

频谱仪在卫星通信领域的使用

文 / 吴波洋

频谱仪和示波器都是常用的电子通信测量仪表。示波器在时间域上显示信号的电压变化，频谱仪则在频域上显示信号的功率变化。频谱仪显示屏的水平坐标为频率轴，垂直坐标为功率轴，主要用于观测和记录某个指定频段内的载波频谱。本文拟以常用的惠普和安捷伦频谱仪为例，在择要介绍频谱仪原理功能的基础上，着重介绍它在卫星通信领域的使用经验。

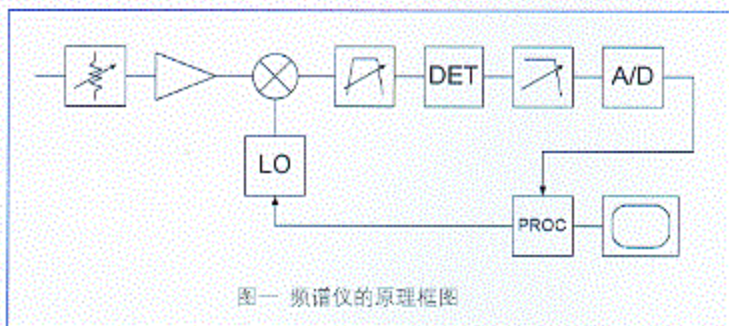
1. 工作原理与测量性能

1.1 工作原理

频谱仪的原理框图如图一所示。输入信号经由衰减器和放大器，被送到混频器。混频输出经过中频带通滤波、检波、视频滤波、以及模数转换等电路，被送入微处理器，微处理器控制混频器的本振频率，并且向显示器输出检测得到的频谱图形。混频器的本振频率通常为周期性的扫频信号。

频谱仪可以根据需要，周而复始地连续检测并且显示某一段频率范围内的信号功率。上图中的混频器控制带通滤波器的中心频率，以决定被检测信号的扫频范围。被称作分辨率带宽 (RBW, Resolution Bandwidth) 的带通滤波器带宽可以受控改变，以决定被检测信号的输入带

宽范围。被称作视频带宽 (VBW, Video Bandwidth) 的低通滤波器带宽也可以受控改变，以改变检波器输出信号的平滑度。检波器的输入信号通常由对数放大器压缩信号动态范围，并且调整其电平范围。微处理器将经过模数转换的检波输出信号，转换为显示器上的频谱图形。



图一 频谱仪的原理框图

1.2 测量范围

在频谱仪的显示屏上，水平坐标通常为信号频率，垂直坐标通常为功率。频率范围通常由中心测量频率 (CF, Center Frequency) 和扫频测量范围 (SP, Frequency Span) 共同决定。功率电平范围通常由功率显示的最大值 (RL, Reference Level)、以及电平刻度 (Scale/Div, 即每一格的电平值) 共同决定。

频谱仪的主要性能指标大致为下列几个方面。其一是频率范围。不同型号频谱仪的工作频率最高可为 1.5GHz、6.7GHz、20 余 GHz 或更高，这些工作频率分别适应于中频和 L 频段、C 频段，以及 Ku 频段。其二是扫描点数，即显示屏在水平方向上的取样点数量。不同型号频谱仪在

经过 A/D 转换后的扫描点数分别可为 401 点、1001 点，乃至 8192 点。扫描点数越多，在水平轴上的显示精度就越高。其三是扫描时间，各种频谱仪的扫描时间最长分别可为 300s、1500s、乃至 4000s。扫描时间越长，后文将介绍的 0 span 测试范围也就越大。其四是分辨带宽，根据频谱仪型号的不同，分辨带宽最窄可为 10kHz、10Hz、甚至 1Hz。选择较窄的分辨带宽，有助于较为准确地显示窄带载波的频谱。其五是视频带宽，根据频谱仪型号的不同，视频带宽最窄可为 30Hz，或为 1Hz，选择较窄的视频带宽，可以得到较为平滑的谱线。其六是最大输入功率，当输入衰减设在 5dB 以上时，平均连续功率可为 1W (30dBm)。当脉宽小于 10s、占宽比小于 1%、输入衰减设在 30dB 以上时，峰值脉冲功率可达 100W (50dBm)。其七为平均噪声电平，平均噪声电平反映频谱仪可以显示的最小信号电平，它随测量时的分辨带宽和视频带宽而改变。在 RBW=1kHz 和 VBW=30Hz 条件下，平均噪声电平约为 -110dBm；在 RBW=10Hz 和 VBW=1Hz 条件下，平均噪声电平约为 -130dBm。平均噪声电平越低，对小信号的检测灵敏度就越高。

