一. 选择填空

空格号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
答案	B	B	D	C	B	A	C	C	B	C
空格号	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
答案	C	D	D	B	A	C	D	A	C	D
空格号	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
答案	C	B	D	C	B	D	C	B	B	C

1. 设 8PSK 的数据速率是 3b/s，平均每比特能量是 E_b=1/3 焦耳，则平均每符号能量是(1)焦耳，平均发送功率是(2)瓦。

(1) (2)	(A) 1/3	(B) 1	(C) 2	(D) 3

注：每个符号携带 3 个比特，故每个符号的能量是 $E_s=3E_b$。功率是单位时间（1s）内的能量，1s 内有三个比特，故功率的数值是 $3E_b$。

2. 设数据速率是 10kb/s。若基带采用矩形脉冲，OOK 信号的主瓣带宽是(3)；若基带采用滚降因子为 0.5 的根号升余弦滚降，OOK 信号的带宽是(4)。

(3) (4)	(A) 5kHz	(B) 10kHz	(C) 15kHz	(D) 20kHz

注：OOK 是一种 DSB 信号，其奈奎斯特极限带宽等于符号速率，为 10kHz。滚降系数 0.5 表示带宽还要增加 50%，故为 15kHz。基带采用矩形脉冲时的主瓣带宽等于基带采用滚降因子=1 的升余弦滚降的带宽。

3. 设数据速率是 10kb/s。正交 2FSK 的两个频率之差最小是(5)kHz。正交 4FSK 相邻频率之差最小是(6)kHz。

(5) (6)	(A) 2.5kHz	(B) 5kHz	(C) 10kHz	(D) 20kHz

注：最小频差是$\frac{1}{2T_s}=\frac{R_s}{2}$，是符号速率的一半。$M$ 增大时，符号速率减小。

4. 假设 OQPSK 的比特间隔是 T_b，复包络是$s_L(t)=I(t)+jQ(t)$。$I(t),Q(t)$这两个随机过程的关系是(7)。

(7)	(A) $Q(t)=I(t-T_b)$	(B) $Q(t)$是$I(t)$的希尔伯特变换
	(C) $I(t),Q(t)$不相关	(D) $I(t)+jQ(t)$是解析信号

注：I、Q 两路传输的是独立等概数据，故这两个随机过程不相关。

5. 若 OOK 信号的载频为 1MHz，发送功率为 1W。那么 OOK 信号的单边功率谱密度中包含冲激（线谱分量），其频率是(8)MHz，冲激强度是(9)W。

(8) (9)	(A) 0.25	(B) 0.5	(C) 1	(D) 2

注：OOK 和 AM 类似，功率谱中有载频线谱分量，其功率占总功率的一半。

6. QPSK 是两个载频正交的(10)之和。

(10)	(A) OOK	(B) 2FSK	(C) 2PSK	(D) DPSK

7. 设 2PSK 调制器的载波是$\cos(2\pi f_c t+\theta)$。忽略噪声、信道以及其他因素引起的相移，设接收端科斯塔斯环提取的载波是$\cos(2\pi f_c t+\varphi)$。令$\psi=\theta-\varphi$，则ψ的可能取值是(11)。

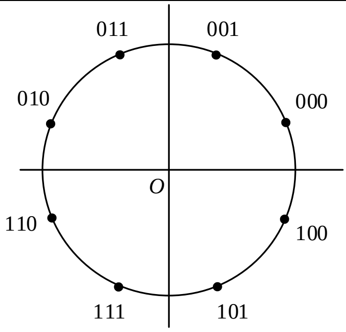
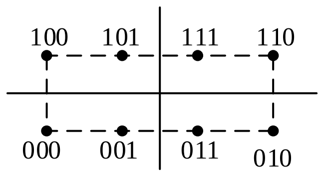
(11)	(A) 0	(B) π	(C) 0 或π	(D) 区间$[0,\pi]$内的任意值

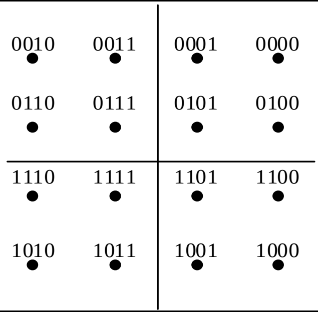
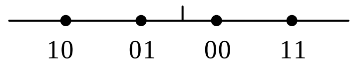
注：科斯塔斯环提取的载波有 0、π相位模糊。

