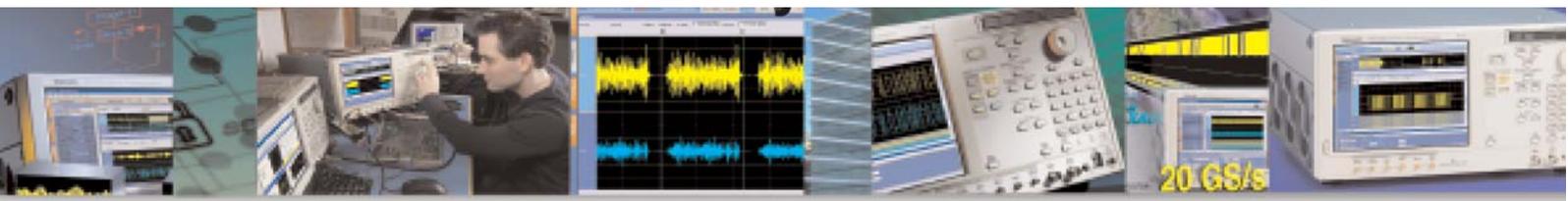


使用任意波形发生器 创建无线信号



入门手册

使用任意波形发生器创建无线信号

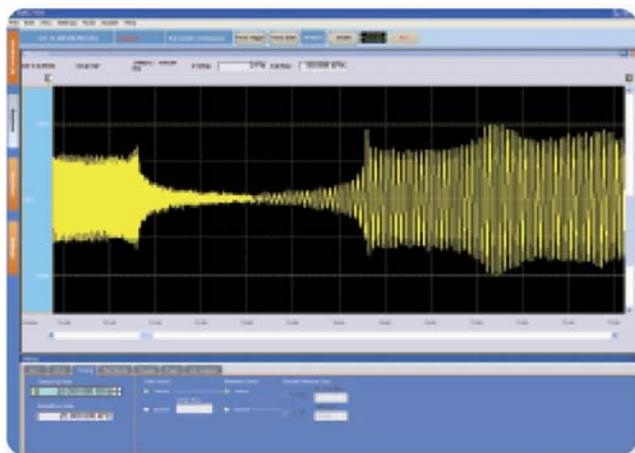
入门手册

目录

摘要	4
简介	4
无线应用与数字调制	5-12
无线发射面临的挑战	5
为什么要数字调制?	6
什么是数字调制?	7
数字调制应用	12
数字无线测试	12-19
发射机 – I-Q调制器测试	13
IF滤波器效率和损伤测试	14
发射机 – RF功率放大器线性度	15
接收机 – IF解调器测试	16
接收机 – RF功能测试	17
接收机 – 平衡器特性评估	18
接收机 – 干扰灵敏度	18
RF频谱环境仿真	19
使用任意波形发生器(AWG)生成调制信号	19-25
生成基带I-Q信号	19
IF生成	20
RF生成	21
编译复合信号	23
回绕式考虑	24
展望	26

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册



摘要

任意波形发生器(AWG)已经在商业上应用数年并在性能上不断得到改进。先进的任意波形发生器如最新的 Tektronix AWG系列可以支持今天最复杂的无线测试信号。现代 AWG 可以产生基带、IF 和 RF 频带激励信号以高效率地测试无线器件和系统性能。20 GS/s, 10位深度分辨率的 AWG7000 可以适用在极端的应用环境当中, 如超宽带(UWB)无线电设计。类似的, 14 位深度分辨率 AWG5000 可以适合在高动态范围的窄带应用。当合成复合数字无线调制时, 任意波形发生器的独特价值得以快速显现。

在此入门介绍中, 我们探讨推进数字无线革新的技术, 一些通用的AWG无线测试应用以及如何从任意波形发生器得到更好特性的重要思路。

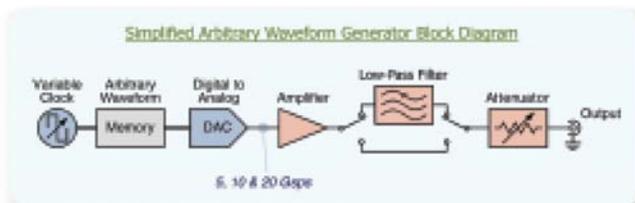


图1. Tektronix AWG 系列简化方框图揭示了一个可变时钟控制任意波形, 采样速率达 20 GS/s

简介

近年来无线设备行业成长迅速并产生了许多新型无线设备。行业发展迅猛的重要原因在于 RF 半导体的发展和数字调制技术的广泛应用。如今的数字无线信号对合成测试信号提出一系列新的挑战。由于行业重点向数字无线技术转移, 使得调制波形复杂度极速增加。幸运的是 AWG 性能稳定上升能够灵活有效地产生相当复杂的测试激励信号。AWG 的原理很简单, 一个可变频率时钟步进跟随一个任意波形的预存储数字表达, 然后被转换为模拟信号。

尽管概念简单, 但在每次测试应用中为获得 AWG 的最佳性能, 各种重要思路是必要的。为了理解如何得到 AWG 的最佳性能, 我们首先回溯 RF 传输信道, 说明为什么复合数字调制受人欢迎。

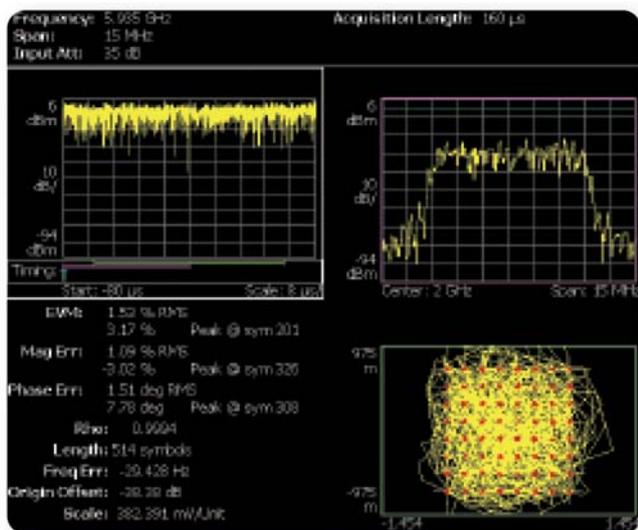


图2 不使用任意波形发生器时，图中所示的64 QAM 信号包含波形的复合调制将难以合成

此入门简介参考了一些普通无线测试案例，随后是AWG在基带、IF和RF应用中的重要思路。最后是RF测试中AWG应用的前景展望总结。

无线应用程序和数字

调制

由于现在多数复杂射频调制波形具有预期特性，因此被选用来抗击无线传输通道。介于传输器和接收器之间，该信号必须通过的传输通道媒介由分配给信号的射频通道频带宽度界定。

无线传输的挑战

通过无线通道的传输和接收电磁辐射可能面临着挑战。传输通道通常会大大削减被传输信号，同时其噪音和传播特性会彻底扭曲传输波形。

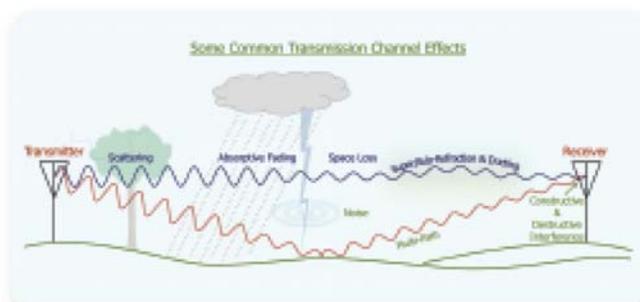


图3. 无线信号经受各种会严重改变传输信号的通道作用。为提高接收效果，复杂数字调制会起到举足轻重的作用。

从无线电到雷达的无线应用程序跨越了广泛的通道类型。无线信号传播依赖于传输信号的频率和带宽，以及附近的反射和吸收物体。大气和电离层等客观条件也会在传输信号达到接收终端时使其发生较大改变。

为了达到使用性的目的，调制传输信号在通过接受器时，受到严重路径减损后必须是可恢复的。比如1瓦(+30 dBm)传输信号可能会在其达到接收器的同时被削减到其最初振幅(-90 dBm)的一万亿分之一。如果存在多路径，那么通过传输带宽的衰减就不可能一致。通道的衰减和迟滞还可能随着接收器的物理运动而有所波动。

最近几年，宽带信号因其能够抗击波动通道获得了普及。超宽带调制技术能够通过填充有多路径的，分散的传输通道传递高速数据。然而，许多测试信号发生器完全不能生成超宽带信号所需要的宽的带宽和成就一个重要的发展及测试障碍。

在深入探讨超宽带挑战和生成技术之前，让我们先看一看数字调制是什么以及为什么它们如此普遍。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

为什么会有数字调制？

调幅(AM)，调频(FM)和调相(PM)在数字调制日趋普遍之前被广泛采用模拟调变。模拟调变的首要问题是传输信号是不予以编码的。

模拟信号完全被调制并依附于一个高频射频载体上，其将通过传输通道进行传播。例如，一个扩音器的模拟电压是被直接调制到一个广播射频载体上的典型调频。

由于没有编码，在接收器解调信号后，达到的模拟信号强度与噪音强度的比率(S/N or SNR) 取决于射频载体的信号强度的作用。

完成具有广泛动态范围的静态自由传输—因此被解调噪音程度非常小，被比成是所需信号的振幅—需要非常高的射频S/N比率。由于传输通道的背景热力噪音动力光谱密度通常固定在 -174 dBm/Hz，因此唯一提高模拟调制接收质量的方法就是传输较高动力水平，使用较大和较多的方向天线，或者在较宽的带宽上进行调制。这些模拟调制局限会限制能够通过传输通道实现的动态范围性能。

