

无线通信实验在线开放课程

主讲人：吴光 博士

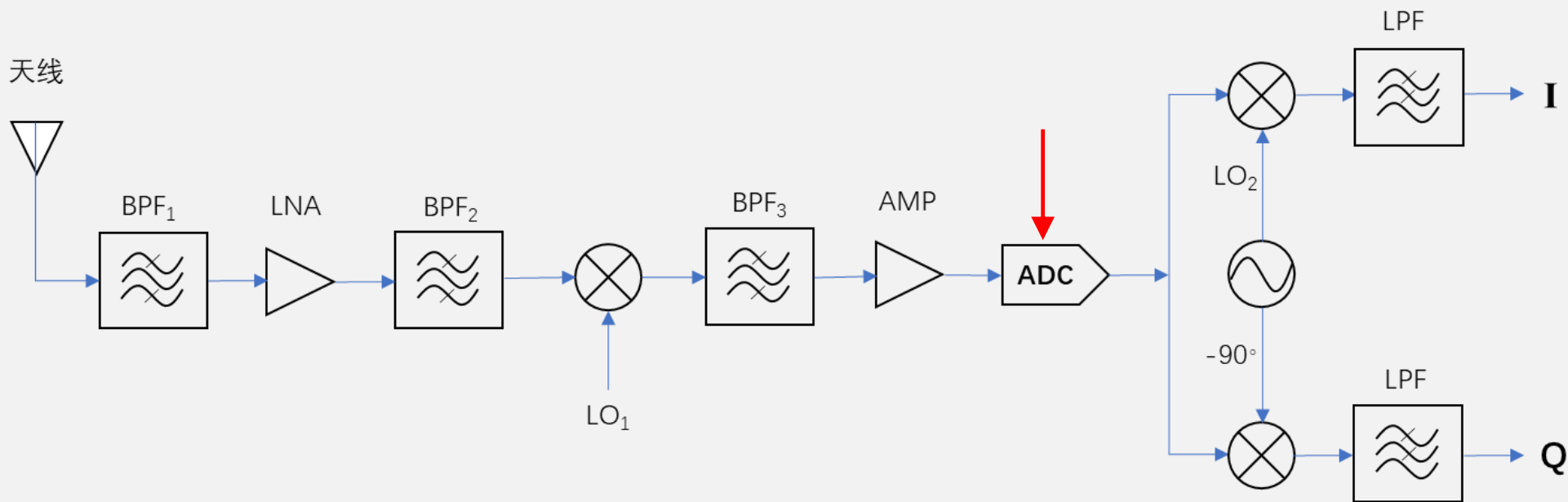
广东省教学质量工程建设项目





第七章

软件无线电概述



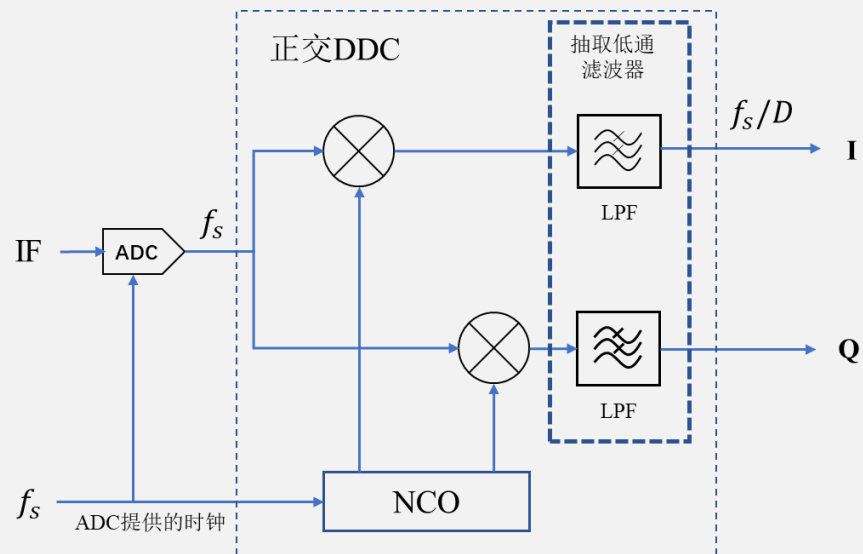
软件无线电简介

- 软件无线电(Software Defined Radio, SDR)构造了具有标准化、模块化的硬件平台，其功能如频段选择、调制类型、通信协议等由软件来实现。由软件控制功能的思想具有很高的灵活性和较强的开放性。软件无线电可以说打破了传统通信功能仅仅依赖于硬件发展的局限，实现了通信功能由软件定义的新体系。



目录

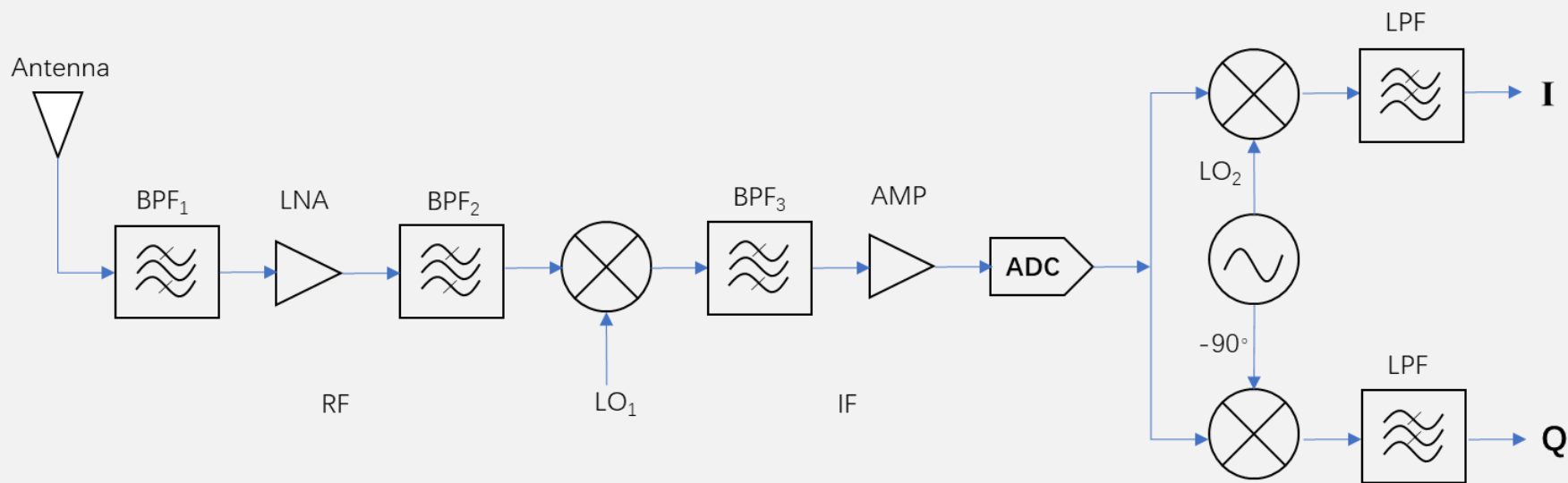
- 软件无线电结构
- 数字下变频器
- 抽取与内插
- 数字滤波器





软件无线电结构

- 低中频结构对中频信号进行模/数转换、数字下变频等数字信号处理。其主要流程有：带通滤波器BPF1、低噪声放大器（LNA）、镜像滤波器BPF3、混频器、模数转换器（ADC）。采用这种结构的硬件有RTL-SDR。

