

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





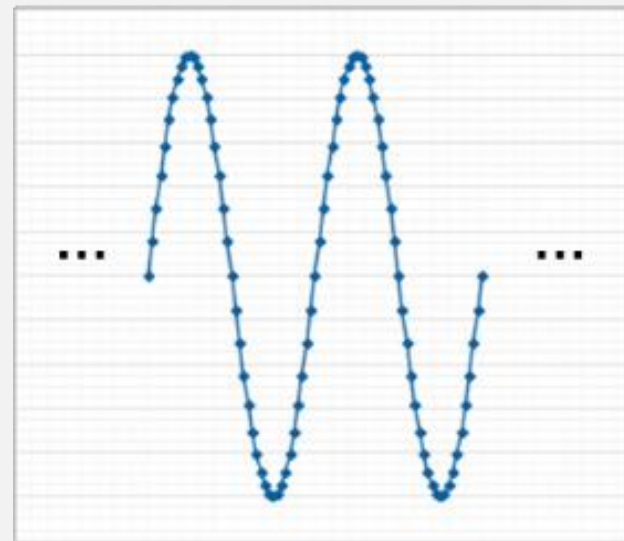
第四章

接收机性能分析与优化

目录



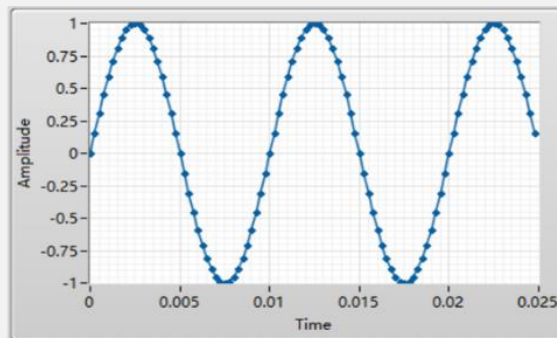
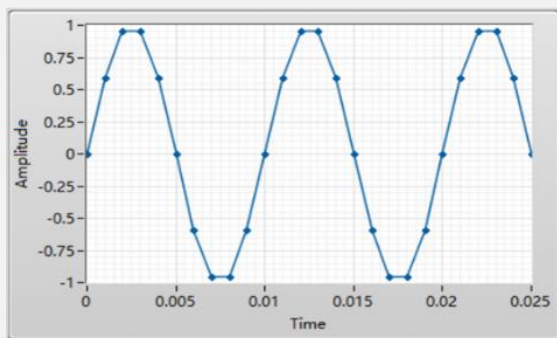
- 信号分析基础
- FM解调中的优化
- 前面板设计优化
- 程序设计模式优化



信号分析中的基础概念——采样率



- 采样率 Sample Rate——对连续信号每秒采样的次数。
- 采样周期 Δt ——相邻两个采样点之间的时间间隔，为采样率的倒数。



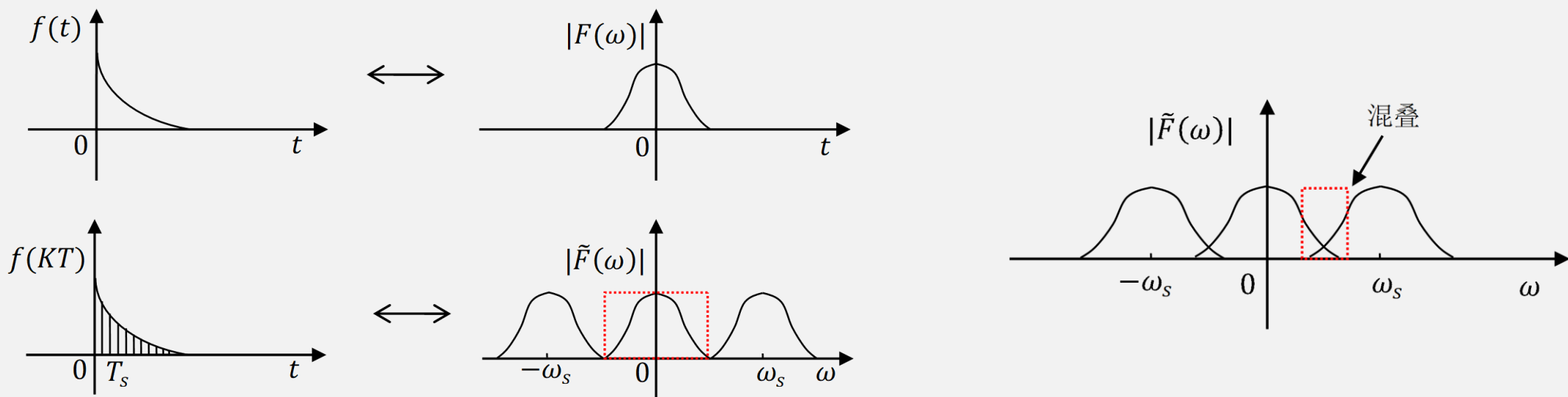
- 直观上，采样率越高，越接近原信号。

信号分析中的基础概念——采样率



- 奈奎斯特低通采样定理

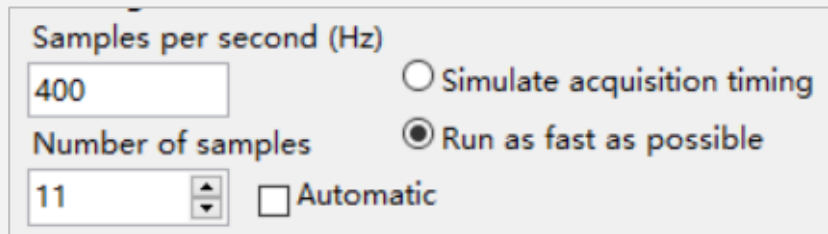
- 设一个低通信号 $f(t)$ 的最高频率为 f_{\max} ，在等间隔采样的条件下，采样率必须大于或等于 $2f_{\max}$ ，才能用采样信号无失真地恢复原始信号。



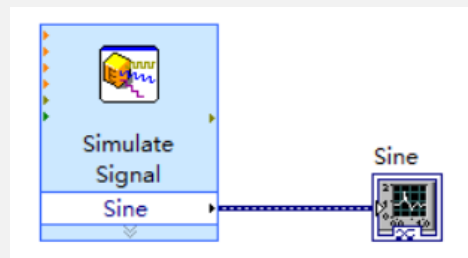
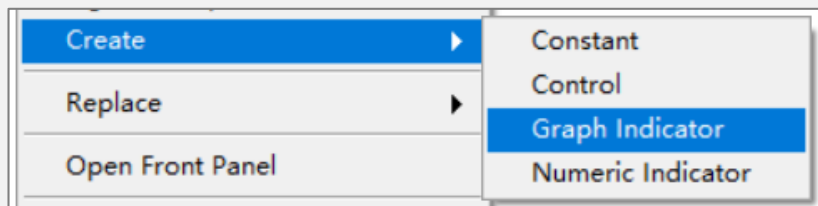
奈奎斯特采样定理的仿真验证



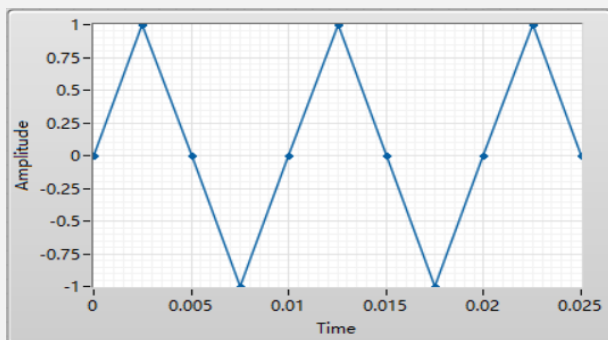
- 利用Express → “Simulate Signal”模块产生一个频率为100Hz的正弦信号，并将采样率分别设置为400Hz/1000Hz/4000Hz。



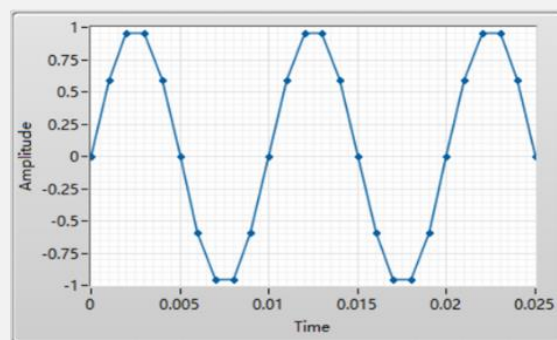
- 在其输出端口单击右键，在弹出的窗口中依次选择“Create”→“Graph Indicator”，就可以在前面板快速创建一个波形显示控件，用于观察波形。



