

MATLAB 实验中的关键原理说明——2020

发送部分从数据文件 SendBit 中取数据，首先转换成数字基带信号，再转变成已调数字信号（复基带信号），并以 USRP 的采样率发送数据。

接收部分接收经信道后的复基带信号，完成载波同步和位同步（需要的话），解调并恢复为原数据文件的比特。

性能展示通过两个方面表现：1) 计算误比特率和误码率，或绘出恢复比特与原数据文件的逐比特差值图；2) 动态显示恢复码元的星座图（还可以增加一幅信道接收到的信号的星座图，以作对比）。

1. 数字基带信号

实验中，原始信源数据从数据文件中读取（SendBit），经信道编码形成卷积码（Code），插入前导码后形成基带数据（data）。

卷积码编码译码原理参见配套PPT。

data=二进制数据码元 A_k : $A_k=0, 1$

数字基带信号一般可表示为

$$m(t) = d(t) * g(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot g(t - kT_s) \quad (1)$$

其中， $d(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \delta(t - kT_s)$ 是码元脉冲序列，

—— a_k 是用来表示码元 A_k 的电平值，对二进制无记忆码元，有单极性和双极性之分；

—— T_s 是码元宽度；

—— $g(t)$ 是基带脉冲成型函数，通常为方波波形，也可为升余弦滚降特性的波形或其它无码间串扰的波形。

1) 单极性-双极性变换：

设二进制数据码元为： $A_k=0, 1$

单极性电平时，有： $a_k = A_k$ ；

双极性电平时，有： $a_k = 2A_k - 1$, $a_k = +1, -1$

2) 差分编码：

设 A_k 的差分码为 B_k ，对应的双极性电平分别为 a_k , b_k ，则：

传号差分码：

$$\text{发送端 } B_k = A_k \oplus B_{k-1} \quad b_k = -a_k \times b_{k-1}$$

$$\text{接收端 } A_k = B_k \oplus B_{k-1} \quad a_k = -b_k \times b_{k-1}$$

空号差分码:

$$\text{发送端 } B_k = \bar{A}_k \oplus B_{k-1} \quad b_k = a_k \times b_{k-1}$$

$$\text{接收端 } A_k = \overline{B_k \oplus B_{k-1}} \quad a_k = b_k \times b_{k-1}$$

其中初始值 B_0 可任意取0或1, b_0 可任意取+1或-1。

2. 数字复基带信号

1) 数字复基带信号的表达

复基带信号的概念参见配套PPT。

实验中带通实信号与复基带信号的关系为: $s(t) = \text{Re}[s_l(t)e^{j\omega_c t}]$

BDPSK: 带通实信号 $s(t) = m(t)\cos\omega_c t$

$$\text{复基带信号 } s_{l-BDPSK}(t) = m(t) = d(t) * g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n g(t - nT_b), \quad d(t) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n \delta(t - nT_b)$$

b_k 为差分码的双极性电平表示(传号码与空号码皆可), T_b 是原始数据的比特宽度。

2FSK: 带通实信号 $s(t) = m_1(t)\cos\omega_1 t + m_2(t)\cos\omega_2 t$

$$\text{其中, } m_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n g(t - nT_b), \quad m_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{a}_n g(t - nT_b)$$

$$\text{复基带信号 } s_{l-2FSK}(t) = m_1(t)e^{j(\omega_1 - \omega_c)t} + m_2(t)e^{j(\omega_2 - \omega_c)t}$$

实验中, 取

$$\omega_2 - \omega_1 = 2R_s, \quad \omega_c = (\omega_2 + \omega_1)/2$$

a_k 为二进制数据码元的单极性电平表示, T_b 是原始数据的比特宽度, R_s 为码元速率。

2) 数字复基带信号的上采样

本实验中, 复基带信号的系统采样率设置为 $F_s=200\text{kHz}$, 而码元速率(比特率)为 $R_s=10\text{kbps}$ 。假设传整

段数据所需时间为1s, 则MATLAB每个采样值的间隔为 $\Delta T=1/F_s$, 而码元宽度 $T_s = T_b = \frac{1}{R_s} = \frac{F_s}{R_s} \cdot \Delta T$, 这意

