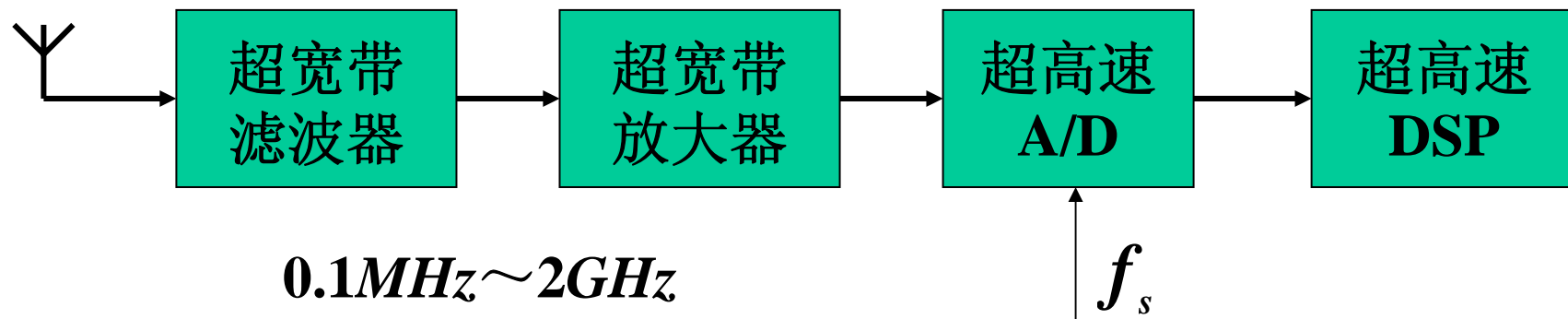


第四章 软件无线电接收机

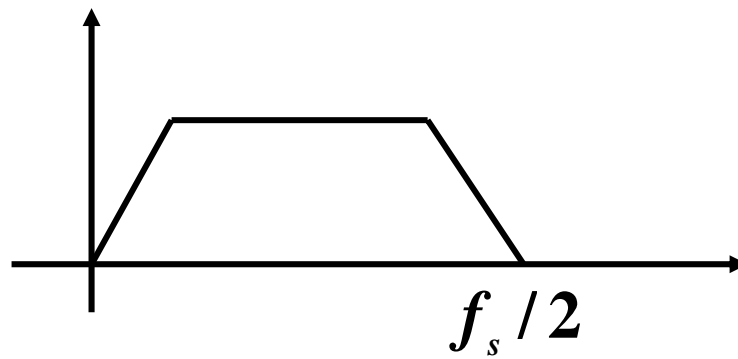
1. 软件无线电的三种结构形式

1.1 射频全宽开低通采样软件无线电结构

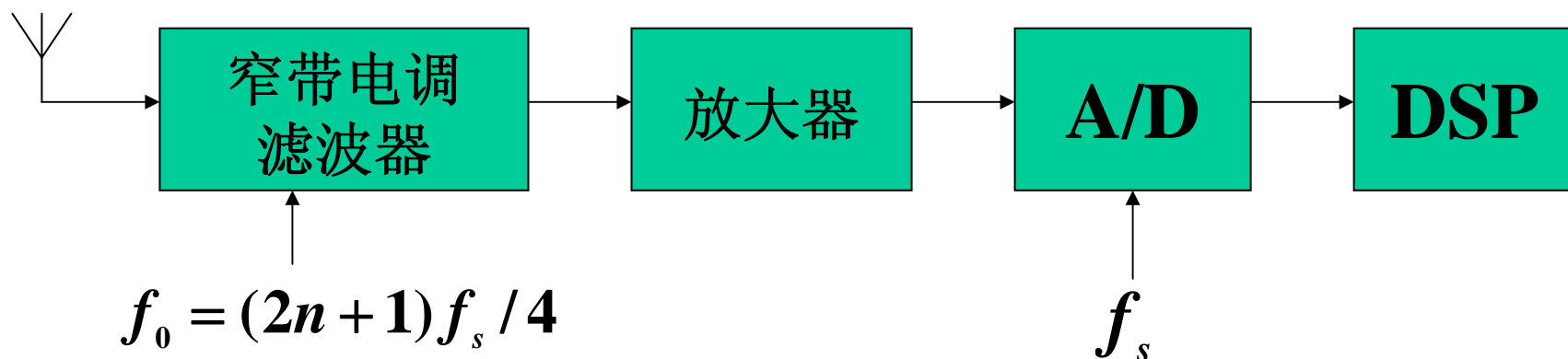


$f_s > 2f_{\max}$ A/D无法实现

等效数字
谱:

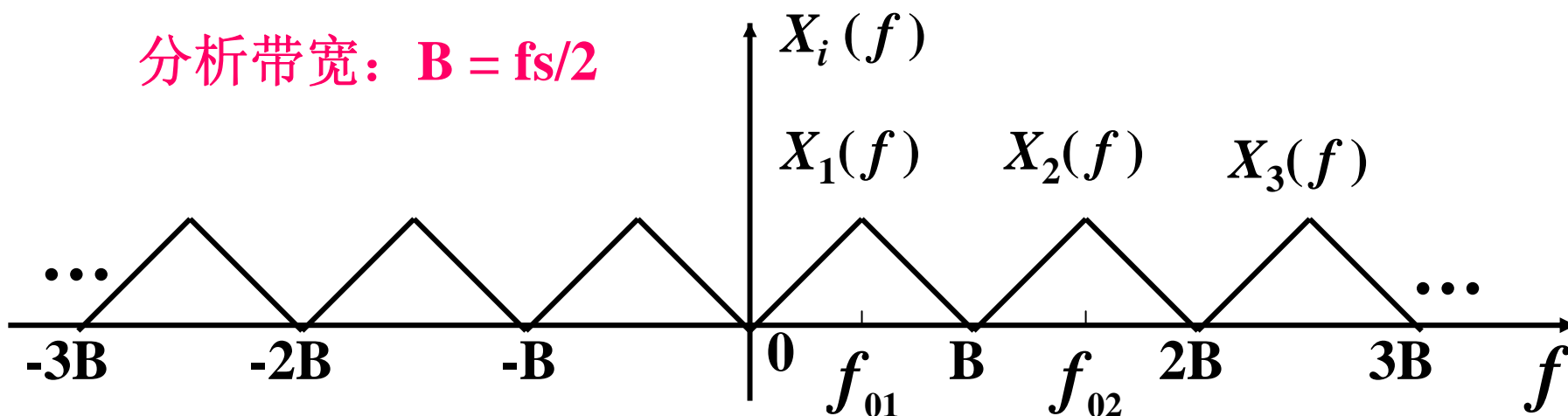


1.2 射频直接带通采样软件无线电结构

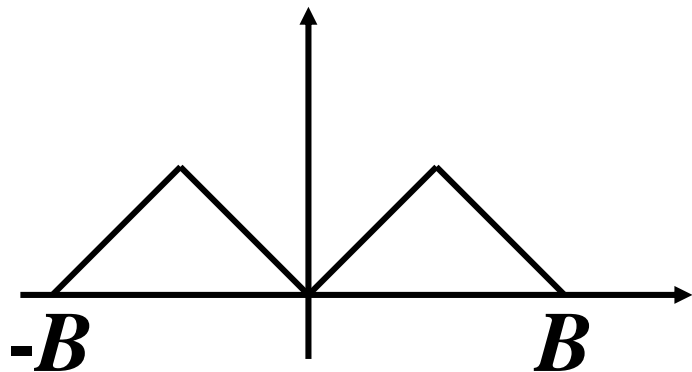


$$\Delta f_0 = f_s / 2$$

分析带宽: $B = f_s / 2$

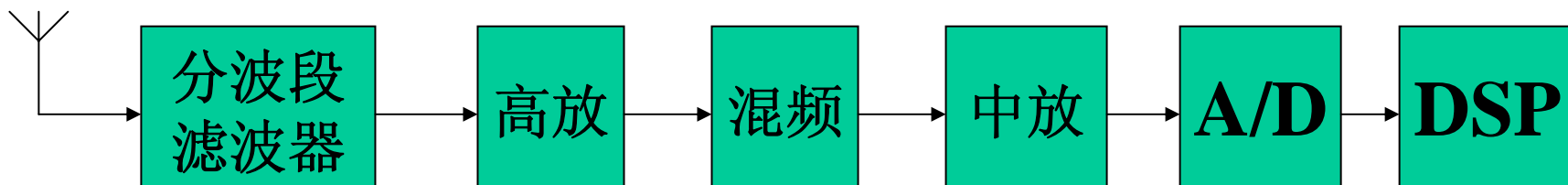


对 $0 \sim 2\text{GHz}$ 的整个频段分段滤波后以 $f_s = 2B$ 进行带通采样，每个频带都被移到 $0 \sim B$ 的频段上。



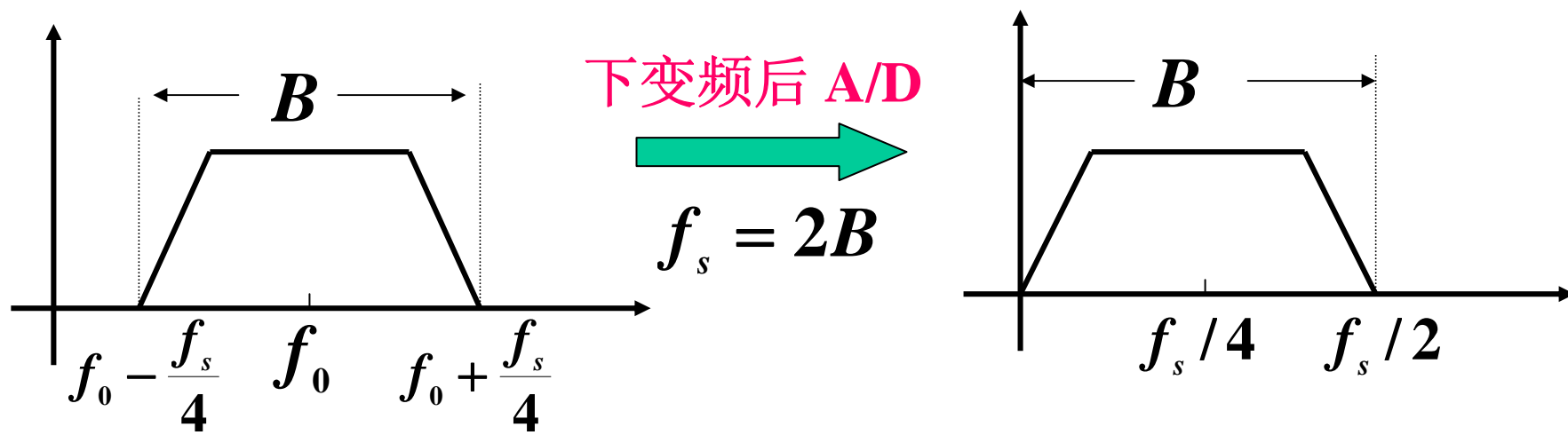
这种方法降低了A/D转换器的采样率，但对A/D转换器的工作带宽要求很高。

1.3 宽带中频带通采样软件无线电结构



$$f_0 = \frac{2n+1}{4} f_s$$

下变频到中频（宽带中频）后采样，对A/D转换器的采样速率和工作带宽都降低了要求。



三种结构小结：

结构1:

