

可用于混频器表征的非线性矢量网络分析仪*

张亦弛, 何 昭, 郭晓涛, 黄见明, 张子龙

(中国计量科学研究院 信息与电子计量科学和测量技术研究所 北京 100029)

摘要:非线性矢量网络分析仪(NVNA)是一种针对射频微波器件非线性行为表征的测量装置,通过引入一个相位参考信号实现复杂被测对象的相位谱测量,目前主要用于功率放大器(PA)的表征和建模研究。提出了一种基于双相位参考结构的NVNA改进方案,并尝试用于混频器的非线性行为表征研究。该方案采用一个“步进式”的多频正弦信号作为“主”相位参考,以实现高频谱分辨率的多频段测量,同时引入第2个低频谱分辨率的“辅助”相位参考提供各测量频段的相位同步。该方案能够显著提高测量装置的信噪比,具备对多频段、“调制+谐波”复杂被测对象的测量表征能力。实验表明,该方案可以提供小于 $\pm 0.2^\circ$ 相位谱测量稳定度,能够进行混频器在复杂调制状态下的相位和谐波失真特性分析。

关键词:非线性矢量网络分析仪;相位参考;相位谱测量;混频器;非线性

中图分类号: TN98 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Novel nonlinear vector network analyzer architecture and test bench for mixer characterization

Zhang Yichi, He Zhao, Guo Xiaotao, Huang Jianming, Zhang Zilong

(National Institute of Metrology, Division of Electronics and Information Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Nonlinear Vector Network Analyzer (NVNA) is a measurement setup for characterizing the nonlinear behavior of RF/Microwave devices. It uses a phase reference to achieve the phase spectrum measurement of a complex test target, and is mainly used for the power amplifier characterization and modeling at present. This paper presents an improved two-phase-reference NVNA setup, and investigates its performance for mixer characterization with nonlinear behaviors. This novel NVNA setup uses a “stepped” multisine as the primary phase reference, to achieve multi-band measurement on a dense spectral grid, and uses a second “auxiliary” phase reference on a coarse grid to ensure the synchronization between multi-band phase measurements. As a result, the signal-to-noise ratio of the test bench can be largely improved, and a complex test target with multi-band and “modulated multi-harmonic” components can be characterized. According to the experimental results, the proposed method can guarantee a phase measurement stability of less than $\pm 0.2^\circ$ fluctuation, and achieve the phase and harmonic distortion analysis of a mixer under complex modulation.

Keywords: nonlinear vector network analyzer (NVNA); phase reference; phase spectrum measurement; mixer; nonlinearity

0 引 言

随着非线性理论研究的不断深入^[1],以非线性矢量网络分析仪(nonlinear vector network analyzer, NVNA)为代表的新一代微波毫米波测量平台得以发展和推广^[2-5]。作为对传统矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)的升级和改造, NVNA通过引入相位参考信号和绝

对校准方法^[6],实现了对复杂射频微波信号的幅度谱和相位谱完整测量,从而拓展了对非线性器件的测试和分析功能。

从2008年问世至今,商用NVNA产品采用周期脉冲序列作为相位参考,能够以10 MHz的频谱分辨率覆盖DC ~ 67 GHz射频带宽,可以满足绝大多数谐波非线性研究需求,为功率放大器的X参数模型和谐波负载牵引测试等研究热点提供了必不可少的测量技术手段^[2-5]。

近年来,文献[7-14]报道了几种改造或替代的 NVNA 相位参考信号实现方案,以损失射频带宽和频谱功率(信噪比)为代价,实现了 kHz 级高频分辨率的多频段测量,从而拓展了 NVNA 平台对调制信号和功率放大器互调非线性测量分析能力。

然而文献[7-14]的相位参考实现方法均基于非等间隔的脉冲序列,虽然具有“同时获得全部所需(谐波、调制)频率成分”的优点,但是依然存在一系列技术弊端,如非等间隔脉冲序列的周期重复性变差,造成各频率分量相位噪声的提高;信号能量一次性分配给全部频率成分,各频率分量的功率较低,(在 NVNA 扫频测量的工作模式下)利用率也较低;各次谐波频段的调制带宽有限,不能实现 DC 至最高射频带宽的全覆盖。

