

一、数字调制的基本概念

一般情况下，信道不能直接传输由信源产生的原始信号，信源产生的信号需要变换成适合信号，才能在信道中进行传输。将信源产生的信号变换成适合于信道传输的信号的过程就称为调制。在数字通信系统中，由数字信源直接产生数字信号或由模拟信源产生模拟信号后，经采样量化编码后变为数字信号，由该数字信号控制载波信号的参量变化的过程，就称为数字调制。

二、单音收发的原理、结果图示及说明

原理：

类似 DDS 的原理。在基带信号处理中，先对一个单音余弦信号每个周期采样 32 个点，经精度为 15 位量化后，再经 $f_{\text{sampling}} = 40\text{MHz}$ 的频率采样，即最终产生的基带信号频率为 $f_1 = \frac{f_{\text{sampling}}}{32} = 1.25\text{MHz}$ 。在外设板中，该基带信号经 DAC 和滤波器变为模拟信号，再与频率为 $f_{LO} = 1.45\text{GHz}$ 的本振信号相乘，得到射频信号并经过 SMA 线由 Tx 端口发送至 Rx 端口。即发送出的射频信号为

$$\begin{aligned} S_I(t) &= A \cos(1.25 \times 10^6 \times 2\pi t) \cos(1.45 \times 10^9 \times 2\pi) \\ &= \frac{A}{2} [\cos(1448.75 \times 10^6 \times 2\pi) + \cos(1451.25 \times 10^6 \times 2\pi)] \end{aligned}$$

但这仅是 I 路信号，同理对相位相差 90° 的正弦信号进行相同的操作即可得到 Q 路信号

$$S_Q(t) = A \sin(1.25 \times 10^6 \times 2\pi t) \sin(1.45 \times 10^9 \times 2\pi).$$

发射信号

$$S(t) = S_Q(t) + S_I(t).$$

在接收端，接收到的射频信号在外设板中经与 $f_{LO} = 1.45\text{GHz}$ 的本振信号相乘得到 I 路和 Q 路信号，再经滤波器和 ADC 转换得到 1.25MHz 的正弦和余弦信号。

