

# 集成 ZigBee 的射频实现与测试

## 应用指南

在设计嵌入式 ZigBee (或其它基于 IEEE 802.15.4 的协议) 射频解决方案时,在最终产品中的集成度方面有一些折衷的考虑。挑战在于如何平衡集成度和开发成本对最终应用性能的要求。由于低成本无线技术在许多电子产

品应用中激增,简化 ZigBee 模块性能的验证和检验非常重要。本应用指南展示了泰克 MDO4000 系列示波器在验证和检验 ZigBee 无线模块集成度方面的应用及简便性。

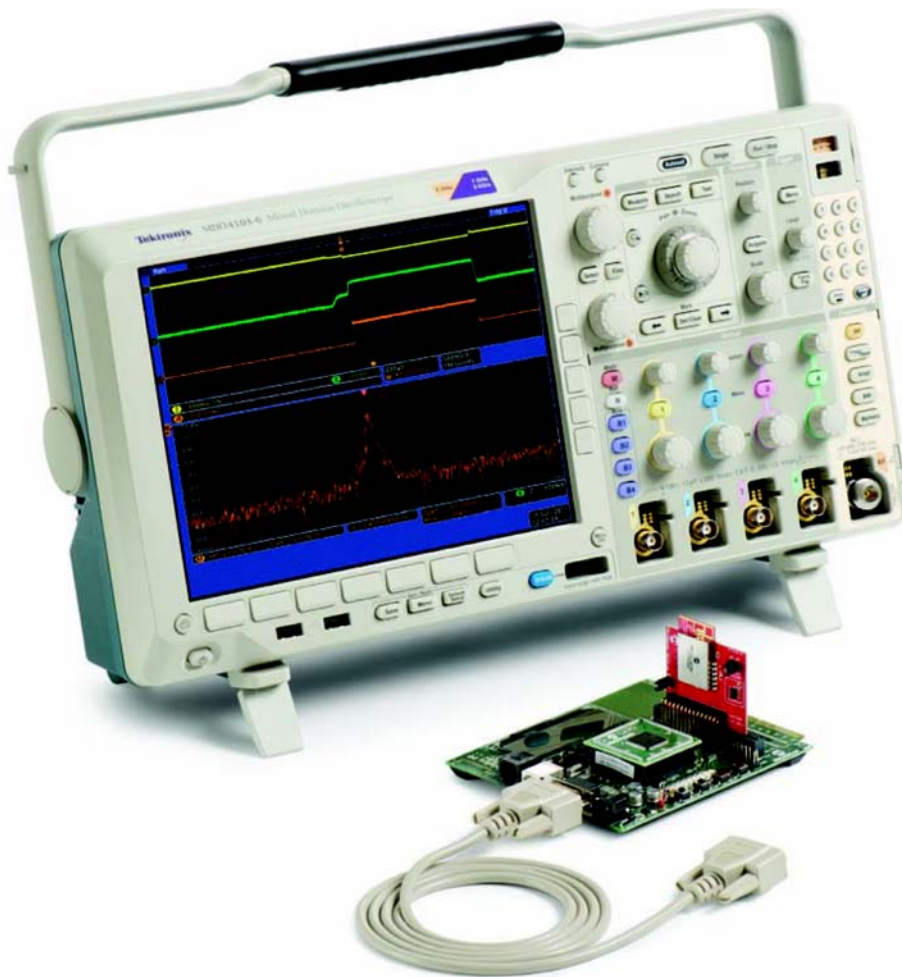


图 1. 泰克 MDO4000 系列混合域示波器和 Microchip 无线电测试电路板模块。

### 嵌入式集成 ZigBee 模块

事实证明, IEEE 802.15.4 物理层无线技术在各种短距离控制和数据通信应用中非常流行。ZigBee 协议提供了一个由设备组成网状网络, 因此大型区域及数百台、甚至数千台设备可以相互通信。至少在理论上, 不同来源的 ZigBee 标准设备可以相互通信。不同的 IEEE 802.15.4 协议厂商, 提供了功能少、软件简单的方案, 可以在有限的特定应用或特定功能中工作。

无线系统应用包括家庭和商业楼宇自动化、能源监测和控制、安全系统、医疗监测及各种商业和工业产品。

围绕着这套通信标准已经开发出了丰富的 IC 和模块支持结构, 这些模块带有天线, 并经 FCC 或其它地区机构认

证。每个 IC 和模块还有两个增强选项。嵌入式产品只采用 IEEE802.15.4 低层协议的射频电路, 因此需要单独的微控制器或微处理器来处理 ZigBee 或其它高级软件及应用。也有的 IC 和模块内置微控制器, 运行 ZigBee 或其它协议软件。许多 IC 和模块带有未定义的 I/O 引脚, 因此整个产品可能需要很少模块和传感器和/或制动器及配件。此外, 许多模块带有功放和接收机低噪声前置放大器(LNA)。功放和 LNA 可以明显提高射频范围, 但成本高、能耗大。

对任何一种方案, 都需要 PCB 支持 IC 或模块。还需要有足够峰值功率及低噪声的电源。如果选择芯片级方案, 还需要相应的天线接口电路。

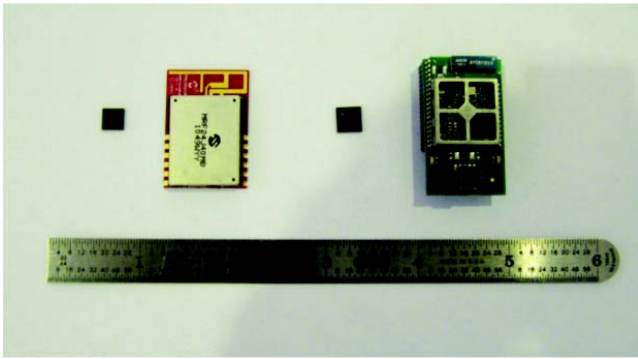


图2. 来自不同厂商的典型 ZigBee 无线电选项实例，可以有不同的集成度，从无线电集成电路到全面集成模块及微控制器、功放和 LNA。

图2 从左到右显示了无线 IC (Microchip Technologies MRF24J40)、带有 100 mW 功放和 LNA (Microchip MRF24J40MB) 的无线模块、射频和微控制器集成电路 (Ember EM357)、以及带有微控制器和外部功放和 LNA (Ember EM357-MOD) 的无线模块。

