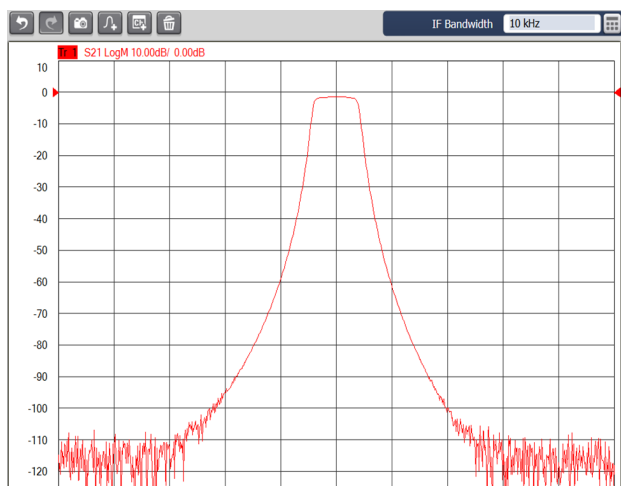


# 了解和改善 网络分析仪的动态范围



# 引言

表征多种类型的微波设备时，实现尽可能高的网络分析仪动态范围极为重要，在某些情况下，这是确定测量性能的关键因素。要从网络测量系统获得最大的动态范围，了解动态范围的本质和哪些方法可用于增加动态范围非常重要。有了这些知识，设计人员可以选择合适的方法获得最佳结果，并且把对其他参数的影响降到最小，比如测量速度等。

## 定义动态范围

网络分析仪的动态范围本质上是系统可以测量的功率范围，具体为：

- **P<sub>最大值</sub>**：表示在测量过程中系统发生不可接受的误差之前可以测量的最高输入功率电平，通常由网络分析仪接收机的压缩技术指标来确定。
- **P<sub>参考值</sub>**：表示测试端口处、来自网络分析仪信号源的标称功率。
- **P<sub>最小值</sub>**：表示系统可以测量（其灵敏度）的最小输入功率电平，它取决于接收机的本底噪声。  
P<sub>最小值</sub>取决于 IF 带宽、平均值和测试配置。

动态范围的两个常用定义是：

- 接收机动态范围 = P<sub>最大值</sub> - P<sub>最小值</sub>
- 系统动态范围 = P<sub>参考值</sub> - P<sub>最小值</sub>

可获得的动态范围取决于测量应用，如图 1 所示。

- **系统动态范围**：无需放大即可实现的动态范围，例如测量衰减器和滤波器等无源元件时。
- **接收机的动态范围**：如果把接收机看作是一个系统，那么它就是这个系统的真实动态范围。要实现接收机的全动态范围，可能需要用到放大器。这可以是被测器件或者是添加到测量系统的外部放大器。

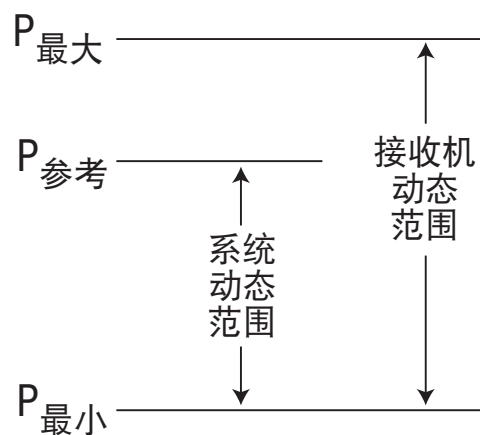


图 1. 动态范围定义。

## 本底噪声定义

接收机的本底噪声是一项重要的网络分析仪技术指标，它有助于确定接收机动态范围。不幸的是，“本底噪声”并不是一个定义明确的术语，多年以来已经有了许多种不同的定义方式。

图 2 通过实验，对比示出了一些常见的本底噪声的定义。在本实验中，我们模拟了噪声功率为 -100 dBm 的高斯随机噪声，并使用四个定义进行了计算：

- 图中实线表示噪声的 RMS 值，它等于 -100 dBm 的噪声功率。
- 虚线 (-101 dBm) 是噪声线性幅度的平均值，转换为 dBm。
- 点线 (-102.4 dBm) 是噪声对数幅度的平均值。
- 点划线 (-92.8 dBm) 是噪声线性幅度的平均值与其三倍标准偏差之和，转换为 dBm。

是德科技的矢量网络分析仪 (VNA)，如 PNA 或 ENA 系列都是使用 RMS 值定义接收机的本底噪声。这是一个常用定义，很易于理解，因为它是接收机的等效输入噪声功率。

