

## 无线通信中的 OFDM 技术及测试

作者：Mark Elo, [吉时利](#)仪器公司射频产品总监  
张毓华, [吉时利](#)仪器公司中国射频产品业务拓展经理

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing, 正交频分多路复用) 是各种通信系统中广泛使用的一种数字调制技术。本文将介绍 OFDM 的内涵、重要性、应用范围以及测试仪器的技术要求。

我们先来解释一下 OFDM 的特别之处, 其中有三点值得说明。

OFDM 具有很高的频谱效率, 相比 GSM 和 W-CDMA 之类的无线技术能够在单位带宽内调制更多的数据。图 1 对比了几种主要无线蜂窝技术的频谱效率, 以及它们与 [WLAN](#) 和 [WiMAX](#) 的对比情况。以面向移动蜂窝设备的无线 LTE (Long Term Evolution, 长期演进) 和 UMB (Ultra Mobile Broadband, 超移动宽带) 技术为代表的第四代无线通信技术计划将采用 OFDM 和 OFDMA 技术。

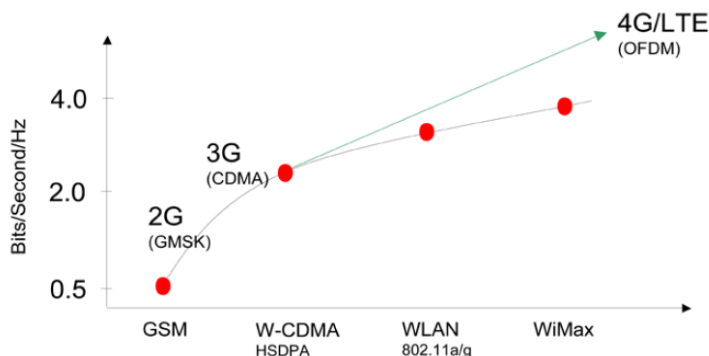


图1. 主要蜂窝技术的频谱效率及其与 [WLAN](#) 和 [WiMAX](#) 的对比。以 LTE (即无线蜂窝设备的长期演进) 技术为核心的第四代无线通信将采用 OFDM 技术。

OFDM 能够容忍带有较高射频干扰的环境。某些使用 OFDM 技术的通信服务——例如 [WLAN](#)——工作在开放的 ISM (Industrial Scientific Medical, 工业科学医学) 频带中, 它们必须与很多其它使用该开放频带的设备共存, 包括模拟无绳电话 (900MHz)、微波炉 (2.45GHz)、蓝牙设备 (2.45GHz)、数字无绳电话 (2.45GHz 或 5.8GHz) 和 [WLAN](#) (2.45GHz 或 5.8GHz)。

最后一点, OFDM 能够很好地工作在复杂的多通路环境中, 本文后面将会详细说明。

### 数字调制综述

大多数数字传输技术都通过调制一对相位差为  $90^\circ$  的正交正弦波来实现。调制信号可以表示为一个同相 (I) 分量与一个正交 (Q) 分量的矢量和, 如图 2 所示。

## 数字调制综述 信号的I和Q分量

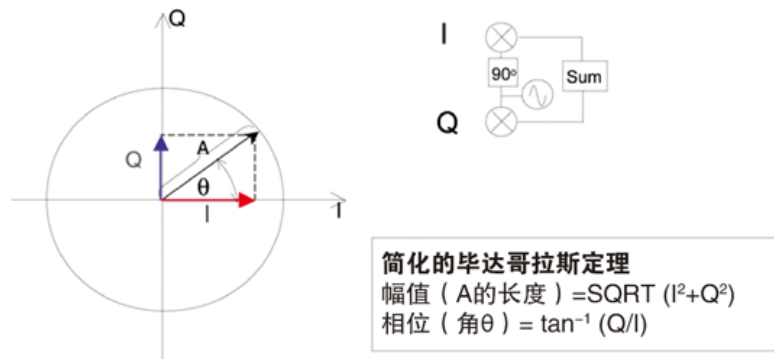


图 2. 大多数数字传输技术都通过调制一对相位差为 90° 的正弦波实现。调制信号可以表示为一个同相 (I) 分量与一个正交 (Q) 分量的矢量和。

按照这种方法进行数字信号的编码映射有多种实现方式。如果改变两个正弦波之间的相位关系，那么这就是 PSK (phase shift keying, 相移键控) 技术。常见的 PSK 是采用四个相位的 QPSK (quadrature phase shift keying, 四相移键控); 如果采用 8 个相位，那就是 8PSK。