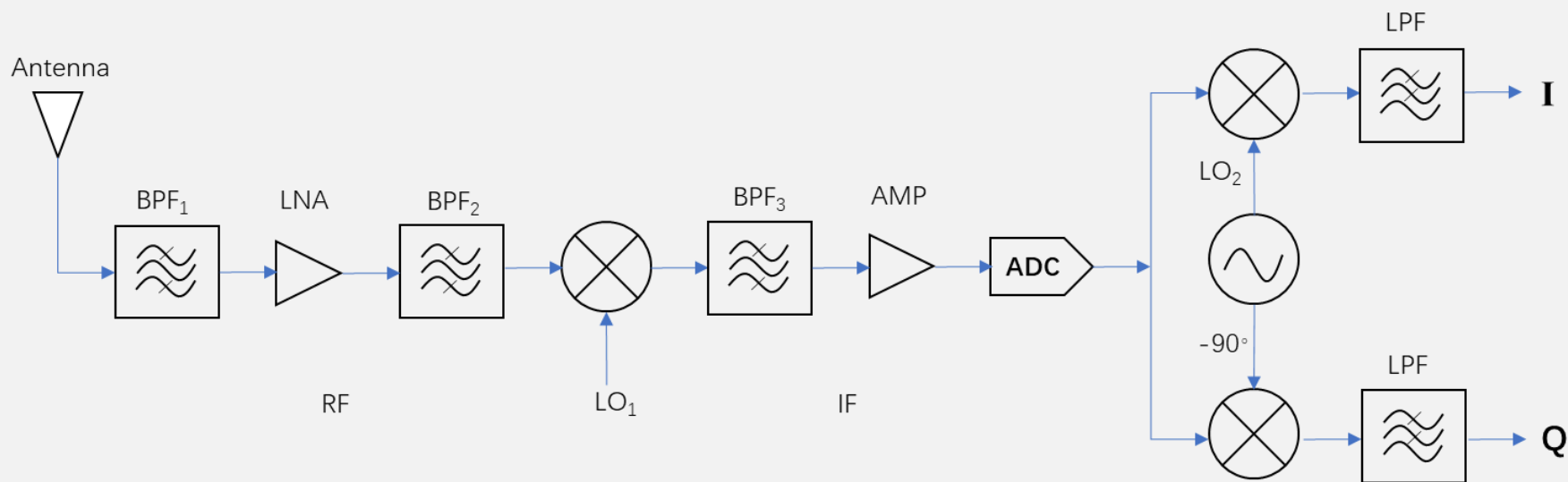


低中频结构



软件无线电结构

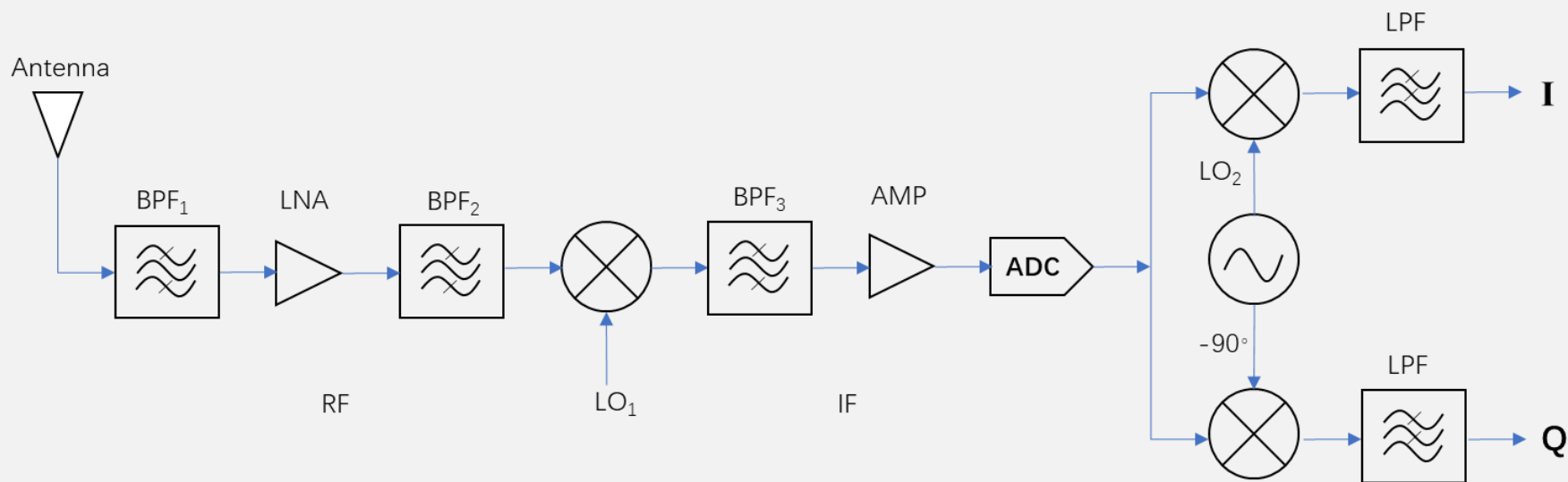
- 首先通过带通滤波器 BPF_1 将天线上接收到的射频信号进行第一次信道选择，防止信道外干扰。带通滤波器会引起信号功率的损耗。



