

脉压雷达系统分析

Pulse Compression Radar System Analysis

Herbert Schmitt

罗德与施瓦茨公司，德国慕尼黑

当今，脉冲雷达系统频繁使用脉冲压缩技术。该技术能将出色的距离分辨率与低峰值功率电平下的长探测距离相结合。为此，发射脉冲通过脉内调制扩展发射信号的带宽和时间。而在雷达接收机中使用匹配滤波器压缩接收到的回波信号，并按脉冲压缩比值提高接收信号的峰值（图1）。这种方法可以按压缩比值提高雷达时间分辨率与距离分辨率。这也降低了雷达对高脉冲峰值功率电平的需求，进而减少使用高功率放大器并降低了供电的复杂性。

但增加脉宽会使雷达盲区范围增加，并且影响多普勒效应下的测距精度。此外，雷达系统中的信号处理单元变得更为复杂。依赖不同的脉冲调制方式，压缩脉冲不仅有一个窄的时间峰（即主瓣），而且出现一些旁瓣（又称为时域旁瓣或距离旁瓣）。这些可能引发虚警或者显示成“虚假”的目标反射。尽

管有这些缺点，但脉压技术利大于弊，如今已被广泛使用。

典型的传输信号类型包括线性调频（LFM，或称线性调频脉冲）、非线性调频、二相编码信号和多相位编码脉冲信号。比如，使用巴克码的二进制移相键控（BPSK）就属于二相编码信号。尽管业界现已开发出更为复杂的脉压技术，但线性调频和巴克码仍在广泛使用。就纯粹的线性调频而言，压缩脉冲显示 $\sin(x)/x$ 响应，其最高时域旁瓣的电平理论上应比主瓣电平低 13.2dB。此比率也称为峰值旁瓣电平比（PSL）。峰值旁瓣电平比代表雷达系统辨别邻近大小目标的能力。图2所示为线性调频脉冲宽度约为 38MHz 的线性调频压缩脉冲波形以及脉间频率和相位特征。

