

# 任意波形发生器在调制度比对中的应用

梁桂海

(西南电子技术研究所 成都 610036)

**摘要:**调制度分析仪的量值溯源一般通过调制度比对实现。调制度比对中,参与比对的调制度分析仪测量同一台信号源产生的调幅调频信号并比对调制度准确度、调制失真和剩余调制的测试结果的差异。调制度比对对信号调制度的稳定性和调制失真要求极高。使用 MATLAB 编程产生调幅调频信号的波形数据,再通过高性能的任意波形发生器播放该波形数据,可以得到高性能调幅调频信号。实验证明,该方法产生的调幅调频信号调制度稳定性小于 0.5%,调幅失真小于 0.3%,调频失真小于 0.1%,剩余调幅小于 0.01%,剩余调频小于 1 Hz。利用任意波形发生器产生调幅调频信号,其性能较传统的模拟调幅调频测试源更优,完全满足调制度比对的要求。

**关键词:**任意波;调制度;量值溯源;比对

**中图分类号:** TN98    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Application of arbitrary waveform generator in modulation comparison

Liang Guihai

(Southwest Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** The quantity traceability of the modulation analyzer is achieved by modulation comparison. During modulation comparison, the modulation analyzers measure the AM and FM signals generate by the same signal generator, and the differences of modulation accuracy, modulation distortion and residual modulation are compared. An AM and FM test source with very stable modulation quantity and extremely low modulation distortion is needed. We can get a high performance AM and FM signal by using Matlab generates AM and FM waveform data and then using a high performance arbitrary waveform generator to playbacks it. Experiments show that the modulation stability of the signal is less than 0.5%, the distortion of AM is less than 0.3%, the distortion of FM is less than 0.1%, the residual AM is less than 0.01% and the residual FM is less than 1 Hz. The performance of the AM and FM signal generates by arbitrary waveform generator is better than that generates by traditional analog AM and FM test source, and it fully meets the requirements of modulation comparison.

**Keywords:** arbitrary waveform generator; modulation; quantity traceability; comparison

### 1 引言

调制度计量是无线电计量的一个重要项目,包含调幅度、调频频偏、调相相偏和调制失真等参数。调制度标准装置一般使用调制度分析仪作为主标准器。目前,各级计量机构使用的主流调制度分析仪如 8901B、N5530S 和 FSMR 等,调制度测量最大允许误差均为 1%。调制度分析仪的溯源需要通过比对来实现,国内多家计量技术机构研制了调制度比对的自动测试系统<sup>[1-2]</sup>。在调制度比对系统中,需要用到调制度量值稳定,失真度极小的调幅调频

测试源,现有的调制度比对系统多使用惠普公司生产的 11715A 调幅调频测试源,该仪器已经停产多年,且无替代产品,一旦该仪器发生故障,将对调制度比对产生严重影响。为了寻找一款性能指标满足调制度比对要求的信号源,对主流厂家的多种合成信号源和函数信号源进行了指标分析和性能验证,结果均未满足使用要求。最后,将研究目标锁定在任意波形发生器上。经过对任意波形发生器的工作原理和性能指标分析,发现使用高性能的任意波形发生器,结合适当的调幅调频信号产生算法,可以产生满足调制度比对所需的调幅调频测试信号,而且其性能

较传统的模拟调幅调频测试源更优。

## 2 任意波形发生器原理和性能分析

任意波形发生器又叫任意函数发生器,它是一种数字合成函数发生器,可以通过软件产生各种函数、噪声、脉冲串和调制信号。

任意波形发生器一般包含采样时钟信号产生单元、地址产生单元、波形存储单元、数模转换单元、信号整形单元和处理器系统等<sup>[3-5]</sup>,其原理示意如图1所示。

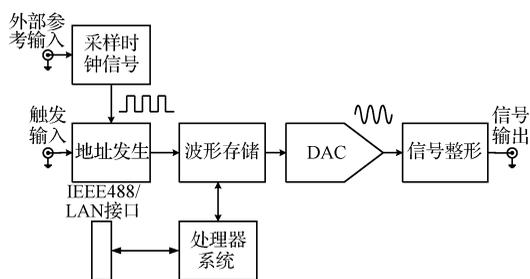


图1 任意波形发生器原理示意

图1中,采样时钟信号产生单元选择参考源,产生采样时钟信号,供地址产生单元和数模转换单元使用;地址产生单元在时钟信号的控制下,产生波形存储单元的读取地址;波形存储单元负责存储事先编写好的波形数据,在地址产生单元的驱动下,输出波形数据至数模转换单元;数模转换单元将波形存储单元送来的波形数据转换为电压信号;信号整形单元负责将数模转换单元输出的波形进行必要的滤波和放大。