然而，唯一能够传送低射频S/N比率的高动态范围的只有数字调制。

数字调制通过把即将发送的信号编码成另一个要求低射频S/N比率的形式，以便成功接收。比如，扩音器的一

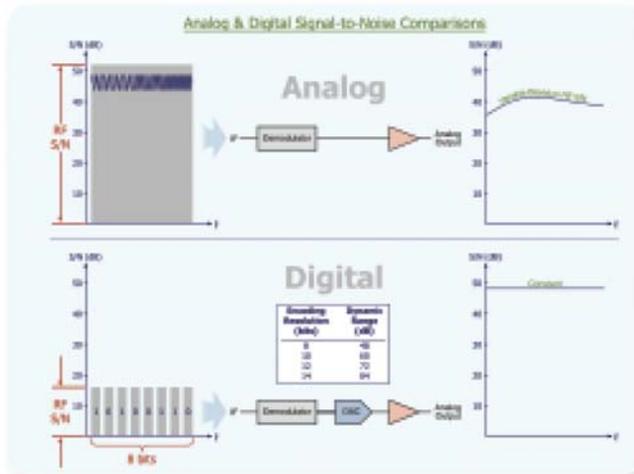


图4. 模拟信号需要高的射频S/N比率以便在解调后仍是高的S/N比率。数字调制在给低射频S/N比率解调加入一点精密度后能够达到非常高的S/N比率。

个电压能够被数字化并被编码成一个8位字节。然后每一位被使用简单的二进位判断法来准确确定正确字节，并以较低射频S/N比率传送出去。当所有字节在接收器中被重新合成一个8位字节时，一个48 dB动态范围就产生了，即使射频通道可能仅有25 dB的S/N比率。接受器末端的信号保真度多数情况下是固定的，大于数字调制可接受的字节错误率所需的最小S/N比率。

这些特性使得数字调制在遭受传输通道的严重损害后，不仅可以消除静态噪音，还提供了优异的通信可靠性。

数字调制通常还具有许多优于模拟调制的其他优点。其中一个优点就是其使得数字模拟的普遍使用直接来自于使用的数字信号处理器(DSP)以生成调制。现在大部分数字调制都是由某种数字电路形式的DSP技术产生的,例如现场可编程门阵列(FPGA),或者专门的DSP微处理器。

相比较许多模拟电路,数字电路更加稳定,不会随着温度变化而变化。数字电路的稳定,精确和可靠减少了温度模拟设计和手动电路调整,节省了大量的生产劳力。这不仅节约了成本,而且还推动了可行性技术的发展。

同模拟调制相比,数字调制通常被使用者称赞是大大减小了波谱带宽,其实不尽然。许多当下流行的数字调制大体上并非比流行模拟调制更具带宽有效性。然而,由于数字数据在被传送到调制器之前能够被压缩,因此固定的信息带宽缩减通常是可行的。所以,数字信号压缩技术和一个数字调制器的混用通常达到所需射频带宽数量的3:1的缩减,以便传送多种类型的无线数据。

为更好理解数字调制的带宽特性和了解AWG对于生成复杂波形的举足轻重的作用。让我们现在思考一下用来传送二进位‘1’和‘0’…的波形。

什么是数字调制?

数字调制同模拟调制,各种射频振幅,频率或相位类似,但是通过数字调制,被调制参数可呈现出一特定波形状态或特征。相反,模拟调制由于振幅、频率或相位而发生不断变化。

简单的数字调制例如幅移键控(OOK),双移频键控(FSK),或二相相移键控(BPSK)仅使用两种状态就表示

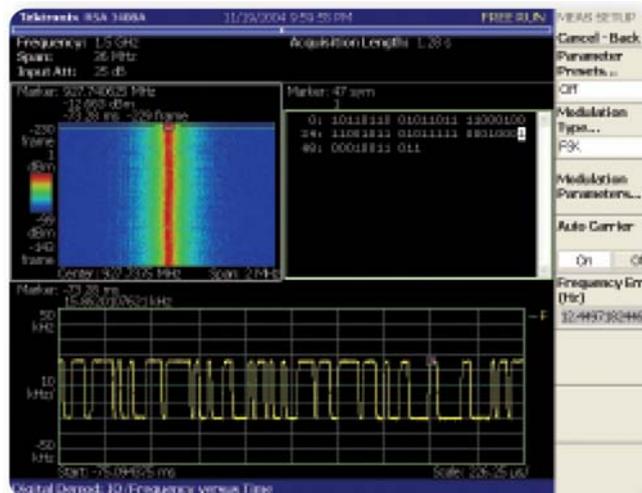


图5. 在1个RSA3408A实时光谱分析机(RTSA)上抓取的无线电话的传输显示了两种频率、两种程度的FSK信号及恢复特征。

出了二进位编码数据。通过这些简单的双状态调制,每一编码状态或特征就代表了二进位1或者0。

OOK, FSK 和 BPSK 提供良好的动力效率,并能够被以S/N比率可靠接收。然而,这些调制都具有很差的带宽效率,这就意味着对于一个给定的数据比率(bits/s),射频传输通道带宽是调制后所必需的。相比之下,动力效率调制在有限的通道带宽内,达不到非常高的数据比率。

容易看到的一个现象就是把带宽效率平面上这些简单调制的动力效率当成给定比特误差率(BER)的其他调制。2FSK 和 BPSK的低Eb/No或S/N比率使得它们在接收动力受到限制的地方能引起注意。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

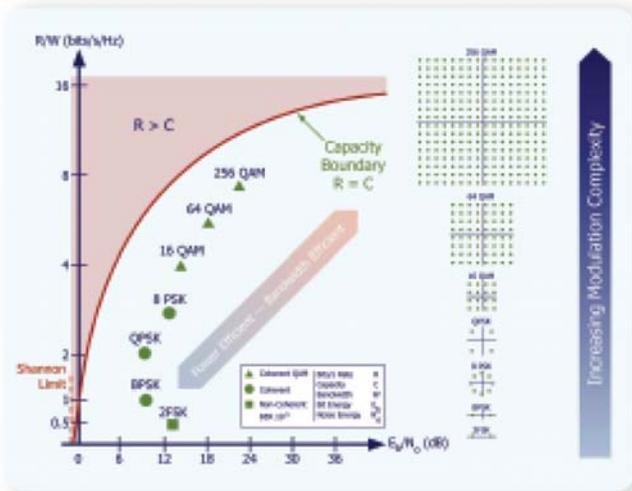


图 6. 带宽效率平面比较给定比特误差率(BER)的不同数字调制特性。简单动力效率调制使用低Eb/No 或 S/N 比率。带宽效率调制需要较大 Eb/No, 生成并将较高比特率压缩成较小的射频光谱也更加复杂。

有限的波谱资源较之动力效率，通常更偏向于带宽效率。无线电光谱是一个细致整合和共享的资源。因此，大部分无线传输通道大大限制了每个用户可用射频带宽的数量。致使其偏向于能够通过可用通道带宽更快获得更多字节的带宽效率调制。

为增强带有固定带宽分配的数据链接性能，有较高Eb/No or S/N比率要求的更高级的复杂性带宽效率调制日渐普及。因此需要测试大部分数字数据链接的波形不断变得越加复杂, 制造商尽量提供有限的有效射频带宽的最大程度的数据链接性能。

复杂调制普遍使用相位(I)和矩(Q, 90°) 正弦和余弦波形加在一起的正交调幅(QAM)。借助将这些信号加在一块的相关振幅, 相位复数矢量能够被放置在的星座符号点。通常随着两个动力符号点的增加, 每个符号点传送的字节数量显示也会越多。

最简单的正交调幅(QAM)调制是QPSK, 其使BPSK的带宽效率加倍。QPSK也因其出色的动力效率变得非常普遍。4个符号点的每个被发送的QPSK符号点代表两个数据字节, 每个发送符号被比成是BPSK的单一字节。

数字调制如QPSK需要被传送到调制器的时域脉冲的细致的基带过滤。一旦数据字节被编码成符号, 矩形脉冲必须要被过滤以减小调制信号所需的射频光谱。

基带符号脉冲的过滤通过一种特殊的滤波器形状实现。最常见的是升余弦滤波器——由余弦波Y轴正半轴部分组成。升余弦滤波器特点是它们的时域脉冲响应会周期性归零 (Null), 即零振幅。谨慎的选择计时就可以使这些零 (Null) 阻止脉冲串的能量扩散到符号采样时间内的相邻脉冲中。因此就消除了符号间干扰 (ISI)。

数字设备硬件中常用的是DSP算法, 通过调整升余弦滤波器形状来修正RF频谱。升余弦滤波器的形状由 α 参数决定。 α 值越低, 滤波器裙部下降部分就越陡。随着 α 值变小, RF频谱缩小。但是, α 值变小, 符号点之间的调制矢量的轨迹越来越大量的过冲冲出符号星座图

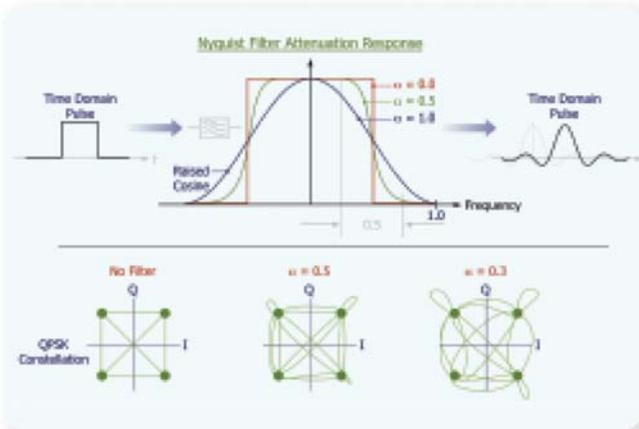


图 7. 为了限制时域符号脉冲中的 RF 带宽，升余弦滤波器利用包含周期性零振幅的期望响应消除符号间干扰。但是，随着滤波器形状因子的改变，星座图的矢量轨迹也会改变。

