

任意FIR滤波器的原理、设计和应用



示波器用户能够运用自定义的FIR滤波器进行波形数学运算。本文将深入讨论使用DSP实现FIR——有限冲激响应滤波器的原理。它还将介绍此类滤波器设计的一些方法。此外，我们还将讨论泰克示波器数学运算所包含的任意滤波器函数使用的FIR滤波器程序库。本文只涵盖了FIR类型的滤波器。

第1章：引言

在信号处理方面，滤波器可能会被视为一种修改波形形状的数学程序。因此，对任何形状的波形，我们都可以设计出特定的滤波器，以根据一定的基本规则、假设和限制，把波形

变换成任何希望的形状。从广义上讲，有人可能会说，处理信号的任何系统都可以视为滤波器。例如，示波器通道可被视为低通滤波器，其3dB衰减点被称为带宽。如果使用AC耦合，那么示波器可被看作带通滤波器。

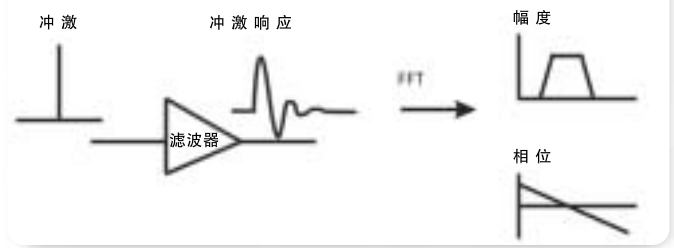
任意FIR滤波器的原理、设计和应用

► 应用指南

在计算机和数字采样出现以前，工程师主要在电路设计中实现模拟滤波器。这些滤波器使用电阻器、电容器和电感器，执行称为卷积的“模拟计算”。在数字计算机和模数转换器发明之后，可以通过表示信号的二进制数据样点的一系列乘法和加法运算，来实现卷积流程。

数字滤波器较模拟滤波器有某些明显的优势。例如，模拟滤波器电路器件的公差可能过大，因此很难或不可能实现高阶滤波器。而在数字滤波器中，则可以很容易实现这些高阶滤波器。此外，模拟器件特性会随着岁月或温度而变化，影响滤波器的响应特性。数字滤波器则没有这样的问题。数字滤波器的另一个主要优势是能够改变系数、重新编程。这大大简化了合适的滤波器的实现过程。

一般来说，数字滤波器可以分成两大类：FIR“有限冲激响应”和IIR“无限冲激响应”。FIR滤波器在转函中只有零点，没有极点，因此它一直处于稳定状态，不会振荡。所以，FIR滤波器的冲激响应的长度有限。此外，可以使用准确的线性相位响应来指定FIR滤波器。IIR滤波器在转函中既有零点、又有极点，可能会不稳定。从理论上讲，其冲激响应会持续到无穷大。换句话说，它采用反馈环路实现。IIR滤波器不能获得真正的线性相位响应。不过，它可以在感兴趣的区域内接近线性相位。本文只介绍FIR类型的滤波器。如需更深入地了解数字滤波器原理，请参见最后一页的参考资料清单。



► 图1. 滤波器的基本概念图。

第2章：FIR滤波器系数

FIR滤波器由数据样点数组 $h(m)$ 组成，这个数组代表着滤波器的取样冲激响应，其中 m 是数组中的索引。参见图1。众所周知，冲激函数由幅度相等的所有频率的余弦函数组成，其相位在冲激的时间位置上等于零，即不同频率的每个余弦波在冲激位置都会有一个波峰。这个位置称为零相位参考点。因此，如果冲激输入到滤波器中，其冲激响应会全面确定滤波器在时域中的特点。通过计算滤波器冲激响应的FFT，可以提供滤波器在频域中的相位和幅度响应。

通过指定系数获得FIR滤波器

系数是指滤波器冲激响应的样点数。可以通过各种方法获得冲激响应。一般来说，应在频域中指定滤波器特点，通过计算IFFT获得冲激响应。然后可以对冲激响应取样，获得希望的采样率下的滤波器系数。

Remez交换方法：在FIR滤波器设计中，可能最著名的方法是采用Remez交换算法。“数字信号处理原理和应用”中介绍了这种算法(参见最后一页的参考资料清单)，其中提供了FORTRAN程序列表。这种程序允许用户指定三种线性相位FIR滤波器中的一种，如：1)多频段滤波器；2)Hilbert变换滤波器；3)微分器滤波器。Matlab™提供了一种滤波器设计软件包，采用Remez算法，提供了流行的Windows™用户界面。

模拟原型：还有许多方法，使用双线性变换把已知的模拟转函数转换成数字滤波器转函数。之所以需要这种变换，是因为模拟s-平面中的复jw轴会映射到数字z-平面域中的单位圆。在从s-平面转换到z-平面，以获得同等数字滤波器转函数时，可以对滤波器转函数进行指定转折频率的双线性变换。

本文作者使用的直接频率取样方法：上面介绍的Remez算法方法和模拟原型方法在控制希望的滤波器的相位响应和幅度响应方面有着明显的局限性。使用这些方法可能很难获得希望的响应。在第8章“任意频率取样滤波器设计方法”中，我们提供了一个程序，该程序使用设计人员指定的任意幅度和相位响应创建滤波器。

第3章：卷积

一旦已经设计了滤波器，且已经获得了滤波器系数，那么将通过卷积运算对输入数据应用滤波器。公式(1)、(2)和(3)以

Mathcad™或Matlab™可以简便实现的形式进行了描述。

$$m := 0 \dots (M - 1) \quad (1)$$

$$n := \text{floor}(M/2) \dots (N - 1 - \text{floor}(M/2)) \quad (2)$$

$$y(n) = \sum_m x(n - m + \text{floor}(M/2)) \cdot h(m) \quad (3)$$

$$p = 0 \dots \text{floor}(M/2) - 1 \quad (4)$$

$$x(p) = y(p) \quad (5)$$

$$y(N - p - 1) = x(N - p - 1) \quad (6)$$

其中：M是滤波器系数数量，必须是公式(2)中描述的索引表的奇数。也可以实现偶数长度的滤波器，但必须略微修改索引公式(2)。N的值是x指定的输入数据数组的长度。滤波器数组为h。从公式(1)、(2)和(3)中可以看出，卷积流程需要保留滤波器冲激响应的时序次序，把它逐点乘以指数位置M开始的相应样点x。把每次的乘积结果加在一起，获得一个置入数组的滤波后的输入点y。然后把n的值加1，重复乘法和加法程序，获得y中下一个滤波的数据样点。