幅度加权又称为加窗，可以将峰值旁瓣电平比降至所需的电平，但信噪比会降低。在此情况下，因回波信号和理想的 Tx 波形之

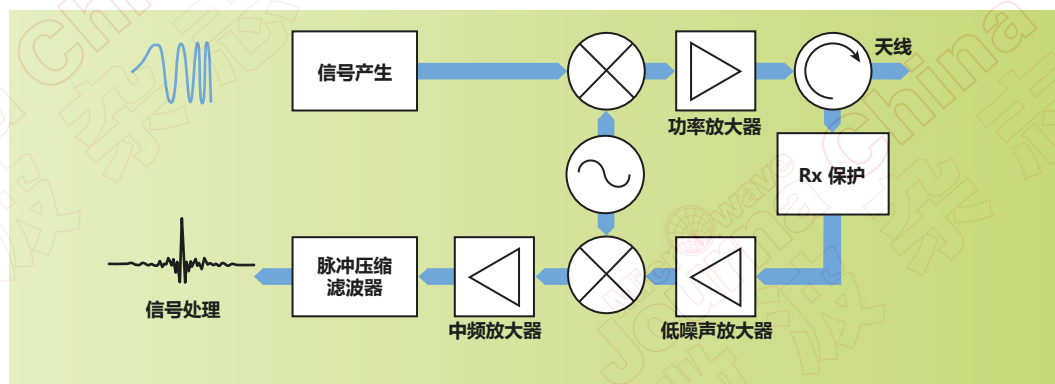


图1. 使用数字脉冲压缩滤波器的雷达系统。

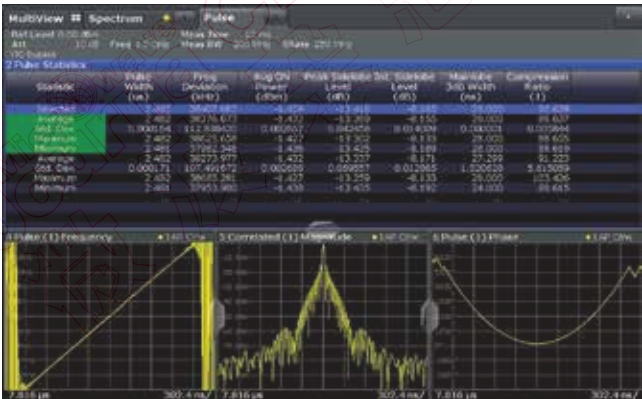


图 2. 线性调频压缩脉冲。相关振幅窗口显示峰值旁瓣比峰值低 13dB。

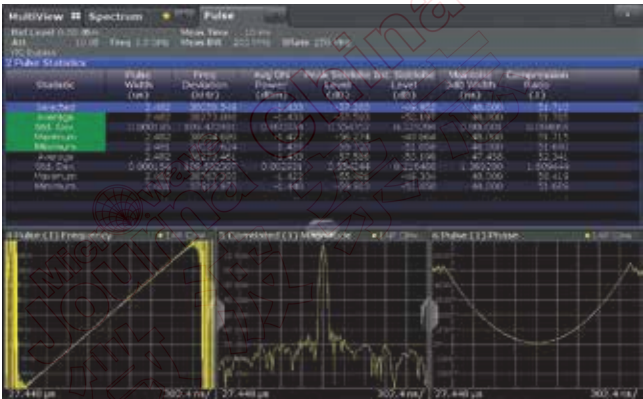


图 3. 在接收处理过程中应用加窗，将旁瓣电平降至峰值以下 57dB。



图 4. 设置包含多项式系数的线性与非线性调频信号的参考波形（匹配滤波器）。

间存在相关性，在接收机数字信号处理时会使用到匹配滤波器。通常，频域乘法运算较时域上的卷积运算更有效率。首先对接收信号进行快速傅里叶变换 (FFT)，然后乘以参考线性调频脉冲，最后通过快速傅里叶逆变换将信号变换回时域。众所周知，加窗广泛应用于快速傅里叶变换信号处理。常用的加窗函数是汉明窗、布莱克曼窗和布莱克曼哈里斯窗。

表 1 对这些函数的特征进行了对比。图 3 也显示，38MHz 的线性

无法充分对雷达性能进行测量评估。任何与理想线性调频信号频率偏差、Tx 通道失配反射、相位和幅度失真或调制器误差都将影响雷达的性能，如距离分辨率和测距精度。这些影响可能导致压缩脉冲的主瓣变宽或者增加旁瓣电平和额外的旁瓣，超出容许阈值。

由于脉内添加了线性调频、二进制移相键控和多相位编码调制方式，工程师可能倾向于将其视为通信信号并应用于测量通信信号质量的

调频信号在使用布莱克曼哈里斯窗后，其峰值旁瓣电平比降了 -47dB。

测量挑战

雷达使用脉冲压缩后，仅衡量脉宽或上升和下降时间，已经

矢量幅度误差 (EVM) 指标进行度量。但是，矢量幅度误差不能直观地转变成雷达的性能参数，如空间分辨率或虚警率。要评估脉冲压缩雷达的性能，直接分析主、旁瓣行为的做法不失为一个好的选择。为了诊断系统性能下降的根源，需要在系统信号调理的各个点进行测试。而使用参考目标，只观察雷达接收器最终的处理输出是不够的。必须使用测量仪器（通常为信号分析仪）进行标准脉冲分析，但这还是不够。信号分析仪还必须分析使用适合的匹配滤波器和应用相关计算来分析传输信号，模拟理想雷达接收器运作方式。

经过了脉冲压缩计算后，显示时域的压缩脉冲曲线（图 2 和图 3）。脉冲响应（主瓣）变宽导致距离分辨率变差，以及旁瓣电平和峰值旁瓣电平比都很容易观测到。此外，也可显示脉宽内的频率误差和相位误差曲线。如果发射信号为线性调频信号，则可以通过频率误差直接度量频率斜率的线性度。

还有许多其他参数用于测量脉压信号的特性。对于主瓣，这些参数是主瓣宽度 (3dB)、主瓣功率、相位和频率以及压缩比。重要的旁瓣测量参数是 PSL(峰值旁瓣电平比)、积分旁瓣电平和旁瓣延时，即主瓣和最

表1 所选加窗函数的属性			
加窗函数	峰值旁瓣电平比 (dB)	信噪比降低 (dB)	3 dB 宽度 (快速傅里叶变换信号频点数)
矩形窗	-13.2	0	0.89
汉明窗	-43	1.34	1.3
布莱克曼窗	-58	2.37	1.68
布莱克曼哈里斯窗	-61	2.07	1.56