## 改善动态范围

在某些测量情况下需要提高网络分析仪的动态范围，使其超过使用默认设置时获得的电平。本底噪声决定了仪器可以测量的最小功率电平，从而限制了它的动态范围。使用平均值或降低系统 IF 带宽 (IF BW) 可以改善本底噪声。

平滑处理法 (Smoothing) 是另一种常被认为类似于平均值和 IF BW 调整的技术，但它不会降低本底噪声。平滑处理法是对格式化数据的邻点进行平均，类似于视频过滤。迹线到迹线 (或扫描到扫描) 取平均值时，针对的是预先格式化的矢量数据，因此它实际上会降低噪声功率。这种关键差异导致平滑处理时无法降低本底噪声，尽管它确实是在迹线上减少了噪声峰峰值的微小变化。<sup>1</sup>

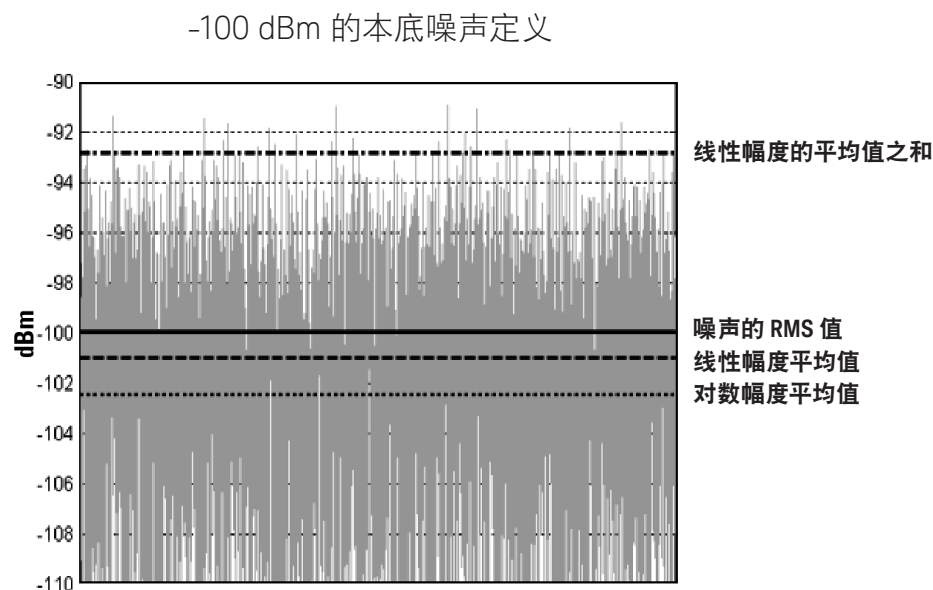


图 2. 各种本底噪声定义

## 平均值

是德科技的 VNA 和许多其他网络分析仪通过对每次扫描的数据点进行指数加权平均来执行扫描到扫描平均。对数据集内的样本进行指数加权，即使在达到所需的平均因子之后，也可以在不终止的情况下进行平均。对复杂数据进行平均就意味着数据是矢量平均的。

许多信号分析仪使用标量平均，这只会减少噪声的方差，不会影响平均噪声电平。在矢量意义上进行平均时，如果包含相干信号和无关噪声的迹线，噪声分量将接近于零，所得到的迹线将显示具有较少噪声的期望信号。在网络分析仪显示器上以对数幅度格式观察时，可以清楚地看出平均噪声电平降低并且改善了动态范围。

使用大多数矢量网络分析仪中提供的平均功能，平均值每增加 2 倍，信噪比改善 3 dB。这是降低本底噪声的有效方法。但是，它也会降低测量速度，因为在必须平均两条迹线时，测量时间会加倍。

平均法只能用于比例测量，不适用于使用单个接收机信道进行的测量。非比例测量不允许进行平均，因为在此模式下相位是随机的，平均法（在复杂域中执行）将始终会导致结果接近于零。

## 减少中频带宽

系统的中频带宽可以通过前面板或远程编程进行更改，其值将影响对分析仪接收机中收集的数据执行的数字滤波。降低中频带宽会滤除数字滤波器带宽之外的噪声，从而降低本底噪声。