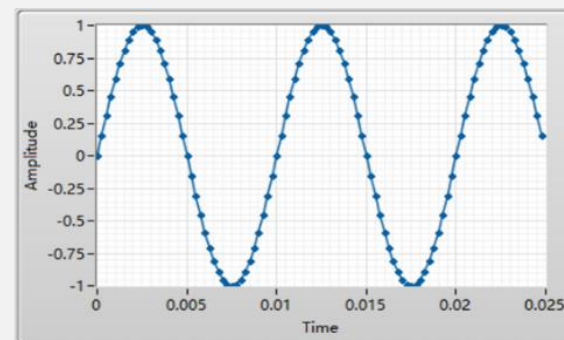
奈奎斯特采样仿真结果



400Hz



1000Hz

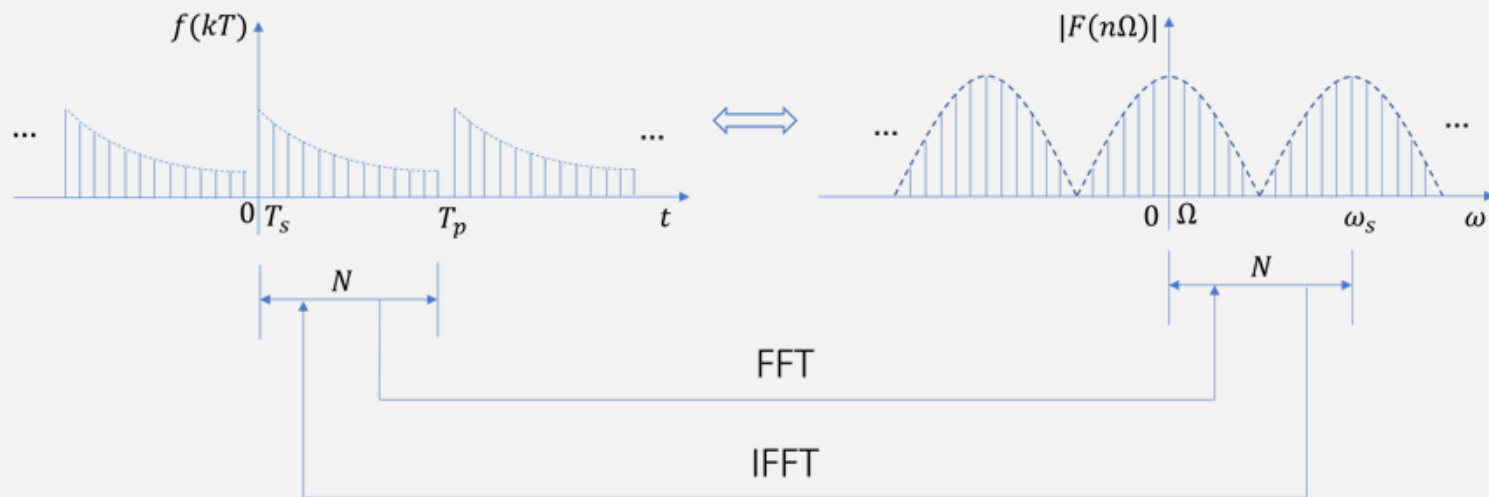


4000Hz

信号分析中的基础概念——频谱测量



- 实际的频谱计算是通过数字信号处理器来完成的，信号在时域和频域上都必须离散化，同时在时域和频域上也必须周期化，如下图所示。

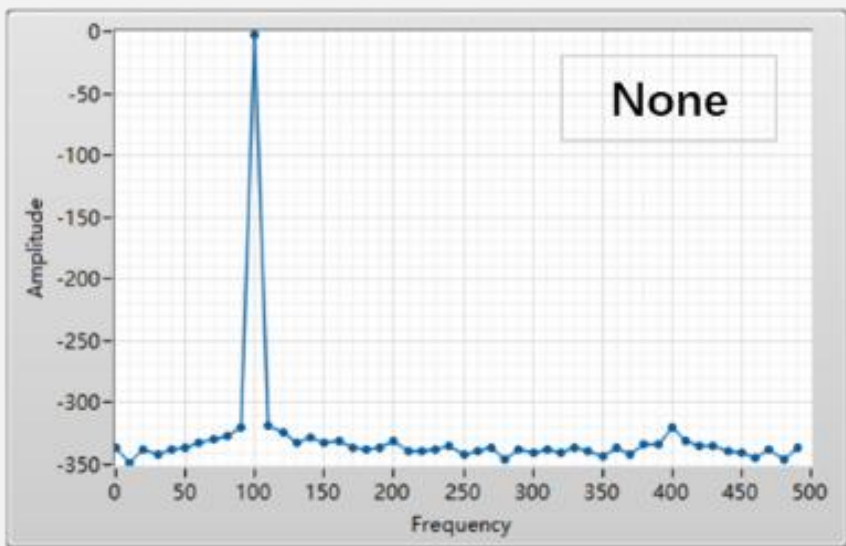


- 若 T_s 不变，同时 T_p 增大，那么一个周期内的采样点数 N 将增大，频谱间隔 Ω 将会减小，频谱分辨率增大。因此，如果提高频谱测量精度，需要增大符号周期或者提升采样点数。

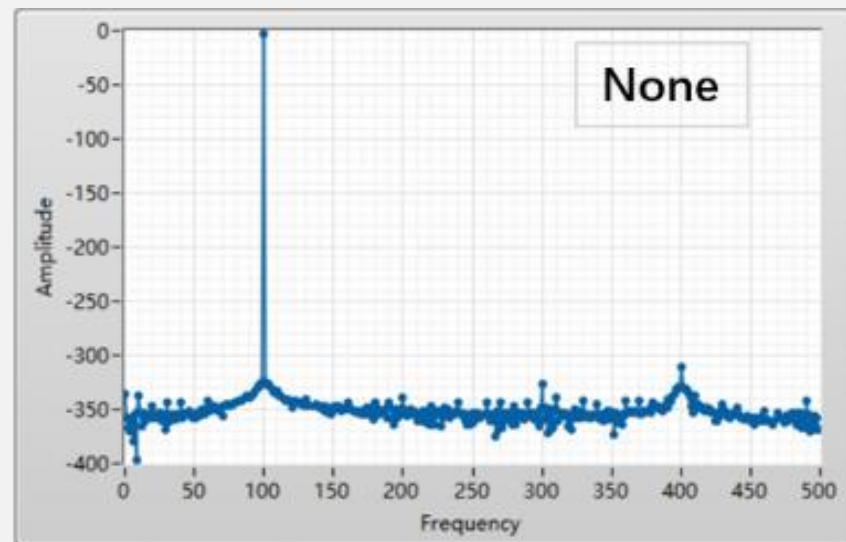
频谱分辨率仿真验证



- 仿真中我们同样使用一个100Hz的正弦信号，采样率设置为1000Hz，利用频谱仪观察采样点数 N 分别为100/1000时的信号频谱。



$N=100$

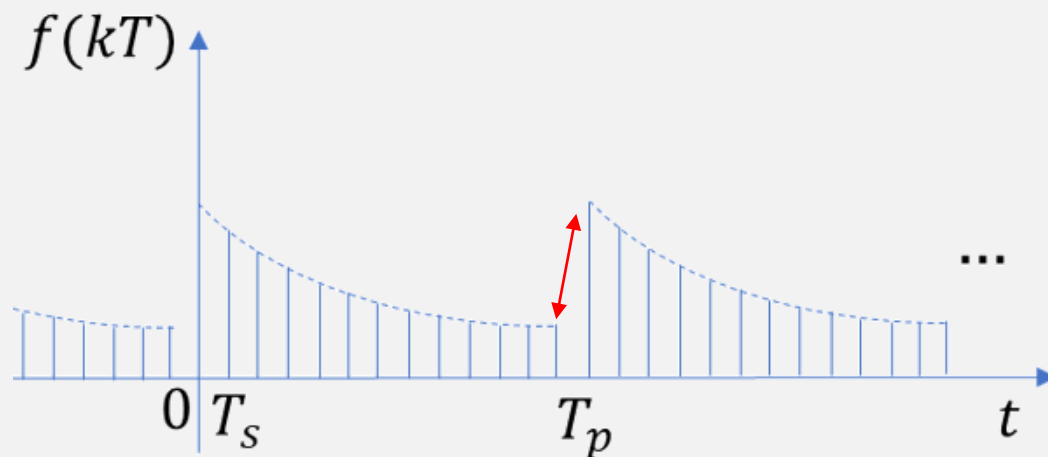


$N=1000$

频谱测量——窗函数



- 经采样后的离散信号在FFT周期延拓时，两个相邻周期的衔接处可能会产生“跳变”，带来高频噪声。

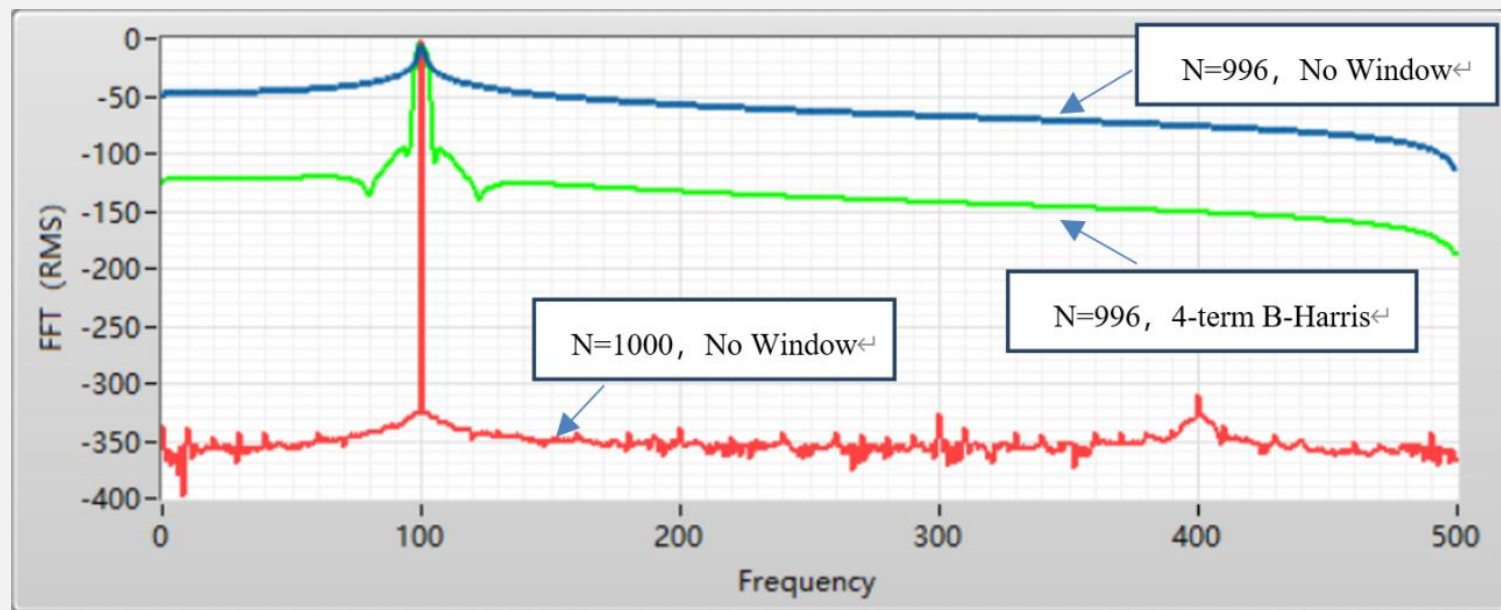


- 为了消除这种“跳变”带来的影响，可以采用窗函数对信号的首尾两端进行衰减，使用不同窗函数得到的频谱也不同。对于非周期信号以及采样点数不是周期整数倍的周期信号，加窗函数有明显好的观测效果。