对A/D采样速率和工作带宽要求最高，理想软件无线电结构。

结构2:

对A/D采样速率降低，但工作带宽要求不变（高），带通滤波后采样。

结构3:

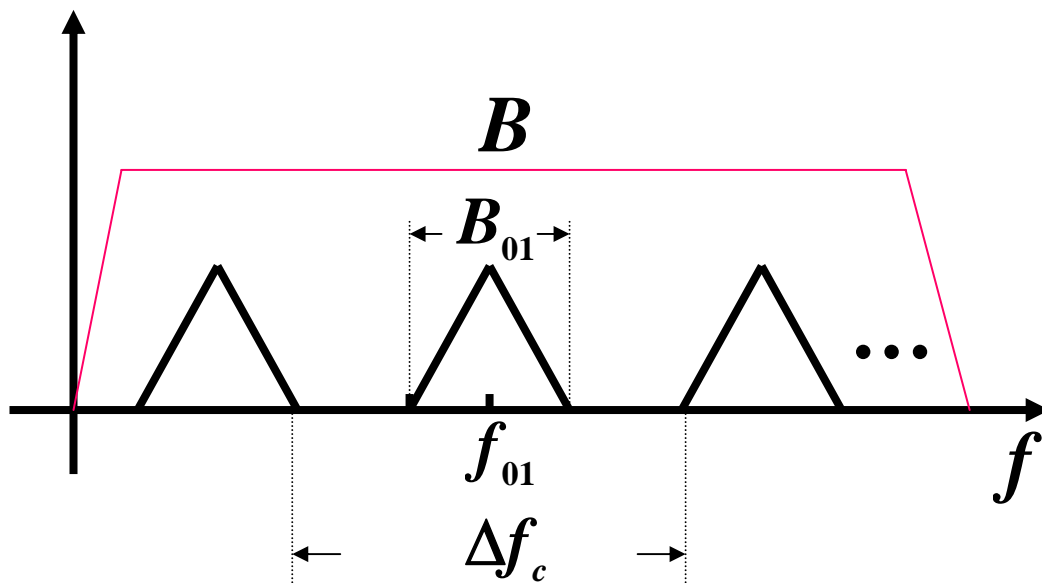
对A/D采样速率和工作带宽要求低，带通滤波后混频至中频再采样。

2. 单通道软件无线电接收机

2.1 数字混频式单通道接收机

(1) 正交解调

单通道接收机只对某一感兴趣的子信道进行接收解调。



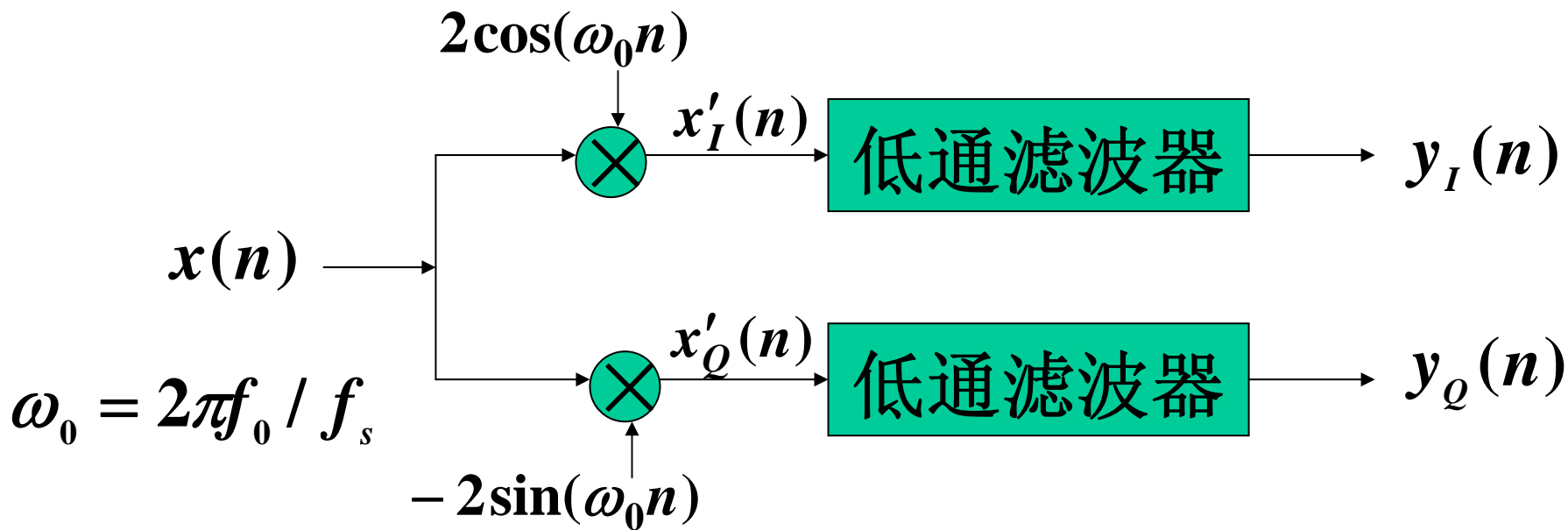
设对中心频率为 ω_0 ，带宽为 B_0 的子信道进行接收。

设该子信道的信号表示为：

$$x(n) = a(n)\cos(\omega_0 n + \theta(n))$$

经正交解调后得：

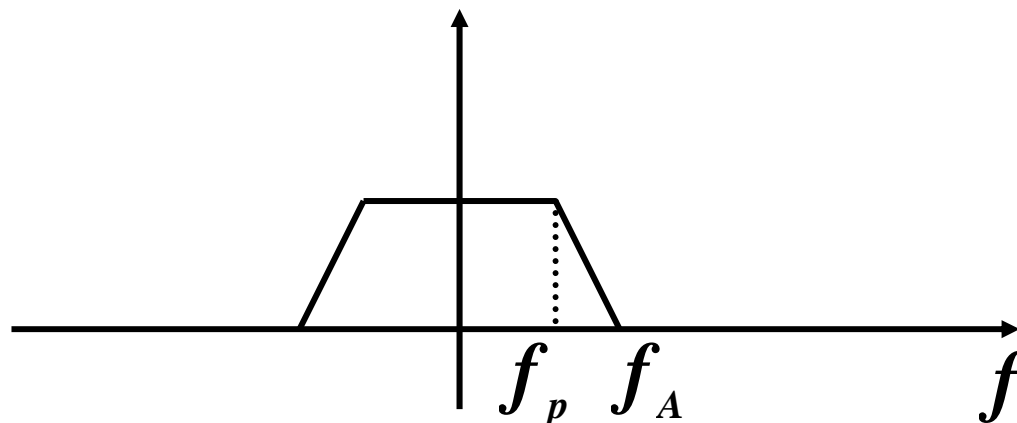
$$\begin{aligned} y(n) &= y_I(n) + jy_Q(n) \\ &= a(n)\cos(\theta(n)) + ja(n)\sin(\theta(n)) \end{aligned}$$



低通滤波器:

$$f_p = B_0 / 2$$

$$f_A = \Delta f_c / 2$$

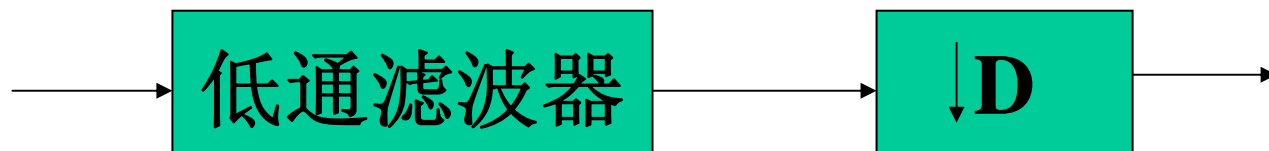


由于 $x(n)$ 的采样率很高($f_s > 2B$), 而 $x(n)$ 的本身带宽(B_0)较窄, 因此低通滤波器的阶数很大。

经过滤波后, $x(n)$ 的带宽(设为 f_A) $\ll f_s$, 所以要进行抽取, 以缓解后续DSP的压力。

抽取因子 $D = f_s / (2f_A)$ 。例如: $f_s = 80\text{MHz}$, $B_0 = 40\text{kHz}$, $\Delta f_c = 80\text{kHz}$, 则 $f_A = 40\text{kHz}$, $D = 1000$ 。

