量偏差，即相位修正因子  $\varphi^{Cal}$ 。在此基础上，可以如式（2）所示获得被测 64-QAM 信号的频域定标结果  $X^{Meas}$ 。

$$X^{Meas}(f) = X^{Raw}(f) \times A^{Cal}(f) \angle \varphi^{Cal}(f) \quad (2)$$

## 4) 波形重构、数字解调和量值溯源

基于上述“幅度谱+相位谱”定标结果，可以借助傅里叶逆变换（Inverse Fast Fourier Transform, IFFT）实现被测 64-QAM 信号的时域波形重构，进而完成数字调制的算法解调，

获得如图 2 所示的星座图和 EVM。由于这些时域和调制域的参数均基于频域定标结果得到，因此其量值可以通过幅度谱和相位谱的校准修正，有效溯源到国家功率和衰减等计量基标准，从而解决相关测量标准缺失的核心问题。在此基础上获得的“已定标”64-QAM 信号可以作为测量标准（measurement reference），用于商用 VSA 的校准和测试。

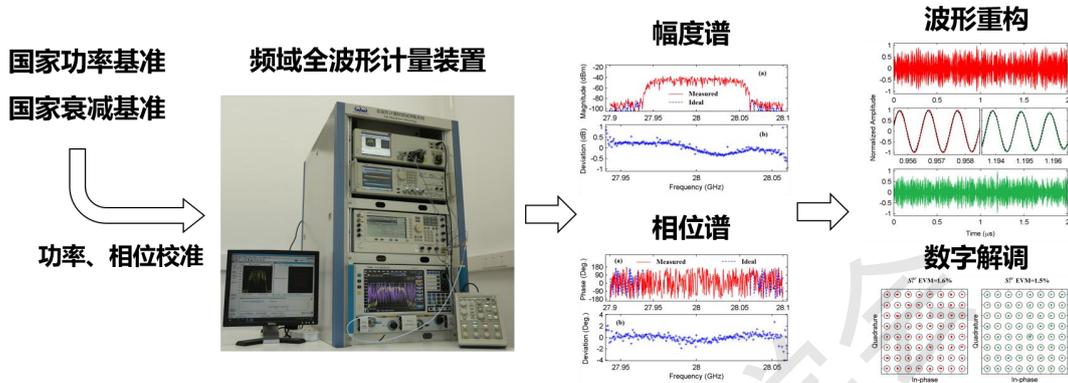


图 2 频域全波形计量装置的量值溯源和传递

## 2.2 基于高速实时示波器的时域验证方法

截止目前，共有四类测量仪器或方法可以实现毫米波数字调制信号的测量，包括：专门用于数字调制测量的矢量信号分析仪（VSA）、基于取样示波器的时域全波形计量装置、基于矢量网络分析仪的频域全波形计量装置，以及近年来功能不断扩展的高速实时示波器<sup>[32]</sup>。为实现对频域全波形计量装置定标结果的核验，本案例特别引入了 70 GHz 带宽的高速实时示波器（Tektronix DPO77002SX，采样率 200 GS/s）作为第二种独立测量手段，如图 3 所示，对前者产生并定标的 64-QAM 信号进行“原位”“同步”测量和比对。在实际应用中，该实时示波器即可以工作在常规的实时采样模式，借助外部的软件算法对其采集的时域波形进行滤波、修正和数字解调，也可以工作在内嵌的数字调制分析模式<sup>[32]</sup>，直接获得选件给出的解调分析结果。在第一种工作模式下，通过修正示波器的频率响应（冲激响应或幅频和相频特性），同样可以实现 EVM 测量结果向国家计量基标准的量值溯源，但是其在动态范围和测量不确定度方面显著逊色于频域全波形计量方法，故而在本案例中只作为时域验证的“辅助”方案。