如果同时改变两个正弦波的幅值和相位，那就是 QAM (quadrature amplitude modulation, 正交幅值调制) 技术。

分析所生成的调制信号的最好方法是采用 VSA (vector signal analyzer, 矢量信号分析仪)，例如 [吉时利的 2820](#)，它以星座图中正交信号对的形式处理所有的数据。图 3 给出了几种调制信号的星座图，包括 QPSK、8PSK 和 16QAM。

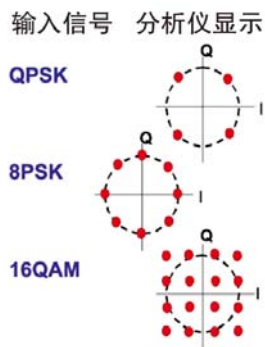


图 3. 几种调制信号的星座图。

### 调制质量分析

衡量数字接收信号质量的常用指标是误差矢量幅值，即 EVM (如图 4 所示)。EVM 是接收信号的矢量误差幅值与其理想的信号幅值的比值。EVM 从数学的角度可以表示为：

$$EVM = \sqrt{\frac{P_{error}}{P_{reference}}} \cdot 100\%$$

或

$$EVM (dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{error}}{P_{reference}} \right)$$

蜂窝技术规范通常用百分比来表示某些量，而在 [WLAN](#) 领域则一般用分贝数来表示 EVM 的大小。

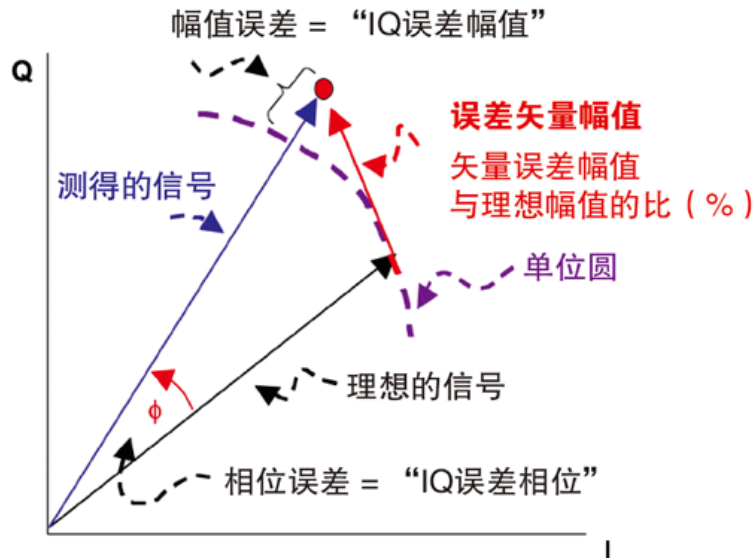


图 4. 衡量数字接收信号质量的常用指标是误差矢量幅值，即 EVM。EVM 是接收信号矢量误差幅值与其理想的信号幅值的比值。

### 多路径问题

多路径问题进一步增大了 EVM 测量的复杂性。图 5 给出了一种符号速率为每秒 1M 的蓝牙信号。在这一速率下，接收器将在一微秒的时间窗口内接收到一个特定的符号。如果由于多路径问题而使信号延迟了一微秒以上，接收器将在下一个符号周期内收到应有的符号，从而引起严重的符号错误。

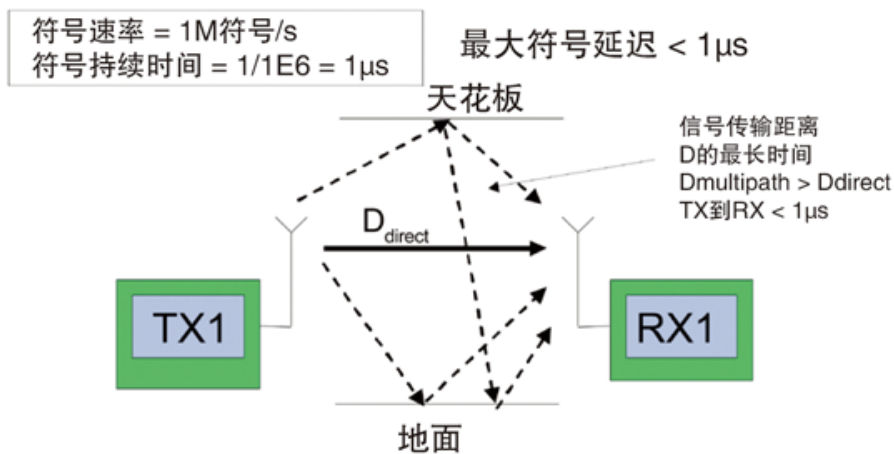


图 5. 如果信号直接到达路径与反射到达路径的长度差异使传输延迟差超过 1 微秒，那么接收器将在下一个符号周期内收到符号。

数据速率越快，多路径引起 ISI（Inter Symbol Interference，符间干扰）问题的可能性就越大。减少误码率最直接的方法是降低符号速率，使得每个符号持续的时间延长，增强抵抗多路径问题的能力。但是，这种方法会降低数据速率。我们需要一种既能够降低符号速率，又不会降低数据速率的方法——看起来似乎是一件不可能的事。OFDM 技术是解决这一难题的方法。