注意，根据公式(3)，没有定义y()数组中第一层(M/2)的点。此外，也没有定义数组末尾最后一层(M/2)的点。但是，数组中其余点进行了滤波。在这种表示方式中，滤波器充分工作，输出数据数组中的滤波器没有产生瞬时启动失真。公式(6)描述的最后一个数组y(n)的所有点均有效。

示波器滤波的数学波形在波形记录结束前或结束后没有额外的点。因此，为避免滤波器启动瞬时失真，公式(3)中没有定义的点被代以ETnull，“无效数字”。这些项目在屏幕上显示为空白。在导出的ASCII文件中，这些点显示为空格。

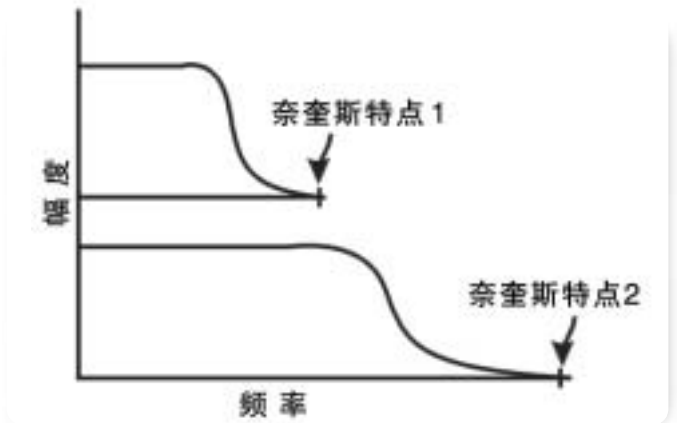
第4章：相对于采样率的滤波器系数和响应

任意数字滤波器的响应相对于采样率 f_s 归一化。

滤波器在 $0-0.5f_s$ 的频率范围内定义了自己的幅度和相位响应，其中 $0.5f_s$ 的值称为奈奎斯特特点。可以使用归一化值指定关键滤波参数。例如，可以指定低通滤波器有0.3的归一化带宽。这意味着截止频率等于 $0.3f_s$ 。不管选择什么样的采样率值，这个滤波器都会有这样的截止频率。

例如，考虑一下传输频带为 $0-0.25f_s$ 的低通滤波器。现在假设已经确定了滤波器系数，且已经应用到拥有某个指定采样率的数据中。不管数据的采样率是多少，滤波器都将表现出与0到奈奎斯特特点范围内成比例的相同幅度和相位特点。因此，如果以1Hz的采样率应用这一滤波器，带宽将是0.25Hz。如果对采样率为1GHz的数据应用相同的滤波器系数，那么滤波器的带宽是250MHz。图2以图形方式表明了这种影响。

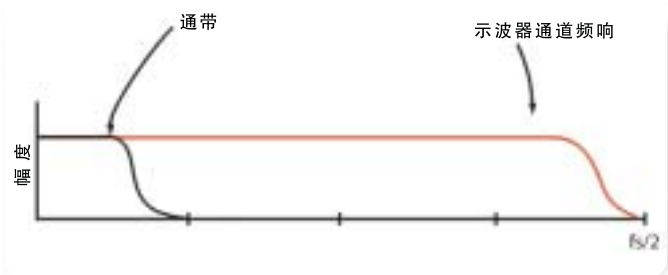
为一般用途提供一套归一化滤波器具有重要意义。例如，泰克新推出的示波器把这样的滤波器程序库存储在磁盘文件中。这个程序库中包括高通滤波器、低通滤波器、带通滤波器及其它类型的滤波器。参阅第10章：“数学运算任意滤波器程序库”。



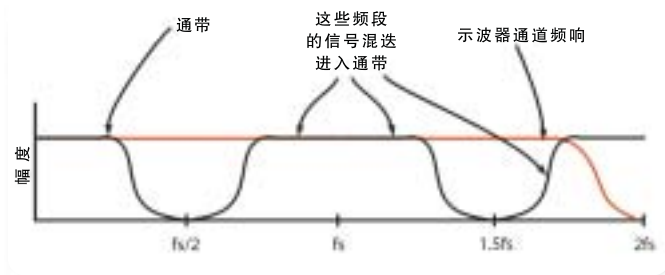
► 图2.例:相同的滤波器系数、不同的采样率如何影响归一化响应的缩放比例。

拥有一套固定的滤波器系数会导致冲激响应时长随着不同采样率变化。因此，带宽等频域特点也会变化。在这种情况下，滤波器系数的数量会保持不变。

如果不管采样率是多少，用户都要求滤波器提供固定的频响，那么会对每种采样率要求一套不同的滤波器系数。这意味着冲激响应涵盖的时间间隔将恒定不变。结果，采样率越低，滤波器系数越少；采样率越高，系数越多。因此，在这种情况下，滤波器系数数量会随着采样率变化。很明显，采样率



► **图3.**以基本采样率运行的示波器中的带宽限制滤波器希望的响应实例。滤波器响应用黑色表示，示波器通过响应用红色表示。在本例中没有发生信号混迭。



► **图4.**在带宽限制滤波器采样率太低时，带混迭信号的滤波器响应实例。黑色是数字滤波器响应，红色是模拟示波器的通道响应。得到的滤波器没有提供希望的带宽限制功能。

必须足够高，从而使得希望的频响落在奈奎斯特范围内。在这种情况下，用户应该为最高的采样率设计滤波器，因为这将要求最多的系数。然后要使用内插或抽样技术，针对滤波器应该适合的每种采样率，对滤波器系数重新取样。然后可以在一个磁盘文件中包括各种系数集，参见第11章：“FIR滤波器的文件格式”。在示波器中的不同采样率下运行时，必须考虑可能的信号混迭和噪声混迭的影响。此外，如果示波器中设置的采样率没有相应的ArbFilt()数学函数滤波器系数定义，那么滤波器将关闭。对第11章中描述的归一化滤波器文件，滤波器会一直打开，而不管选择的采样率是多少。