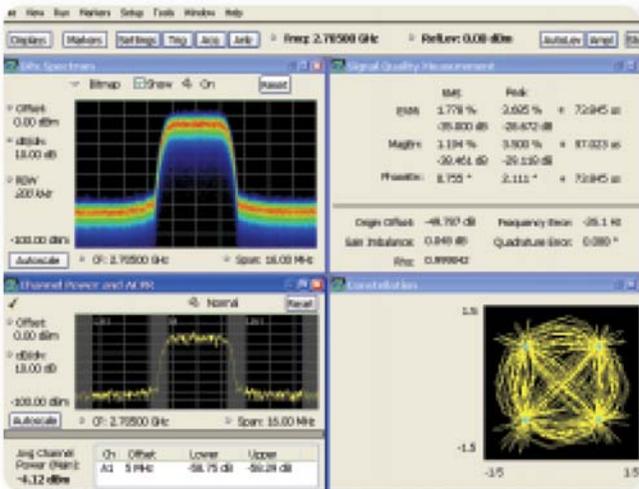


图 8. 利用 RSA6114A 可以很容易检测 Tektronix 任意波形发生器产生的 QPSK 信号的通道功率和星座图过冲

的边界。RF 带宽和星座图过冲之间的平衡是一个重要的工程因素，因为这将影响发射机功率放大器和天线的大小。

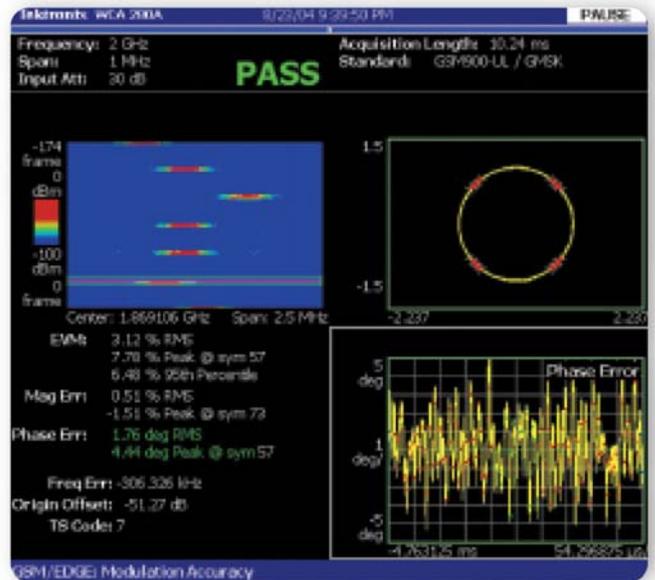


图 9. 利用 RSA3408A 实时频谱分析仪测量到的 GSM 蜂窝信号是一个恒定信号振幅的 GMSK 调制信息。与 QPSK 精确定义 4 个符号点不同，GMSK 的高斯滤波会引起符号间干扰。

利用任意波形发生器生成数字调制信号时，正确的滤波器 α 值和充足的发生器动态范围都需要被认真考虑。一些调制，如 GMSK，不采用升余弦滤波器，而是采用高斯滤波器波形，因此可以使星座图相量图移动最小，由此实现恒定的调制振幅包络线。高斯滤波不允许一些符号间干扰，导致在每个象限中都有一行符号点。

同样，在生成数字调制信号时，利用适当的基带滤波器编辑波形非常重要。

为进一步提高带宽效率，可在 QAM 星座图中增加更多的符号点。除了 QPSK 的 4 个符号点，8PSK(3 位/符号)、16QAM(4 位/符号)、32QAM(5 位/符号)、64QAM(6 位/符号)、128QAM(7 位/符号)和 256QAM(8 位/符号)都很常见。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

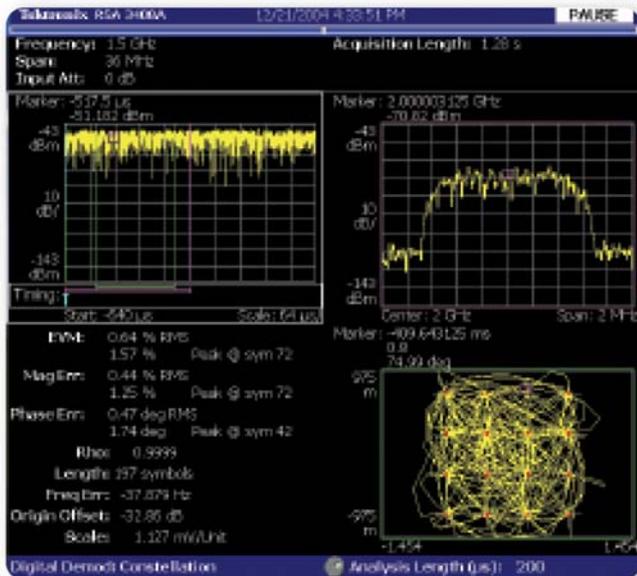


图 10. 一个正确生成的 16QAM 信号具有适当的 RF 频谱下陷部分和星座图过冲。

鉴于调制复杂度不断增加,越来越难于生成正确的数字符号星座图。信噪比的上升、相位噪声、数模转换器精度、放大器线性度以及其他因素,制约了高阶调制的应用。因此,512QAM 和 1024QAM 很到在量产系统中得到应用。

对复杂 QAM 调制,一些方法可以降低信噪比要求并提供滤波折中方案。例如,正交局部响应采用受控符号间干扰(Controlled ISI),允许调制信号更高效的滤波。

通过编码符号点,网格编码调制(TCM)可以有效改善星座图中符号点的欧式距离,在下一个符号状态间避开某些相邻符号。同样,块码调制(BCM)和多级编码调制(MLCM)利用符号图编码改进 QAM 星座点的有效距离。

Modulation Type	S/N	Bandwidth
2FSK	13.4	B ¹
4FSK	23.1	B/2
BPSK	10.5	B
QPSK	13.5	B/2
8PSK	18.8	B/3
16QAM	20.5	B/4
64QAM	26.5	B/6
128QAM	29.5	B/7
256QAM	32.6	B/8
9QPR	16.5	B/2
25QPR	20.5	B/3
49QPR	23.5	B/4
16TCM-2D	14.3	B/3
64TCM-2D	21.9	B/5.5

1 — B = bit rate.

表 1. 通过选择不同的数字调制,给出了针对 10–6 比特误码率的不同理论信噪比和带宽要求。

总之,符号编码技术可降低调制对星座图几何误差的敏感度。

为星座图中的符号添加编码会进一步增大生成测试信号的复杂度。不仅 QAM 星座图需要正确的映射,在某些时间还不允许出现某些符号。

以正交频分复用技术(OFDM)为代表的多载波技术的实际应用,使现代 DSP 处理器硬件把调制技术推上了一个新台阶。OFDM 在多近空间载波中应用一个和多个曾经讨论过的单载波数字调制,把它们合成到一个信号中。正确的构建频率空间,每个载波上的符号都正交并可以防止符号间干扰。相对于单载波调制,OFDM 由于降低了单个载波符号率且多个符号同时发送,因此可以非常有效地克服通道多重路径影响。

通过动态改变调制方式以更适应常见的通道环境,许多无线数据链路可以进一步优化传输速率。例如无线局域网(WLAN)调制器可以随时改变调制类型和数据传输速率,以适应当时的通道特性。如果接收机信噪比能够满足64QAM要求,那么就采用这种调制方式。随着信噪比的下降,则选择那些对信噪比要求更低的调制方式,如QPSK。

生成动态改变调制是一个挑战性问题。任意波形发生器可以储存包含几个调制的复杂波形,对于测试随时改变调制方式的调制解调器具有很大价值。

调制技术的另一个趋势是:采用能够提供比调制要求更大带宽的扩频信号。频谱扩展具有很多优势:良好的多重路径性能、利用码分复用技术使多个信号共享相同频带的能力、更好的干扰抑制。

由于使信号跳跃出了预先设定的一系列频率,跳频扩频技术(FHSS)增加了调制信号的复杂度。目前有2种跳频器:每个跳频传送多个符号的慢速跳频器,每个符号多次跳频的快速跳频器。每种FHSS系统一般都利用QAM调制(经常是QPSK),采用伪随机数序列扩频。

直接序列扩频(DSSS)是另一种常见的扩展调制信号的技术。DSSS利用伪随机数序列相位调制被调制信号(经常是QPSK),从而扩展频谱。扩展被调制信号的每个伪随机数代表一个扩频码片。DSSS码片速率(chip rate)可以非常高,因此可以在更大的带宽上扩展频谱。