1.3 输入输出端口

频谱仪的测试输入端口通常为 N 型电缆插座，如果测试电缆为 BNC 电缆头，则需加装 N-BNC 转换接头，用于频谱仪频率和功率自校准的参考信号输出端口通常使用 BNC 型电缆插座。

HP 频谱仪采用 HP-IB 端口，图形输出设备为 HP 绘图仪。新型频谱仪多采用并行打印端口，可以使用各种型号的打印机。

频谱仪可以通过 GP-IB (即 HP-IB)，或者 RS232 通信端口与计算机相连。经过计算机编程控制的频谱仪可对输入载波信号进行自动监测。

1.4 预热自校与输入限制

频谱仪接通电源后，应该有 5 分钟的预热时间，必要时需在开机后对其进行自校准。自校时，先用专用测试电缆连接参考信号输出端口与测试输入端口，用 Marker 读出参考信号（单载波）的频率和功率，再按说明书所列步骤，将频率和功率读数调整为标称值。

频谱仪对输入信号的平均连续功率有严格限制，通常应低于 30dBm (即 1W)，因此在测量大功率载波时，应使用功率衰减器，以限制输入功率。频谱仪对输入直流电压的限制值为 0V，因此，当输入信号含有直流成分时，应采用隔离器，将输入信号中的直流成分完全隔离。

1.5 存储与调用

频谱仪通常可以在内存中存储一定数量的频谱图，部分频谱仪还配备软盘驱动器，可以存储更多的频谱图供日后作比较，采用先集中进行测量及存储，然后再绘图或打印输出的方法，可以缩短测试时间。

频谱仪的内存也可以存储一定数量的设置参数，调用并且调整预设参数进行测量，可以加快测试进度。调用预设参数，以同等条件进行测量，也便于比较和分析同一个载波在不同时段的多个频谱图。

2. 测量参数设置

2.1 常用设置参数

频谱仪的常用设置参数有如下几组：

1) 频率 FREQUENCY (中心频率 Center Freq.、起始频率 Start Freq.、终止频率 Stop Freq.、中心频率步进值 CF Step) 与扫频范围 SPAN

2) 电平幅度 AMPLITUDE (参考电平 Ref Level.、衰减 Attenuation.、电平刻度 Scale/Div)

3) 带宽BW/Avg (分辨带宽RBW、视频带宽VBW) 与扫描Sweep (扫描时间Sweep Time、扫描方式Sweep)

4) 光标Marker (普通Normal、差值Delta、关闭Off)、峰值查找Peak Search (下一个峰值Next Peak)、光标转移Marker → (转移至中心频率Marker → CF、转移至参考电平Marker → Ref Lvl) 与显示方式Display

5) 谱线显示View/Trace (谱线选择Trace、连续扫描Clear Write、最大保持Max Hold、最小保持Min Hold、固定显示View、空白Blank)

2.2 参数输入方式

部分测量参数可以选择Auto (自动) 和Manual (人工) 两种设置方式。被设为Auto方式的测量参数, 将由频谱仪根据相关参数的设置值, 作自动调整。被设为Manual方式的测量参数, 可作手动输入或修改。手动输入或修改测量参数的方法大致有如下三种: 用数字按钮输入数据, 并且选择单位; 通过按动向上或向下按键, 逐档改变现行参数; 通过转动旋钮, 连续改变现行参数。

