

## 高速可变增益放大器(VGA)

[高频可变增益放大器\(VGA\)的全面而详细参数](#)不仅包括传统运算放大器的交流参数(带宽、压摆率、建立时间),而且还应说明通信专用参数。这些参数包括谐波失真性能、无杂散动态范围(SFDR)、交调失真、交调截点(IP<sub>2</sub>、IP<sub>3</sub>)、噪声和噪声系数(NF)。图1列出了这些参数。

- ◆ **Noise**
  - Noise referred to output (RTO)
  - Noise referred to input (RTI)
- ◆ **Distortion**
  - Second and third order intercept points (IP<sub>2</sub>, IP<sub>3</sub>)
  - Spurious free dynamic range (SFDR)
  - Harmonic distortion
    - ◆ Single-tone
    - ◆ Multi-tone
    - ◆ Out-of-band
  - Multitone Power Ratio (MTPR)
  - Noise Factor (NF), Noise Figure (NF)

**图1: 通信系统中的动态范围参数**

本指南将重点讨论适合通信系统的VGA。VGA是否适合通信系统取决于这些参数是否满足系统性能。文中将探讨模拟控制式和数字控制式VGA。

### 自动增益控制(AGC)系统中的可变增益放大器(VGA)

宽带、低失真可变增益放大器在通信系统中应用非常广泛。例如,无线电接收机中的自动增益控制(AGC),如图2所示。通常,由于传播路径存在差异,接收到的能量表现出很大的动态范围,需要在接收机内进行动态范围压缩。

这种情况下，所需信息蕴含在调制包络中(无论采用何种调制模式)，而不是载波的绝对幅度。例如，1MHz的载波被调制到1kHz上，调制深度为30%，不管接收到的载波电平是0 dBm还是-120 dBm，传递的信息都是相同的。存在较大输入变化时，通常会在接收机内利用某种类型的自动增益控制(AGC)功能，将载波幅度调整到某个归一化参考水平。AGC电路用作动态范围压缩器，能够在多个载波周期的间隔内响应某个信号衡量指标(通常为幅度平均值)。

因此，它们需要时间来根据接收信号电平差异做出调整。利用峰值检波方法可以缩短信号电平突然提高所需的响应时间，但稳定性会受到一定损害，因为瞬态噪声尖峰现在可以激活AGC检测电路。非线性滤波和“延迟AGC”概念对于优化AGC系统很有用。实践中有很多折衷考虑。

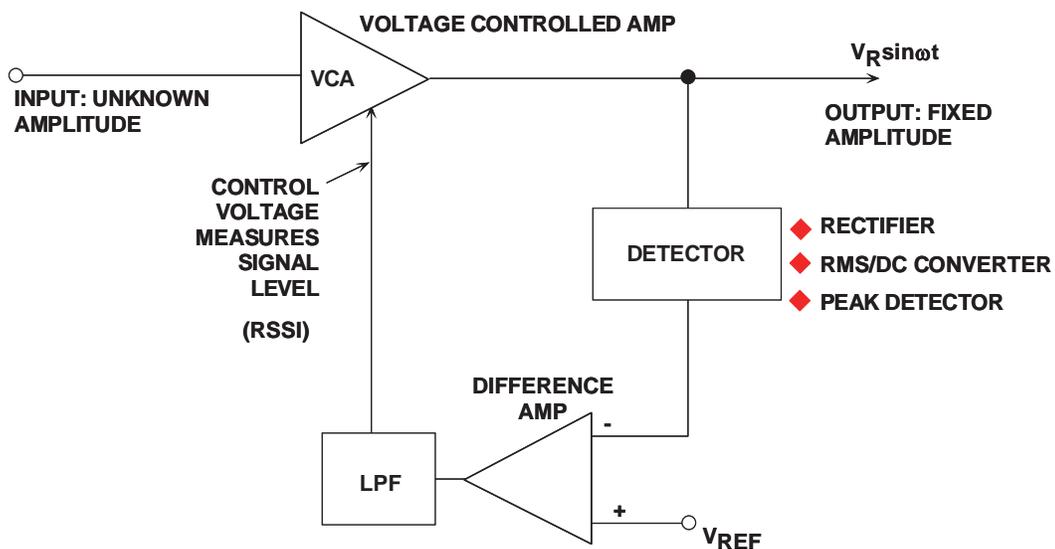


图2：典型的自动增益控制(AGC)系统

值得注意的是，一个AGC环路实际上有两路输出。当然，较为明显的输出是幅度稳定信号。不太明显的输出则是VCA的控制电压。实际上，此电压衡量输入信号的幅度平均值。如果系统经过精确调整，则控制电压可用于衡量输入信号，有时也称为“接收信号强度指示(RSSI)”。给定适用的精密VCA增益控制法则，利用后面这点便可以实施针对输入信号电平进行校准的接收系统。