8. 对 DPSK 进行差分相干解调时，(12)。

<table>
<tr><td rowspan="4">(12)</td><td>(A) 发送端需要插入导频</td></tr>
<tr><td>(B) 接收端需要用平方环提取相干载波</td></tr>
<tr><td>(C) 接收端需要用科斯塔斯环提取相干载波</td></tr>
<tr><td>(D) 以上都不需要</td></tr>
</table>

9. 下列星座图中(13)是 4ASK，(14)是 8QAM，(15)是 8PSK，(16)是 16QAM，其中的(17)不满足格雷码映射规则。

<table>
<tr><td>(13)
(14)
(15)
(16)
(17)</td><td>(A)

</td><td>(B)

</td></tr>
</table>

	(C) 	(D) 

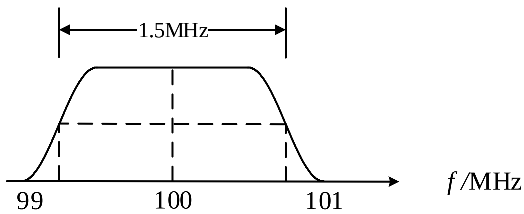
10. 对于格雷映射的 8PSK，若误符号率是 0.0003，则误比特率近似是(18)。

(18)	(A) 0.0001	(B) 0.0003	(C) 0.0006	(D) 0.0024

注：以前图为例，假设发端将 000 对应的符号发送 1 万次，那么平均而言，收端会收到 9997 个 000，另外有 3 个不是 000。这三个出错的符号极有可能是 001 或 100。

从比特来看，发送端发送了 1 万次 000 就是发送了 3 万个“0”，收到的 9997 个正确的符号是 9997×3 个“0”，3 个错误符号基本上不是 001 就 100，每个错误符号有两个“0”，一个“1”。总之，3 万个比特中，有 3 个“1”，故比特错误率是万分之一。

11. 下图是某 8PSK 系统发送信号的单边功率谱密度图。由图可知，该系统基带脉冲成形采用的是(19)的脉冲，数据速率是(20)Mb/s，频带利用率是(21)b/s/Hz。



(19)	(A) 时域为矩形	(B) 频域为矩形
	(C) 频域为根号升余弦滚降特性	(D) 频域为升余弦滚降特性

(20) (21)	(A) 1.5	(B) 2	(C) 2.25	(D) 4.5

注：从基带看，PAM 的功率谱密度的形状是基带脉冲傅氏变换的模平方。图中的功率谱是升余弦滚降（下降部分有互补对称性，是升起的余弦），故基带脉冲在频域是根号升余弦。

图中左右两个互补对称的点之间的宽度是 1.5MHz，说明符号速率是 1.5MBaud，因此比特速率是 1.5×3=4.5Mb/s。

12. 将二进制数据先进行差分编码，然后进行(22)调制，便形成了 DPSK。接收端先进行理想相干解调，然后进行差分译码。假设理想相干解调的误比特率是 0.0002，那么差分译码之后的误比特率近似是(23)。

(22)	(A) OOK	(B) 2PSK	(C) QPSK	(D) 2FSK
(23)	(A) 0	(B) 0.0001	(C) 0.0002	(D) 0.0004

注：DPSK 采用相干解调+差分译码方案时存在差错传播的问题。在差分译码的输入中，如果某个比特出错，差分译码输出往往会出现连续两个比特差错。

13. 设 OOK、2PSK 和 QPSK 已调信号的主瓣带宽相同，载波幅度分别是 A_{OOK}、A_{2PSK} 和 A_{QPSK}。若在相同噪声功率谱密度 N_0 的条件下最佳接收的误比特率相同，则$\frac{A_{\text{OOK}}}{A_{\text{2PSK}}}=$(24)，$\frac{A_{\text{OOK}}}{A_{\text{QPSK}}}=$ (25)。

(24) (25)	(A) 1	(B) $\sqrt{2}$	(C) 2	(D) 4

注：误比特率公式是$P_{\text{OOK}}=\frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_{\text{b}}}{2N_0}}\right)$、$P_{\text{BPSK}}=P_{\text{QPSK}}=\frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_{\text{b}}}{N_0}}\right)$

