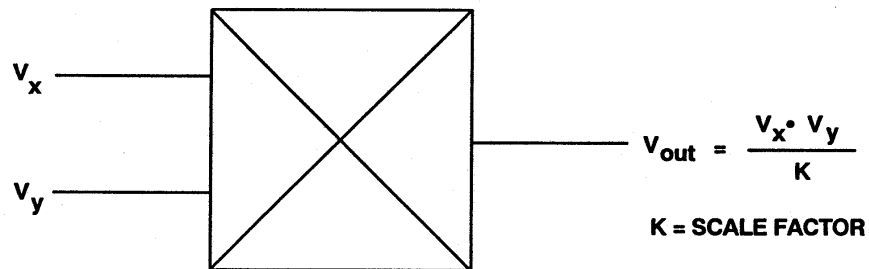


模拟乘法器

模拟乘法器基础知识

模拟乘法器是具有两个输入端口和一个输出端口的一种器件。输出端的信号为两个输入信号之积。如果输入和输出信号均为电压，则传输特性为两个电压之积与一个比例因子K的比值，而K则拥有电压的一个维度(如图1所示)。



Type	V _x	V _y	V _{out}
Single Quadrant	Unipolar	Unipolar	Unipolar
Two Quadrant	Bipolar	Unipolar	Bipolar
Four Quadrant	Bipolar	Bipolar	Bipolar

图1：基础模拟乘法器与乘法器象限的定义

从数学角度来看，乘法是一种“四象限”运算——换言之，两个输入可能为正，也可能为负，输出亦是如此。然而，用于生产电子乘法器的某些电路仅支持单极性信号。如果两个信号都必须是单极性的，结果形成一个“单象限”乘法器，输出同样也会是单极性的。如果其中一个信号为单极性，而其他信号可能为正或负，则乘法器就是一个“二象限”乘法器，输出可能为两个极性之一(因而为“双极性”)。用于产生一象限或二象限乘法器的电路可能比四象限乘法器所需电路要简单，由于许多应用并不需要全四象限乘法，因此，常用的是仅支持一象限或二象限的精密器件。一个示例是AD539，这是一款宽带双通道二象限乘法器，具有一个单极性V_y输入，其相对受限带宽为5 MHz，还有两个双极性V_x输入，每个乘法器各一个，带宽为60 MHz。图2显示的是AD539的框图。