压控可变增益放大器

ADL5391等模拟乘法器可以用作可变增益放大器，如下面图3所示。控制电压施加于其中一路输入，信号则施加于另一路输入。采用这种配置时，增益与控制电压成正比。

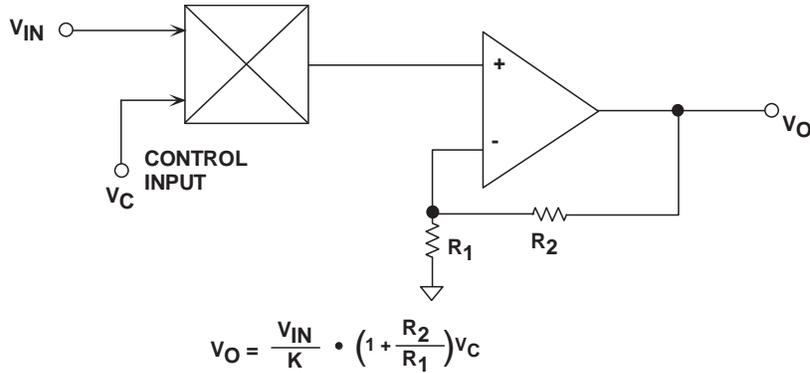


图3：将乘法器用作压控可变增益放大器

对于大多数采用模拟乘法器构建的VCA，其增益与以V为单位的控制电压成线性关系，而且往往存在噪声。但是，所需的VCA能够将宽增益范围与恒定带宽和相位、低噪声与大信号处理能力以及低失真与低功耗相结合，同时提供精确、稳定的线性dB增益。X-AMP™系列可以利用一个独特而精致的解决方案(针对指数放大器)实现这些非常严苛且相互冲突的目标。概念非常简单：固定增益放大器后接通过特殊方式利用电压来控制其衰减的无源宽带衰减器(见图4)。