### ZigBee 设计考虑因素

当越来越多的产品采用 ZigBee 技术时，从许多类型的无线系统中选择一种应用，设计人员会面临着许多取舍，包括：

1. **成本**—与 IC 相比，模块的原材料成本与工程设计和机构认证成本之间存在着明显的矛盾。模块成本明显要高于射频 IC，因为需要大量的支持及组装工人，部分额外成本在于 PCB 材料，但大多数是补偿模块设计费用及模块制造商成本。然而，无线电路设计及机构认证也具有成本。对基于 IC 的设计，如果要使用 ZigBee 协议，ZigBee 联盟测试和认证会增加成本。经验表明，集成 IC 对模块的盈亏平衡点典型为 10,000 块对 25,000 块。
2. **开发时间**—一旦产品准备就绪，就可以推广预认证的模块。集成电路级设计的机构审批时间最短要一个月，但通常要远远长于一个月。一般来说，这一般会增加到开发过程中，因为产品必需接近最后形状，软件需要基本完成之后，才能开始认证测试。
3. **外观形状**—设计一个定制的 IC 级无线系统可以灵活地配置射频电路。在定制设计中，根据产品的整体配置，无线系统可以利用模块放不进去的空间。一般来说，提供的模块所有部件都位于 PCB 一侧，以便模块能够焊接到主电路板上。在定制设计中，部件可以放到任何配置中，并放在电路板的两侧。
4. **协议灵活性**—许多模块或内置微控制器 IC 的制造商不提供 ZigBee 或其它通信软件的源代码。这意味着，如果希望或需要定制功能，那么在厂商没有提供这种功能时，几乎没有可用的资源。
5. **特殊要求**—对有些应用，需要硬件模块或 IC 集成了射频和微处理器的功能，虽然可以选择增加第二个微控制器，但总成本会提高到超出所需水平。在其它情况下，可能希望提供市场上没有的功能。例如，美国规范允许 1 W 的无线输出功率，但有这种功能的模块很少。
6. **天线类型和位置**—模块在 PCB 上提供了天线，其方式为印刷模式，如 Microchip 模块，或者为“芯片”天线，如 Ember 模块，并带有外部天线。如果天线位于屏蔽外壳内部，或离最终封装设计中的其它组件太近，模块上的天线可能会影响性能。有的模块带有外部天线使用的连接器。但是，唯一合法的天线是使用与模块一起经过认证的天线。如果有理由(如需要更高的增益)使用模块厂商不支持的天线，那么要求机构认证，这会导致相应的成本和时间。

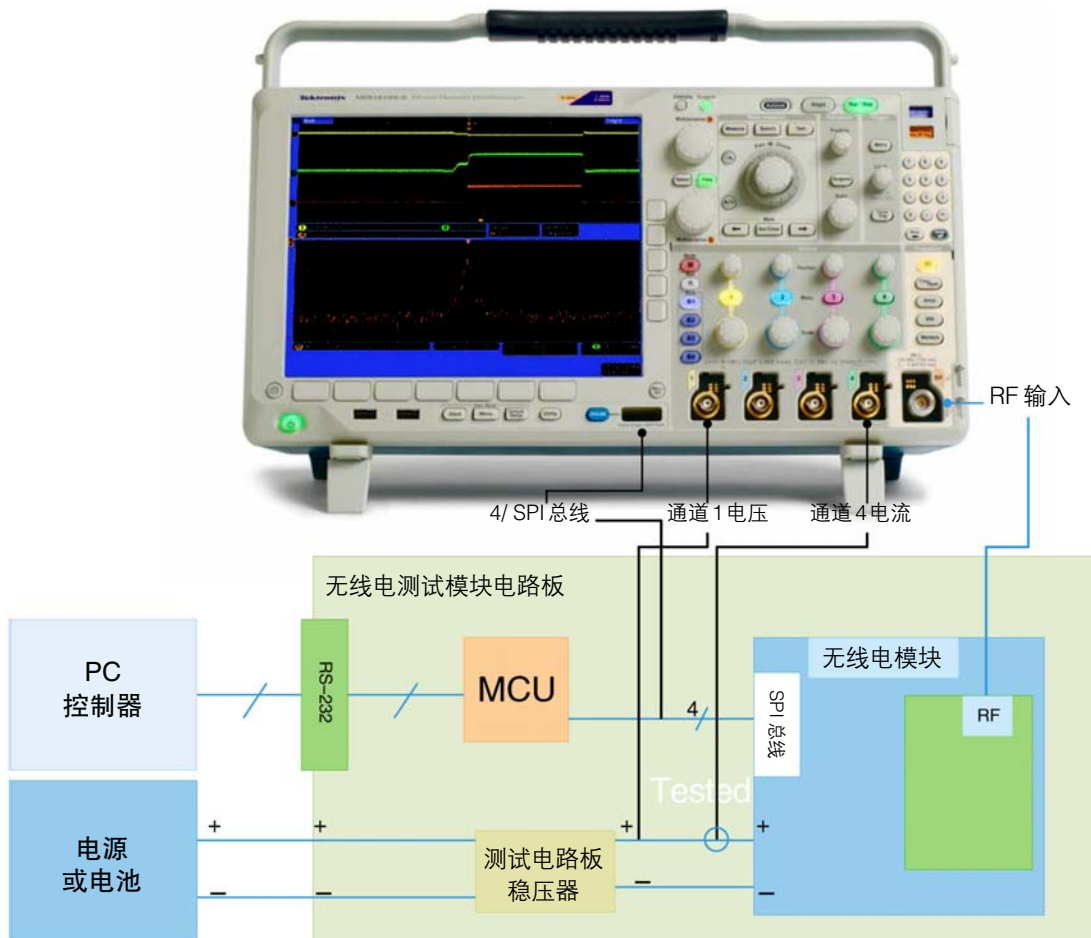


图 3. (Microchip Technologies MRF24J40MB 和 Explorer 16 演示电路板) ZigBee 无线电模块 / 测试电路板与 MDO4000 系列混合域示波器之间的测试连接。

### 集成的射频测试验证

一旦选择了无线实现方式，进行了相应的PCB布线，编写了必要的软件，那么需要进行大量的测试，以保证良好的通信：

对许多应用来说，无线系统与产品其它部分之间要进行串行通信。例如，Microchip IC 和模块采用 4 线 SPI 连接，控制射频 IC 和相关组件，如功放。需要使用 SPI 命令，设置内部寄存器，选择频率信道、输出功率电平及许多其它工作参数。SPI 还用来控制通用端口引脚，这些引脚控制着功放器或其它器件。SPI 还用来把数据包发送到 IC 或模块，发送命令传送数据包。接收机数据也通过 SPI 总线返回。

微控制器中的软件(不管是集成还是分开)需要提供更高级的协议(ZigBee或其它协议)，及控制无线系统的供电，运行产品的其它方面。在许多应用中，无线传输的定时至关重要，以便产品的某个其它部分正在工作，消耗电源电压时，射频电路不会发射信号。

为了说明验证射频工作所要完成的一些测试，我们使用带有 Explorer 16 演示电路板的 Microchip Technologies IEEE 802.15.4 放大无线模块(MRF24J40MB)。这些屏幕显示是使用泰克MDO4000系列多域示波器获得的，可以以时间相关的方式同时查看RF信号、模拟信号和数字信号。设置和数据命令从PC发送，允许手动控制。图 3 显示了测试设置。注意我们直接连接到射频部分，方便电源测量和其它测量。同样，可以使用校准后的天线，进行 RF 测量。

