运算放大器失真：HD、THD、THD + N、IMD、SFDR、MTPR

谐波失真(HD)和总谐波失真(THD)

运算放大器的动态范围可以多种方式进行定义。其中一种最常见的方式是规定谐波失真、总谐波失真(THD)或总谐波失真加噪声(THD + N)。其他相关规格包括交调失真(IMD)、交调截点(IP2, IP3)、无杂散动态范围(SFDR)和多音功率比(MTPR)。

谐波失真非常简单，就是目标谐波(二阶、三阶等)的均方根(RMS)值与信号电平均方根值的比值。在音频应用中，通常表示为一个百分比，但在通信应用中，则经常表示为dB。其测量方式是，将一个频谱纯净的正弦波应用于一个放大器，并用一个频谱分析仪观察放大器的输出。

总谐波失真(THD)为所有谐波(二阶、三阶、四阶等)的和方根值与信号方根值的比值。一般而言，在THD测量中，只有前五个或六个谐波是有意义的。在许多实际场合中，仅考虑二阶和三阶谐波而不考虑更高阶谐波，所带来的误差已经可以忽略了，因为更高阶项的幅度往往大幅降低了。

总谐波失真加噪声(THD + N)

总谐波失真加噪声(THD + N)为所有谐波及噪声组分在指定带宽下的和方根值与信号方根值的比值。必须注意，THD测量不包括噪声项，而THD + N则包括。THD + N测量中的噪声项必须在整个测量带宽上积分，并且必须指定该带宽才可得到有意义的测量结果。在窄带应用中，可通过滤波方式降低噪声电平，结果将降低THD + N，从而提高信噪比(SNR)。

在许多情况下(尤其是在音频应用中)，当引用THD时，制造商实际上指的是THD + N，因为多数测量系统并不区分谐波相关信号和其他信号。THD + N测量一般是通过以下方法测得的，以陷波方式消除基波信号(以防止过驱)，然后测量剩下的信号，其中包括噪声和失真组分。在音频应用中，一般采用Audio Precision出品的特殊分析仪来测量THD + N。图1对THD和THD + N的定义进行了总结。

- V_s = Signal Amplitude (RMS Volts)
- V_2 = Second Harmonic Amplitude (RMS Volts)
- V_n = nth Harmonic Amplitude (RMS Volts)
- V_{noise} = RMS value of noise over measurement bandwidth
- $$THD + N = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \ldots + V_n^2 + V_{noise}^2}}{V_s}$$
- $$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \ldots + V_n^2}}{V_s}$$

图1：THD和THD + N定义

交调失真(IMD)

当一个频谱纯净的正弦波通常一个放大器(或其他有源器件)时，会产生各类谐波失真积，具体取决于非线性度的性质和严重程度。然而，仅仅测量单音正弦波在各种频率下的谐波失真，无法得到对放大器在通信应用中的潜在性能进行评估时所需要的全部信息。在多数通信系统中，有多个通道在频率上是“堆叠”起来的。往往需要测定放大器在应用两个或多个指定音时产生的交调失真(IMD)。

交调失真积在IF和RF区域尤其值得关注，也是无线电接收器设计的主要关注内容之一。不仅需要考察单音正弦波输入产生的谐波失真或总谐波失真(THD)，通常同时需要考察双音产生的失真积。

如图2所示，两个音将产生二阶和三阶交调积。示例展示了在将两个频率f1和f2应用于一个非线性器件时产生的二阶和三阶积。位于$f_2 + f_1$和$f_2 - f_1$.的二阶积离两个音非常远，可通过滤波的方式加以消除。位于$2f_1 + f_2$ 和$2f_2 + f_1$ 的三阶积也可以类似方式过滤掉。然而，位于$2f_1 - f_2$和$2f_2 - f_1$的三阶积离原始音非常近，对其进行过滤是非常困难的。