(2) 抽取的实现



(a) 多相滤波结构

D很大时，多相滤波结构实现仍然困难。

(b) 多级抽取结构



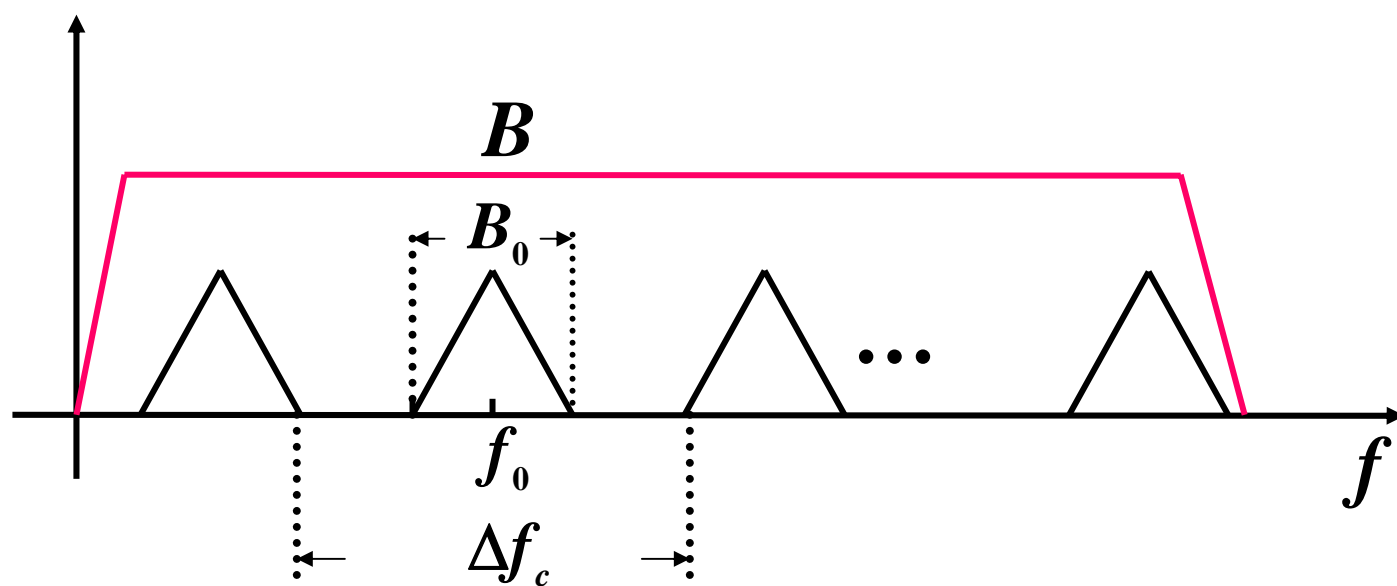
D_1

D_2

D_3

$$D = D_1 D_2 D_3$$

例子



$$f_s = 80\text{MHz}$$

$$B_0 = 40\text{kHz}$$

$$\Delta f_c = 80\text{kHz}$$

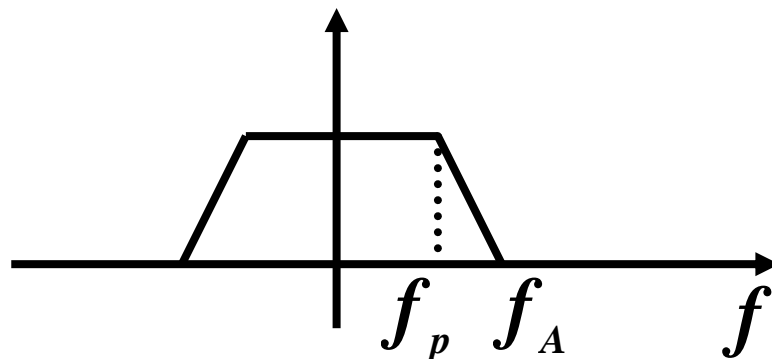
低通滤波

器:

$$f_p = B_0 / 2 = 20\text{kHz}$$

$$f_A = \Delta f_c / 2 = 40\text{kHz}$$

$$\text{抽取因子 } D = f_s / (2f_A) = 1000$$



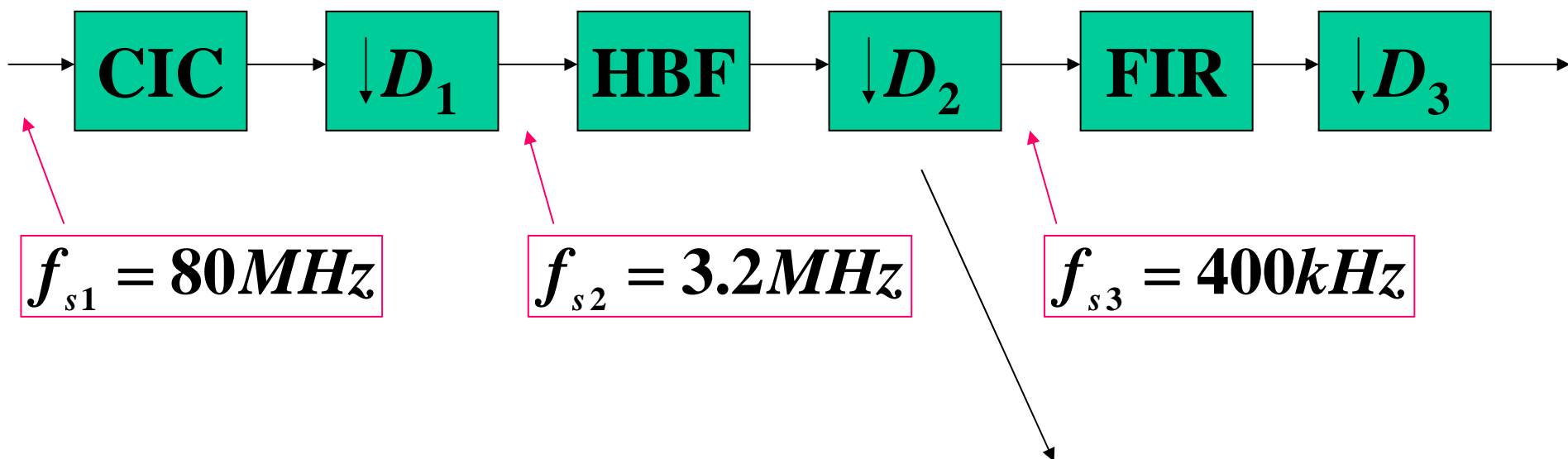
$$N \geq \frac{-20\lg \delta - 7.95}{14.36\Delta f / f_s}$$

$$\Delta f / f_s = (f_A - f_P) / f_s = 20\text{kHz} / 80\text{MHz}$$

$$\delta = 0.001$$

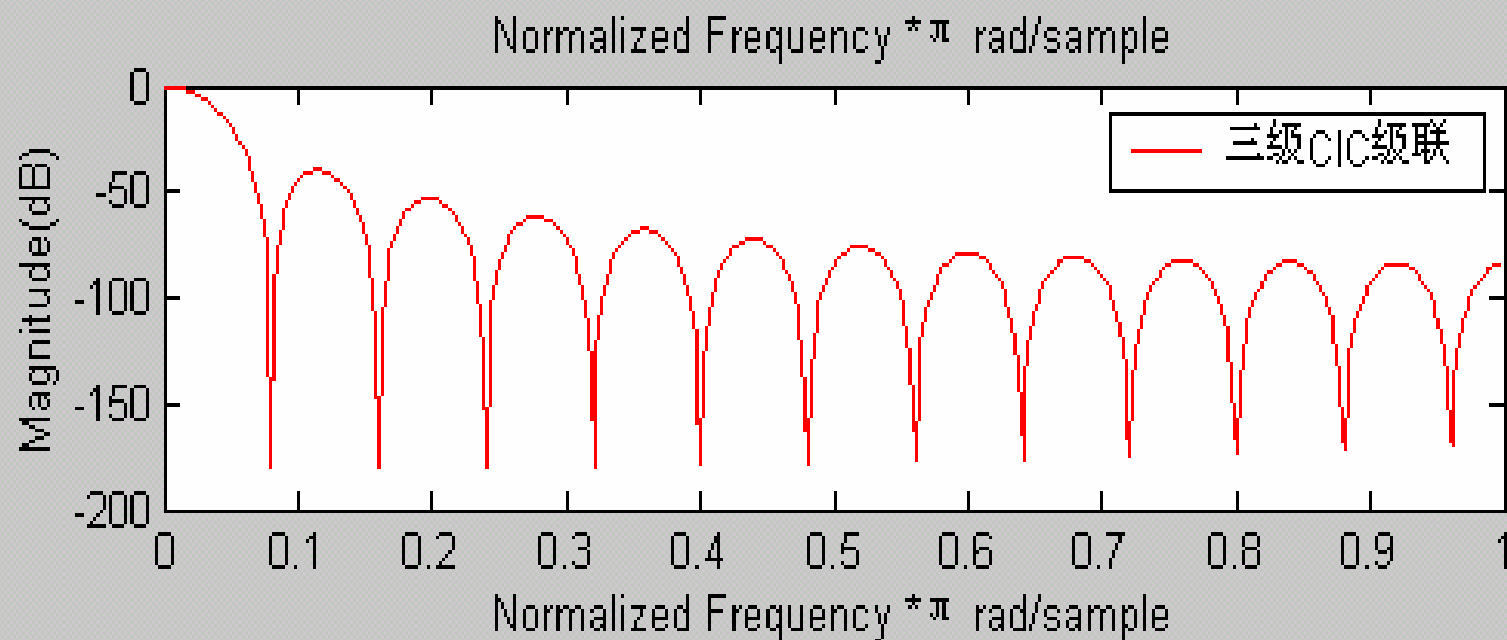
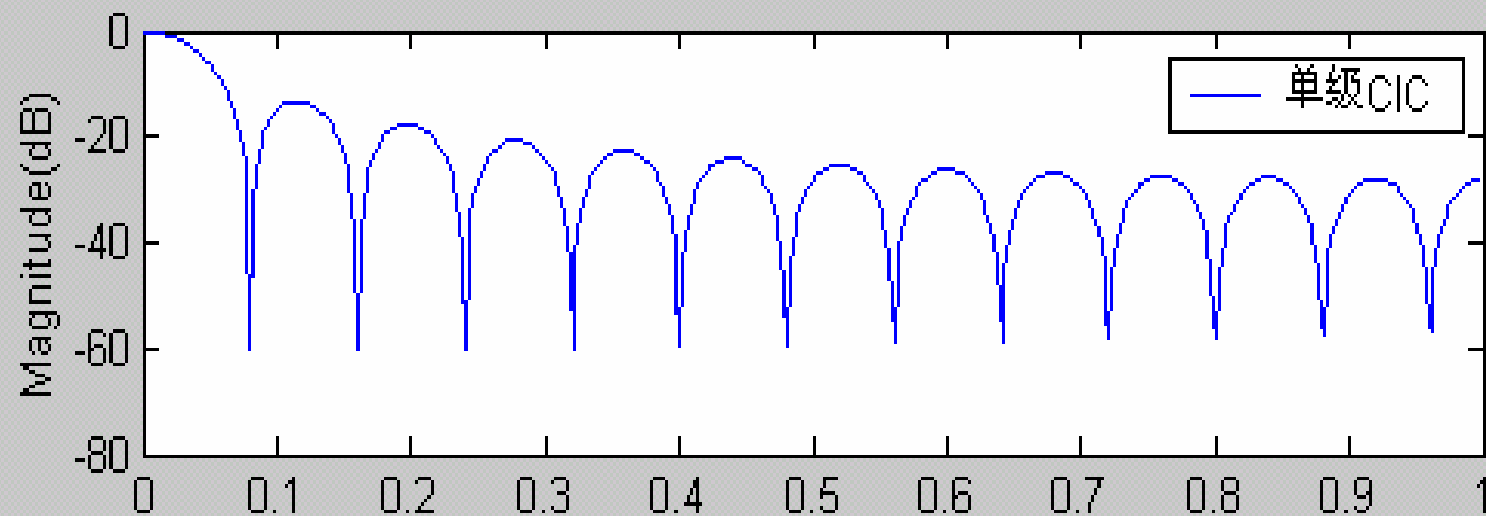
$$N \geq 14499$$

