

矢量调制误差测量影响因素分离方法研究

方宏, 周鑫, 刘科, 卞昕

(中国计量科学研究院 信息与电子所, 北京 100013)

摘 要: 提出一种基于多次测量数据解析求解的方法, 用于分离矢量信号发生器自带的调制误差和矢量信号分析仪的测量误差, 并通过数值仿真和实验测量对方法进行实施和验证。该方法不但可以提高矢量信号发生器和矢量信号分析仪的校准准确性和可靠性, 也为建立数字调制质量参数量值溯源体系提供了理论基础。

关键词: 矢量调制误差; 仪器校准; I/Q 不平衡; 矢量信号发生器; 矢量信号分析仪

中图分类号: TN98

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)07-0119-06

Study on method of distinguishing influence factors for vector modulation errors measurement

FANG Hong, ZHOU Xin, LIU Ke, BIAN Xin

(Division of Electronics and Information Technology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to distinguish between the intrinsic modulation errors of vector signal generator and the measurement errors of vector signal analyzer, a method based on experimental measurement and analytical calculation was proposed, then numerical simulation and actual measurement were presented for verification. This method can not only improve accuracy and reliability of calibration for vector signal generator and vector signal analyzer, but also provide some theoretical basis for the establishment of traceability in the measurement of digital modulation quality parameters.

Key words: vector modulation errors; instrument calibration; I/Q imbalance; vector signal generator; vector signal analyzer

1 引言

矢量调制信号是现代移动通信系统信息传输的主要载体, 在数字移动通信产品的研发和生产过程中, 必须使用矢量信号分析仪(VSA, vector signal analyzer)和矢量信号发生器(VSG, vector signal generator)分别对发射机和接收机部分进行测量和测试。要保证相关产品在研发和生产中得到准确、可靠的测量结果, 所使用测量仪器的准确度必须得到充分的保证。仪器校准的任务就是把仪器的测量量值通过不间断的溯源链溯源到国家标准所复现的量值上。根据目前我国对这 2 类仪器的校准规范^[1,2],

VSG 是使用一台作为标准的 VSA 对其发出的矢量信号进行校准, 同时, VSA 是使用一台作为标准的 VSG 对其测量准确度进行校准。对于矢量调制误差参数而言, 在校准 VSG 时, 假设作为标准的 VSA 对矢量调制误差的测量是准确的, 不存在测量误差; 同样, 在对 VSA 进行校准时, 假设作为标准的 VSG 发出的矢量信号是不存在矢量调制误差的, 此时 VSA 读出的矢量调制误差就是该分析仪的测量误差。然而, 这种假设在理论上是不完善的, 也是不符合实际的, 导致这种需要假设一方是理想的, 再对另一方进行校准的现状, 主要原因在于难以就 VSG 自带的调制误差和 VSA 的测量误差进行

收稿日期: 2011-06-07; 修回日期: 2011-12-23

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目(22-1113ZCKF-3)

Foundation Item: The National Key Technology R&D Program of China (22-1113ZCKF-3)

分离,在这种假设条件下,计量的准确性就会受到质疑,完善的量值溯源体系也无法搭建^[3]。

在数字调制质量参数的测量与量值溯源的研究方面,英国国家计量院(NPL, national physical laboratory)走在最前列,其提出完善数字调制质量参数量值溯源最终目标必须进行 2 方面的研究,一是对数字调制误差进行可溯源测量,二是准确分离 VSG 和 VSA 在数字调制误差测量过程中的影响。近年来 NPL 陆续报道了其使用实时数字示波器和采样示波器对 WCDMA 信号的数字调制误差进行可溯源测量的成果,取得的测量不确定度分别为 0.3%, 0.23% (置信区间为 95%)^[4-6]。随后捷克国家计量院也报道了他们利用采样示波器的可溯源测量系统^[7]。可溯源测量方法在一定程度上取得突破,使得第 2 方面的研究更显迫切,但目前尚未见文献报道。

本文首先根据 VSG 和 VSA 的原理进行理论建模,用一些特定系数来表征仪器特性,由此出发,基于多次测量数据求解出这些系数,从而达到分离 VSG 自带的调制误差和 VSA 的测量误差的目的。为验证本方法的自洽性和可执行性,文中从数值仿真和实验测量 2 方面对方法进行了实施和验证。