第5章：混迭和滤波器响应

一般来说，在使用FIR滤波器时，必须考虑信号混迭的问题，在示波器数学运算套件中尤其如此。频率高于奈奎斯特特点、并落在示波器模拟带宽范围内的任何信号都会在通带内引起信号混迭，表现出的频率要低于实际频率。

在示波器中避免信号混迭的最佳方式是在模拟带宽小于奈奎

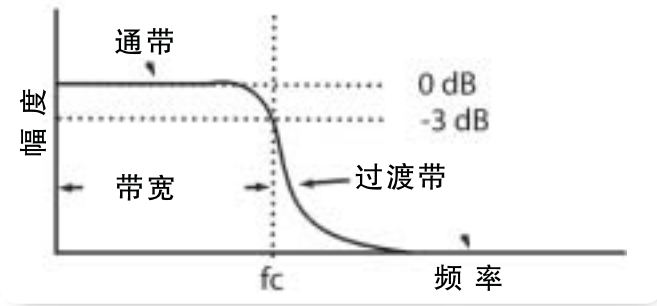
斯特特点时以基本采样率操作。在这种情况下，示波器的模拟通道作为抗信号混迭的滤波器操作。例如，DPO7254的基本采样率为10GS/s，通道带宽为2GHz，低于奈奎斯特特点5GHz。这可以有效工作，只要滤波器带宽与示波器带宽相比不是太小就可以了，在示波器带宽内滤波器会得到高的过采样率。滤波器将采用浮点系数进行计算，因此其对过采样的容忍程度要高于固定点滤波器。在这种情况下，系数数量变得大得多，滤波器卷积的计算时间也会变得大得多。

图3显示了以示波器基本采样率工作的低通滤波器的实例。在本例中没有发生信号混迭。

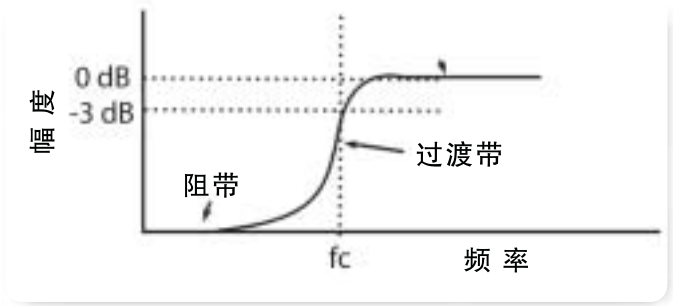
如图4中的实例所示，采样率 f_s 低于示波器的基本采样率，滤波器响应发生信号混迭。注意，数字滤波器的混迭导致了多个镜频，这些镜频以采样率的整数倍多次重复出现。在这种情况下，用户希望使用低通滤波器，去掉频带噪声；但其实际得到的低通滤波器在传输频带中却引入了多个高频段的噪声和/或信号混迭。

任意FIR滤波器的原理、设计和应用

► 应用指南



► 图5.低通滤波器参数。



► 图6.高通滤波器参数。

第6章：线性相位

如果一个系统的相位响应是相对于频率的线性函数，它将以相同的时延传送所有频率。非线性相位系统会改变不同频率成分信号的相对相位，导致波形失真。因此，设计人员通常希望设计具有线性相位特征的滤波器。另一方面，有时需要一个滤波器来校正系统中的相位误差，以便滤波后的结果拥有线性相位响应。这类滤波器将拥有非线性相位特点，以互补校正系统中存在的非线性相位响应。TDS6154C示波器中使用的增强带宽的滤波器就是这样一个实例。这些滤波器在制造过程中进行校准，得到的示波器通道响应要平坦得多，并拥有线性相位特点。

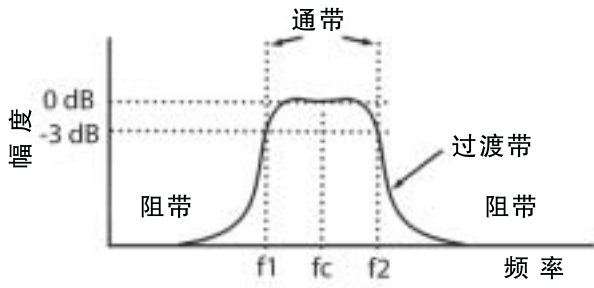
第7章：滤波器参数

下面列明了描述或指定滤波器特点时通常使用的一系列参数和术语。

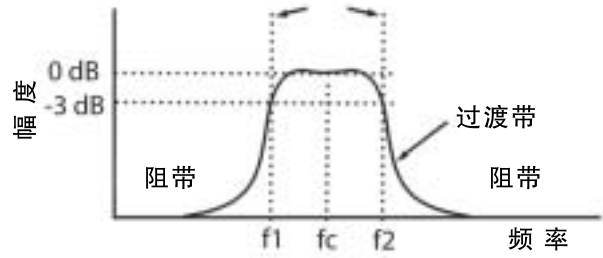
- **滤波器转函名称：**由用户定义，如FIR, Bessel, Thompson, Butterworth, Chebychev, Gaussian等等。注：Bessel Thompson类型的滤波器通常作为示波器中的模拟带宽限

制滤波器使用。它还在光参考接收机模板测试应用中作为响应类型的滤波器使用。其流行的原因在于，它是最接近实现理想的、但在物理上不可能实现的高斯滤波响应的滤波器。这种滤波器使用的转函同时包括极点和零点，可以很好地获得近似的线性相位。注：这里列明的多种滤波器最初都设计成采用极点和零点的模拟滤波器。因此，作为FIR滤波器实现这些滤波器可能要求使用预变换和双线性变换技术。

- **滤波器类型：**低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器、Hilbert变换滤波器、微分器滤波器、多频段滤波器等等。
- **截止频率：**用来指定高通滤波器、低通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器的带宽。截止频率是幅度滚降到-3dB时的点。参阅图5、图6、图7和图8。
- **带宽：**滤波器传输频带中的频率范围，它是规定了频带边缘是幅度响应曲线中-3dB下降点的截止频率。