2.3 频率参数设置

常用Center Freq加Span, 或者Start Freq加Stop Freq等两种方法确定频率测量范围, 建议采用数字键盘输入数据。输入数据的有效数据位越少, 越容易根据坐标线估算载波频率。

适当选择CF Step (例如使之与Span相等), 可使频率测量范围随着向上和向下两个按键的使用, 而呈波段式变化。

2.4 电平参数设置

参考电平Ref Level对应于最高一条水平坐标线的电平值, 用于调整信号频谱在显示屏上的纵向位置。建议使用整数数值以方便估算载波电平。

输入衰减Attenuation用于调整频谱仪可变输入衰减器的衰减量。-10dB档通常最为精确。0dB档通常只能用数字键设定。建议常设在Auto档上, 由频谱仪根据输入信号强度自行决定输入衰减量。

电平刻度Scale/Div为相邻两条水平坐标线之间的功率差值, 用于调整频谱仪所能显示的功率测量范围。载波在显示屏上的相对幅度将随Scale/Div的变化而改变。

2.5 带宽与扫描方式设置

分辨带宽RBW为扫频带滤波器的带宽, 视频带宽VBW为检波输出信号低通滤波器的带宽。RBW越宽, 载波的局部失真就越大; VBW越宽, 所显示谱线的上下起伏就越大。为使所显示的载波频谱不失真, RBW应不宽于载波带宽的1/10。为了兼顾谱线的清晰与扫描时间, 建议将VBW设在Auto上。

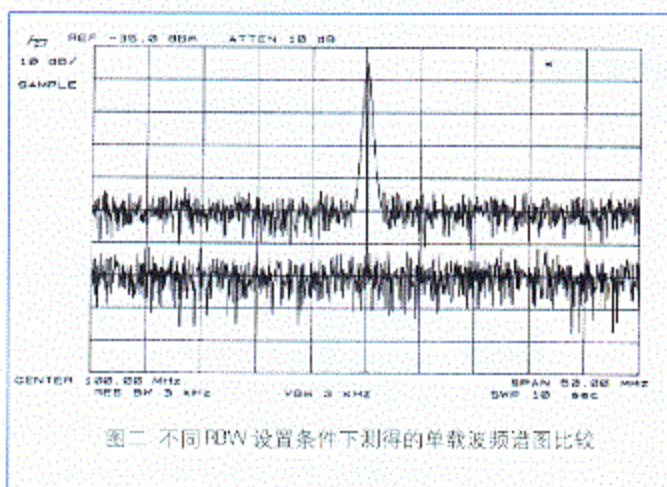
扫描时间Sweep Time为扫描并且处理一个测量带宽范围的时间周期。Span越宽, RBW和VBW越窄, Sweep Time就越长。强烈建议将Sweep Time设在Auto上, 因为如果人工输入的扫描时间短于处理器所需要的数据处理时间, 则所显示的频谱将出现严重失真。

扫描方式Sweep分为连续扫描(Cont Sweep)和单次扫描(Single Sweep)两种。Cont Sweep方式在从起始频率到终止频率的整个扫描范围内, 周而复始地连续扫描, 新扫描得到的谱线将覆盖以前的显示。Single Sweep方式只对整个频率范围作单次扫描, 扫描后的显示频谱维持不变。

图二用于比较在不同分辨带宽条件下所测得的单载波频谱: RBW=300kHz时, 载波频谱较宽, 噪声底较高; RBW=3kHz时, 载波频谱较窄, 噪声底较低。不同RBW设置条件下测得

的载波电平相同。但是，在两种RBW条件下得到的20dB噪声底差值，以及20dB载噪比差值，都反映了RBW的100倍比值。此外，RBW=3kHz的扫描时间也远长于RBW=300kHz时。

图三用于比较在不同的视频带宽设置条件下测得的单载波频谱。VBW=100kHz时，噪声底起伏大；VBW=1kHz时，噪声底起伏小，谱线较为平滑。单载波频谱基本上不受VBW设置的影响，VBW=1kHz的扫描时间远长于VBW=100kHz时。



