Centro Universitário Senac (Santo Amaro)

Engenharia da Computação

Fundamentos de Telecomunicações

Professor: Sérgio Tavares

QAM – P2

Nomes: Alessandro da Costa Silva Kantousian

São Paulo (2018)

Teoria sobre QAM

A modulação de amplitude em quadratura – QAM (Quadrature Amplitude Modulation) é a combinação de dois processos K-ASK sobre portadoras de mesma frequência, porém em quadratura de fase.

QAM faz parte de um dos tópicos atrelados em *Sistemas Digitais de RF*, a qual citaremos a introdução sobre o assunto de Sistemas Digitais de RF, Regeneração de RF, Diagrama de Constelação e ASK (modulação, espectro do sinal e demodulação).

Os processos básicos de modulação de uma portadora senoidal por sinal modulador digital são conhecidos como chaveamento de amplitude, de frequência e de fase – identificamos, respectivamente, pelas siglas ASK, FSP e PSK (do inglês – amplitude/frequency/phase shift keying). O processo de modulação/demodulação é normalmente feito sobre uma portadora de FI (frequência intermediária, valor típico 70 MHz), no modem e o sinal modulado em FI é deslocado para/de RF em misturadores (de transmissão e de recepção) no transceptor. Com sinal de RF transmitido em canal de **Nyquist de RF**, a interferência intersimbólico (entre pulsos de RF) é nulo no centro dos intervalos de símbolo e o sinal demodulado deve ser regenerado para recuperar a informação binária (*Figura 1*).

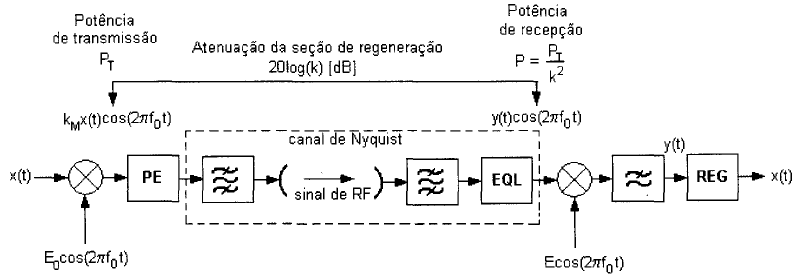


Figura 1. Seção de regeneração de RF. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

A *Figura 2* representa o terminal (modem + transceptor) de um sistema digital de RF. O sistema digital de banda, base, recebido do multiplexador, é convertido do código de linha HDB-3 (para taxa até 34 Mbit/s) ou CMI (para taxa de 140 ou 155 Mbit/s) para NRZ, embaralhado (para garantir recuperação de relógio com baixa flutuação de fase), e modula a portadora de FI. O sinal modulado de FI é deslocado para RF no transmissor. No receptor, o sinal de RF é deslocado para FI e entregue ao demodulador com nível aproximadamente constante devido ao controle automático de ganho (CAG), no ampliador de FI de recepção. O sinal demodulado e regenerado e então desembaralhado e reconvertido ao código de linha original para ser encaminhado ao demultiplexador.

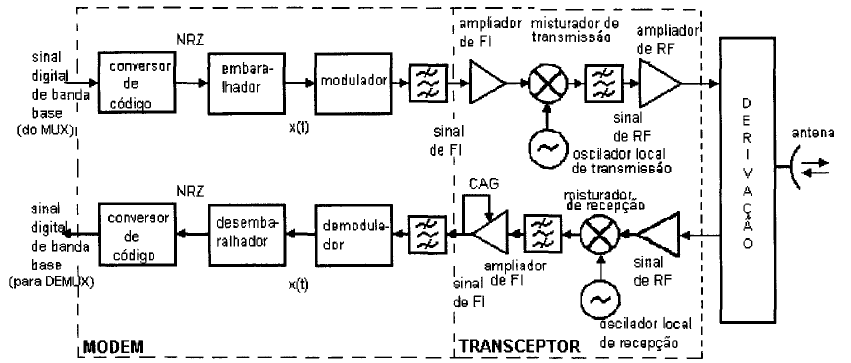


Figura 2: Sistema digital de RF. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

Na propagação de ondas eletromagnéticas na atmosfera terrestre, em condições normais, a atenuação e o atraso de grupo são, dentro da faixa de cada canal de RF, essencialmente constantes. A ocorrência de fenômenos anormais de propagação (desvanescimento seletivo) pode, no entanto, resultar em variação da atenuação e do atraso de grupo com a frequência. Para limitar a distorção (que acarreta interferência intersimbólica), o demodulador deve incluir um equalizador adaptativo (que se adapta às variações no canal de RF). Por simplicidade, a *Figura 1* representa apenas um equalizador (EQL). A equalização adaptativa, no entanto, é normalmente feita no Domínio da Frequência (AFDE – Adaptative Frequency Domain Equalizer), em FI – para compensar parcialmente a variação de atenuação com a frequência dentro do canal de RF – e no Domínio do Tempo (ATDE – Adaptive Time Domain Equalizer), em banda base – para corrigir a distorção residual do sinal demodulado.