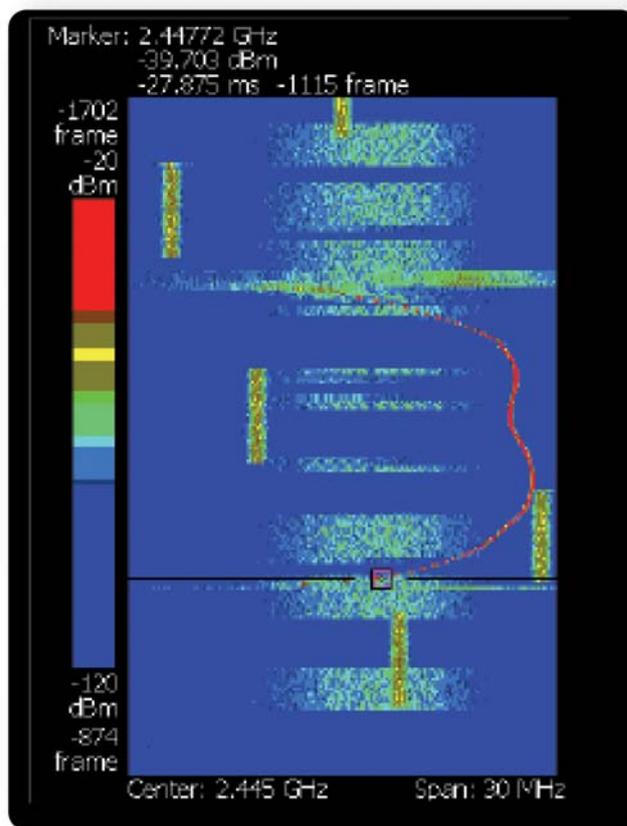


图 11. 这个频谱图中有 2 个共扩频信号。黄色的跳频信号是蓝牙 FHSS 传输,而浅绿色的恒定中心频率信号是 WLAN DSSS 传输。红线是由于微波炉的 RF 辐射泄漏造成的。

与 FHSS 一样, DSSS 需要更大带宽信号源以生成测试接收机性能所需的信号。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

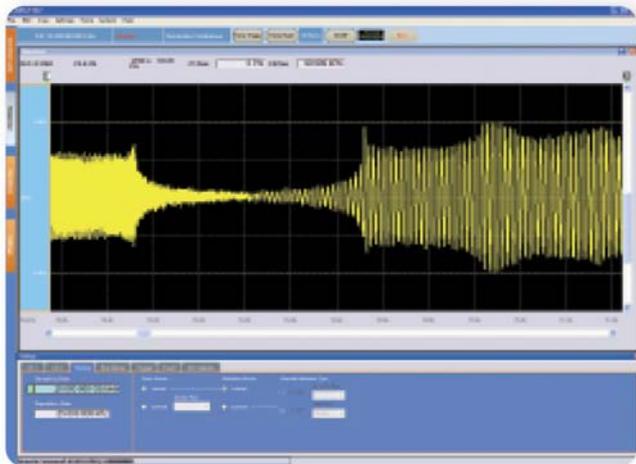


图 12. AWG700 具有足够的带宽可以生成多数超宽带信号，如超宽带雷达脉冲。

超宽带 (UWB) 技术也需要极大的测试信号带宽。

超宽带发射接收机使用宽频谱,对多重路径就有很好的抵抗能力,因此在充满反射的室内环境应用中备受青睐。通过在一个宽频谱范围内扩展一系列窄脉冲,超宽带无线链路支持更高的数据传输速率。

同样,用于改进目标分辨率的压缩雷达脉冲一般也需要大带宽。脉冲压缩利用RF脉冲调制隔离重叠雷达回波。(相关讨论请参见Tektronix应用笔记《利用实时频谱分析仪的雷达脉冲测量》)。同脉冲压缩调制常常啁啾FHSS和DSSS信号。

频率啁啾、FHSS和BPSK DSSS调制是压缩脉冲的常见方法,用于改进目标间的空间分辨率。被调制压缩脉冲的带宽直接关系到空间分辨率。如果没有大带宽任意波形发生器,那么只有借助于昂贵的定制RF测试设备才能够生成这些高难度的信号和它们的劣化回波。

革命性的数字调制技术不仅可以用于无线通信设备,还能使压缩脉冲雷达受益。

数字调制应用

得益于低成本数字信号处理硬件和软件无线电(SDR)工具,数字调制技术的优势使之迅速在无线遥感、通信和雷达系统领域得到广泛应用。只有最简单的系统或古董级的无线电应用还采用模拟调制技术。

测试信号的生成由此成为数字无线系统测试方面的首要问题。众所周知,数字无线调制使信号的复杂程度增加,并且需要极大的带宽。下面看看任意波形发生器在测试无线系统和设备上的应用。

数字无线测试

数字无线数据链路一般需要各种调制波形进行开发性评测和生产性检验。调制信号是评估元件和系统性能的常用最佳测试激励源。

极具灵活性的任意波形发生器是生成各种测试信号的首选工具。这些信号将用于无线设计中的高效验证。

Popular Modulations	
Cellular	
GSM, GPRS, EDGE	GMSK
W-CDMA	DSSS HPSK, QPSK, 16QAM
HSDPA, HSUPA	DSSS HPSK, QPSK, 16QAM
TDSCMA	DSSS QPSK
TD-CDMA	DSSS QPSK, 16QAM
IS-95	DSSS OQPSK, QPSK
cdma2000	DSSS QPSK, HPSK
1xEV-DO & DV	DSSS QPSK, HPSK, 8PSK, 16QAM
iDEN	QPSK, M16QAM
WiDEN	QPSK, M16QAM, M64QAM
TETRA	$\pi/4$ -DQPSK
Point-to-Point Radio	
Short Haul	DSSS, 4FSK, 16QAM, 64QAM, 64TCM, 49QPR
Long Haul	128QAM, 128TCM, 256TCM
Radar	
	Chirps, BPSK, FHSS
Satellite	
	QPSK, 8PSK, 16QAM
HD Television	
ATSC	8-VSB, 16-VSB
DVB-T	QPSK, 16QAM, 64QAM on COFDM
ISDB-T	BST-COFDM DQPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Wireless Networks	
Bluetooth™	FHSS, GFSK, $\pi/4$ -DQPSK
WLAN	DSSS CCK D8PSK, DQPSK, 52 OFDM 64QAM
WiMax	OFDM BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
ZigBee	BPSK, OQPSK

表2: 展示了在一些常见的应用中, 用于设备测试的一系列复杂的数字信号。如果没有任意波形发生器, 几乎很难生成这些信号以及它们的劣化信号。

AWG (任意波形发生器) 既能生成理想信号来测试基本电路功能, 也可产生劣化信号以测试不良传输通路环境中的性能。

Maximum Capabilities	AWG5000	AWG7000	Units
Channels	2	2	—
Sample Rate	1.2	20	GS/s
Bandwidth	0.379	5.8	GHz
Memory Depth	32 M	64 M	Samples
Vertical Resolution	14	10	Bits
Output Amplitude*	4.5	2	Volts p-p
Marker Outputs Per Channel	2	2	—
Parallel Digital Outputs**	28	—	—

* 50 Ohm Load, ** Optional on 2-Channel Models

表3: Tektronix AWG5000和AWG7000系列信号发生器提供了适于多数无线应用的多种功能和选项。

下面通过一些常用的AWG测试案例进行说明...

发射机 – IQ 调制器测试

调制解调器工程师特别关注调制器的性能, 因为这是特定调制实现理论性能的关键。

许多数字无线设计中采用模拟IQ矢量调制器, 但这会产生许多问题。

正交误差、IQ增益不平衡、非线性度和一些其他问题使这些元件会造成符号星座图失真, 进而损害数据链路性能。数字调制信噪比(如前面所示)是理论性能极限。带有失真的不良符号星座图需要更高的信噪比, 也就是更短的数据链路传输距离。

测试矢量调制器需要2个模拟输入, 一个用于I-通道, 一个用于Q-通道。I和Q通道之间需要完全同步并滤波, 以生成优质的调制IF信号。一旦输入激励源被正确地引入矢量调制器, 就可以利用实时频谱分析仪方便地测试其性能特性。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

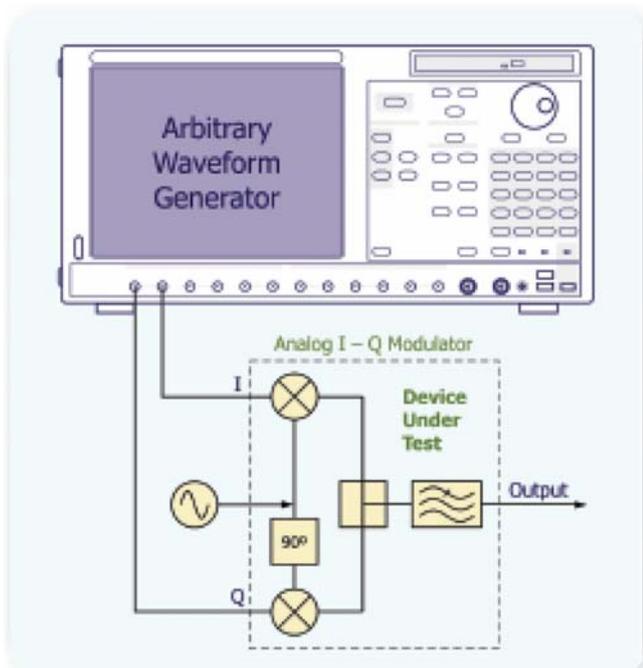


图 13：高带宽和高速数字无线应用常常使用模拟矢量调制器。任意波形发生器的精密时间相关 IQ 输出非常适于测试这些元件或生成高频调制信号。

把任意波形发生器置于 IQ 输出模式，就能够生成所需的测试激励源，用以挑选最适合数字链路的调制器。通过设置用于驱动调制器的 2 个输出信号的相位，可以实现通道间优异的相位同步性和振幅匹配性。调制后测量到的弱化现象都是由矢量调制器内部的延迟、损耗或非线性度造成的。