近的旁瓣之间的时间间隔。主瓣宽度和旁瓣延时是影响可用空间分辨率的重要系统参数。脉冲压缩分析功能提供了简单快速的测试手段，在现场应用中可实际评估系统的可用空间分辨率。鉴于可测量的参数数目众多，应选择对测量任务最为重要的参数进行显示。为此，用户可在测试结果表格中任意配置想显示的测试结果参数。图2和图3显示了信号分析仪如何借助脉冲测量应用和时域旁瓣分析功能执行此类分析，图中已经配置结果表格，仅显示最重要的脉压参数。该仪器还提供各项参数的标准偏差等统计数据，使其可以评估雷达信号的稳定性以及测量的可重复性。

除了相关计算功能外，测试还需考虑信号分析仪的分析带宽或瞬时带宽。信号分析仪的带宽需覆盖雷达发射信号调制带宽。如果是捷变频雷达，则分析仪的带宽还应覆盖频率捷变的整个频段。有些信号与频谱分析仪可覆盖高达500MHz的瞬时带宽，且使用其宽带中频输出并使用高性能示波器将输出宽带中频转化为数字I/Q，可实现高达2GHz的瞬时带宽。在此情况下，分析仪比须补偿整个测量链的幅度和群延时失真对测试结果的影响。操作者无需分别操作信号分析仪和示波器，只需单独操作信号分析仪即可得到测试结果。

时域旁瓣分析基于理想发射波形（又称为参考信号）和被测发射信号之间的相关计算，所以用户首先应该选择并创建一个参考信号。对于常见的线性调频、非线性调频、使用巴克码的二进制移相键控或嵌入式巴克码应无需借助其他工具创建参考信号；信号分析仪内部可直接定义此参考信号。图4显示可以如何定义此类参考信号（在图4中为多项式调频信号）。

Smart Measurement Solutions

Ana Pico

of Switzerland

信号分析仪

5MHz – 26GHz



- 频偏范围：
0.01Hz – 100MHz；相噪底：-190dBc/Hz
- 连续或脉冲信号测试模式
- 单击操作、使用方便
- 市场上最快的相噪测试
- 小巧、轻便；低功耗、无风扇