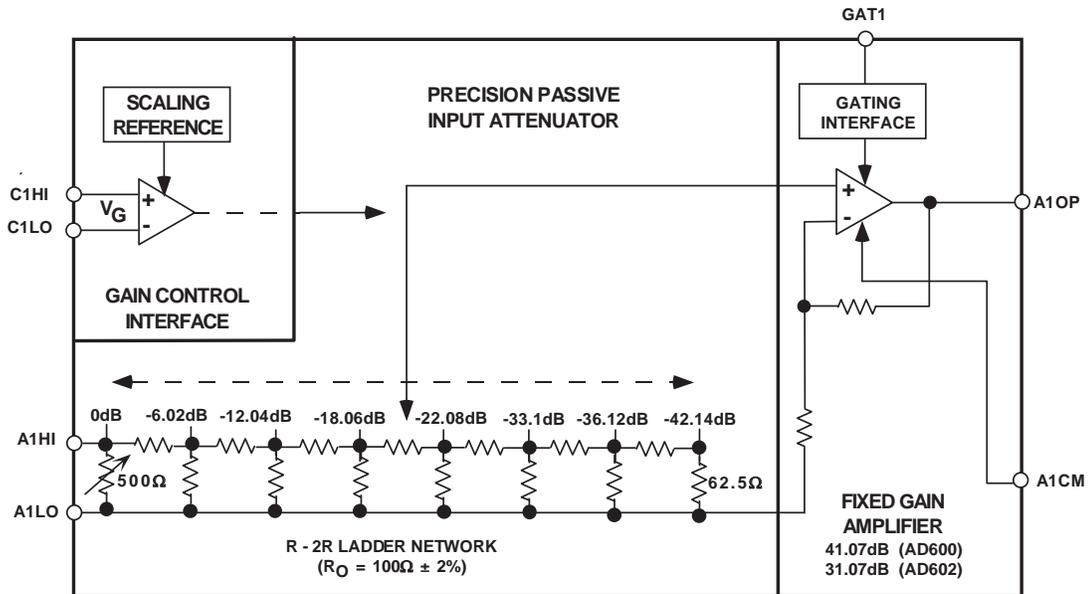


图4：X-Amp框图

该放大器具有优秀的低噪声性能，负反馈则用于精确定义其较高增益(约30至40 dB)并将失真降至最低。由于该放大器的增益是固定的，因此其交流和瞬变响应特性也是不变的，包括失真和群延迟；由于其增益较高，因此其输入永远不会由超过数毫伏的电压驱动。因此，该器件始终工作在其小信号响应范围内。

衰减器是一个7级(8抽头)R-2R梯形网络。所有相邻抽头之间的电压比都正好为2，即6.02 dB。这为实现精密线性dB特性奠定了基础。总体衰减为42.14 dB。如图所示，该放大器的输入可以连接到这些抽头中的任意一个，甚至可以在这些抽头之间进行插值，而且偏差很小，只有约±0.2 dB。总增益的变化范围是固定增益(最大值)到比最大值小42.14 dB的值。例如，在AD600中，固定增益为41.07 dB(电压增益为113)；使用此选项时，整个增益范围为-1.07 dB至+41.07 dB。该增益与控制电压之间的关系为 $G_{dB} = 32V_G + 20$ ，其中 $V_G$ 的单位为伏特(V)。

$V_G = 0$ 时的增益经过激光调整至绝对精度±0.2 dB。增益调整比例由片上带隙基准电压源(由两个通道共享)决定，该电压源经过激光调整以获得高精度和低温度系数。图5所示为AD600和AD602的增益与差分控制电压之间的关系。

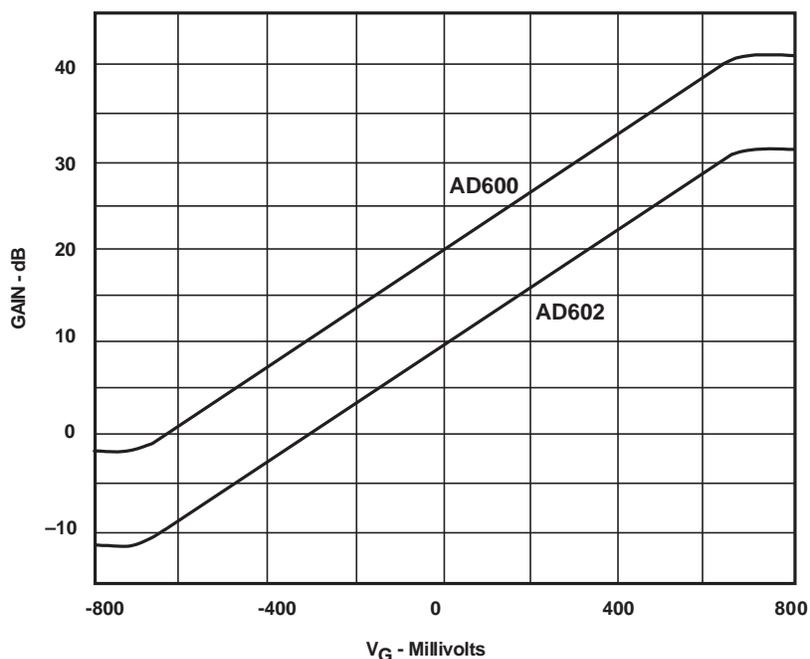


图5: X-Amp传递函数

为了了解X-AMP™系列的工作方式，请考虑图6所示的示意图。请注意，八个抽头各自均连接到八个双极性差分对(用作由电流控制的跨导( $g_m$ )级)之一的一个输入端；所有这些 $g_m$ 级的另一个输入端则连接到放大器用于决定增益的反馈网络 $R_{F1}/R_{F2}$ 。当发射极偏置电流 $I_E$ 被送至8个晶体管对之一(此处未显示具体方式)时，它成为完整放大器的输入级。