任意波形发生器存储了许多波形，因此可以在编辑测试激励源波形时方便的调整基带滤波。由于利用不同滤波器 alpha 存储各种波形，工程师可以快速评估在不同环境中各个矢量调制器的频谱性能。这非常重要，因为调制器的频谱再生随驱动电平而变化并且叠加到滤波后的

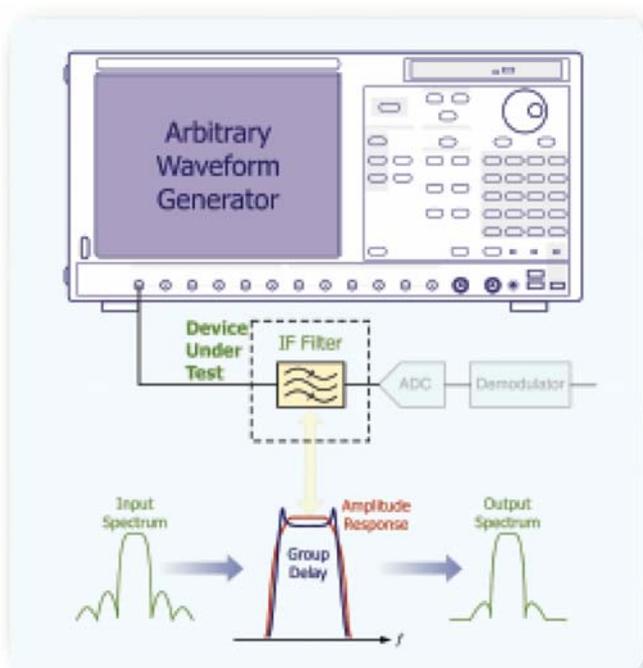


图 14：IF 滤波器从有用信号频谱中滤除干扰。但 IF 滤波器还是接收信号中无用群延时失真的“罪魁祸首”。任意波形发生器可以很容易地产生各种测试频谱，用于评估接收信号的干扰抑制和失真之间的关系。

基带频谱中。利用任意波形发生器生成的多个测试波形，可以方便地选出满足频谱调整要求的调制器驱动电平和滤波器 alpha 的最佳组合

IF 滤波器效能和劣化测试

在无线数据链路设计中，IF 滤波器通常被加入发射机和接收机中以解决频谱问题。

IF 滤波器清除不需要的内部频变产物，去除外部源对有用信号的干扰，以及增补有限的或周期性的数字滤波器响应。也就是说，IF 滤波器可以使有用调制频谱更陡峭、更锐化、更狭窄，即更好！

但是，IF滤波器同时增加了群延时，造成有用带内信号失真。为了使有用信号失真达到最小，滤波器需要更宽带宽、带外衰减更平滑。

作为必备的工程技能，选择IF滤波器就是平衡考虑抑制干扰和保持带内信号性能的关系。复杂数字调制和IF必须支持多种调制类型，因此很难确定最佳滤波器。

任意波形滤波器可以简化IF滤波器的选择，工程师利用它可方便地生成现实中最糟糕的信号场景，进而判断滤波器的效能和劣化作用。

首先合成有用数字调制信号，再利用数字技术在有用信号中加入适当级别的邻频干扰信号和寄生信号。随后，把这个组合的多载波波形存入任意波形发生器存储器中并重现出来，使之通过IF滤波器。经过IF滤波器后的输入频谱的振幅衰减可以很容易的测量出来，用于判定滤波器的效能。

通过比较滤波前后误差矢量幅度(Error Vector Magnitude)，有用信号的劣化就可得到量化。误差矢量幅度是实时频谱分析仪或矢量信号分析仪上通行的调制质量测量方法，通过比较基准数字调制信号和实测调制信号实现。

两个信号之间误差矢量幅度就是有用信号失真劣化程度的测量值。

任意波形发生器和实时频谱分析仪的综合运用为那些难于测试的元件(如IF滤波器)提供了复杂激励-响应测试方法。通过测量有用信号的干扰衰减和组合误差矢量幅度，有助于工程师在干扰防护和有用信号性能损失之间作出更加科学的选择。

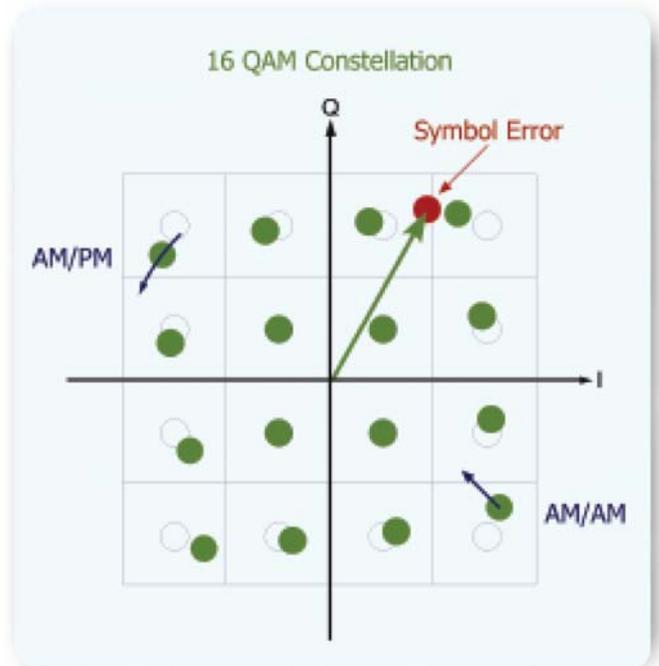


图 15: 非线性度，如 AM/AM 和 AM/PM，可能造成符号星座图失真，从而产生误差。而要精确的描述这些非线性度常常需要借助于一个调制测试信号。

发射机 - RF 功率放大器线性度

复杂激励-响应方法近年来广泛应用的另一个领域就是功率放大器非线性度测量。

正交调制对于功率放大器的非线性度很敏感。功率放大器的非线性度可造成调制信号中的大矢量振幅失真，进而引发非预期的附加调制。调幅-调幅变换(AM/AM)，以及对大多数数字调制更为重要的调幅-调相变换(AM/PM)，可以由于传送符号星座图失真而造成符号误码。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册



图 16: 利用 Tektronix 任意波形发生器产生的数字调制信号, 可以在 RSA3408A 上精确地测量出功率放大器的动态线性度。

传统的做法是: 在放大器的输入端口施加一个正弦波激励源, 利用矢量网络分析仪观测输出端口的振幅和相位响应, 从而方便地测量 AM/AM 和 AM/PM。美中不足的是, 在许多应用中, 利用这种方法取得的测量结果不够精确。

许多功率放大器设计中常用的耦合和去耦电容器以及晶体管热效应, 会产生一个调制“记忆效应”——动态改变 AM/AM 和 AM/PM。因此, 在实际的非线性度测量中 (如多载波功率放大器系统的数字预失真), 必须利用调制信号而不是静态正弦波测量 AM/AM 和 AM/PM。

在任意波形放大器中存入一个数据链路中实际信号的复杂数字调制波形, 以此作为测试的 RF 激励源。

利用已经安装专用的线性度测量软件的实时频谱分析仪, 通过测量动态 AM/AM 和 AM/PM, 从而检测由功率放大器所造成的任意波形发生器信号的失真。

任意波形发生器在测试发射机组件 (如矢量调制器、IF 滤波器和功率放大器) 中可以发挥重要作用。

下面看看任意波形发生器在数据链路接收机端测试中的作用。

接收机 - 中频解调器测试

数字解调器开发中需要各种测试激励源以描述其性能。

数字信号载波的捕获时间、接收信号的允许频偏、对于特定比特误码率 (BER) 所需的信噪比和载波噪声比测量, 这些都是家常便饭。

解调器测试通常需要一个采用数字调制信号的中频激励源。

利用一个无劣化数字调制信号可以方便地测量载波捕获时间, 但载波偏置测量会因为中心频率的微小改变而使正确信号劣化。

利用一个加入噪声的数字调制波形可以测量载波噪声比。通过调整加入调制波形中的噪声量, 同时观察比特误码率, 能够量化描述解调器的门限性能。

除了了解调器性能测试中生成劣化信号, 任意波形发生器常用于功能测试。许多解调器的综合误差对开关天线或调制类型敏感。

只需利用任意波形发生器产生一系列波形序列, 就可以迅速地测试这些特征。任意波形发生器具有多种事件标记输出。这些标记在波形改变以使解调器响应与测试序列中特定波形相关联时被触发。

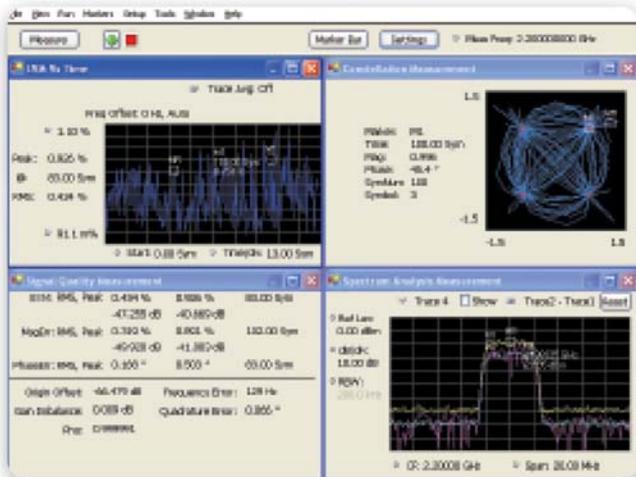


图 17: 对于一个给定比特误码率的门限载波噪声比和误差矢量幅度调制测量值, 显示出 QPSK 解调器与理论性能的接近程度。

AWG7000 具有极高的采样率, 而 AWG5000 则具有大动态范围。因此 IF 信号可以利用它们直接生成, 而不必借助外部调制器。

接收机 - RF 功能性测试

与中频解调器测试相似, 对于许多无线电应用来说, 任意波形发生器所具有的极高采样率和垂直分辨率使其能够直接产生 RF 信号。利用两个数模转换器的插值技术, AWG7000 在某些配置下可以达到 20GS/s 的采样率, 由此可以以 4 倍过采样率生成 5GHz 的 RF 信号。AWG7000 可以直接调制 RF 信号, 实现接收机基本功能测试。