$$D = D_1 D_2 D_3 = 25 \times 8 \times 5$$

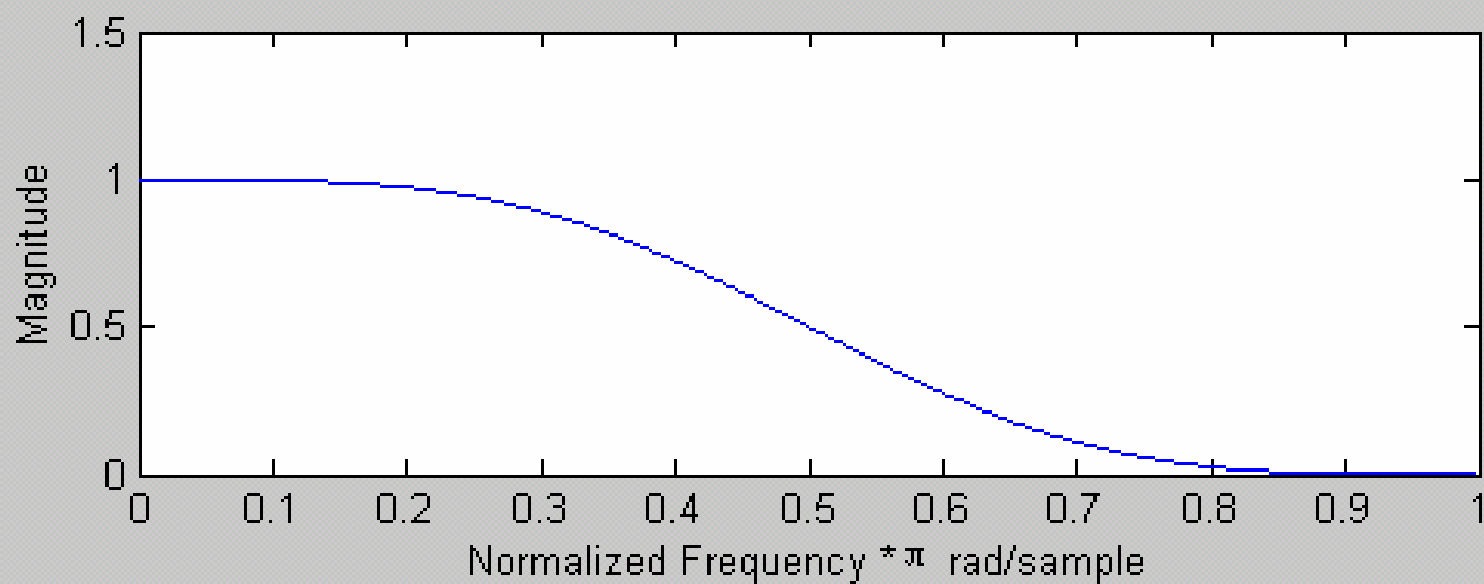
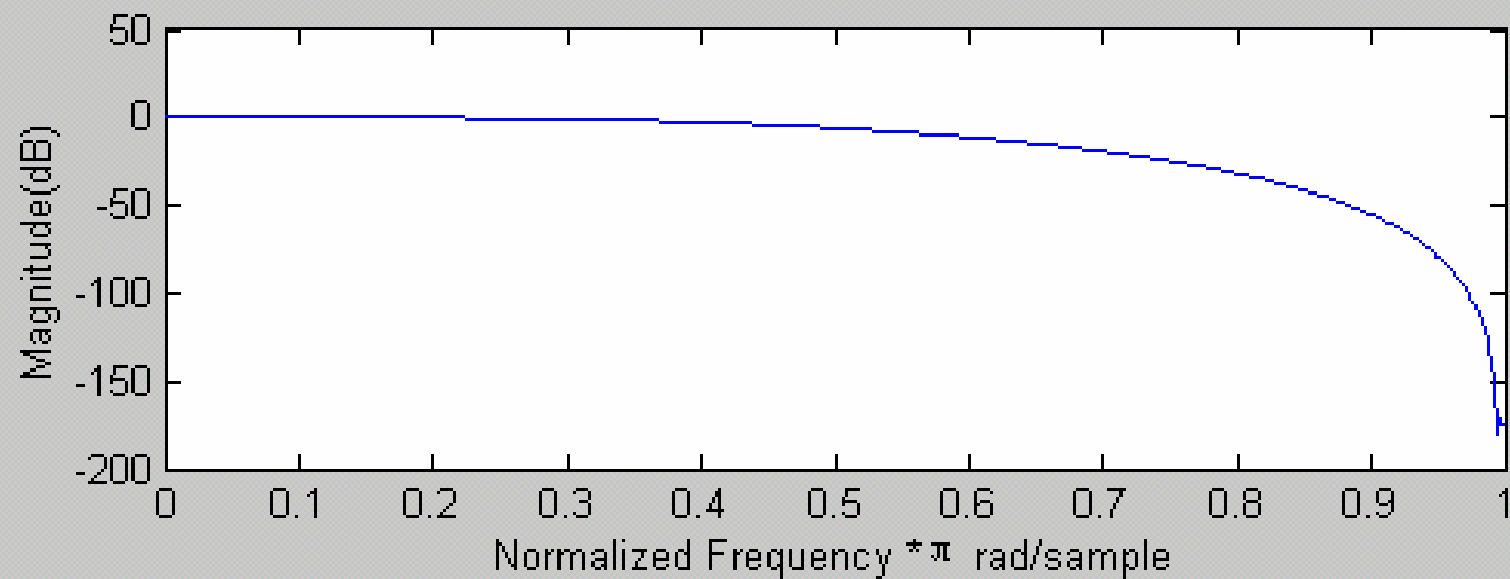


$$h(n) = \{-0.0313, 0, 0.2813, 0.5, 0.2813, 0, -0.0313\}$$

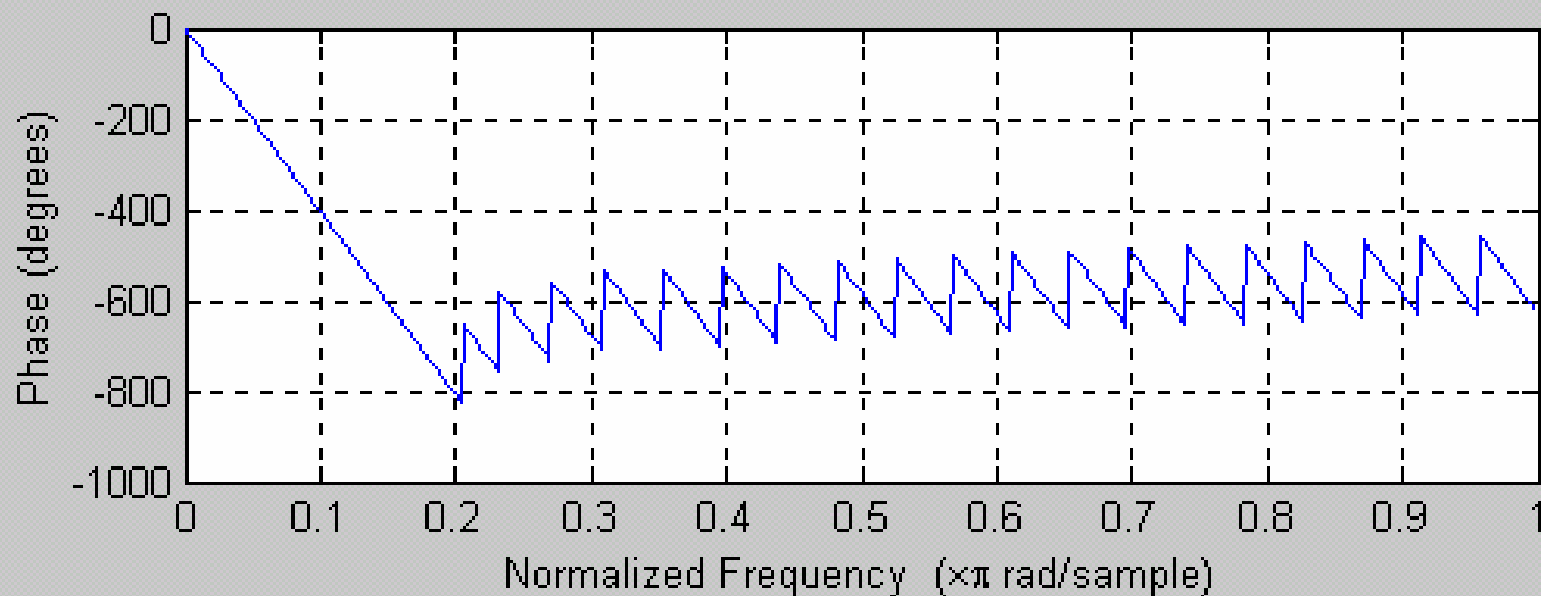
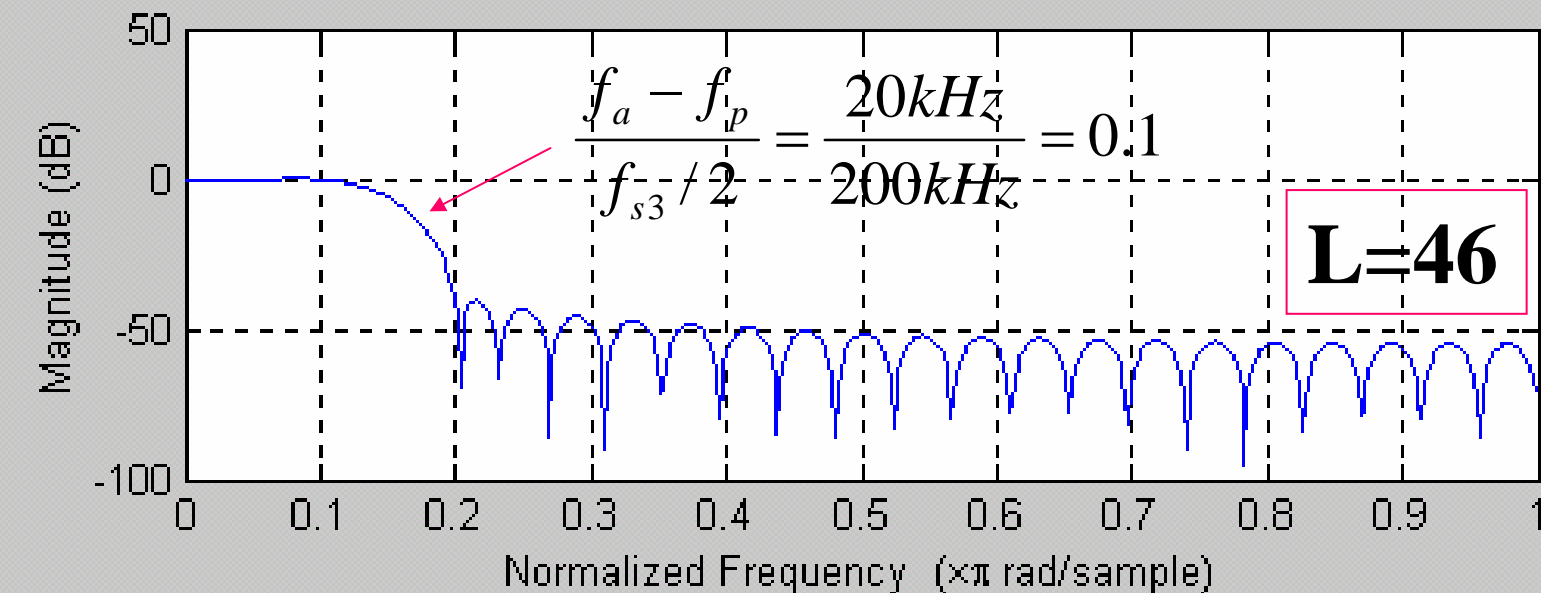
CIC低通滤波器的幅度响应