► 图7.带通滤波器参数。



► 图8.低阻滤波器参数。

► **中心频率：**用来指定带通滤波器或带阻滤波器的中心频率。参见图7和图8。

► **Q：**Q参数是滤波器的中心频率与带宽之比，如公式(8)所示。

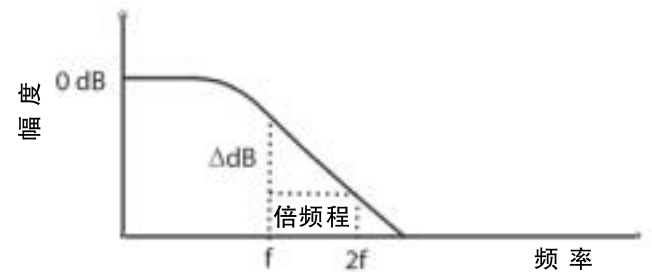
► **滚降速率：**转换频带的斜率即滚降速率，其通常用dB/octave(dB/倍频程)或dB/decade(dB/十倍频程)表示。

图5和图6说明了各种滤波器参数和术语。在图5和图6中，滤波器截止频率用 f_c 表示。

在图7所示的带通滤波器中， f_c 是通带的中心频率。此外， f_1 是截止频率下限， f_2 是截止频率上限， bw 是公式(7)规定的带宽。公式(8)规定了滤波器的Q。

$$bw = f_2 - f_1 \quad (7)$$

$$Q = \frac{f_c}{bw} \quad (8)$$



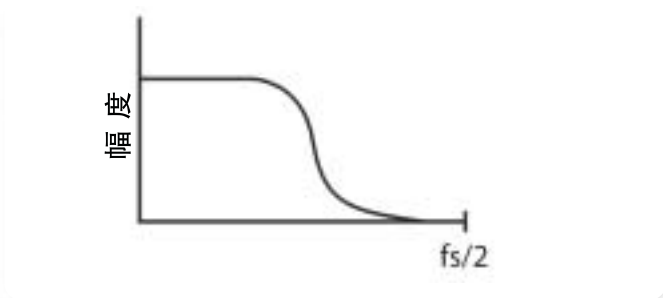
► 图9.用dB/octave表示的滤波器滚降速率。

滤波器滚降速率

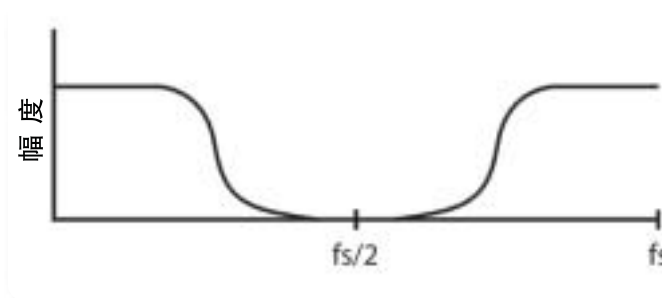
滤波器过渡带的斜率称为滚降速率。这通常用dB/octave或dB/decade表示。一个倍频程(octave)是频率翻一倍所经过的间隔。Decade则是频率翻10倍所经过的间隔。滤波器的阶通常与滤波器的滚降速率相关。例如，一阶滤波器以6 dB/octave滚降，二阶滤波器以12 dB/octave滚降。用dB/octave表示的滚降速率等于滤波器的阶乘以6。这只适用于典型的滤波器设计，其中转函的极点和零所在的位置提供了典型的单调斜率。可以指定不适用于这一规则的转函。

任意FIR滤波器的原理、设计和应用

► 应用指南



► 图10.定义频域幅度响应。



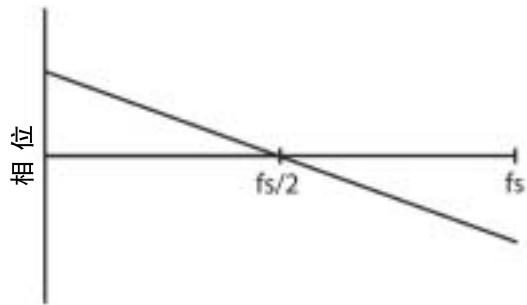
► 图11.创建第一步中获得的数据复数共轭的幅度部分。

第8章：任意频率取样滤波器设计方法

本章描述了在频域中为FIR滤波器任意指定相位和幅度响应、然后计算时域响应的设计方法。MathcadTM或MatlabTM之类的设计工具为实现这些程序提供了理想的环境。如需深入了解频率取样滤波器设计方法，请参阅最后一页列出的参考资料清单中的“数字信号处理”。一般步骤如下：

1. **定义幅度响应：** 导出一个函数或通过其它方式，在0Hz到奈奎斯特特点范围内指定滤波器的幅度响应，并存储在数组X中（参见图10）。
2. **复制这些幅度数据X，以相反的顺序追加到数组X的末尾。**

参见图11。要特别注意这些样点的位置及复制的数据开始和结束指数。X中的样点总数是IFFT的长度。如果IFFT拥有偶数个样点，那么奈奎斯特位于频谱中的其中一个样点上。如果IFFT拥有奇数个样点，那么奈奎斯特不会发生在样点上，而是会位于两个样点之间。如果不考虑这些细节，那么会在最终的滤波器结果中引起错误，使得IFFT应该等于零的复数部分不等于零。**注：**如果X相对于奈奎斯特特点拥有对称的幅度响应(如图11所示)及相对于奈奎斯特特点拥有反对称的相位响应(如图12所示)，那么X的IFFT将为零。这意味着奈奎斯特特点右面的数据是奈奎斯特特点左面数据的相反顺序的复数共轭，其中 $a+jb$ 的共轭等于 $a-jb$ 。

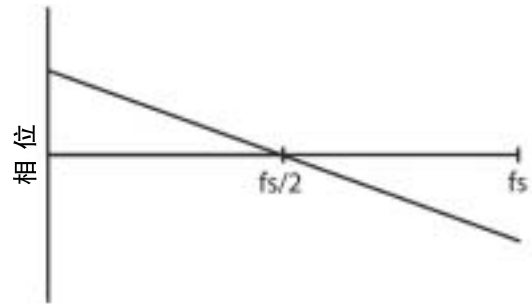


► 图12.为X中的数据分配一个线性相位函数。纵轴是X(f)的相位，其中f是频率。

3. **指定线性相位：**旋转坐标公式(9)，旋转X中的所有数据点，把X转换成a+jb复数形式的数组，其中a是实部，b是虚部，j是-1的平方根。公式如下：

$$\begin{aligned} n &= 0..N-1 \\ K &= \frac{2 \cdot \pi}{N} \\ X_n &= X_n \cos(K \cdot n) - j \cdot X_n \sin(K \cdot n) \end{aligned} \quad (9)$$

