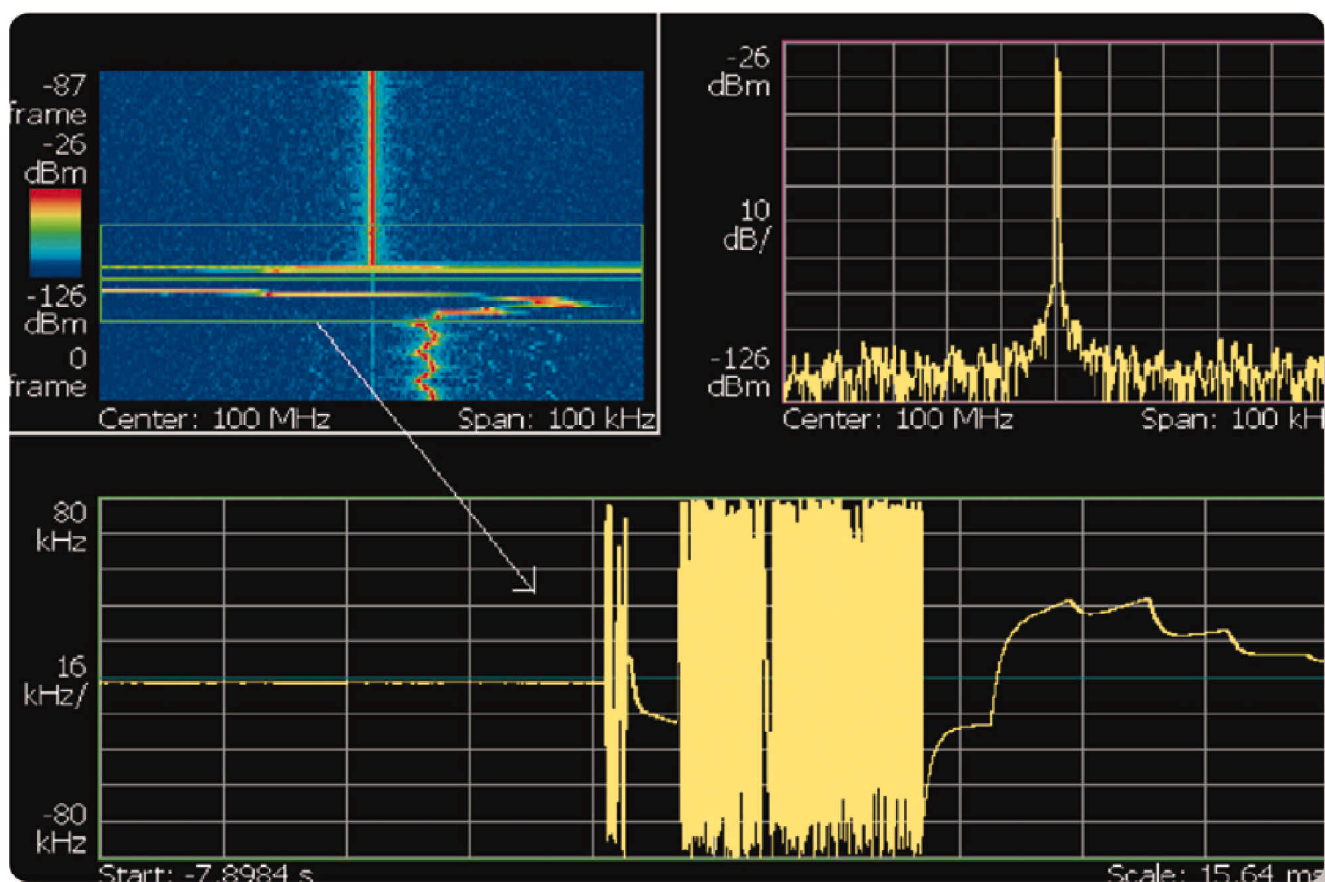


实时频谱分析仪在高能物理应用中的优势



引言

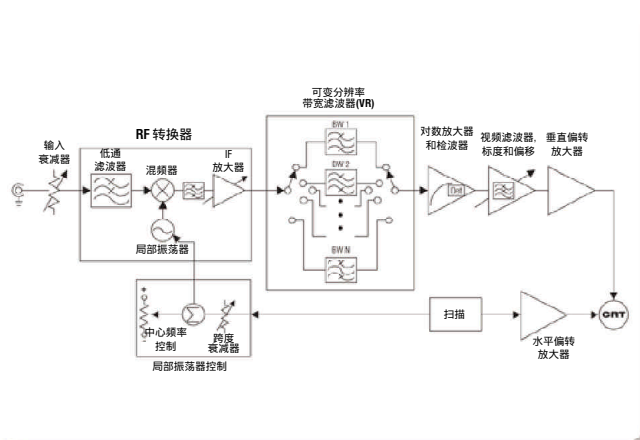
在高能物理(HEP)应用中,操作人员和科研人员面临的基本挑战是在粒子加速器中保持最大的电子束功率和一致的电子束稳定性。为实现这些目标,操作人员必需能够在电子束提升时及在各种试验期间,收集与粒立束的频谱行为有关的信息。

在本应用指南中,我们将考察电子束不稳定和“放大”(电子束电流突然整体丢失或部分丢失)。我们将讨论与使用扫频分析(SSA)技术相比,使用实时频谱分析技术分析和

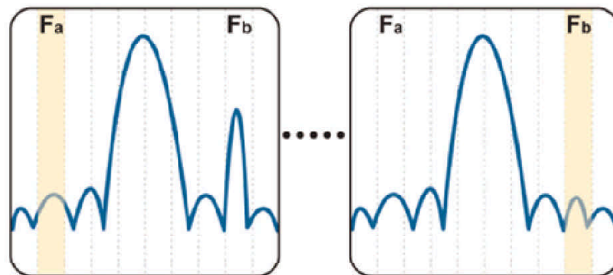
解决电子束丢失和不稳定问题的优势。我们将说明怎样使用泰克实时频谱分析仪(RTSA)在高能物理领域收集、分析和表示数据。

实时频谱分析仪在高能物理应用中的优势

► 应用指南



► 图1. 扫频频谱分析仪方框图。



► 图2. 扫频分析仪步进通过一系列频率段，通常会漏掉当前扫描频段之外发生的重要瞬时事件。

电子束不稳定和“放大”的原因

