

## ADC需要考虑的交调失真因素

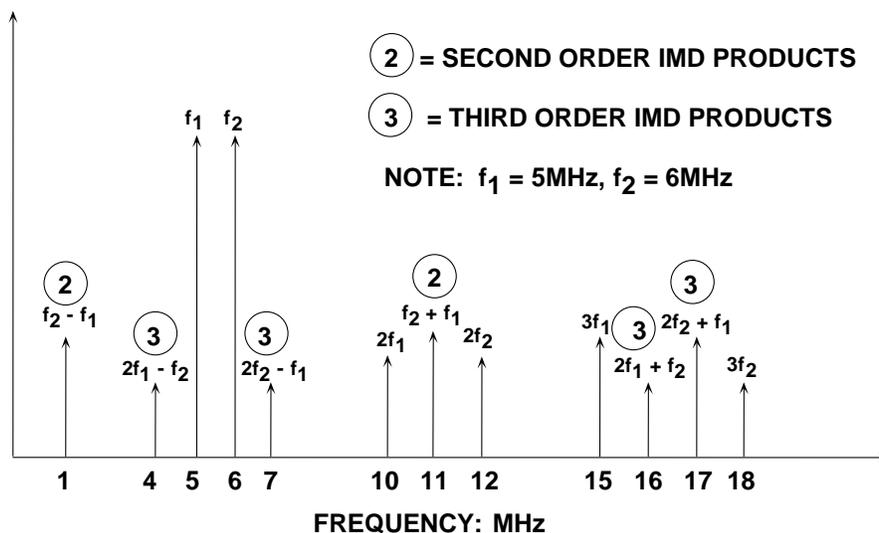
作者: Walt Kester

### 简介

交调失真(IMD)是用于衡量放大器、增益模块、混频器和其他射频元件线性度的一项常用指标。二阶和三阶交调截点(IP2和IP3)是这些规格参数的品质因素,以其为基础可以计算不同信号幅度下的失真积。虽然射频工程师们非常熟悉这些规格参数,但当将其用于ADC时往往会产生一些困惑。本教程首先在ADC的框架下对交调失真进行定义,然后指出将IP2和IP3的定义应用于ADC时必须采取的一些预防措施。

### 双音交调失真(IMD)

测量双音交调失真时,要将两个频谱纯净的正弦波在频率 $f_1$ 和 $f_2$ 下应用于ADC,这两个频率一般距离相对较近。将每个音的幅度设为比满量程低,数值略微超过6 dB即可,以便两个音相位增加时,ADC不会出现削波。二阶和三阶积的位置如图1所示。请注意,二阶积处于数字滤波器可以消除的频率位置。然而,三阶积 $2f_2 - f_1$ 和 $2f_1 - f_2$ 接近原始信号,过滤的难度更大。除非另有说明,双音交调失真指这些“近距”三阶积。交调失真积值一般以dBc为单位,相对于两个原始音之一的值,而不是两者之和。



**图1: 二阶和三阶交调积**  
**其中,  $f_1 = 5\text{ MHz}$ ,  $f_2 = 6\text{ MHz}$**

然而，请注意，如果两个音接近 $f_s/4$ ，则基波的混叠三次谐波可能使 $2f_2 - f_1$ 和 $2f_1 - f_2$ 真实积的识别变得异常困难。其原因在于， $f_s/4$ 的三次谐波为 $3f_s/4$ ，而混叠出现在 $f_s - 3f_s/4 = f_s/4$ 频率处。类似地，如果两个音接近 $f_s/3$ ，则混叠二次谐波可能会干扰测量。原理同上， $f_s/3$ 的二次谐波为 $2f_s/3$ ，混叠出现在 $f_s - 2f_s/3 = f_s/3$ 处。

## 二阶和三阶交调截点(IP2, IP3)、1-dB 压缩点

三阶交调失真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。三阶交调失真积在有大信号的情况下可能掩盖住小信号。