OFDM 技术能够同时传输大量间隔紧密的载波，每个载波调制一个不同的信号。如图 6 所示，单独的 I 和 Q 输入信号被转换成分离的载波。每个载波的符号速率较低，因而具有较强的抵抗多路径问题的能力。但是由于载波数量很多，所以总体上仍然保持较高的数据速率。相邻载波都是频率相互正交的，从而使它们之间的串扰降到最低限度，不需要窄带滤波器。

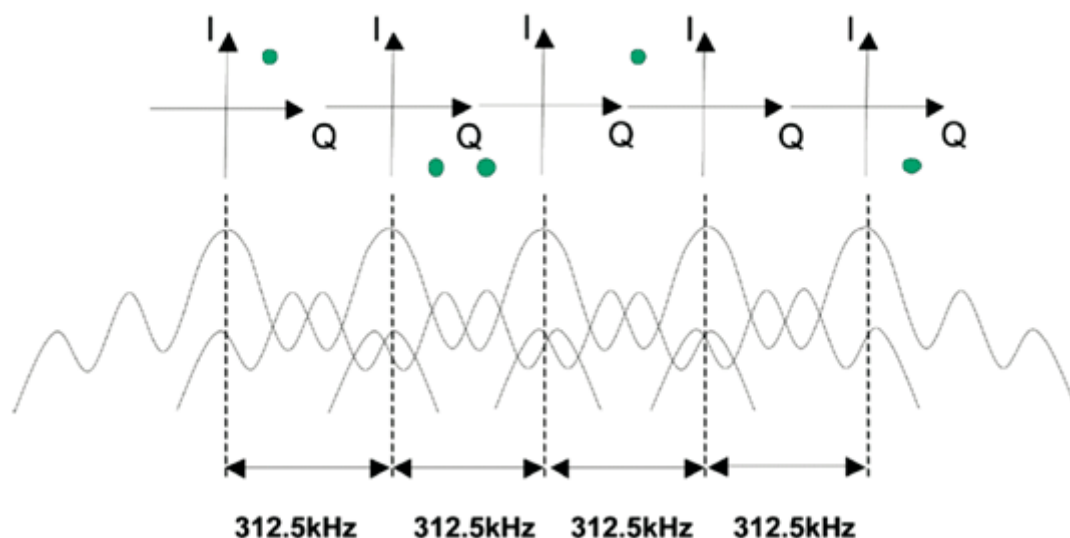


图 6. 与每次传输一个符号不同的是，OFDM 能够通过大量载波同时传输多个符号。这就是频分多路复用分量。子载波分布在精心选择的多个频率上，相互“正交”，邻近的子载波不会相互干扰。

## OFDM 射频技术

正如大家所看到的，这里涉及很多复杂的数学知识。很多传统的测试仪器缺少信号处理功能，无法快速执行这类测量操作。如图 7 所示，[吉时利](#)采用基于 DSP 的增强架构能够快速实现这类分析操作。