在储存环中，粒子(质子、电子或离子)注入到稳定的轨道中，可以循环几个小时。这个粒子轨道称为“电子束”。电子束以特定速度保持在储存环中，直到它被“逐出”到线性加速器(LINAC)。在储存期间，将使用磁铁和RF场监测和调节电子束的速度、路径、相干性和色品。正是在电子束生命周期的这一部分，最容易发生错误和问题。

储存环中的电子束轨迹拥有称为水平、垂直和纵向“调谐”频率的设计值，这些值与电子束在环中的位置直接相关。储存环周围的聚焦磁铁和RF腔的电子特点决定着这些值。

一般来说，粒子会以较低能量水平注入到环中，然后“提升”到较高的水平。在提升过程中，重要的一点是水平和垂直调谐频率不能发生位移，以免碰撞谐振组合，导致电子束不稳定或储存环电子束电流突然整体丢失(电子束放大)。许多因素都可能会导致电子束不稳定。独立控制器件的非线性度和/或不同响应时间，如电子束位置监

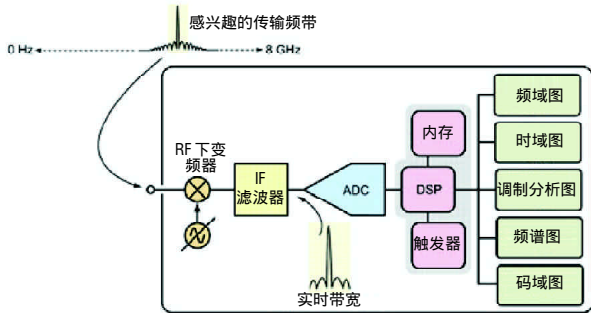
测(BPM)电缆和电路、引导磁铁和电子束聚集、Klystrons或Teetrodes (为把能量转运到电子束的RF腔供电)及真空泵和监测仪等，都可能会导致电子束不稳定。振动和缺乏正确屏蔽也可能导致电子束不稳定。