由此可以画出接收端的 IQ 两路信号、IQ 两路信号构成的星座图和以 1.25MHz 为中心的功率谱密度图。

结果图示及说明：

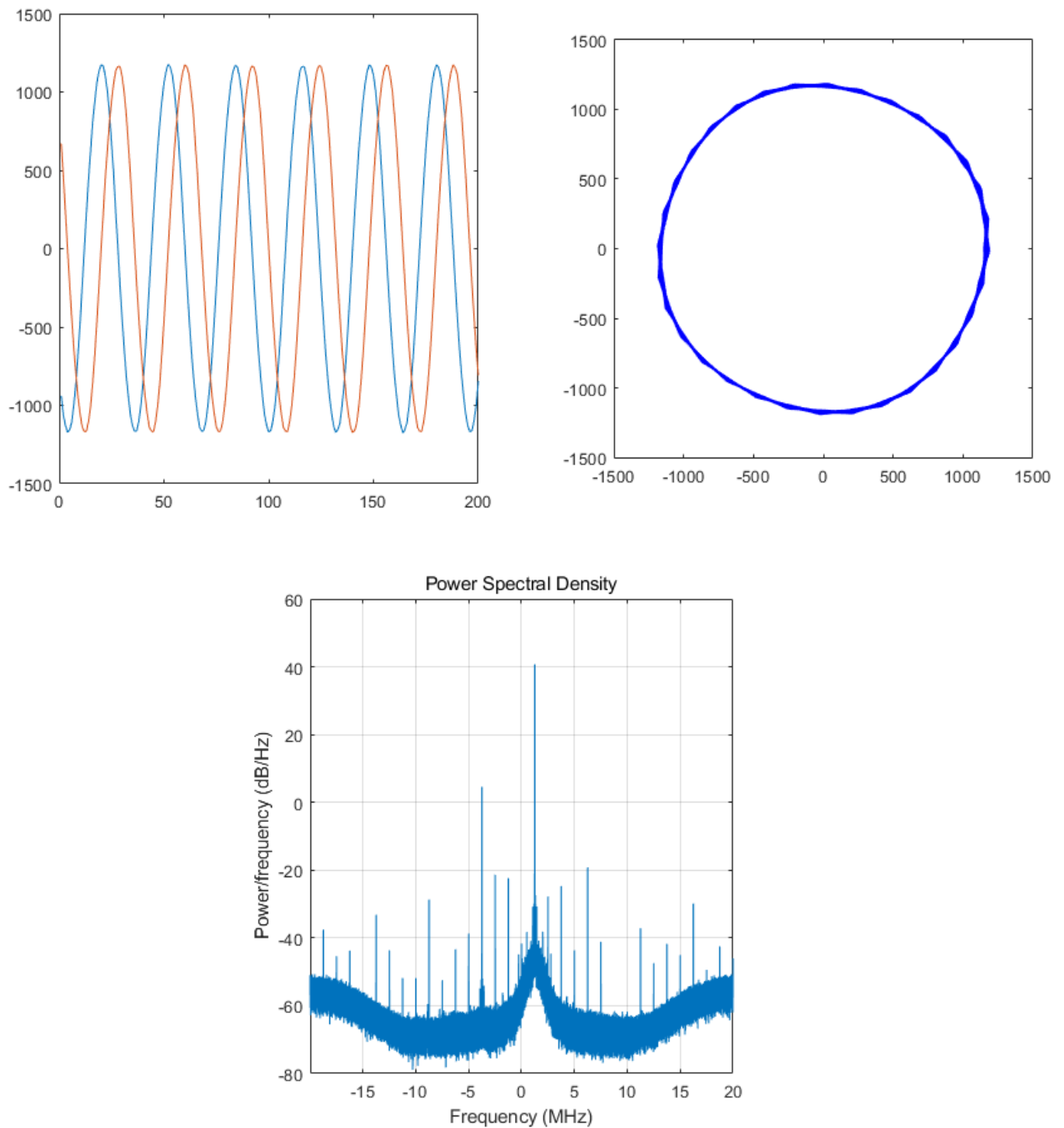


图 1

由于器件的不理想，IQ 两路的一致性较差，加之滤波器性能一般，因此第一幅图两路信号的相位并不严格相差 $\pi/2$ ，第二幅图并非严格的正圆，第三幅图除 1.25MHz 的峰值外和线条较粗的本底噪声外，还有一些未被完全滤除但

仍与 1.25MHz 的曲线相差 20dB 以上的其他频率分量。

三、2ASK 的调制解调原理、结果图及说明

原理：

2ASK 信号指用数字信号来调制载波的幅度。一般情况下，其基带信号可表示为

$$s(t) = \sum a_n g(t - nT_s).$$

其中

$$a_n = \begin{cases} 1, & \text{概率为 } p \\ 0, & \text{概率为 } 1 - p \end{cases}.$$

在本实验中取

$$g(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{T_s}{2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}.$$

即 a_n 为取值为 0 或 1 的数字码流， $g_1(t)$ 为宽度为 T_s 的门信号。在本实验中，令每个码元占据 bit_Width 个采样点，然后用 $s(t)$ 与每个周期采样 20 个点的余弦和正弦信号相乘，得到基带的 I 路和 Q 路信号，该信号经过 $f_{\text{sampling}} = 40\text{MHz}$ 频率采样、DA 转换和滤波后得到中频信号（为与传统基带信号区分称其为中频信号，但实际上其仍为由 PC 负责处理的基带部分信号）

$$s_I(t) = A \times s\left(\frac{t}{\text{bit_Width}}\right) \times \cos(2 \times 20^6 \times 2\pi t).$$
$$s_Q(t) = A \times s\left(\frac{t}{\text{bit_Width}}\right) \times \sin(2 \times 20^6 \times 2\pi t).$$

该信号与本振信号相乘后发出，在接收端再经与本振信号相乘恢复得到中频信号，中频信号再经滤波器、采样频率为 $f_{\text{sampling}} = 40\text{MHz}$ 的 AD 转换后得到数字信号，将两路信号归一化后，取 I 路和 Q 路信号的模值 abs_rxdata 作为判决量，每 bit_Width 个点采样一次，以 0.5 作为判决门限，abs_rxdata < 0.5 时