图二 不同RBW设置条件下测得的单载波频谱图比较

2.6 光标与显示方式设置

光标Marker通常有如下几个选项：普通（Normal），显示单个光标所在点的频率和功率值，光标的所在位置可以通过转动旋钮而调整改变；差值（Delta），固定原有的光标，并且增添一个可以调整改变的新光标，显示两个光标所在点之间的频率和功率差值；关闭（Off），关闭光标。

峰值查找Peak Search用于将光标设在所显示频谱的功率峰值点上。它的选项主要有下一个峰值（Next Peak），用于自动寻找谱线上电平仅次于光标所在点的次一级功率峰值，将光标位置转移到该处，并且显示相应的频率和功率值。

光标转移Marker → 用于根据光标所在点的频率或功率参数改变频谱仪的设置：转移至中心频率（Marker → CF），以光标所在点的频率作为频谱仪设置值中的中心频率（Center Freq），其效果为左右平移谱线，使光标所在位置落在频率范围的中点；转移至参考电平（Marker → Ref. Lvl），以光标所在点的功率作为参考电平，其效果为上下平移谱

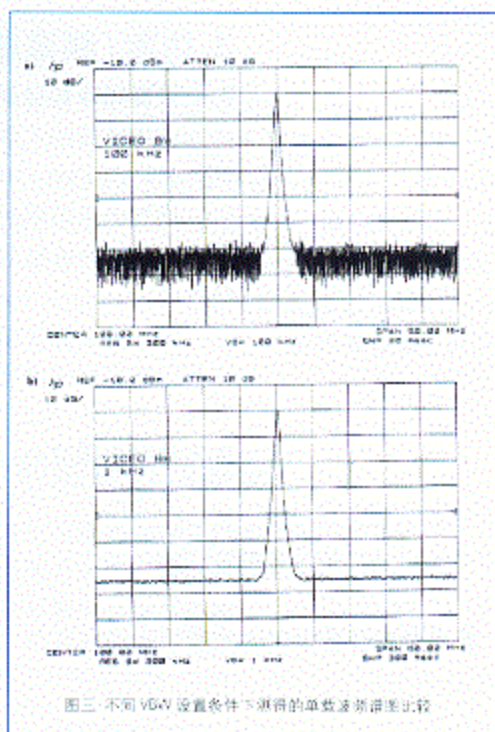
线，使光标所在位置落在最高的一条水平坐标线上。

显示方式Display的选项主要有水平显示线（Display Line），用于对水平显示线作On、Off选择。通过上下调整显示线的电平值，可以比较和读取载波频谱中相应线段的载波功率。

2.7 谱线显示方式设置

谱线显示方式View/Trace通常有如下几个选项：谱线选择（Trace），用于选择A、B、C等几条可用谱线中的某一根；连续扫描（Clear Write），使当前所选择的谱线处于重复刷新（Cont Sweep时），或者可被刷新（Single Sweep时）的状态；最大保持（Max Hold），使谱线中每个频点（显示屏在水平方向上的取样点）的功率显示只会被更大的信号所修正；最小保持（Min Hold），使谱线中每个频点的功率显示只会被更小的信号所修正；固定显示（View），固定显示谱线的当前测量值，便于对前后频谱或不同频谱作比较；空白（Blank），关闭并且不显示当前选定的谱线。

如果将3条同时工作的谱线分别设在Clear Write、Max hold和Min Hold上，可以观察和比较相关频谱的瞬时变化，及其在某段时间内的最大和最小电平变化范围。



图三 不同VBW设置条件下测得的单载波频谱图比较

3. 功率 / 频率测量方法举例

3.1 设置频率和功率测量范围

按照给定的工作频段，或者根据被测载波的频率带宽范围，设置 Center Freq 与 Span（或者 Start Freq 与 Stop Freq）。

调整电平范围时，先根据被测对象设置 Scale/Div。一般而言，调制载波多用 5dB，单载波应为 10dB，然后用向上、向下按键或者旋钮调整 Ref Level，使被观测载波和噪声底均落在电平显示范围内。