单、多通道模拟信号源

9kHz – 40GHz



- 低相噪
- 高速切换：30μs
- 高输出：+27dBm
- 调制或非调制信号
- 轻便：可带电池、手持
- 低功耗

www.anapico.com

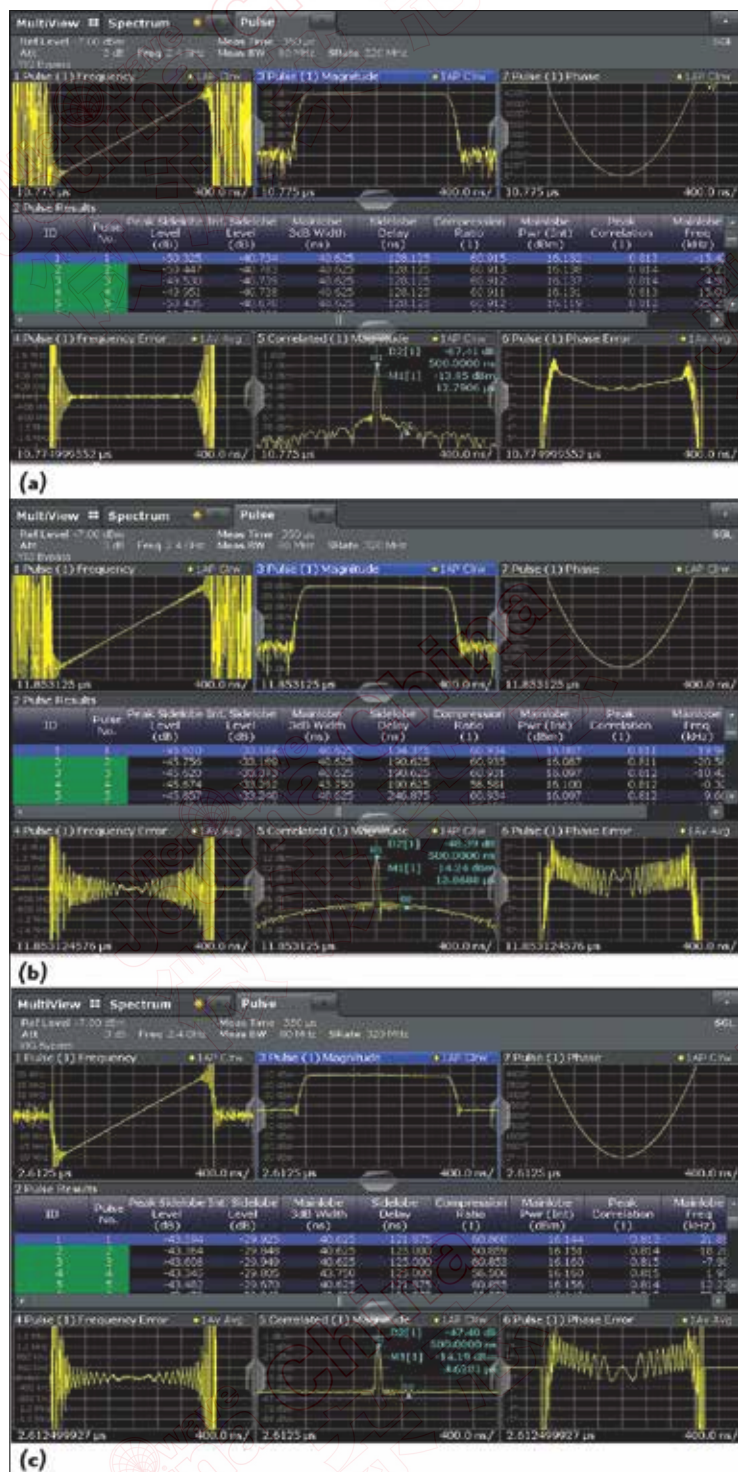


图5. 理想I/Q调制(a)的加富线性调频信号, 以及I/Q调制器增益不平衡(b)和I/Q调制原点偏移(c)。

对于标准线性调频信号, 应可选择使用不同的加窗, 如汉明窗、汉宁窗、布莱克曼哈里斯窗、高斯窗或切比雪夫窗。目前业界普遍使用复杂度高于线性调频脉冲或巴克码的发射波形。其中许多波形都是专有或保密的, 原因很简单:

如果编码泄露, 则干扰机可轻松调制待压缩的干扰信号(模仿雷达发射信号)增加雷达虚警率。考虑到发射波形的机密性, 带时域旁瓣分析功能的分析仪必须能够加载特定波形作为用户参考波形, 如用户I/Q数据。

R&S FSW 所提供工具能轻松将MATLAB格式I/Q数据文件转换为仪表参考信号数据格式。更方便的方式为由分析仪直接捕捉理想的发射信号作为参考信号。仪表也提供了可视化的功能, 方便用户观测导入I/Q数据或捕捉信号是否正确(包括幅度、频率或自动相关)。该技术也可以对比不同信号处理阶段的信号, 从中找出系统性能降级的原因。

通过时域旁瓣分析功能, 用户只需显示相关计算后的相关脉冲曲线(如有必要, 也可增加显示频率和相位误差), 然后调整表格结果以提供期望的测试参数。由滤波器、放大器或其他雷达发射机部件对系统性能的影响就很容易判断。图5a和图5b显示I/Q调制器增益不平衡如何将峰值旁瓣电平比从-50dB降为-45dB。而与此同时积分旁瓣电平如何在不受干扰的情况下从-40dB进一步降到-33dB。I/Q调制器原点偏移还导致峰值旁瓣电平比从-50dB降到-43dB(图5c)。各种电路的非理性特性对系统的影响可通过脉冲响应来辨别, 如图5b和图5c所示的相关脉冲幅度。

尽管时域旁瓣测量很重要, 更为常见的脉冲参数(脉宽、脉冲重复间隔(PRI)、上升和下降时间、功率、脉顶倾斜、过冲、振铃或脉间相位)及相关统计数据也提供其他重要信息。因此, 可分析雷达信号的通用测量仪器应提供时域旁瓣测量和综合脉冲参数分析功能。由于雷达性能取决于振荡器的稳定性(通常描述为相位噪声), 测量仪器应准确测量振荡器稳定性。高级信号分析仪具备相位噪声测量功能并提供精密的脉冲分析, 包括时域旁瓣测量, 适用于各类雷达系统。为满足严苛的频率稳定性分析的要求, 通常使用

专门的相位噪声分析仪来测量相位噪声。

最新的相位噪声分析仪的测量功能将能分析脉冲信号的相位噪声, 同时也能实现脉冲参数自动分析功能。■