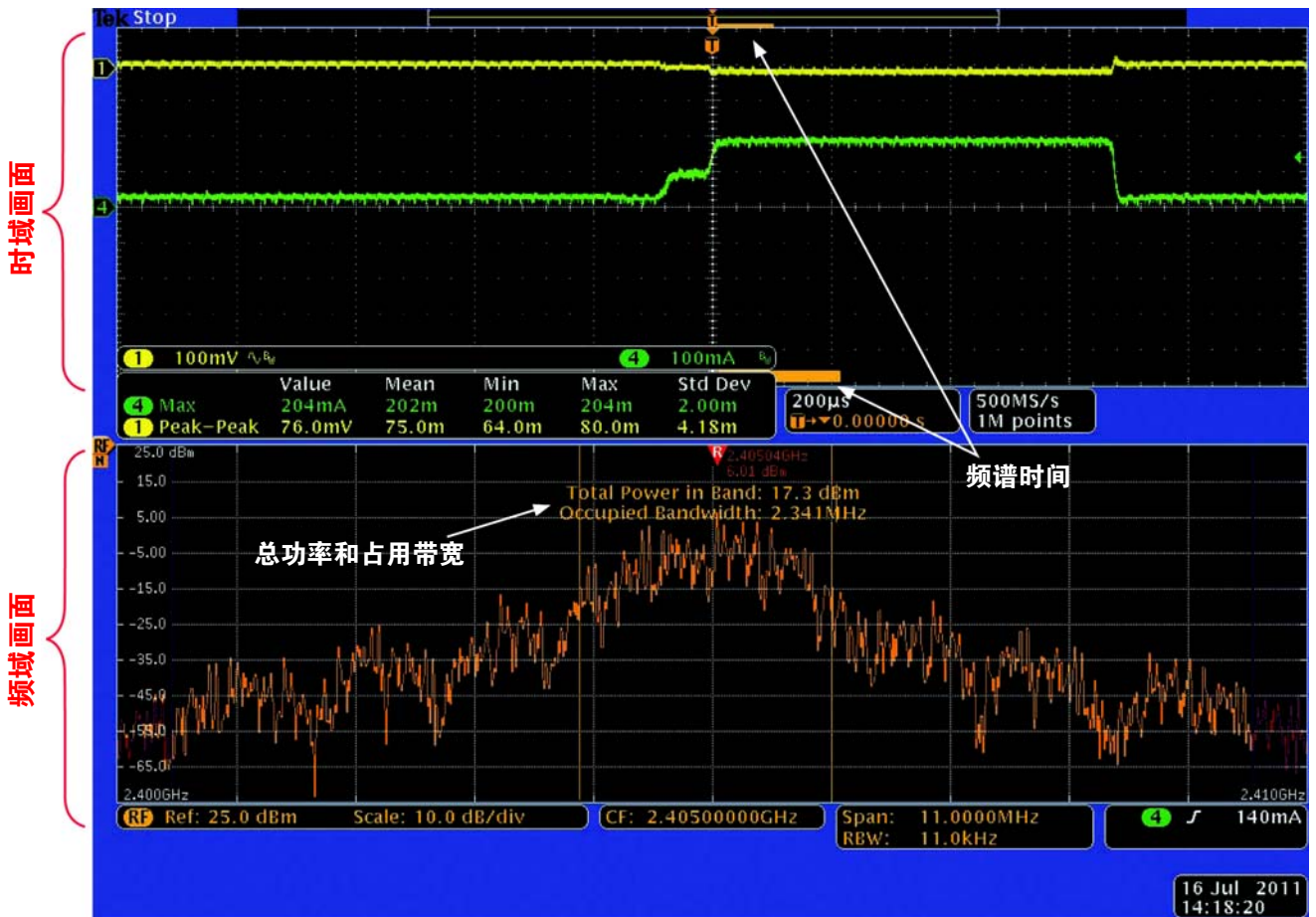


图 4. 时域画面和频域画面。橙色条表示频域画面相对于时域测量的频谱时间。

验证射频工作的一些关键测试有：

**RF 测量和电源测量** – 泰克 MDO4000 系列混合域示波器的独特之处在于，它允许同时查看射频频谱和电源，如图 4 所示。

IEEE 802.15.4 (包括 ZigBee) 的信道间隔为 5 MHz。20 dB 信道带宽应明显低于信道间隔。如图所示，测得的占用带宽是 2.3 MHz。输出功率约为预计的 20 dBm。屏幕下半部分显示了输出频谱，屏幕上显示了带宽和功率的直接测量结果。测试电缆在这个频率范围内损耗约 2 dB，因此功率测量位于预计范围内。

屏幕上半部分底部的橙色条表明了显示频谱曲线的时间周期。频谱时间是窗函数因数除以分辨率带宽。在本例中，我们使用默认的 Kaiser FFT 函数(因数为 2.23)，RBW 为 11 kHz，则频谱时间约为 200 us。在时域窗口中移动频谱条，可以在数据包传输期间观察和测量数据。只有在启动无线数据包发射之后，这一采集才是相关的。

泰克 MDO4000 系列示波器 RF 采集可以测量 RF 信号的功率和占用带宽。由于它还捕获了 RF 采集的时间记录，因此可以使用数字下变频生成 I (实数) 和 Q (虚数) 数据。每个 I 和 Q 数据样点表示当前中心频率 RF 输入的瞬时偏差。通过这一分析，可以从记录的数据中计算出 RF 幅度随时间的变化。