分析仪接收机链中的低电平噪声是由电阻电子的热骚动引起的热噪声造成的。因此，它与带宽成正比。热噪声电压的均方值由下式给出：

$$E^2 = 4RkTB$$

其中

k 是玻尔兹曼常数（1.38 e-23 焦耳/开尔文）

T 是绝对温度，单位为开尔文

R 是电阻分量，单位为欧姆

B 是带宽，单位为赫兹

传递给复共轭负载的噪声功率为

$$P_n = \frac{E^2}{4R} = kTB$$

这就是为人熟知的噪声功率“kTB”关系<sup>2</sup>。

噪声本质上是随机且被认为是不确定的，因为它是由小事件的集合引起的，呈现出高斯概率分布（可以通过中心极限定理<sup>3</sup>证明）。

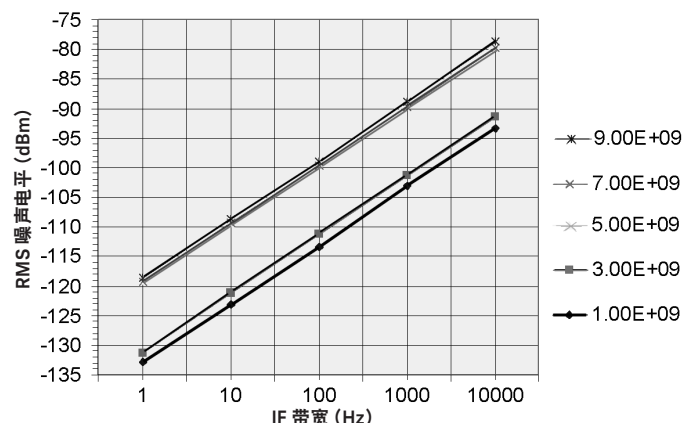


图 3. RMS 本底噪声与中频带宽 (n = 801 pts)

对本底噪声和中频带宽之间关系的高度自信使得可以通过降低中频带宽来精确计算本底噪声降低值。有一项实证研究使用了是德科技的 PNA 网络分析仪，其中 RMS 噪声电平是在 5 个不同的 CW 频率（1、3、5、7 和 9 GHz）下测量的。扫描中有 801 个点，中频带宽设置为 1 Hz、10 Hz、100 Hz、1 kHz 和 10 kHz。在测试端口没有信号的情况下测量了 PNA 的本底噪声。在图 3 中，观察到的本底噪声与中频带宽之间的关系表明 PNA 的 RMS 本底噪声非常接近理论预期。与理论值的偏差可以忽略不计。

与平均操作一样，以降低中频带宽的方式降低本底噪声也会减慢测量速度。虽然可以预期中频带宽降低 10 倍会使本底噪声降低 10 dB，同时导致测量时间增加 10 倍，但这并非总是如此，因为在不同的中频带宽中，数字滤波器的网络分析仪形状可能不同。例如，对是德科技的 VNA 而言，中频带宽减少 10 倍因子，扫描时间的增加值少于 10 倍因子。这意味着为了实现相同的本底噪声降低，降低中频带宽对测量速度的影响低于平均法。

# 选择最佳方法

为了降低本底噪声，可以提高平均值或降低中频带宽。如果测量速度不是最重要的考虑因素，那么任何一种方法都同样有效。获取和处理迹线数据（称为循环时间）所需的时间不仅包括扫描时间，还包括回扫时间、带交叉时间和显示更新时间。

由于平均法需要多条迹线并每次都更新显示，因此执行平均法通常比降低中频带宽需要更长的时间，特别是需要多次平均时。切记，影响测量时间的大部分差异是由对各种中频带宽执行的数字滤波引起的。这种效应在循环时间的扫描时间分量中体现出来，因此为了确定两种噪声降低方法对测量时间的影响，仅考虑扫描时间是合适的。

以 10 kHz 中频带宽的 PNA 系列为例。如果在动态范围内需要改善 10 dB，则可以通过平均 10 次扫描或将中频带宽设置为 1 kHz 来实现。表 1 显示了为改善 10 或 20 dB 的动态范围而采用的两种方法对扫描时间的影响。

表 1 快速中频带宽对扫描时间的影响

		噪声降低 (dB)	扫描时间增加因子
10 kHz	10 次平均	10	10
1 kHz	0 次平均	10	7.75
10 kHz	100 次平均	20	100
100 Hz	0 次平均	20	74.8

此示例采用了相当快的中频带宽，并且表明在尝试改善动态范围时，降低中频带宽比执行平均法更有优势。但是，现在考虑一下较慢的扫描模式（即较低的中频带宽）。如果 PNA 设置为 100 Hz 的中频带宽并且需要降低 10 dB 的本底噪声，则可以应用 10 次平均，或将中频带宽降低到 10 Hz。表 2 显示了对扫描时间的影响。

表 2 慢速中频带宽对扫描时间的影响

		噪声降低 (dB)	扫描时间增加因子
100 Hz	10 次平均	10	10
10 Hz	0 次平均	10	9.9
100 Hz	100 次平均	20	100
1 Hz	0 次平均	20	99.5