为此,本文提出了一种基于双相位参考结构的 NVNA 改进方案,采用一个“步进式”的多频正弦信号作为“主”相位参考,以实现高频谱分辨率的多频段测量,同时引入第 2 个低频谱分辨率的“辅助”相位参考提供各测量频段的相位同步。该方案不仅避免了非等间隔脉冲序列方式的“相位噪声”问题,还能在理论上获得等效的全频段连续覆盖。此外,其所采用的两个相位参考信号均可以获得较高的谱线功率,从而提高测量装置的相位谱测量信噪比。为了验证上述方案的有效性,同时也为了拓展 NVNA 测量平台的应用范围,本文采用混频器作为被测对象,利用上述测量装置对其在复杂调制信号激励下的相位和谐波失真特性进行了测试分析。

1 双相位参考结构的 NVNA 实现方案

1.1 经典 NVNA 和基本测量原理

如图 1 所示,经典的 NVNA 采用“单”相位参考结构。为消除本振相位 φ_{lo} 的影响(随机跳变),NVNA 利用 a_1, b_1, a_2, b_2 与 R 在各频点的相位差获得静态的相位谱测量结果,如式(1)和(2)所示。关于 NVNA 的基本测量原理,可详见参考文献[6]。

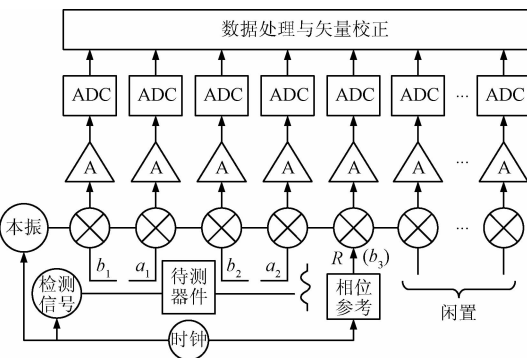


图 1 经典的 NVNA 结构

Fig. 1 Block diagram of classic NVNA

$$\begin{cases} \angle a_1(f) = \angle a_1^{RF}(f) - \varphi_{lo} = random \\ \angle b_1(f) = \angle b_1^{RF}(f) - \varphi_{lo} = random \\ \angle R(f) = \angle R^{RF}(f) - \varphi_{lo} = random \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} |a_1^M(f)| = |a_1(f)| \\ \angle a_1^M(f) = \angle [a_1(f)/R(f)] = constant \end{cases} \quad (2)$$

基于文献[7-14]的相位参考实现方法,经典 NVNA 对双端口器件的测量示意图如图 2 所示。其中,相位参考信号 R 必须在所有被测频点上同时提供参考谱线。在任意频点上,双端口测量结果可简化为式(3)的表示形式。

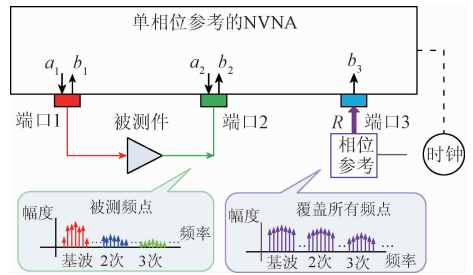


图 2 经典 NVNA 测量示意图

Fig. 2 Illustration of classic NVNA measurement

$$\begin{cases} a_1^M = |a_1| \angle (a_1/b_3) \\ b_1^M = |b_1| \angle (b_1/b_3) \\ a_2^M = |a_2| \angle (a_2/b_3) \\ b_2^M = |b_2| \angle (b_2/b_3) \end{cases} \quad (3)$$

1.2 双相位参考结构的 NVNA

本文提出的双相位参考结构的 NVNA 原理如图 3 所示。其中,装置的端口 1 和 2 用于双端口被测器件的测量,端口 3 用于主相位参考信号 R_1 的测量,端口 4 用于辅助相位参考信号 R_2 的测量。相比较图 1 和 2 的经典 NVNA 结构,该装置引入了第 6 个测量接收机 b_4 。