三阶IMD积在多通道通信系统中尤其麻烦，这种应用中，通道隔离在整个频段保持不变。来自大信号(阻断器)的三阶IMD积可以屏蔽小信号。

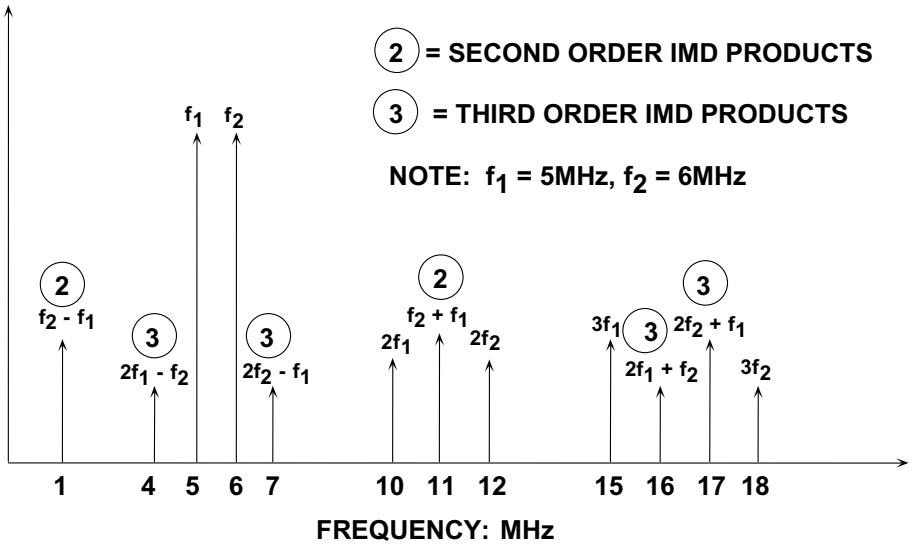

图2：三阶和三阶交调失真积

交调截点和1 dB压缩点

三阶IMD一般基于三阶交调截点测定，如下面的图3所示。两个频谱纯净的音被应用到系统上。单音的输出信号功率(单位：dBm)以及三阶积的相对幅度(以一个单音为基准)表示为输入信号功率的函数。基波表示为图中的slope = 1曲线。如果通过幂级数展开逼近系统非线性度，则信号每增加1 dB，二阶IMD幅度将增加2 dB，如图中slope = 2曲线所示。

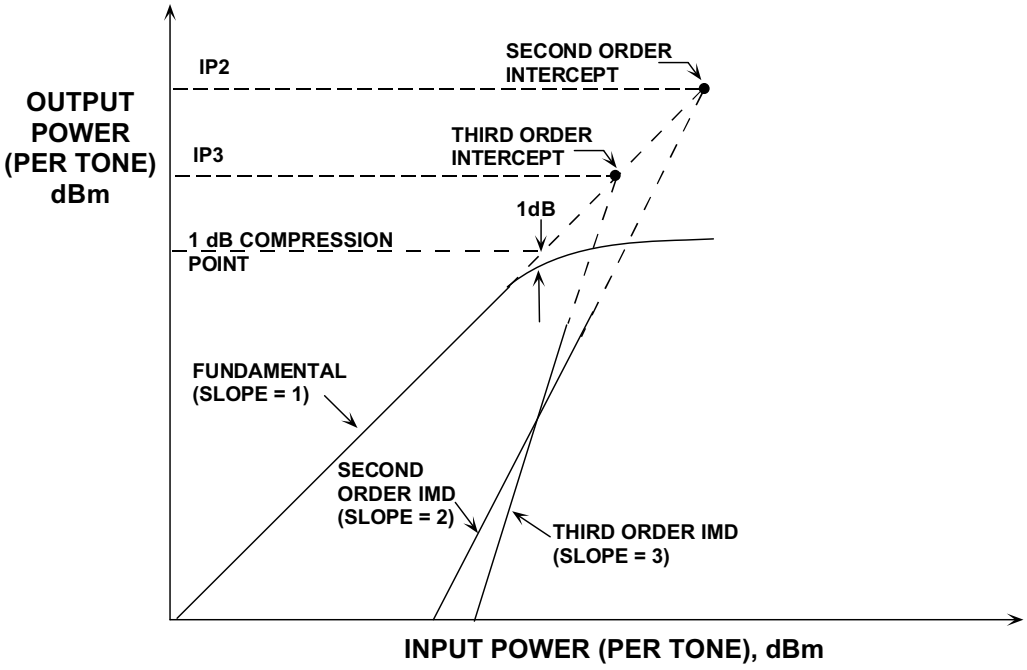

图3：交调截点和1 dB压缩点

类似地，信号每增加1 dB，三阶IMD幅度就增加3 dB，如图中slope = 3曲线所示。在一个低电平双音输入信号和两个数据点下，则可以绘制出二阶和三阶交调失真线，如图3所示(其原理是，一个点和一个斜率定义一条直线)。