OOK、2PSK 和 QPSK 的比特能量分别是$\frac{A_{\text{OOK}}^2T_{\text{b}}}{4}$、$\frac{A_{\text{OOK}}^2T_{\text{b}}}{2}$、$\frac{A_{\text{QPSK}}^2T_{\text{b}}}{2}=\frac{A_{\text{QPSK}}^2T_{\text{s}}}{4}$。主瓣带宽相同说明$T_{\text{s}}$相同。

14. 下列调制方式中，只能相干解调的是(26)。

(26)	(A) OOK	(B) 2DPSK	(C) 2FSK	(D) 2PSK

注：OOK 可以像 AM 那样用包络检波器来解调。2FSK 是两个 OOK 之和，故可以用两个包络检波器来解调 2FSK。2DPSK 采用差分相干解调时，不需要收端提取载波，故此属于非相干解调。

15. 二进制码组(1011001)与(1010000)之间的汉明距离是(27)。

(27)	(A) 0	(B) 1	(C) 2	(D) 3

16. 某线性分组码的最小码距是 5，该码可以保证纠正(28)位错。

(28)	(A) 1	(B) 2	(C) 3	(D) 4

17.线性分组码的生成矩阵为$G=\begin{pmatrix}1&0&0&0&1&1&1\\0&1&0&0&1&1&0\\0&0&1&0&1&0&1\\0&0&0&1&0&1&1\end{pmatrix}$，其监督矩阵为 (29)。

(29)	(A) $H=\begin{pmatrix}1&0&0&0&1&1&1\\0&1&0&0&1&1&0\\0&0&1&0&1&0&1\\0&0&0&1&0&1&1\end{pmatrix}$	(B) $H=\begin{pmatrix}1&1&1&0&1&0&0\\1&1&0&1&0&1&0\\1&0&1&1&0&0&1\end{pmatrix}$
	(C) $H=\begin{pmatrix}1&0&0&1&1&1&0\\0&1&0&1&1&0&1\\0&0&1&1&0&1&1\end{pmatrix}$	(D) $H=\begin{pmatrix}1&1&1&0&1&0\\1&1&0&1&0&1\\1&0&1&1&0&0\end{pmatrix}$

18.若线性分组码的监督矩阵为$H=\begin{pmatrix}1&1&1&0&1&0\\1&1&0&1&0&1\\1&0&1&1&0&0\end{pmatrix}$，则接收到 $\boldsymbol{y}$=(110000)时的伴随式（校正子）$\boldsymbol{s}=\boldsymbol{y}H^{\mathrm{T}}$为 (30)。

(30)	(A) 111	(B) 000	(C) 001	(D) 110

注：$\boldsymbol{y}$ 的前两个元素是 1，故 $\boldsymbol{s}$ 是 H 的前两列之和的转置。

二．判断题

答题表后面有 12 个小题。判断每个小题的称述是否正确。对于第 k 题，如果认为正确，就在答案 c_k 行中对应的序号下填 1，否则填 0。例如第 12 题的称述是正确的，故 c_{12}=1。

答题表

题号 k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
答案 c_k												1

1. 无论发送数据是否为独立等概序列，DPSK 与 2PSK 有相同的功率谱密度。
2. 2FSK 的两个波形之间的归一化相关系数最小可以小于零。
3. 与 QPSK 相比，OQPSK 改善了包络起伏，但频带利用率略有下降。
4. 固定星座点之间的最小距离，MQAM 星座图中的点数 M 增加一倍时，平均符号能量也增加一倍。

5. 对于固定的 E_s/N_0，MFSK 的误符号率随着 M 的增加而增加。

6. 对于固定的 E_s/N_0，MQAM 的误符号率随着 M 的增加而增加。

7. 假设 A 律十三折线编码器的动态范围是$\pm$4096 个量化单位。若输入样值是$+$2015 量化单位，则编码输出是 11111001。

8. 16QAM 可以采用差分相干解调。

9. 假设 2FSK 的在$[0,T_\mathrm{b}]$内的两个信号是$s_1(t)=\cos 2\pi f_1 t$和$s_2(t)=\cos 2\pi f_2 t$。若频差$|f_1-f_2|=\frac{1}{2T_\mathrm{b}}$时的误比特率是 P_1，频差$|f_1-f_2|=\frac{1}{4T_\mathrm{b}}$时的误比特率是 P_2，则$P_2>P_1$。