操作人员和科研人员面临的挑战是正确识别导致电子束不稳定和放大的因素，这样就不会中断昂贵的加速器时间，损害试验结果。在粒子加速器应用中，识别问题最常用的仪器是频谱分析仪。在下一节中，我们将讨论与扫频分析仪相比，实时频谱分析仪在HEP应用中的优势。

使用频谱分析仪 -

扫频分析仪和实时频谱分析仪比较

在扫频分析仪中作为频率的函数监测信号，如果不能说丢失所有临时(相对时间)信息的话，这种方法丢失了大多数临时(相对时间)信息。实时频谱分析仪使得用户能够查看输入信号的频谱的每个部分与时间的关系。在HEP应用中，它们之间的差异如下：



► 图3. 实时频谱分析仪结构。仪器一次捕获频率的全部传输频带，DSP支持灵活的触发和分析功能。

扫频频谱分析仪

图1是扫频频谱分析仪结构简化的方框图。电压受控局部振荡器连续扫描一个频率范围，这些频率在混频器阶段与输入信号组合在一起(这一过程称为外差作用)。

混频器是一种非线性设备，它生成两个信号之和、之差及其原件和谐波。得到的信号成分通过分辨率滤波器传送，分辨率滤波器提取希望的混合产物。然后将检测这个信号产物，发送到显示器的Y轴(幅度)。同时，将处理电压受控振荡器信号，并发送到显示器，生成X轴扫描(频率)。

传统扫频分析仪通过在感兴趣的频率上扫描分辨率带宽(RBW)滤波器，并记录每个频率点的幅度，来测量幅度与频率关系。尽管这种方法提供了很大的动态范围，但其缺点在于，它一次只记录一个频率上的幅度数量。在频率跨度上扫描RBW滤波器需要很长时间，在某些情况下需要几秒钟，因此它要求相对稳定、不变的输入信号。

如果信号迅速变化，那么从统计学上看可能会漏掉变化。如图2所示，扫描查看的是频段 F_a ，而瞬时畸变发生在 F_b 上。在扫描到达频段 F_b 时，误码已经消失，而没有检测到误码。它没有任何方式触发定义的信号特点，也没有任何方式积累长期信号行为记录。

分辨率滤波器的响应或稳定时间限制着分析仪的扫描速率。此外，扫描速率与带宽的平方成比例，分辨率带宽越窄，扫描速率越慢。如果分析仪扫描速度太快，显示的幅度将低于实际幅度，表现频率将向右位移。

从理论上讲，扫描速率应无穷慢，但这是不现实的，因此必须规定一定数量的可接受误差。扫描时间提高要求输入信号在更长的时间内保持稳定，这通常会使得扫频分析仪不能测量间歇性信号或周期性信号。

从传统上看，扫频分析仪较实时仪器的主要优势一直是其动态范围和频率范围。但是，高速模数(A/D)转换器技术的最新发展已经缩小了这些优势，因为新的实时分析仪具有70 dB或更大的动态范围及DC - 8 GHz的频率范围，足以适应大多数HEP应用。

实时频谱分析仪：存储和分析频率和时间

随着随时间变化的信号在HEP应用中越来越普遍，用户越来越迫切地需要一种替代方案进行RF采集和分析。实时频谱分析仪的出现解决了这个棘手的测量问题。仅就频谱分析仪结构而言，RTSA可以触发频域事件，然后捕获和分析落在实时带宽内的任何传输频带信号。

图3说明了RTSA结构。集成式下变频器在任何传输频带上定位实时带宽，直到分析仪的上限。在滤波后，下变频信号通过ADC，ADC对信号进行数字转换，允许一次触发、捕获和分析信号。

实时频谱分析仪在物理应用中的优势

► 应用指南

由于基本流程并不是扫描RF输入信号及从串行采集的频率步进中构建图像，RTSA的数字IF结构可以连续捕获称为帧的“快照”。这些帧作为无缝连续时间记录累积在内存中。

内存支持各种显示和分析工具，包括频谱图，它绘制整个一系列帧，揭示信号随时间变化的情况。因此，RTSA是唯一为生成三维视图而优化的RF信号分析仪，这三个维度是：频率、功率(幅度)和时间。