其中：N是X数组的长度，n是数组范围内的指数变量。得到的线性相位图与图12所示结果类似。群延时等于负的相位响应斜率。线性相位响应的斜率越陡峭，通过滤波器时的延时越长。如果指定滤波器时延为0，而对所有频率值把相位响应保持在零。在这种情况下，不能使用公式(9)。



► 图13.使用IFFT获得滤波器冲激响应。

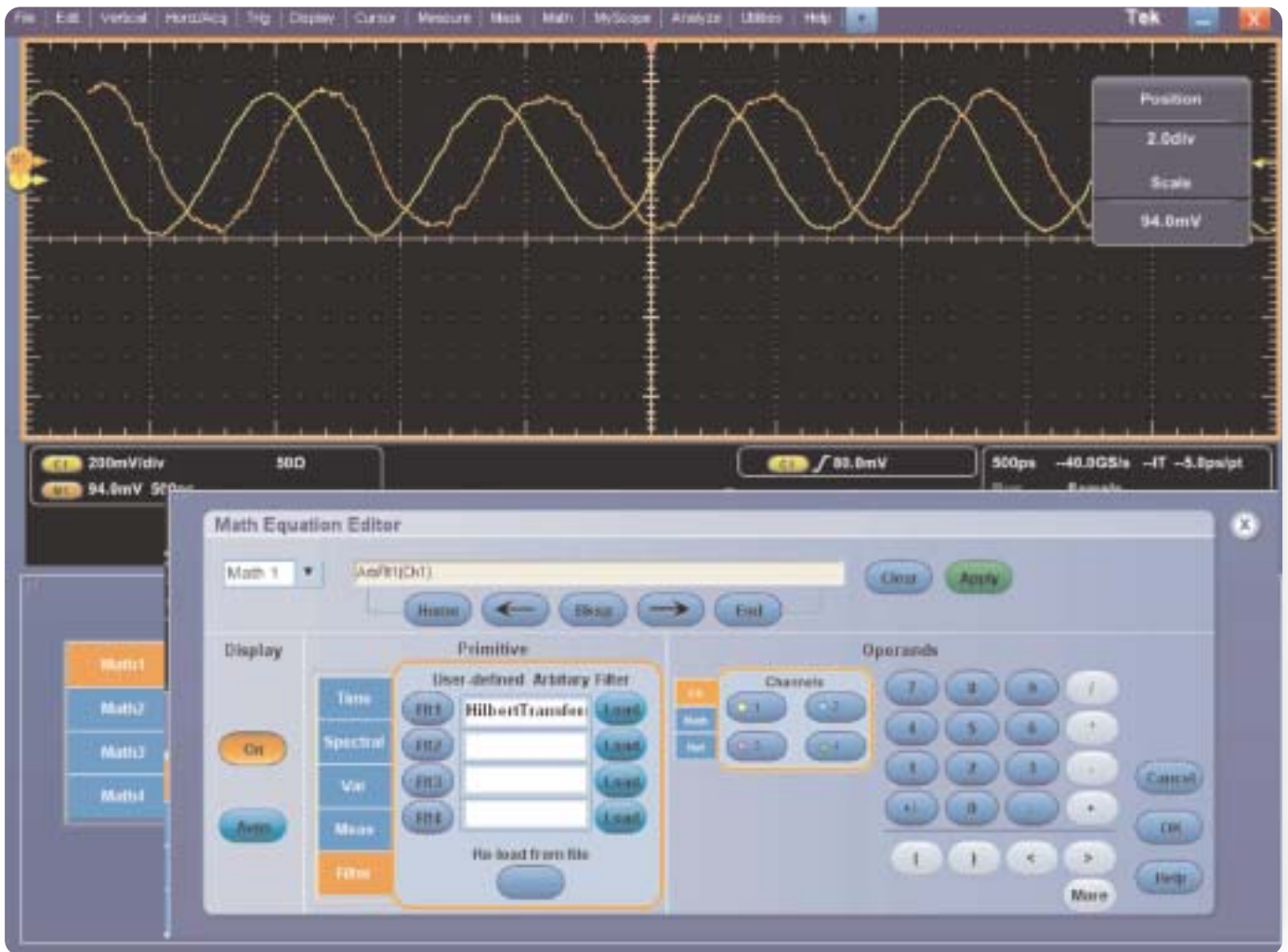


► 图14.获得最后的滤波器系数。

4. **获得滤波器的时域冲激响应：**计算X的IFFT，如图13所示。如果在创建频域响应及复数共轭的上述频率中数据指数均正确，那么x的虚数部分将为零，实数部分将是滤波器要求的冲激响应。
5. **对冲激响应取样，获得FIR滤波器系数。**

任意FIR滤波器的原理、设计和应用

► 应用指南



► 图15.显示了ArbFilt()函数和菜单、为滤波器指定文件名的屏幕。

第9章：DPO滤波器菜单

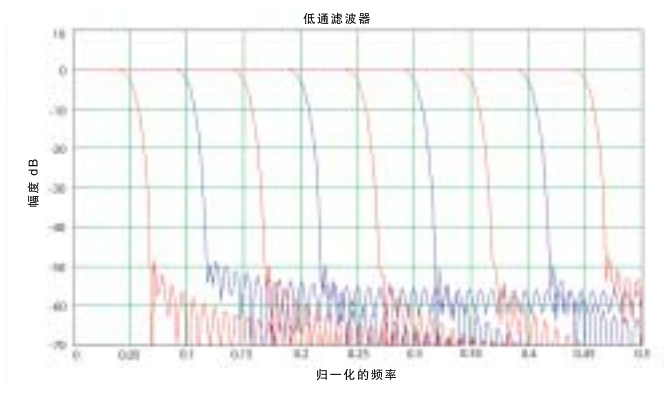
图15是设置ArbFilt()数学函数使用的菜单的屏幕，它演示了可以怎样在定义为math1的数学表达式中使用滤波器函数。

第10章：数学任意滤波器程序库

本章介绍了泰克示波器波形数学运算部分为arbFilt<x> (<fsource waveform>)函数提供的FIR滤波器列表。用户可以使用下面的路径找到这个列表：c:\TekScope\Math Arbitrary Filters\