低中频结构

软件无线电结构

- 为了补偿功率损耗，紧接着采用低噪声放大器（LNA）对信号进行低噪声放大处理。
- 混频器的作用是将镜像滤波之后的信号下变频到中频。

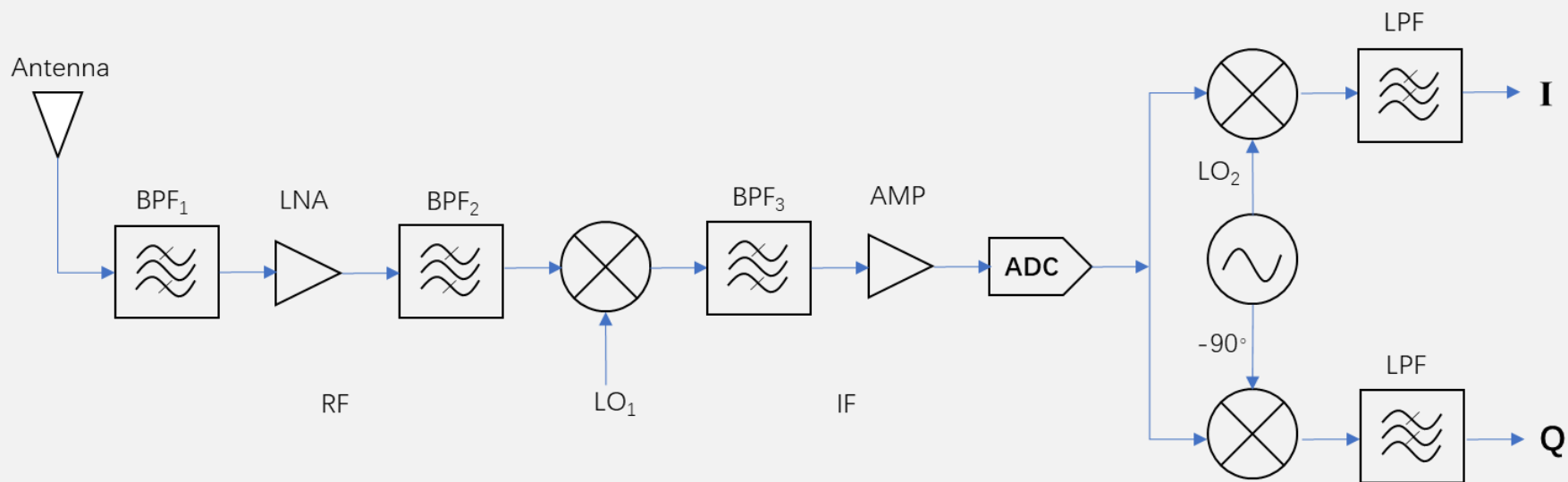


低中频结构



软件无线电结构

- BPF3是镜像滤波器，其作用是抑制镜像干扰。

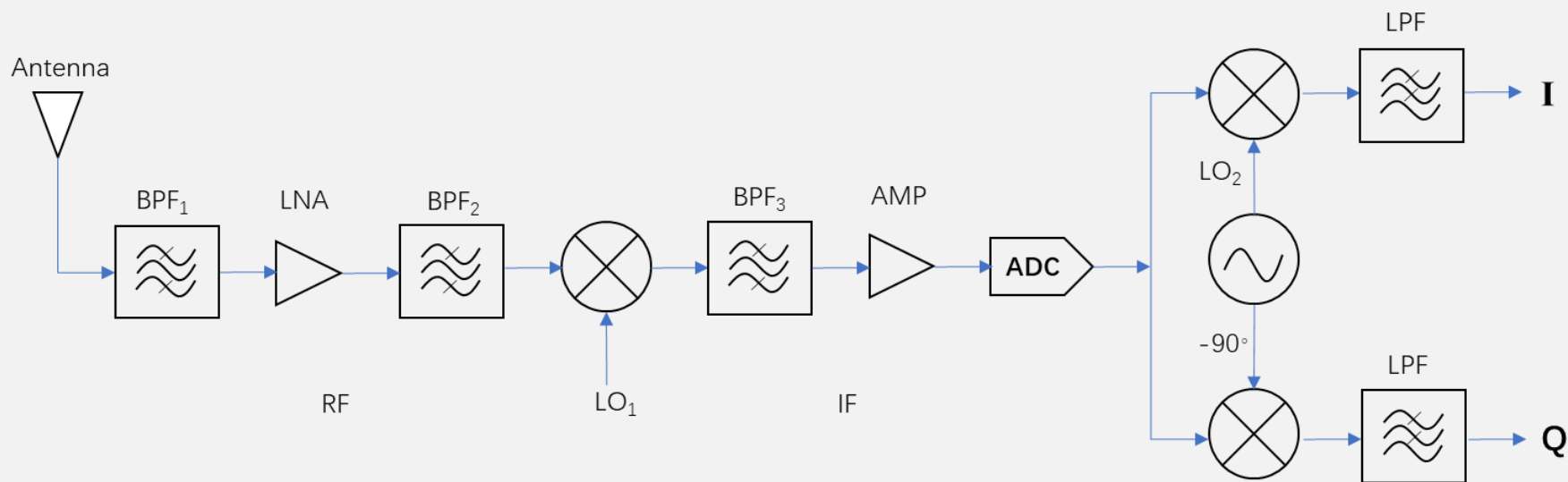


低中频结构



软件无线电结构

- 模数转换器（ADC）是整个接收通道的关键器件，该器件对中频放大（AMP）之后的信号进行采样、量化处理。



低中频结构



低中频结构优点与不足

优点：

它能够较好地解决I/Q不平衡，镜像抑制、直流漂移以及低频噪声等问题。

不足：

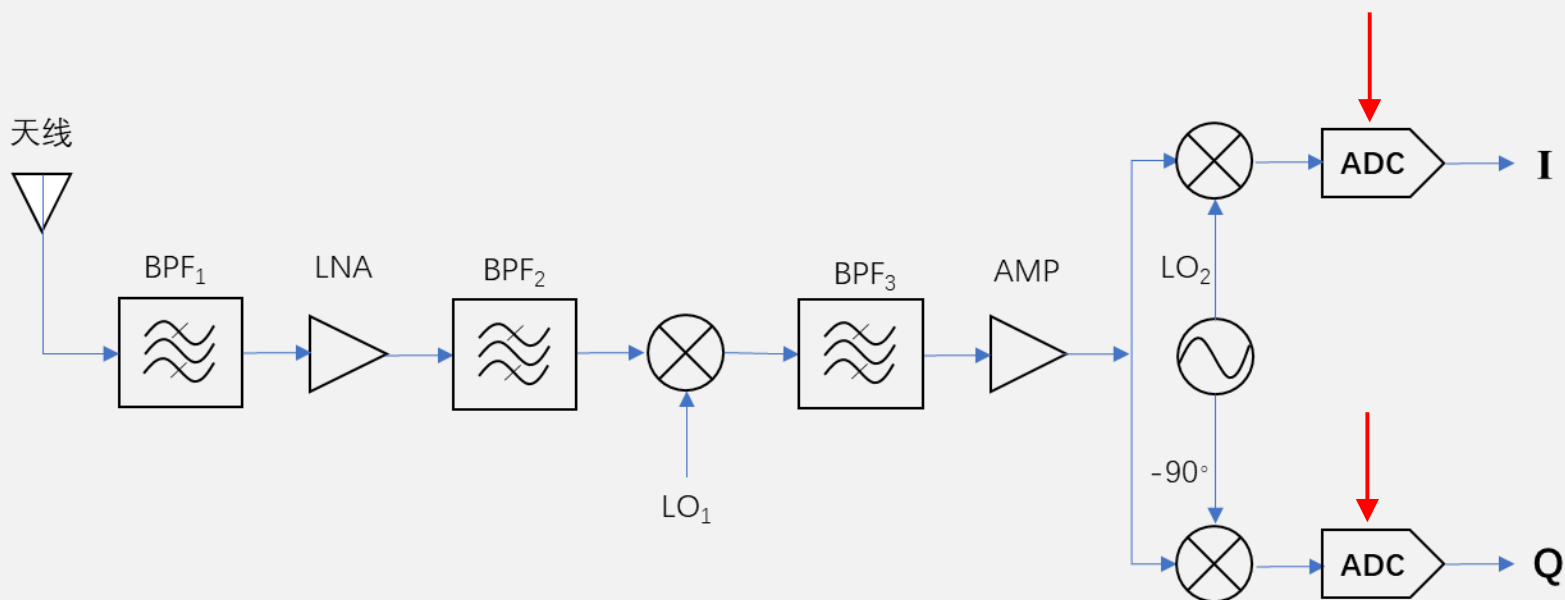
要求ADC需要具有较高的采样率，足够的分辨率，抗噪声性能，具有较好的线性度和较大的动态范围。



软件无线电结构

超外差结构:

- 本地振荡器LO1产生的频率始终比接收目标频率高。IQ解调是在模拟域进行的, ADC是对基带信号进行采样。该结构低中频结构很相似, 区别在于ADC在接收机中的位置。

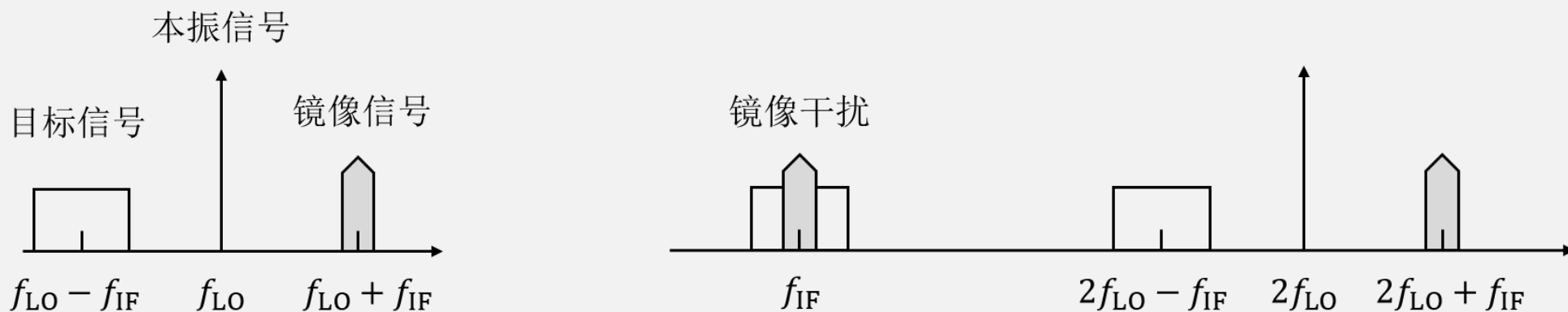


超外差结构



镜像干扰

- 超外差结构的缺点是存在镜像干扰和I/Q失衡。



- 射频混频器将两个信号相乘，产生本振与目标的和频信号 ($f_{LO} + f_{IF}$) 和差频信号 ($f_{LO} - f_{IF}$)
- 为了避免镜像干扰，可以使用镜像滤波器。过滤镜像信号。镜像滤波器本质是以 ($f_{LO} + f_{IF}$) 为中心频率的带通滤波器。