然而，输入信号一旦达到某种水平，输出信号就会开始软限制或压缩。这里一个相关参数是1 dB压缩点。这就是输出信号从一个理想的输入/输出传递函数压缩1 dB的点。在图3中，该点处于理想斜率= 1线变成虚线与实际响应表现出压缩迹象(实线)之间的区域中。

然而，二阶和三阶交调截线都可以延长，与理想输出信号线的延长线(虚线)相交。这些交点分别称为二阶和三阶交调截点，表示为IP2和IP3。这些功率电平值通常以传导至一个匹配负载(通常但不一定为50 ?)的器件输出功率为基准，表示为dBm。

应当注意，IP2、IP3和1 dB压缩点都是频率的函数，不出所料，频率越高，失真越严重。

对于给定的频率，在已知三阶交调截点的情况下，可以计算出三阶IMD积的近似电平值(为输出信号电平的函数)。下面的图4所示三阶交调值(典型宽带低失真放大器)为频率的函数。

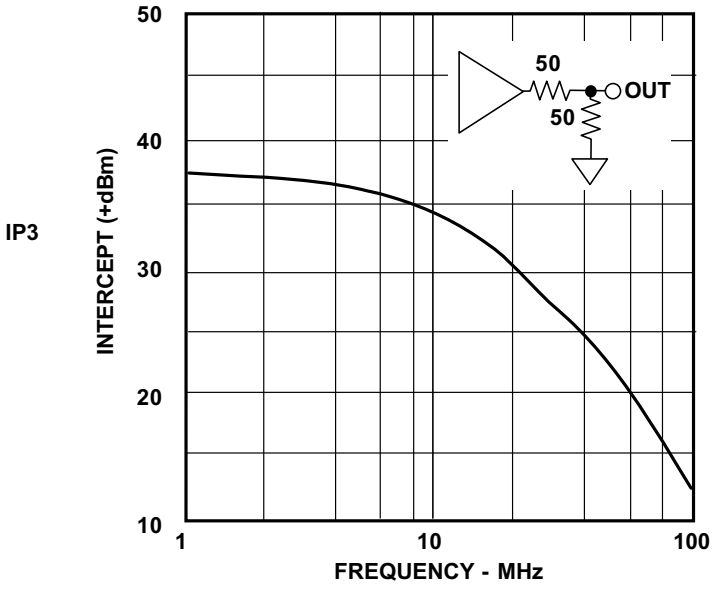

图4：低失真放大器的三阶交调截点(IP3)与频率的关系

设运算放大器的输出信号为5 MHz，峰峰值电压为2 V，负载为100 Ω(50 Ω源和负载端接)。因此，进入50 Ω负载的电压为1 V峰峰值，相当于+4 dBm。从图4中可见，三阶交调截点在5 MHz时的值为36 dBm。+36 dBm与+4 dBm之差为32 dB。然后将该值乘以2，结果得到64 dB(即三阶交调积的值，折合到单音中的功率)。因此，交调积应为–64 dBc(低于载波频率的dB值)，或者为–60 dBm的输出功率水平。