窗函数影响验证

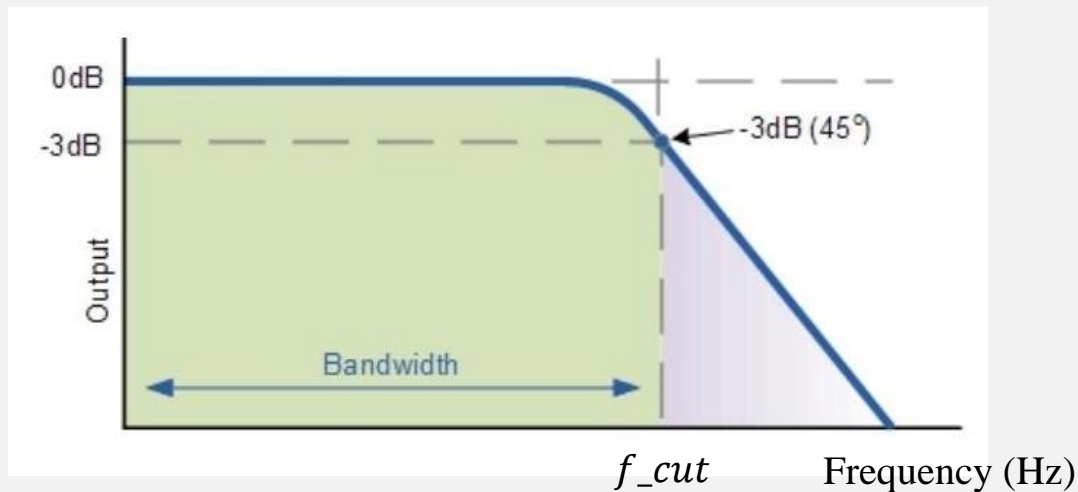


- 用频谱仪观察频率100Hz的正弦信号，采样点数 N 为996（并非信号周期的整数倍）。



- 可见当采样点数不再是信号周期的整数倍时，底噪水平相比之前（ -350dB , $N = 1000$ ）大幅提高（ -50dB , $N = 996$ ）。使用4-term B-Harris窗函数后，底噪水平被显著抑制（ -120dB , $N = 996$ ）。

信号分析中的基础概念——低通滤波器



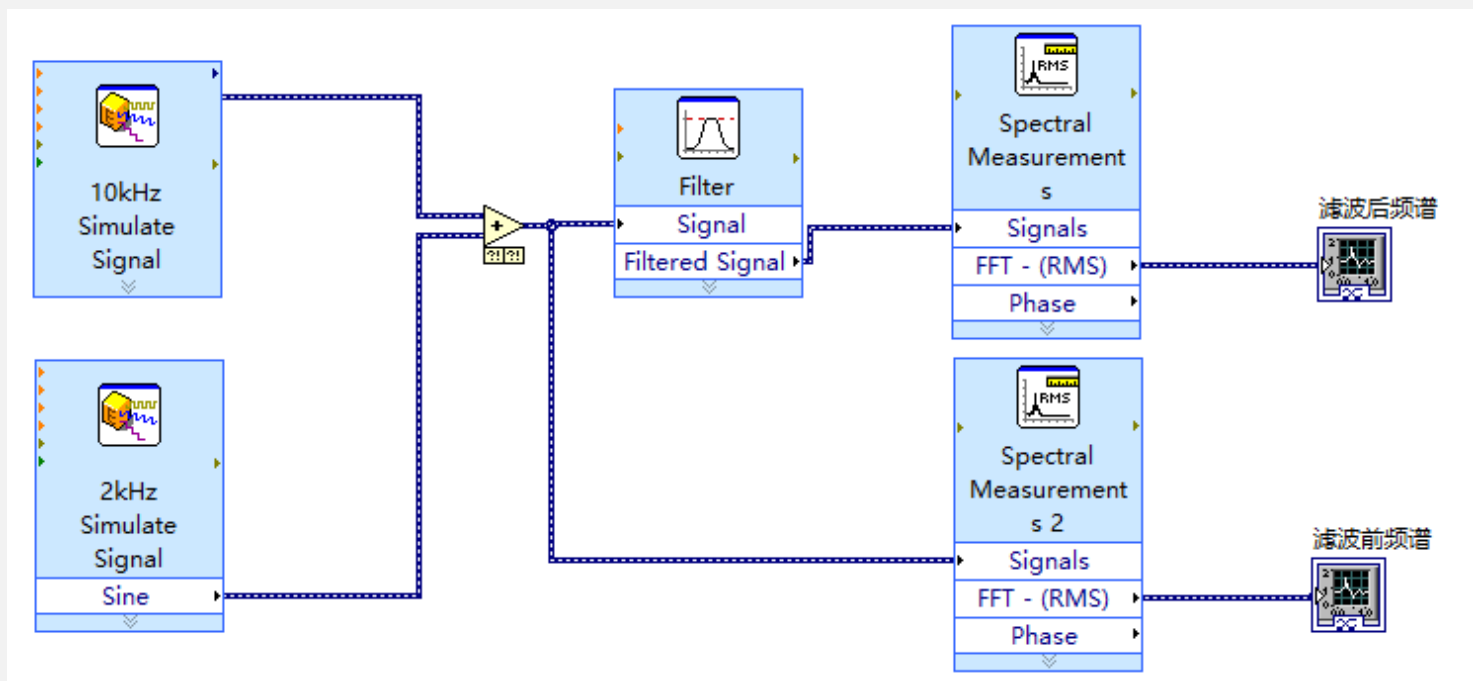
- 一个实际低通滤波器的频率响应，增益为-3dB的截止频率 f_c 将频率响应分为通带（Pass Band）和阻带（Stop Band），使其具备“通低频，阻高频”的特性。

低通滤波器——仿真验证

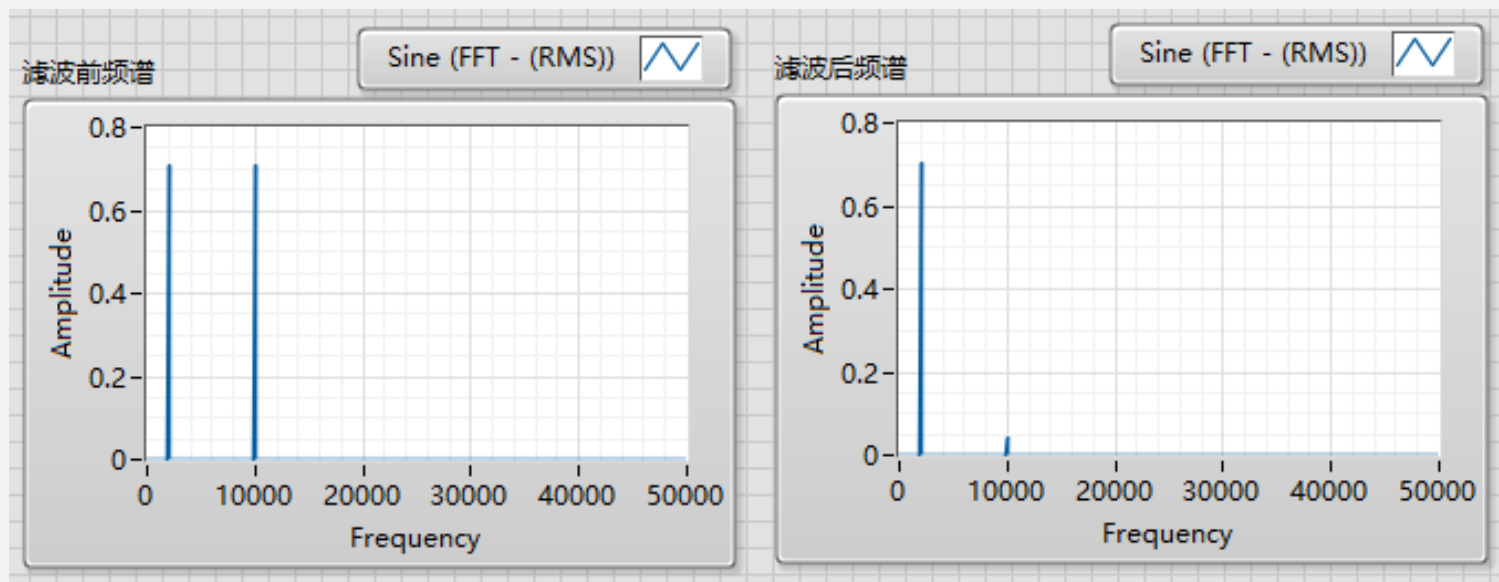


- 为了验证低通滤波器的效果，可以对比信号通过低通滤波器前后的频谱。

LabVIEW仿真中的程序框图如下：



低通滤波器——仿真结果

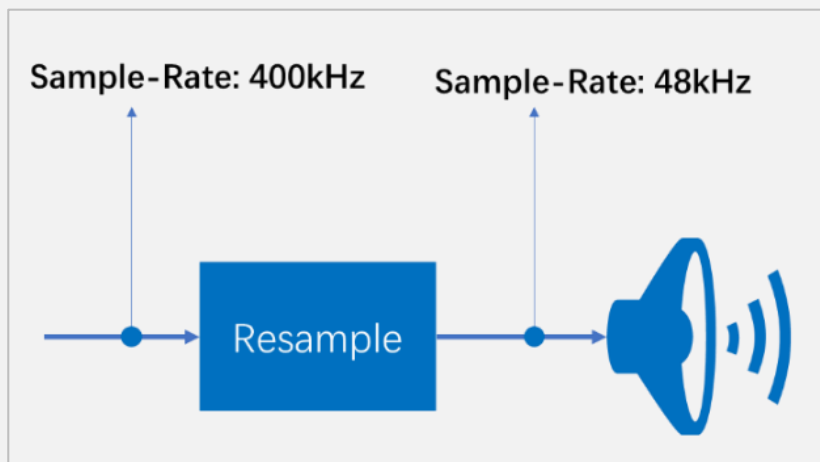


通过滤波器前

通过滤波器后

- 此外，对于我们这里所选用的IIR滤波器，其阶数也会影响滤波器的精度。但阶数越高也会带来更高的输出延迟，因此在实际使用中要综合考虑。

信号分析中的基础概念——重采样



- 在LabVIEW中，可以使用“Signal Manipulation” → “Align and Resample” 模块，并设置“Specific dt”参数，即重采样的目标采样间隔，以实现重采样。