**- Regeneração de RF:**

Cada enlace rádio digital é uma seção de regeneração – o sinal demodulado deve ser regenerado. O sinal de RF resultante da modulação de uma portadora de frequência pelo final digital de banda base *x(t)* tem espectro centrado na frequência . Do mesmo modo que no sistema de transmissão em banda base, pulsos retangulares são pré-enfatizados e transmitidos em um canal de Nyquist de RF (em torno da frequência para que, com interferência intersimbólica seja nula no centro de cada pulso demodulado, minimizando a probabilidade de erro no processo de regeneração *Figura 1*.

O canal de Nyquist de RF, centrado na frequência tem função de transferência correspondendo à expressão - espectro de sinal digital, que desloca a frequência

{

= {

{< ε *para*

O módulo da equação tem fator 1/k correspondente à atenuação da seção de regeneração e variação com a frequência devida a filtros idênticos na saída do modulador e na entrada do demodulador. A resposta amplitude desses filtros está representada na *Figura 3*.

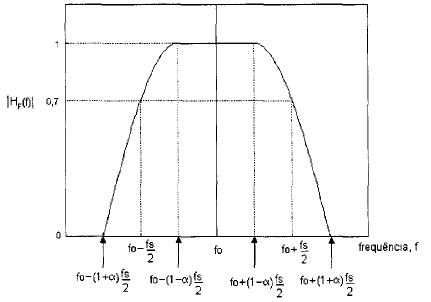


Figura 3: Resposta de amplitude dos filtros. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

A largura de faixa ocupada pelo espectro do sinal modulado (com taxa de sinalização ) é determinada pelo filtro de transmissão e deve se ajustar às regulamentações de uso do espectro de RF.

O filtro de recepção limita a potência de ruído admitida no receptor. A largura de faixa equivalente de ruído do receptor.

A potência média de ruído admitida no receptor é, portanto, R=FkT, ou expressa em dBm:

R(dBm) = F(dB)+10log(kT/1 mW)

O sinal de banda base demodulado, *y(t)*, é idêntico ao que seria obtido transmitindo-se o sinal *x(t)* numa seção de regeneração de banda base com função de transferência de Nyquist. Todos os resultados obtidos para sistemas de banda base aplicam-se, portanto, a sistemas de RF.

A limitação de frequência na seção de regeneração produz uma distorção controlada e o sinal *y(t)* demodulado – não mais digital – deve ser regenerado para recuperar o sinal digital *x(t).*

Para o sinal de RF transmitido, *e(t)* = ) a potência média (antes da pré-ênfase) é:

O sinal recebido (após o equalizador) *r(t) = y(t)cos(2πt)* tem potência média:

A atenuação da seção de regeneração, 20log(k), é a soma algébrica de atenuações (com sinal positivo) e ganhos (com sinal negativo) entre a saída do transmissor (antes da pré-ênfase, onde se determina ) e a entrada do receptor (após o equalizador, onde se determina *P*):

20log(k)(dB)=(dBm)-P(dBm)

Como veremos mais adiante, a taxa de erro bit (TEB), em um enlace rádio digital, é função da relação portadora/ruído na entrada do receptor,

**- Modulação de Amplitude – ASK:**

A modulação de amplitude é obtida num modulador de produto Figura 4. Num modulador de produto com constante de modulação (adimensional) , o sinal modulado ASK é:

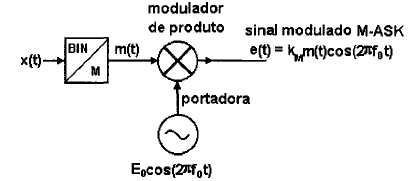


Figura 4: Modulador M-ASK. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

Num modulador M-ASK, o sinal digital binário *x(t)* é convertido em um sinal multinível *m(t)*, com valores discretos de tensão, associando a cada combinação de n bits um dos M valores de tensão. Se o sinal binário *x(t)* modula diretamente a portadora, tem-se o sistema denominado BASK (=ASK binário) ou 2-ASK.