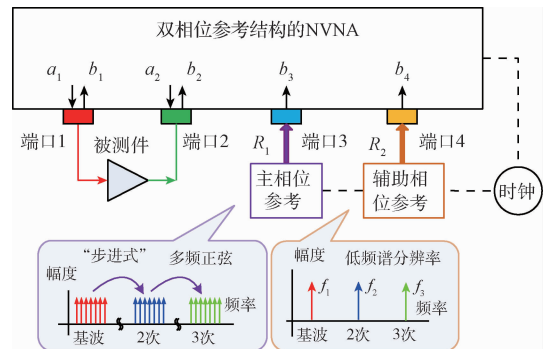


图 3 双相位参考结构的 NVNA 结构

Fig. 3 Block diagram of two-phase-reference NVNA setup

在该方案中,主相位参考信号 R_1 是一个高频谱分辨率的多频正弦信号,每次只能针对一个(或部分)测量频段,需要通过“步进”的形式实现对所有被测频点的等效覆盖。在“步进”过程中, R_1 的载波相位是随机赋值的非可控量,与式(1)中的本振相位 φ_{lo} 类似。如果直接采用式(3)进行数据处理,则 NVNA 每次扫频测量的结果都是随机跳变的,无法提供重复稳定的有效数据。为了消除该影响,该方案引入了第2个低频谱分辨率的辅助相位参考信号 R_2 ,通过在二者交叠频点上的测量值进行修正和补偿,以获得有效的相位谱测量结果。

2 双相位参考的工作和测量原理

2.1 理论基础

多频正弦是一种具有多个频率分量的周期调制信号,一般可采用矢量信号发生器的正交 I/Q 调制功能实现,如式(4)所示。通过对基带 I/Q 信号的波形设计和编辑,能够获得任意幅度谱 $\{A_n\}$ 和相对相位谱 $\{\varphi_n\}$ 的多频正弦信号。不失一般性地,本文采用“等幅、Schroeder 相位关系”^[15]的低峰均比多频正弦信号作为主相位参考 R_1 。

$$R_1(t) = I(t) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_c) - Q(t) \cdot$$

$$\sin(\omega_c t + \varphi_c) = \sum_{n=-N}^N A_n \cos[(\omega_c + n\Omega)t + \varphi_n + \varphi_c] \quad (4)$$

在使用矢量信号发生器合成多频正弦时,载波和基带 I/Q 波形的相位关系是不可控的。当载波频率从 f_{c1} 经 $f_{c2}, f_{c3}, \dots, f_{cm}$ 再切换回 f_{c1} 后,其初相 φ_c 会发生随机的变化,从而使得多频正弦的实际相位 $\{\varphi_n + \varphi_c\}$ 发生整体的偏移。然而通过式(4)的 I/Q 调制原理不难看出,载波相位的变化对每个频率分量的影响在理论上是完全等同的。实际中,由于器件特性的微弱影响,其偏差小于 $\pm 0.1^\circ$,对于 NVNA 的相位测量来讲是可以忽略不计的。在本文的工作中, R_1 载波相位的变化可以通过其他交叠频点的测量值进行修正和补偿,正是利用了这一基本特性。

2.2 测量原理

以端口1入射波 a_1 为例,如直接根据式(3)和(4)确定 a_1^M ,则所得相位信息如式(5)所示,包含随机成分 $\varphi_{i,k}$,其中下角标 $i=1, 2, \dots$ 表示第 i 个被测频段,下角标 $k=1, 2, \dots$ 表示第 k 次测量。

$$\angle a_1^M = \angle(a_1/b_3) = \angle a_1^{RF} - \angle R_1 - \varphi_{i,k} \quad (5)$$

如图3所示, R_2 以低频谱分辨率贯穿整个测试频段,在每个被测频段内与 R_1 存在一个交叠频点(如果同时存在多个,则只使用其中一个)。在第 i 个被测频段的

交叠频点 f_i 上,可由式(6)测得两个相位参考的相位差 $\Delta\varphi_{i,k}$ 。

$$\Delta\varphi_{i,k} = \angle[b_3(f_i)/b_4(f_i)] = \angle R_1(f_i) - \angle R_2(f_i) + \varphi_{i,k} \quad (6)$$

若将 $\Delta\varphi_{i,k}$ 作为修正值补偿到式(5)的测量数据中(仅针对第 i 个被测频段的所有频点),则可以得到式(7)所示的结果。此时, a_1^M 不再随测量次数 k 而改变,可以作为重复稳定的有效测量结果。

$$\angle a_1^M = \angle(a_1/b_3) + \Delta\varphi_{i,k} = \angle a_1^{RF} - \angle R_1 + \angle R_1(f_i) - \angle R_2(f_i) \quad (7)$$