目录



- 信号分析基础
- FM解调中的优化
- 前面板设计优化
- 程序设计模式优化



FM解调算法优化——FIR滤波器



- 在数字采样后的导数可以近似定义如下：

$$\frac{dx(t)}{dt} \cong \frac{x[n] - x[n-1]}{1}$$

- FIR系统方程：

$$y[n] = x[n] - x[n-1]$$

- 系统的频率响应在 $|\omega|$ 较小时可化简得：

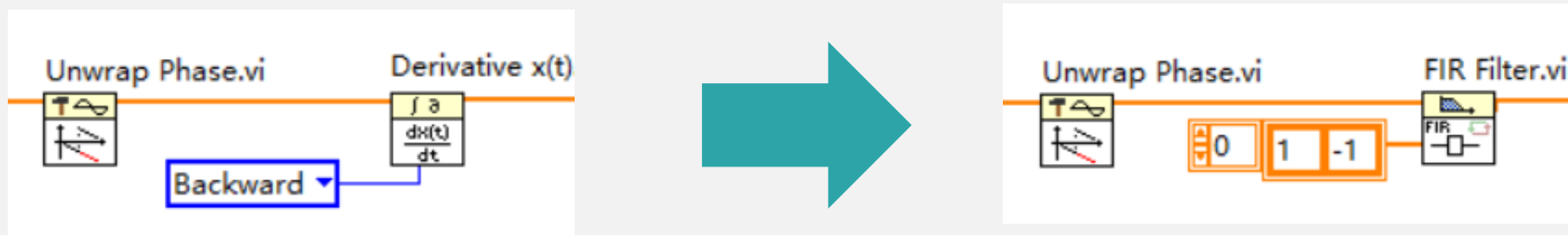
$$H(e^{j\omega}) = 1 - e^{-j\omega} = j\omega e^{-\frac{j\omega}{2}}$$

- 由频率响应可知，系统的输出为带有半个采样时延的理想微分器。



FIR滤波器替代微分器

- 根据以上分析，我们可以用**FIR滤波器**替代反正切解调中的**微分器**，在路径“Signal Processing” → “Filters” → “Advanced FIR Filtering”找到“FIR Filter”，注意将“FIR Coefficients”（滤波器参数）设置为1和-1构成的数组。



- 替换后的FM解调模块：





FM解调算法优化——反正切解调

- 在反正切解调中，门限效应是由非线性的反正切运算引起的。设 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 是FM接收机获取的带噪I/Q信号：

$$I(t) = \overline{I(t)} + n_i(t), Q(t) = \overline{Q(t)} + n_q(t)$$

- 信噪比较高情况下，有效信号 $\overline{I(t)}$ 与 $\overline{Q(t)}$ 都远大于噪声 $n_i(t)$ 与 $n_q(t)$ ，有

$$\theta(t) = \tan^{-1}\left[\frac{Q(t)}{I(t)}\right] \cong \tan^{-1}\left[\frac{\overline{Q(t)}}{\overline{I(t)}}\right]$$

- 但信噪比较低的情况下，由于反正切的**非线性**，其计算结果会显著受到随机噪声的影响，导致解调效果急剧恶化，称为**门限效应**。

反正切算法优化



- 反正切的三角运算实际硬件实现——CORDIC算法，需要ROM、复杂移位寄存器等硬件，并需要多次迭代。





反正切算法优化

- 设 $m(t)$ 为基带信号, $2\pi k_f$ 为FM调制的频偏系数, 由FM反正切解调的基本原理有:

$$2\pi k_f m(t) = \frac{d \left[\arctan \left(\frac{Q(t)}{I(t)} \right) \right]}{dt}$$

- 求导得:

$$m(t) = \frac{1}{2\pi k_f} \cdot \frac{I(t)Q'(t) - Q(t)I'(t)}{I^2(t) + Q^2(t)}$$



反正切算法优化

- 对于上式，在数字系统中有

$$m(n) = \frac{1}{2\pi k_f} \cdot \frac{I(n)[Q(n) - Q(n-1)] - Q(n)[I(n) - I(n-1)]}{I^2(n) + Q^2(n)}$$

- 进一步化简可得

$$m(n) = \frac{1}{2\pi k_f} \cdot \frac{I(n-1)Q(n) - I(n)Q(n-1)}{I^2(n) + Q^2(n)}$$

- 由以上两种式子，我们可以绕过直接计算反正切的步骤，进一步简化反正切解调的硬件实现。

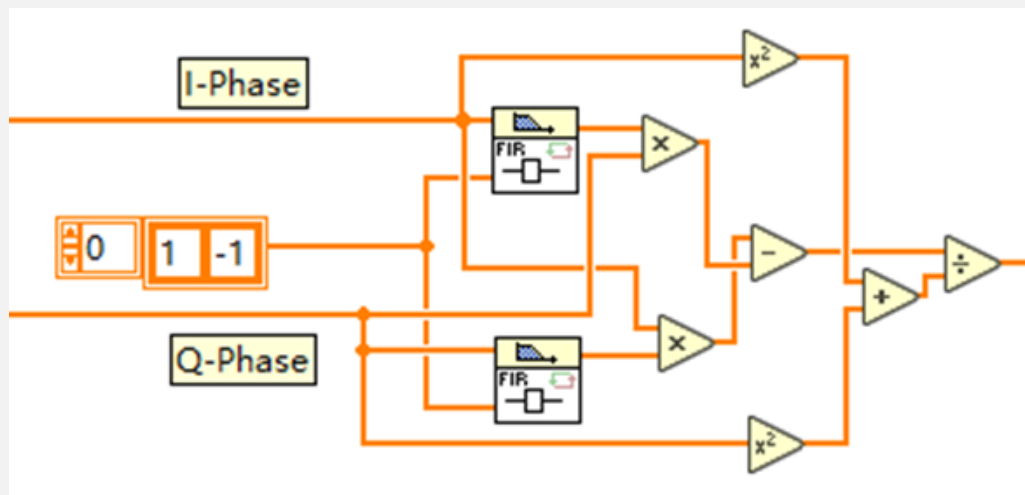


反正切算法优化——双FIR实现

- 观察式

$$m(n) = \frac{1}{2\pi k_f} \cdot \frac{I(n)[Q(n) - Q(n-1)] - Q(n)[I(n) - I(n-1)]}{I^2(n) + Q^2(n)}$$

- 我们先前用FIR滤波器实现差分计算，因此很容易想到在这里也用两个FIR滤波器进行差分运算，得到程序框图如下：



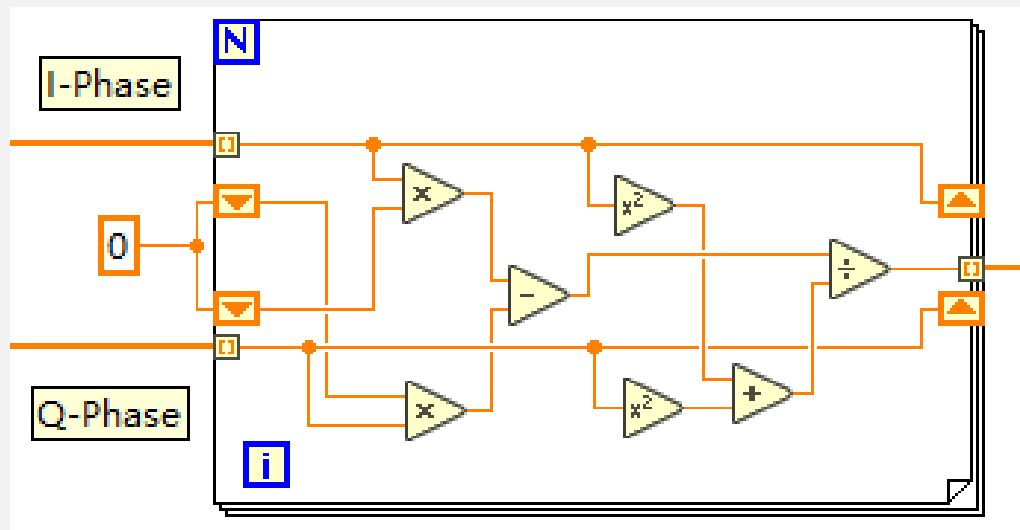
反正切算法优化——移位寄存器实现



- 观察进一步化简后的式子：

$$m(n) = \frac{1}{2\pi k_f} \cdot \frac{I(n-1)Q(n) - I(n)Q(n-1)}{I^2(n) + Q^2(n)}$$

