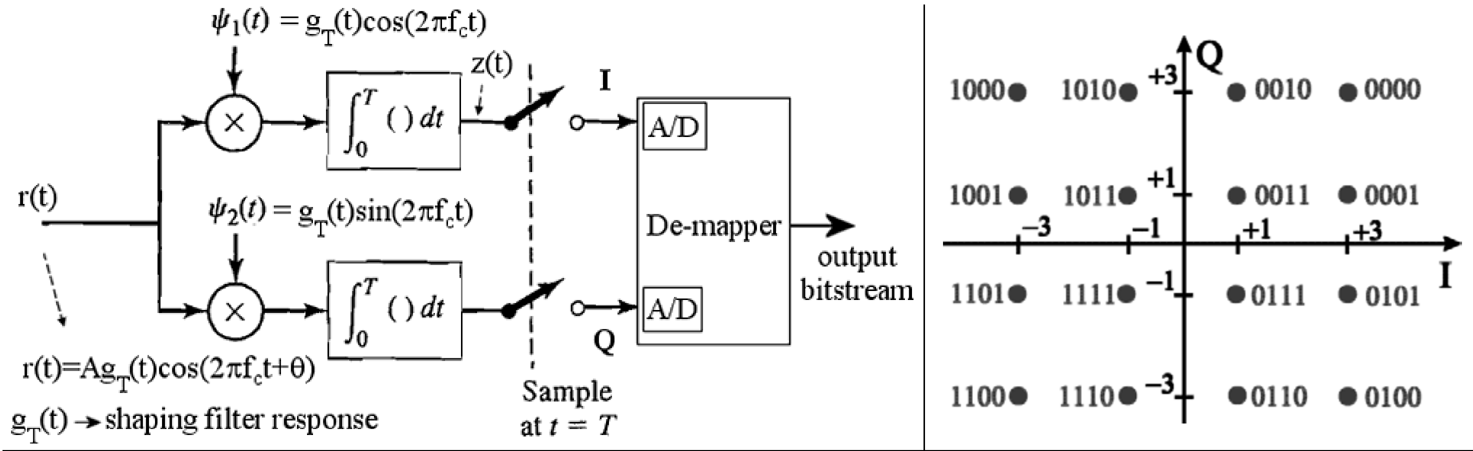
O diagrama abaixo mostra a etapa de demodulação de um receptor digital 16-QAM com detecção por correlator:



(a) Diagrama de blocos | (b) Constelação adotada no *de-mapper* 16-QAM

Figura 1: Etapa de demodulação de um receptor 16-QAM com detecção por correlator.

A taxa do *bitstream* na saída do *de-mapper* é 40 Mbps e a freqüência de portadora é f_c = 430MHz. Cada símbolo IQ tem uma duração T = 1/ *symbol rate*, onde *symbol rate* é a taxa de símbolos na entrada do *de-mapper*. O sistema de *symbol recovery* deste receptor é tal que o *sampler* na Figura 1(a) amostra o sinal na saída dos integradores em um instante t correspondente ao ponto de amplitude máxima do sinal, maximizando assim a SNR na entrada do *de-mapper*, e, portanto, minimizando a BER (*bit error rate*) em sua saída na presença do ruído branco adicionado ao sinal no canal de transmissão.

Pede-se:

a) Determine a freqüência de amostragem f_s do A/D e o intervalo T entre as amostras na saída do *sampler* na Figura 1(a).

b) Determine o *symbol rate* deste sistema.

c) Assuma que o sistema de *carrier recovery* do receptor esteja inoperante mas que o AGC (*automatic gain control*) e o sistema de *symbol recovery* estejam ativos. Nesta situação operacional, a amplitude dos símbolos recebidos é correta com relação à constelação de referência do *de-mapper* mostrada na Figura 1(b) mas a fase residual ϕ não é compensada no sinal recebido $r(t) = Ag_{\mathrm{T}}(t)\cos(2\pi f_c t + \theta + \phi)$. Sabe-se que os pontos nos quais estão localizados o TX e o RX encontram-se distantes entre si de $l =$ 0.25 Km, não estando TX e RX em movimento relativo um ao outro nem tampouco havendo multipercurso presente no cenário de operação. Determine para esta situação qual palavra binária resultaria na saída do *de-mapper* do RX caso o TX transmitisse a palavra 0001. Considere $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s a velocidade de propagação da onda portadora (=onda eletromagnética que transporta os pulsos *passband* do *shaping filter* do TX ao RX).