如果感兴趣的传输频带超过RTSA的实时带宽，RTSA可以步进通过一系列频段，这一点与扫频分析仪非常类似。为此，每次扫描都捕获等于RTSA实时带宽的一段频率。然后仪器会把这些频段级联起来，提供一个传统的频域显示图。

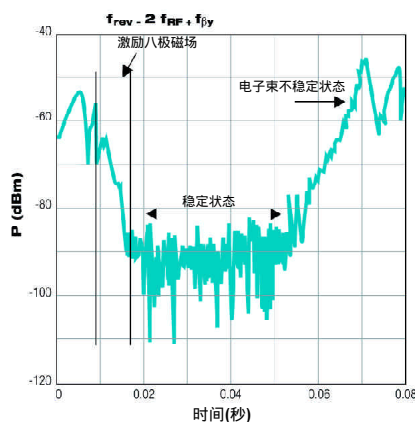
RTSA 测量在粒子加速器应用中的使用

泰克 RSA2200A 和 RSA3399A 系列实时频谱分析仪用于粒子加速器应用中，监测电子束提升，在提升过程中测量水平和垂直调谐频率；测量色品；监测调幅、调频和调相。此外，RSA可以显示功率随时间变化信息，为监测电子束稳定性提供了一个频率模板触发器。

监测电子束提升

在下面的实例中，我们将监测典型时长为 160 ms 的电子束提升，并把它与电子束可能会以 1 秒的速率提升的调试阶段进行比较。我们还将考察多个常见频率跨度设置：20 KHz, 50 KHz, 100 KHz 和 200 KHz。

在典型的 160 ms 提升时间中(在 1 秒提升时间中为 156 ms)，RSA 能够在频域中捕获和存储最多 25 个频谱波形。可以在传统频域显示图中(在扫频分析仪上看到的视图)或以频谱图模式查看这些波形。在频谱图模式下，X轴是频率、Y轴是时间，功率用颜色表示。



► 图4. 这个功率随时间变化显示图用来测量 $2f_{rev}-f_{rf}+f_y$ 时的垂直不稳定性。它从 $t=8\text{ms}$ 到 12.8ms 、以 100A 激励脉冲八极磁铁(用来抑制不稳定性) [2]。

RSA 能够调用这些数据，在时间上以 6.4 ms 间隔向回步进通过捕获的波形。

表1说明了频率跨度、帧速率、时间分辨率和频率分辨率及记录长度(RSA中可以存储的事件长度)之间的关系。时间分辨率是构成帧的每 1024 个样点之间的间隔。

RSA 还可以以功率随时间变化格式显示信息，其时间分辨率可以达到 40ns，其动态范围要优于示波器(参见图 4)。

频率和时间分辨率与频谱分析仪(SSA)频率分辨率相比如何呢？假设在 SSA 显示画面上的分辨率为典型的 501 个数据点，结果如表 2 所示。

跨度	帧速	分辨率 时间	频率 分辨率	记录长度 RSA3300A (64 MB)	记录长度 RSA2200A (2 MB)
200 KHz	3.2 ms	3.125 us	312.5 Hz	51.2 s	1.6 s
100 KHz	6.4 ms	6.25 us	156.25 Hz	102.4 s	3.2 s
50 KHz	12.8 ms	12.5 us	78.125 Hz	204.8 s	6.4 s
20 KHz	32 ms	31.25 us	31.25 Hz	512.0 s	16.0 s

► 表1. 跨度、帧时间、时间分辨率、频率分辨率和记录长度之间的关系。

扫描时间呢？这里，我们看到某些分析仪提供的模拟和FFT模式与泰克RSA仪器在较窄的分辨率带宽(RBW)设置时的结果比较。

在扫频分析仪中，将观察不到其扫描时使用的200 ms之间在某个频率上发生的任何事件。这同样适用于表3 FFT仪器实例中<15ms时发生的任何事件。而泰克RSA系列的实时功能则允许用户以6.4 ms时间段查看整个跨度。此外，RSA允许用户存储和调用这些信号，以进行捕获后