低通滤波器：

图16和图17显示了提供的低通滤波器集合。图中显示了从0到1/2采样率的归一化频响。这些滤波器将以任何采样率及成比例的截止频率运行，如图16所示。这些滤波器拥有0.05,0.1,0.15,0.20,0.25,0.3,0.35,0.40和0.45的归一化截止频率。阻带衰减一般位于-50dB和-60dB之间。



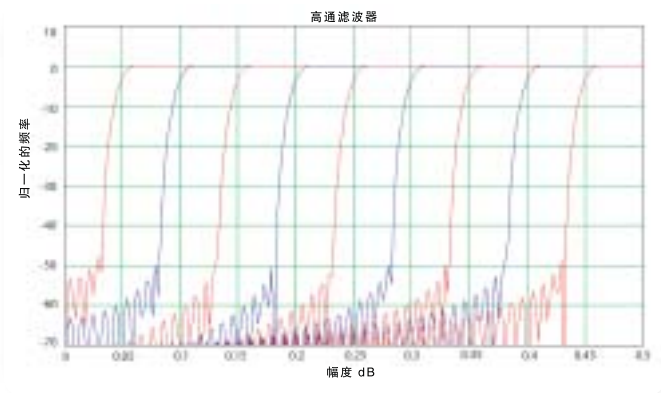
► 图16. 提供的低通滤波器的频响。

| 文件名称 | 归一化的截止频率 |
|--------------------|----------|
| lowpass_0.05bw.ftl | 0.05 |
| lowpass_0.10bw.ftl | 0.10 |
| lowpass_0.15bw.ftl | 0.15 |
| lowpass_0.20bw.ftl | 0.20 |
| lowpass_0.25bw.ftl | 0.25 |
| lowpass_0.30bw.ftl | 0.30 |
| lowpass_0.35bw.ftl | 0.35 |
| lowpass_0.40bw.ftl | 0.40 |
| lowpass_0.45bw.ftl | 0.45 |

► 图17. 程序库中提供的低通滤波器列表。

任意FIR滤波器的原理、设计和应用

应用指南



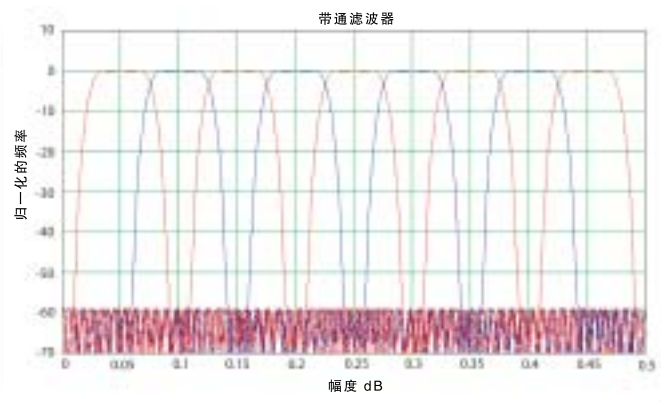
► 图18. 提供的低通滤波器的频响。

| 文件名称 | 归一化的截止频率 |
|---------------------|----------|
| highpass_0.05bw.flr | 0.05 |
| highpass_0.10bw.flr | 0.10 |
| highpass_0.15bw.flr | 0.15 |
| highpass_0.20bw.flr | 0.20 |
| highpass_0.25bw.flr | 0.25 |
| highpass_0.30bw.flr | 0.30 |
| highpass_0.35bw.flr | 0.35 |
| highpass_0.40bw.flr | 0.40 |
| highpass_0.45bw.flr | 0.45 |

► 图19. 程序库中提供的高通滤波器列表。

高能滤波器:

图18和图19显示了提供的高通滤波器集合。图中显示了从0到1/2采样率的归一化频响。这些滤波器将以任何采样率及成比例的截止频率运行，如下面的图表所示。这些滤波器拥有0.05,0.1,0.15,0.20,0.25,0.3,0.35,0.40和0.45的归一化截止频率。阻带衰减一般位于-50dB和-60dB之间。



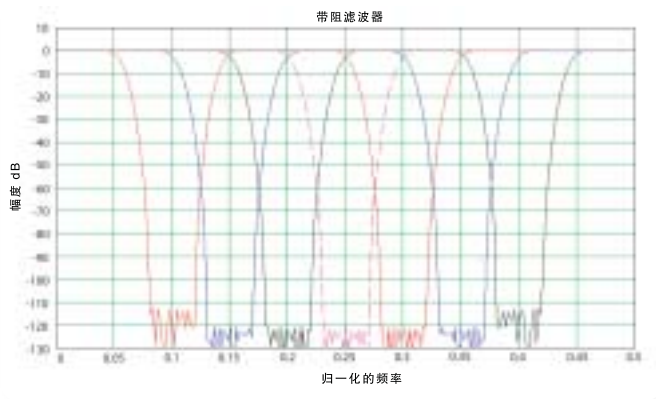
► 图20. 提供的带通滤波器的频响。

| 文件名 | 归一化带宽 | 归一化中心频率 |
|--------------------------------|-------|---------|
| bandpass_0.05bw_0.05center.flr | 0.05 | 0.05 |
| bandpass_0.05bw_0.10center.flr | 0.05 | 0.10 |
| bandpass_0.05bw_0.15center.flr | 0.05 | 0.15 |
| bandpass_0.05bw_0.20center.flr | 0.05 | 0.20 |
| bandpass_0.05bw_0.25center.flr | 0.05 | 0.25 |
| bandpass_0.05bw_0.30center.flr | 0.05 | 0.30 |
| bandpass_0.05bw_0.35center.flr | 0.05 | 0.35 |
| bandpass_0.05bw_0.40center.flr | 0.05 | 0.40 |
| bandpass_0.05bw_0.45center.flr | 0.05 | 0.45 |

► 图21. 程序库中提供的归一化带通滤波器表。

带通滤波器:

每个滤波器的带宽是采样率的0.05倍。它们将以任何采样率操作。提供的中心频率是0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35,0.40,0.45。阻带衰减约为-60dB，通带内波动约为1dB。参见图20和图21。