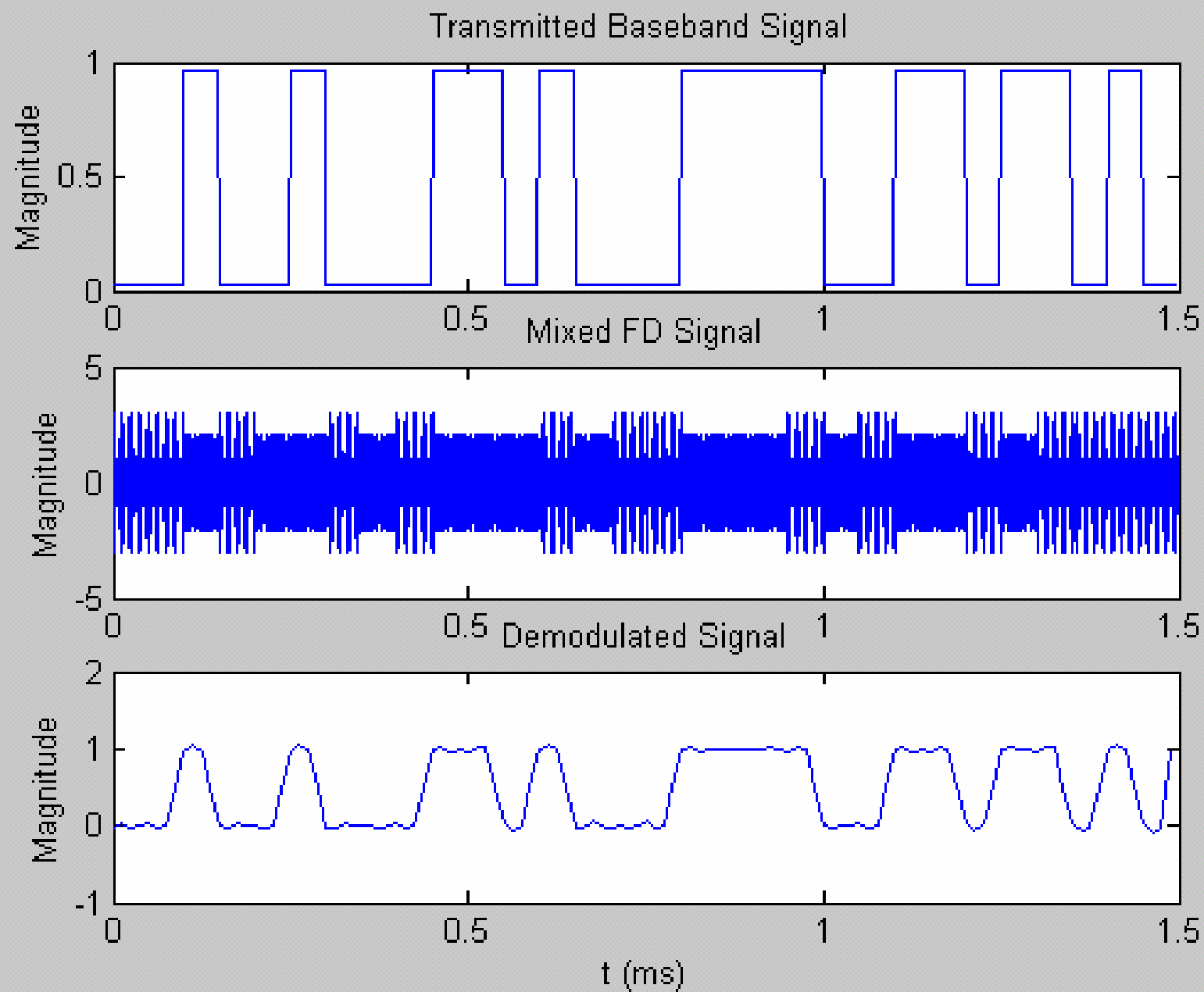


半帶低通滤波器的幅度响应



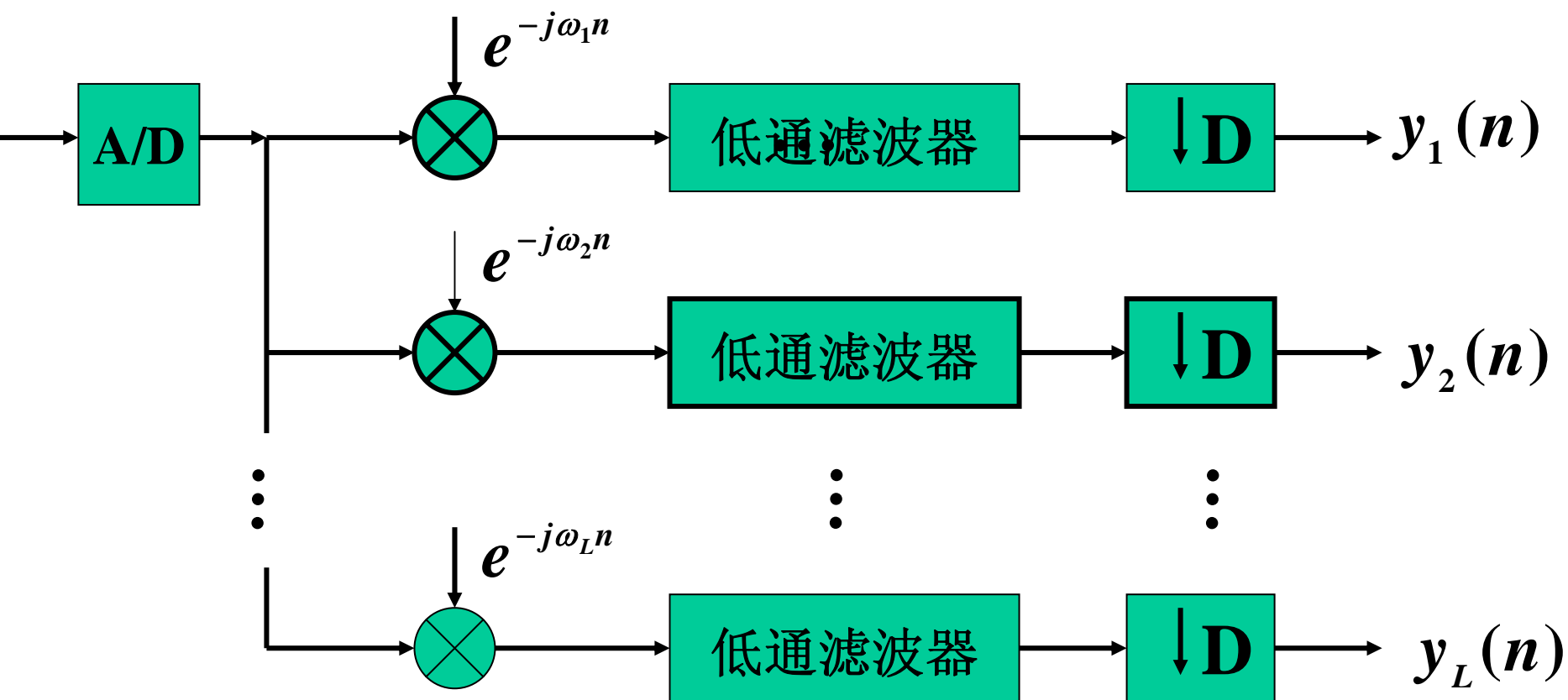
FIR低通滤波器的频率响应





3. 并行多通道软件无线电接收机

并行多通道软件无线电接收机是多个并联的单通道接收机来实现的， L 个本振频率分别对准A/D采样带内的 L 个子信道的中心频率。

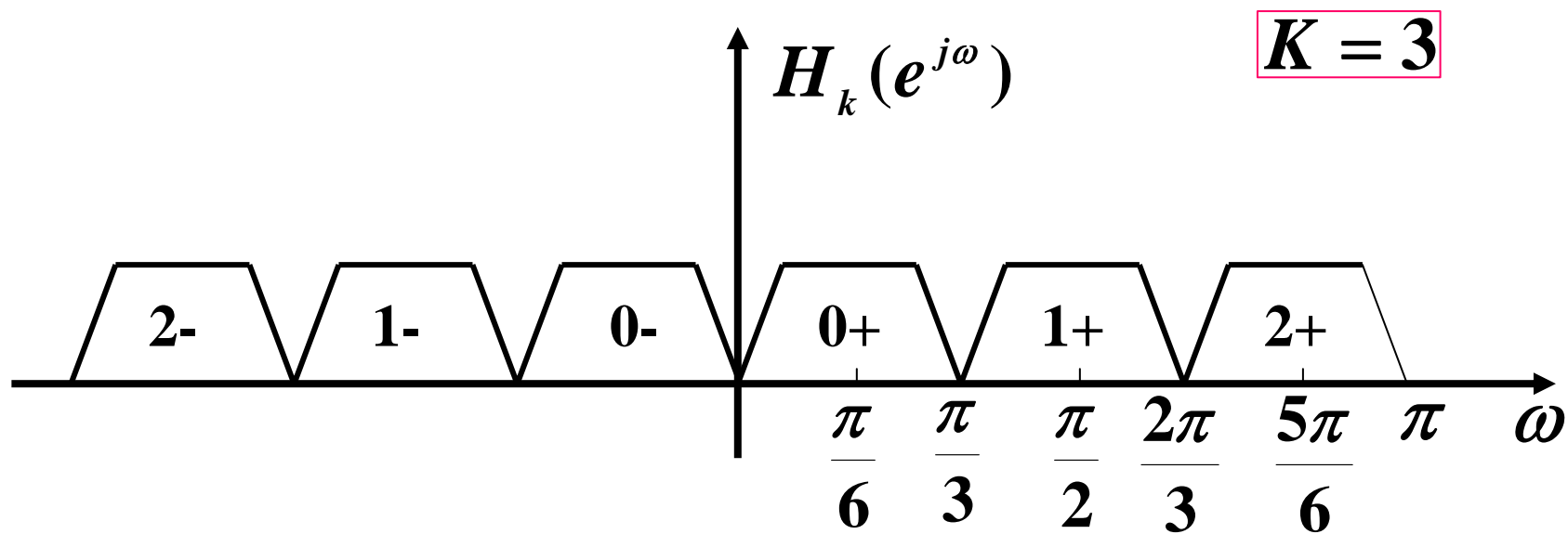
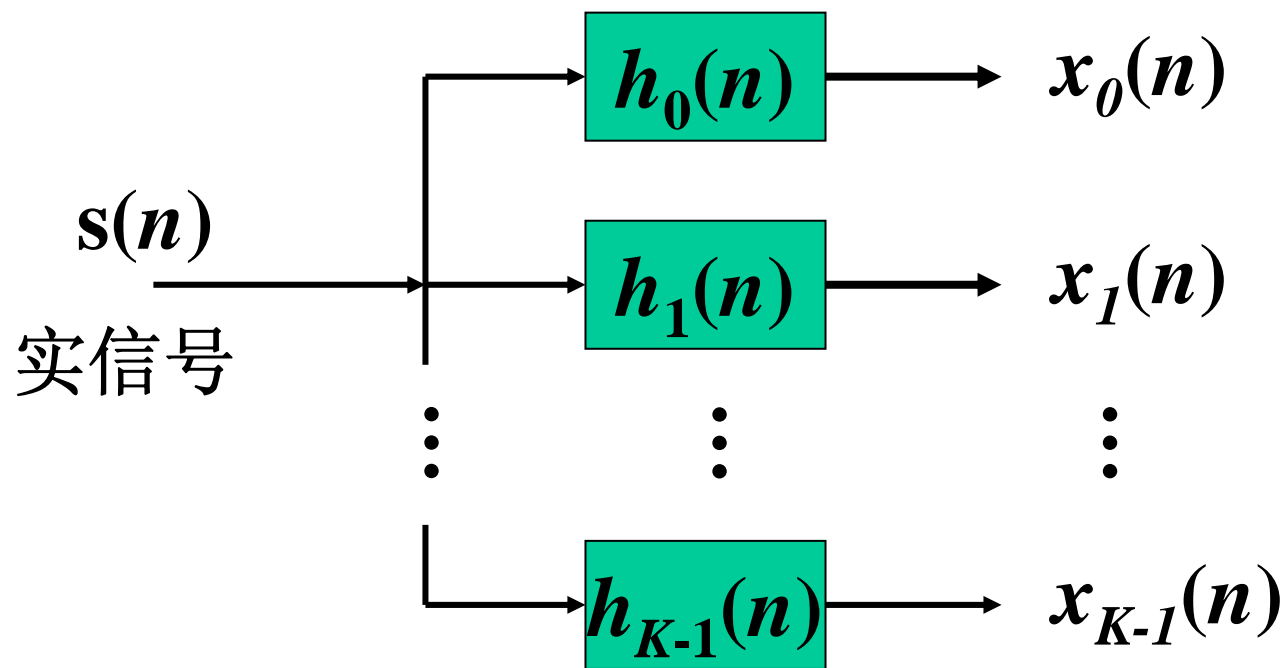


4. 信道化软件无线电接收机

前述的单通道和并行多通道接收机，需要用
一个搜索接收机对整个频段进行搜索，以确定在
哪个或哪几个信道上出现了信号。能覆盖整个
A/D采样带宽($0 \sim f_s/2$)的并行多通道接收机叫做
信道化接收机。

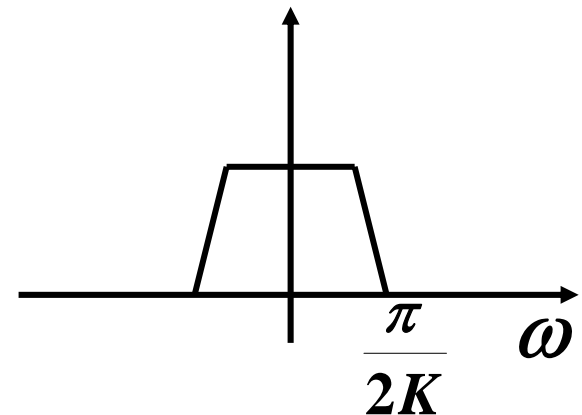