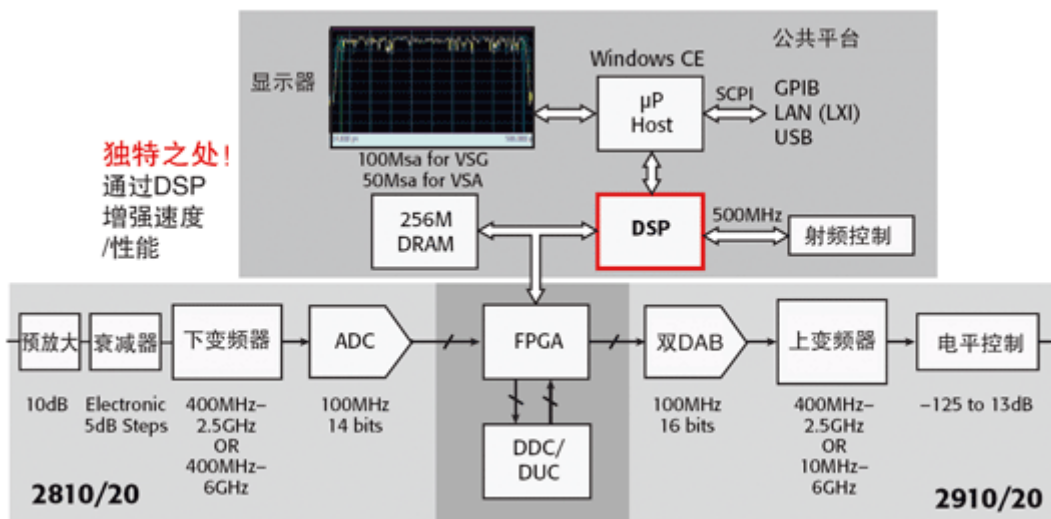


图7. 2810 矢量信号分析仪和2910 矢量信号发生器的数字电路模块图。

OFDM 虽然在概念上比较简单，但是它的实现却非常复杂。从数学上来看，它可以在发射端采用 IFFT（Inverse Fast Fourier Transform，反向快速傅立叶变换）在接收端采用 FFT 变换来实现。如图 8 所示，多个并行符号被变换到输出端两个经过调制的正弦波上。其中，IFFT 变换的作用就像是一个特殊的多路复用器。

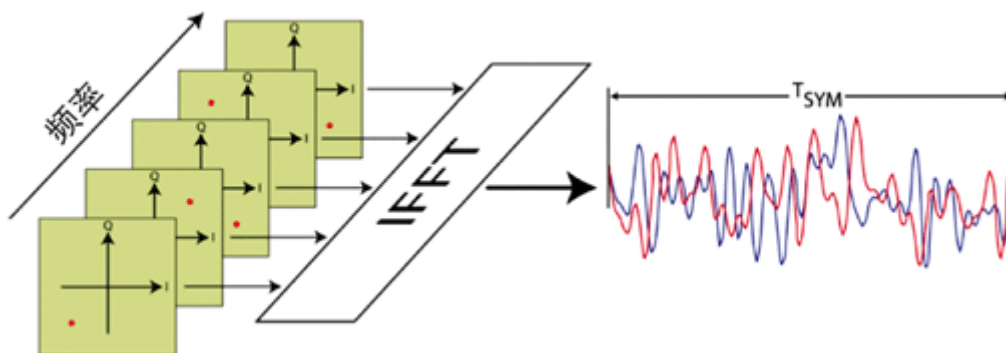


图8. OFDM 可以在发射端采用 IFFT 变换在接收端采用 FFT 变换来实现。在发射端，IFFT 将多个并行的输入信号变换到输出端两个经过调制的正弦波上。IFFT 变换的作用就像一个特殊的多路复用器。

为了保持各路信号的同步，OFDM 信号包含多个用于同步的子载波（如图 9 所示），我们称之为导频，作为相位和幅值基准，在接收器解调其他子载波中的数据时实现同步控制。

- 用作其他子载波中数据解调的相位和幅值基准

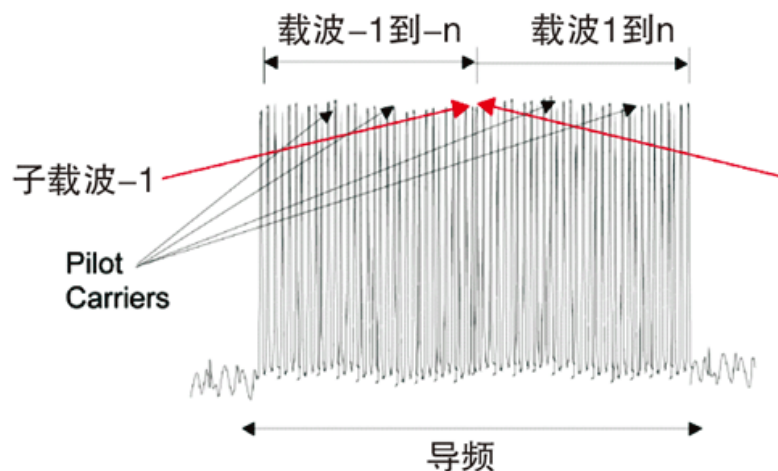


图 9. OFDM 信号包含多个称为导频的子载波，作为相位和幅值基准，在接收器解调其他子载波中的数据时实现同步控制。

关键特性的测量：星座图和 EVM

图 10 给出了符合 802.11j 标准的 [WLAN](#) 信号星座图。注意，虽然该信号是采用多个载波进行传输的，但它本质上仍然是一个 QAM 信号。其中也包含两个冗余的符号，表示在导频上调制的信息。