2.3 测量流程

根据上述测量原理,本文所提出的双相位参考 NVNA 测量流程如下:

- 1) 根据实验条件设置频点、中频带宽等参数;
- 2) 开启辅助相位参考信号 R_2 并调整其频点位置,确定 R_1 和 R_2 的交叠频点 $\{f_i\}$;
- 3) 加载主相位参考信号 R_1 的基带 I/Q,打开射频和调制输出;
- 4) 将 R_1 的载波频率设置为 $f_{c,1}$,使其覆盖第1个被测频段;
- 5) 测量第1个被测频段内所有频点的 a_1, b_1, a_2, b_2, b_3 和 b_4 ,根据交叠频点的 $b_3(f_i)$ 和 $b_4(f_i)$ 计算 $\Delta\varphi_{1,1}$;
- 6) 根据 a_1, b_1, a_2, b_2, b_3 和 $\Delta\varphi_{1,1}$ 计算第1个被测频段内所有频点的 a_1^M, b_1^M, a_2^M 和 b_2^M ;
- 7) 将 R_1 的载波频率设置为 $f_{c,2}$,重复步骤5)和6)测量第2个被测频段,并以此类推直至完成全部频点的测量;
- 8) 重复步骤4)~7),实现对校准件或者被测件的多次测量。

可以看到,主相位参考 R_1 的“步进”与 NVNA 扫频测量保持同步。即 R_1 的载波频率切换到第 i 个被测频段后,方能开始相应频段所有频点的测量,并在完成该频段测量后切换到下一个被测频段。

3 方法验证及混频器非线性表征

3.1 测量装置及实验流程

基于上述方法,本文采用1台 R&S ZVA8 四端口 VNA 如图4所示构建了双相位参考 NVNA 实验装置,其中主相位参考 R_1 由1台矢量信号发生器 R&S SMW200A 提供,辅助相位参考 R_2 由1台窄脉冲发生器 Herotek GC100RC 提供(以100 MHz 频谱分辨率覆盖到18 GHz)。被测器件选择了 Mini-Circuit 15542 ZFM-150 + 混频器,其激励信号由第2台矢量信号发生器 Agilent E8267D 提供。

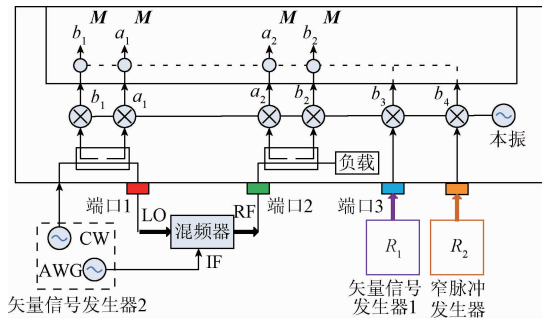


图4 实验装置测量示意图

Fig. 4 Illustration of experimental setup

本文以混频器的“上变频”特性为例,对所构建的实验装置进行了测试验证。为此,Agilent E8267D 需要在特殊的 I/Q 调制状态下:保持基带 I/Q 输出“开启”,并将 I 路信号提供给被测混频器的“IF”端口;同时保持调制状态“关闭”但射频输出“开启”,将未调制的载波提供给被测混频器的“LO”端口。

为了展示被测混频器的上变频特性,该实验保持混频器中频(IF)激励不变,通过混频器本振(LO)激励的功率变化表征“RF”输出的幅频及相频特性。由于被测混频器的技术指标要求其正常工作在不小于 +10 dBm LO 激励功率的“饱和状态”下,该实验专门选择(-15 ~ 15) dBm 的功率扫动范围,以覆盖不同的工作状态。相应的测试条件如表 1 所示。

表 1 主要实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数描述	数值
LO 频率/GHz	1
LO 功率	(-15 ~ 15) dBm, 5 dB 步进
IF 带宽/MHz	10
被测频段	(1, 2, 3) GHz \pm 10 MHz
频谱分辨率/kHz	400
R_1 载波“步进”频率/GHz	(1, 2, 3)
R_1 谱线功率/dBm	≥ -20
R_2 频谱分辨率/MHz	100
R_2 谱线功率/dBm	≥ -20
交叠频点/GHz	(1, 2, 3)