4.1 数字滤波器组实现的信道化接收机

滤波器组把整个**A/D**采样带宽($0 \sim f_s/2$)
分成均匀的 **K** 个子信道。



设原形低通滤波器 $h_{LP}(n)$ 的频响为：

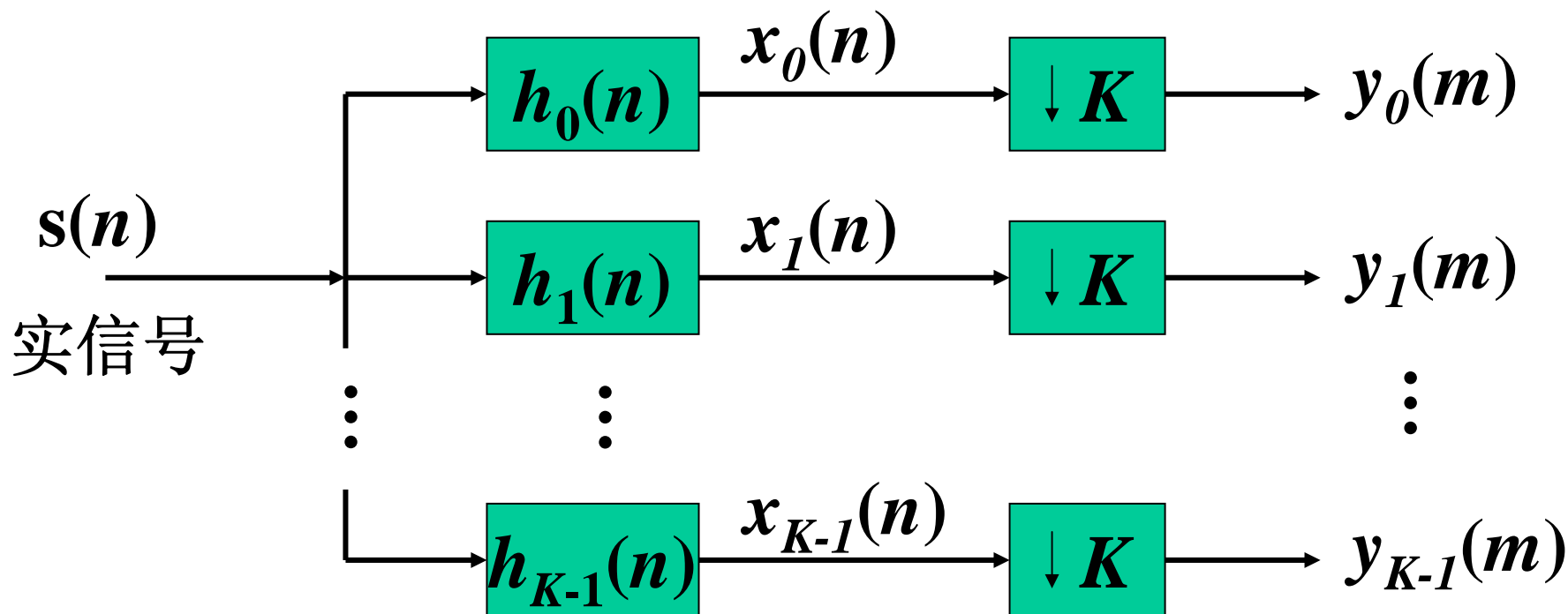
$$H_{LP}(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \frac{\pi}{2K} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$



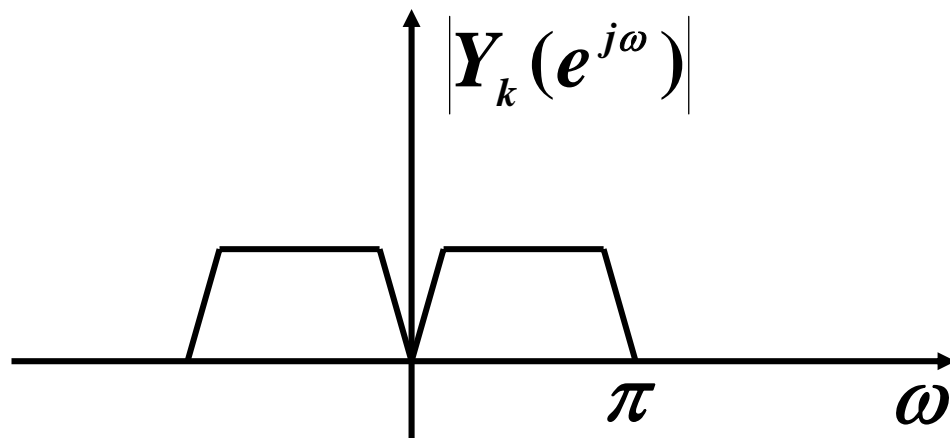
则 K 个滤波器的冲击响应分别为：

$$h_k(n) = h_{LP}(n) \cos\left(\frac{\pi}{2K}(2k+1)n\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, K-1$$