**BASK – ASK Binário:**

Há dois casos particulares importantes de BASK:

1. OOK(On-Off Keying)

Com x(t) binário NRZ unipolar:

A portadora é transmitida para marcas e suprimida para espaços, daí a denominação OOK (chaveamento liga-desliga).

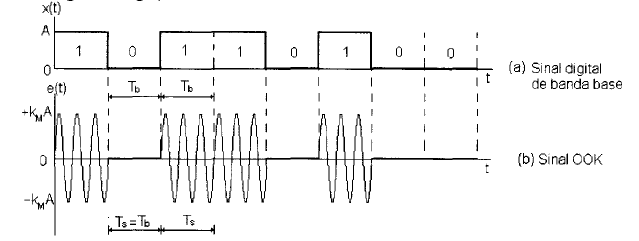


Figura 5: Modulação OOK. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

1. PRK (Phase Reversal Keying)

Com *x(t)* binário NRZ bipolar:

Nesse caso a amplitude é constante () e a fase da portadora comuta entre 0 rad (marca) e π rad (espaço) – chaveamento por reversão de fase. Portando, PRK é equivalente a modulação de fase binária, 2-PSK.

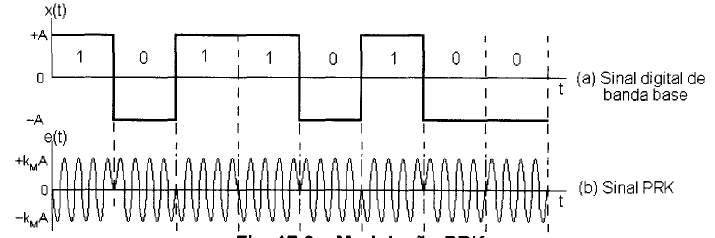


Figura 6: Modulação PRK. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

**- Espectro do Sinal ASK:**

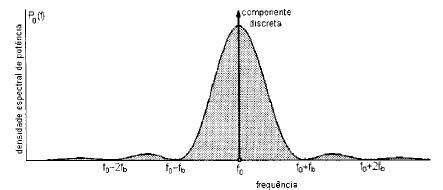
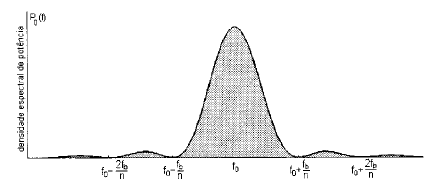
O espectro do sinal ASK () corresponde ao espectro do sinal modulador *m(t)* deslocado para a frequência dá portadora *Figura 7*. 

Figura 7: a) Espectro de sinal modulado ASK - OOK. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.



*b) Espectro de sinal modulado ASK* - *M-ASK(M=. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.*

Com o sinal modulador unipolar (como no sistema OOK) há uma componente discreta na frequência . Com modulador bipolar (como nos sistemas PRK e M-ASK) com marcas e espaços equiprováveis, não há componentes discretas.

A *Figura 8* ilustra o espectro de amplitude do sinal ASK pré-enfatizado e limitado pelo filtro transmissão (no caso de OOK, acrescido de componente discreta na frequência

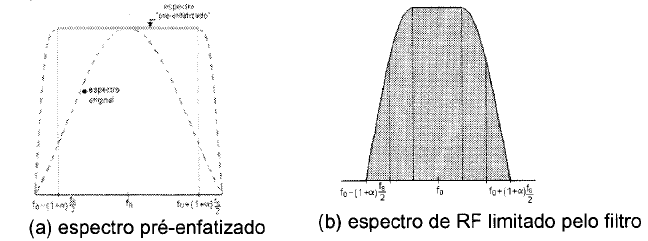


Figura 8: Espectro ASK pré-enfatizado e limitado em frequência. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

**- Demodulação ASK:**

a) OOK – Detecção Não-Coerente:

Após o filtro de recepção, o sinal tem espectro e forma de onda representados na *Figura 9*.