在放大器、混频器和其他射频元件中，一般以三阶交调截点(IP3)来表示三阶交调失真积，如图2所示。两个频谱纯洁的音被应用于该系统。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 (IMD2)幅度将增加2 dB，如图中 $slope = 2$ 曲线所示。

类似地，信号每增加1 dB，三阶IMD (IMD3)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2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2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  $\Omega$ )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)。

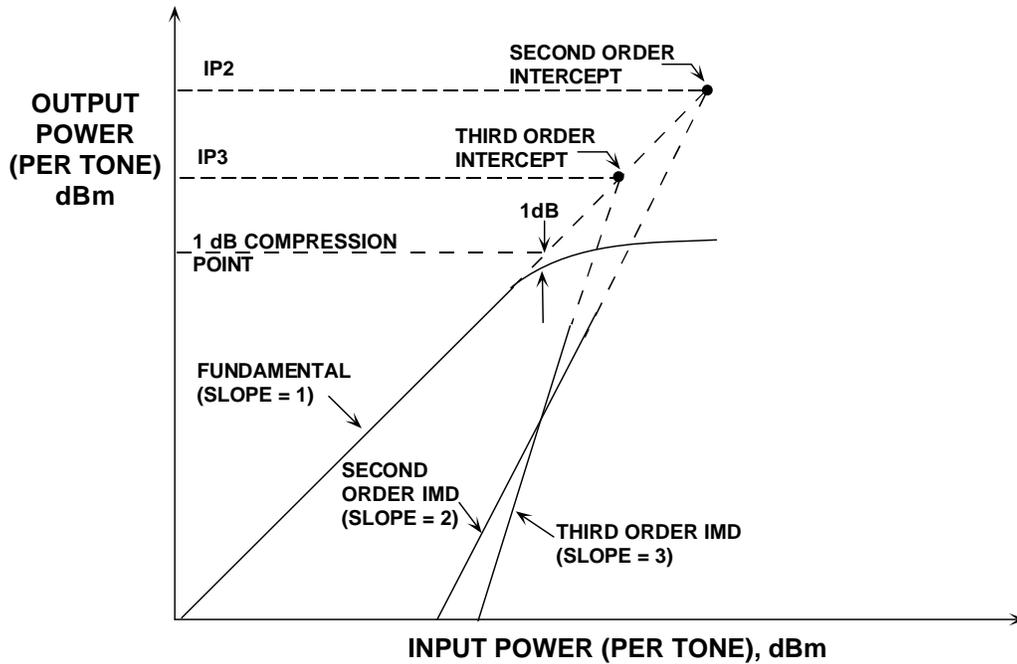


图2: 交调截点的定义与放大器的1 dB压缩

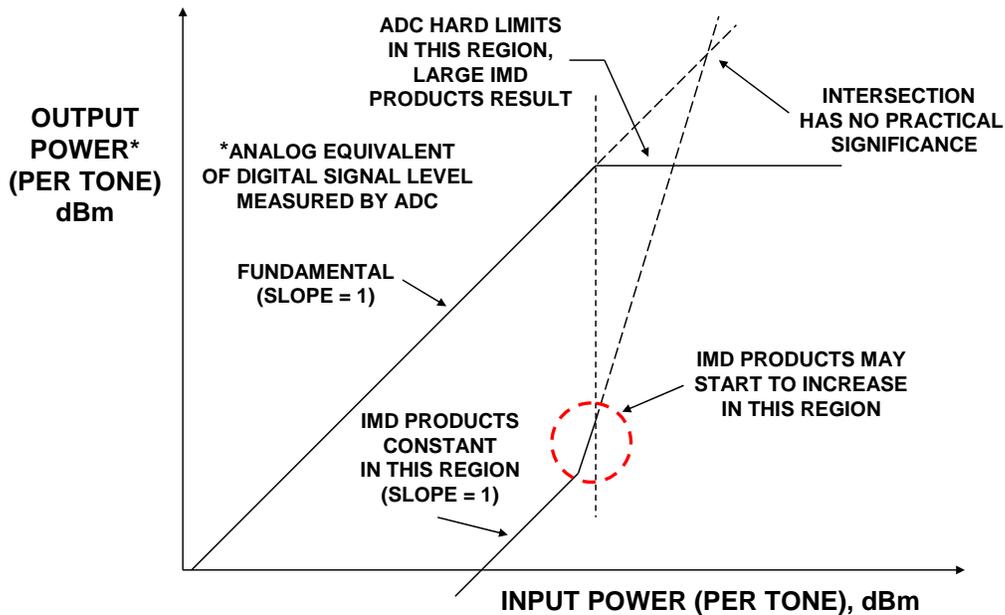


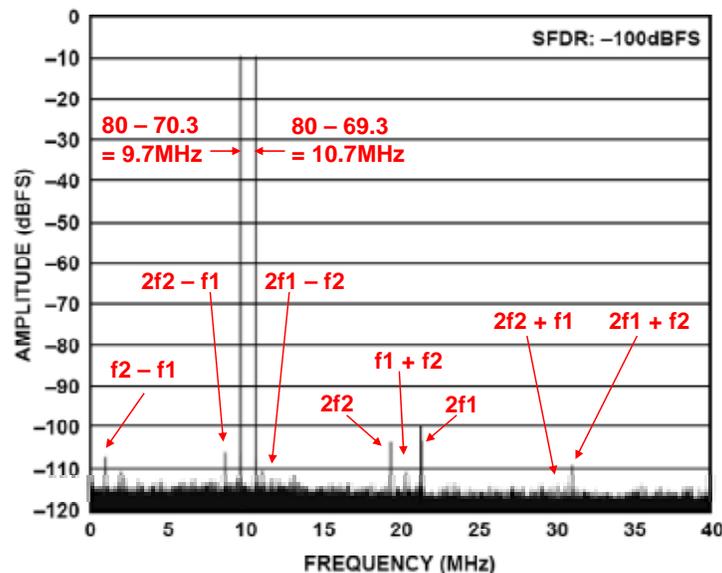
图3: 数据转换器的交调截点无实用价值