- 可以发现其中包含上一个循环中的值，因此可以考虑利用移位寄存器设计程序如下：





反正切算法优化——仿真验证

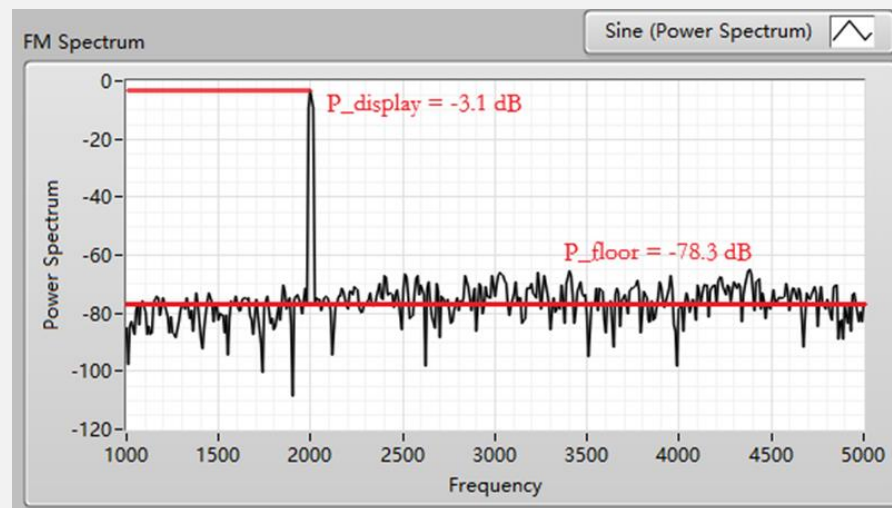
- 对优化前后解调方法的抗噪声性能进行比较。
- 实验中各种参数的设置如下：

参数	设置值
载波幅度 (V)	1
信号频率 (Hz)	2k
FM频偏 (Hz)	2k,10k,20k
低通滤波器截止频率 (Hz)	6k,15k,30k
载波频率 (Hz)	100k
采样率 (Hz)	1M
采样点数	100k
窗函数类型	Hanning
信道类型	AWGN

反正切算法优化——功率测量



- 从时域波形中分析带噪信号的功率并不实际，因此考虑从频域上对功率进行测量：



- 然而，直接从频谱上读取的信号的峰值功率 $P_{display}$ 与底噪功率 P_{floor} 并不准确，需要由下两式进行修正。

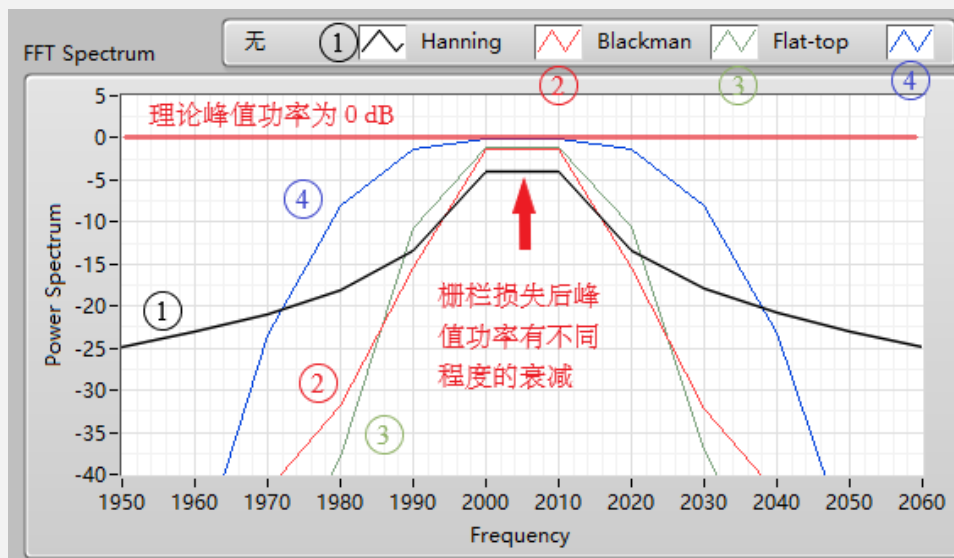
$$P_{signal}(dBw) = P_{display}(dBw) + scalloping\ loss(dB)$$

$$P_{noise} (dBw) = P_{floor} (dBw) + PG(dB) - ENBW_{corr} (dB)$$

功率测量——误差修正



- 栅栏损失(scalloping loss), 信号频率落在两个频点之间时, 峰值功率下降 (以2005Hz为例)。



- 本实验中信号频率2kHz为频率间隔 $\omega = \frac{1\text{MHz}}{100k} = 10\text{Hz}$ 的整数倍, 不会落在两个频点之间, 故可以忽略不计。

功率测量——误差修正



- **FFT处理增益(Processing Gain)**, 当采样点数增加导致频谱间隔缩短时, 所累积的噪声功率会随之衰减, 这部分衰减可以用下式进行补偿:

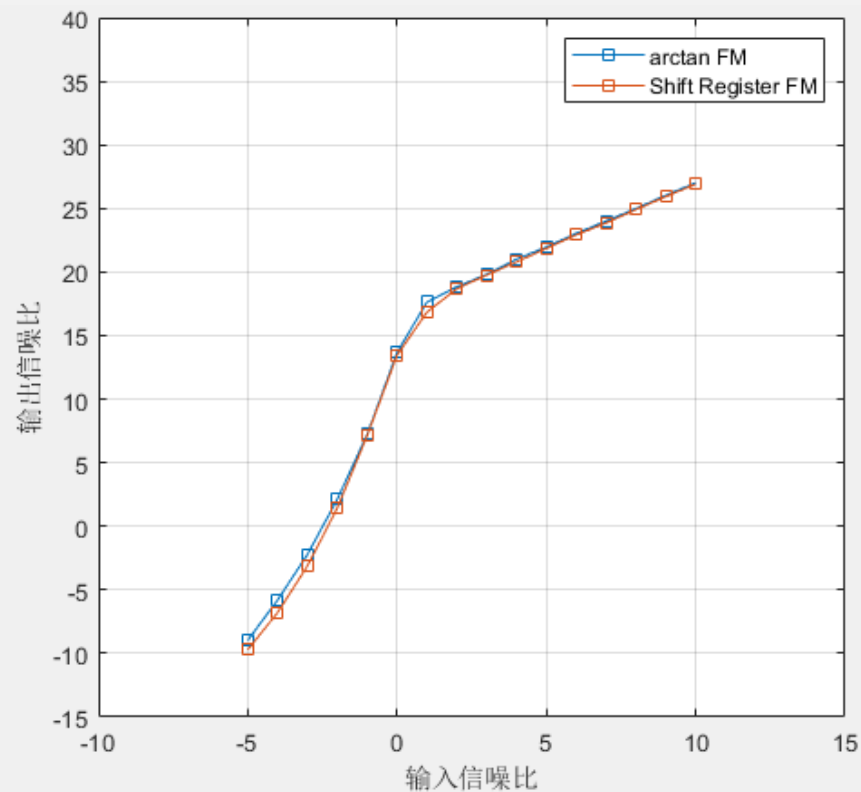
$$PG(dB) = 10 \log_{10}(N/2)$$

- **等效噪声带宽(ENBW)**, 除了FFT外, 不同窗函数会增加每个频点上累积的噪声功率, 这部分增益的补偿值ENBW因窗函数而异。
- 对于本实验, 有 $PG(dB) = 10 \log_{10} 10^5 = 50dB$, 所使用的Hanning窗函数有 $ENBW = 1.76dB$ 。

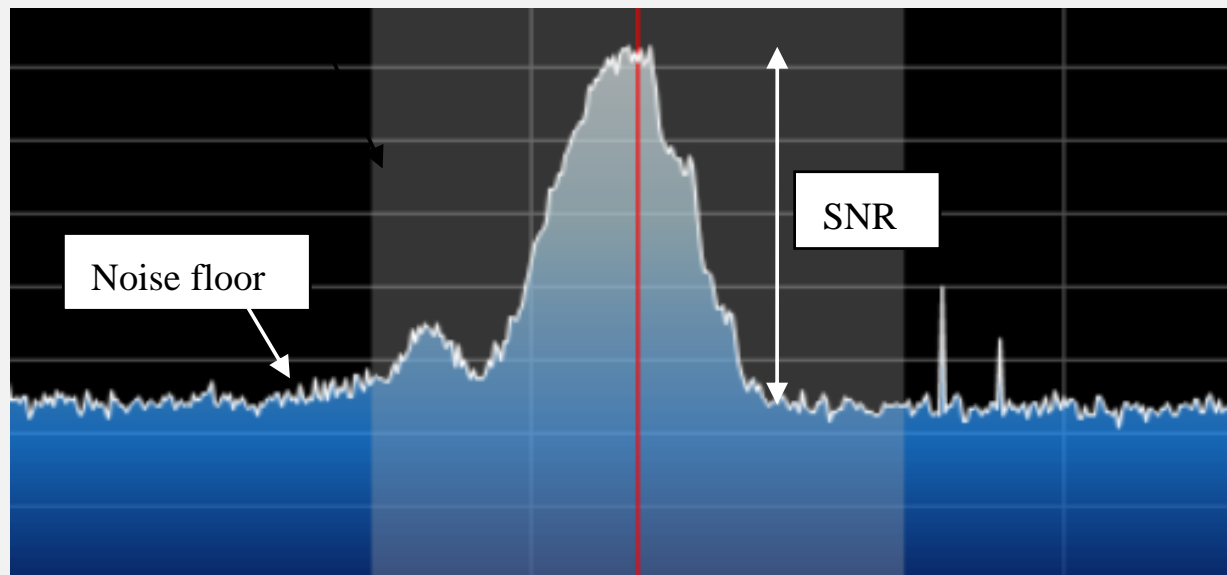
反正切算法优化——性能对比



- 对比优化前后的两种方法在不同输入信噪比与不同FM频偏下的输出信噪比，得到的输入-输出信噪比折线图如右图：
- 门限值：
 - 2kHz频偏： -9dB
 - 10kHz频偏： -2dB
 - 20kHz频偏： 1dB