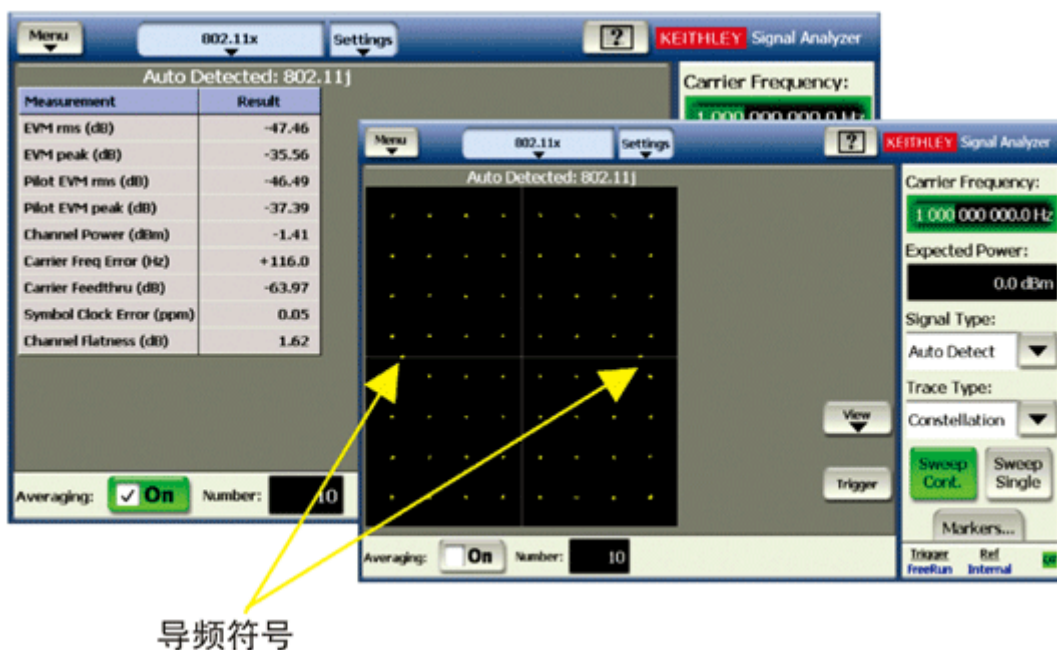


图 10. 符合 802.11j 标准的 [WLAN](#) 信号星座图。注意，虽然该信号是采用多个载波进行传输的，但它本



质上仍然是一个QAM信号。其中也包含两个冗余的符号，表示在导频上调制的信息。

OFDM 的应用非常广泛，如表 1 所示。

表 1: 使用 OFDM 技术的通信标准

无线	有线
IEEE 802.11a, g, n (WiFi), 无线 LAN	基于 POTS 铜线互连的 ADSL 和 VDSL 宽带接入
IEEE 802.15.3a UWB (超宽带) 无线 PAN	MoCA (基于同轴线缆的多媒体联盟) 家用互连网
IEEE 802.16d, e ( <a href="#">WiMAX</a> ), WiBro 和 HiperMAN 无线 MAN	PLC (电力线通信)
IEEE 802.20 MBWA (移动宽带无线接入)	
DVB (数字视频广播) 陆地 TV 系统: DVB-T、DVB-H、T-DMB 和 ISDB-T	
DAB (数字音频广播) 系统: EUREKA 147、Digital Radio Mondiale、HD Radio、T-DMB 和 ISDB-TSB	
Flash-OFDM 蜂窝系统	
3GPP UMTS & 3GPP@ LTE (长期演进) 和 4G	

### WLAN

WLAN 是由 IEEE 802.11 标准定义的，其中包括从 a 到 g 多个变种，如表 2 所示。在 16.25MHz 的带宽内包含 52 个载波 (如图 11 所示)，编号从 -26 到 +26，间隔 312.5kHz。其中载波 7 和 21 (-21、-7、+7 和 +21) 是导频。报文结构为“前同步码—报头—数据块”，子载波调制类型为 BPSK、QPSK、16-QAM 或 64-QAM。

- 子载波之间具有规则的间隔，称为子载波频率间隔 ( $\Delta F$ )。
- 子载波的频率相对中心频率为  $k \Delta F$ ，其中  $k$  是子载波的序号。