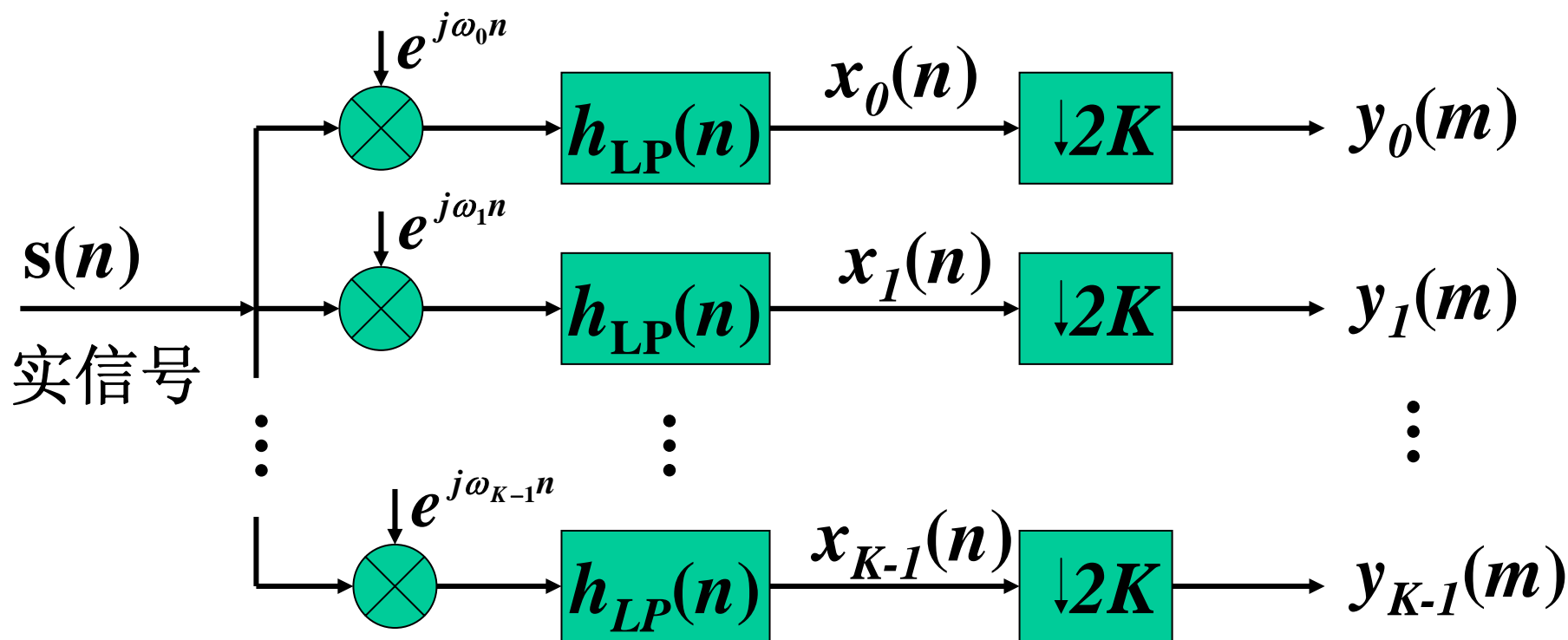
由于 $x_k(n)$ 的带宽为 π/K ，所以可以进行 K 倍抽取。而且是“整带”抽取，抽取后的信号 $y_k(m)$ 变为低通信号了。



$y_k(m)$ 的频谱
为:



滤波器组的另外一种实现形式为：



其中
$$\omega_k = \frac{\pi}{2K}(2k + 1) \quad k = 0, 1, \dots, K - 1$$


先用数字本振把第 k 个子信道下变频至零中频 (I, Q 两路)，然后对 I, Q 两路分别低通滤波。

4.2 多相滤波器组实现的信道化接收机

为了推导高效的多相滤波器组算法，上面第二种滤波器组算法中本振频率取成：

$$\omega_k = \left(k - \frac{2K-1}{4}\right) \frac{2\pi}{K} \quad k = 0, 1, \dots, K-1$$

$K=3$ 时


$$\begin{array}{lll} \omega_0 = \pi/6 & \longrightarrow & \omega_0 = -5\pi/6 \\ \omega_1 = \pi/2 & \longrightarrow & \omega_1 = -\pi/6 \\ \omega_2 = 5\pi/6 & \longrightarrow & \omega_2 = +\pi/2 \end{array}$$

$$y_k(m) = \left(s(n)e^{j\omega_k n}\right) \otimes h_{LP}(n) \Big|_{n=m(2K)}$$

$$y_k(m) = \left(s(n) e^{j\omega_k n} \right) \otimes h_{LP}(n) \Big|_{n=m(2K)}$$

$$= \sum_{p=0}^{K-1} x_p(m) e^{-j\frac{2K-1}{2K}\pi p} e^{-j\frac{2\pi}{K}kp}$$

其中

$$x_p(m) = x'_p(2m)$$

$$x'_p(n') = \left(s_p(n') (-1)^{n'} e^{j\pi n' / 2} \right) \otimes h_p(n') \quad K \text{ 为奇数}$$

$$s_p(n') = s(n'K - p)$$

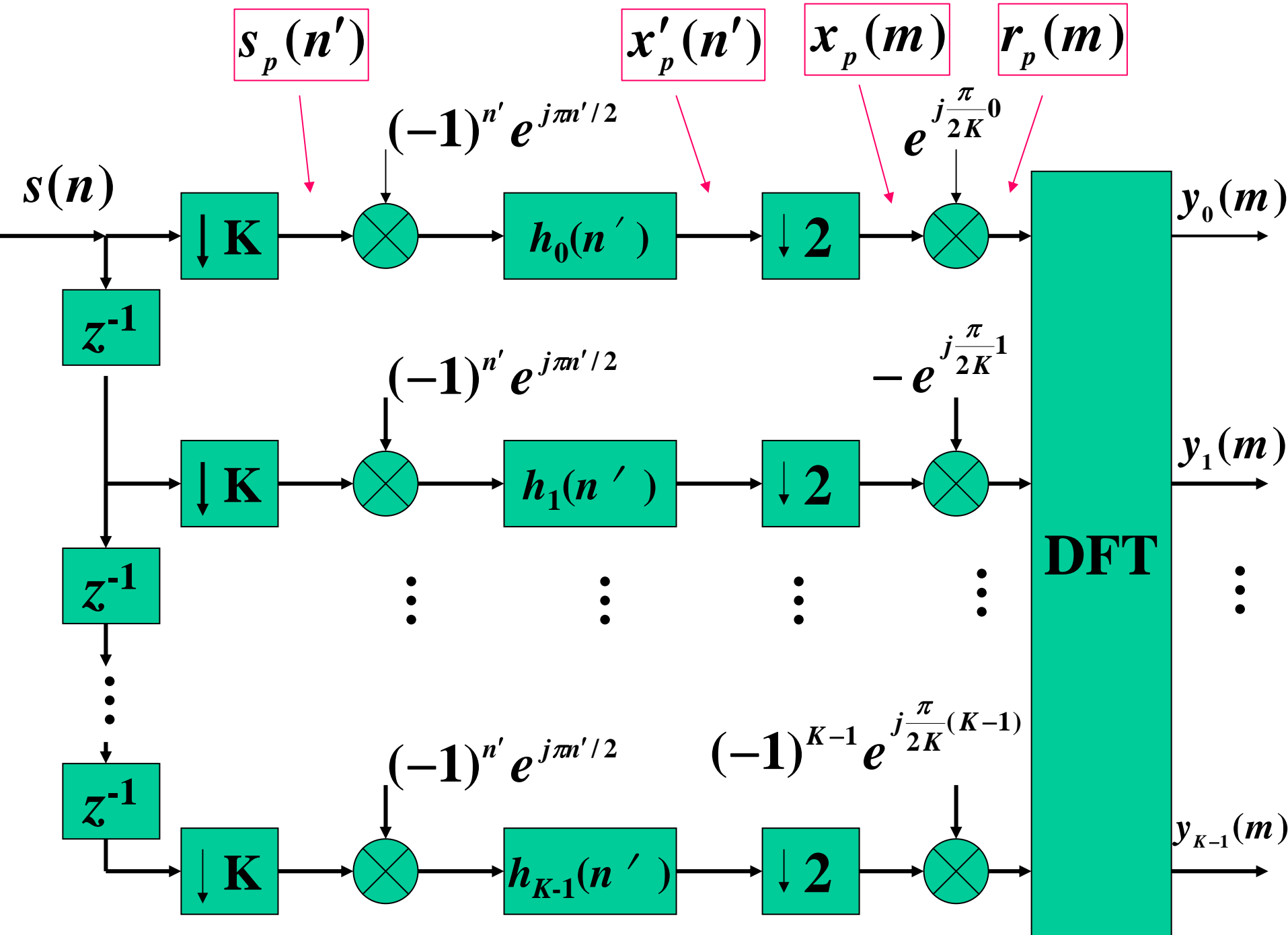
$$h_p(n') = h_{LP}(n'K + p)$$

令

$$r_p(m) = x_p(m) e^{-j\frac{2K-1}{2K}\pi p} = x_p(m) (-1)^p e^{-j\frac{\pi p}{2K}}$$

则

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{K-1} r_p(m) e^{-j\frac{2\pi}{K}kp} = DFT[r_p(m)]$$