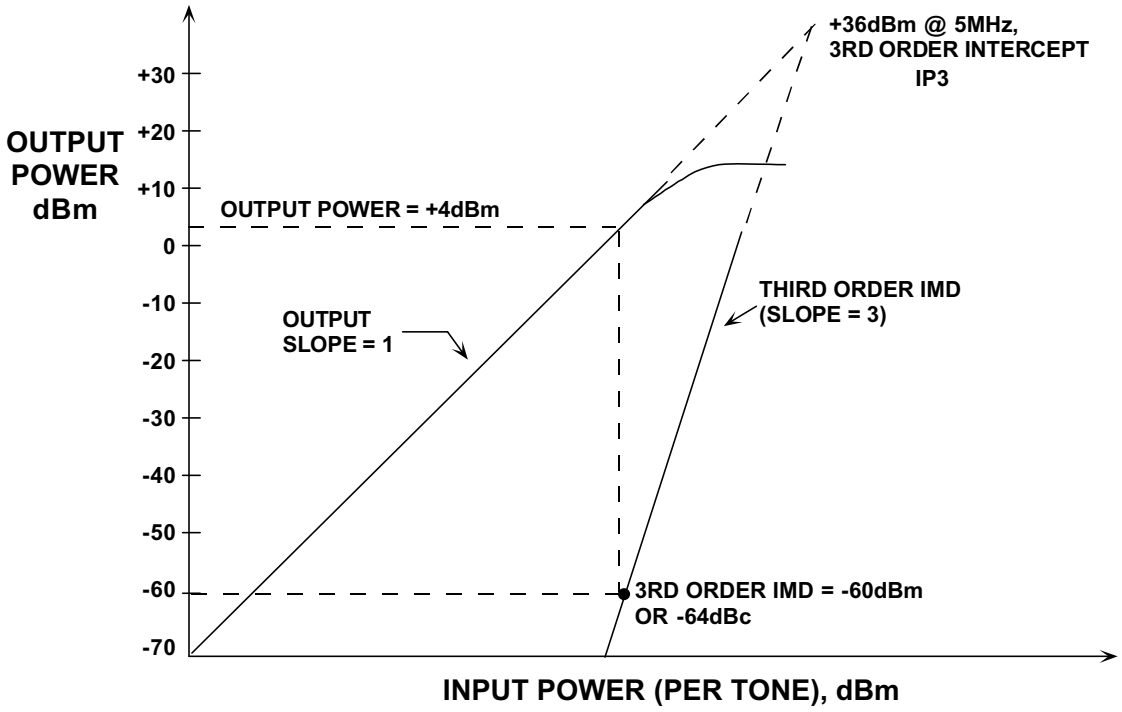

图5：通过IP3计算三阶IMD积的幅度

图5给出了本例所用的图形分析结果。运用IP2数据，可以对二阶交调积进行类似分析。

无杂散动态范围(SFDR)

通信系统中常见的另一种规格是无杂散动态范围(SFDR)。下面的图6所示为该规格的两个变体。单音SFDR(左)为信号(或载波)与目标带宽中最差杂散之间的比值。该杂散可能与信号谐波相关，也可能不相关。SFDR可以折合到信号或载波电平(dBc)，或者折合到满量程(dBFS)。

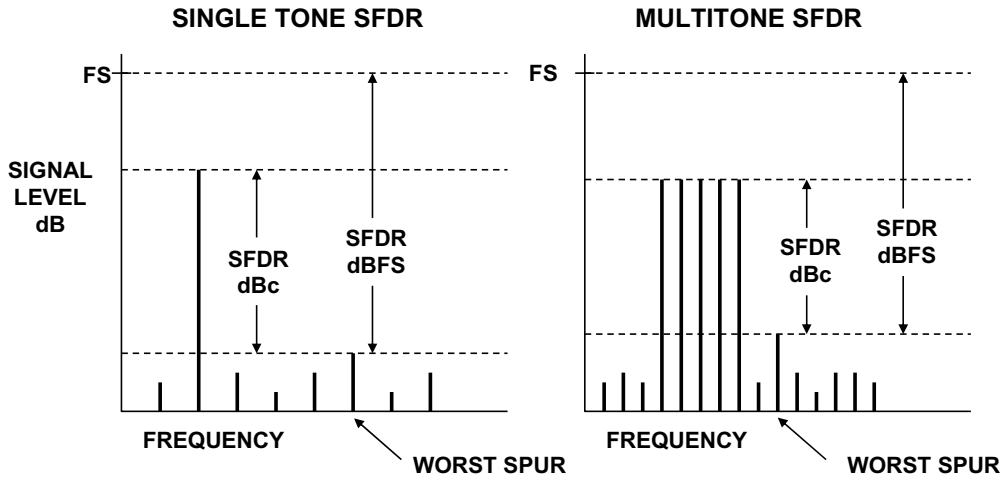

图6：通信系统中的无杂散动态范围(SFDR)

由于多数放大器都是软限幅器，因此更常用的是dBc单位。然而，在拥有用于精确定义满量程的硬限幅器的系统中(如ADC)，可能同时使用dBc和dBFS。需要了解的是，二者描述的都是最差情况下的杂散幅度。SFDR也可针对双音或多音(右)测定，由此模拟含有多个载波和通道的复杂信号。

多音功率比(MTPR)

多音功率比是描述多通道通信系统失真性能的另一种方式。下面的图7所示为一个xDSL系统中的频率分割。上游数据路径中的QAM信号由多个等幅音表示，其间隔频率都是相同的。一个通道被从输入信号中彻底移除(表示为空引脚)，但系统非线性度导致的交调失真会使一个小信号出现在该引脚上。