判决为 0, $\text{abs_rxdata} > 0.5$ 时判决为 1。

结果图及说明：

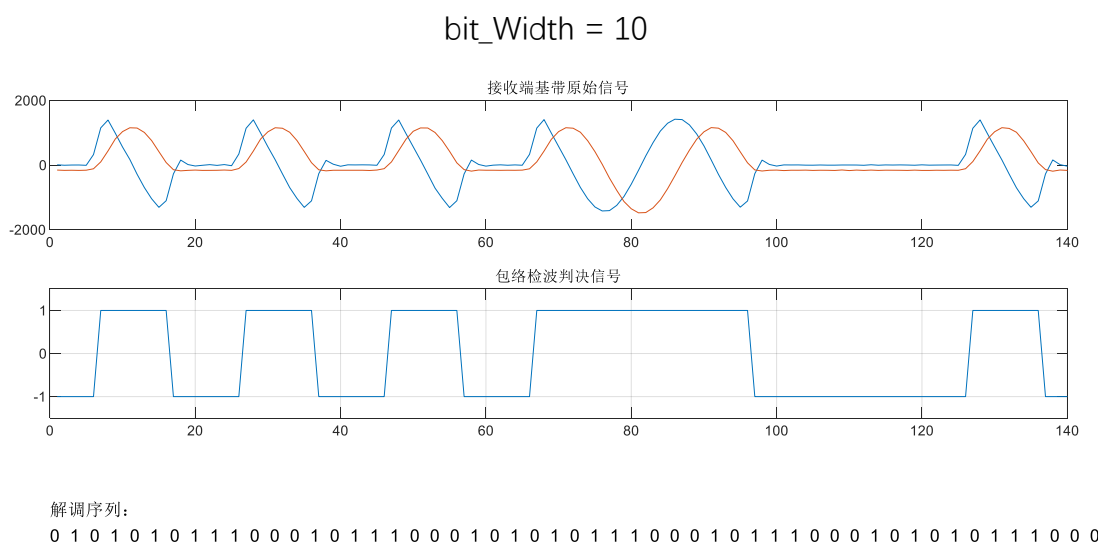


图 2

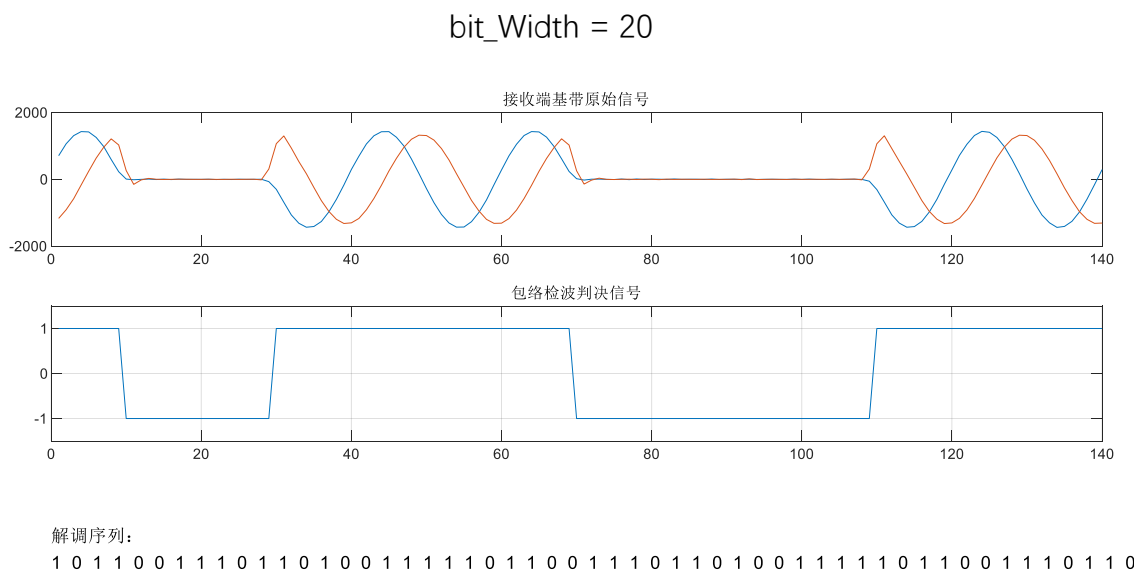


图 3

在横坐标相同的情况下，可以清楚的看到，码元宽度 bit_Width 为 10 和为 20 时的区别。因码元宽度为 10 时，码元速率二倍于中频载波频率，因此在图 2 的接收端基带原始信号中会出现半个周期的正余弦波形。