2 理论建模

在 VSA 或 VSG 的校准过程中,都是使用 VSG 发出矢量调制信号,输入 VSA 进行矢量解调和调制误差分析,仪器连接配置是一致的,因此对于理论建模而言也是一致的。

最重要的矢量调制误差参数是:幅度误差 (MagErr, magnitude error)、相位误差 (PhaseErr, phase error) 和误差矢量幅度 (EVM, error vector magnitude),其定义如图 1 所示。如果对所有符号的矢量调制误差进行均方根统计,可以得出均方根幅度误差 $MagErr_{RMS}$ 、均方根相位误差 $PhaseErr_{RMS}$ 和均方根误差矢量幅度 EVM_{RMS} ^[3]。

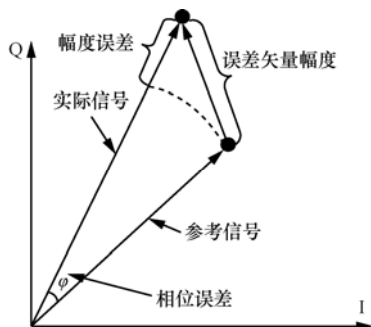


图 1 矢量调制误差定义

如图 2 所示为 VSG 采用的 I/Q 调制方式。理想情况下, I 路、Q 路在调制过程中的增益是一致的,且载波正交,即相差为 90° ,然而由于电路特性不能完全对称等因素的存在,实际 VSG 的 I、Q 2 路的增益并不能完全一致,载波相差也不严格等于 90° ^[8]。因此实际矢量调制信号可以用式(1)建模^[9]:

$$S(t) = I(t) \cos[2\pi f_c t + \bar{\varphi}/2] - \bar{g}Q(t) \sin[2\pi f_c t - \bar{\varphi}/2] \quad (1)$$

其中, $S(t)$ 为 VSG 输出的矢量信号, $I(t)$ 为 I 路信号, $Q(t)$ 为 Q 路信号, t 为时间变量, f_c 为载波频率, \bar{g} 为 VSG 自带的 I/Q 增益不平衡参数, $\bar{\varphi}$ 为 VSG 自带的 I/Q 相位不平衡参数。 \bar{g} 和 $\bar{\varphi}$ 是 VSG 不理想特性造成的,是未知参量。

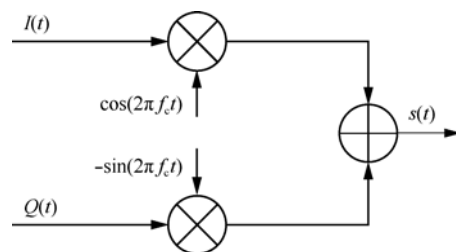


图 2 VSG 矢量调制

另外, VSG 都带有人为设置 I/Q 增益不平衡和 I/Q 相位不平衡参数的功能,如果设置 I/Q 增益不平衡为 g_i , I/Q 相位不平衡为 φ_i , 此处 g_i 和 φ_i 都是设置值,是已知参量。从均方根幅度误差和均方根相位误差的定义出发,通过大量数学推导可以得出^[9]:

$$MagErr_{RMSi}^* = \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_i}{2}\right)} \quad (2)$$

$$PhaseErr_{RMSi}^* = 45 - \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{\bar{g}g_i}\right) \quad (3)$$

VSA 在进行矢量调制误差测量和分析的过程中,会引入测量误差。对于幅度误差而言,由于放大器、衰减器等非线性器件的存在,引入的误差不仅仅是线性测量误差,还有随幅度变化而变化的非线性测量误差。对于相位误差而言,可以仅考虑线性测量误差。因此 VSA 的测量值可以按式(4)、式(5)进行建模:

$$MagErr_{RMS} = MagErr_{RMS}^* (1 + k_m) + \Delta MErr \quad (4)$$

$$PhaseErr_{RMS} = PhaseErr_{RMS}^* + \Delta PErr \quad (5)$$

其中, $MagErr_{RMS}^*$ 为根据式(2)计算的均方根幅度误

差, $MagErr_{RMS}$ 为相应的测量值。 $PhaseErr_{RMS}^*$ 为根据式(3)计算的均方根相位误差, $PhaseErr_{RMS}$ 为相应的测量值, k_m 为幅度误差的一阶非线性误差系数, $\Delta MErr$ 和 $\Delta PErr$ 分别为幅度误差和相位误差的线性