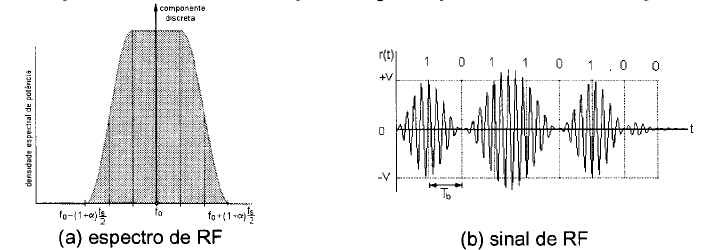


Figura 9: Sinal OOK recebido. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

A envoltória *y(t)*, onde *V = A/k*, correspondente à envoltória original alterada pela função de transferência da seção de regeneração de RF, com atenuação 20log(k).

A detecção não-coerente utiliza um detector de envoltória. A envoltória *y(t)* detectada deve ser regenerada para se recuperar o sinal digital *x(t).* A *Figura 10* ilustra esse processo.

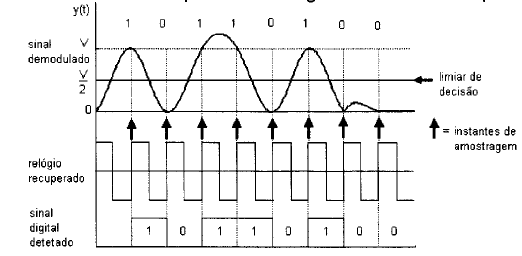


Figura 10: Regeneração do sinal demodulado. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

b) PRK – Detecção Coerente:

Para sinal ASK sem componente discreta em apenas a detecção síncrona é possível (a detecção de envoltória não é aplicável). Após o filtro de recepção, o sinal tem espectro e forma de onda representados na *Figura 11*.

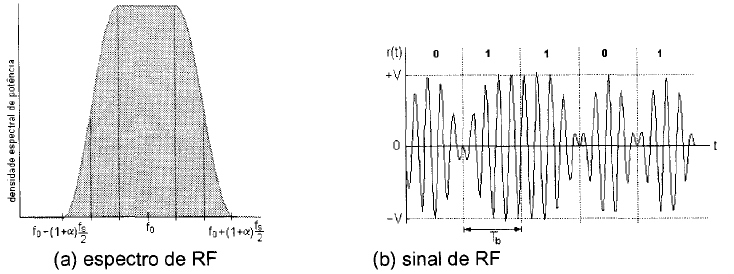


Figura 11: Sinal PRK recebido. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

A envoltória *y(t)*, onde *V = A/k*, corresponde à envoltória original alterada pela função de transferência da seção de regeneração de RF, com atenuação 20log(k).

A *Figura 12*, ilustra o detector coerente (síncrono).

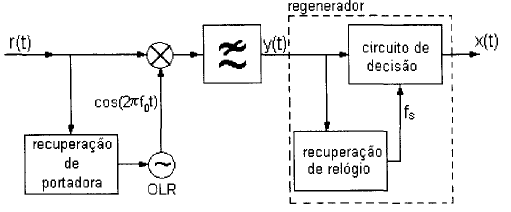


Figura 12: Detecção coerente: CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

O processo de recuperação de portadora tem como base o loop de Costas. Na saída do detector de produto, com constante (adimensional) *k*, tem-se:

, onde

O filtro passa-baixa elimina o segundo termo, obtendo-se sinal proporcional a y(t):

Esse sinal é então regenerado para se recuperar o sinal digital *x(t).*

**- Diagrama de Constelação**

Cada estado é possível de ser assumido pelo sinal modulado é associado a uma combinação de bits e pode ser representado por um fasor, com determinado valor de amplitude e de fase. Uma das extremidades de todos os fasores possíveis coincide com a origem e então representa-se apenas a extremidade oposta do fasor no que se denomina diagrama de constelação do sistema de modulação. Figura 13 ilustra alguns diagramas de constelação para a mesma amplitude máxima de portadora.