四、2FSK 的调制解调原理、结果图示及说明

调制解调原理：

FSK 指用数字信号控制载波频率的调制方式，即用载波的频率来传送数字信息，2FSK 便是指符号“0”对应于载频 f_1 ，而符号“1”对应于载频 f_2 的调制方式。

在本实验中，在发送端，类似于 DDS 和二中的单音调制，首先通过一个周期内对正余弦信号的采样点数不同产生了 2MHz 和 4MHz 的两个载波，当信源产生符号 1 时，发送 2MHz 载波，当信源产生符号 0 时，发送 4MHz 载波。即 I 路基带信号为：

$$S_I(t) = \begin{cases} A\cos(2 \times 10^6 \times 2\pi t), & 1 \text{ to be transmitted} \\ A\cos(4 \times 10^6 \times 2\pi t), & 0 \text{ to be transmitted} \end{cases}$$

Q 路信号、射频前端部分（模拟滤波器、DAC、与高频载波相乘等）与前述部分相同，此处不再赘述。

在接收端，接收信号经射频前端部分（模拟滤波器、与高频载波相乘、ADC 等）得到基带信号，将基带信号归一化后，通过一数字滤波器，以将 4MHz 分量滤除，数字滤波器采用根升余弦滤波器，其 $f_s = 8, f_d = 1$ ，又由采样频率 $f_{\text{sampling}} = 40\text{MHz}$ ，可以求得截止频率 $f_{\text{cutoff}} = 20M \times \frac{1}{8} = 2.5\text{MHz}$ 。以滤波器输出的数字信号的模值作为判决量，若其仍大于某一值，则认为发送的是 2MHz 信号，即判决为 1，若小于该值，则认为发送的是被滤除的 4MHz 信号，即判决为 0。

结果图示与说明：

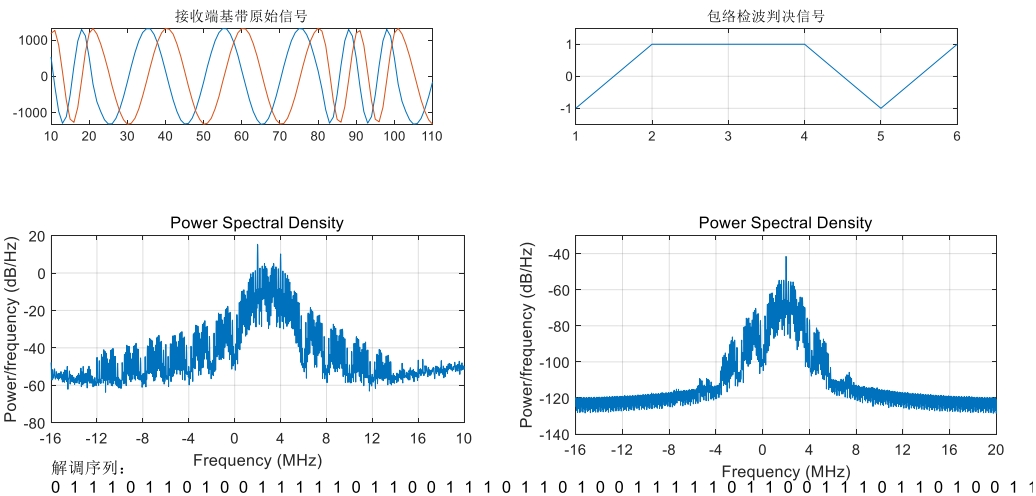


图 4

接收端基带信号明显可见信号频率的变化，结合包络检波判决信号可以看出，高频信号被判决为-1（0），低频信号被判决为1（1）。下方两个功率谱分别为接收端基带原始信号的功率谱和其通过数字滤波器之后的功率谱，可以看出除本底噪声外原始信号包含2MHz和4MHz两条谱线，通过滤波器之后只剩2MHz的谱线。