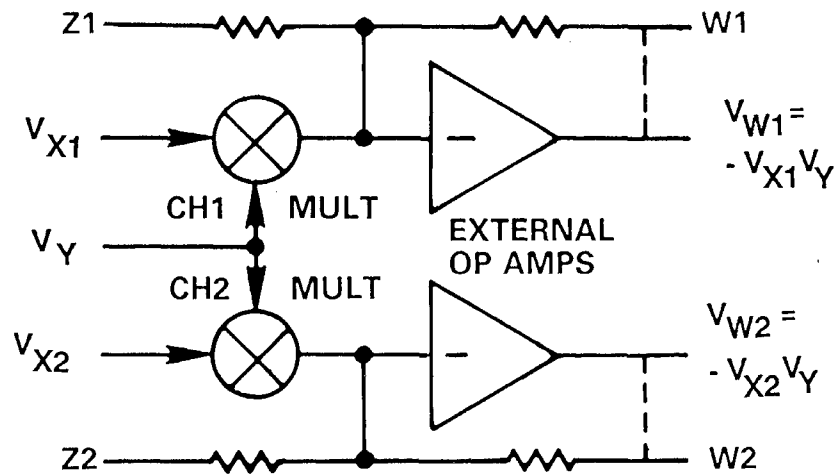


图2: AD539模拟乘法器框图

最简单的电子乘法器采用对数放大器。计算依赖于以下事实：两个数的对数之和的反对数为这两数字之积(如图3所示)。

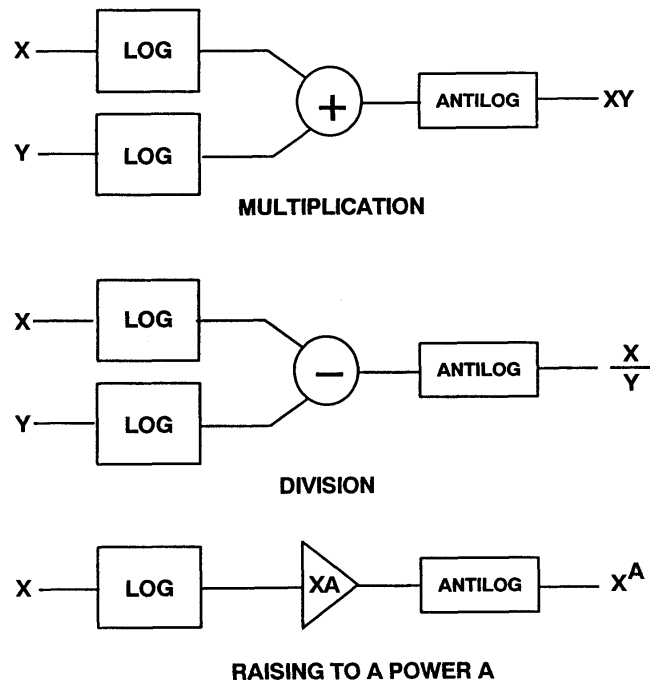


图3: 利用对数放大器实现乘法运算

这类乘法的劣势在于带宽受限且仅支持单象限运算。一种更优秀的乘法器采用的是“吉尔伯特单元”。这种结构由巴里·吉尔伯特(Barrie Gilbert)在上世纪60年代末发明。(见参考文献1和参考文献2)。

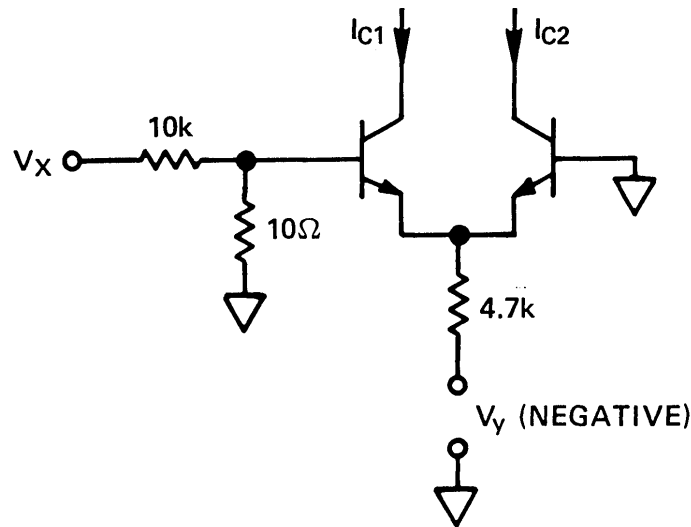
吉尔伯特单元乘法器

硅晶体管的集电极电流与其跨导(增益)之间存在线性关系，跨导的计算公式如下

$$dI_C / dV_{BE} = qI_C / kT, \text{ 其中} \tag{等式 1}$$

I_C = 集电极电流; V_{BE} = 基极-发射极电压; q = 电子电荷(1.60219×10^{-19}); k = 玻尔兹曼常数 (1.38062×10^{-23}); T = 绝对温度。

可以利用这种关系用一对长尾硅晶体管来构建乘法器，如图4所示。



$$I_{c1} - I_{c2} = \Delta I_C = \frac{q}{kT} \left(\frac{V_y + V_{be}}{4.7 \times 10^3} \right) \left(\frac{10}{10,010} \right) V_x$$

$$= 8.3 \times 10^{-6} (V_y + 0.6) V_x \text{ @ } 25^\circ\text{C}$$

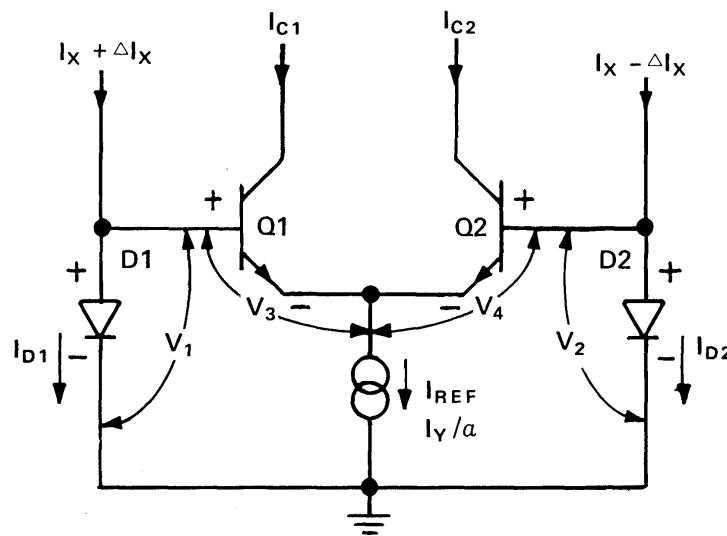
图4: 基础跨导乘法器

这是一种性能很差的乘法器，因为(1) Y输入被随 V_y 非线性变化的 V_{BE} 抵消；(2) 由于 I_C 与 V_{BE} 之间存在指数关系，因而X输入呈现非线性；(3) 比例因子随温度而变化。