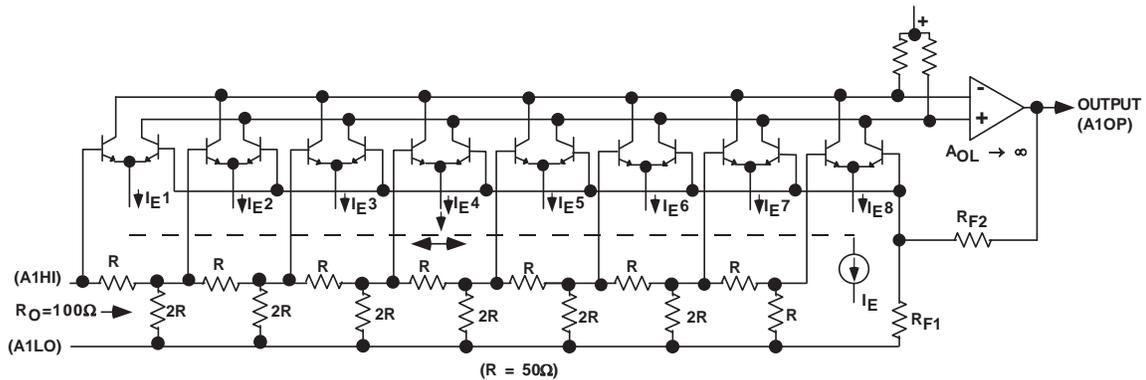


图6: X-Amp原理示意图

当 $I_E$ 连接至左侧的对时，信号输入直接连接到放大器，从而产生最大增益。凭借良好的开环设计并辅以负反馈，使得即使在较高频率条件下，失真也非常低。如果 $I_E$ 现在被突然切换至第二对，那么总增益会下降正好6.02 dB，而由于只有一个 $g_m$ 级保持有效，因此失真仍旧会很低。

在现实中，偏置电流会“逐渐”从第一对传递到第二对。当 $I_E$ 在两个 $g_m$ 级之间均衡分配时，这两个级都激活；当运算放大器中的两个输入级争抢环路控制(其中一个获得完整信号，而另一个获得刚好一半信号)时，就会出现这种情况。

分析表明，有效增益会减少 $20 \log 1.5$ (即3.52 dB)，而不是大家首先预想的3 dB。在整个范围内均衡分配时，该误差相当于 $\pm 0.25$  dB的增益纹波；不过，插值电路实际上会生成偏置电流的高斯分布，有些 $I_E$ 始终在相邻级中流动。这使得增益函数更加平滑，并真正地减少纹波。随着 $I_E$ 逐渐向右移动，总增益会逐渐下降。

X-AMP™折合到输入端的总噪声为 $1.4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，仅略大于 $100 \Omega$ 电阻的热噪声( $25^\circ\text{C}$ 时为 $1.29 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ )；折合到输入端的噪声是恒定的，而不受衰减器设置影响，因此输出噪声始终是恒定的且不受增益影响。

	BANDWIDTH	DISTORTION	NOISE	INPUT Z	SUPPLY
AD600/602	35MHz	-60dBc @ 10MHz	1.4nV/√Hz	100Ω	±5V
AD603	90MHz	-60dBc @ 10MHz	1.3nV/√Hz	100Ω	±5V
AD604	40MHz	-43dBc @ 10MHz	0.8nV/√Hz	300kΩ	±5V
AD605	40MHz	-51dBc @ 10MHz	1.8nV/√Hz	200Ω	+5V
AD8367	500MHz	IP3 = +33dBm @ 140MHz	NF = 7.5dB @ 140MHz	200Ω	+2.7 to +5.5V
AD8368	800MHz	IP3 = +33dBm @ 140MHz	NF = 9.5dB @ 140MHz	50Ω	+4.5 to +5.5V

图7总结了很多X-AMP系列的特性。

### 数字控制式VGA

在某些情况下，以数字方式控制信号电平可能会大有好处。上行电缆调制解调器驱动器便是一例，如AD8325。

由于数据速率远高于标准拨号连接，有线调制解调器越来越受欢迎。除接收数据(下行)之外，有线调制解调器还能发射数据(上行)。这就要求使用低失真的数字控制式可变增益放大器，且该放大器能够以1 V rms的标称电平(+11.2 dBm或60 dBmV)驱动75 Ω同轴电缆。AD8325就是适合此应用的有线电视(CATV)上行线路驱动器系列的一款产品。AD8325的增益由一个8位串行字控制，该字在59.45 dB范围内决定所需增益，进而产生0.7526 dB/LSB的增益变化。AD8325框图如下面图8所示。