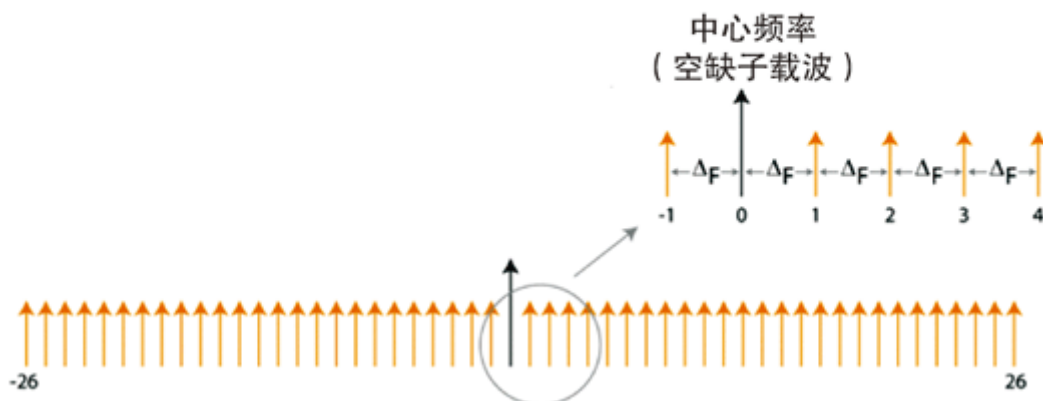


图 11. 调制方案中的各个载波称为子载波。子载波之间具有规则的间隔，称为子载波频率间隔 ( $\Delta F$ )。子载波的频率相对中心频率为  $k \Delta F$ ，其中  $k$  是子载波的序号。

表 2: [WLAN](#) 概况

802.11	含义
a	54Mbps OFDM、5.9GHz 频带、20MHz 信道
b	11Mbps CCK、2.4GHz（传统技术，非 OFDM）
g	目前已非常普及——与 802.11a 相同，只是频率为 2.4GHz
j	802.11g 的日本版，采用一半大小的采样速率
n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 是一个并未完成的标准</li> <li>• 与 802.11g 类似，但带宽可达 600Mbps</li> <li>• OFDM</li> <li>• <a href="#">MIMO</a></li> <li>• 20 和 40MHz 的信道</li> </ul>

最初的 [WLAN](#) 标准是 802.11b，它不是基于 OFDM 技术的。a 和 g 相同：a 采用 5GHz 的 ISM 频带，g 采用 2.4GHz 的 ISM 频带。j 是 g 符号速率降低的版本，主要用于日本市场，n 基于 [MIMO](#) 技术，有关内容将在另外一本技术白皮书中进行介绍。

国际上多个组织都在从事 [WLAN](#) 的研究规范工作：WiFi 行业联盟致力于定义 802.11 标准所需的子集，以确保不同厂商的设备之间具有更好的互操作性。EWC 行业联盟致力于完善目前还没有完成的 n 标准，已经为此达成了一个统一的版本，并力图在 802.11n 标准批准之前提出实际的解决方案。

### [WLAN](#) 所需的测试设备

[WLAN](#) 所需的测试设备必须具有高达 6GHz 的频率范围，并且能够调制或解调除了 802.11n 之外所有类型的带宽高达 16.25GHz 的 OFDM 信号，802.11n 的最大带宽为 40MHz。

到目前为止，我们对 OFDM 已经有了初步的认识。在 OFDM 中所有的载波都是用于构成单链路。OFDMA（Orthogonal Frequency Division Multiple Access，正交频分多路复用多址）采用与 CDMA 类似的方式将不同组的子载波分配给不同的用户，其最著名的应用就是 [WiMAX](#)。

### [WiMAX](#)

[WiMAX](#)（Worldwide Interoperability for Microwave Access，全球微波接入互通）在概念上与 802.11 标准非常类似，但是要同时满足多个用户的需求使得它的实现更加复杂。

[WiMAX](#) 主要有两个变种：固定式和移动式。移动式 [WiMAX](#)，即 802.16e-2005（常称为 802.16e），易于实现移动设备之间的互连。它采用 SOFDMA（Scalable OFDM Multiple Access，可扩展 OFDM 多路多址）技术，这种技术能够与 OFDMA 互操作，但是需要新的设备支持。802.16e 标准也增加了对 [MIMO](#)（Multiple-Input Multiple-Output，多入多出）的支持，有关内容将在另外一本技术白皮书中进行介绍。

固定式 [WiMAX](#)，即 802.16-2004（常称为 802.16d），采用 OFDMA 技术，工作频率范围为 2~11GHz（在 5.9GHz 以上没有经过正式的批准）；它在 2km 范围内能够实现 10Mbps 的实际数据速率。



表 3 归纳了固定式与移动式 [WiMAX](#) 二者的差异。

表 3: 固定式与移动式 [WiMAX](#)

802.16	含义
802.16-2004 (aka 802.16d)	定点接入（家用或办公室）的实际系统
	OFDMA（OFDM 多路多址） 2~11GHz（在 5.9GHz 以上没有经过正式的批准） 实际速率：2km 范围内 10Mbps
802.16e-2005	该标准的当前版本，经过升级后包含移动接入
	SOFDMA（可扩展 OFDM 多路多址） SOFDMA 能够与 OFDMA 互操作，但是需要新的设备支持 增加了 <a href="#">MIMO</a> 技术