测量误差系数。 k_m 、 $\Delta MErr$ 和 $\Delta PErr$ 这 3 个参量是 VSA 不理想性造成的, 是未知参量。

将式(4)、式(5)代入式(6)中可求得 EVM 的均方根值^[10]:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{1 + (1 + MagErr_{RMS})^2 - 2(1 + MagErr_{RMS}) \cos(PhaseErr_{RMS} \pi / 180)} \quad (6)$$

3 基于多次测量结果解析求解的分离方法

对于 VSG, 在设置 g_i 和 φ_i 都为零的情况下, 由于 \bar{g} 和 $\bar{\varphi}$ 不为零, 导致输出矢量调制信号的调制误差不为零, 即 VSG 带有非零的初始调制误差。同时, 在 VSA 进行测量时, 会引入测量误差, 因此, 在 VSA 读出矢量调制误差时并不能直接分析出是 VSG 的初始调制误差, 还是 VSA 的测量误差引入的。这正是目前这 2 类仪器校准过程中不确定度的主要来源。在以上建模中本文将引起这些不确定度因素的主要参量进行了提取, \bar{g} 、 $\bar{\varphi}$ 、 k_m 、 $\Delta MErr$ 和 $\Delta PErr$ 5 个参量对于特定的仪器而言可以认为是常量, 接下来只要能准确求解出这些常量, 即可以分离 VSG 和 VSA 对矢量调制误差测量的影响。

设置 VSG 的 I/Q 增益不平衡参数分别为 g_1 、 g_2 , 通过 VSA 读出相应的相位误差均方根值 $PhaseErr_{RMS1}$ 、 $PhaseErr_{RMS2}$, 代入以下方程组:

$$PhaseErr_{RMS1} = 45 - \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{1}{\bar{g}g_1}\right) + \Delta PErr \quad (7)$$

$$PhaseErr_{RMS2} = 45 - \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{1}{\bar{g}g_2}\right) + \Delta PErr \quad (8)$$

将式(7)、式(8)进行解析求解, 可以求解出 \bar{g} :

$$\bar{g} = \frac{(g_1 - g_2) \pm \sqrt{(g_2 - g_1)^2 - 4 \tan^2(A) g_1 g_2}}{2 g_1 g_2 \tan(A)}$$

其中, $A = (PhaseErr_{RMS1} - PhaseErr_{RMS2}) \pi / 180$ 。求解出的 \bar{g} 表达式中出现双根的现象, 但根据该参数的实际物理意义, 可以将正号的根剔除, 仅保留负号的根。

将 \bar{g} 代入式(7), 可以求解出 $\Delta PErr$:

$$\Delta PErr = PhaseErr_{RMS1} - 45 + \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{1}{\bar{g}g_1}\right)$$

设置 VSG 的 I/Q 相位不平衡参数分别为 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 , 通过 VSA 读出相应的幅度误差均方根值

$MagErr_{RMS1}$ 、 $MagErr_{RMS2}$ 、 $MagErr_{RMS3}$, 代入以下方程组:

$$MagErr_{RMS1} = \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_1}{2}\right)} (1 + k_m) + \Delta MErr \quad (9)$$

$$MagErr_{RMS2} = \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_2}{2}\right)} (1 + k_m) + \Delta MErr \quad (10)$$

$$MagErr_{RMS3} = \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_3}{2}\right)} (1 + k_m) + \Delta MErr \quad (11)$$

将式(9)、式(10)、式(11)进行解析求解, 可以求解出 $\bar{\varphi}$:

$$\bar{\varphi} = 4 \arctan\left(\frac{\cos \frac{\varphi_1}{8} - C \cos \frac{\varphi_3}{8}}{\sin \frac{\varphi_1}{8} - C \sin \frac{\varphi_3}{8}}\right) - \frac{\varphi_2}{2}$$

$$\text{其中, } C = \frac{MagErr_{RMS1} - MagErr_{RMS2}}{MagErr_{RMS2} - MagErr_{RMS3}} \frac{\sin \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{8}}{\sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{8}}$$