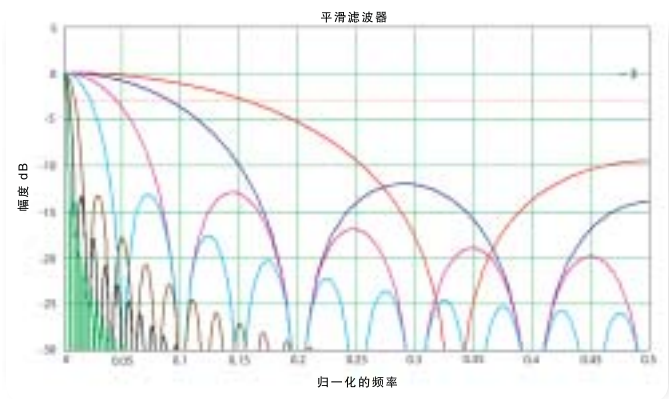
► 图22.提供的带阻滤波器的频响。

| 文件名称 | 归一化 带宽 | 归一化 中心频率 |
|-------------------------------|-----------|-------------|
| bandstop_0.1bw_0.10center.flr | 0.1 | 0.10 |
| bandstop_0.1bw_0.15center.flr | 0.1 | 0.15 |
| bandstop_0.1bw_0.20center.flr | 0.1 | 0.20 |
| bandstop_0.1bw_0.25center.flr | 0.1 | 0.25 |
| bandstop_0.1bw_0.30center.flr | 0.1 | 0.30 |
| bandstop_0.1bw_0.35center.flr | 0.1 | 0.35 |
| bandstop_0.1bw_0.40center.flr | 0.1 | 0.40 |

► 图23.提供的归一化带阻滤波器表。

带阻滤波器:

每个滤波器的带宽是采样率的0.1倍。它们将以任何采样率操作。提供的中心频率是0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35和0.40。阻带衰减约为-110dB,但示波器的本底噪声使得这种深度不



► 图24.提供的平滑滤波器的频响。

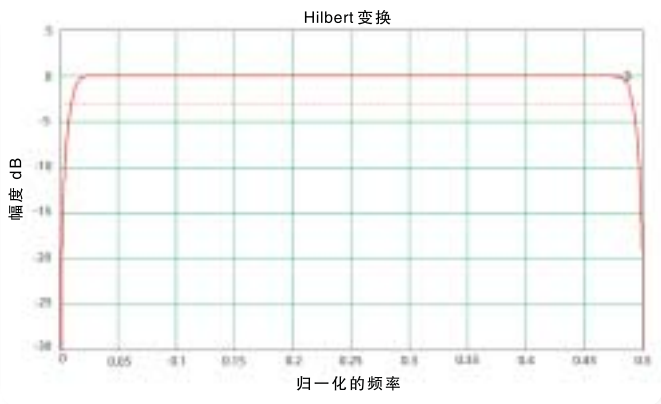
| 文件名称 | 长度 | 归一化 带宽 | 带阻 衰减dB |
|---------------|-----|-----------|------------|
| smooth3.flr | 3 | 0.1558 | -9.4 |
| smooth5.flr | 5 | 0.0903 | -12 |
| smooth10.flr | 10 | 0.0446 | -12.9 |
| smooth20.flr | 20 | 0.0224 | -13.2 |
| smooth50.flr | 50 | 0.00887 | -13.2 |
| smooth100.flr | 100 | 0.0045 | -13.2 |
| smooth200.flr | 200 | 0.0022 | -13.2 |

► 图25.提供的平滑滤波器列表。

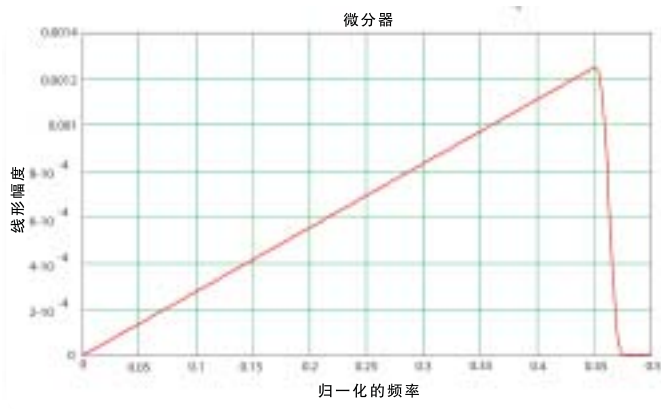
可能实现。通过启动FFT和长记录长度及平均功能,在8位示波器上可以把本底噪声降低到-100dBm的范围!但是,示波器在该本底噪声之上有某些杂散信号。之所以可以达到这样的指标,是因为FFT内部进行了平均计算,平均功能会提高分

任意FIR滤波器的原理、设计和应用

► 应用指南



► 图26. Hilbert滤波器的频响。



► 图27. 微分器滤波器的频响。

平滑滤波器:

这些滤波器有时称为矩形波串滤波器，它们沿着时间记录简单地平均相邻样点。这些滤波器的滤波器系数都等于 $1/M$ ，其中 M 是滤波器的长度。滤波器文件名指明了平滑滤波器的长度。其频响如图24所示。

平滑滤波器是拥有次优带阻特点的低通滤波器。但是，它们通常用来从显示的轨迹中去掉高频噪声。在使用时要注意保证滤波的信号通带要很好地落在选择的滤波器的通带范围内。这样可以保证只去掉噪声。程序库中提供的长度是3, 5, 10, 20, 50, 100和200。参见图25和图24。红色轨迹的滤波器长度是3，然后蓝色轨迹是5，然后洋红色轨迹是10，依此类推。

Hilbert变换滤波器:

理想的Hilbert变换滤波器在所有频率上的增益为1，把所有频率的信号相位位移90度。这种滤波器是Remez交换算法中可以指定的多种类型之一，最后一页参考资料“数字信号处理原理和应用”中介绍了这种算法。注意，这个滤波器在 $0-0.025$ 乘以采样率及在 $0.475-0.5$ 乘以采样率的范围内偏离了理

想的行为特点。可以使用这种滤波器在很宽的频率范围内创建正交信号。这个滤波器的文件名是HilbertTransform90 PhaseShift.ft。参见图26。

微分器滤波器:

理想的微分器是一种把相位位移90度的高通滤波器。其频响从DC直到0.5都是线性的。但是，这一点不容易实现，因此程序库中提供的滤波器的响应为DC-0.45范围提供了良好的微分器。参见图27。