二阶和三阶交调截点的概念对ADC无效，因为，在这种情况下，失真积的变化不可预测（作为信号幅度的函数）。ADC并不是逐渐开始压缩接近满量程的信号（不存在1 dB压缩点）；一旦信号超过ADC输入范围，ADC就会充当硬限幅器，从而因削波而突然产生数量极大的失真。另一方面，对于远远低于满量程的信号，失真底保持相对稳定，不受信号电平影响，如图3所示。

图3中的IMD曲线分为三个区域。对于低电平输入信号，IMD积保持相对稳定，不受信号电平的影响。这就意味着，当输入信号增加1 dB时，该信号与IMD电平的比值也会增加1 dB。当输入信号处于ADC满量程范围的几dB之内时，IMD可能开始增加(但在设计优良的ADC中可能不会如此)。出现这种现象的确切电平取决于具体的ADC——有些ADC在其满量程输入范围内，其IMD积不会显著增大，但多数ADC会。当输入信号继续增加并超过满量程范围时，ADC应充当理想的限幅器，IMD积将变得非常大。出于对此类原因的考虑，ADC并无二阶和三阶IMD交调截点额定值。需要注意的是，DAC实际上存在同样的情况。在两种情况下，单音或多音SFDR(无杂散动态范围)额定值是广受认可的数据转换器失真性能的衡量指标。

### 多音无杂散动态范围

通信应用通常需要测量双音和多音SFDR。信号音数量越多，越接近蜂窝电话系统(如AMPS或GSM)的宽带频谱。图4所示为AD9444 14位80-MSPS ADC的双音交调性能。两个输入音的频率分别为69.3 MHz和70.3 MHz，位于第二奈奎斯特区。