3.2 实验结果

如图 5 所示,Agilent E8267D 所提供的基带 I/Q 波形是一个复杂的周期信号,具有 ± 1 V 的归一化幅度,其 2.5 μ s 的重复周期与 400 kHz 测量频谱分辨率保持对应。其中,I 路用于被测混频器的 IF 激励信号,Q 路闲置。

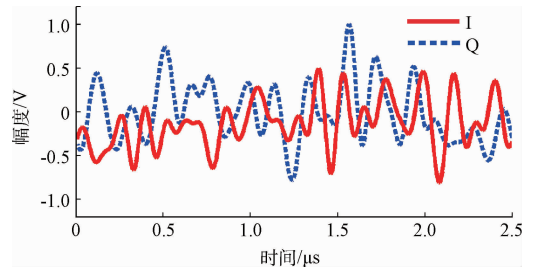


图5 基带 I/Q 信号波形

Fig. 5 Waveforms of baseband I/Q signals

在不同的 LO 激励功率下,被测混频器的幅频特性如图 6 所示,左边为归一化的 IF 幅度谱,右边为随着 LO 功率变化的 RF 幅度谱。可以看到,RF 输出的幅度谱随 LO 功率的增大而趋向于 IF 幅度谱,呈现出更为理想的幅度“上变频”特性:当 LO 功率小于等于 -5 dBm 时,RF 和 IF 幅度谱的(归一化后)最大相对偏差达到 ± 15 dB;当 LO 功率为 0 dBm 时,最大相对偏差为 ± 5 dB;当 LO 功率达到 +5 dBm 及以上时,最大相对偏差不足 ± 1 dB。

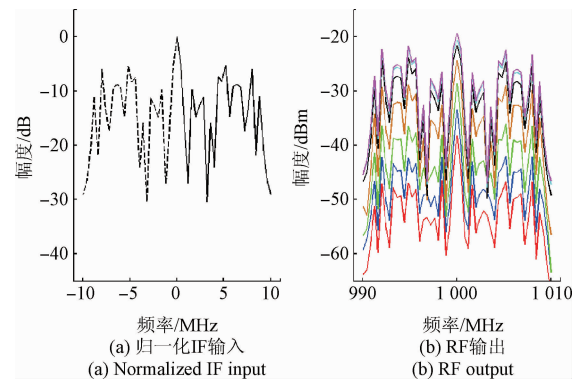


图6 幅频特性测量结果

Fig. 6 Results of magnitude-frequency characteristics measurement

图 7 所示为在不同的 LO 激励功率下,被测混频器的相频特性。与图 6 中的绝对幅度谱比较不同,图 7 给出的是 RF 相位谱与 IF 相位谱的差值,即上变频的“相位失真”。可以看到,当 LO 功率达到 +5 dBm 或以上时,全频段相位失真小于 $\pm 3^\circ$,大部分频点的失真集中在 $\pm 1^\circ$ 以内,呈现了比较理想的相位“上变频”特性;而当 LO 功率小于 +5 dBm 时,由于被测混频器不能工作在额定的工作状态,相位失真超过 $\pm 10^\circ$,甚至达到 $\pm 100^\circ$ 。这与幅度谱的失真情况保持高度一致。在不考虑转换损耗等因素的前提下,上述测量结果可以认定被测混频器在大于 +5 dBm LO 功率的情况下均能提供较好的上变频性能。相比之下,被测件技术指标所要求的“不小于 +10 dBm

LO 功率”工作条件更为严苛,以保证转换损耗等其他指标要求。

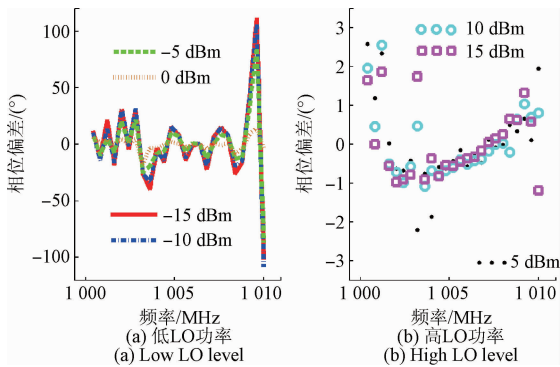


图 7 相频特性测量结果

Fig. 7 Results of phase-frequency characteristics measurement

基于上述幅度和相位谱测量结果,图 8 所示为被测混频器在不同 LO 激励功率下的时域波形重构结果。可以看到,当 LO 功率超过 +5 dBm 时,RF 输出波形开始呈现出较强的非线性失真(2 次谐波分量超过 -10 dBc, 3 次谐波分量超过 -15 dBc),表明被测混频器充分进入额定的“饱和”工作状态。该结果与图 6 和图 7 的现象保持一致,符合混频器的设计和工作原理。