吉尔伯特意识到，这种电路可以线性化并实现温度稳定性，其方式是采用电流而非电压，同时要利用晶体管的对数 I_C/V_{BE} 特性，如图5所示。吉尔伯特单元的X输入表现为差分电流形式，Y输入则为单极性电流。差分X电流在两个由二极管连接的晶体管中流动，对数电压对指数 V_{BE}/I_C 关系进行补偿。另外， q/kT 比例因子取消。结果使吉尔伯特单元获得以下线性传递函数

$$\Delta I_C = \frac{\Delta I_X I_Y}{I_X} \quad \text{等式 2}$$

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$$



$$\Delta I_C = \frac{\Delta I_X I_Y}{I_X}$$

图5：基础跨导乘法器

如此，吉尔伯特单元有三个不便之处：(1) 其X输入为差分电流；(2) 其输出为差分电流；(3) 其Y输入为单极性电流——因此吉尔伯特单元只是一个二象限乘法器。

通过交叉耦合两个这样的单元并使用两个电压-电流转换器(如图6所示)，我们可以把基础架构转换成一种带电压输入的四象限器件，如AD534。在中低频率下，可以用一个减法器放大器把输出端的差分电流转换成电压。鉴于其电压输出架构，AD534的带宽仅为1 MHz左右，而后续版本AD734的带宽则为10 MHz。

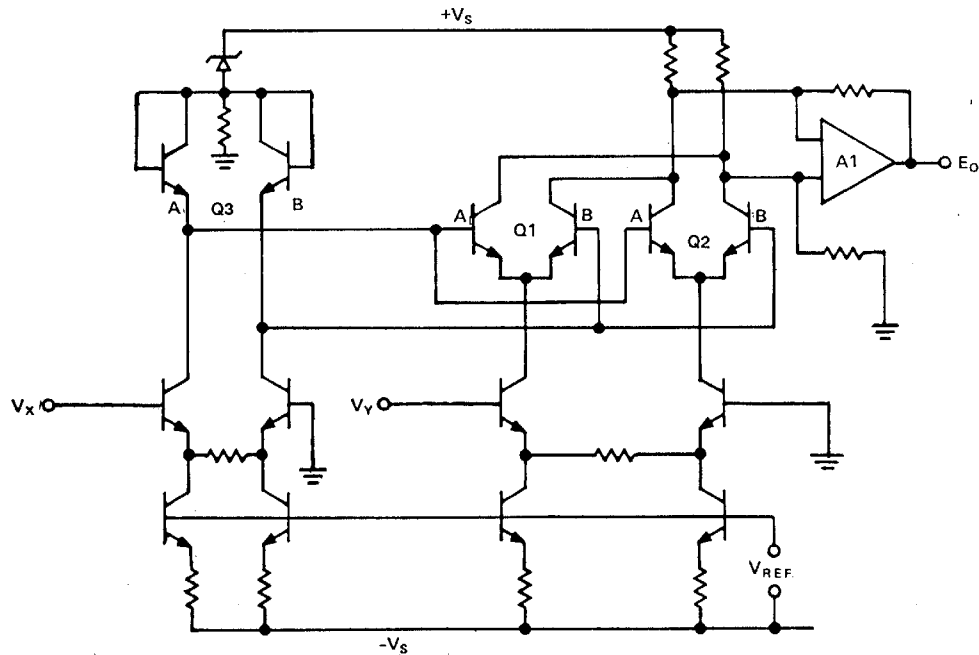


图6: [AD534](#): 一款四象限跨导线性乘法器

在图6中，Q1A和Q1B以及Q2A和Q2B形成两个吉尔伯特单元的两对核心长尾对，而Q3A和Q3B则为两个单元的线性化晶体管。还有一个运算放大器充当着差分电流-单端电压转换器，但对更高速度的应用来说，Q1和Q2的交叉耦合集电极会形成一种差分开路集电极电流输出(如[AD834](#) 500 MHz乘法器)。

跨导线性乘法器依赖于多个晶体管和电流的匹配。在单芯片中，可以轻松实现这一点。然而，即使是最好的IC工艺也存在一些残余误差，这些误差在此类乘法器中表现为四个直流误差项(参见)。X输入上的失调电压表现为来自Y输入的馈通。Y输入上的失调电压表现为来自X输入的馈通。Z输入上的失调电压会导致输出信号的偏置，而电阻失配则会导致增益误差。