FM解调算法优化——硬件校正

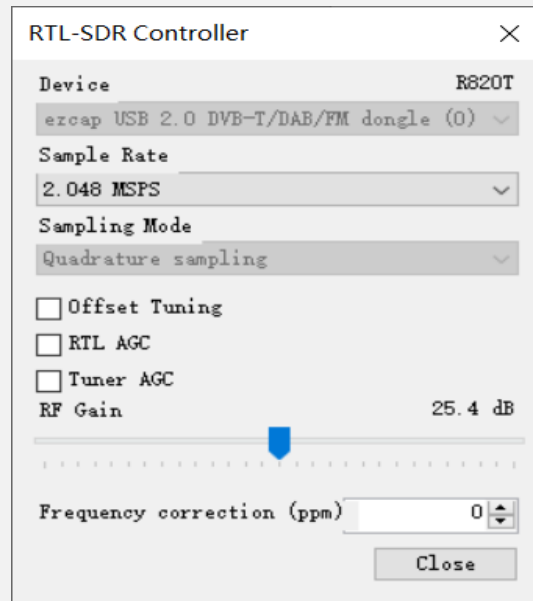
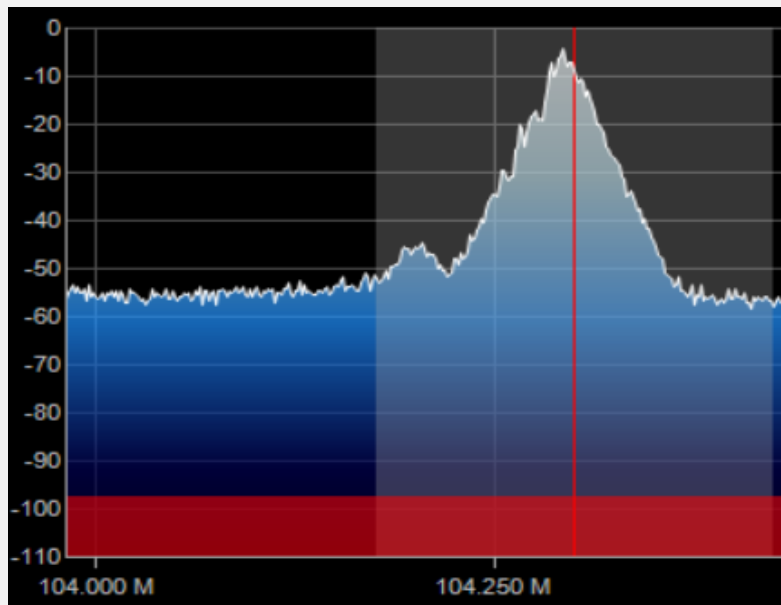


- 除了算法的影响外，硬件系统时钟的频率偏差也会影响FM解调效果。由于成本控制的原因，RTL-SDR使用的28.8MHz石英晶振稳定度本身就很低（接近 $\pm 100\text{ppm}$ ），再加上电子噪声的干扰，会导致晶振的显著频偏。

硬件校正——信噪比最优化



- 射频增益(RF Gain)的调节可以显著地改变信号与的强度，间接地对信噪比产生影响。
- 对于信噪比的测量，可以采取与先前FM解调算法优化中相同的方法，引入修正值得到准确的信号与噪声功率。

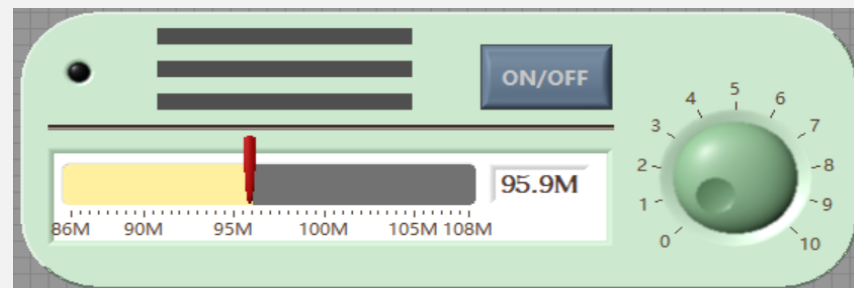


$$SNR(dBw) = [P_{display}(dBw) - P_{floor}(dBw)] - PG(dB) + ENBW_{corr}(dB)$$

目录



- 信号分析基础
- FM解调中的优化
- 前面板设计优化
- 程序设计模式优化

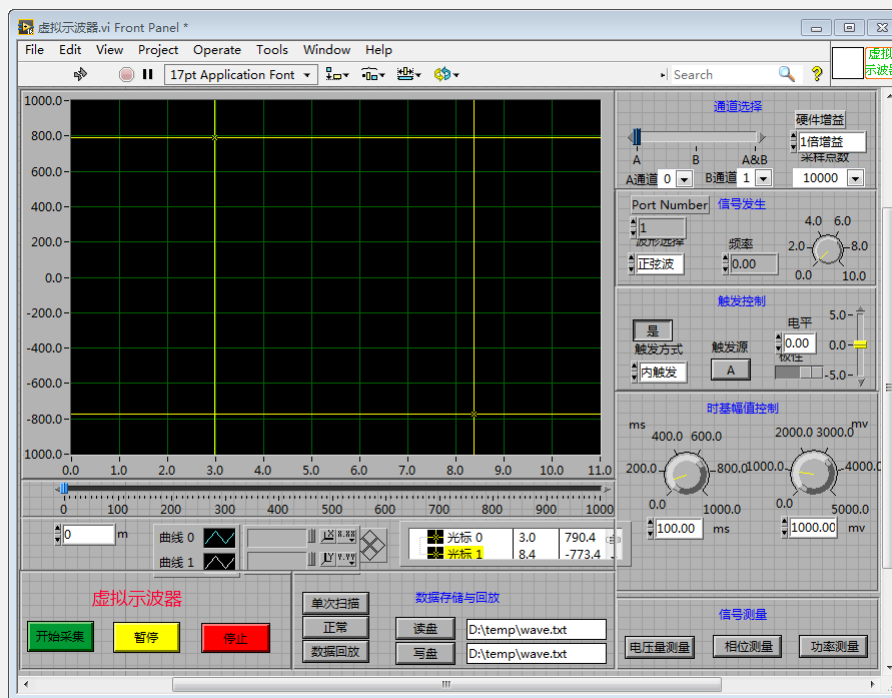


前面板设计概述



- 良好界面应具有的基本特征——实用、易用、美观

实用

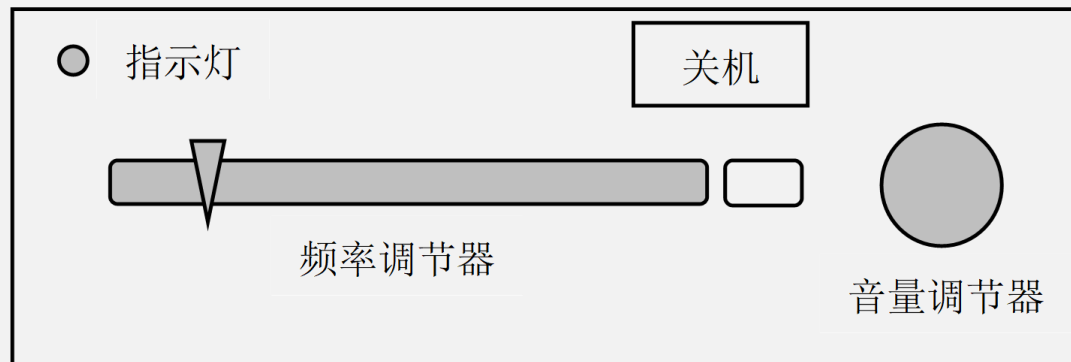


- 实际设计时需要功能定义、界面布局、颜色搭配、视觉处理等步骤。

前面板设计——功能定义



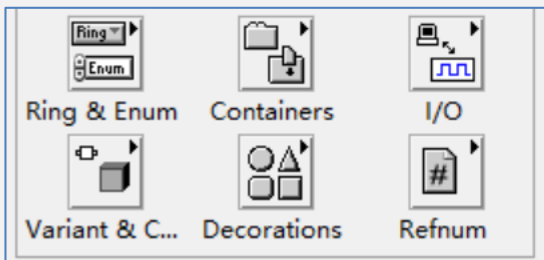
- 从使用者（用户）需求出发，对应具备的功能进行调研。
- FM收音机基本功能：
 - 开关机（及指示）
 - 调节频率
 - 调节音量
- 额外功能
 - 显示时间
 - 自动搜索并保存电台
 - 特色频谱显示
 - 自定义颜色
 - 自动录音
 -



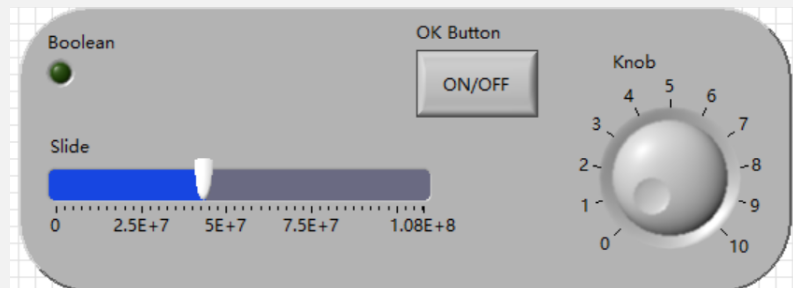
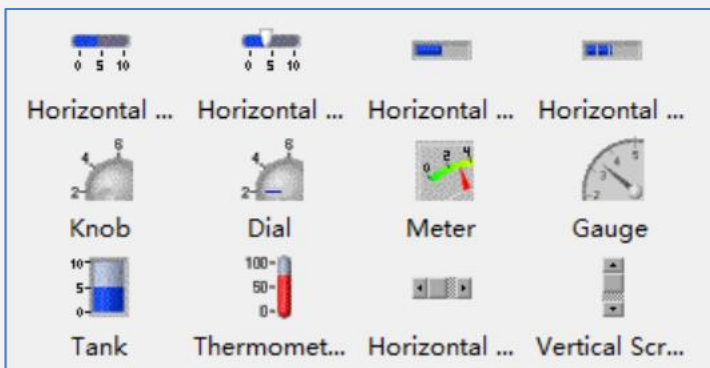
前面板设计——界面布局