带通滤波器的选择

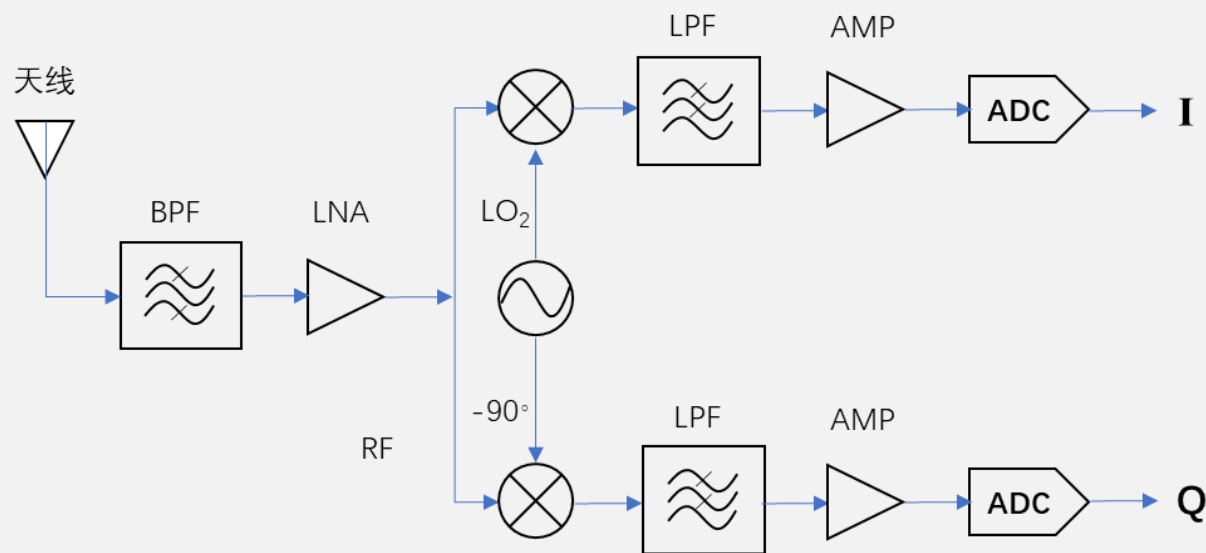
- 超外差结构和低中频结构在模拟域使用带通滤波选择频带，而带通滤波器参数设定的关键在于镜像抑制和相邻信道抑制之间的折衷。
- Q值（中心频率与带宽的比）一定时，中心频率增加，镜像信号与目标信号在频谱上距离增加，镜像信号得到有效抑制。同时带宽随之增大，滤波器分辨率降低，对于相邻信道的抑制减弱。
- 反之，中心频率减小会导致镜像干扰增强，相邻信道的干扰减弱。



软件无线电结构

零中频结构:

- 舍去中频处理部分, 射频信号依次通过带通滤波器和放大器进行频带选择和低噪声放大, 然后直接通过I/Q解调器将射频信号直接下面变频到基带, 对基带信号进行低通滤波, 放大处理, 最后利用ADC进行采样, 获得I/Q信号。

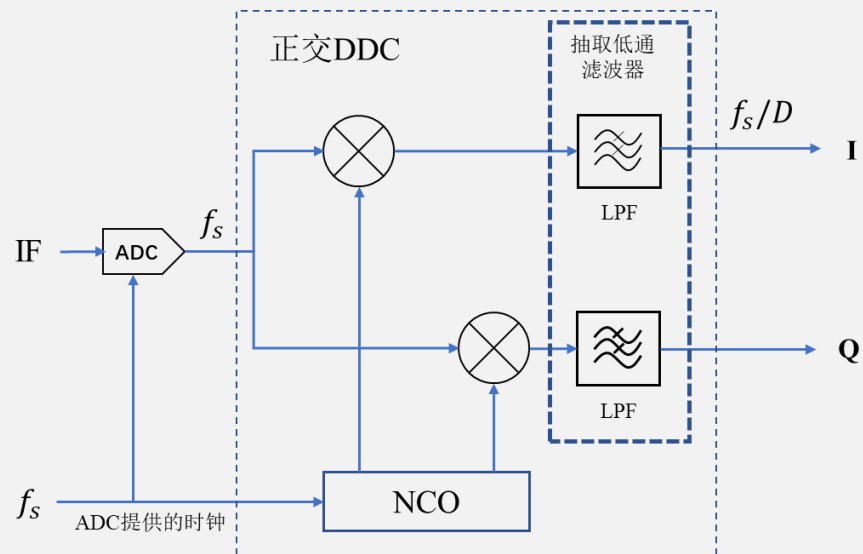


零中频结构

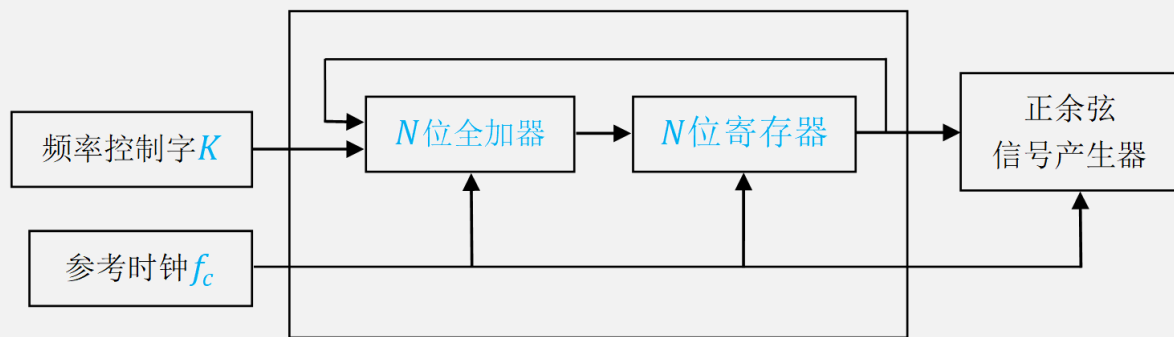


目录

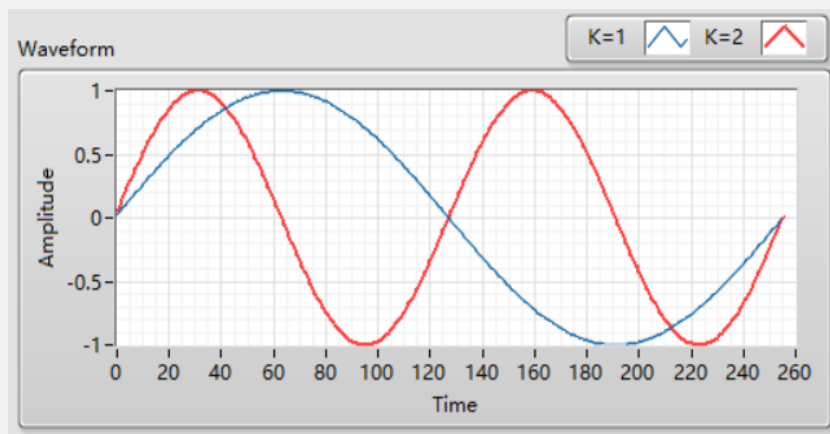
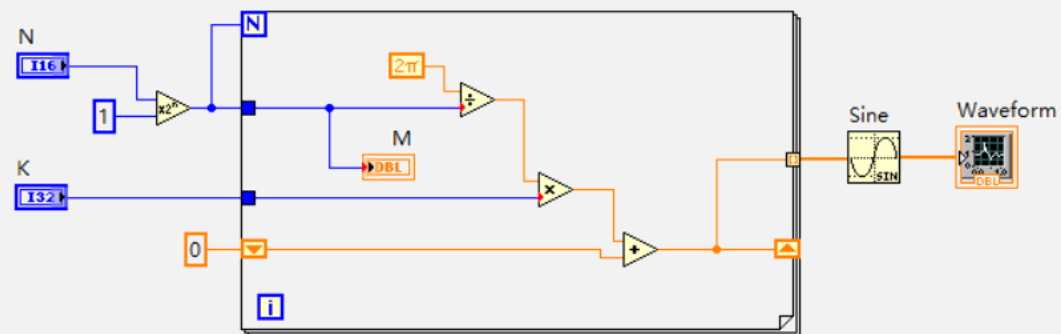
- 软件无线电结构
- 数字下变频器
- 抽取与内插
- 数字滤波器



数字振荡器



NCO结构框图



数字振荡器的输出



数字振荡器

- 数字振荡器（NCO）提供本地震荡，由硬件上的时钟晶体产生频率可控的正余弦信号。
- 一般使用查表法，预先将不同频率的正余弦值按对应的相位存储，构成一个波形储存器，当需要使用时，读取储存设备。



数字混频器

- 数字混频器的作用是将数字中频信号搬移到基带。从硬件实现的角度来看，数字混频就是将NCO产生的数字正余弦信号与数字中频信号相乘，然后通过数字滤波器，得到数字基带信号。