味着每个码元电平(a_k 或 b_k)需取 $\frac{F_s}{R_s}$ 个采样值, 此即为上采样。当 $g(t)$ 为矩形码元脉冲时, 这些采样值都等

于当前码元电平值。

3) 数字复基带信号的脉冲成型

本实验中，2FSK复基带信号的 $g(t)$ 为矩形码元脉冲，上采样后无需脉冲成型；

BDPSK复基带信号的 $g(t)$ 不是矩形码元脉冲，上采样后需要通过发送滤波器形成发送码元的脉冲波形。实验中用于接收端判决时的码元波形 $h(t)$ 为升余弦滚降特性，而接收滤波器采用匹配滤波器，由第9章所学知，发送和接收滤波器的特性为：

$$G_T(f) = G_R(f) = \sqrt{H(f)}$$

3. 通过信道后的复基带信号

通过信道传输后，接收的复基带信号可表示为

$$r_l(t) = a \cdot s_l(t - \tau) e^{j(\omega_\Delta t + \theta)} + n_l(t)$$

其中， a 是幅度变化， ω_Δ 是载波频偏， θ 是载波相移， τ 是传输延迟，为仿真USRP实际信道环境，在MATLAB下由channel子程序产生这些随机变化，并加入高斯噪声。

在PSK/FSK类调制中，不关心幅度，因此在下文中，不考虑噪声时，可简写为：

$$r_l(t) = \begin{cases} s_l(t - \tau) e^{j(\omega_\Delta t + \theta)}, & t > \tau \\ 0, & t \leq \tau \end{cases}$$

4. 2FSK 复基带信号的相干解调等

复基带下，2FSK的两个复载波为： $s_1(t) = e^{j(\omega_1 - \omega_c)t}$ 和 $s_2(t) = e^{j(\omega_2 - \omega_c)t}$

对复基带信号的两路相干解调为： $r_l(t) \cdot s_1^*(t) = r_l(t) \cdot e^{-j(\omega_1 - \omega_c)t}$ 和 $r_l(t) \cdot s_2^*(t) = r_l(t) \cdot e^{-j(\omega_2 - \omega_c)t}$

经过低通滤波后，两路输出为： $m_1(t - \tau) e^{j(\omega_\Delta t + \theta)}$ 和 $m_2(t - \tau) e^{j(\omega_\Delta t + \theta)}$

其中， $m_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n g(t - nT_b)$ ， $m_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \overline{a_n} g(t - nT_b)$

由于两路输出为复数，幅度比较时取绝对值，即得： $m_2(t - \tau) - m_1(t - \tau)$

通过前导码搜索消除时延后，为 $m_2(t) - m_1(t)$

对每个码元只进行一次采样，则得到码元采样序列，即 $\overline{a_n} - a_n$ 序列。

5. BDPSK 的差分相干解调等

经过匹配滤波器后的接收信号（不考虑噪声）为：

$$r(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n h(t - \tau - nT_b) \cdot e^{j(\omega_\Delta t + \theta)}$$

对接收信号进行差分相干，可得

$$x(t) = r(t)r^*(t+T_b) = m(t)m(t+T_b)e^{-j\omega_\Delta T_b}$$

其中

$$m(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n g(t-\tau-nT_b), \quad m(t+T_b) = \sum_{n'=1}^{\infty} b_{n'} g(t-\tau+T_b-n'T_b) = \sum_{n=0}^{\infty} b_{n+1} g(t-\tau-nT_b)$$

则有

$$m(t)m(t+T_b) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot b_{n+1} \cdot g^2(t-\tau-nT_b)$$

这里假设 $\omega_\Delta T_b$ 的影响可以忽略，则对 $x(t)$ 取实部，即得差分相干解调后的信号。再经搜索前导码消除时延影响。

网站上的实验结果图——MATLAB 代码中各环节的信号对照表

	网站上实验结果图	MATLAB 代码中各环节的信号
DPSK	数据源比特	SendBit
	差分编码后的 BPSK 码元	SendBpsk
	DPSK 发送信号	SendSig
	DPSK 接收信号	real(RecvSig)
	滤波接收信号	real(RecvSigFiltered)——完成“% RRC filtering”后的结果
	DPSK 解调后信号	RecvDpskDemod——完成“% differential decoding”后的结果
	preamble 相关结果	RecvCorr——完成“% preamble search”时的中间结果，是用相关计算搜索前导码时的相关结果
	抽样码元	RecvSymbolSampled——完成“% sampled symbol”后的结果，已去除前导码，且每个采样值对应一个码元
	译码比特	RecvBit——完成“% convolutional decoding”后的结果
	接收发送比特错误	abs(RecvBit-SendBit)
FSK	数据源比特	SendBit

	FSK 发送信号相位	phase(SendSig)
	FSK 接收信号	real(RecvSig)
	FSK 解调后信号	real(RecvFskDemod)——RecvFskDemod 是完成 “% FSK demodulation” 后的结果
	preamble 相关结果	RecvCorr——完成 “% preamble search” 时的中间结果，是用相关计算搜索前导码时的相关结果
	抽样码元	RecvSymbolSampled——完成 “% sampled symbol” 后的结果，已去除前导码，且每个采样值对应一个码元
	译码比特	RecvBit——完成 “% convolutoinal decoding” 后的结果
	接收发送比特错误	abs(RecvBit-SendBit)