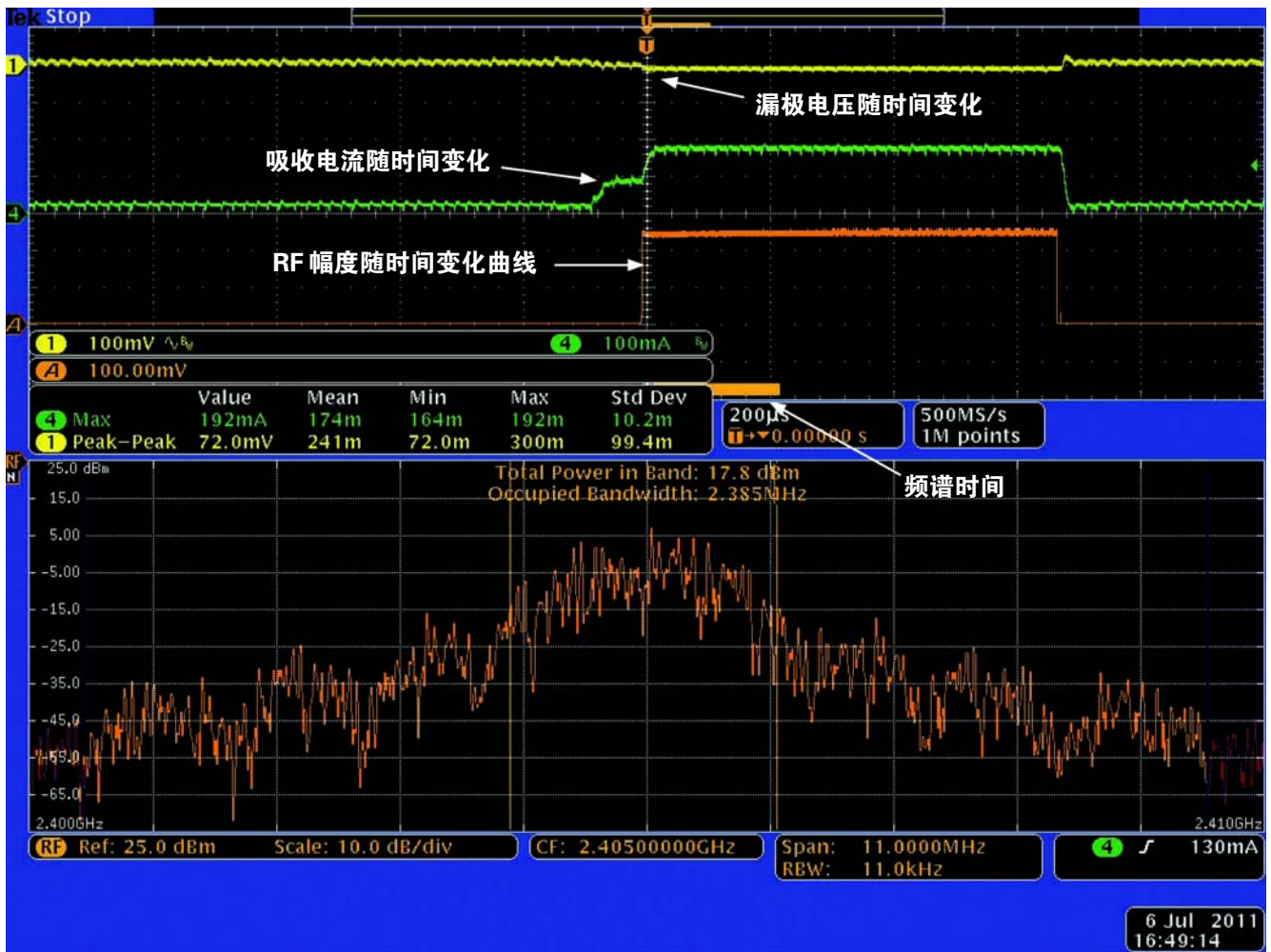


图 5. 功率和占用带宽测量，相关的 RF 幅度随时间变化，电源电流和漏极电压测量。

图 5 在图 4 画面中增加了 RF 幅度随时间变化曲线。这演示了图 5 显示的电流和电压测量与启动 RF 发射相关。

绿色轨迹(轨迹 4)显示了模块消耗的电流。在数据包传输过程中，消耗的电流约为 200 mA (注意测量值为 174 mA)，因此电源必须设计成支持这一负荷。黄色轨迹(轨迹 1)显示了消耗这一电流对供电电压的影响。电压暂降仅约为 70 mV，(注意测量值为 72 mV)。

屏幕上半部分橙色条(轨迹 A)显示了 RF 信号幅度随时间变化。输入电流分两步上升。首先，启动射频 IC。延迟让频率合成器稳定，然后启动功放。RF 功率上升与电流阶跃的第二部分一致。启动周期约为 100 us。

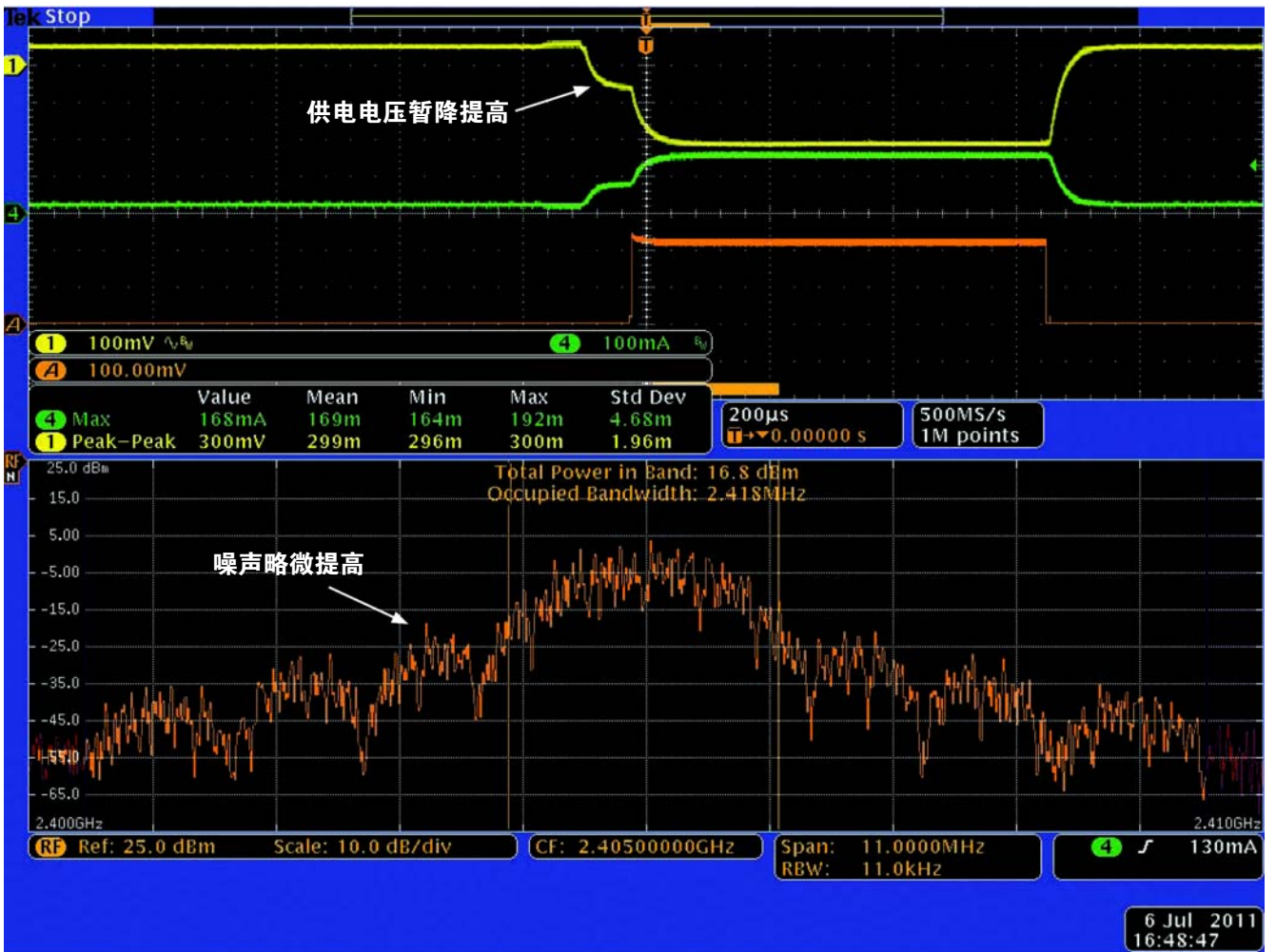


图 6. 频谱及其它测量，电阻与模块电源串联，研究低功率性能特点。

在图 6 中，1.5 欧姆电阻与模块串联，以仿真电池耗尽时的影响。模块消耗的电流只低几毫安，但电压降约 230 mV。注意测量的 RF 功率输出功率下降了 1 dB，从频谱画面中可以看到，邻道噪声略微提高。在幅度随时