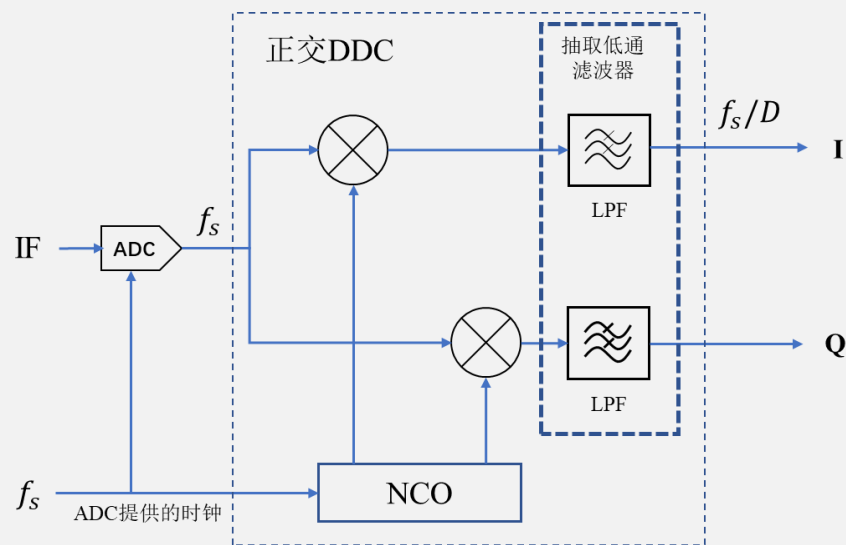
$$I = \frac{\cos(\varphi(nT_s))}{2} + \frac{\cos(2 \times 2\pi f_c nT_s + \varphi(nT_s))}{2}$$

$$Q = -\frac{\sin(\varphi(nT_s))}{2} + \frac{\cos(2 \times 2\pi f_c nT_s - \varphi(nT_s))}{2}$$



抽取低通滤波器

- 数字低通滤波器的主要功能是滤除混频后信号的高频部分。对采样后的信号进行了扛混淆操作，抑制不需要的信号，使最后的输出信号能够正常输出。

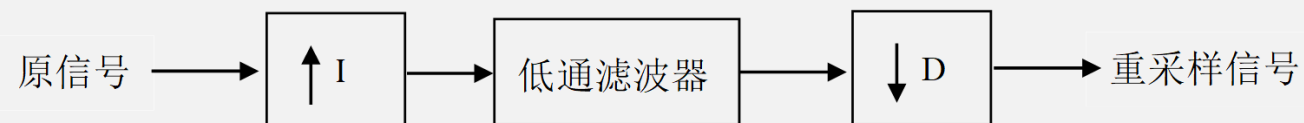


- 信号滤波之后，对信号进行采样率转变。将滤波结构和抽取结构结合在一起可以极大地节省硬件资源，在实际操作中，往往同时实现这两个操作。



目录

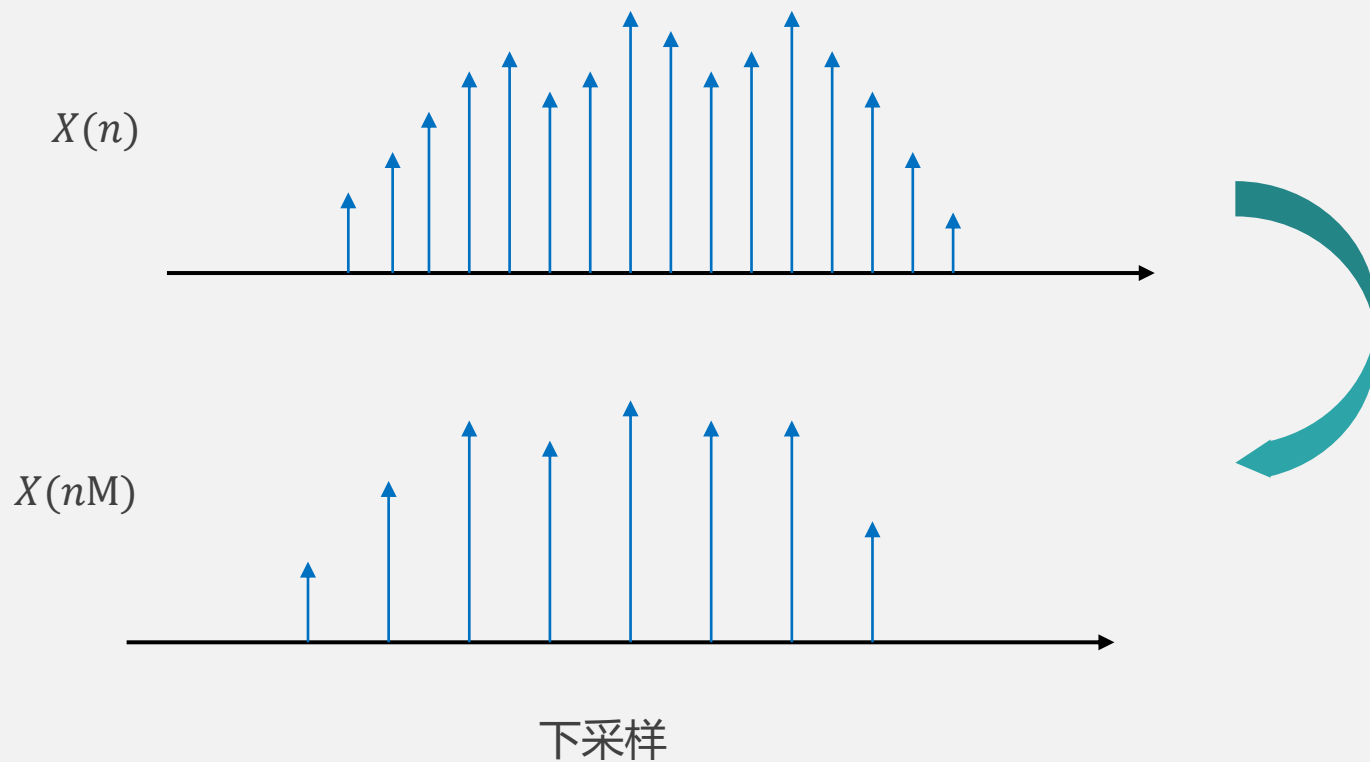
- 软件无线电结构
- 数字下变频器
- 抽取与内插
- 数字滤波器





抽取与内插

- 采样率变换是数字下变频流程的关键。通过降低采样率，我们就能降低 A/D 后的数据流速率，减小硬件的压力。





带通采样定理

- 如果信号的频率分布在某一有限的频带(f_L, f_H)上时, 按照Nyquist低通采样定理进行采样, 采样频率将会非常的高。带通采样定理可以解决这一问题。
- 带通采样定理: 设一个频率带限信号 $x(t)$, 如果其采样速率 f_s 满足:

$$f_s = \frac{2(f_L + f_H)}{2n + 1} = \frac{4f_0}{2n + 1}$$

- 式中, n 取能满足 $f_s \geq 2(f_H - f_L) = 2B$ 的最大整数 $(0, 1, 2, \dots)$ 。
- 用 f_s 进行等间隔采样所得到的信号采样值 $x(nT_s)$ 能准确的确定原信号 $x(t)$ 。



带通采样定理的条件

- 只允许在其中的一个频带上存在信号，不允许在不同的频带上同时存在信号，否则将引起混叠。为了能使用最低采样速率即： $f_s = 2B$ ， B 为信号带宽， f_s 是带通信号的中心频率，必须满足：

$$f_0 = \frac{2n+1}{2} B$$

$$\text{或} \quad f_L + f_H = (2n+1)B$$

- 信号的最高频率加上最低频率是带宽的整数倍。



整数倍抽取

- 从原始采样序列 $x(n)$ 中，每隔 $D-1$ 个数据取一个采样重新形成的一个序列 $x_D(m)$:

$$x_D(m) = x(nD)$$

- 在上式中， D 为正整数，称为抽取因子。 $x(n)$ 和 $x_D(m)$ 都是原始信号 $x(t)$ 采样得到的序列。 f_s 表示 $x(n)$ 的采样率，
- 根据采样定理， $x(n)$ 不产生频谱混叠的带宽是： $f_s/2$
- 设 f_D 表示 $x_D(m)$ 的采样率，则 $f_D = f_s/D$ ， $x_D(m)$ 不产生频谱混叠的带宽是： $f_s/(2D)$