10. A 律或μ律对数量化与 Lloyd-Max 最佳量化等价。

11. 对于任意的(n,k)线性分组码（$1<k<n$），其校验矩阵 H 的所有列线性相关。

12. 答题表中的$c_1c_2\cdots c_{12}$构成了一个偶校验码。

注：

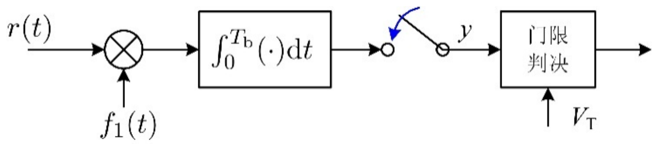
5. 固定 N_0、固定 E_s 时，MFSK 星座点之间的距离是$\sqrt{2E_\mathrm{s}}$，与 M 无关。但 M 增加时，接收端的选项增多，所以错误率增加。好比单项选择题，对于相同的题，将候选项从 4 个减少到 2 个后，答错的概率会降低。

9. 两个信号之间的欧氏距离平方是

$$
\begin{aligned}
d_{12}^2 &= \int_0^{T_\mathrm{b}} (\cos 2\pi f_1 t - \cos 2\pi f_2 t)^2 \mathrm{d}t \\
&= \int_0^{T_\mathrm{b}} \cos^2 2\pi f_1 t \mathrm{d}t + \int_0^{T_\mathrm{b}} \cos^2 2\pi f_2 t \mathrm{d}t - 2\int_0^{T_\mathrm{b}} \cos 2\pi f_1 t \cos 2\pi f_2 t \mathrm{d}t \\
&\approx \frac{T_\mathrm{b}}{2} + \frac{T_\mathrm{b}}{2} - \int_0^{T_\mathrm{b}} \cos 2\pi (f_1-f_2) t \mathrm{d}t = T_\mathrm{b} - \frac{\sin 2\pi(f_1-f_2)T_\mathrm{b}}{2\pi(f_1-f_2)}
\end{aligned}
$$

由此可知，$|f_1-f_2|=\frac{1}{2T_\mathrm{b}}$时的距离比$|f_1-f_2|=\frac{1}{4T_\mathrm{b}}$时大。

三.（14 分）某二进制调制系统在$[0,T_\mathrm{b}]$内等概发送$s_1(t)=f_1(t)$或$s_2(t)=-f_1(t)$之一，其中$f_1(t)=\sqrt{\frac{2}{T_\mathrm{b}}}\cos 2\pi f_\mathrm{c} t$是归一化基函数。发送信号叠加了白高斯噪声$n_\mathrm{w}(t)$后成为$r(t)=s_i(t)+n_\mathrm{w}(t)$。接收框图如下所示，其中$y=\int_0^{T_\mathrm{b}} r(t)f_1(t)\mathrm{d}t$，$V_\mathrm{T}$ 是判决门限，$y\ge V_\mathrm{T}$时判发$s_1(t)$，否则判发$s_2(t)$。



(1) 求发送$s_1(t)$条件下 y 的均值、方差，写出条件概率密度函数$p(y|s_1)$；

(2) 令q_1、q_2分别表示发送$s_1(t)$、$s_2(t)$条件下的错判概率。若 V_T=0，试求q_1、q_2以及平均误比特率P_b；

(3) 若 V_T=1，试求q_1、q_2。

解：(1) 发送$s_1(t)$条件下 y 为

$$y = \int_0^{T_b} r(t) f_1(t)\mathrm{d}t = \int_0^{T_b} [f_1(t) + n_w(t)] f_1(f)\mathrm{d}t$$
$$= 1 + z$$

其中$z \sim \mathcal{N}(0, \frac{N_0}{2})$。因此，发送$s_1(t)$条件下 y 的均值是 1，方差是 $N_0/2$，条件概率密度函数是$p(y|s_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(y-1)^2}{N_0}\right]$

