

# 通信及通信对抗信号产生新方法

刘 勇 白俊辉

中国船舶重工集团武汉船舶通信研究所 (430079)

**摘 要:** 本文论证任意波形发生器的原理、特点和相关波形生成理论; 并介绍 AWG 在通信及通信对抗应用情况, 经实际使用验证 AWG 是产生通信和通信对抗信号的非常灵活、有效的新方法。

**关键词:** 通信信号 通信对抗 AWG

## The new method of generating Communication and Communication Antagonize Signal

**Abstract:** In this article we demonstrate the principle and character of arbitrary wave generator, the theory of correlative wave generation; Introduce the application of AWG in communication and communication antagonize. According to the practical application it is validated that AWG is a flexible and effective new method to generate communication and communication antagonize signal.

**Keywords:** communication signal, communication antagonize, AWG

### 信号产生需求

在通信产品研制和通信对抗试验中, 经常需要产生特定的信号, 如复杂调制信号、背景多路信号、跳频信号、扩频信号、线性调频信号等, 这些信号用普通信号源难以产生, 而研制专门的信号源受经费、技术状态等各种因素影响, 往往无法实现, 同时专门的信号源功能上受限制, 不能做到通用化设计, 满足不同使用的要求。

借助于软件无线电的思想, 采用通用的硬件平台, 采用更换软件的方法能完成各种特定信号的生成, 任意波形发生器 (以下简称 AWG) 就是按照这种思路设计的信号源。

### AWG 工作原理

#### 1 AWG 组成

AWG 组成框图如图 1 所示, 主要由采样时钟发生器、地址发生器、波形存储矩阵、高速 D/A、低通滤波组成。Tektronix 的 AWG 配置了大硬盘、CPU 和程控接口等组成, AWG 等效于高速 DAC 加上配套的外围器件和计算机系统。

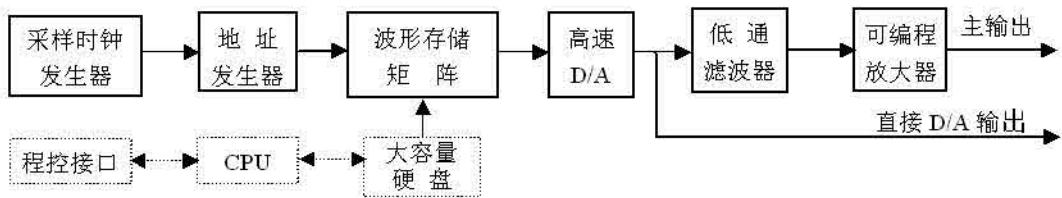


图 1 AWG 组成框图

AWG 产生信号的质量由高速 D/A 的采样率、垂直分辨率、波形存储长度、时钟质量等因素决定，同时随机提供的软件及计算机系统决定了使用的方便性和设备功能，高性能的 AWG 离不开计算机系统和配套软件。

多数 AWG 具有序列地址控制功能，波形存储器可以分段工作，因此 AWG 能执行序列功能。序列功能对复杂的时变多路信号、复杂调制信号的生成非常有用。

## 2 高性能 AWG 状况

通信和通信对抗信号生成所需的 AWG 性能一般都比较高，5 年前的 AWG 难以满足需求，最近几年由于 DAC 技术和计算机技术的高速发展带动 AWG 技术的发展，能很好地满足复杂信号产生的需要。其中 AWG 指标以 Tektronix 产品最好，表 1 为主要高性能 AWG 的主要性能。

表 1 高性能 AWG 主要性能

型号	通道	存储器(M)	采样率/带宽 MHz	垂直分辨率	SFDR (dB)	相位噪声 偏置 10kHz	序列长度	频率精度	备注
AWG420	2	2*16	200/80	16bit	74@100MS/s	-84dBc/Hz	8K	2ppm	PC 系统
AWG2021	2	2*0.256	250/100	12bit	66		8K	50ppm	PC 系统
AWG520	2	2*4	1000/400	10bit	53(DC-400MHz)	-90dBc/Hz	8K	1ppm	PC 系统
AWG610	1	8	2600/710	8bit	50(DC-800MHz)	-90dBc/Hz	8K	1ppm	PC 系统
AWG710	1	32	4000/2000	8bit	50(DC-1GHz)	-85dBc/Hz	8K	1ppm	PC 系统
33250A	1	0.064	200/80	12bit			无	1ppm	台式
LW420	2	2*0.256	400/100	8bit				3ppm	台式