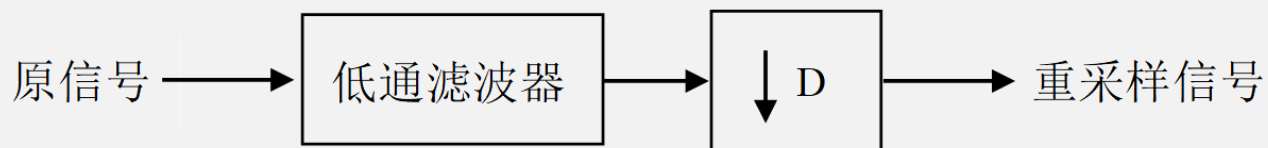


整数倍抽取

- 从原始采样序列 $x(n)$ 中，每隔 $D-1$ 个数据取一个采样重新形成的一个序列 $x_D(m)$:

$$x_D(m) = x(nD)$$

- 抽取序列的频谱由抽取前原序列频谱经频移和 D 倍展宽后的频谱叠加构成，为了使抽取后的频谱不发生混叠，需要在抽取之前，对信号进行抗混叠处理。整数倍抽取结构，



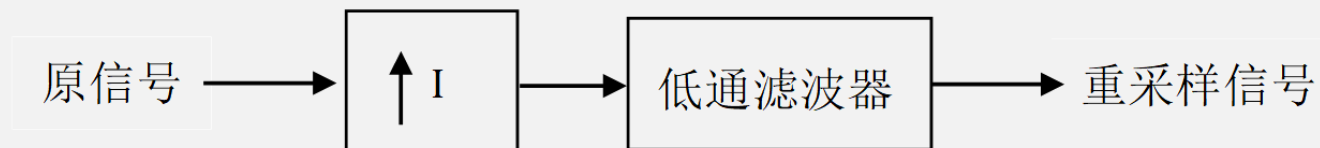


整数倍内插

- 在两个原始采样点之间插入 $(I - 1)$ 个零，设内插后新形成的序列为 $x_I(m)$:

$$x_I(n) = \begin{cases} x\left(\frac{n}{I}\right), & n = 0, \pm I, \pm 2I, \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

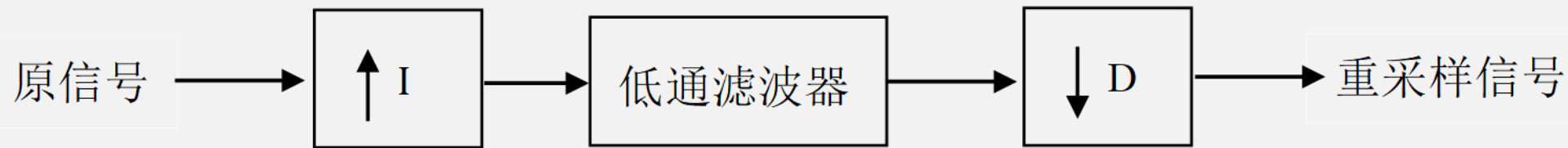
- 内插后的信号频谱相当于原始信号经过 I 倍压缩后得到的频谱，频谱中除了含有基带分量外，还含有原始信号的高频成分，因此，为了能恢复原始信号，内插后通常要进行低通滤波。整数倍内插结构：





分数倍速率变换

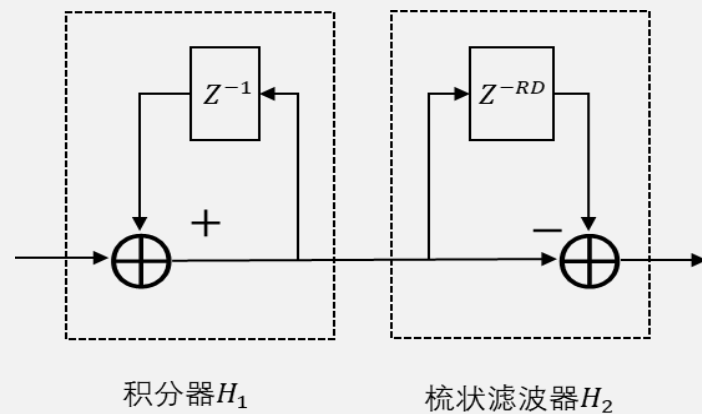
- 在实际的数字信号处理中，抽取和内插往往是非整数倍变换的情况，例如，在FM解调实验中，需要将200kS/s的I/Q采样率转换成44.1kS/s的WAV采样速率，就需要进行分数倍的变换。设分数倍变换比 $R = D/I$ ，在速率变换时，一般先进行内插，然后进行抽取处理，





目录

- 软件无线电结构
- 数字下变频器
- 抽取与内插
- 数字滤波器





FIR数字滤波器

- 有限冲激响应滤波器是一类对输入信号幅度和相位产生影响并且单位冲激响应在有限时间内衰减为零的器件。有限冲激响应滤波器有 ①稳定性 ②线性相位特性两个优点。
- 稳定性：系统在扰动消失后,由初始偏差状态恢复到原平衡状态的性能。满足稳定性的充要条件是系统具有有限长度的单位冲激响应。
- 线性相位特性：系统对输入函数的各频率组分做正比于频率的相移，输入函数经过具有线性相位特性的系统后，波形不会产生失真。



CIC滤波器

- 积分梳状滤波器（CIC）是一种常用的低通滤波器，它由两个部分组成:①积分器②梳状器组成。
- CIC的单位冲激响应是：

$$h[n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq RD - 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