周期时间的增加与扫描时间的增加紧密相关，如果网络分析仪处于快速扫描模式，则通过降低中频带宽获得动态范围的改善对测量速度的影响明显优于执行平均法。对于慢扫描模式，两种方法对测量速度的影响基本相同。

决定在给定测量应用中改善动态范围的方法时，还可以考虑其他因素。通过平均法降低本底噪声可让用户在进行平均时观察 PNA 屏幕上的迹线，一些设计人员发现这些迹线很有用。降低中频带宽适用于比例和非比例测量（不同于仅适用于比例模式的平均法），这可能是某些情况下的决定因素。

PNA 和 ENA 系列矢量网络分析仪均可提供大量 中频带宽供选择，这使设计人员可以灵活选择期望的本底噪声降低值，同时尽可能避免降低测量速度。在许多情况下，通过平均法和调整中频带宽都可以增加动态范围。

# 动态范围、分段扫描和可配置的测试设置

对于速度和宽动态范围都必须优化的应用，是德科技矢量网络分析仪提供的分段扫描功能非常有用。测量滤波器要同时表征高功率电平的通带和极低功率电平的抑制频带时，此功能非常有用。分段扫描允许用户将频率扫描分成多个频段，每个频段都有自己的起始频率、中频带宽、功率电平和点数。测量滤波器时，只要高电平迹线噪声保持足够小，通带中的中频带宽就可以设置得更宽，以实现快速扫描速率。

抑制频带中的本底噪声对测量误差有显著影响，因此中频带宽可以设置得足够低，以实现期望的平均噪声水平降低。为了进一步提高分析仪的动态范围，可以将分段扫描与重新配置测试结合起来（图 4）。反转接收测试端口中的定向耦合器，可以实现 12 至 15 dB 的动态范围增加。

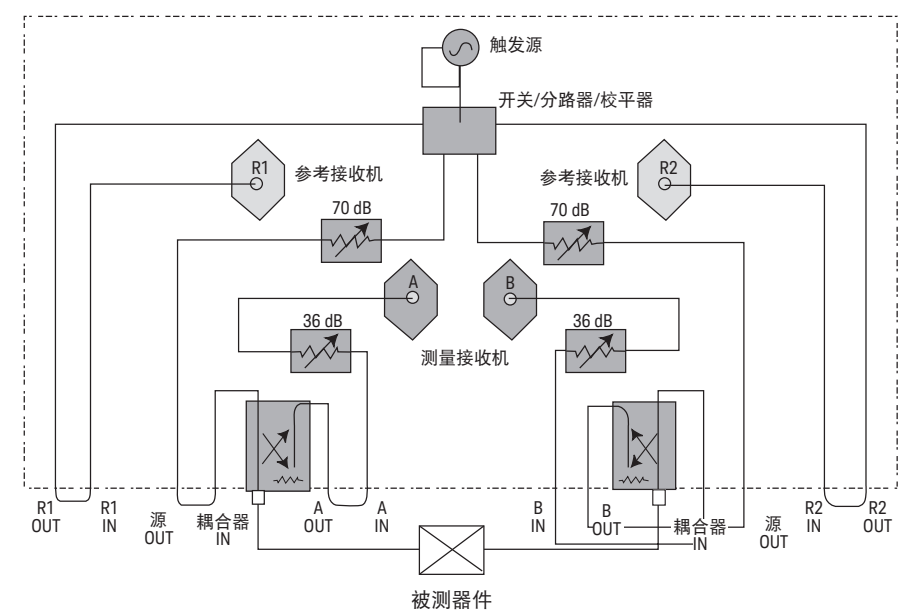


图 4. 重新配置测试集以进一步增加分析仪的动态范围。

## 总结

网络分析仪动态范围是许多测量情况下最关键的参数，可以通过平均法或降低中频带宽来降低本底噪声。然而，每种方法都有决定其在某些情况下适用性的缺点，并且对测量速度具有各自的影响。除了这两种方法以外，还可以通过使用分段扫描功能，以及可配置的测试集进一步改善动态范围，并且保持测量速度。

## 参考文献

1. Robert A. Witte, 《频谱与网络测量》，Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall PTR, Inc., 1993。
2. H.L. Krauss, C.W. Bostian 与 F.H. Raab, 《固态无线电工程》，New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. 1980, pp. 11-24。
3. Alberto Leon-Garcia, 《电气工程的概率和随机过程》第 2 版，New York, NY: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1994。

[www.keysight.com/find/NA](http://www.keysight.com/find/NA)

如欲了解更多信息，请访问：[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。

如需完整的联系方式，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