Tetronix 的 AWG 具有以下特点来满足多种需求：

- 可编程、本机提供多种编辑手段：可产生各种调制信号和复合信号；
- 序列功能：信号切换时间短（ns 级），可产生高速跳频信号和扩频信号；
- DA 垂直分辨率高：可同时产生多路通信信号或信号质量要求高的信号；
- 提供多种对外接口：可通过硬盘、软盘、网络、GPIB 口传送数据，可结合其它编辑手段满足及其复杂和特殊信号产生的需要；
- 外时钟接口：提高频率输出准确度，满足高频率准确度信号生成要求；
- 长内存：适于产生更高频率分辨率信号或更长时间信号。

## 3 编辑功能

每种 AWG 提供的编辑功能不同，AWG 主要编辑功能有：

a)图形编辑法。直接由点或一段波形来描述输出图形，适合于时域波形输出。

b)方程式编辑法。方程式编辑可直接利用输入的数学公式计算得到 D/A 转换器的波形数据，由于数学公式书写的灵活性，这种编辑方法特别适合于频域描述以及能够用数学公式表达的波形。

c) FFT 编辑法。FFT 编辑器可编辑每个信号的频谱，如频谱的频率值、幅度值和相位值，这种编辑方法也适合于频域描述。

d)计算机编辑法。作为系统应用，采用计算机操作编辑法可结合图形编辑法、方程式编辑法、FFT 编辑法的优点，这是一种更利于产生复杂的多路信号的方法。它是利用外部开发的程序对波形数据进行计算，然后将数据通过外部高速接口传送到多路信号产生器的存贮单元中，并可以利用序列功能将多个波形连接成复杂的信号。

#### 4 PC 系统及接口

AWG 本机配备标准 PC 系统对提高 AWG 功能作用非常大，PC 系统能提供良好的操作界面，多种编辑功能和多种接口，如网络口、488 接口、键盘接口等，可以方便地将外部数据通过这些接口转送到 AWG，同时可以将 TDS 示波器采集到的波形通过 IEEE488 接口转送到 AWG 进行回放，重现现场的实际信号。

Matlab 是目前广泛应用的仿真软件，这一类仿真软件产生的数据经过一定的格式变换通过网络接口直接传送到 AWG，可以输出所需波形进行验证，大大加强仿真的可实现性。

## 信号生成相关理论

信号生成质量通常采用信号最高频率、频率分辨率、SFDR（无寄生动态范围）、频率捷变时间等来评价。AWG 的最高采样率、波形存储器长度、垂直分辨率、时钟等决定信号产生的质量。

### 1 信号最高频率与采样时钟

AWG 产生信号的最高频率主要由取样速率决定，理论上取样速率  $f_s$  与信号最高频率  $f_{max}$  之比大于 2 即可行。DAC 输出由于 S/H 电路存在一个频率=取样速率-信号最高频率的镜像，S/H 同样引起信号频谱的 sinc 加权。通常采用模拟滤波器滤除镜像频率。但在奈奎斯特频率附近，由于传输带宽非常接近镜像带宽，无法用滤波器滤除，因此这个折叠信号影响所需信号的信噪比。

在工程实现过程中，通常选用  $f_s$  与  $f_{max}$  为 2.5~3，其关系如式（1）所示。这样折叠信号与所需产生的信号之间存在较宽的保护频带，可以用滤波器滤除无用的折叠信号，保留所需信号。

$$f_{max}=f_s / (2.5\sim 3) \quad \text{式（1）}$$

AWG 采用数字信号表示频率，因此在作为频率捷变信号产生时的变换时间在单个时钟周期完成，频率捷变时间  $\Delta t$  如（式 2）所示：

$$\Delta t=1/f_s \quad \text{式 (2)}$$

## 2 频率分辨率与波形存储长度

要保证信号的质量、降低杂散，表示的信号必需是整数个周期，因此内存必须表征信号长度的整数倍。当要产生多个信号时，所有信号都必须是整数个周期。

波形存储器的容量  $L$  和  $f_s$  决定了输出波形的分辨率  $f_b$ ，其关系如式 (3) 所示：

$$f_b=f_s/L \quad \text{式 (3)}$$

## 3 产生多个信号的线性

AWG 的线性主要由 DAC 决定，DAC 性能分为静态和动态特性，静态主要指线性增益误差，动态特性主要指假信号、非线性摇摆等。

对静态特性，我们经常使用差分非线性 (DNL) 和积分非线性 (INL)。对动态特性，通过测量两个采样点间的过渡状态或瞬间状态，可以发现毛刺、过冲、孔径时间等，这些特性与信号或非线性有关。