利用附加的衰减器和比特误码率测试仪(BERT), 任意波形发生器可以测试接收机门限。门限测试是检验大部分接收机能否正常工作的有效方法。在门限测试时, 任意波形发生器的存储器中需要存入调制信号波形。

随后振幅变化到门限水平, 同时测量比特误码率, 以确

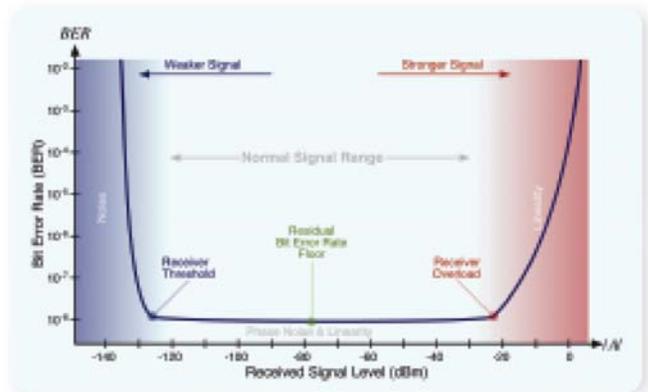


图 18: 比特误码率是衡量接收信号级别的重要函数, 它随噪声和失真而变化。由于信号源常常产生一些噪声和失真, 因此只有利用实际的发射机才能够得到残余比特误码率的精确测量结果。利用 Tektronix 的任意波形发生器可以精确测量门限比特误码率(受接收机噪声限制)和过载比特误码率(受接收机失真限制)

定该设备能否通过测试。利用任意波形发生器进行比特误码率测试时需要特别注意。只有在接近接收机门限或接收机过载时, 才能利用任意波形发生器进行接收机比特误码率精确测量。这是为什么?

在门限处, 由于随机噪声在有用信号中占主导地位, 因此产生了符号误码。任意波形发生器能够很容易地重现这种噪声主导信号, 因此可以精确地测量接收机的比特误码率特性。同样, 在过载处, 接收机前端(主要是一级混频器)中的过驱动组件会造成符号误码。所以利用任意波形发生器, 通过过驱动接收机就可以得到接收机过载比特误码率的精确测量结果。

但是, 残余比特误码率误码本底的产生机理与门限和过载不同。在通常的工作信号范围内, 发射机和接收机的组合相位噪声以及功率放大器的非线性度主导了误码的产生机理。由于任意波形发生器不能生成与发射机相同的相位噪声和非线性度, 因此残余比特误码率本底中测量的比特误码率与实际发射机中测量的不同。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

任意波形发生器的一个常见应用是,生成用于接收机门限测试中频谱“平”衰落的RF信号,但是任意波形发生器还具有更多用途。

接收机 – 均衡器性能评估

传输通道造成调制信号失真是由于更为复杂原因,而不仅仅是平吸收衰落。多重路径衰落具有多种形式,如Rician衰落 – 强视线信号主导接收能量, Rayleigh衰落 – 接收信号由所有散射信号构成但不存在视线信号。接收信号还可能含有弥散性频率选择性衰落 – 某个频谱频率缺口超出了信号。现有多种通道模型用来描述许多可能的失真 – 传输通道损伤接收信号。

如果信号被通道损伤,那么任意波形发生器在任意波形编程方面的灵活性对于测试接收机性能就没有任何意义。工作在多重路径环境中的数字无线接收机一般都配备一些类型的传输通道均衡器。

鉴于传输通道会随着大气扰动和天线位置的改变而变化,因此测试均衡器的实际效能是一个挑战。一系列包含视线和多重路径成分的组合信号被储存到任意波形发生器的存储器中。随后,这个劣化信号可以用于测试不同通道均衡器的效能。

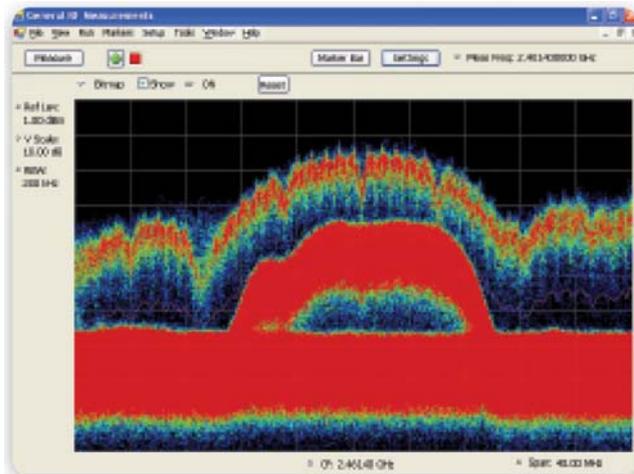


图19: 这个DPX频谱显示一个近端膝上电脑的较强信号和远程接入点WLAN交换机的较弱红信号。多重路径失真造成的接入点处频谱缺口和凹陷清晰可见。

接收机 – 干扰敏感性

利用任意波形发生器还可以测试接收机对干扰的耐受力。干扰门限(T/I)测试用于测量接收机对于干扰引起退化的敏感性限度。T/I测试的难点在于:干扰敏感度必须在有用信号的不同频偏和不同功率电平下测量。

任意波形发生器能够存储各种干扰并且把它们的信号叠加到有用RF信号中,这点对于T/I性能测试极其有用。随着无线频谱的不断拥挤,许多设备的干扰测试变得非常重要。

RF 频谱环境仿真

与干扰测试类似,越来越多的数字无线应用开始进行整个 RF 环境或频带的仿真。例如,战舰离港前需要测试它的 RF 接收机系统。情报官员需要训练无线电操作员如何搜索可用信号的频带。超宽带无线(UWB)设计人员需要利用宽带干扰源测试数据链路。所有这些都需要在巨大的带宽上生成复杂的频谱环境。

利用多个传统的信号发生器构建整个 RF 频谱环境成本极高。但是,一台 AWG7000 就可以仿真或重现高达 5GHz 的 RF 信号频谱。此外,任意波形发生器的频谱输出可以任意改变,以模仿各种不同的频谱环境。

如果需要高保真频谱环境来模拟大信号强度差异,那么可以把几台 AWG5000 与外部上变频器连接。利用多台 AWG5000 能够覆盖与 AWG7000 相同的带宽,尽管会加大成本,但却可以把动态范围提高到 24dB。

此外,一台 4 个输出通道的 AWG5014 就可以产生相当可观的频谱,成本远远低于利用十多台传统信号发生器合成频谱环境的方法。

使用任意波形发生器生成调制信号

正如我们前边的无线测试实例所看到的,使用 AWG 生成测试信号有 3 种基本方法:生成基带 I-Q、中频信号和直接射频信号。在下面的章节里,我们将探讨每种方法的优劣,以及它们是如何将任意波形编辑进入 AWG 内存的。这样在对于在 AWG 的限制条件下根据不同的应用,如何选择最适合的方法会有一个基本的了解。并深入理解如何为每一种应用选择最适合的 AWG。

生成基带 I-Q 信号

利用 AWG 生成基带 I-Q 信号不仅仅是拥有 2 个输出来驱动调制器,同时还提供了其他优势。相对于大多数调制带宽,AWG 宽广的带宽还支持过采样。

AWG 的 DAC 输出端会产生一些量化噪声。因为当目标信号通过离散量化阶重建时,每个量化阶不可能都精确的表示所需幅值,这样就产生了量化噪声。

对于许多场合,有一个减小量化噪声的简单方法,就是选择象 AWG5000 系列这样的任意波形发生器,用许多位来表示每个取样信号。基带应用中,具有 14 位分辨率的 AWG5000 系列通常足以防止噪声本底带来的问题。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册



图 20. 以高于奈奎斯特率许多倍来对信号过取样，可以使数模转换器之后的滤波器更加精确而平均地输出噪声电平，减小量化噪声。

另一个减小量化噪声本底的方法是使用过取样技术。如果以奈奎斯特率或2倍于目标信号最高频率对信号进行取样，那么它产生的量化噪声会达到最大。以高于奈奎斯特率的频率对信号过取样，则降低量化噪声。这是因为 DAC 后面的滤波器平均化了过取样信号，从而使其更接近所需的真实信号电平。

经由过取样来减小量化噪声的方法增加了动态范围。因为基带 I-Q 信号可能处于最低频率，那就可能达到最大程度的过取样，因此 I-Q 调制方法在动态范围上具有明显的优势。

对于要求最大程度调制动态范围的应用而言，使用具有高的过采样率和外部 I-Q 调制器的 AWG 是非常有优势的。对于超出 AWG5000 系列带宽能力的宽带信号，可以使用 AWG7000 系列和过采样技术来达到良好的噪声本底。

用基带 I-Q 方法生成数字调制的不足在于它需要一个外部模拟向量调制器，而这样会引入各种不良的星群失真。

生成中频信号

为了避免使用外部调制器，直接中频合成的方法也许更为可取。它允许建造数字 I-Q 调制信号，并使之进入一单调制中频输出端。这样就避免了外部模拟向量调制器引入的潜在破坏性失真。