(2)发送$s_1(t)$而判错的概率是

$$q_1 = \Pr\{1 + z < 0\} = \Pr\{z < -1\} = \Pr\{z > 1\} = \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{1}{N_0}\right)$$

根据对称性可知$q_1 = q_2$，平均误比特率是q_1, q_2的平均，故

$$P_b = q_1 = q_2 = \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{N_0}}\right)$$

(3)发送$s_1(t)$而判错的概率是$q_1 = \Pr\{1 + z < 1\} = \Pr\{z < 0\} = \frac{1}{2}$。

发送$s_2(t)$时$y = -1 + z$，$q_2 = \Pr\{-1 + z < 1\} = \Pr\{z < -2\} = \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{2}{\sqrt{N_0}}\right)$

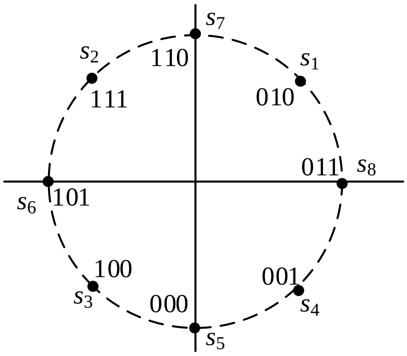
四.（16 分）下图是归一化正交基下的八进制星座图，8 个星座点等概出现。图(a)是 8PSK，图中圆的半径是 1。图(b)的星座图上下左右对称，外圆半径是 1，s_7 与 s_1、s_2、s_6、s_8 等距离。

(1) 在图(a)中标出星座点 s_1 的最佳判决域，并求星座点之间的最小欧氏距离 $d_{\min}$；

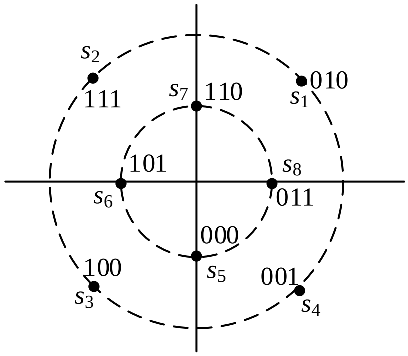
(2) 在图(b)中标出星座点 s_1 的最佳判决域示意图，并求出内圆半径、此星座图的平均符号能量 E_s 以及星座点之间的最小欧氏距离 $d_{\min}$；

(3) 若 E_s/N_0 相同，图(a)和图(b)所对应的两个调制系统中哪个的误符号率低?

(4) 若误符号率相同，图(a)和图(b)所对应的两个调制系统中，哪个的误比特率低?

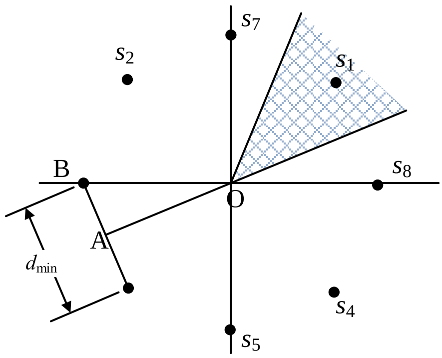


(a)

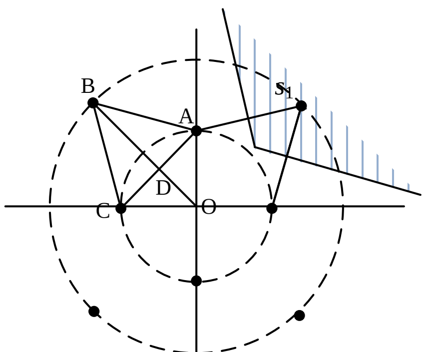


(b)