第11章: FIR滤波器的文件格式

本章介绍了泰克示波器波形数学运算部分使用的存储滤波器的ASCII文件格式。通过使用滤波器菜单功能，用户可以指定一个磁盘文件名，其中包含滤波器。用户可以使用这种文件格式，为滤波器允许运行的每种采样率指明不同的一套系数。如果采样率没有位于文件列表中，那么将不会对数据应用滤波器。这种文件格式还允许用户指定归一化滤波器系数集，从而可以在所有采样率上运行同一套滤波器系数。

ASCII文件规定如下:

```
# Comments preceded by # symbol
< sampleRate > coef1, coef2, ..., coefN
< sampleRate > coef1, coef2, ..., coefN
    |                               |
    |                               |
< sampleRate > coef1, coef2, ..., coefN
```

对应每一种滤波器的工作特性, 这些文件将有一行数据对其进行定义, 这些数据的第一个是工作采样率, 后面紧跟的是相应的一套滤波器系数。如果用户将取率指定@符号, 那么滤波器将在所有采样率上运行。如果指定@符号, 那么在文件中只应有一套滤波器系数。但是, 用户也可以定义其它行, 其中包括指定的采样率, 在这些采样率下滤波器功能将不会工作。对滤波器要运行的每种采样率, 将有一个单独的行来说明。每一行有不同数量的系数, 最大数量为1000个。文件中可以包含最多20行。

归一化滤波器的文件内容实例如下面所示。这个实例显示了smooth5.flt文件的内容。

```
@    0.2,    0.2,    0.2,    0.2,    0.2
```

下面是设置成以特定采样率运行的滤波器实例。这是示波器程序库中名为200MHz_mult_sample_rates.flt的文件的内容。

```
#This is a 4th order Bessel Thompsen low pass filter.
#200MHz bandwidth, will operate at any of the following sample rates:
# 40 GS/s, 20 GS/s, 10 GS/s, 5 GS/s, 2.5 GS/s, 1 GS/s, 500 MS/s
5e8; 1.968e-007,1.008,-0.00978,0.002267,-0.0002208,1.643e-005,-1.397e-006,1.434e-007
1e9; 9.524e-008,0.3899,0.4877,0.1304,-0.004733,-0.004566,.....
2.5e9; 3.868e-008,0.01885,0.1081,0.1982,0.2284,0.1981,.....
5e9; 1.935e008,0.0007332, 0.009428, 0.02874, 0.05408, 0.07921, .....
1e10; 9.673e-009,3.445e-006,0.0003666,0.001831,0.004714,0.008978,0.01437,0.....
2e10; 4.837e-009, 1.657e-008, 1.723e-006, 4.274e-005, 0.00018334-009, .....
4e10;2.418e-009, -3.524e-009, 8.284e-009, -1.795e-008,8.613e-007, .....
```

总结

本文介绍了专门针对泰克示波器波形数学运算部分设计和使用FIR数字滤波器的相关信息。本文介绍了频率取样滤波器设计方法, 这种方法允许示波器用户创建定制滤波器。此外, 本文定义了示波器内部提供的FIR滤波器程序库。这个程序库为通用用途提供了广泛的归一化FIR滤波器。本文提供了必要的信息, 使得示波器用户能够有效利用DPO示波器平台数学运算套件中提供的任意FIR滤波器功能。

词汇表

卷积 – 使用乘法和加法实现滤波器运算的过程

DSP – 数字信号处理

DUT – 被测设备

FIR – 有限冲激响应

FFT – 快速傅立叶变换

IFFT – 反向快速傅立叶变换

IIR – 无限冲激响应

幅度响应 – 当恒定幅度、各种频率的激励信号加在DUT的输入端时，输出信号各个频点的响应幅度与频率的函数关系。

相位响应 – 当相位为0、各种频率的余弦激励信号加在DUT输入端时，输出信号各个频点的响应相位与频率的函数关系。

参考资料

1. Alan V. Oppenheim/Rona. W. Schaffer, 数字信号处理, Prentice-Hall公司, 1975年版权所有, 第155页, ISBN 0-13-214635-5
2. Lawrence R. Rabiner-Bernard Gold, 数字信号处理原理和应用, Prentice-Hall公司, 1975年版权所有, 第75-183页
3. Lawrence R. Rabiner-Bernard Gold, 数字信号处理原理和应用, Prentice-Hall公司, 1975年版权所有, 第187-204页

作者: John J Pickerd

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编: 201206
电话: (86 21)5031 2000
传真: (86 21)5899 3156

泰克北京办事处

北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10)6235 1210/1230
传真: (86 10)6235 1236

泰克上海办事处

上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼1802-06室
邮编: 200040
电话: (86 21)6289 6908
传真: (86 21)6289 7267

泰克广州办事处

广州市环市东路403号
广州国际电子大厦2807A室
邮编: 510095
电话: (86 20)8732 2008
传真: (86 20)8732 2108

泰克深圳办事处

深圳市罗湖区深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦G1-02室
邮编: 518008
电话: (86 755)8246 0909
传真: (86 755)8246 1539

泰克成都办事处

成都市人民南路一段86号
城市之心23层D-F座
邮编: 610016
电话: (86 28)8620 3028
传真: (86 28)8620 3038

泰克西安办事处

西安市东大街
西安凯悦(阿房宫)饭店322室
邮编: 710001
电话: (86 29)8723 1794
传真: (86 29)8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市武昌区民主路788号
白玫瑰大酒店924室
邮编: 430071
电话: (86 27)8781 2760/2831
传真: (86 27)8730 5230

泰克香港办事处

香港铜锣湾希慎道33号
利园3501室
电话: (852)2585 6688
传真: (852)2598 6260

如查看升级信息, 请访问网址: WWW.TEKTRONIX.COM



版权所有 © 2005, Tektronix, Inc. 版权所有。Tektronix 产品受美国和外国专利权(包括已取得的和正在申请的专利权)的保护。本文中的信息将取代所有以前出版的资料中的信息。保留更改产品价格和价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。引用的其它所有商标名称均为他们各自公司的服务标志、商标或注册商标。 1/06 FLG/WWW 4HC-19378-0

Tektronix
Enabling Innovation