分析，而扫频分析仪中是不提供这种功能的。用户可以在“频率随时间变化”模式或“功率随时间变化”模式下以好得多的时间分辨率(6.25us)调用这些信号。因此，我们看到，泰克RSA2200A和RSA3300A系列分析仪中的独特结构和方法在测量瞬时信号时提供了巨大的优势，而且通常会改善频率分辨率。由于快速帧速率，泰克实时频谱分析仪可以更加动态地测量色品和色品校正的应用情况。

频率 跨度	扫频分析仪 (501 个数据点)	RSA (实时模式)
100 KHz	200 Hz	156 Hz
20 KHz	40 Hz	31 Hz

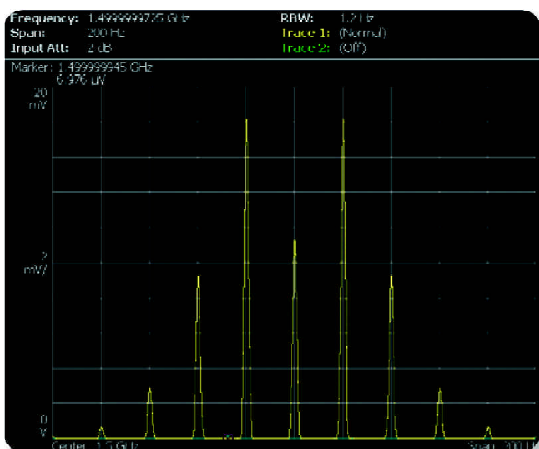
► 表2. 扫频分析仪和RSA频率分辨率在100 KHz和20 KHz分辨率带宽设置时比较，假设在扫频分析仪上的分辨率为501个数据点。

分析仪类型	扫频	FFT	实时
RBW (默认值)	1 KHz	1 KHz	266.96 Hz
扫描时间 (耦合模式)/ 时间分辨率	0.2 s	15 ms	6.4 ms (帧时间) 6.25 us (时间分辨率)

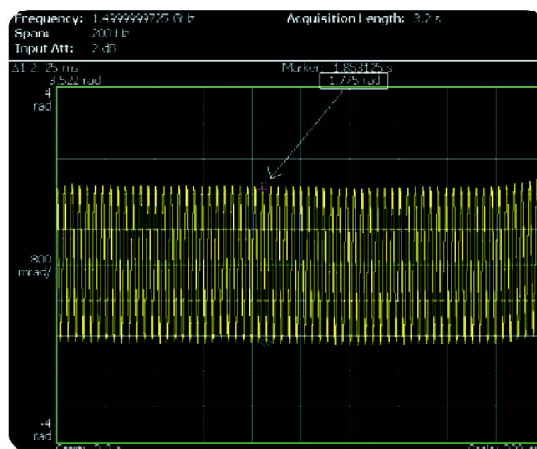
► 表3. 100 KHz频率跨度时模拟扫频分析仪、采用FFT模式的仪器(某些分析仪中以较窄的分辨率带宽(RBW)设置提供)和采用实时技术的RSA分辨率比较。注意使用RSA时默认的RBW设置大大改善。

实时频谱分析仪在高能物理应用中的优势

► 应用指南



► 图5(a). 拥有以 20 Hz 调制的 1.5 GHz 载波及调相幅度为 1.75 弧度的调相信号的频谱。



► 图5(b). 图5a 中显示的频谱的解调图。注意现在可以使用标尺功能，直接读取调相和速率。

色品测量

色品描述了电子感应加速器谐振频率(调谐)的变化与电子束动力的关系。高能储存环中要求色品补偿，以避免由于头尾(H-T)效应导致的不稳定。我们把磁聚焦结构的色品定义为 $Q' = dQ/dd$ ，其中 Q 是电子感应加速器调谐， d 是较额定动力的部分偏差。

一种方法是使用快速先驱震激电子束，然后在 RTSA 上观察电子束位置监测信号的响应，测量相干阻尼率。分析仪以对数方式显示阻尼包络，在减去不相干的辐射阻尼比之后，可以确定相干的阻尼率。