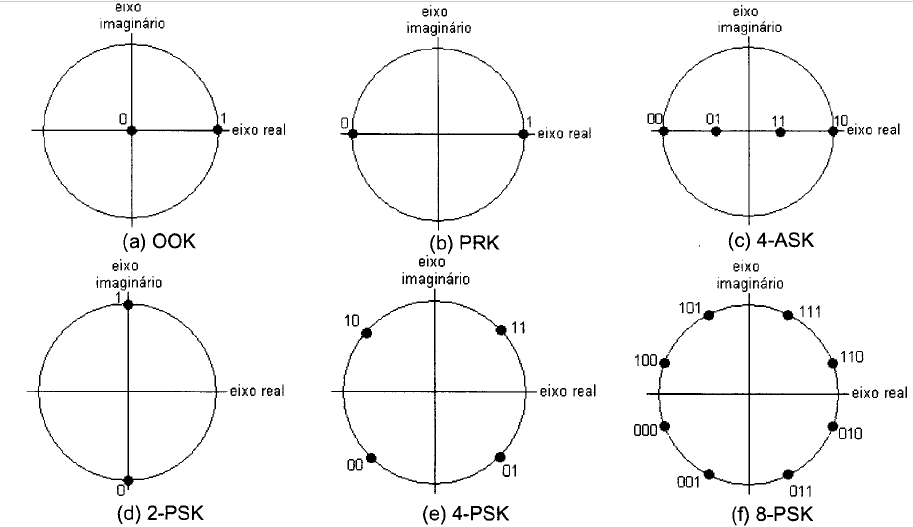


Figura 13: Diagramas de Constelação. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

Observe-se o espaçamento elétrico uniforme e a diferença de apenas um bit entre estados elétricos adjacentes.

O diagrama de constelação é uma ferramenta importante na análise dos sistemas digitais de modulação de RF e pode ser visualizado por meio de instrumentos de teste.

**- Modulação de Amplitude em Quadratura – QAM**

Dado a explicação sobre Sistemas Digitais RF, ASK e Diagrama de Constelação a qual QAM é um dos tipos em sistemas digitais de rf, combinado pelo processo de ASK e utiliza a parte de diagrama de constelação, podemos continuar sobre QAM.

Cada sinal K-ASK tem estados, cada um deles associado a uma combinação *n* bits. O resultado da soma fasorial desses sinais K-ASK é um sinal modulado tanto em amplitude quanto em fase, com *M = K²* estados, cada um deles associado a uma combinação de 2n bits . Na modulação M-QAM, então, o número de estados possíveis é sempre uma potência par de dois (M =4, 16, 64, 256...).

A *Figura 14* ilustra o diagrama de blocos de um modulador 16-QAM, com diagramas de constelação das componentes 4-ASK em fase e em quadratura.

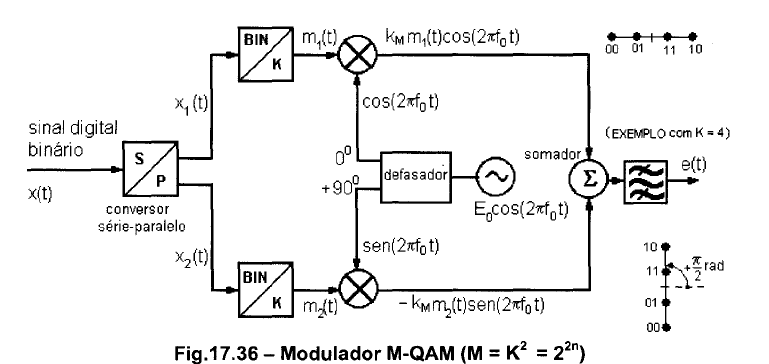


Figura 14: Modulador M-QAM (M = K² = ). Diagramas de Constelação. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

A *Figura 15* ilustra os diagramas de constelação dos sistemas 16-QAM e 64-QAM.

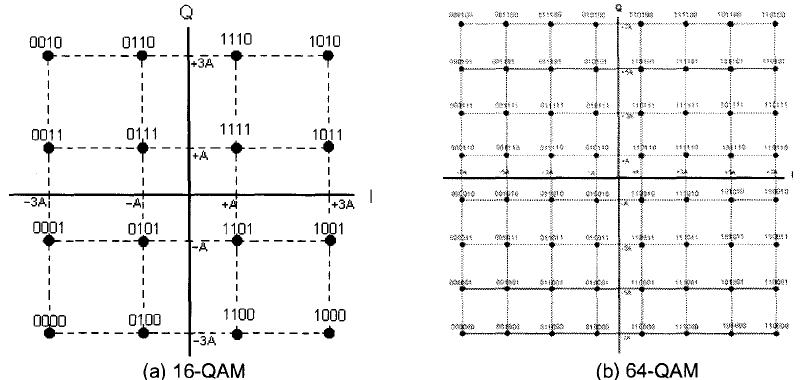


Figura 15: Diagramas de constelação 16-QAM e 64-QAM. Diagramas de Constelação. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

Para o sinal binário x(t) com taxa de bit bits/s, os sinais binários paralelos e têm taxa de bit bit/s. Nos sinais multinível e , cada um dos K valores de tensão é associado a uma combinação de n bits do sinal binário paralelo correspondente. A duração de cada um dos K símbolos discretos do sinal multinível é (pois a duração de cada símbolo de ou é . A taxa de sinalização de cada um dos sinais e é então:

O sinal QAM é a soma fasorial das componentes em fase, e em quadratura, , cada uma com estados possíveis. Logo, o número de estados possíveis do sinal QAM é:

Cada um dos M estados possíveis do sinal QAM tem um determinada amplitude e fase e representa a combinação de um número par de bits, .