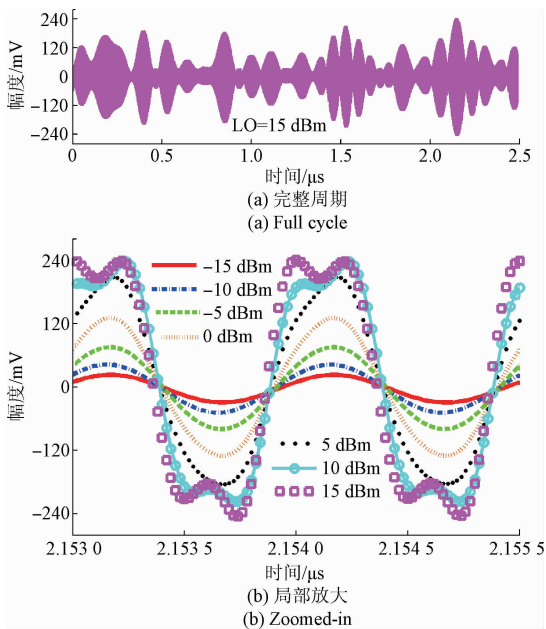


图 8 时域波形测量结果

Fig. 8 Results of time-domain waveforms

由于 NVNA 相位参考的作用是获得重复稳定的相位谱测量结果,因此除了上述基于混频器的测试验证外,图 9 专门给出了双相位参考 NVNA 实验装置对该被测件的重复测量结果,进一步验证“双相位参考”的有效性。根据

表 1 所示,两个相位参考的谱线功率均可超过 -20 dBm,从而提供较高的信噪比。100 次的重复测量表明,该装置的相位谱测量波动小于 $\pm 0.2^\circ$,远小于通常 $\pm 2^\circ$ 校准不确定度的影响,可以满足 NVNA 平台的测量要求。

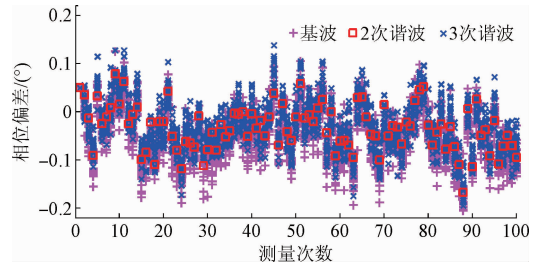


图 9 相位谱测量波动

Fig. 9 Fluctuation of phase spectrum measurements

4 讨 论

4.1 与现有方法比较

现有的混频器测量方法主要工作在“连续波”状态下,是一种最基本的稳态表征。其测试内容主要为变频损耗、三阶交调、群延迟等^[16-17],适用于描述正弦波变频的非通信状态,但不能直接反映混频器在真实“复杂调制”工作状态下的变频特性。

本文则在提出新的 NVNA 测量方法基础上,尝试将“调制+谐波”非线性测量技术应用到混频器表征,能够获得其在复杂调制状态下的宽带幅频、相频以及时域动态特性。该工作可作为对现有混频器表征方法的有效补充,为高峰均比的 5G 测试应用提供技术支撑。

4.2 硬件设备的选择和配置

为构建本文所提出的双相位参考 NVNA,负责信号测量的 VNA 主机模块需要在测试端口外提供额外的两个测量接收机。对于一般的双端口器件测试,如功率放大器,可采用一台 4 端口(8 个接收机) VNA 并如图 3 所示进行配置,此时共有 6 个接收机同时工作。如果该 VNA 主机支持外部信号(通过跳线)直接接入功能,则最多能够实现 3 端口器件的测试(须更改配置为 a_4 接收机测量主相位参考信号, b_4 接收机测量辅助相位参考信号)。