将 I 通道和 Q 通道数字叠加就得到在理想符号定时下的卓越的 I-Q 相位和幅度匹配。

许多中频合成都保证在 AWG 的频率范围内。具有 1.2GS/s 取样率的 AWG5000 系列可对 70MHz 中频以 14 位动态范围进行 17 倍的过取样，其量化噪声本底接近 -174 dBm/Hz 的热噪声本底。而有着 20GS/s 的 AWG7000 系列可对窄带 70MHz 中频进行 285 倍的过取样，对 500MHz 中频进行 40 倍的过取样。基于这一特性，甚至对于流行的 500MHz 这样的宽带中频都可以显著降低其噪声。

中频信号生成方法的不足是，较高的取样率会更快消耗 AWG 的可用内存。一旦生成，中频信号便可上变频为射频，用于接收机测试。若使用了外部上变频器，那么射频频率只受变频器的频率范围限制。将中频信号上变频为射频，额外增加了外部组件的复杂性。而直接生成射频信号的方法无需外部组件，在 AWG 资源充足的情况下，它对于射频测试是更优越的。

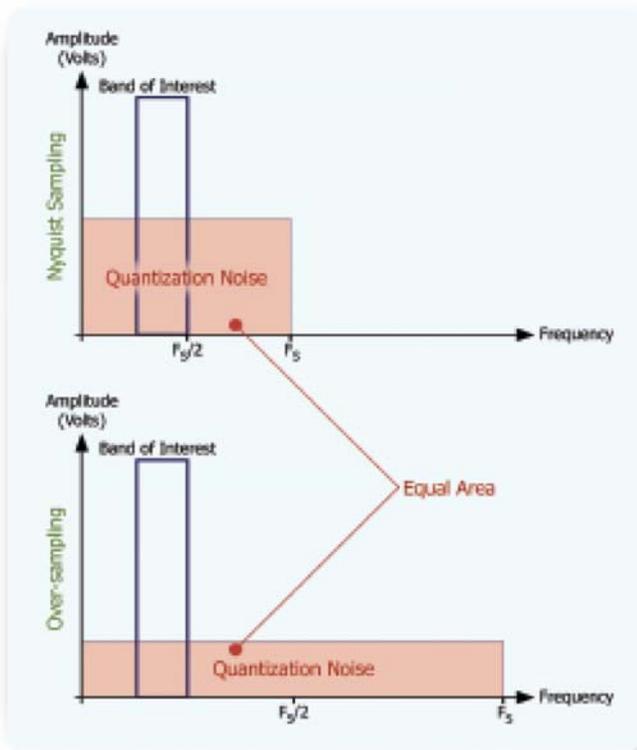


图 21. 增加过取样率扩展了量化噪声，减小了噪声本底。

生成射频信号

AWG 直接合成技术可以建立高带宽的射频信号，而无需外部调制器和上变频器。载频受取样率和模拟带宽需求的限制。

AWG7000 系列无与伦比的 20GS/s 取样率为各种射频直接合成应用开启了新视野。

直接射频合成方法具有与中频信号生成方法同样出色的 I-Q 相位和幅度匹配。



图 22. AWG7000 系列可直接生成 UWB 信号。

因依赖于目标射频的频率，AWG 的直接射频生成方法可能不允许大程度的过取样，这样就要经常考虑到量化噪声。当以频率驱动取样时钟来适应射频信号时，DAC 的线性度会降低。

若没有进行过取样，则 DAC 线性度定会使无杂散信号的动态范围 (SFDR) 最大化。

AWG7000 系列的 DAC 能在极高取样率下提供高达 10 位的线性数字化范围。AWG5000 系列的 DAC 对于优异的 SFDR 可提供高达 14 位的线性数字化范围。然而，如同所有的 DAC 一样，操作因数会降低线性度并减少转换器可实际处理的有效位数 (ENOB)。取样率是影响 DAC 有效位数并降低线性度的关键参数 [0]。因此当使用较高的取样率直接生成射频信号时，AWG 的线性度和 SFDR 会减小。

依据数字调制的复杂性和满足无差错传输的信噪比，我们必须确保 AWG 的 SFDR 能力超过了所需的信噪比。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

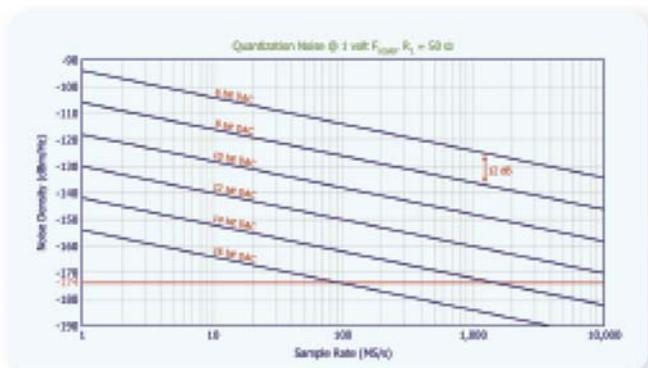


图23. 增加AWG的分辨位数和提高取样率都会降低量化噪声的功率谱密度。AWG7000系列的高取样率和AWG5000系列建立的垂直分辨率使得低噪声本底存在于各种频率和带宽中。

AWG用于直接合成射频应用时，另一个需要重点考虑的问题是内存使用率[0]。AWG7000系列支持高达64M个取样点，AWG5000系列最高支持32M个取样点。然而当取样时钟率增加时，波形内存也会更快耗尽。

有一种方法可以避免快速耗尽波形内存，就是使用波形排序。它可以使重复波形部分反复循环，例如一个BPSK信号可分为4段， $0^\circ \sim 180^\circ$ ， $180^\circ \sim 0^\circ$ ， $180^\circ \sim 180^\circ$ 和 $0^\circ \sim 0^\circ$ 。

每个射频波形段可存储在AWG的快速内存中，可以依据传送到AWG的位码型或是AWG内部生成的伪噪声序列的位码型来调出波形段。当生成复杂的波形记录长度时，显著降低了对内存的需求。

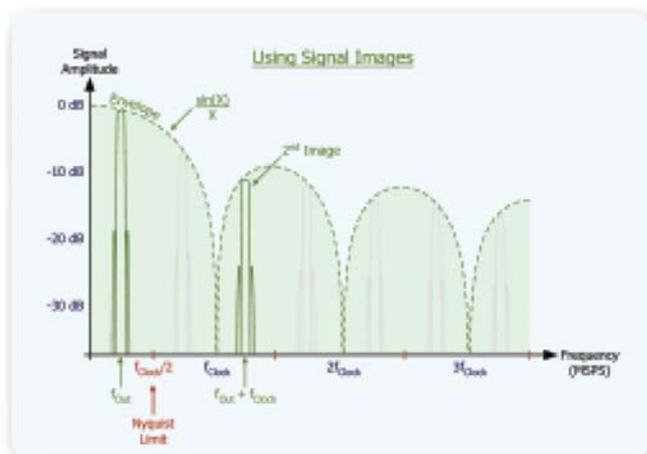


图24. 未经滤波的DAC输出一个由许多混频产物和谐波组成的正弦函数。可选择图像方式作为较高频输出。

AWG拥有的丰富排序命令允许通过无尽的程序分支、跳转和循环来持续生成调制信号。

欠采样或亚奈奎斯特采样也可以降低内存的使用率。未经滤波的DAC输出是一个富含谐波能量的正弦函数($\sin x/x$)。通常低通滤波器只允许低于奈奎斯特率的基频通过，以保证从DAC重建无失真信号。可用一带通滤波器取代低通滤波器来选择较高频信号图像。这样，DAC在半频率处同步，减少了一半的取样点数量。

这种方法的不足在于亚采样降低了有效动态范围。当选择较高频图像时，正弦函数的幅值会减小，而噪声级保持不变，所以SFDR会降低。再次，当进行亚采样操作时，需要仔细权衡所需信噪比与有效SFDR之间的得与失。

为了取样应用选择适合的 AWG 也很重要。AWG7000 系列提供非常高的取样率,然而在较低频使用亚取样技术时, AWG5000 系列的深动态范围可提供更好的 SFDR 性能。

为了最大限度利用 AWG 的可用内存,在选择取样率和编辑波形时要多加考虑。

编辑复杂信号

有若干编辑复杂数字调制信号的方式可用于 AWG 回放。

前面板命令和公式可用来创建波形,可使用 AWG 新改进的用户接口轻松输入预定义波形,如正弦波、方波、锯齿波和三角波。既可应用数学函数也可使用剪切/粘贴编辑,来创建用户自定义波形。还可以使用排序命令拼接不同的波形,因此直接通过 AWG 触摸屏便可产生无穷的波形段组合。排序命令包括:重复计数,等待触发,Go-to-N 以及跳转。

RFExpress™ 是 Tektronix 基于 PC 的软件,可以在 Windows 桌面环境下生成丰富的波形。

RFExpress 具有生成丰富而易用的基带 I-Q 调制阵列的功能。例如 BPSK, QPSK, OQPSK, $\pi/4$ QPSK, DQPSK, 16 QAM 到 1024 QAM, 8PSK, O-8PSK, GMSK, FSK, AM, FM 和 PM 调制,都可轻松生成,并支持可变频率和奈奎斯特滤波。也可应用调制来模拟像正交误差、增益不平衡、星座图倾斜这样的 I-Q 损伤和 AM/AM、AM/PM 这样的非线性影响,使其近似理想条件。