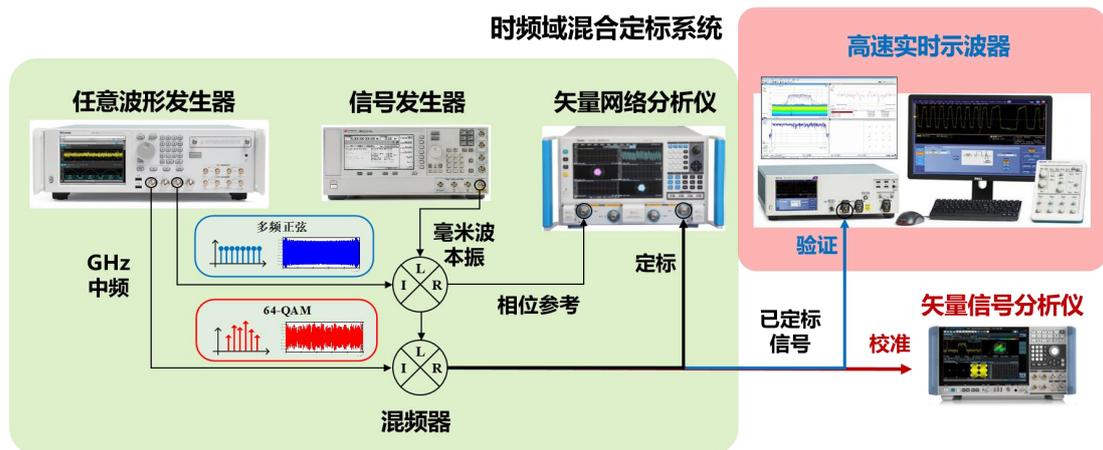


图3 时频域混合定标系统原理框图

### 2.3 面向商用矢量信号测试设备的校准方法

为形成面向商用 VSA 测试和校准的计量能力，本案例结合上述两种独立测量手段，脱离于商用 VSG 和 VSA 构建了基于毫米波宽带数字调制信号自定义发生的“时频域混合定标系统”，如图 3 所示。一方面采用频域全波形计量装置对 64-QAM 信号进行频域表征，获得 EVM 已知的标准信号；另一方面采用高速实时示波器对该 64-QAM 标准信号进行时域表征，实现 EVM 结果的比对和验证。通过验证的 64-QAM 测试信号可作为测量标准，用于对商用 VSA 的校准和性能验证，从而跳出一直以来“VSG-VSA 互测验证”的逻辑闭环，实现 EVM 量值向国家基标准的有效溯源。

对于商用矢量信号发生器 VSG，由于其不能提供精确同步的本振和中频信号，无法采用频域全波形计量装置直接测量。为此，本案例所构建的“时频域混合定标系统”需采用频域全波形计量装置对高速实时示波器进行频率响应的校准和修正，借助后者完成对商用 VSG 的测试和校准。

## 3 案例意义

### 3.1 建立毫米波数字调制参数的量值溯源体系

本案例针对国内数字调制信号参数测量标准缺失、EVM 量值无法有效溯源到国家计量基标准的关键问题，结合频域全波形计量方法和高速实时示波器构建了“时频域混合定标系统”，从而脱离于商用 VSG 和 VSA 形成毫米波宽带数字调制信号计量能力，建立可溯源至国家功率和衰减基准的 EVM 参数量值溯源体系，突破了业内一直依靠“VSG-VSA 互测验证”开展校准测试的技术瓶颈。

### 3.2 推进我国主导的频域全波形计量方案

本案例基于我国自主提出的频域全波形计量方案构建自定义信号发生和定标系统，一方面独立于美国 NIST 的时域方法形成毫米波宽带数字调制信号的计量能力，推进了我国主导的频域全波形计量方案的技术落地，另一方面创新引入了高速实时示波器作为“辅助”手段，用于时频域方法的比对和验证，进一步保证了量值的准确可靠以及对商用 VSG 的测试和校准能力。

### 3.3 核心设备的国产替代和应用推广

通过采用频域全波形计量方案构建定标系统，本案例主要基于国产矢量网络分析仪 Ceyear 3672E 形成毫米波宽带数字调制信号的测量能力，摆脱了测量方案（NIST 时域方法）对进口高速取样示波器的技术依赖，可以做到核心设备的自主可控和国产替代。相应的本振信号发生器和任意波形发生器也在逐步替换为 Ceyear 1465L-V 和 1652B 等产品，进一步提高计量标准装置中的国产化比率。在已开展的“十四五”合作研究中，本案例所涉及的频域全波形计量方法拟依托新一代国产矢量网络分析仪及扩频模块，形成定制化的毫米波宽带信号、器件和 Over-The-Air 测量解决方案，具备较好应用推广前景。