间变化轨迹(轨迹 A)中还可以看到较低的输出。通常必需了解电池电量不足或在电源限流期间无线发射机的性能，以了解射频的一致性能余量。

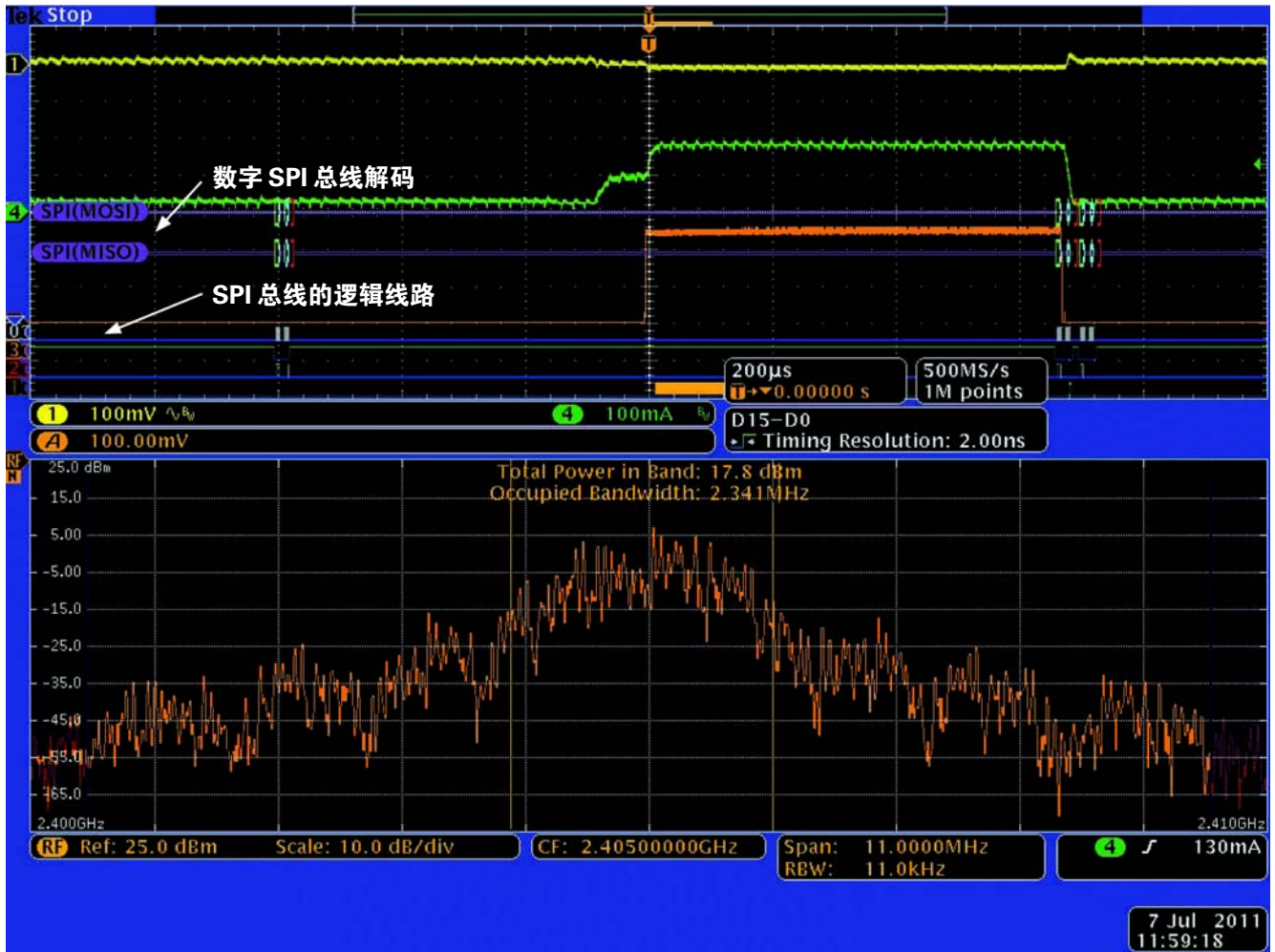


图 7. 画面中增加 SPI 数字信号(SPI – MOSI 和 MISO)的数据包解码。

数字命令—设置射频 IC 和模块，以满足特定应用和任何特定协议设置的工作要求。MDO 可以解码 SPI 命令。图 7 显示了与图 4 相同时间段内 SPI 命令的数字捕获结果。虽然进行了解码，但在这个时间刻度中不可读。

在图 7 中，用轨迹 4 的消耗电流在 130mA 电平以上触发来采集模拟、数字和 RF 信号。时域部分中心左面显示了 RF 启动时电流超过这一电平之前的事件，包括数字解码、模拟(电压和电流)和 RF 对时间的轨迹。从这些信息中可以很容易看到，数字命令发生在 RF 事件启动前大约 600 微秒时。