在早期的吉尔伯特单元乘法器中，这些误差必须通过芯片外部的电阻和电位计调整，不太方便。利用激光调整芯片上的SiCr薄膜电阻的现代模拟工艺，可以在制造过程中调整这些误差，从而使器件最终具有极高的精度。内部调整还具有其他优势，因为它不会降低高频性能，外部微调就可能存在这种问题。

由于跨导线性乘法器的内部结构实质上具有差分性质，因此，其输入通常也具有差分性(毕竟，如果需要单端输入，使一个输入接地并不难)。这样不但便于抑制共模信号，同时也允许实现更复杂的计算。[AD534](#)(如上面的图6所示)是基于吉尔伯特单元的一种四象限乘法器的经典示例。

其在乘法器模式下的精度达0.1%，拥有全差分输入，以及一个电压输出。然而，受其电压输出架构影响，其带宽仅为1 MHz左右。

对于宽带应用，则采用开路集电极电流输出的基本乘法器。[AD834](#)是一款8引脚器件，具有差分X输入、差分Y输入、差分开路集电极输出，带宽超过500 MHz。框图如图7所示。

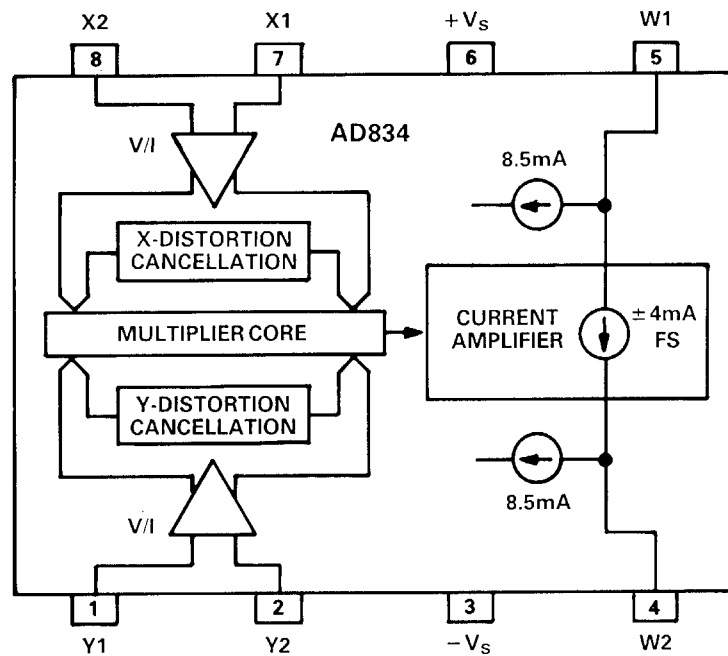


图7: [AD834](#) 500MHz四象限乘法器

AD834是真正的线性乘法器，其传递函数为

$$I_{OUT} = \frac{V_x \cdot V_y}{1V \cdot 250\Omega} \quad \text{等式 3}$$

其X和Y失调被平衡至500 μV(最大值为3 mV)，可以用于众多应用，包括乘法器(宽带和窄带)、平方器、倍频器和高频功率测量电路。在使用AD834时需要考虑的一个因素是，由于其带宽非常宽，因此，在设计输入电路时必须考虑其输入偏置电流(每个输入约为50 μA)，以防止它们在源电阻中流动时会导致意外失调电压。

采用AD834的一种基础宽带乘法器如图8所示。差分输出电流在两个相等负载电阻R1和R2中流动，结果输出差分电压。这是该器件最简单的应用电路。在只需要高频输出的情况下，可以采用变压器耦合法，简单的变压器或巴伦均可。