主相位参考信号 R_1 是实现多频段、高频谱分辨率相位测量的关键所在。理论上,该信号可以是任意幅度谱和相位谱的多频正弦。在实际应用中,推荐采用低峰均比的“等幅、Schroeder 相位关系”的多频正弦,从而在相同的信号源输出功率设置下获得较高的谱线功率,提高测量信噪比(5 ~ 10 dB)。

对于辅助相位参考 R_2 ,可以直接采用基于阶跃恢复二极管(step recovery diode, SRD)或非线性传输线(non-

linear transmission line, NLTL) 脉冲发生器, 在正弦波激励下获得丰富的“低频谱分辨率”谐波分量。此外, 在被测频段数量较少的情况下, 也可采用 VNA 内部的闲置信号源及频率参考, 通过合路的方式得到所需频率成分的辅助相位参考信号。

4.3 带宽和频谱分辨率

在不使用扩频模块的情况下, 商用矢量信号发生器目前能够提供的多频正弦载波频率最高为 44 GHz; 通过配置扩频模块, 主相位参考信号的载波频率可达到 110 GHz。与此同时, 商用 SRD 和 NLTL 脉冲发生器的谐波带宽可达 75 GHz。因此, 采用商用 VNA、矢量信号发生器、脉冲发生器构建本文所提出的双相位参考 NVNA 平台, 可以轻易地实现 44 GHz 的射频带宽, 并具备进一步拓展向 75 GHz 的技术潜力。

此外, 商用矢量信号发生器的内调制带宽普遍为 80 ~ 160 MHz, 配合高速任意波形发生器和外调制选件能够实现最高 2 GHz 的调制带宽。因此, 通过选择参数匹配的主、辅助相位参考信号发生设备, 能够直接实现 100 MHz ~ 2 GHz 的调制带宽测量, 并且(当 R_1 调制带宽大于等于 R_2 谐波分辨率时)具备 DC ~ 75 GHz 全频段连续覆盖的技术潜力。

采用商用矢量信号发生器自带的多频正弦发生模块, 能够直接获得最高 1 kHz 的频谱分辨率。若采用自定义基带 I/Q 方式, 理论上能够实现 Hz 级的高频谱分辨率测量。考虑到 5G 通信的子载波间隔为十几到几十 kHz, 本文所提技术方法能够充分满足当前的科学研究和工程测试需求。

4.4 测试对象

本文所提出的双相位参考 NVNA 能够为功率放大器和混频器提供“调制 + 谐波”非线性表征, 可用于器件建模、数字预失真、矢量信号校正等研究。如采用低频可至 kHz 的 VNA, 理论上能够进一步实现“基带 + 调制 + 谐波”复杂非线性测试, 从而对功率放大器和混频器的时频域特性进行完整测量。通过选用合适的主、辅助相位参考信号发生设备, 能够完成任意多频段(如 WCDMA + WIFI + LTE)复杂测试。

5 结 论

本文提出了一种基于双相位参考结构的 NVNA 改进方案, 采用一个“步进式”的多频正弦信号作为“主”相位参考, 以实现高频谱分辨率的多频段测量, 同时引入第 2 个低频谱分辨率的“辅助”相位参考提供各测量频段的相位同步。该方案所采用的两个相位参考信号均可以获得较高的谱线功率, 从而提高测量装置的相位谱测量信

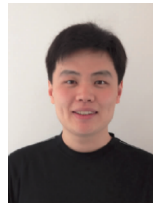
噪比。为了验证上述方案的有效性, 同时也为了拓展 NVNA 测量平台的应用范围, 本文采用混频器作为被测对象, 利用上述测量装置对其在复杂调制信号激励下的相位和谐波失真特性进行了测试分析。实验表明, 该方案可以获得超过 -20 dBm 的相位参考谱线功率, 提供波动小于 $\pm 0.2^\circ$ 的相位谱测量稳定度, 能够进行混频器在复杂调制状态下的失真特性分析。