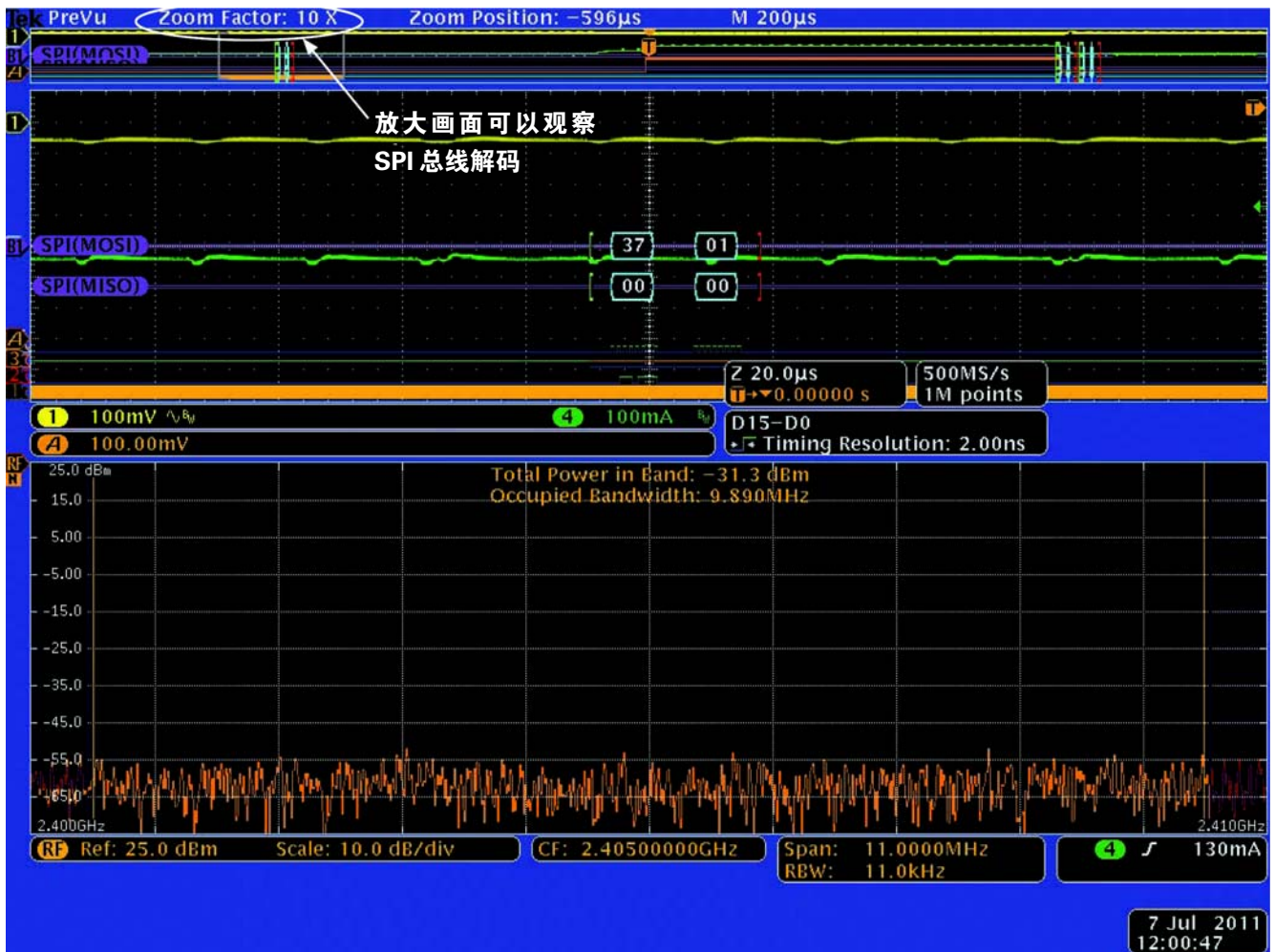


图 8. 数字曲线和解码的放大视图。注意频谱时间现在观察传输启动前的 RF 频谱。

紫色轨迹显示时域中解码后的数据。在图 8 中，我们使用 MDO 波形导航和缩放功能，读取数字波形和解码后的数据。

SPI(MOSI) 轨迹以十六进制格式显示到模块的命令。在本例中，命令 {37} 是到传送触发 (TXNMTRIG) 寄存器的命令，参数 {01} 告诉模块以先进先出方式发送发射机中的

数据包，我们已经确定其发生在大约 600  $\mu$ s 后。图中显示了数字波形，但自动解码读起来要比数字信号容易得多。

可以读取或触发 SPI(MISO) 上的其它命令和数据读回，以确认命令正确，及验证射频的工作。

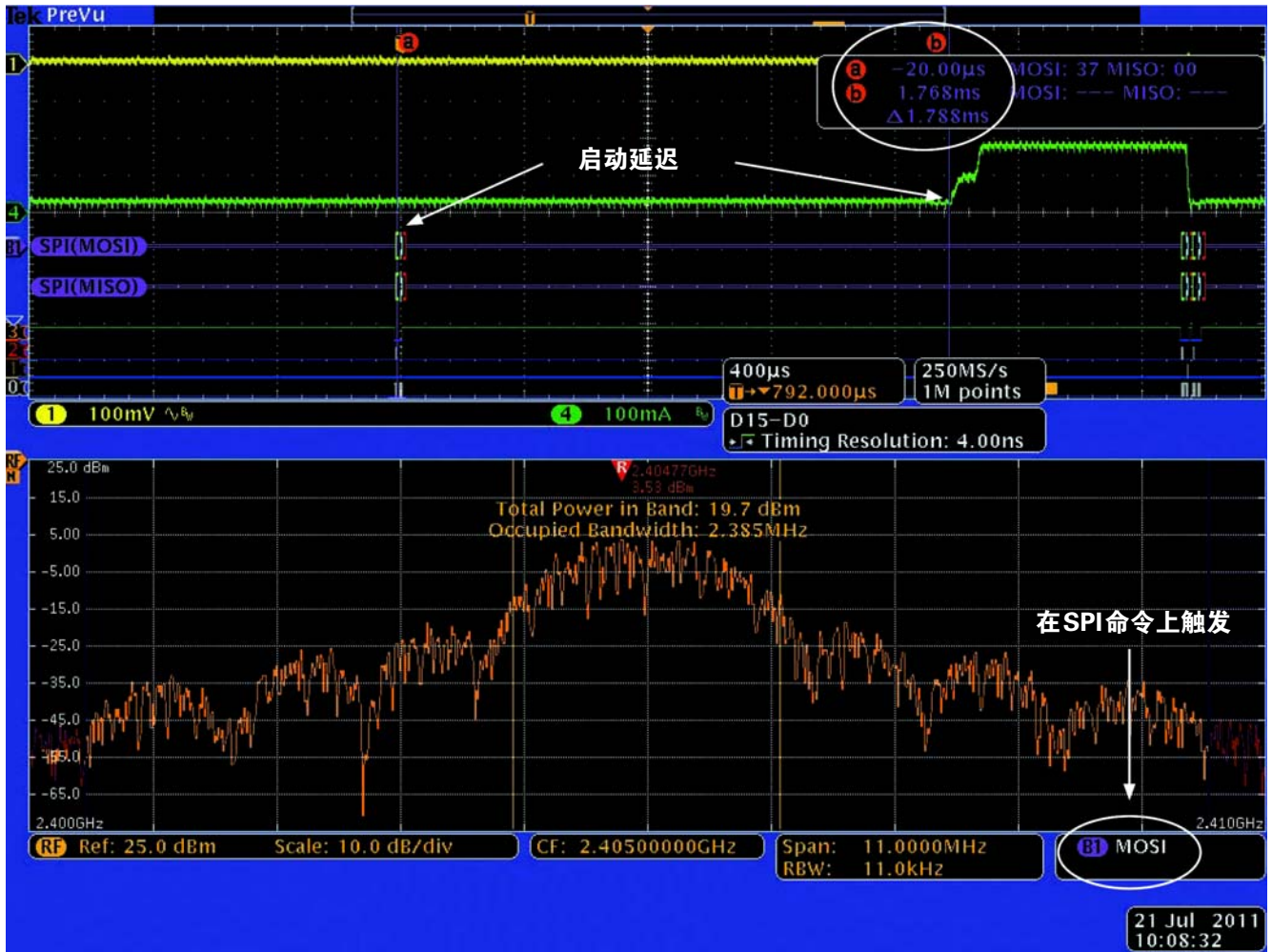


图 9. SPI 命令触发后的采集数据显示了命令与无线电启动之间的延迟。

泰克MDO系列混合域示波器的独特结构简化了SPI命令触发和相关RF事件之间的测量。在图9中，触发事件变成SPI命令{37}：无线发射触发命令。时域画面上的标记显示，从SPI命令到消耗电流(在RF Tx启动开始时)的时间现在为1.768 ms。

在图7上面的实例中，从命令到启动的延迟约为600 us。图9中的实际事件长近三倍。这演示了ZigBee无线系统的特点实际上满足IEEE 802.15.4 其中一项物理层性能要求。ZigBee射频在命令和启动事件之间采用伪随机延迟，以使无线系统能够监听其它ZigBee无线发射机或其它无线干扰信道。