在频域中，无寄生动态范围 (SFDR) 是衡量线性特性的有效方法。如果单音正弦信号加到输入，SFDR 定义在一定频率范围内的信号与第二大频率成分的功率差。在大多通信应用中，输入是多音信号，信号由幅度、相位、和频率不同的多个信号组成。测量 SFDR 时将引起一些混淆，有时更好是用称之为多音功率比 (MTPR) 进行测量。我们在多个频率施加一定数量的等幅但相位不同的信号。在某点测量该点的输出和该点失真的功率。MTPR 定义为单音载波与失真的功率比。注意这有几个参数影响 MTPR，例如单音幅度、挑选的单音频率、单音数量。在不同情况下，得出的 MTPR 也不同。

当单音数量增加，将形成一个高的峰值。高峰值可能使放大器饱和并使 DAC 超出范围。我们用峰值/平均值比 (PAR) 或峰值因子，测量输入信号的峰值与有效值功率，对单音正弦信号  $PAR=A^2/(A/\sqrt{2})^2=2$ 。有时 PAR 也定义为均方根功率比。如果输入单音幅度相等，单音数量和相位决定 PAR。多个信号输出的 SFDR 见式 (4)：

$$SFDR=6.02 \times N+4.77-10 \cdot \log(PAR) \quad \text{式 (4)}$$

## 4 产生单个信号的线性

高速 DAC 根据奈奎斯特采样定理，如果采样时钟为  $f_s$ ，信号带宽为  $f_N=f_s/2$ ，但 SFDR 可能比较差。提高 SFDR 的一个有效途径是采用比奈奎斯特频率小的带宽，当信号带宽为  $f_B$ ，定义过采样率  $OSR=f_s/f_B$ 。单个信号输出的 SFDR 如式 (5) 所示：

$$SFDR=6.02 \cdot N+1.76+10 \cdot \log(OSR) \quad \text{式 (5)}$$

采样时钟的抖动影响信号的的抖动，并且时钟本身存在杂散，这些杂散通过电路耦合到输出，降低信号质量。

## 5 频率转换时间

由于 AWG 信号输出无锁相环路，采用 DAC 直接将数字信号转换成模拟信号，不存在锁相环路需要稳定的问题，因此 AWG 频率转换非常快，它与 DAC 的上升、下降时间和时钟速度有关，各种信号的 AWG 的频率转换时间见表 2。

表 2 各种 AWG 频率转换时间

AWG 型号	AWG2021	AWG400	AWG520	AWG610	AWG710
频率转换时间	4ns	5ns	1ns	0.4ns	0.25ns

### 波形产生应用

AWG 本身提供硬件平台、编辑工具和相应的接口。对大多数应用利用 AWG 本身的编辑工具能完成信号生成，但对于特殊的高要求应用，由于 AWG 本身的计算速度和编辑工具所限，必须在外部计算机完成数据运算，将数据通过接口传到 AWG 生成波形。

#### 1 常规应用

像 AM、FM、SSB、FSK、PSK、QAM、PSK 等常规模拟和数字调制信号，I/Q 信号生成需要双通道 AWG，采用 AWG 生成波形实现非常容易，通常采用公式编辑法实现。

各种调制公式如下：

$$\text{AM: } (1 + M \sin(2\pi F \cdot t)) A \sin(2\pi f \cdot t + \theta) \quad \text{式 (6)}$$

$$\text{FM: } A \sin(2\pi f \cdot t + K \sin(2\pi F \cdot t + \theta 1) + \theta 2) \quad \text{式 (7)}$$

式中 M 为 AM 调制度，K 为调频指数，F 为调制频率，f 为载波。

$$\text{ASK: } X = A1 \sin(2\pi f1 \cdot t + \theta 1) \quad \text{码元为 1}$$

$$X = 0 \quad \text{码元为 0}$$

$$\text{PSK: } X = A2 \sin(2\pi f2 \cdot t + \theta 2) \quad \text{码元为 1}$$

$$X = -A2 \sin(2\pi f2 \cdot t + \theta 2) \quad \text{码元为 0}$$

$$\text{FSK: } X = A3 \sin(2\pi f3 \cdot t + \theta 3) \quad \text{码元为 1}$$

$$X = A3 \sin(2\pi (f3 + \Delta f) t + \theta 3) \quad \text{码元为 0}$$

AWG400 系列直接提供 DPSK、QPSK、QPPSK、PI/4DQPSK、SPSK、16QAM、64QAM、256QAM，并且用户可以自行定义其它调制方式，这样用户可以直接使用，操作更为简便。

#### 2 软件无线电模拟

1992 年 MILTRE 公司首次明确提出软件无线电的概念，理想的软件无线电组成框图见图 2，其中心思想是：构造一个具有开发性、标准化、模块化的通用硬件平台，将各种功能如工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等用软件完成，并使 ADC 和 DAC 尽可能靠近天线。由于软件无线电的各种功能用软件实现，具有很强的灵活性和开放性。