为了避免载波频谱的失真，RBW 应被调整为待测载波带宽的 1/10（至少为 1/3）。为了获得较为平滑的扫描谱线，可以适当调低 VBW。为了保证频谱仪有足够的检测处理时间，应将 Scan Time 设在 Auto 档上。RBW 和 VBW 的取值也不能过低，以避免延长频谱扫描的时间。

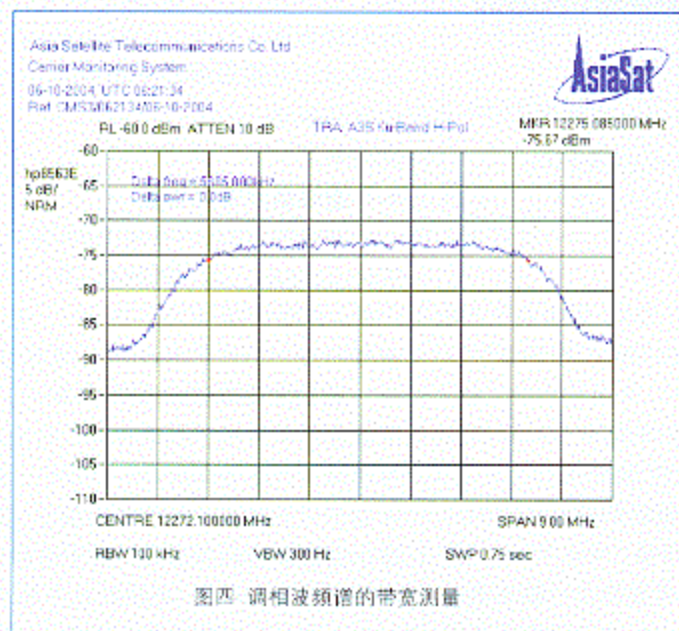
3.2 典型应用之一：调相波的载噪比与带宽测量

载噪比 C/N 的测量方法和步骤大致为：将 Display Line 设为 On，用旋钮调整 Display Line，使之与载波波峰的平均电平相重合，并且读取相应的电平值 C；向下调整 Display Line，使之与噪声底相重合，并且读取相应的电平值 N；用本方法测得的 C 为载波与噪声功率之和，它与 N 的对数差值为载波加噪声的功率与噪声功率之比 (C+N)/N。调相波的 (C+N)/N 通常都大于 10dB，这时，

它与载噪比 C/N 之差值低于 0.5dB，亦即可以认为两者近似相等。

调相波的频谱近似于一个梯形，其带宽测量值通常附有功率条件，即与所测带宽对应的功率滚降是多少 dB。带宽测量的方法步骤大致为：打开 Marker，并且将其调整在载波峰值的平均电平上；选择 Marker Delta，将可移动光标移到载波谱线一侧的 -n dB 处（根据需要，n 可取为 3、6 或 20）；再次选择 Marker Delta，将可移动光标移到载波谱线另一侧的等电平（同样为从载波峰值下降 n dB）处；Marker Delta 所显示的频率差值数据，即两个光标点所对应频率的差值，为所测载波的 n dB 带宽。

由图四所示的调相波测量频谱



可见，载波的 C/N 约为 15dB，其 3dB 带宽约为 5685MHz。

3.3 典型应用之二：TDMA 和 DAMA 载波测量

TDMA 载波频谱的包络线通常与调相波相同，TDMA 载波通常由多个上行站点分时发射，从卫星转发下行的载波是断续的。对应于频谱仪参数设置中的不同扫描时间，TDMA 载波频谱表现为宽疏不等的梳状谱线。

DAMA 载波通常为间歇发射的连续调相载波。载波频率甚至带宽都将由网管系统在某个带宽池内随机分配。带宽池内的多个载波此起彼伏。在不同时刻所观测到的载波频点和载波数量通常并不相同。