d) Assuma as mesmas condições operacionais do item d), exceto que o RX move-se com uma velocidade v=90Km/h em relação ao TX. Nesta situação $r(t) = Ag_{\mathrm{T}}(t)\cos(2\pi f_r t + \theta + \phi)$, sendo $f_r \neq f_c$ devido ao efeito Doppler ocasionado pelo movimento relativo entre TX e RX sob velocidade v. O efeito Doppler em um canal sem multipercurso (i.e, em um canal AWGN) faz o conjunto de símbolos IQ recebidos girar com uma velocidade angular $\omega_D = 2\pi f_{\text{doppler}}$ sobre o mapa da constelação de referência mostrado na Figura 1(b), sendo f_{doppler} = vf/c. Determine o quanto gira (em graus) por ação do efeito Doppler cada novo símbolo IQ recebido em relação ao símbolo recebido em instante imediatamente anterior.

e) Considere um receptor funcionalmente idêntico ao em questão exceto por utilizar detecção por *matched filter*. Sabe-se que a função de transferência $H(f)$ do *matched filter* deste receptor funcionalmente idêntico é dada por

$$H(f) = \frac{1 - e^{-j2\pi f T}}{j2\pi f}.$$

Determine a resposta ao impulso $g_{\mathrm{T}}(t)$ do *shaping filter* do transmissor que envia sinal ao demodulador mostrado na Figura 1.

Solução:

a) Do enunciado e da Figura 1(b): $bitrate := 40 \cdot MHz$ ← $NBitsPerSymbol := 4$

Daí:

$$SymbolRate := \frac{bitrate}{NBitsPerSymbol} \qquad SymbolRate = 10 \cdot MHz$$

Uma vez que o correlator é analógico, o A/D que segue o correlator digitaliza uma amostra por símbolo IQ. Daí:

$$fs := SymbolRate \qquad fs = 10 \cdot MHz \quad \rightarrow \quad T := \frac{1}{fs} \qquad T = 0.1 \cdot \mu s$$

b) Vide item a).

c) Do enunciado, a palavra binária Btx_0 transmitida é $Btx_0 :=$ "0001". ←

$Btx_0 =$ "0001" resulta no símbolo transmitido $Stx_0 = (3 + i)$ na saída do *mapper* do TX.

$Stx_0 = (3 + i)$ resultaria na palavra binária $Brx_0 =$ "0001" na saída do *de-mapper* se o *carrier recovery* do RX estivesse operacional - vide Figura 1(b) do enunciado.

No entanto, do enunciado, o *carrier recovery* do RX não está operacional. Portanto, o ângulo ϕ residual (que é uma função da distância entre TX e RX) não será compensado e os símbolos recebidos estarão todos girados de ϕ em relação aos símbolos da constelação de referência mostrada na Figura 1(b). Determinando o valor do ângulo residual ϕ:

Do enunciado: $L := 0.25 \cdot km$ → distância entre TX e RX $\quad fc := 430 \cdot MHz$ → freqüência da portadora

$\lambda := \frac{c}{fc} \qquad \lambda = 0.697 m$ → comprimento de onda da onda eletromagnética na freqüência da portadora

$Num\lambda := \frac{L}{\lambda}$ → $floor(Num\lambda) = 358$ → **Numλ** é um número em ponto flutuante que expressa quantos comprimentos de onda λ separam TX e RX um do outro. **floor(Numλ)** expressa quantos comprimentos de onda **inteiros** separam TX e RX um do outro. **Nota:** A onda portadora zera o seu giro de fase ao percorrer um número inteiro de comprimentos de onda.