任意波形发生器的关键指标有采样率、波形存储深度和数模转换分辨率等。针对调制度比对的技术要求,需对任意波形发生器的选择进行分析。

调制度比对中,需要使用的最高信号频率为1 GHz。根据奈奎斯特定理,为完整保留原始信号的信息,在数模转换中,采样率应大于信号最高频率的2倍,即:

$$f_s \geq 2 \times f_{\max} \quad (1)$$

在工程实践中,一般取采样率为信号最高频率的2.5~4倍,因此,任意波形发生器的最大采样频率应大于2.5 GS/s。

在调制度比对中,需要进行调制频响的测试,调制频率在20 Hz~100 kHz之间。当调制频率取20 Hz时,调制波的周期最大,为50 ms。考虑到调制频响一般在100 MHz载波频率上测试,则相应的采样率为400 MS/s,调制波一个周期对应的采样点数为:

$$P = 400 \text{ MS/s} \times 50 \text{ ms} = 50 \text{ MS} \quad (2)$$

因此,任意波形发生器的波形存储深度应大于20 MS。

在调制度比对中,还要求用于测试从信号自身有极低的失真。任意波形发生器采用数字方式对信号幅度进行量化,量化误差会引起信号的失真。量化字长越长,失真

越小<sup>[6]</sup>。常见的任意波形发生器中,量化字长有8位、12位和14位。采样何种字长能满足调制度比对信号失真的要求需要用实验验证。

## 3 模拟调制波形产生方法

### 3.1 任意波形发生器的基本使用方法

任意波形发生器一般不能单独使用,需要相关的软硬件配合。典型的任意波形发生器使用配置如图2所示。

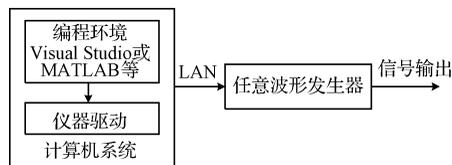


图2 任意波形发生器使用配置

计算机系统和任意波形发生器通过LAN口连接。计算机上运行Visual Studio或MATLAB等编程软件,根据输入的参数,编程产生所需的波形数据。然后调用仪器驱动程序,将波形数据传输至任意波形发生器,并通过驱动程序控制任意波形发生器的采样率、幅度和开关等。

### 3.2 调幅信号产生方法

调幅信号的表达式如式(3)所示:

$$u_{AM}(t) = U_{cm}(1 + m_a \cos(\Omega t)) \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

式中: $m_a$ 为调幅度; $\Omega$ 为调制角频率; $\omega_c$ 为载波角频率。

由式(1)可知,调幅信号的周期与调制信号的周期一致。只需产生一个周期的调幅信号,通过任意波形发生器循环播放,即可得到连续的调幅信号。

### 3.3 调频信号产生方法

调频信号的表达式如式(4)所示:

$$u_{FM}(t) = U_{cm} \cos(\omega_c t + M_f \sin(\Omega t)) \quad (4)$$

式中: $M_f$ 为调频指数; $\Omega$ 为调制角频率; $\omega_c$ 为载波角频率。

由式(4)可知,调频信号的周期与调制信号的周期一致。只需产生一个周期的调频信号,通过任意波形发生器循环播放,即可得到连续的调频信号。

## 4 指标验证

### 4.1 验证方法

调制度指标测量精度最好的方法是频谱仪法<sup>[7-9]</sup>。R&S公司的FSMR测量接收机是一款基于频谱仪的测量接收机,其调制度指标十分优秀。本文使用FSMR接收机对任意波形发生器产生的调幅调频信号指标进行验证,测试结构示意图如图3所示。计算机控制任意波形发生器产生待测信号,并连接至测量接收机FSMR射频输入口,FSMR直接读出调幅度准确度、调频频偏准确度、调制

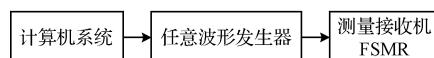


图3 验证测试结构示意图

失真和剩余调制等参数的测量结果。

#### 4.2 调制失真和剩余调制指标验证

使用量化字长为 8 位、12 位和 14 位的 3 种任意波形发生器,产生载波频率为 12.5 MHz,调幅度为 40%,调制频率为 50 Hz、1 kHz 和 100 kHz 3 种调幅信号,用 FSMR 测量它们的调幅失真,结果如表 1 所示。

表 1 调幅失真测量结果

量化字长/位	调制频率/Hz	调幅失真/%
8	50	0.36
8	1 k	0.42
8	50 k	0.38
12	50	0.17
12	1 k	0.22
12	50 k	0.19
14	50	0.16
14	1 k	0.20
14	50 k	0.19

使用 3 种任意波形发生器,产生载波频率为 100 MHz,调频频偏为 40 kHz,调制频率为 50 Hz、1 kHz 和 100 kHz 3 种调频信号,用 FSMR 测量它们的调频失真,结果如表 2 所示。

表 2 调频失真测量结果

量化字长/位	调制频率/Hz	调频失真/%
8	50	0.12
8	1 k	0.11
8	50 k	0.13
12	50	0.09
12	1 k	0.08
12	50 k	0.06
14	50	0.08
14	1 k	0.08
14	50 k	0.04