- D 表示降采样的倍数， R 表示微分器延迟。



CIC滤波器

- 对单位冲激响应进行z变换，得到CIC的系统函数，如下所示：

$$H(z) = \frac{1}{(1 - z^{-1})} \cdot (1 - z^{-(RD)})$$

- D被称作是CIC滤波器的设计参数，R被称为CIC滤波器的微分延迟。在CIC滤波器的各级运算中，D和R以乘积的形式出现，等于单位冲激响应的序列长度N：

$$N = DM$$

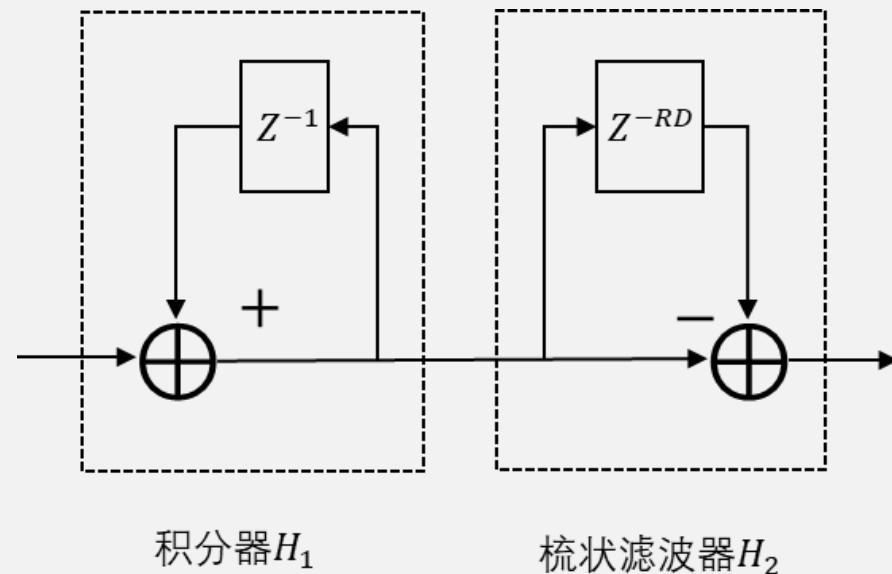


CIC滤波器

- 系统函数 $H(z)$ 可以分解成两个部分，一个部分来自于系统函数的分子，另一个部分来自系统函数的分母部分：

$$H(z) = H_1(z) \cdot H_2(z)$$

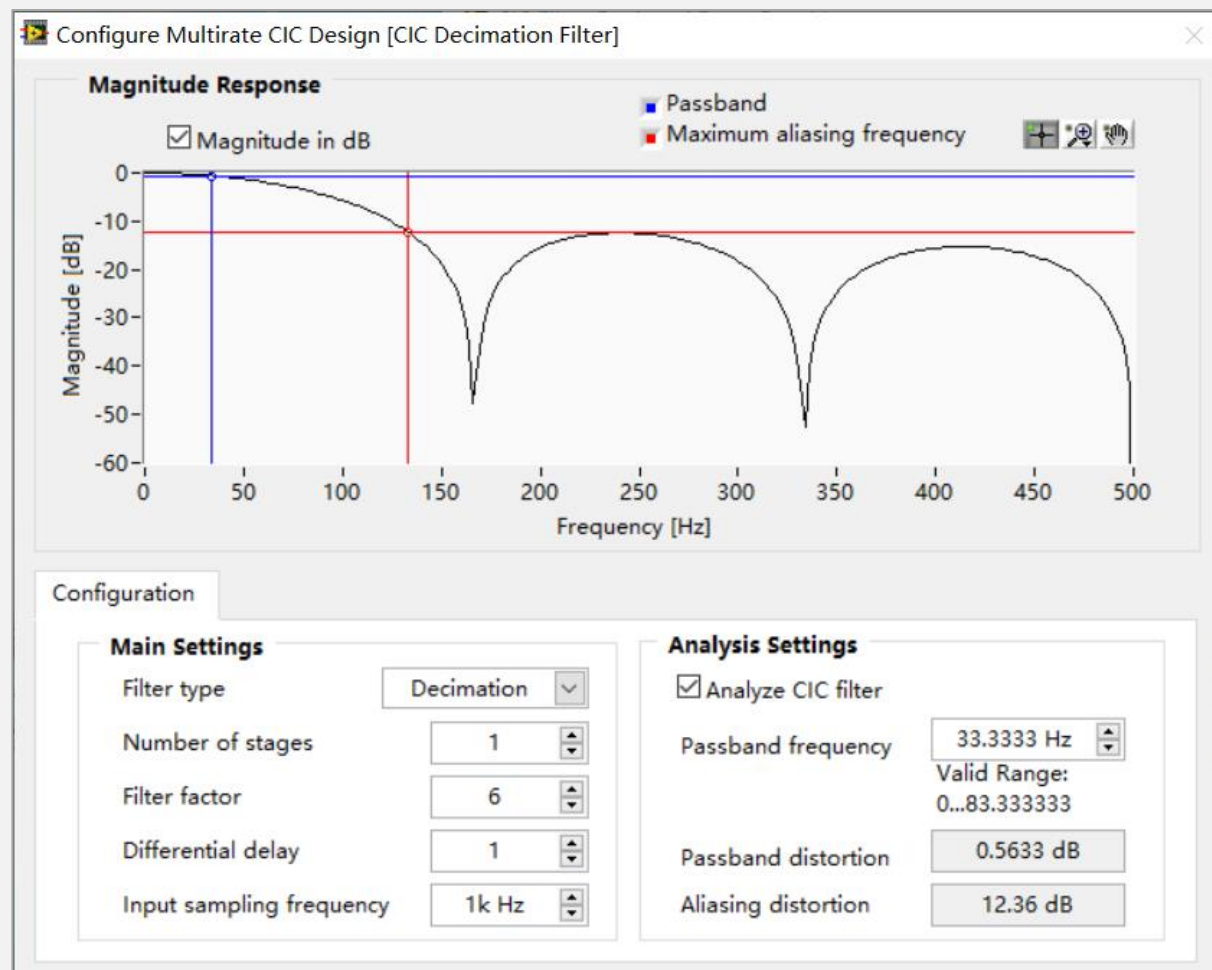
$$H_1(z) = \frac{1}{(1 - z^{-1})}, \quad H_2(z) = 1 - z^{-RD}$$





CIC滤波器幅频响应

- 通过数字滤波器设计工具包 (Digital Filter Design Toolkit) 中的CIC抽取滤波器模块Decimation Filter, 就可以设计CIC滤波器。
- 设置降采样的倍数D (Filter Factor) 为6, 微分器延迟R (Differential delay) 为1, 其余参数值默认。单级CIC滤波器的幅频特性曲线如图所示。





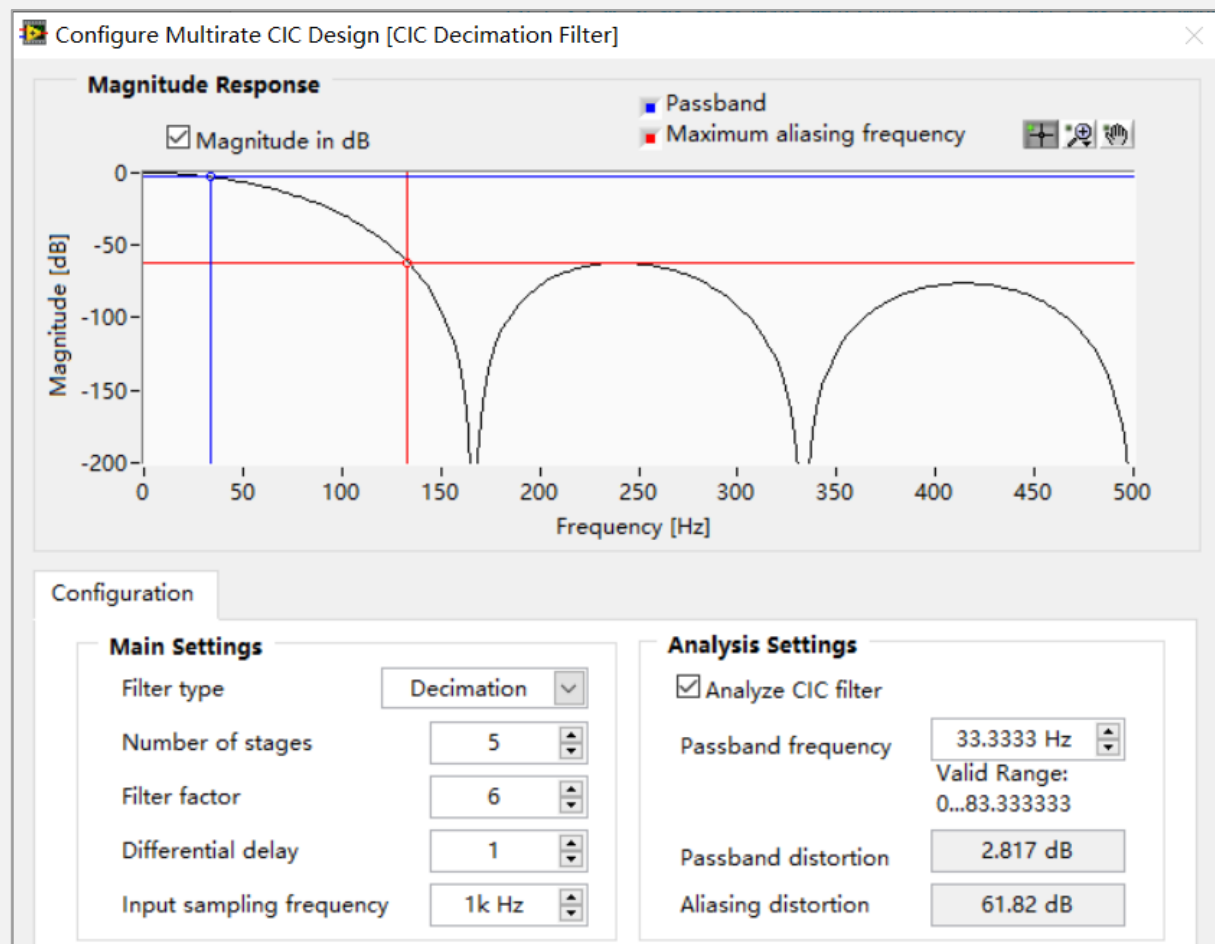
多级CIC滤波器

- 单级CIC滤波器的低通滤波效果并不理想。将多个CIC滤波器级联起来可以提升CIC滤波器的低通滤波性能。 N 个CIC滤波器级联而成的低通滤波器为：

$$H(z) = \left(\frac{1}{(1 - z^{-1})} \cdot (1 - z^{-RD}) \right)^N$$

多级CIC滤波器

- 级联数 (Number of Stages) 设置为5, 将获得一个5级CIC滤波器, 幅频响应特性曲线如图所示。
- 对比单级CIC滤波器, 可以明显看出, 经过5级级联后, 低通滤波器的旁瓣衰减明显加快, 第一旁瓣相对于主瓣的抑制为62.81dB。
- 显然级联数N越大, 低通滤波效果越好。
- CIC滤波器级数越多, 低通滤波效果越好, 但滤波器通带却越窄, 且硬件实现的开销也随之增大。