将 $\bar{\varphi}$ 代入式(9)、式(10)可以求解出 k_m :

$$k_m = \frac{MagErr_{RMS1} - MagErr_{RMS2}}{\sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_1}{2}\right)} - \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_2}{2}\right)}} - 1$$

再将 $\bar{\varphi}$ 和 k_m 代入式(9)可以求解出 $\Delta MErr$:

$$\Delta MErr = MagErr_{RMS1} - \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\bar{\varphi} + \varphi_1}{2}\right)} (1 + k_m)$$

将求解出的 \bar{g} 、 $\bar{\varphi}$ 代入式(2)、式(3)、式(6), 可以计算出对应于任意设置参数 g_i 、 φ_i ($i, j=1, 2, 3, \dots$) 时由 VSG 引起的均方根幅度误差、均方根相位误差以及均方根误差矢量幅度。此时, 将 VSA 的测量值减去 VSG 引起的调制误差, 就得到 VSA

引起的调制误差。需要注意的是，对于 VSG 而言，通常需要关注的是其在 I/Q 增益不平衡和 I/Q 相位不平衡参数设置都为零时，仪器的残余不平衡量引起的矢量调制误差，即 $g_i=0$ 、 $\varphi_i=0$ 时 \bar{g} 、 $\bar{\varphi}$ 引起的矢量调制误差。对于 VSA 而言，因为存在非线性的测量误差，所以需要关注的是随 g_i 、 φ_i 变化的矢量调制误差的变化情况。

4 仿真验证

为验证上文提出方法的理论自洽性和准确性，设计数值仿真的方法进行验证。假设 VSG 由于不理想特性导致的自带 I/Q 增益不平衡和 I/Q 相位不平衡分别为 $\bar{\varphi}=2^\circ$ （代入公式时需要换算为弧度单位）、 $\bar{g}=0.1\text{dB}$ （代入公式时需要换算为线性单位）。并假设 VSA 测量误差系数分别为 $k_m=0.5$ 、 $\Delta MErr=0.002$ 和 $\Delta PErr=0.1^\circ$ 。以上这些数据是假定 VSG 和 VSA 仪器中固有的参量，对于实际仪器而言是未知的，但在数值仿真方法中可以进行预设。

模拟实际 VSG 中设置 I/Q 增益不平衡和 I/Q 相位不平衡参数分别为 $g_1=0.3\text{dB}$ 、 $g_2=1.8\text{dB}$ 和 $\varphi_1=2^\circ$ 、 $\varphi_2=6^\circ$ 、 $\varphi_3=10^\circ$ 。这些参数在使用实际仪器时是人为设置的，因此是已知量。

将以上参量输入搭建的数值仿真系统^[9]进行数字调制、解调仿真计算，可以仿真计算出 VSA 测得的

矢量调制信号星座图（如图 3 所示，其中，空心圆为参考星座点）以及矢量调制误差值（如表 1 所示）。

将设置的仿真参数 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 g_1 、 g_2 以及计算出 VSA 的测量结果 $PhaseErr_{RMS1}$ 、 $PhaseErr_{RMS2}$ 、 $MagErr_{RMS1}$ 、 $MagErr_{RMS2}$ 、 $MagErr_{RMS3}$ 代入上文提出的分离方法中，求解方程组(7)~(11)，可以求解出 $\bar{\varphi}=2^\circ$ 、 $\bar{g}=0.1\text{dB}$ 、 $k_m=0.5$ 、 $\Delta MErr=0.002$ 和 $\Delta PErr=0.1^\circ$ ，与之前预设的值完全一致，从而证明了本方法的自洽性和准确性。

表 1 仿真计算得出 VSA 的测量结果

测量参数	测量结果
$MagErr_{RMS1}$	5.44%
$MagErr_{RMS2}$	10.67%
$MagErr_{RMS3}$	15.9%
$PhaseErr_{RMS1}$	1.42°
$PhaseErr_{RMS2}$	6.32°

基于求解出的 VSG 和 VSA 的相关参量，本文可以对任意设置的参数 g_i 、 φ_i ($i, j=1, 2, 3, \dots$) 分离 VSG 和 VSA 对调制误差测量的影响。图 4~图 6 显示分别给出了由 VSG 和 VSA 引入的均方根幅度误差、均方根相位误差和均方根误差矢量幅度分量，图中重点给出了 $g_i=0$ 、 $\varphi_i=0$ 时 VSG 引入的矢量调制误差值。