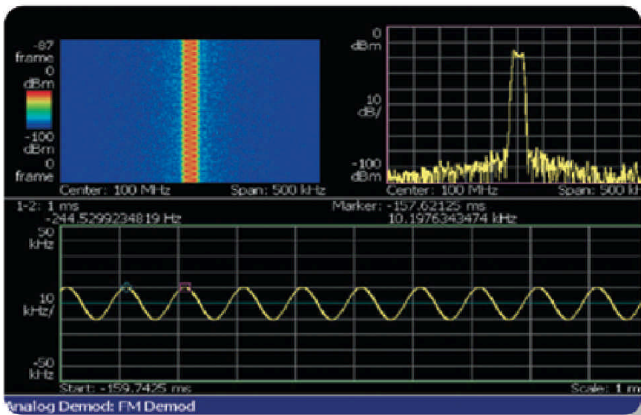
在具有多个波长相近的波束的正电子或质子储存环中，电子束可能会由于光电效应或二级放射而积聚在真空腔中。然后可能会出现这一电子束驱动的单束双流不稳定性。根据电子束与电子交互的强度、色品和同步加速器振荡频率，不稳定性要么类似于直线加速器电子束畸变，要么类似于头尾不稳定。

储存环中大多数调谐测量是在加速周期中单一时间上进行的。但是，如果在整个加速周期测量调谐(扫频分析仪要求这样做)，那么这一流程要求许多电子束周期，使得数据采集工作耗费大量的人力，甚至会导致 HEP 试验中断。RTSA 可以在一个电子束周期中对整个加速周期采集和检索调谐数据。它还可以利用调相 RF，测量色品[3, 4]。RSA 产品可以直接进行调相(PM)测量，更快速、更精确地计算色品(参见图 5(a)和图 5(b))。

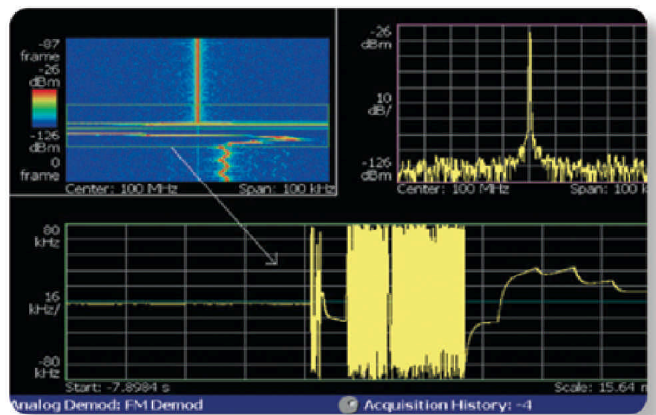
模拟解调，支持多域显示图

RSA 在多域显示图中提供了幅度、频率和相位解调功能。通过使用标尺功能，RSA 可以简便地在显示屏上直接读出调制结果(参见图 6)。

FM 解调适用于各种 HEP 应用。例如，在电子束不稳定时，可以以很高的频率和时间分辨率分析变化量(参见图 7)。它还可以用来监测电子感应加速器信号，并适用于把数量已知的外部 FM 注入 RF 系统的情况。



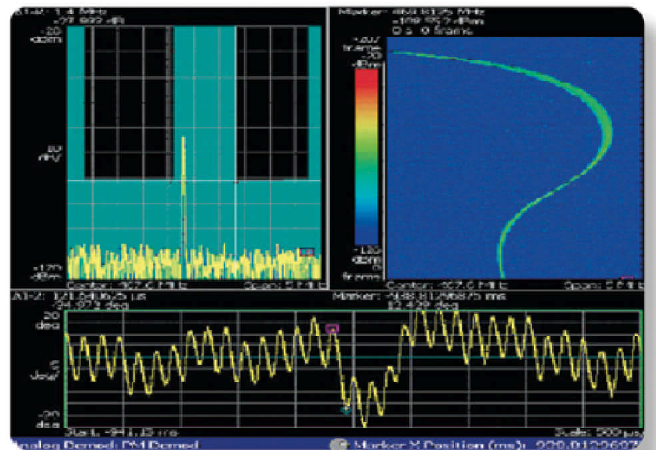
► 图6. 直接读出FM 信号。使用峰值标尺读出峰值FM 变化(大约10 kHz), 使用增量标尺读出FM 比率(1 ms 或1 kHz)。在频谱图模式下(左上), X轴是频率, Y轴是时间, 颜色标度表示功率。