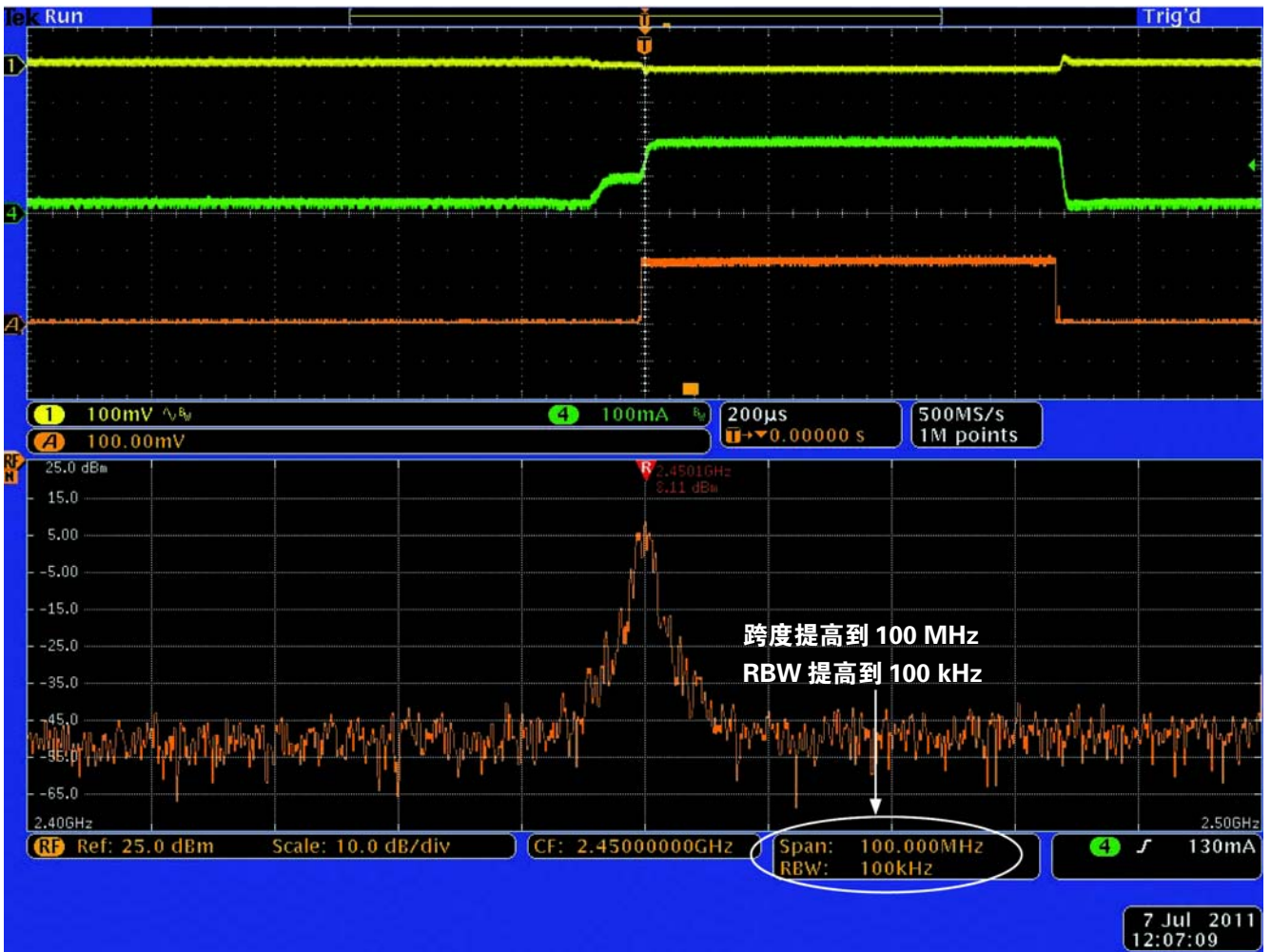


图 10. 2.45 GHz 频谱的宽扫描可以观察整个 ISM 频段的信号。

杂散信号—确认射频系统工作而没有导致干扰的杂散信号是很关键的。图 10 显示，在 ZigBee 工作的频段中没有明显的杂散信号。注意在这个图中，模块设置成在

2.45 GHz 频段中心发射。这里使用 MARKER 功能测量峰值信号。分辨率带宽现在设置为 100 kHz，频谱时间现在降低到仅高于 20us。

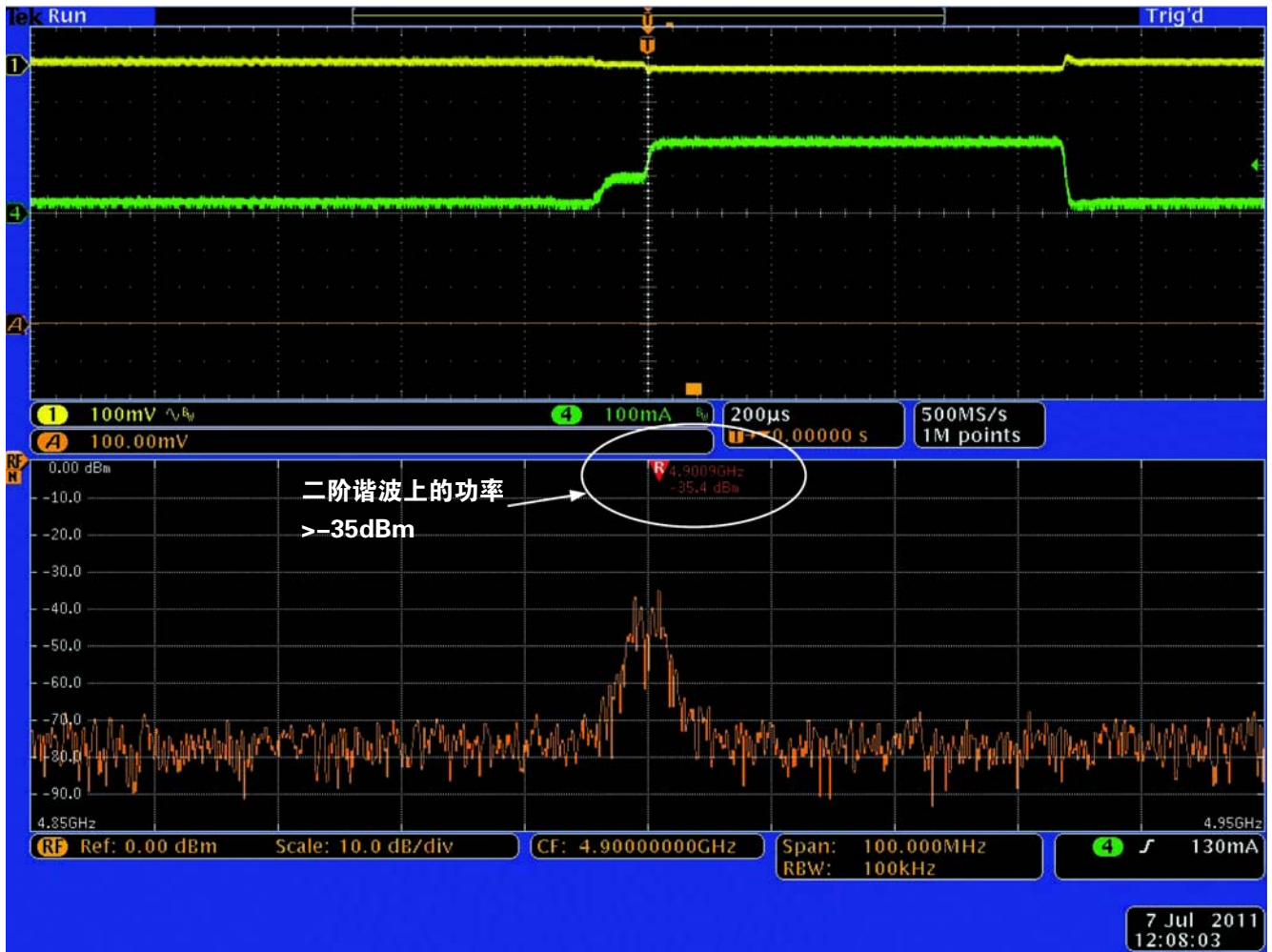


图 11. 与前面实例相同的启动条件下，触发二阶谐波 4.9 MHz 时的时间相关扫描。

查找频谱其它成分的信号也非常重要。图 11 显示了发射信号的二次谐波的频率范围，与 RF 发射启动过程中消耗电流的触发电平相关。注意，在二次谐波上只有一个小信号，在其它频率上没有明显的信号。MARKER 上二次谐波信号约比基波低 35 dB，基波完全落在 FCC 规定范