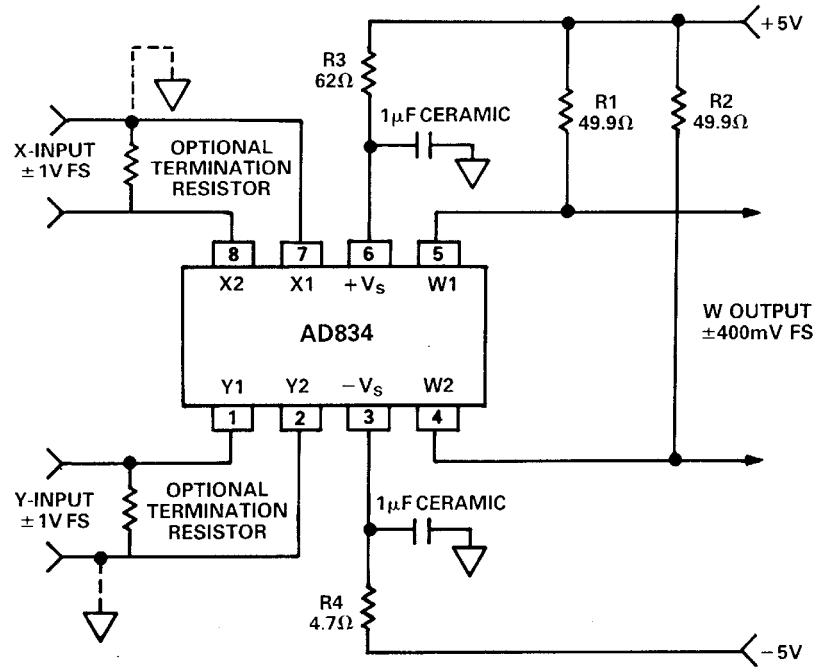
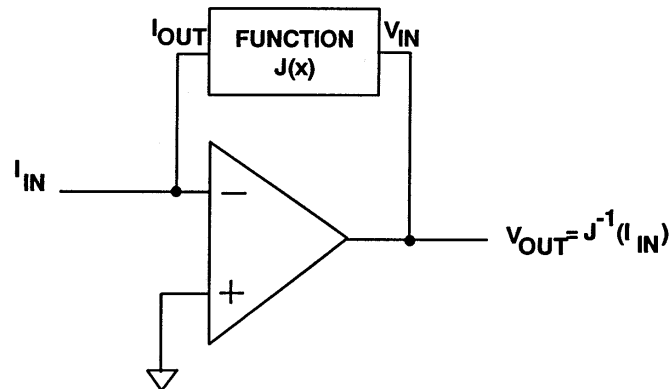


图8: AD834的基本连接

用带运算放大器的乘法器实现算术函数

乘法器可以置于运算放大器的反馈环路中，以形成多个有用的函数。图9展示了模拟计算的基本原理，其中，负反馈环路中的一个函数发生器计算反函数(当然该函数须在整個运算范围内具有单调性)。图10展示的是一个乘法器以及一个配置为同相和反相模式的除法器的运算放大器。



NOTE: FUNCTION MUST BE MONOTONIC OVER THE RELEVANT RANGE

图9: 负反馈环路中的函数发生器产生反函数

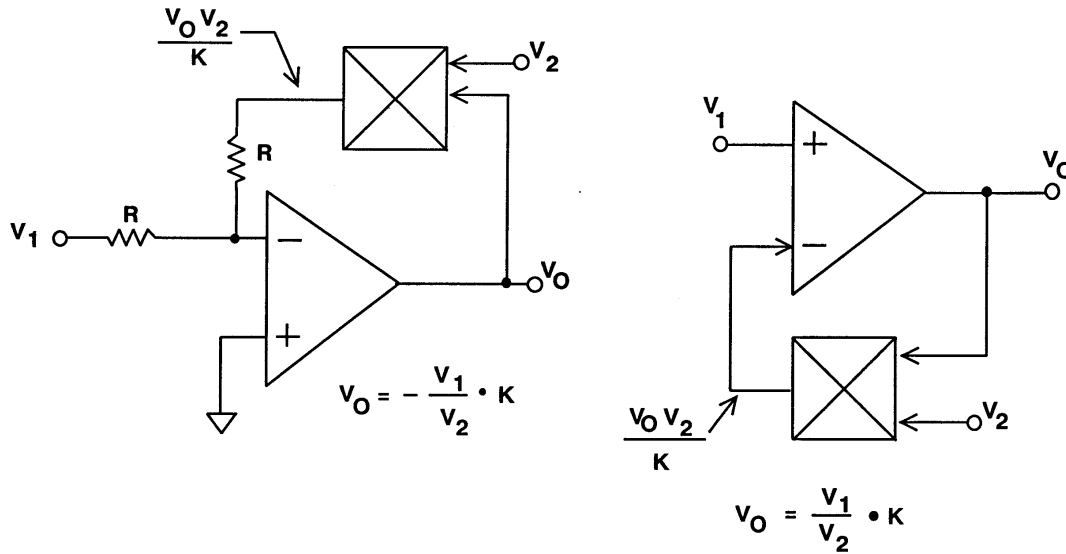


图10： 结合使用乘法器和运算放大器实现除法运算

参考文献：

1. Barrie Gilbert, *ISSCC Digest of Technical Papers 1968*, pp. 114-115 February 16, 1968.
2. Barrie Gilbert, *Journal of Solid State Circuits*, Vol. SC-3, December 1968, pp. 353-372.
3. 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 2, 4.

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.