► 图7. 信号不稳定的多模式图。

在图7中, 我们在多模式图中看到信号严重不稳定。回忆一下表1, 在跨度为100 kHz 时, 频谱图(左上)和频域图(右上)提供了6.4 ms 的时间分辨率和156.25 Hz 的频率分辨率。通过使用FM 解调模式(底部), 可以把时间分辨率(X轴)设成6.25 us, 把频率分辨率(Y轴)设成每格16 mHz, 从而可以观察异常瞬时频率变化和小的频率变化。

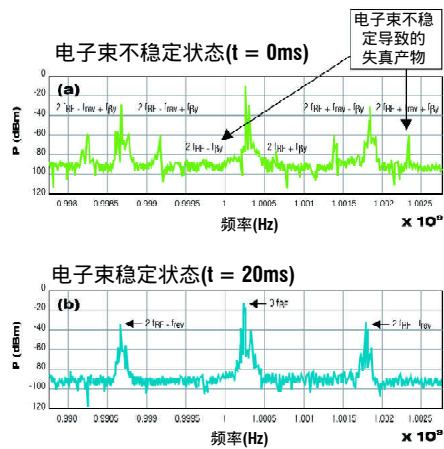
调相特别适合监测电子束的相位稳定性, 分析和调节典型储存环中常见的多个锁相环(PLL), 及计算色品(参见图8)。调相则可以用于同步加速器测量。



► 图8. PLL 响应, 左上图是频域(启动了频率模板触发), 右上图是频谱图, 可以清楚地看见频率摆幅和稳定时间。在底部可以看见相位随时间变化的情况(PM 解调)。

实时频谱分析仪在高能物理应用中的优势

► 应用指南



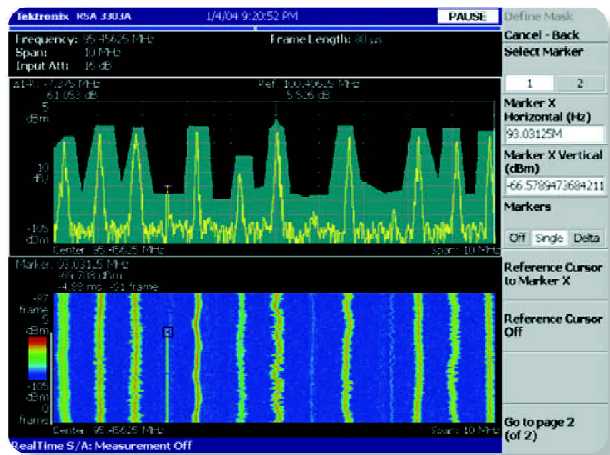
► 图9. 电子束不稳定表现为瞬时失真产物。不稳定的电子束(顶部)与稳定的电子束(底部)比较。注意在不稳定时失真产物的外观。

使用频率模板触发器监测电子束稳定性

电子束不稳定作为频偏信号或作为失真产物显示在频域中(参见图9)。

通过使用这种独特的频率模板触发器(图10),泰克RSA可以设置成在发生任何事件时触发系统。可以使用鼠标在显示屏上“画”一个模板,支持1个像素及0.1 dB的分辨率。

一旦触发RSA,它可以开始记录数据,以用于日后分析,它还把触发输出到外部设备,如警报。此外,RSA提供了触发前设置,因此可以调用和分析触发事件之前的数据。



► 图10. 使用频率模板触发器。

与扫频分析仪中的传统触发相比,这是一个重大优势,因为扫频分析仪仅限于TTL输入或IF电平触发。扫频分析仪监测IF传输频带中所有信号的功率电平,结果会一直触发信号,而不管是否有失真产物。RSA3300A提供了这些传统触发输入及独特的新增频率模板触发选项。