- 基础框架在LabVIEW中的设计
- 背景的选择



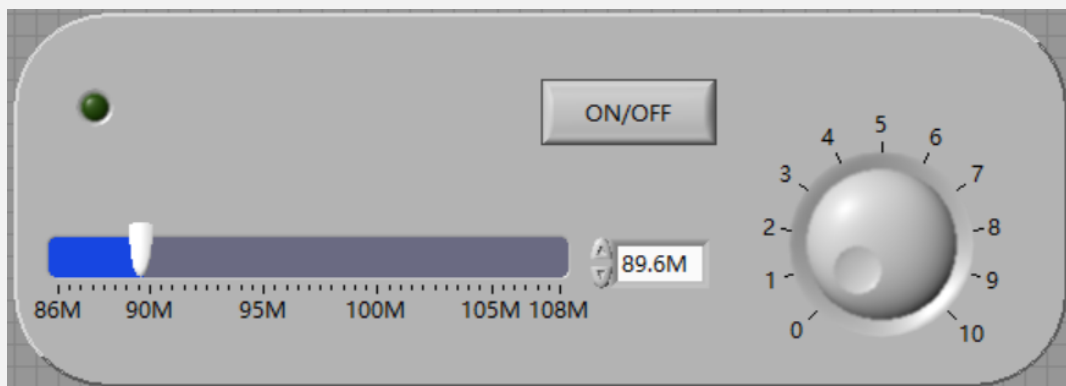
- 易用控件的选择



前面板设计——界面布局



- 完善界面



- 调频控制增加了显示控件，且以MHz为单位显示

前面板设计——界面美化



- 配色选择

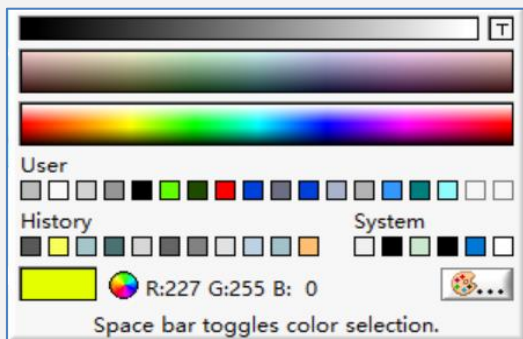


- 文本设置

- 在工具栏中，可以对界面中文本的字体、字号、颜色、样式等进行设置。

- 上色工具

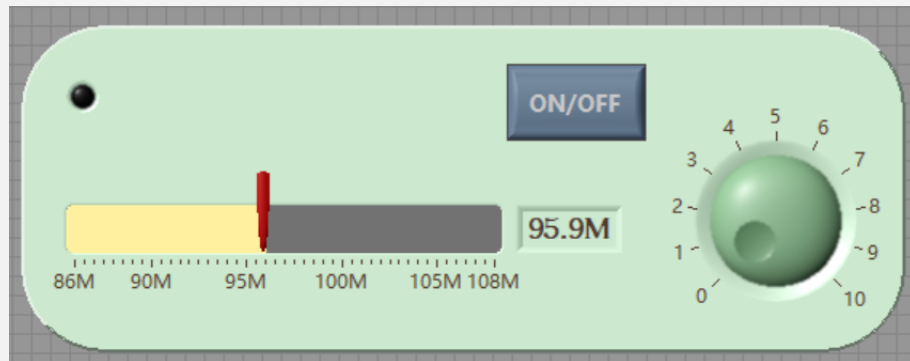
- 在界面空白处按shift同时点击鼠标右键调用控件选板（或者在工具栏中选择查看>>工具选板）



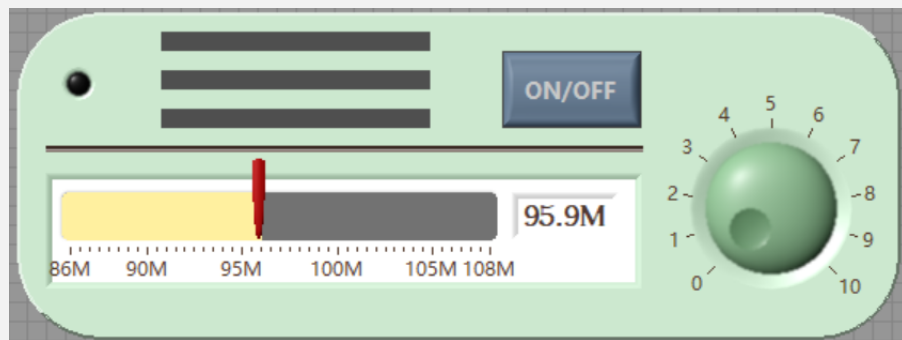
前面板设计——界面美化



- 基本面板美化结果



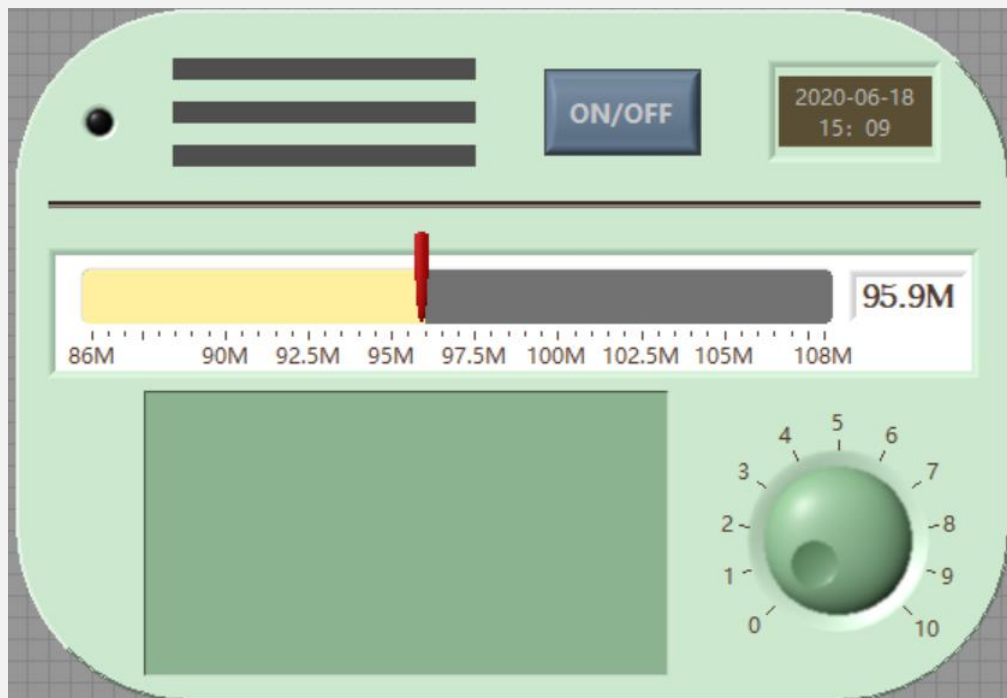
- 进一步美化可以通过添加装饰实现（可在右键>>Decorations中找到），并在重排列菜单中定义合适的重叠顺序。