$Frac\lambda := Num\lambda - floor(Num\lambda)$ → $Frac\lambda = 0.581$ → fração decimal de λ que, se somado ao número inteiro de λ's que separam TX e RX resulta na distância exata entre TX e RX, distância expressa em comprimentos de onda.

Daí, $\phi := Frac\lambda \cdot 2 \cdot \pi$ → $\phi = 209.305 \cdot deg$. Assim, o símbolo IQ transmitido Stx_0 sofre uma rotação de fase $\phi = 209.305 \cdot deg$ em relação ao seu valor original, **causado pelo giro de fase ϕ da onda portadora no percurso entre TX e RX**, o que resulta um símbolo recebido Srx_0 na entrada do *de-mapper* dado por

$$Srx_0 := Stx_0 \cdot e^{j \cdot \phi} \qquad Srx_0 = (-2.127 - 2.34i)$$

E, por inspeção visual da Figura 1(b) do enunciado, $Srx_0 = (-2.127 - 2.34i)$ resulta na palavra binária $Brx_0 =$ "1100" na saída do *de-mapper.*

d) Nesta situação em que o RX move-se a uma velocidade v em relação ao TX temos:

$$r(t) = A \cdot gT(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot fr \cdot t + \theta + \phi) \qquad \text{onde} \qquad fr = fc + fdoppler$$

$v := 90 \cdot kph$ ←

$$fdoppler := fc \cdot \frac{v}{c} \rightarrow \qquad fdoppler = 35.858 Hz$$

O oscilador local do *mixer* - *mixer* é o bloco '⊗' na Figura 1(a) - opera em fc e a freqüência central do sinal r(t) recebido é fr=fc+fdoppler. Portanto o *mixer* da Figura 1(a) não converte integralmente o sinal r(t) para banda-base, permanecendo uma componente residual de freqüência equivalente a fdoppler. Desta maneira, se Stx(n) é a seqüência de símbolos originalmente transmitidos pelo TX, a seqüência de símbolos correspondentes Srx(n) resultante na entradado *de-mapper* do RX é dada nesta situação por:

$$Srx(n) = Stx(n) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot fdoppler \cdot n \cdot T} \qquad \text{ou} \qquad Srx(n) = Stx(n) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{fdoppler}{SymbolRate} \cdot n}$$

Portanto, o conjunto de símbolos IQ recebidos Srx gira com uma velocidade angular ωD sobre o mapa da constelação de referência mostrado na Figura 1(b), sendo ωD dada por:

$$\omega D := 2 \cdot \pi \cdot fdoppler \qquad \omega D = 225.303 \cdot \frac{rad}{s}$$

Daí, cada novo símbolo IQ recebido gira em relação ao símbolo recebido em instante imediatamente anterior do valor dado por:

$\text{GiroAngularPorIntervadoDeSimbolo} := T \cdot \omega D$ $\quad$ $\text{GiroAngularPorIntervadoDeSimbolo} = 1.291 \times 10^{-3} \cdot \text{deg}$

e) **Efetuando a Transformada Inversa de Fourier de *H(f)*:**

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}[H(f)] = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{1}{j2\pi f}\right] - \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{e^{-j2\pi fT}}{j2\pi f}\right]$$

$$= \text{sgn}(t) - \text{sgn}(t-T) = 2\Pi\left(\frac{t-\frac{T}{2}}{T}\right)$$

O sinal $g_T(t)$ ao qual $h(t)$ é *matched* é:

$$g_T(t) = h(T-t) = 2\Pi\left(\frac{T-t-\frac{T}{2}}{T}\right) = 2\Pi\left(\frac{\frac{T}{2}-t}{T}\right) = h(t)$$

tendo aqui sido usado as propriedades de simetria de $\Pi\left(\frac{t-\frac{T}{2}}{T}\right)$ em relação ao eixo $t = \frac{T}{2}$.

Nota: Π(t/T) é a notação para a função pulso unitário de largura T.