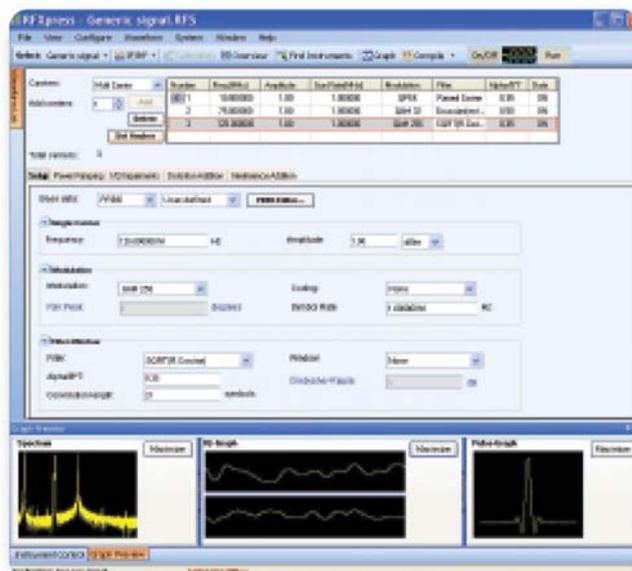


图 25. 如同这个多载波 QPSK 实例, RFExpress 为 Tektronix 的 AWG 产品提供了强大的波形生成功能。

RFExpress 也可以定义多载波中频和射频信号。每个载波的频率、符号率、调制类型、基带滤波和数据源都可分别定义。它拥有高至 512 个载波,从而可以对整个频谱环境进行数字合成并下载到 AWG 用于回放。

为保证正确合成目标信号, RFExpress 配置了多种图形化的设置构造帮助。在将波形下载到 AWG 之前,时域、频域、星座图、眼图和脉冲形状的波形设置都可以在 RFExpress 中以可视化的方式得到确认。

RFExpress 的另一个重要特点是其连通性。软件不仅能与 AWG 连通,还能与 Tektronix 先进的示波器连通。这样就可以通过 RFExpress 用示波器捕获宽带信号,再将捕获的信号下载到 AWG 来回放。这样实时的无线射频信号就捕获到了,并可以回放许多次。这一功能对于复杂信号衰落问题的一致性测试特别有用。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

RFExpress还拥有更多的特性,从对广阔的用户自定义调制、标准的支持,UWB和Wi-Media®功能,到专门的标度修正。RFExpress可以生成波形的数字表达,是用于AWG回放的理想工具。

除了RFExpress,也可以用第三方波形建立工具为AWG系列设计专门的波形。

软件无线电(SDR),完全在软件中定义调制。专注于此的数字无线工程师们通常选择流行的数学开发工具来建立信号特性,比如MATLAB®,Mathcad®或Excel®。AWG能够通过这些工具来导入文本数据文件来对任意波形内存编程。同时支持.wfm,.pat和.seq这些之前的Tektronix的AWG波形文件。

所以若能充分利用AWG从数字内存回放信号的灵活性,会有许多方法来生成数字表达。

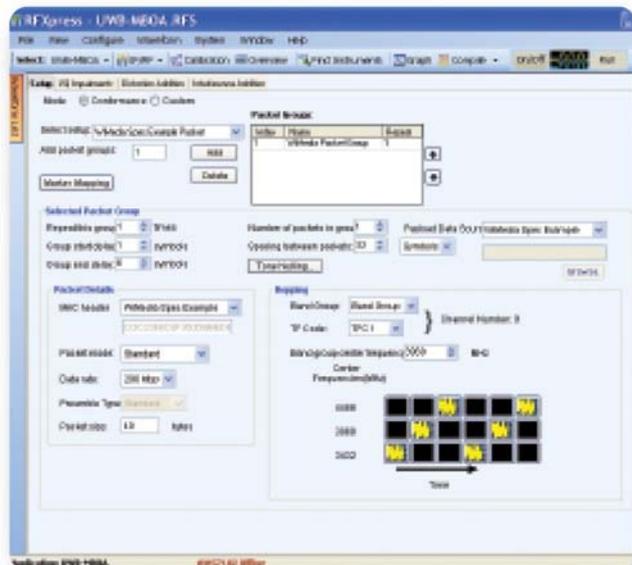


图 26. RFExpress 带有可选的应用标准,支持超宽带(UWB)和Wi-Media 信号的复杂调制。

关于回绕

AWG 的连续信号回放通常需要重复编辑其波形或段。在内存中需要重复的信号,其开始和结束部分的载波相位和频率必须相符。

波形始末部分的间断会产生频谱扩展,并且解调器载波恢复控制电路有可能变成解锁状态。

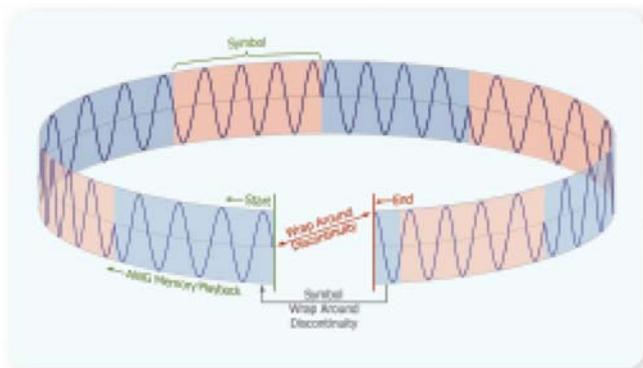


图 27. 当连续循环回放过程到达 AWG 的波形内存结束端时，会产生回绕间断。不期望的回绕跳变会引起杂散以及载波和符号同步的丢失。

同样的，为实现完美的连续操作，也需要符号转换、误差校正编码和复用协议在回绕点都保持一致。

回绕问题对于频分双工(FDD)信号是相当重要的。不像时分双工(TDD)信号那样通过数据链路轮流来回地发送和接收信息，FDD信号一直都是连续的。这意味着在传输 FDD 信号时没有合适的断点来连接波形末端，使之成为无毛刺的回绕。

有一个简单的解决方法是，使用载波和符号的整数周期。调整内存记录长度、符率、载波相位和符号周期，这样两端恰好在正确位置相遇，就能消除大部分回绕毛刺。对于允许某种程度 ISI 的 GMSK 调制或是只允许差分相移的 $\pi/4$ DPSK 调制，在记录的末端需要独特的符号序列，以防止回绕毛刺。

具有符号序列的基带滤波器可以用循环卷积消除符号误差产生的回绕毛刺。从数字上来看，对大量取样点进行循环卷积需要时间。在制作环境中，执行卷积过程所需的时间就显得尤为重要。

值得注意的是，若能使来自 AWG 的波形连续回放，就可以消除回绕间断。为简化这一过程，RFExpress 波形开发软件内置了处理回绕间断的功能，可轻松实现无毛刺回放。

使用任意波形发生器创建无线信号

入门手册

展望

在无线射频应用中，AWG 的实用性和重要性正日益明显。不断增加的取样率、分辨率、线性度和波形内存长度使 AWG 应对无线应用更加得心应手。

得益于更大的 DAC 分辨率位和较高的过取样率，这些来自动态范围、带宽和频率的传统限制正在消失。

理解了基带 I-Q、中频和射频生成技术之间的对比分析，可以更充分的发挥 AWG 的作用。最终，如能恰当使用 AWG，则其可与许多专门定制的信号发生器相匹敌，而成本仅是它们的几分之一。

Tektronix 的 AWG 产品线提供美妙灵活的波形生成功能，使其能够产生当今最富挑战性的数字无线信号。结合 RFExpress 和直观的前面板菜单，可以轻松生成带有损伤的复杂的多载波 I-Q 调制信号。

若要生成低于 379MHz 的复杂数字调制无线测试信号，则 AWG5000 系列是非常理想的工具。AWG5000 系列具有 14 位分辨率和 4 个高至 1.2 GS/s 的取样输出，能提供优越的信号保真度和测试便利。

具有 20 GS/s 取样率的 AWG7000 系列为业界提供领先的性能。它能有力地支持最尖端的 UWB 应用和超过 5GHz 带宽的压缩雷达脉冲。

过去，任意波形发生器只限于应用在具有受限动态范围的低频基带场合，而今它正迅速成为射频和微波工程师必需的新一代测试平台。

很多工程师都在使用 AWG 应对最为艰难的射频测试激励应用。今天，通过一个示范项目，Tektronix 邀请您来亲身感受一下现代任意波形发生器在无线测试领域的身手。

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编: 201206
电话: (86 21) 5031 2000
传真: (86 21) 5899 3156

泰克北京办事处

北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 6235 1210/1230
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼1802-06室
邮编: 200040
电话: (86 21) 6289 6908
传真: (86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市罗湖区深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦G1-02室
邮编: 518008
电话: (86 755) 8246 0909
传真: (86 755) 8246 1539

泰克成都办事处

成都市人民南路一段86号
城市之心23层D-F座
邮编: 610016
电话: (86 28) 8620 3028
传真: (86 28) 8620 3038

泰克西安办事处

西安市东大街
西安凯悦(阿房宫)饭店345室
邮编: 710001
电话: (86 29) 8723 1794
传真: (86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市汉口建设大道518号
招银大厦1611室
邮编: 430022
电话: (86 27) 8781 2760/2831

泰克香港办事处

香港铜锣湾希慎道33号
利园3501室
电话: (852) 2585 6688
传真: (852) 2598 6260

有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料,并不断予以充实,可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 www.tektronix.com.cn



版权©2009,泰克公司。泰克公司保留所有权利。泰克公司的产品受美国和国际专利权保护,包括已发布和尚未发布的产品。以往出版的相关资料信息由本出版物的信息代替。泰克公司保留更改产品规格和定价的权利。TEKTRONIX 和TEK 是泰克有限公司的注册商标。所有其他相关商标名称是各自公司的服务商标或注册商标。

10/09 DM

76C-20180-1

Tektronix®