参考文献

- [1] FEMANDEZ-BARCIELA M, PELAEZ-PEREZ A. Stretching the design: Extending analytical circuit design from the linear to the nonlinear domain [J]. IEEE Microwave Magazine, 2014, 15(6): 106-120.
- [2] 苟元潇, 傅佳辉, 林茂六, 等. 基于矢量测量的射频微波器件非线性参数化行为建模技术评述 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1319-1329.
GOU Y X, FU J H, LIN M L, et al. Review of nonlinear behavioral modeling for RF microwave devices based on vectorial measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1319-1329.
- [3] 林茂六. 射频微波功放器件非线性记忆效应测量与行为建模技术的新进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 113-122.
LIN M L. New progress on nonlinear measurement and behavioral modeling for RF power amplifiers with memory effects [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2): 113-122.
- [4] 孙金龙, 林茂六, 吴芝路, 等. 射频器件时域非线性行为建模综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1565-1573.
SUN J L, LIN M L, WU ZH L, et al. Summary of time-domain nonlinear behavioral modeling of RF devices [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1565-1573.
- [5] 于赫, 杨国辉, 林茂六, 等. 射频器件时域非线性行为建模综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 825-833.
YU H, YANG G H, LIN M L, et al. Characterization and behavioral modeling for mixed-signal systems-background, basic theory, measurement scheme and key technique [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(6): 825-833.
- [6] VAN MOER W, GOMME L. NVNA versus LSNA: Enemies or friends? [J]. IEEE Microwave Magazine, 2010, 11(1): 97-103.
- [7] MIRRA M, MARCHETTI M, TESSITOR F, et al. A multi-step phase calibration procedure for closely spaced multi-tone signals [C]. Microwave Measurement

- Conference (75th ARFTG), 2010: 1-5.
- [8] HU J, GARD K G, STEER M B. Calibrated non-linear vector network measurement without using a multi-harmonic generator [J]. IET Microwave, Antennas & Propagation, 2011, 5(5): 616-624.
- [9] ROLAIN Y, SCHOUKENS M, PINTELON R, et al. Synchronizing modulated NVNA measurements on a dense spectral grid [C]. Microwave Measurement Conference (79th ARFTG), 2012: 1-3.
- [10] VERBEYST F, BOSSCHE M, PAILLONCY G. Next generation comb generators for accurate modulated measurements [C]. Microwave Measurement Conference (81st ARFTG), 2013: 1-4.
- [11] 张亦弛, 黄见明, 何昭, 等. 基于相位谱测量的脉冲调制信号频域测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2508-2514.
- ZHANG Y CH, HUANG J M, HE ZH, et. Frequency-domain measurement technique for pulsed RF signals based on phase spectrum measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (11): 2508-2514.
- [12] ZHANG Y CH, GUO X T, HE ZH, et al. Characterization for multiharmonic intermodulation nonlinearity of RF power amplifiers using a calibrated nonlinear vector network analyzer [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64 (9): 2912-2923.
- [13] ZHANG Y CH, GUO X T, HE ZH, et al. Characterizing dual-band RF PAs using wideband synchronization and calibration techniques of nonlinear vector network analyzer [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(11): 3934-3945.
- [14] 张亦弛, 郭晓涛, 聂梅宁. 一种射频功放“谐波 + 互调”复杂非线性测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1158-1163.
- ZHANG Y CH, GUO X T, NIE M N, et al. A novel measurement technique for characterizing multi-harmonic inter-modulation nonlinearity of rf power amplifiers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 1158-1163.
- [15] REMLEY K A. Multisine excitation for ACPR measurements [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2003: 2141-2144.
- [16] 宋翔, 年夫顺. 基于矢量网络分析仪的混频器测试技术 [J]. 电子测量技术, 2011, 34(11): 113-117.
- SONG X, NIAN F SH. Measurement of mixer based on vector network analyzer [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(11): 113-117.
- [17] 黄志芳, 罗宏伟. 基于频谱仪和矢网的混频器变频损耗测量技术 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 85-87.
- HUANG ZH F, LUO H W. Frequency conversion loss measuring technology of mixer frequency meter based on spectrum instrument and vector network [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(11): 85-87.

作者简介



张亦弛(通讯作者),分别在2008年和2013年于哈尔滨工业大学获得学士学位和博士学位,现为中国计量科学研究院副研究员,主要研究方向为全波形计量和非线性矢量网络分析仪测量方法。

E-mail: zhangyichi@nim.ac.cn

Zhang Yichi (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 2008 and 2013, respectively. Now he is an associate research fellow in National Institute of Metrology. His main research interests include full waveform metrology and nonlinear vector network analyzer techniques.