### 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（2021YFF0600304、2022YFF0604400、2017YFF0206202）。

### 参考文献：

- [1] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, et al, What Will 5G Be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32 (6) : 1065-1082
- [2] J. Cheng, W. Chen, F. Tao, and C.-L. Lin, “Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing,” J. Ind. Inf. Integr., vol. 10, pp. 10–19, Jun. 2018.
- [3] Meisu Zhong, Yongsheng Yang, Haiqing Yao, et al, 5G and IoT: Towards a new era of communications and measurements, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2019, 22 (6) : 18 - 26
- [4] Yu Liu, Cheng-Xiang Wang, Jie Huang, et al, Recent Developments and Future Challenges in Channel Measurements and Models for 5G and Beyond High-Speed Train Communication Systems, IEEE Communications Magazine, 2019, 57 (9) : 50 - 56

- [5] Eric Westberg, Joseph Staudinger, Justin Annes, et al , 5G Infrastructure RF Solutions: Challenges and Opportunities, *IEEE Microwave Magazine*, 2019, 20 (12) : 51 – 58
- [6] User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 16), document 38.101-1; 3GPP, Oct. 2019.
- [7] User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 16), document 38.101-2; 3GPP, Oct. 2019.
- [8] Biswa P.S. Sahoo, Ching-Chun Chou, Chung-Wei Weng, et al , Enabling Millimeter-Wave 5G Networks for Massive IoT Applications: A Closer Look at the Issues Impacting Millimeter-Waves in Consumer Devices Under the 5G Framework , *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2019, 8 (1) : 49 – 54
- [9] Sana Salous, Vittorio Degli Esposti, Franco Fuschini, et al , Millimeter-Wave Propagation: Characterization and modeling toward fifth-generation systems , *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, 58 (6) : 115 - 127
- [10] B. Khosravi. Autonomous Cars Won't Work—Until We Have 5G. Accessed: Jun. 17, 2019. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bijankhosravi/2018/03/25/autonomous-cars-wont-work-until-wehave-5g/>
- [11] FCC Opens 70, 80, and 90 GHz Spectrum Bands for Deployment of Broadband Millimeter Wave Technologies. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-70-80-and-90-ghz-spectrum-bands-deployment-broadband>
- [12] Jon Martens , Meeting New RF Measurement Challenges: Wide Intermediate-Frequency Millimeter-Wave Modulated Device and Subsystem Characterization and Evolving Measurement Architectures, *IEEE Microwave Magazine*, 2018, 19 (2) : 35 - 48
- [13] Chao Yu, Jianxin Jing, Han Shao, et al , Full-Angle Digital Predistortion of 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Transmitters , *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67 (7) : 2847 - 2860
- [14] Kate A. Remley, Joshua A. Gordon, David Novotny, et al , Measurement challenges for 5G and beyond: an update from the National Institute of Standards and Technology , *IEEE Microwave Magazine*, 2017, 18 (5) : 41–56

- [15] Perry F. Wilson, Kate A. Remley, et al , A NIST perspective on metrology and EMC challenges for 5G and beyond, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2018, 7(4): 77-85
- [16] Camillo Gentile, Peter B. Papazian, Nada Golmie, et al , Millimeter-Wave Channel Measurement and Modeling: A NIST Perspective, IEEE Communications Magazine, 2018, 56(12) : 30-37
- [17] Hale P D , Williams D F, and Dienstfrey A, Waveform metrology: signal measurements in a modulated world, Metrologia, 2018, 55(5) : S135-S151
- [18] Calibration and Measurement Capabilities. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/kcdb/>
- [19] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1131-2005 TDMA-GSM数字移动通信综合测试仪校准规范.
- [20] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1177-2007 CDMA数字移动通信综合测试仪校准规范.
- [21] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1204-2008 TD-SCDMA数字移动通信综合测试仪校准规范.
- [22] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1276-2011 宽带码分多址接入(WCDMA)数字移动通信综合测试仪校准规范.
- [23] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1443-2014 LTE数字移动通信综合测试仪校准规范.
- [24] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1128-2004 矢量信号分析仪校准规范.
- [25] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1174-2017 矢量信号发生器校准规范.
- [26] Paul Hale, Andrew Dienstfrey, Jeffrey Jargon, Kate Remley, Jack Wang, and Dylan Williams, High-speed Waveform Metrology, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/29/CCEM-15-17-waveform-metrology.pdf>
- [27] 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
- [28] 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.

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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., Online. Oct. 2022.
- [32] Tektronix RF and Vector Signal Analysis for Oscilloscopes. SignalVu Datasheet (available: [https://download.tek.com/datasheet/SignalVu\\_Datasheet\\_EN-US\\_37W-22314-20.pdf](https://download.tek.com/datasheet/SignalVu_Datasheet_EN-US_37W-22314-20.pdf))