使用 3 种任意波形发生器,分别产生频率为 12.5 MHz 的正弦波,用 FSMR 测量它们的剩余调幅,结果如表 3 所示。

表 3 剩余调幅测量结果

量化字长/位	剩余调幅/%
8	0.017
12	0.004
14	0.005

使用 3 种任意波形发生器,分别产生频率为 560 MHz 的正弦波,用 FSMR 测量它们的剩余调频,结果如表 4 所示。

表 4 剩余调频测量结果

量化字长/位	剩余调频/Hz
8	1.24
12	0.122
14	0.108

从以上数据可见,使用 8 位量化字长的任意波形发生器,调幅失真  $> 0.3\%$ ,调频失真  $> 0.1\%$ ,剩余调幅  $> 0.01\%$ ,剩余调频  $> 1$  Hz,不满足调制度比对的要求,而 12 位和 14 位量化字长的任意波形发生器均满足要求。后续调制度准确度的验证使用 12 位量化字长的任意波形发生器进行。

#### 4.3 调幅指标验证

设定载波频率为 12.5 MHz,不同调制频率和调幅度的测试结果如表 5 所示。

表 5 调幅准确度测试结果

调制频率/Hz	调幅度标称值/%	调幅度测量值/%
1 k	5	5.035
1 k	50	50.1
1 k	99	98.9
50	80	80.0
1 k	80	80.0
100 k	80	80.1

所有设定不变,仪器不关机,经过 8 h 后,重新测试,测试结果如表 6 所示。

表 6 第二次调幅准确度测试结果

调制频率/Hz	调幅度标称值/%	调幅度测量值/%
1 k	5	5.045
1 k	50	50.1
1 k	99	98.8
50	80	80.0
1 k	80	80.0
100 k	80	80.0

从以上数据可见,任意波形发生器产生的调幅信号,调幅度准确度由于 1%,调幅度稳定度由于 0.5%。

#### 4.4 调频指标验证

设定载波频率为 100 MHz,不同调制频率和调频频偏的测试结果如表 7 所示。

表 7 调频准确度数据

调制频率/Hz	频偏标称值/kHz	频偏测量值/kHz
1 k	1	1.003
1 k	40	40.0
1 k	400	400.1
50	100	100.2
1 k	100	100.2
100 k	100	100.2

所有设定不变,仪器不关机,经过 8 h 后,重新测试,测试结果如表 8 所示。

表 8 第二次调频准确度测试结果

调制频率/Hz	频偏标称值/kHz	频偏测量值/kHz
1 k	1	1.008
1 k	40	40.1
1 k	400	400.2
50	100	100.1
1 k	100	100.1
100 k	100	100.1

从以上数据可见,任意波形发生器产生的调频信号,调频频偏准确度优于 1%,调频频偏稳定度优于 0.5%。

## 5 结论

研究表明,利用 2.5 GS/s 采样率、20 MS 存储深度和 12 位量化字长的任意波形发生器,可以产生调制失真和剩余调制极小的调幅调频信号,其调幅度和调频频偏的准确度和稳定度指标也十分优秀,完全满足了调制度比对的需要。本单位利用任意波形发生器替换原有 11715A 调

幅调频测试源,连续两年进行西南地区调制度分析仪比对,取得良好的效果。为了提高比对的效率,减少比对所需的时间,降低人员的测量结果的干扰,需要将任意波形发生器与原有调制度比对的自动测试系统进行集成。

## 参考文献

- [1] 胡勇. 调制度自动比对系统的建立[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(2): 35-41.
- [2] 阮滨, 赵海鹰, 黄全胜. 调制度测量仪自动鉴定系统[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(2): 23-24.
- [3] 冯煦, 钟卫, 胡亮, 等. 基于 DDS 的多调制功能正弦信号发生器[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(1): 39-41.
- [4] 刘柯, 童子权, 李德青. 基于 AD9954 的双路高速调制信号源的设计[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(1): 48-50.
- [5] 赵艳朝, 江修富, 许斌, 等. 基于 AD9954 实现多种调制信号平台[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(6): 58-61.
- [6] 何梓滨, 蒋方亮, 柏向春. 超低频信号测量中 ADC 系统的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(增刊): 75-79.
- [7] 梁志国, 孙宇. 调制度测量仪的一种精确评价方法[J]. 计量技术, 2006(7): 20-23.
- [8] 詹志强, 来磊, 石雷兵. 频谱分析仪测量模拟调制准确度[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(增刊 1): 13-17.
- [9] 王景明. 两种精确测量调频频偏的新方法[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(3): 19-23.

## 作者简介

梁桂海, 1982 年出生, 工学学士, 工程师, 主要研究方向为时间频率计量、无线电计量和卫星导航产品测试等。  
E-mail: 13308215107@189.cn