固定式 [WiMAX](#) 与 [WLAN](#) 有类似之处，即它具有 OFDM 物理层。移动 [WiMAX](#) 基于 OFDMA 物理层。它同时采用了频分多路复用和时分多路复用技术。子载波组（如图 12 所示）表示单独的数据流。每组子载波也具有帧结构。

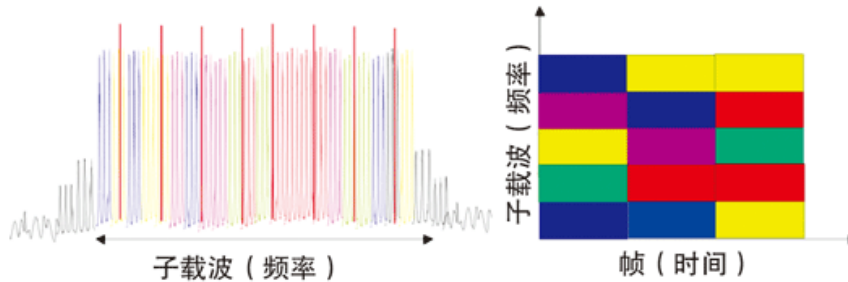


图 12. 移动 [WiMAX](#) 同时采用频分多路复用和时分多路复用技术。子载波组（如图 12 所示）表示单独的数据流。每组子载波也具有帧结构。

时分特征如图 13 所示。帧结构等同于一个报文。上行链路和下行链路之间有一个时隙，称为转换时隙。

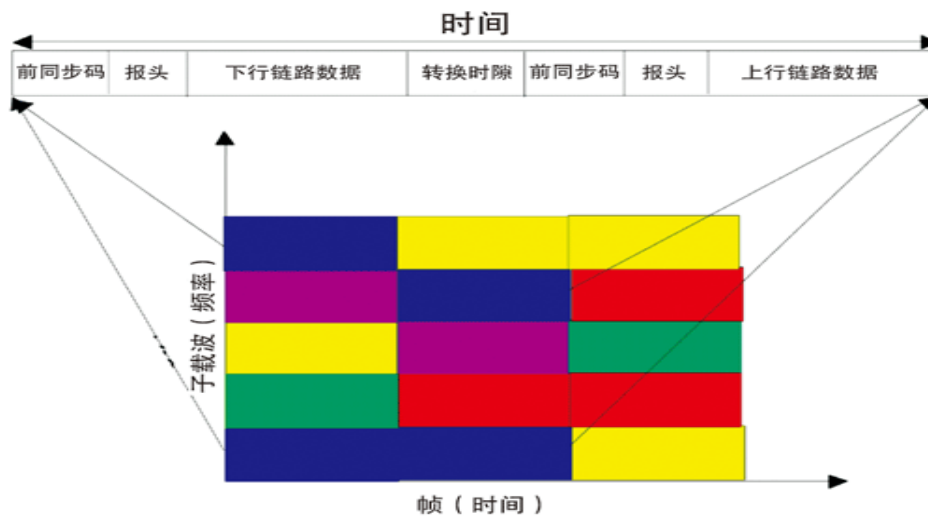


图 13. 时分特征如图 13 所示。帧结构等同于一个报文。上行链路和下行链路之间有一个时隙，称为转换时隙。

移动 [WiMAX](#) 是一个动态系统。所传输的数据量与每组子载波上的调制类型和符号速率有关。如果链路质量较好，使用诸如QAM之类的高吞吐率调制类型，占用大部分带宽，那么就会限制系统内的用户数量。随着用户进一步远离基站，信号质量就会下降，系统能够保持较高的吞吐率。此时可以采用诸如QPSK之类吞吐率较低的调制方案。因此，这样就不需要一大组子载波了，系统就能够支持更多的用户。

图 14 给出了 [吉时利](#) 的 [2820](#) 能够实现的两种 [WiMAX](#) 测量类型。我们可以看到，报文结构中包括下行和上行链路的数据，DL和UL，中间间隔一个转换时隙。UL包含较多的数据，可以使用比较复杂的调制格式，例如QAM。这就是我们选择解调的对象，但是我们也可以对采用QPSK格式的DL部分进行解调。我们还可以对两者同时进行解调，并在星座图上显示两种调制类型的混合图形。