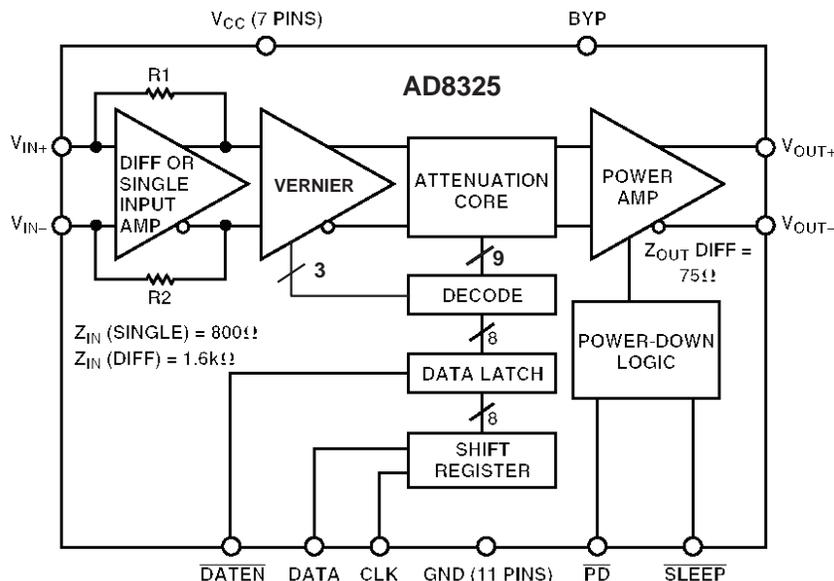


图8: AD8325 CATV数字控制式可变增益放大器

AD8325具有一个可变衰减器内核，以数字方式控制衰减，范围为0 dB至-59.45 dB。输入缓冲器的增益大约为+30 dB，因此得到的总增益范围为-29.45 dB至+30.0 dB。在上电模式下，AD8325包括四个模拟功能。输入放大器(前置放大器)可以采用单端或差分配置。8位控制字解码成一个3位字和一个9位字，前者驱动游标级(精密增益调整)，后者则驱动衰减内核(DAC)。游标级中实现0.7526 dB/LSB分辨率，总衰减约为5.25 dB。在游标级之后，由DAC提供AD8325衰减的批处理(9位或54 dB)。

前置放大器和游标增益模块中的信号为差分形式，以提高PSRR和线性度。差分电流从DAC馈入输出级，后者将这些电流放大到驱动75  $\Omega$ 负载所需的合适电平。

AD8325在上电和关断情况下均可保持恒定的75  $\Omega$ 动态输出阻抗，这是该器件的一项主要性能和成本优势。输出级利用负反馈来实现75  $\Omega$ 差分动态输出阻抗。这样便无需使用外部75  $\Omega$ 端接电阻，进而产生是标准运算放大器两倍的有效输出电压。

这些特性使得AD8325能够采用+5 V单电源工作并且仍能提供所需的输出功率。在21 MHz带宽、输出电平最高为1 V rms (+11.2 dBm)时，失真性能为-57 dBc。