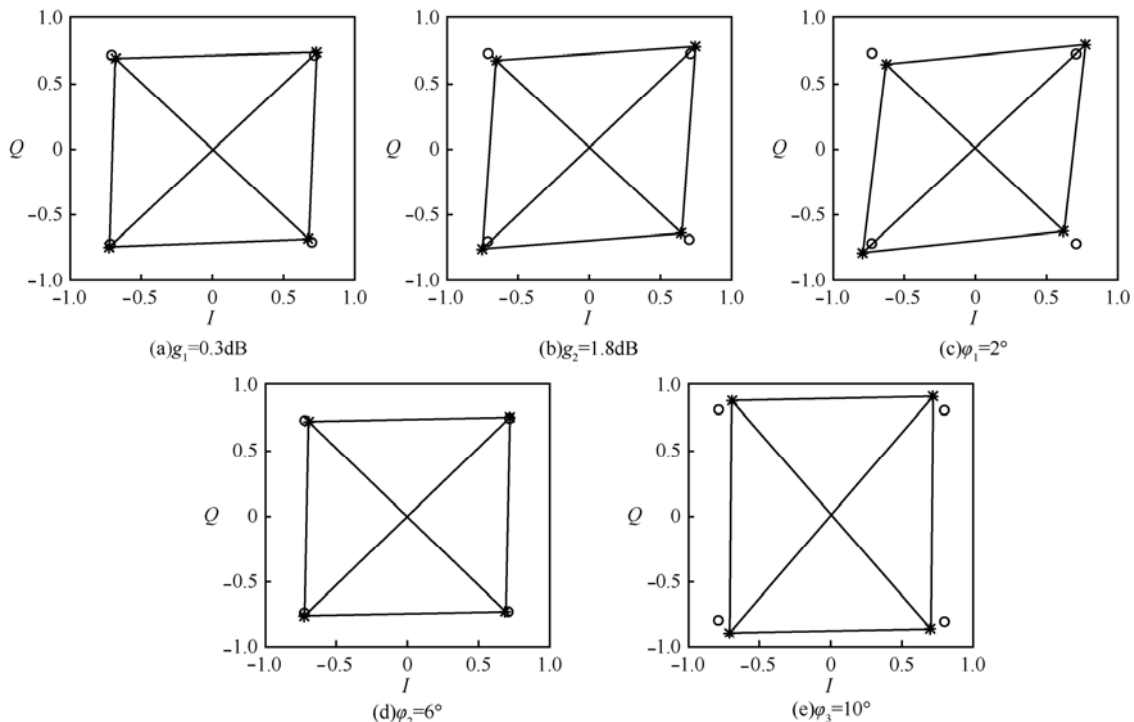


图 3 仿真得出 VSA 解调后的矢量信号星座图

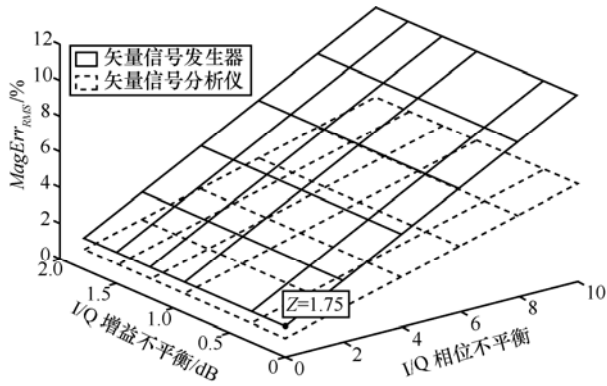


图 4 分离后的均方根幅度误差

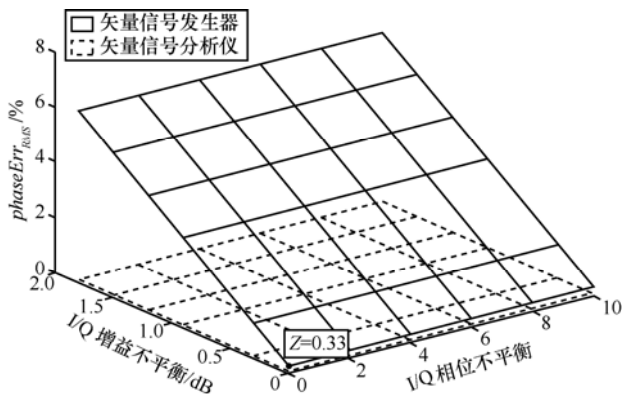


图 5 分离后的均方根相位误差

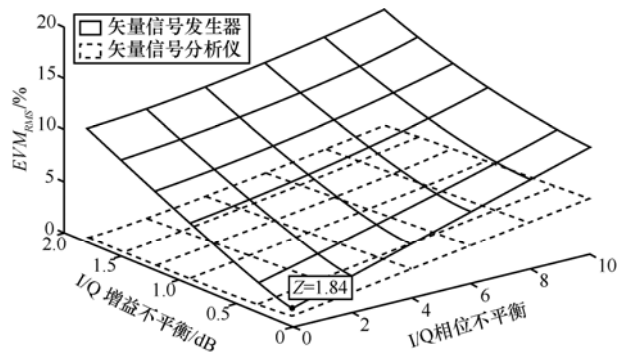


图 6 分离后的均方根矢量误差幅度

5 实验测量与分析

搭建实际测量系统，使用安捷伦公司 (Agilent) 的 E4438C 进行矢量信号调制，使用 Agilent 的 E4445A 结合 89600VSA 软件作为 VSA 对矢量信号进行解调和调制误差参数的计算。设置基本调制解调参量如下：矢量调制方式为 QPSK，载波频率为 1GHz，信号电平幅度 -10dBm，码率 3.84Mbit/s，成形滤波器和匹配滤波器设置为根升余弦滤波器，参考滤波器设置为升余弦滤波器，滚降系数 $\alpha=0.22$ 。

此时 VSG 的自带不平衡参量 \bar{g} 、 $\bar{\varphi}$ ，以及 VSA

的测量误差参数 k_m 、 $\Delta MErr$ 和 $\Delta PErr$ 都是未知的，要就 VSG 和 VSA 对矢量调制误差测量的影响进行分离关键在于确定出这些未知参量。

根据上文所示方法在 VSG 中先后设置 I/Q 增益不平衡和 I/Q 相位不平衡参数分别为 $g_1=0\text{dB}$ 、 $g_2=1.8\text{dB}$ 和 $\varphi_1=0^\circ$ 、 $\varphi_2=5^\circ$ 、 $\varphi_3=10^\circ$ 。用 VSA 分别读出相应的测量结果，如表 2 所示。