**图4: AD9444 14位80 MSPS ADC双音FFT**  
(输入音频率:  $f_1 = 69.3$  MHz和 $f_2 = 70.3$  MHz)

因此，混叠音出现在9.7 MHz和10.7 MHz，位于第一奈奎斯特区。图4同时显示了所有混叠IMD积的位置。高SFDR会增强接收器在有大大信号时捕获小信号的能力，并防止小信号被大信号的交调积掩盖。图5所示为AD9444双音SFDR(为输入信号幅度的函数)，其中，两个音的输入频率相同。

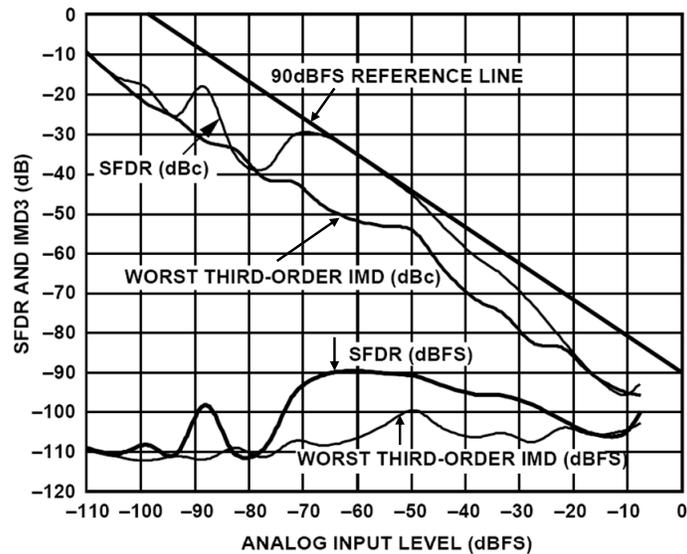


图5：双音SFDR和最差IMD3积与AD9444 14位80 MSPS ADC输入幅度的关系

## 总结

交调失真(IMD2、IMD3)和交调截点(IP2、IP3)是混频器、LNA、增益模块、放大器等射频元件的常用规格参数。通过幂级数展开来模拟这些器件的非线性度，可以基于交调截点IP2和IP3来预测各种信号幅度的失真电平。与放大器和混频器不同，ADC失真(尤其是低电平信号)并不适用简单的幂级数展开模型，因此，交调截点IP2和IP3无法用于预测失真性能。另外，当输入信号超过满量程范围时，ADC将充当理想的限幅器，而放大器和混频器一般充当软限幅器。

尽管存在这些差异，但在通信应用中，了解ADC的双音IMD性能至关重要。较好的数据手册会针对多种输入信号频率和幅度提供这种数据。除此以外，ADIsimADC™ 程序可用于评估各种ADC在系统应用要求的具体频率和幅度下的性能。ADIsimADC程序充当虚拟评估板的作用，可以从ADI网站下载，同时还可下载针对IF采样ADC的最新模型。该程序基于FFT引擎，可以精确地计算出单音和双音输入信号的SNR、SFDR和IMD值。

## 参考文献

1. Robert A. Witte, "Distortion Measurements Using a Spectrum Analyzer," *RF Design*, September, 1992, pp. 75-84.
2. Walt Kester, "[Confused About Amplifier Distortion Specs?](#)", *Ask The Applications Engineer, A Selection from Analog Dialogue, 30<sup>th</sup> Issue Reader Bonus*, Analog Devices, 1997, pp. 23-25.
3. Walt Kester, *Analog-Digital Conversion*, Analog Devices, 2004, ISBN 0-916550-27-3, Chapter 2. Also available as [The Data Conversion Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0, Chapter 2.
4. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [Linear Circuit Design Handbook](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034, Chapter 1.
5. Walter G. Jung, [Op Amp Applications](#), Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, Also available as [Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 6.

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.