为了方便观察和测量 TDMA 载波和 DAMA 载波组的频谱，可以对特定的频段作一段时间的 Max Hold 测试，从而使所显示载波的谱线相对固定。图五为某个 TDMA 载波的频谱图。其中的一组梳状谱线为载波的实时扫描结果，而另一条较为连续的谱线则为用 max hold 方式记录一段时间所得到的载波包络线。

3.4 典型应用之三：单载波的功率和稳定度测量

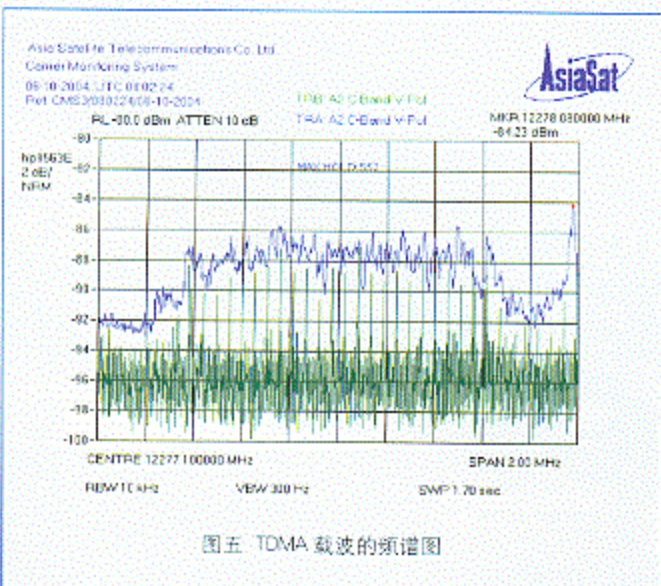
单载波的功率测量方法可以为：适当调整 Center Freq、Span、Ref Level 和 RBW，使载波的峰值落在显示范围内；用 Peak Search 读出光标的功率值 PMarker；再按下式计算载波功率

$$PCW = PMarker + AttnCoupler + AttnSA$$

式中，AttnCoupler 为测试端口到频谱仪输入端口之间的耦合衰减与电缆损耗之和，AttnSA 为频谱仪的输入衰减。

单载波的功率和频率稳定度测量方法可以为：适当调整频谱仪设置，使载波的峰值落在显示范围内；按 Marker → CF、Marker → Ref Lvl，以及向上按键，使载波的峰值落在中心频率的参考电平以下 10dB 处。在做完上述准备工作后，定时按 Peak Search，并且读取并记录光标所对应的功率和频率值；经过规定时间的反复测试后，对测试记录作统计处理。

3.5 典型应用之四：互调失真测量



互调失真的测量对象通常为在非线性放大器带宽范围内的两个等幅单载波，以及由它们所产生的三阶互调产物。测量对象为单载波和互调产物之间的电平差值。

测量方法与步骤大致为：适当调整 Center Freq、Span、Ref Level、Scale/Div 和 RBW，使两个单载波与两个三阶互调产物的峰值，以及噪声底都落在显示范围内；按 Peak Search，使光标落在较高的一个单载波上；按 Next Peak，使光标落在另一个单载波上；按 Marker Delta，再按 Next Peak，使可移动光标落在较高的一个三阶互调产物上。Marker Delta 在这时所显示的单载波与互调产物之间的功率差值，即为互调比 C/IM。