五、2PSK的调制解调原理、结果图示及说明

调制解调原理

移相键控方法是用数字信号0，1来改变载波信号的相位值的调制方法，2PSK中，当发送数字信号0时，使载波发送初相为0的波形，当发送数字信号1时，使载波发送初相为1的波形。解调时，为准确恢复相位，需使用相干解调，用与载波同频同相的信号与接收信号相乘以得到发送信号。

在本实验中，利用扩频序列实现同步。在发送端，先由10抽头序列发生器产生长1023的扩频码，该序列发生器类似m序列发生器，序列由两个m序列发生器依次产生各位后再经一次异或得到。得到序列后，用取值为{-1,1}的数字信号调制扩频序列，即

$$b_n = a_n \times pn_n$$

$\{a_n\}$ 表示原始信息序列，其取值为{-1,1}， $\{pn_n\}$ 表示扩频序列，其取值也为{-1,1}。再用 $\{b_n\}$ 序列调制载波，即

$$s_I(t) = Ab_n \times \cos(4 \times 10^6 \times 2\pi t).$$

得到发送基带I路信号，Q路信号与之类似，但其载波与I路载波相位相差 $\pi/2$ 。基带信号经DAC、滤波器、与本振相乘并发送的过程与前述类似，不再赘述。

在接收端，也由同样的方法产生相同的一串 $\{pn_n\}$ 扩频序列，接收到的信号首先与同频的载波相乘，得到一个序列 $\{b'_n\}$ ，为实现同相，用 $\{b'_n\}$ 的前1023位与 $\{pn_n\}$ 做相关，由于 $\{pn_n\}$ 序列的自相关函数 $R_{pn}(\tau)$ 具有当 $\tau = 0$ 时其模值最大的特性，因此当 $\{b'_n\}$ 与 $\{pn_n\}$ 的相关在第k位的模值最大时，可认为接收端载波在第k位与原始载波同相，即需将接收端载波的提前k位，再与接收信号相乘，即可恢复出信号 $\{b_n\}$ 。为讨论方便，以上讨论中为讨论对原始信号的重复编码，考虑重复编码后，原理相同，将与 a_n 相关的序列的按位重复bit_Width次即可。

结果图示与说明：

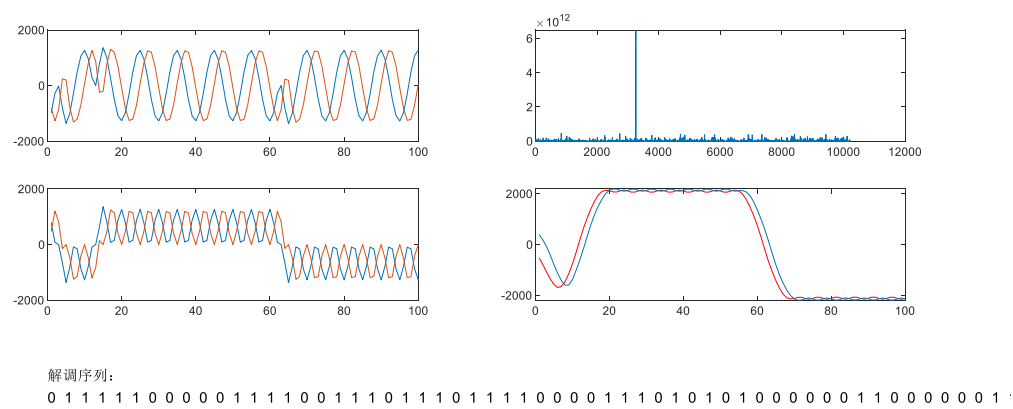


图 5

左上角的图为接收到的原始信号的 I 路和 Q 路，可以看到在横坐标为 10、60 左右波形相位反相。右上角的图为 $\{b'_n\}$ 与 $\{pn_n\}$ 的做相关的结果，可以看到有一个明显的峰值，即在该点处开始的载波与发送相位载波相同，对载波进行处理后重新下变频并取包络、采样判决，便依次得到了第三、四幅图和解调序列。