表 2 仿真计算得出 VSA 的测量结果

测量参数	测量结果
$MagErr_{RMS1}$	0.30%
$MagErr_{RMS2}$	5.32%
$MagErr_{RMS3}$	10.33%
$PhaseErr_{RMS1}$	0.13°
$PhaseErr_{RMS2}$	6.03°

根据上文方法求解方程组(7)~(11)。可以求解出 $\bar{\varphi}=0.1^\circ$ 、 $\bar{g}=0.01\text{dB}$ 、 $k_m=0.15$ 、 $\Delta MErr=0.002$ 和 $\Delta PErr=0.1^\circ$ 。此时，与上文中叙述类似，可以对任意设置的参数 g_i 、 φ_i ($i, j=1, 2, 3, \dots$) 分离 VSG 和 VSA 对矢量调制误差测量的影响，并将分别由 VSG 和 VSA 引入的矢量调制误差进行作图显示，由于文章篇幅所限，此处省略。

特别地，对于本次实验中使用的 VSG，在参数 $g_i=0$ 、 $\varphi_i=0$ 时，VSA 的测量值为 $EVM_{RMS}=0.38\%$ 、 $MagErr_{RMS}=0.30\%$ 、 $PhaseErr_{RMS}=0.13^\circ$ 。经过本文提出方法的分离，得知，其中由 VSG 引入的矢量调制误差分别为 $EVM_{RMS}^{VSG}=0.10\%$ 、 $MagErr_{RMS}^{VSG}=0.09\%$ 、 $PhaseErr_{RMS}^{VSG}=0.03^\circ$ ，由 VSA 引入的矢量调制误差分别为 $EVM_{RMS}^{VSA}=0.28\%$ 、 $MagErr_{RMS}^{VSA}=0.21\%$ 、 $PhaseErr_{RMS}^{VSA}=0.10^\circ$ 。