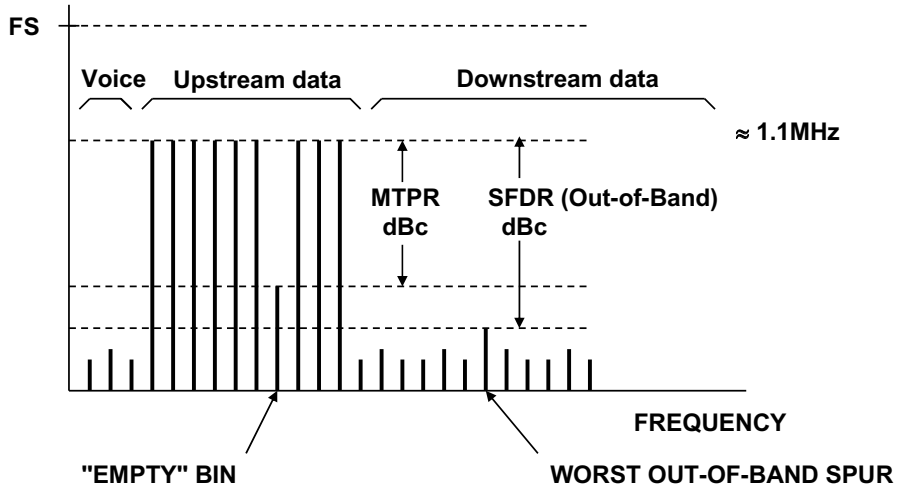

图7：xDSL应用中的多音功率比(MTPR)与带外SFDR的关系

音幅度与空引脚中的无用信号的幅度之间的比值即是多音功率比(MTPR)。同样重要的是，多音信号(模拟多个通道)交调积的幅度不得干扰语音频带中的信号，也不得干扰下游数据频带中的信号。因此，这些频带中产生的最差杂散的幅度与多音信号的幅度之间的比值被定义为带外SFDR。

运算放大器失真与噪声对电路配置的依赖性

本指南中讨论的所有运算放大器失真规格都高度依赖于运算放大器的配置(反相或同相)、增益、电源电压、输出电压摆幅、输出加载和输出频率。由于存在这些依赖关系，因此，运算放大器的失真和噪声规格必须包括确切的电路测试配置和条件。

由于条件存在许多的组合可能，因此，运算放大器数据手册中的规格表一般都含有最常见条件下的失真规格。针对其他条件的典型曲线一般包含在数据手册的其余部分。图8所示为AD8044高速运算放大器的这样一条曲线。这类曲线所表示的数据可能有些难以理解，因为同一图形中还显示了大量变量。

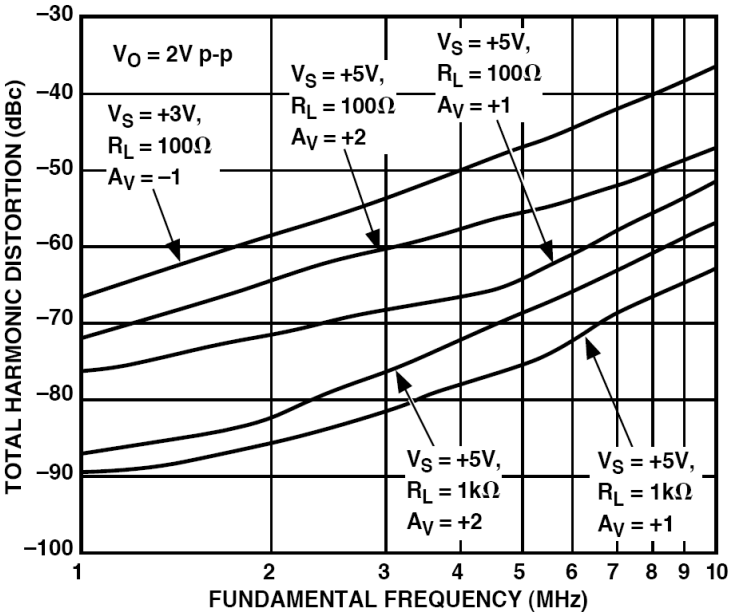

图8：AD8044运算放大器的

摘要

运算放大器的失真可以归纳如下。在多数情况下，运算放大器失真会随着以下条件而恶化：

- 输出信号摆幅的增加
- 输出频率的增加
- 电源电压的下降
- 输出负载的增加(较高的输出电流)
- 闭环增益的增加

参考文献

1. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN:0-915550-28-1.另见*Linear Circuit Design Handbook*, Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10:0750687037, ISBN-13:978-0750687034。Chapter 1.

2. Walter G. Jung, *Op Amp Applications*, Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, 另见*Op Amp Applications Handbook*, Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5.Chapter 1.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.