解：(1) s_1 的最佳判决域如下图中的阴影区所示。最小距离可按图中的直角三角形 OAB 来计算，结果是 $2\sin\dfrac{\pi}{8}$。



(2) s_1 的最佳判决域如下图中的阴影区所示（注意判决域不超出第一象限）。



设内圆半径是 x，则等腰三角形 AOC 的腰长是 x，等边三角形 ABC 的边长是 $\sqrt{2}x$。在三角形 OAB 中，OB=1，∠OAB=105°=$\frac{7\pi}{12}$，可列出方程

$$x^2+2x^2-2\cdot x\cdot\sqrt{2}x\cdot\cos\frac{7\pi}{12}=1$$

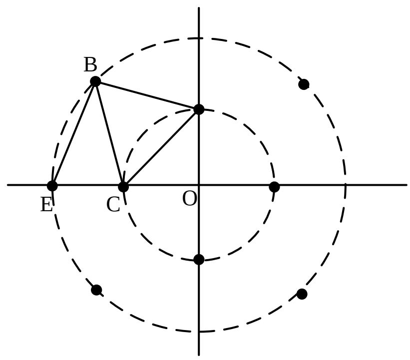
解得$x=\frac{1}{\sqrt{3+2\sqrt{2}\sin\frac{\pi}{12}}}$。

也可以根据$\mathrm{DB}=\mathrm{AB}\cdot\sin\frac{\pi}{2}$，$\mathrm{OD}=\mathrm{OA}\cdot\cos\frac{\pi}{4}$列出方程$\frac{x}{\sqrt{2}}+\sqrt{2}x\sin\frac{\pi}{3}=1$，得$x=\frac{\sqrt{2}}{1+\sqrt{3}}$

平均符号能量是$\frac{1}{2}+\frac{x^2}{2}$

$d_{\min}=\sqrt{2}x$

(3) 图 b 相当于是把图 a 中的 4 个点向原点方向收缩形成的。参考下图，目测 BE 和 BC 近似相等（实际上 BE 大一点，算一下三角形 BEC 的内角可以判断出这一点）。但 C 点的能量要比 E 点小很多（能量是长度的平方，目测 C 和 E 的能量大约差 4 倍）。题中条件是 E_s/N_0 相同，因此图 b 中的 N_0 要比图 a 明显小，而最小距离大体差不多，由此可以推断出：图 b 的误符号率比图 a 低。



(4)图 a 是格雷映射，图 b 不是，故当误符号率相同时，图 a 的误比特率更低。

五.（16 分）设 X 在区间(0,8)内均匀分布。将 X 通过一个 4 电平量化器后成为$Y=Q(X)\in\{y_1,y_2,y_3,y_4\}$。对于$k=1,2,3,4$，当 X 的取值在区间$[x_{k-1},x_k)$时，Y 的取值是$y_k=\frac{1}{2}(x_k+x_{k-1})$，其中 x_0=0、x_4=8。

(1) 写出 X 的概率密度函数$p(x)$，求 X 的平均功率$S=\mathbb{E}[X^2]$；

(2) 若$Q(X)$是均匀量化，写出y_1,y_2,y_3,y_4的值，求量化后信号的功率$S_q=\mathbb{E}[Y^2]$以及量化噪声功率$N_q=\mathbb{E}[(X-Y)^2]$；

(3) 若对于$k=1,2,3$，$x_k=2^{k-1}$，写出y_1,y_2,y_3,y_4的值，求量化后信号的功率$S_q=\mathbb{E}[Y^2]$以及量化噪声功率$N_q=\mathbb{E}[(X-Y)^2]$。

解：(1)$p(x)=\frac{1}{8},x\in(0,8)$，$S=21+\frac{1}{3}$。

计算 S 时，除了可以按$\int_0^8 x^2p(x)\mathrm{d}x$来做之外，还可以这样做：$X$ 的均值是 4，方差是$\frac{8^2}{12}=\frac{16}{3}$，故$\mathbb{E}[X^2]=4^2+\frac{16}{3}$。

(2) y_1,y_2,y_3,y_4的值分别是 1、3、5、7；其出现概率都是$\frac{1}{4}$，平均功率是$S_q=\frac{1}{4}[1^2+3^2+5^2+7^2]=21$；

N_{q} 答案是$\frac{1}{3}$。求法一：$N_q=\mathbb{E}[(X-Y)^2]=\sum\limits_{k=1}^{4}\int_{x_{k-1}}^{x_k}(x-y_k)^2p(x)\mathrm{d}x$