6 结束语

本文提出了一种分离 VSG 和 VSA 对矢量调制误差测量影响的方法。该方法基于设计测量参数进行多次测量，并将测量结果代入本文提出的解析公式中进行求解，从而得出 VSA 自带的 I/Q 不平衡参数和 VSA 的测量误差参数。这些参数的确定对于 VSG 和 VSA 相关参量的校准有非常重要的意义。例如，在校准 VSA 时，目前假定作为标准的 VSG 是理想的，即在 I/Q 不平衡设置为零的情况下，所发出的矢量调制信号的调制误差为零，此时被校准的 VSA 测得的矢量调制误差都认为是 VSA 的测量

误差,这种评价方法是严重缺乏理论依据的,因为作为标准的VSG必定带有一些I/Q不平衡。使用本文提出的方法,可以将VSG的影响准确地分离出来,此时才可以准确地对VSA进行校准,同理在VSG的校准中也是如此。本方法提升了对数字移动通信产业的计量保障能力,也为之后数字调制质量参数量值溯源体系的完善奠定了必要的理论基础。

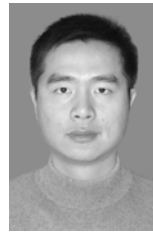
参考文献:

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1174-2007 矢量信号发生器校准规范[S].
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P.R.C. JJF1174-2007 Calibration Specification for Vector Signal Generators[S].
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1128-2004 矢量信号分析仪校准规范[S].
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P.R.C. JJF1128-2004 Calibration Specification for Vector Signal Analyzers[S].
- [3] 吴幼璋, 赵海宁, 于汇东等. 数字调制质量参数的校准和量值溯源[J]. 计量学报, 2005, 26(3): 271-274.
WU Y Z, ZHAO H N, YU H D, *et al.* Calibration and traceability for digital modulation quality parameters[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(3): 271-274.
- [4] HUMPHREYS D A, DICKERSON R T. Traceable measurement of error vector magnitude (EVM) in WCDMA signals[A]. International Waveform Diversity & Design Conference[C]. Pisa, Italy, 2007. 270-274.
- [5] HUMPHREYS D A, MIALL J. Traceable RF peak power measurements for mobile communications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 680-683.
- [6] HUMPHREYS D A. Vector measurement of modulated RF signals by an in-phase and quadrature referencing technique[A]. IEE Proceedings Science, Measurement & Technology[C]. Stevenage, United Kingdom, 2006. 210-216.
- [7] HUDLICKA M. Laboratory system for a traceable measurement of error vector magnitude[A]. Proceedings of the 39th European Microwave Conference[C]. 2009. 934-937.
- [8] 孙德春, 张霏霏, 刘祖军. TDD-MIMO 系统中由 I/Q 不平衡引起的信道非互易性补偿方法[J]. 通信学报, 2011, 32(3): 79-85.

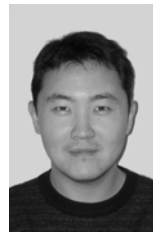
SUN D C, ZHANG F F, LIU Z J. Compensation for channel non-reciprocity caused by I/Q imbalance in TDD-MIMO systems[J]. Journal on Communications, 2011, 32(3): 79-85.

- [9] FANG H, BIAN X, ZHOU X, *et al.* The numerical simulation and experiment research for measurement of error vector magnitude (EVM)[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 103(25): 199-204.
- [10] MCKINLEY M D, REMLEY K A, MYSLINSKI M. EVM Calculation for broadband modulated signals[A]. ARFTG Microwave Measurements Conference[C]. 2004. 45-52.

作者简介:



方宏(1982-),男,江西上饶人,博士,中国计量科学研究院信息与电子所助理研究员,主要研究方向为现代移动通信关键参量计量。



周鑫(1980-),男,北京人,硕士,中国计量科学研究院信息与电子所助理研究员,主要研究方向为现代移动通信关键参量计量。



刘科(1981-),男,河南济源人,博士,中国计量科学研究院信息与电子所助理研究员,主要研究方向为无线电计量和医学计量。



卞昕(1974-),男,吉林省吉林市人,博士,中国计量科学研究院信息与电子所副研究员,主要研究方向为无线电计量和医学计量。