4. 功率 / 时间测量方法举例

频谱仪也可用于观测和记录固定频率的单载波功率在某个时间段内的起伏变化。这时，频谱仪的垂直坐标为功率轴，水平坐标为时间轴。

4.1 测试频率、功率和时间范围的初始设置与调整步骤

- 1) 按载波工作频率设置 Center Freq，设 Span 为 10 到 100kHz
- 2) 根据被测对象的电平变化范围设置 Scale/Div，以使测量过程中的载波电平变化始终落在频谱仪的可显示电平范围内
- 3) 根据被测对象的频率稳定度，在确保测量过程中的载波频率飘移不会超出频谱仪带通滤波器带宽范围的条件下，选择尽可能窄的 RBW
- 4) 用 Peak Search、Marker → CF 和 Marker → Ref Lvl，按照载波的峰值频率和功率，调整频谱仪的 Center Freq 与 Ref Level
- 5) 用向下按键调窄 Span，再作上述 CF 与 RL 的调整步骤
- 6) 重复上述 4)、5) 两个步骤，直到 Span 小到不能再调窄
- 7) 用数字键盘将 Span 设为 0Hz，并且用向上按键将 Ref Level 调高一格，这时的载波显示谱线将在第二高的水平坐标线上作从左至右的水平运动
- 8) 根据测试需要输入扫描时间，即频谱仪在 0 Span 工作方式下的水平轴显示范围

4.2 典型应用之五：天线方向图测量

天线收方向图的测量方法为，在被测电驱动天线预先对准信号源（卫星或者地面测试天线）的条件下，锁定天线的方位角（或俯仰角），在转动天线俯仰角（或方位角）的

同时，测试并且记录由信号源以恒定的频率和功率所发送的，并由被测天线接收到的单载波的功率变化。

天线发方向图的测量方法通常为，在被测电驱动天线预先对准接收设备（卫星或者地面测试天线）的条件下，锁定天线的方位角（或俯仰角），在转动天线俯仰角（或方位角）的同时，测试并且记录由被测天线以恒定的频率和功率所发送的，并且由接收设备接收或者转发的单载波的功率变化。

具体的准备工作和测试步骤为：

- 1) 调准被测天线的指向和极化角，锁定的方位角（或俯仰角）
- 2) 根据测试要求，先将天线的俯仰角（或方位角）转到起始角度（例如原指向-20度），再将天线转到终止角度（例如原指向+20度），记录天线从起始角度驱动到终止角度的所需时间
- 3) 按照4.1节所述的方式和步骤，调整频谱仪设置，并且将扫描时间设置为测试过程所需的的天线转动时间
- 4) 重新调准被测天线的指向
- 5) 再次将天线的俯仰角（或方位角）转到起始角度
- 6) 在启动并驱使天线转向终止角度的同时，使频谱仪开始作 Single Sweep
- 7) 在待测天线转到终止角度，并且频谱仪完成 Single Sweep 时所记录的谱线，即为相关天线方向图的测试结果

4.3 典型应用之六：天线跟踪性能测量

测试信号通常为卫星信标，测试步骤和频谱仪设置大致与天线收方向图的测试相似。

在对具有自动跟踪功能的地面天线进行验收时，需要测量天线的自动跟踪性能。测试前应按4.1节所述的方式和步骤，调整频谱仪设置，测试时，先使天线对准卫星，并使频谱仪开始作 Single Sweep，随之，用手控方式调偏天线的方位角和俯仰角，频谱仪显示谱线的电平将随天线偏离卫星而下降，在启动天线自动跟踪功能后，频谱仪所显示的卫星信标电平随时间的变化，反映了自动跟踪天线的对星过程，以及跟踪的速度和精度。

在卫星通信的某些特殊应用领域，需要使用能在车载行进过程中自动对星的“动中通”天线。由于动中通天线在自动跟踪性能不佳时，可能因射偏载波而干扰邻星，也可能因极化角失配而干扰反极化用户，卫星公司必须对它的跟踪性能作严格的测试。为了避免产生干扰，动中通天线通常采用以收代发的方式，测试和比较天线在正、反两个极化上接收到的卫星信标电平，测试前的设置准备过程同上。测试时，先让车载天线在静止状态中对星，再令频谱仪开始作 Single Sweep，然后在特定的路况和驾驶条件下测试并记录天线所收卫星信标的电平变化，正极化的信号电平主要随天线的指向角而变，反极化的信号电平可能随天线的指向角和极化角而变。通过测试，记录并且比较所收到的正反极化卫星信标电平随时间的变化量，可以了解车载天线在行进中的自动跟踪性能和极化失准状况。