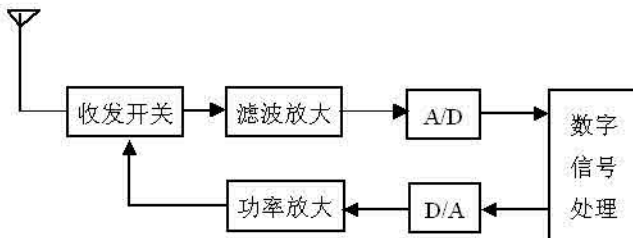


图 2 理想软件无线电组成框图

AWG 本身具有性能非常优越的 D/A 转换器，并具有功能强大的计算机处理系统和相关编辑手段和多种接口，完全能胜任数字信号处理的功能，因此 AWG 能胜任软件无线电的信号处理和信号输出发射功能。

新型的 AWG610、AWG710 输出信号带宽分别达到 800MHz、2000MHz，能满足绝大多数通信系统的要求。AWG520、AWG420 分别提供 10bit、16bit 的垂直分辨率，能生成对幅度精度要求严格的通信信号。

### 3 背景多路通信信号

在已装备某试验基地的背景信号模拟系统（组成框图见图 3）中，采用 2 台双通道 AWG520 产生 1.5~30MHz、30~215MHz、60~360MHz 的射频调制信号，并通过变频器组将信号频率同时覆盖 1.5~1300MHz，输出 500~1000 路 AM、FM、CW、FSK、PSK、SSB 调制背景通信信号，用于模拟实际战场存在的各种无线电台的电磁环境。

由于输出信号分辨率为 50Hz（采样率 100MS/s）、250Hz（采样率 1000MS/s），信号长度分别为 2M 点和 4M 点。为降低信号杂散，信号生成采用了卷积运算，并且对 500 路信号的每路分别进行 4M 点的调制运算，运算量过于庞大，因此采用外部计算机进行数据处理，通过 IEEE802.3 网络进行数据传输。图 4 是输出频率 700~1000MHz、信号路数 500 路、功率为 10W 时的频谱，系统输出杂散达到 -40dBc。工作时外部计算机通过 IEEE488 接口和 RS232 接口控制 AWG520 和变频器组，从而实现系统动态刷新工作。

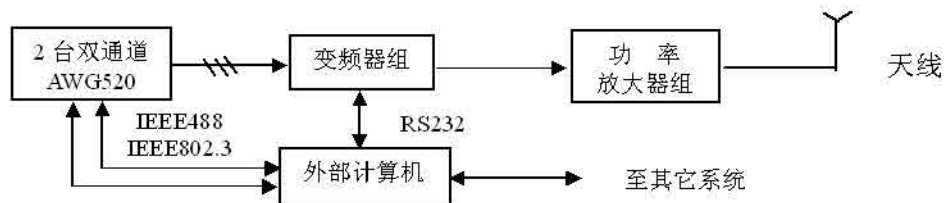


图 3 背景信号模拟系统组成框图

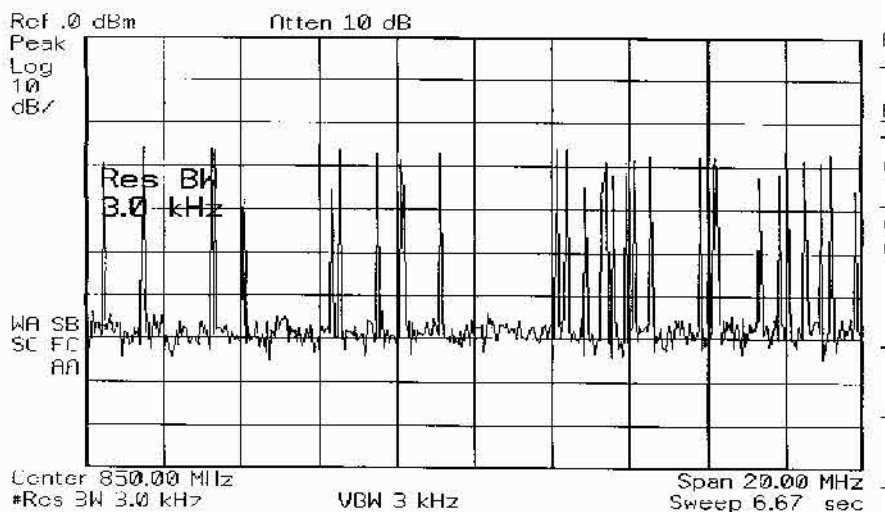


图 4 输出 500 路 10W 信号频谱