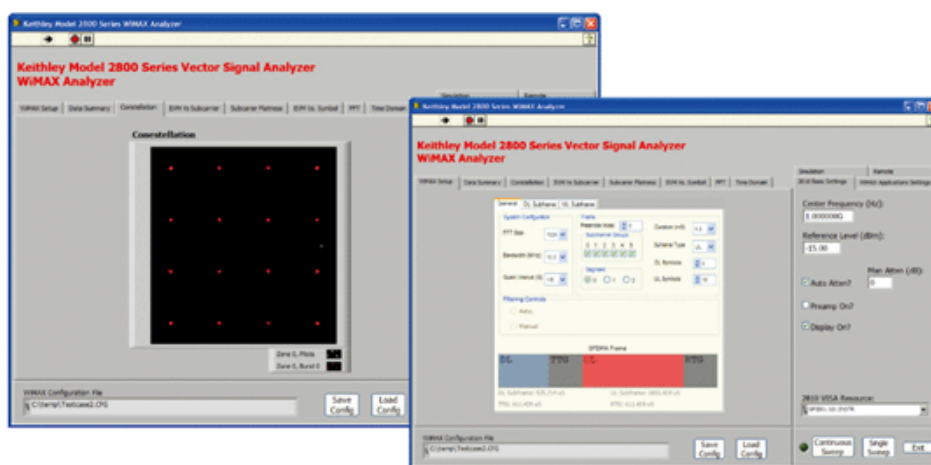


图 14. 在这种 [WiMAX](#) 测量中，我们可以看到报文结构中包括下行和上行链路的数据，DL和UL，中间间隔一个转换时隙。UL包含较多的数据，可以使用比较复杂的调制格式，例如QAM。这就是我们选择解调的对象，但是我们也可以对采用QPSK格式的DL部分进行解调。我们还可以对两者同时进行解调，并在星座图上显示两种调制类型的混合图形。

## 结束语

就速度与移动性而言，[WLAN](#)和 [WiMAX](#)标准相比传统的基于蜂窝的通信技术大大提高了数据传输的速度。

未来的无线技术和第四代蜂窝系统，例如LTE或UWB，将是OFDM类的调制技术与 [MIMO](#)射频结构的组合（如图 15 所示）。在选择测试设备测试目前的射频标准时，最重要的是要考虑无线技术的发展趋势，确保您购买的测试仪器能够向前兼容。

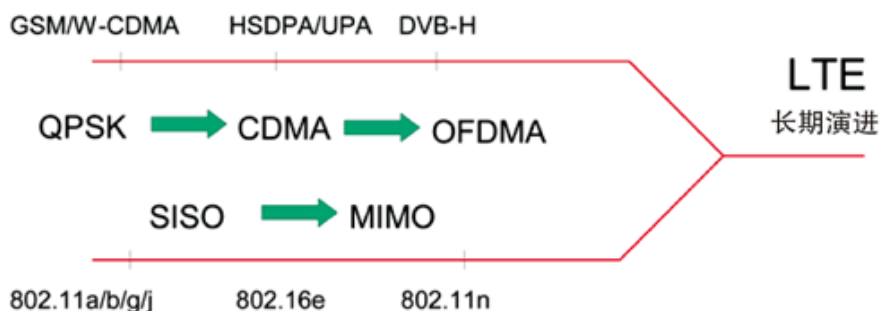


图 15. 无线技术和第四代蜂窝系统的LTE(长期演进)将是OFDM类的调制技术与MIMO射频结构的组合。在选择测试设备测试目前的射频标准时,最重要的是要考虑无线技术的发展趋势,确保您购买的测试仪器能够向前兼容。

选择仪器时的一项关键指标就是带宽; WiMAX和 WLAN的带宽都超过了 25MHz。如图 16 所示, 吉时利的无线测试仪器具有 40MHz的标准带宽, 是目前市场上极具性价比的仪器。



吉时利仪器具有 40MHz的标准带宽

图 16. 选择仪器时的一项关键指标就是带宽; WiMAX和 WLAN的带宽都超过了 25MHz。吉时利的信号分析仪具有 40MHz的标准带宽, 而信号发生器的任意波形具有 20、40 和 80MHz的带宽, 是目前市场上极具性价比的仪器。



[点击按钮, 即时交谈, 获得在线支持](#)

或者拨打全国免费电话: **800-810-1334/400-650-1334**

或访问 <http://www.keithley.com.cn>

北京办事处:

北京市海淀区北太平庄路  
18号城建大厦 A1301  
邮编: 100088  
电话: 010-82255010  
传真: 010-82255018  
Email: china@keithley.com

上海代表处:

上海市延安西路 728 号  
华敏翰尊国际 5E  
邮编: 200050  
电话: 021-51758333  
传真: 021-51758330  
Email: shanghai@keithley.com

深圳代表处:

深圳市深南中路 2 号  
新闻大厦 11 楼 14 室  
邮编: 518027  
电话: 0755-82090093/82090095  
传真: 0755-82090087  
Email: shenzhen@keithley.com