[AD8370](#)是一款低成本、数字控制、可变增益放大器，可以提供精密增益控制、高IP3和低噪声系数。框图如图9所示。

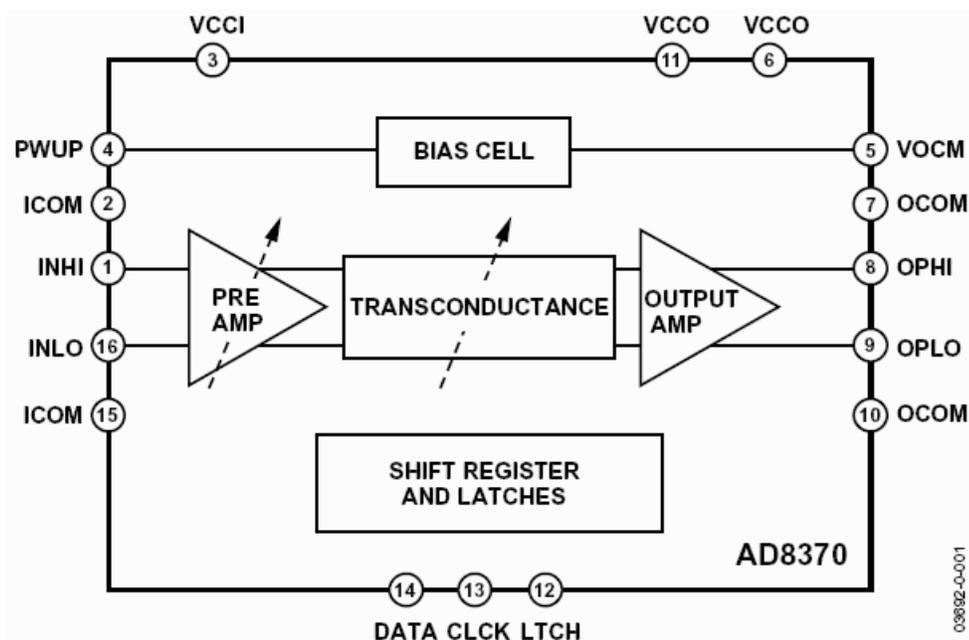
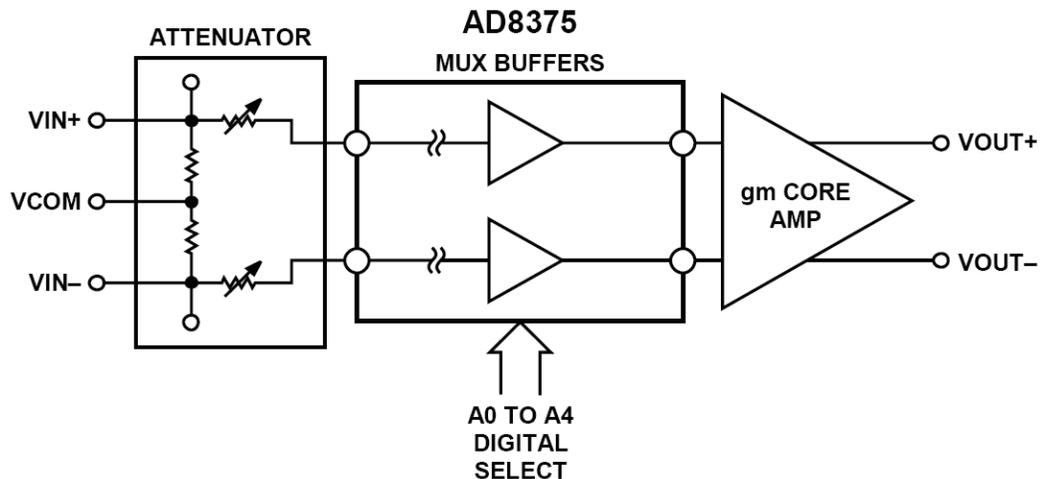


图9: 750MHz数字控制式VGA AD8370

[AD8370](#)具有出色的失真性能和宽带宽。对于宽输入动态范围应用，AD8370能提供以下两种输入范围：高增益模式和低增益模式。一个游标7位跨导(Gm)级能够以优于2 dB的分辨率提供28 dB增益范围，以优于1 dB的分辨率提供22 dB的增益范围。第二种增益范围比第一种要高17 dB，可选择用于改善噪声性能。AD8370的电源由PWUP引脚的逻辑电平提供，在关断模式下，其功耗小于4 mA，可以提供出色的输入-输出隔离。关断模式下工作时，增益设置保持不变。

AD8370的增益控制通过一个8位串行增益控制字实现。MSB在两个增益范围之间进行选择，余下的7位则以精确线性增益步进调整总增益。

[AD8375](#)是一款差分可变增益放大器，由一个150  $\Omega$ 数字控制式无源衰减器后接高线性度跨导放大器组成，如图10所示。



**图10：630MHz低失真数字控制式VGA AD8375**

一个5位二进制代码以1 dB步进更改衰减设置，从而使得器件的增益从20 dB(代码0)变为-4 dB(代码24及以上)。最大增益设置下，器件的噪声系数约为8 dB，并会随着增益下降而增加。噪声系数的增加量与增益的减少量相等。在输出端测得的器件线性度是一阶的，且与增益设置无关。增益介于0 dB至20 dB之间时，140 MHz条件下150  $\Omega$ 负载的OIP3约为50 dBm(每个信号音3 dBm)。增益设置为0 dB以下时，则会下降至约45 dBm。

**参考文献**

1. 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 4.
2. 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.