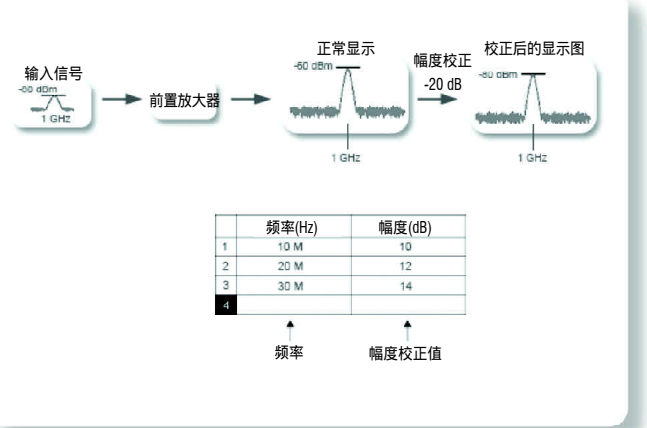
其它功能和应用

幅度校正

可以用于HEP应用中的其它RSA功能包括：RSA能够输入高达3000点频响数据的幅度校正文件(参见图11)，这可以用来校正RTSA输入前的BPM电缆损耗或其它损耗。

振动分析

可以使用RSA测量低频振动(到DC)，实现优异的频率分辨率，其更新显示速率要远远好于传统扫频分析仪。在同步加速器辐射源的储存环发射度较小时，振动问题的重要程度进一步提高。储存环的垂直发射度会非常小，以致振动对电子束的影响不能小视。空调、制冷和真空泵操作可能会导致磁铁振动，进而影响电子束稳定性。可以使用加速计分析这些振动，其输出可以放大，然后输入RSA进行FFT处理。此外，可以使用RSA的实时功能，可靠地捕获间歇性振动峰值。



► 图11. 幅度校正。

实时频谱分析仪在高能物理应用中的优势

► 应用指南

总结

通过在一台仪器中提供扫频分析仪中没有提供的多种功能，泰克实时频谱分析仪在 HEP 应用领域中持续居于领导地位。

- 频率模板触发和触发输出，允许用户在其变得不稳定时触发调谐频率，同时向其它仪器 (如报警设备) 发送 TTL 信号，捕获触发前数据。
- 捕获无缝数据的长记录 (包括触发前数据)。
- 多域视图，可以同时显示任何三种模式：频谱图、功率随时间变化、频域或解调数据 (AM, FM, PM)。
- 以更好的频率分辨率更新显示频谱。
- 调用数据，进行后期处理和详细分析。

泰克 RSA2200A 和 RSA3300A 系列实时频谱分析仪为高能物理领域中的操作人员和科研人员提供了独特的解决方案和优势。只有泰克实时频谱分析仪提供了所需的触发、捕获和分析功能，可以揭示粒子加速器异常事件的实际特点。RSA 是可以满足苛刻的粒子研究要求的解决方案。

如需更多信息，请与当地泰克代表处联系，或安排仪器演示。

参考资料：

1. “Elettra 增强器快速调谐测量系统”，S. Bassanese, M. Ferianis, F. Lazzourene, DIPAC 2003 会议记录 - GSI, 德国美因兹
2. “光子工厂储存环中的脉冲八极磁铁系统”，Tsukasa Miyajima., Yukinori Kobayash和Shinya Nagahashi.
3. PBAR 指南 656“使用调相 RF 进行色品测量”，Dave McGinnis - Fermi 国家实验室。
4. “通过 RF 调相进行色品测量”，BI 论坛，2/26/2002，Oliver Bruning - CERN。
5. “Spring-8 储存环的振动测量”，2001 年粒子加速器会议记录，芝加哥，K. Tsumaki, N. Kumagai, Spring-8, Hyogo, 日本。
6. “时间问题”，泰克技术简介，资料编号：37W-17252-0。

泰克科技(中国)有限公司
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
邮编：200040
电话：(86 21) 6289 6908
传真：(86 21) 6289 7267

泰克广州办事处
广州市环市东路403号
广州国际电子大厦2807A室
邮编：510095
电话：(86 20) 8732 2008
传真：(86 20) 8732 2108

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322室
邮编：710001
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

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



© 2004年 Tektronix, Inc. 版权所有。 全权所有。 Tektronix 产品， 不论已获得专利和正在申请专利者， 均受美国和外国专利法的保护。 本文提供的信息取代所有以前出版的资料。 本公司保留变更技术规格和售价的权利。 TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。 本文提及的所有其它商号分别为其各自所有公司的服务标志、商标或注册商标。 03/04 HADW/WOW 37C-17749-0

Tektronix
Enabling Innovation