求法二：量化误差在每个量化区间内都是在$[-1,1]$内均匀分布，其方差为$\frac{2^2}{12}=\frac{1}{3}$

求法三：当量化电平是量化区间的概率质心时，有这样的性质：$S=S_{\mathrm{q}}+N_{\mathrm{q}}$

求法四：考虑将$X'=X-4$通过一个范围是$[-4,-4]$的 4 电平均匀量化器得到Y'，然后对量化前和量化后的信号X',Y'统一加上 4，就和本小题等价。两者有相同的量化噪声功率：$\mathbb{E}[(X'-Y')^2]=\mathbb{E}[(X-Y)^2]=N_{\mathrm{q}}$。因为是均匀量化，所以前者的量化信噪比是$\frac{\mathbb{E}[X'^2]}{N_{\mathrm{q}}}=4^2$，而$\mathbb{E}[X'^2]$是 X 的方差，是$\frac{16}{3}$。由此可以推出$N_{\mathrm{q}}=\frac{1}{3}$

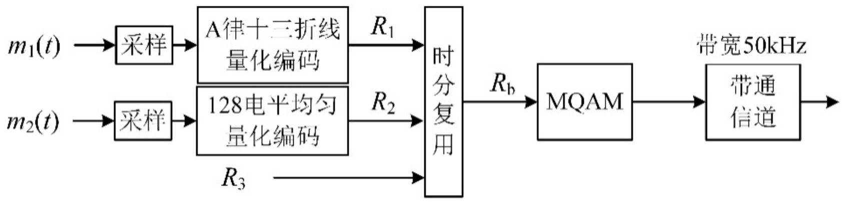
(3) 4 个量化区间分别是$[0,1)$、$[1,2)$、$[2,4)$和$[4,8]$，y_1,y_2,y_3,y_4的值分别是 0.5、1.5、3、6，出现概率分别是$\frac{1}{8}$、$\frac{1}{8}$、$\frac{1}{4}$和$\frac{1}{2}$。

$S_{\mathrm{q}}=\frac{1}{8}(0.5^2+1.5^2)+\frac{1}{4}\cdot 3^2+\frac{1}{2}\cdot 6^2=20+\frac{9}{16}$。

4 个量化区间中的量化噪声功率分别是$\frac{1}{12}$、$\frac{1}{12}$、$\frac{2^2}{12}$和$\frac{4^2}{12}$，平均值为

$N_{\mathrm{q}}=\frac{1}{8}(\frac{1}{12}+\frac{1}{12})+\frac{1}{4}\cdot\frac{4}{12}+\frac{1}{2}\cdot\frac{16}{12}=\frac{37}{48}$ （或者$N_{\mathrm{q}}=S-S_{\mathrm{q}}$）

六.（18 分）下图中 $m_1(t)$是基带信号，其最高频率为 f_1；$m_2(t)$是带通信号，其频谱范围是$[5\mathrm{kHz},f_2]$。图中的采样速率都是 8kHz。$m_1(t)$的样值采用 A 律十三折线编码，输出速率是 R_1；$m_2(t)$的样值采用 128 电平的均匀量化编码，输出速率是 R_2。R_1、R_2 与另外一路速率为 R_3 的数据复用为一路速率为 R_b=160kb/s 的数据。然后经 MQAM 调制后通过一个带宽为 50kHz 的频带信道传输。



(1) 求 R_1、R_2、R_3 的数值；

(2) 求能使采样不发生频谱混叠的最大 f_1、f_2 值；

(3) 确定 MQAM 的进制数 M 及滚降因子α;（要求 M 尽量小，α尽量大）;

(4) 画出 MQAM 调制及解调框图。

解：(1)f_s=8kHz，R_1=8f_s=64kbps， R_2=7f_s=56kbps， R_3=160-64-56=40kbps

(2)$m_1(t)$是基带信号，采样率与 f_1 的关系是$f_s \geq 2f_1$，故 f_1 最高是 4kHz；

$m_2(t)$是带通信号，最小采样率应满足$f_s = \frac{2f_2}{k}$且$\frac{f_2}{k} \geq W$，其中$W = f_2 - 5\mathrm{k}$是$m_2(t)$的带宽。由此可得 f_2 最高是 f_2=8kHz。

(3)信道带宽是 50kHz，传输速率是 160kbps，频带利用率至少是 160/50>3，因此调制的进制数必须$M > 2^3$，取 M=16 则符号速率是 40kBaud，奈奎斯特极限带宽是 40kHz，滚降后的带宽是 50kHz，故滚降因子是α=0.25。

(4)收发框图如下