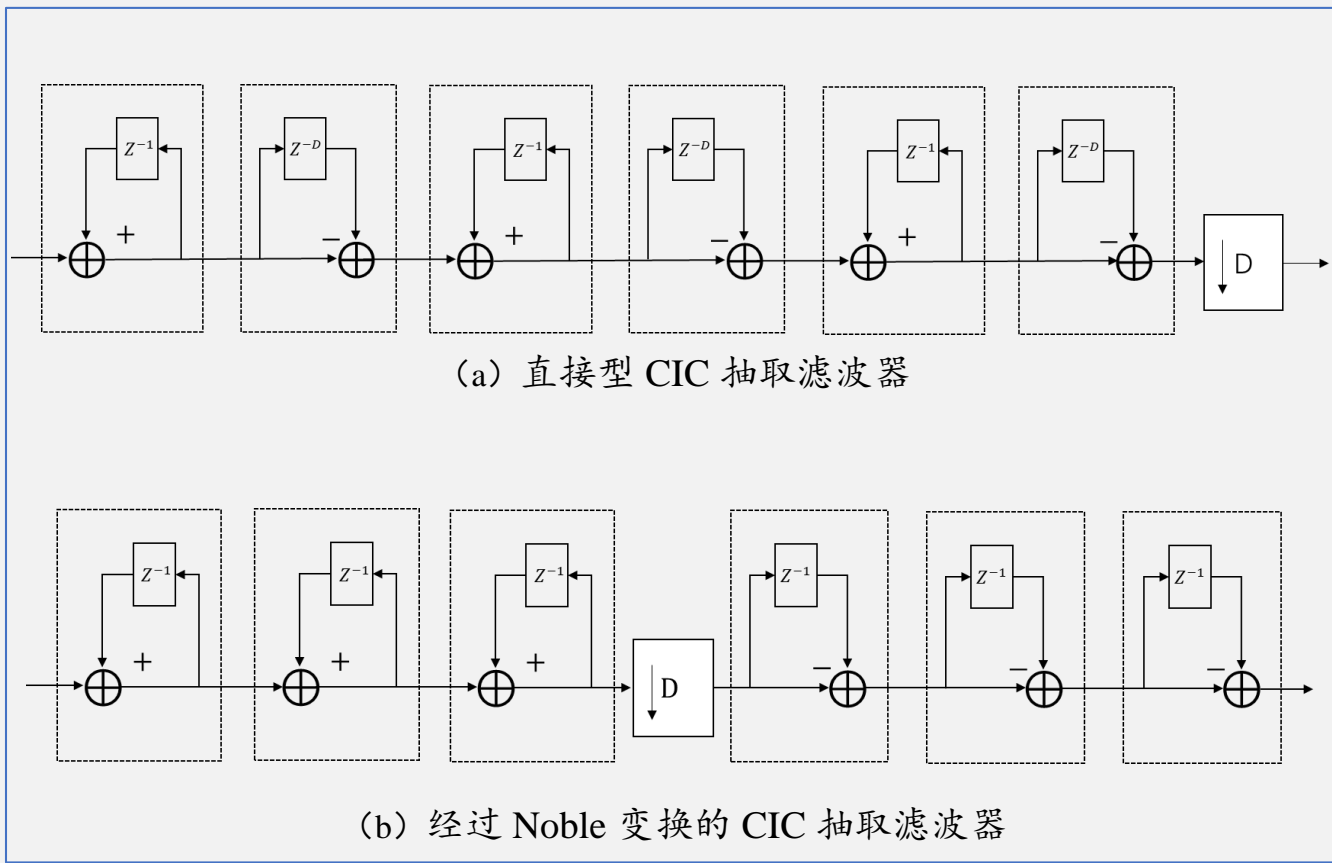


Noble恒等式

- 实际应用中通常会采用多级CIC方案，直接型的多级方案资源消耗较大，使用经Noble变换的Hoggenauer滤波器来实现抽取或者内插，可以有效降低滤波器的实现开销，

$$F(z^D)(\downarrow D) = (\downarrow D)F(z)$$

- 调整抽取处理的顺序可以有效地减少硬件的复杂程度，并且可有效降低滤波器的阶数。





HB滤波器

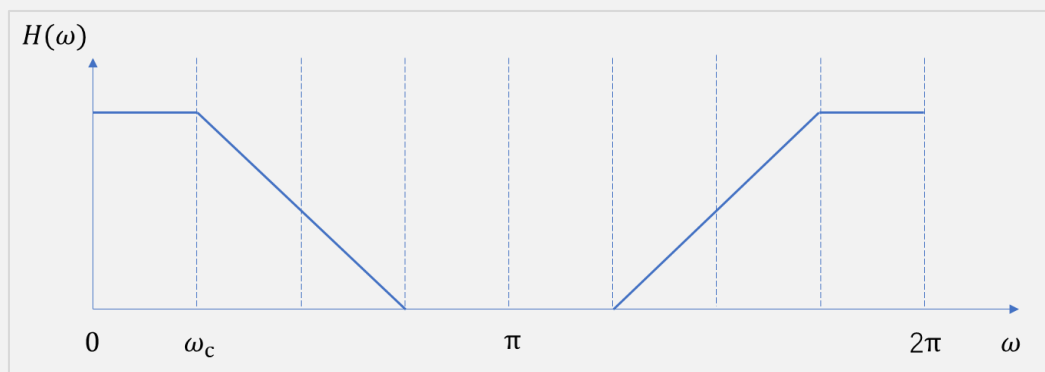
- 半带滤波器 (HB, Halfband) 是另一种类型的数字低通滤波器，相比于CIC低通滤波器，HB滤波器对于阻带的抑制效果更好。在多采样率滤波器的实现过程中，将HB滤波器放置在CIC滤波器之后，可以增强对阻带的抑制。
- 设N表示HB滤波器的长度，其单位冲激响应如下：

$$h_{even}[n] = h[N - n - 1], 0 \leq n \leq N - 1$$

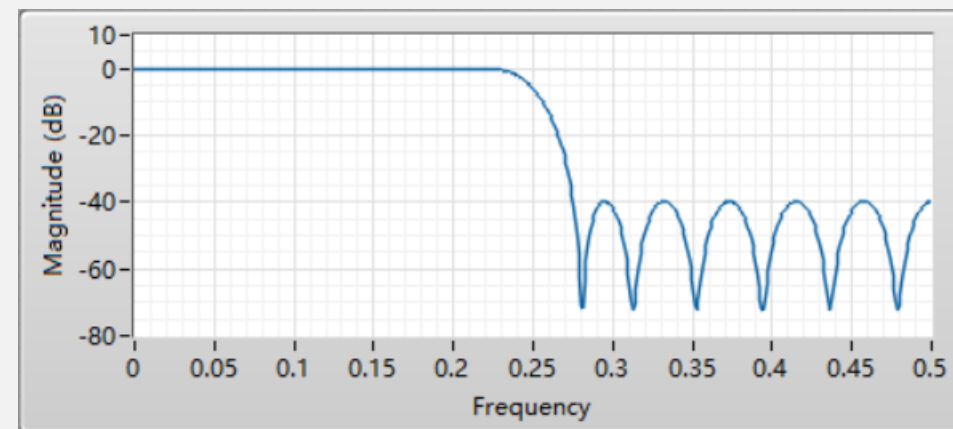
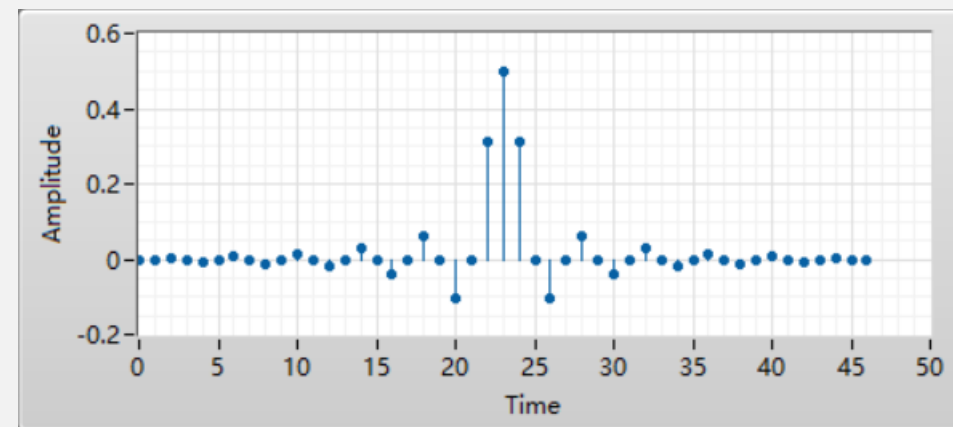
$$h_{odd}[n] = \begin{cases} 0.5 & n = \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$



HB滤波器



半带滤波器的频谱



半带滤波器的幅频特性曲线



HB滤波器

➤ HB滤波器拥有三个特点：

- ① 对称
- ② 接近一半的滤波器系数精确为零
- ③ 阻带抑制程度大。

➤ 由于采取了通带阻带对称的结构，HB滤波器只适用 2^M 倍变频处理，

➤ 由于其阻带系数为0，能极大降低运算量通常作为多级滤波器最后一级使用。



- Question ?





【通信新说】



腾讯课堂