前面板设计——功能升级



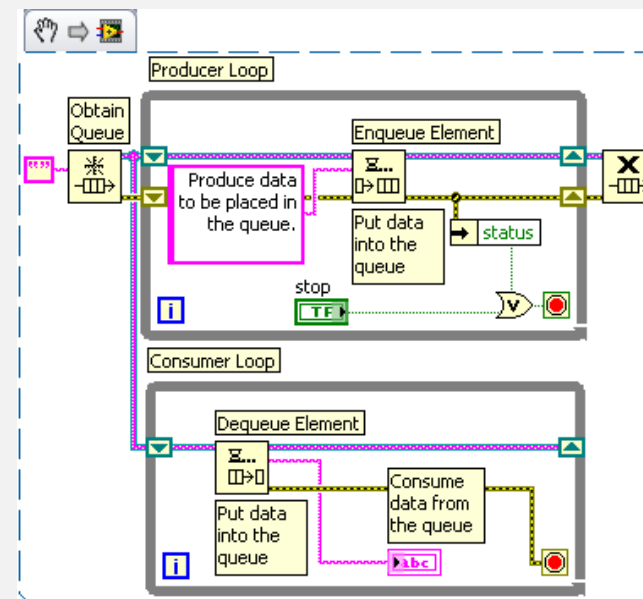
- 针对需求中额外的功能
 - 时间显示
 - 频谱显示



目录



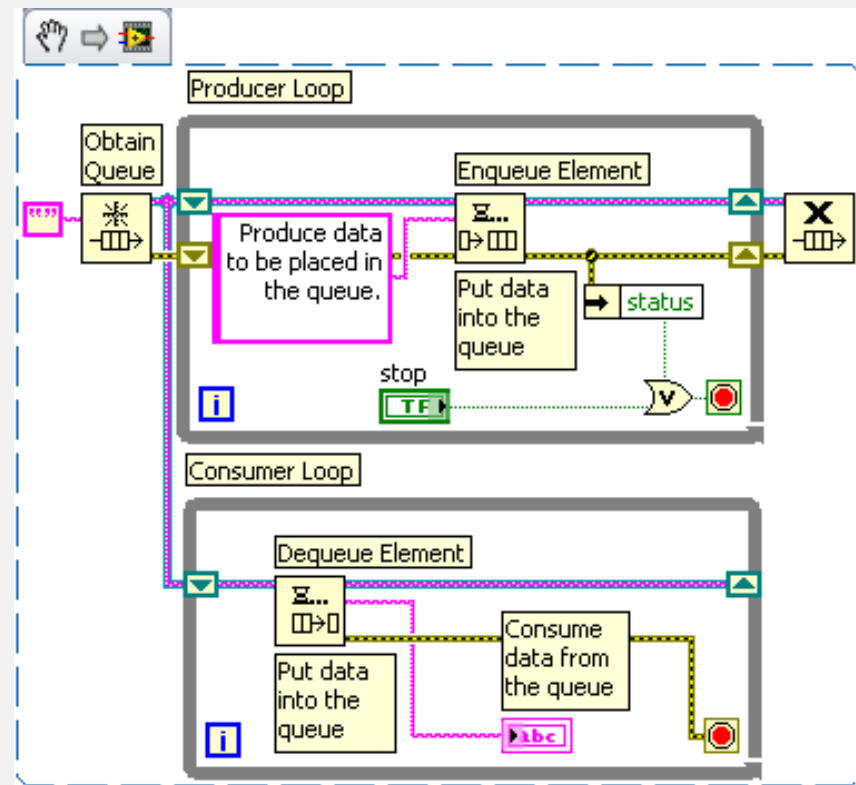
- 信号分析基础
- FM解调中的优化
- 前面板设计优化
- 程序设计模式优化



设计模式优化



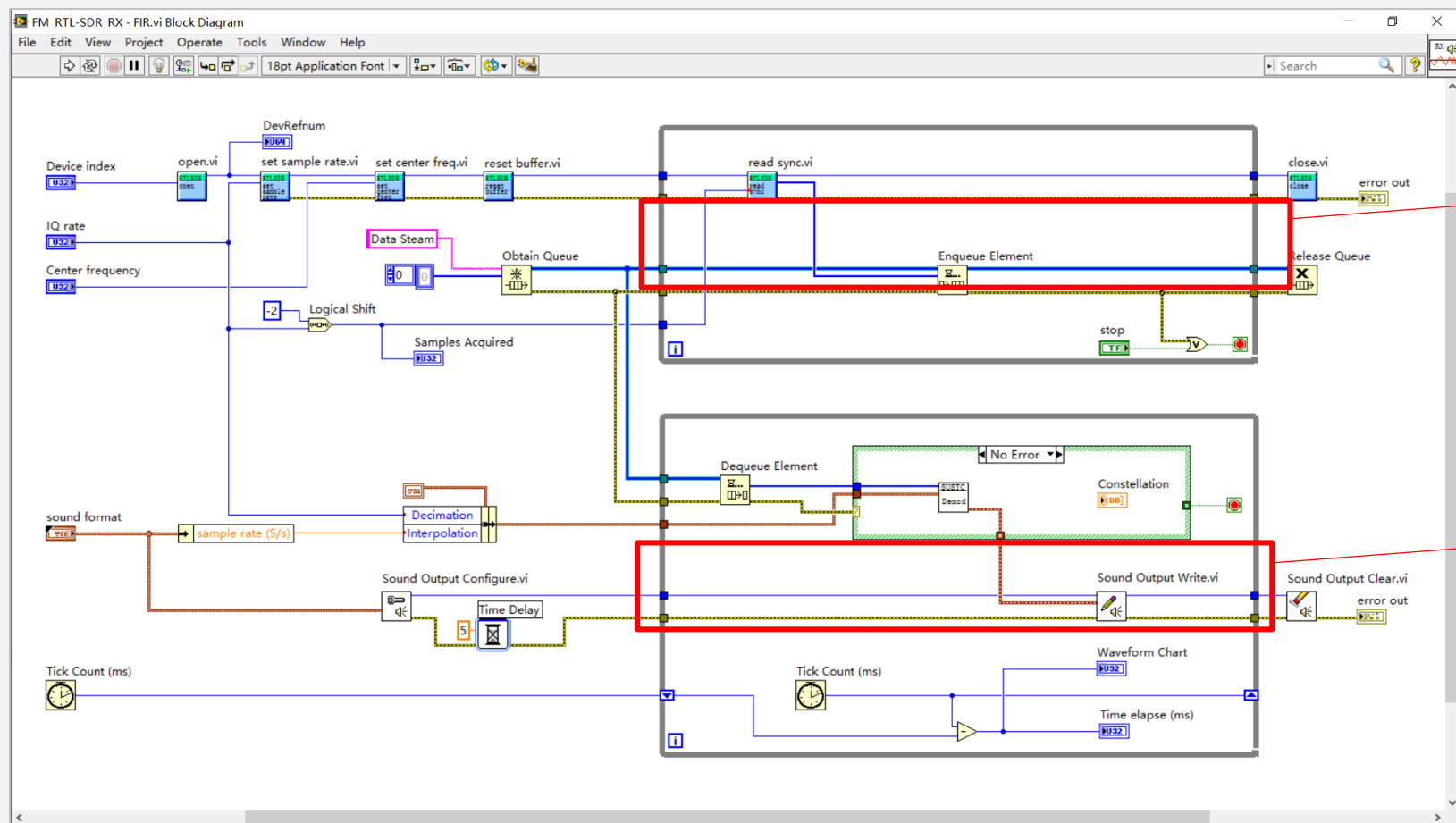
- FM接收机得到声音有时非常卡顿
- 接收速度远快于解调处理速度（数据生产快于消费）
- 生产者——消费者模式的优点：
 - 使用队列作为缓冲区能减少数据丢失
 - 将数据产生与处理循环分隔开，以不同速率运行



设计模式优化



- 使用生产者——消费者结构在FM接收与解调间进行数据传输



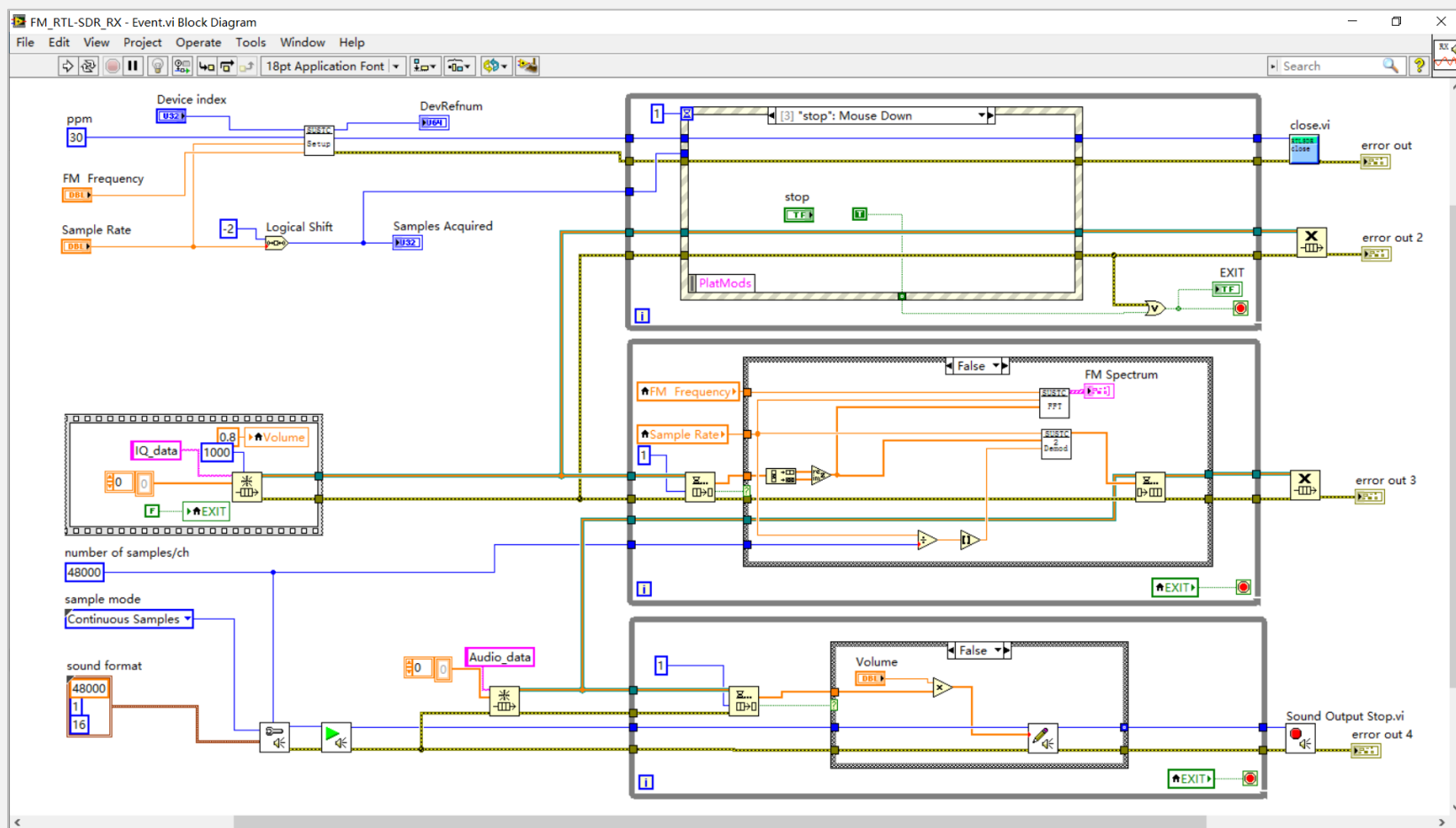
FM数据接收

解调与播放

设计模式优化



- 使用生产者——消费者结构在FM接收机的各模块间进行传输





- Question ?





【通信新说】



腾讯课堂