围内。MDO 的频谱分析仪可以快速扫描很宽的频率范围，以确信没有不想要的杂散信号。对射频认证和一致性测试，满足认证要求的全面扫描需要使用频率更高的频谱分析仪，而使用 MDO 可以发现许多可能最麻烦的杂散信号，从而降低射频一致性测试的风险。

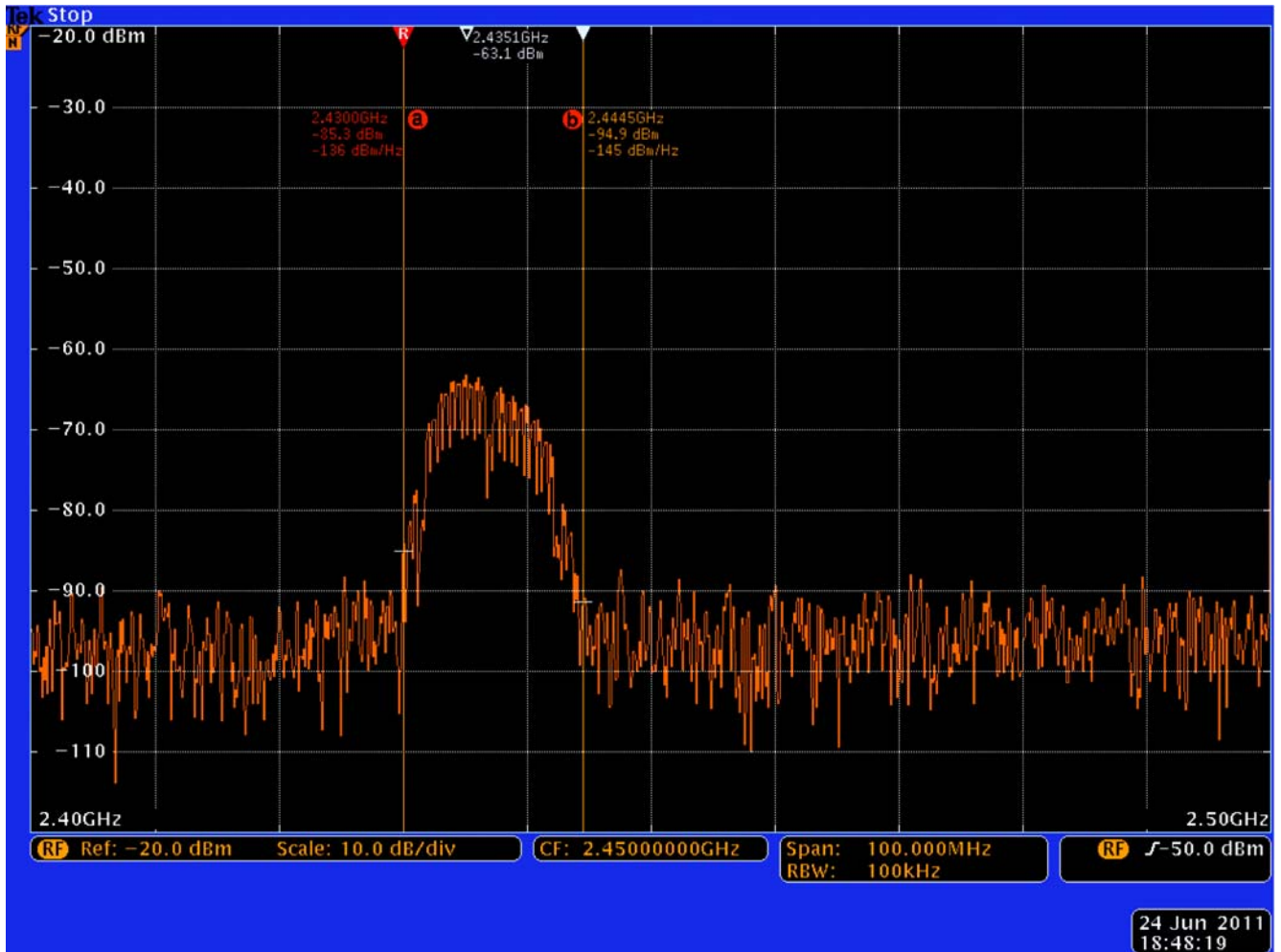


图 12. 显示了无线局域网干扰信号，评估互操作测试期间的影响。

干扰— MDO 还可以与天线一起使用，检查可能对被触发的射频产生干扰的其它射频来源。图 12 使用一个参考天线，查找可能的射频干扰源。注意存在一个大约以 2.46 MHz 为中心的宽带信号。这是同一座大楼中的 Wi-Fi 射频。它覆盖了 ZigBee 射频可能使用的大量信道。在这一射频模块应用中，最好避免使用这一频率范围信道，因为会损害 ZigBee 射频的范围或射频完全堵塞。MDO 为查找这些信号提供了一种快速方式。本例中只使用频

谱分析仪。可以使用 MDO 的 RF 触发功能，迅速捕获关心的频段中的任何信号。主参考标记显示，这是一个相当强的信号。手动标记(a)和(b)提供了干扰源的频率范围读数。这个干扰的频率范围和功率使 ZigBee 信道 17 到信道 19 不能用。当然，大多数协议(包括 ZigBee)将扫描此类干扰，移动到无干扰信道上运行。少的复杂协议可能需要手动调节工作信道。

### 小结

有许多选则可以实现 ZigBee 或其它 IEEE 802.15.4 无线系统。最佳方式的选择取决于许多因素，包括开发时间、单位成本与设计 and 认证成本对比、以及各种特殊要求，如可用空间、外形和射频特殊电气要求。不管选择哪种方法，都需要进行大量的测量，保证无线系统正确工作。RF 测量包括检查 RF 输出频率、输出幅度、占用带宽和杂散输出。确认数据包定时、耗电量和任何电源噪声也非常重要。此外，非常重要的一点是确认为无线系统设置了正确的数字配置信息、正在接收正确的数据。

泰克 MDO4000 系列混合域示波器可以用来监测和验证高达 6 GHz 频率的 RF 工作，提供了 4 条带宽高达 1 GHz 的模拟通道以及 16 条数字信道，这些信道均时间相关。您可以使用一台仪器支持所有的功能，包括多种串行协议(如 SPI 和 RS232)。所有这些信号的时间相关性测量是很有价值的，它可以节约调试时间。

泰克 MDO 外观紧凑，便于携带，可以用于任何现场测试。它还提供了统一易用的界面，可以对多种信号执行复杂的测试。

**请立即联系泰克授权一级分销商：**

北京东方中科集成科技股份有限公司  
服务电话：400-650-5566  
网 址：www.jicheng.net.cn