5. 软件无线电发射机

发射信号可以表示为：

$$s_s(t) = a_s(t) \cos[2\pi f_0 t + \theta_s(t)]$$

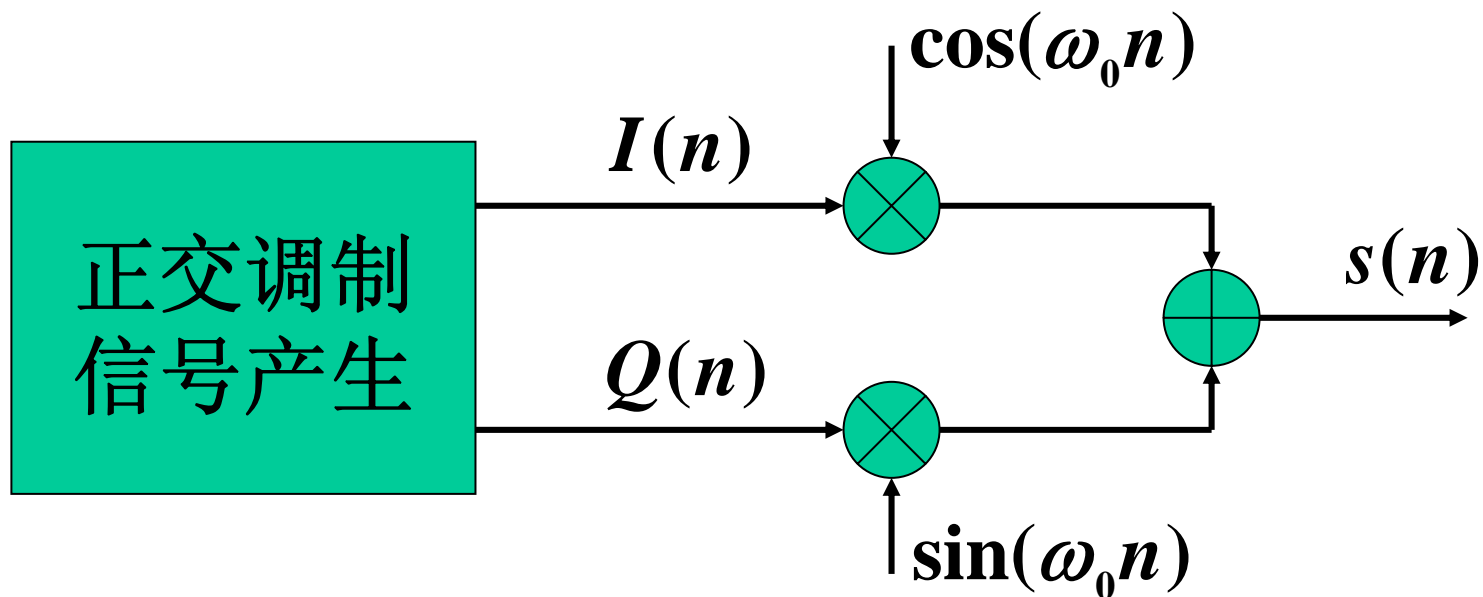
为了用数字的方法产生信号，对上式以采样频率 f_s 数字化得到：

$$s(n) = a(n) \cos[\omega_0 n + \theta(n)]$$

其中 $\omega_0 = 2\pi f_0 / f_s$

$$s(n) = I(n) \cos(\omega_0 n) + Q(n) \sin(\omega_0 n)$$

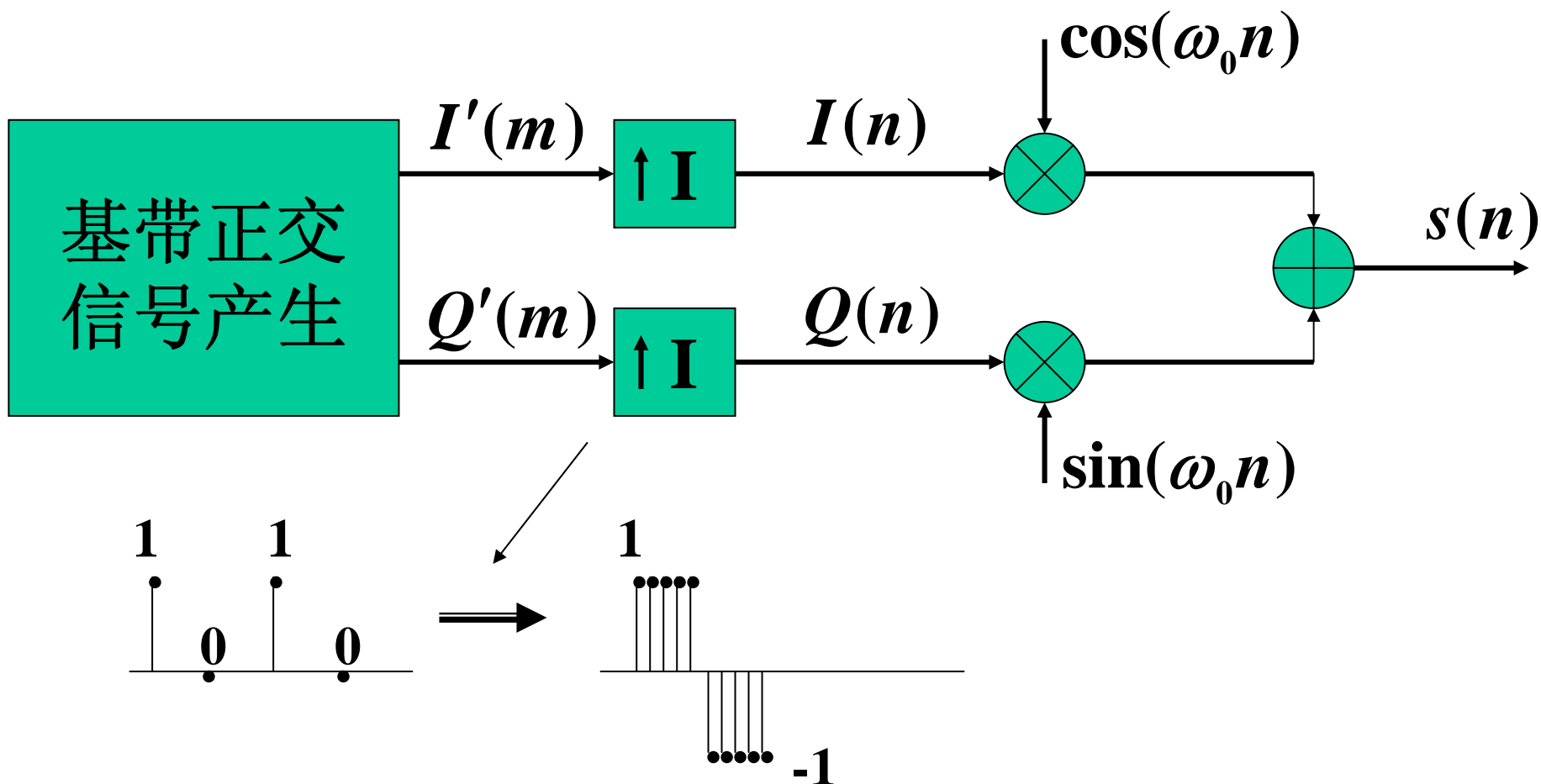
其中 $I(n) = a(n) \cos(\theta(n))$
 $Q(n) = -a(n) \sin(\theta(n))$



两个缺点：

- 正交信号 $I(n)$ 、 $Q(n)$ 的速率太高，DSP 产生困难。
- 载频受到限制。

第一个问题的解决方法：

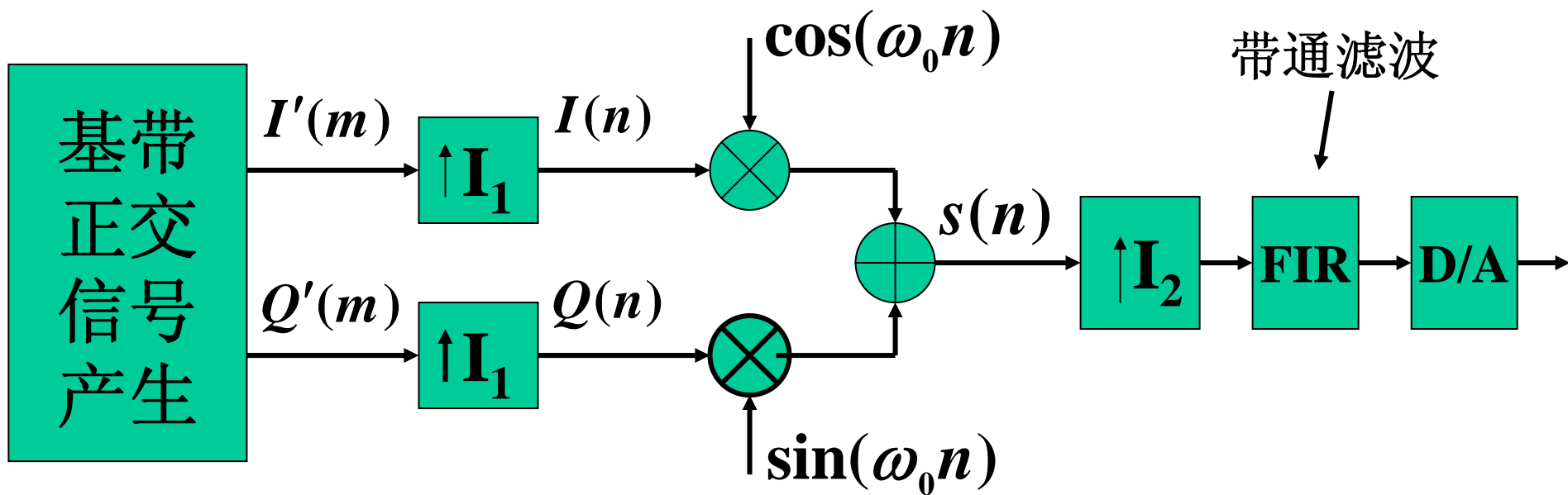


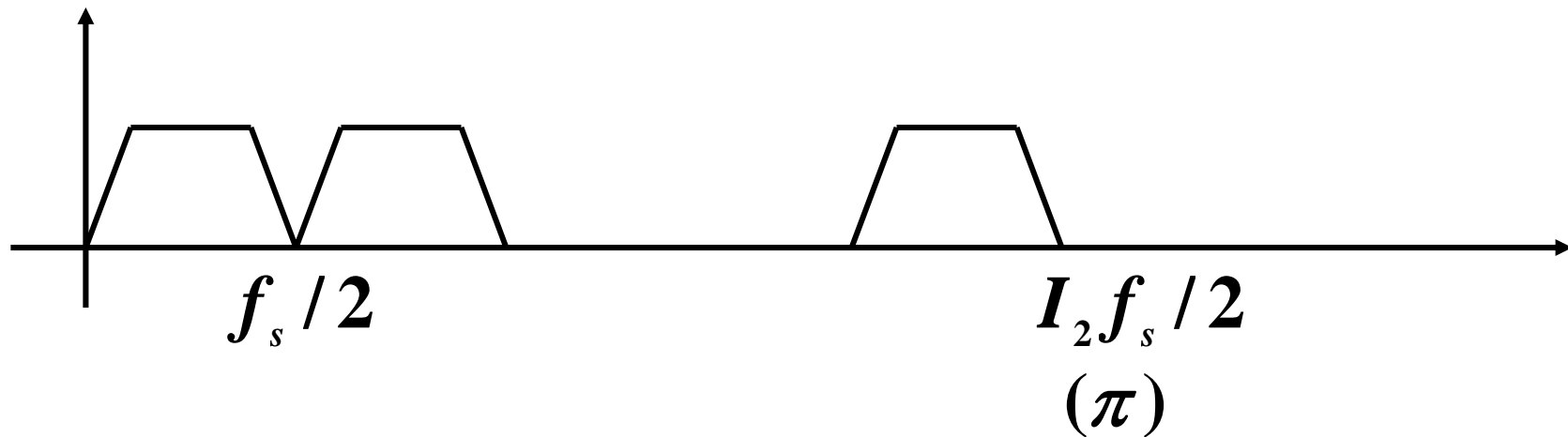
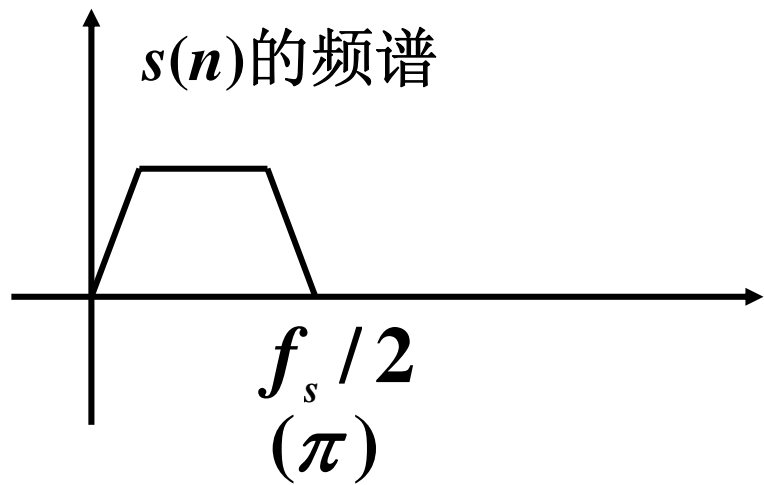
注意：当对基带信号进行脉冲成形时，
补零内插后还需加入成形滤波器。

第二个问题的解决方法：

方法I：模拟上变频。

方法II：





为了避免数字滤波的困难，采用如下方案：