As componentes em fase *i(t)* e em quadratura q(t) ocupam o mesmo intervalo de frequência e a largura de faixa de RF ocupada pelo sinal M-QAM é então:

A Figura 16 representa, para a sequência binária 1011110100110000010, o sinal 16-QAM transmitido e recebido na seção de regeneração de RF com atenuação 20log(k) e fator de rolagem α = 0,5. Observe se as variações abruptas de amplitude de fase do sinal transmitindo *e(t)* em contraste com ausência de variações abruptas de amplitude e fase do sinal recebido *r(t)*.

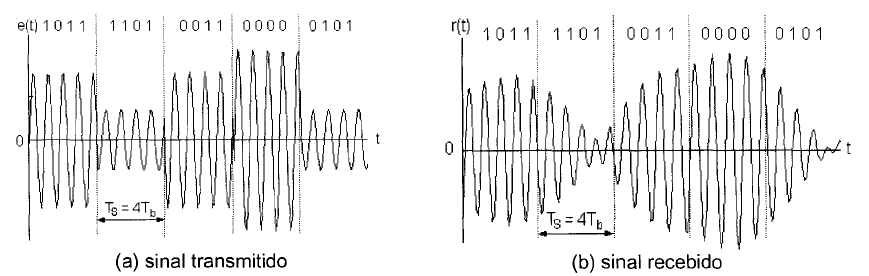


Figura 16: Modulação 16-QAM na seção de regeneração de RF. Diagramas de Constelação. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

**- Demodulador QAM**

O sinal recebido (após o filtro de recepção) é , onde representam os sinais multiníveis e , respectivamente, alterados pela função de transferência da seção de regeneração de RF. A demodulação QAM só pode feita por detecção coerente (*Figura 17*).

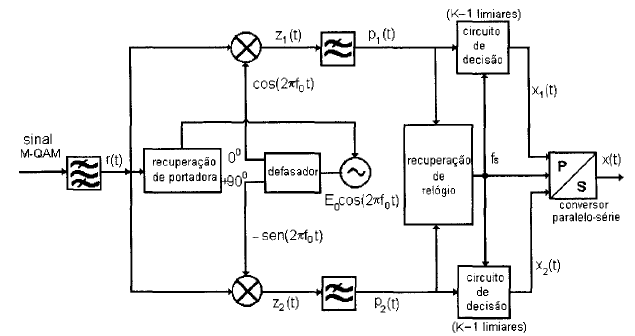


Figura 17: Demodulador M-QAM. Diagramas de Constelação. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

Na saída do detector superior, com constante k, tem-se:

O filtro passa-baixa elimina as componentes centradas em e obtém-se, na saída, um sinal proporcional a .

Na saída do detector inferior, com constante k, tem-se:

O filtro passa-baixa elimina as componentes centradas em e obtém-se, na saída, um sinal proporcional a .

Os sinais demodulados e são regenerados, aplicado a cada um deles a um circuito de decisão com K – 1 limiares e amostrando-se com relógio de símbolo recuperado (frequência . Recuperando assim os sinais binários e e o converso paralelo- série (*Figura 17*) refaz o sinal digital binário , intercalando bit a bit os sinais e A *Figura 18* ilustra a regeneração do sinal demodulado para recuperação do sinal no demodulador 16-QAM (K=4).

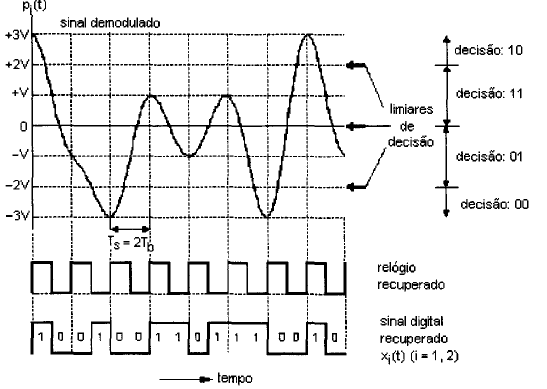


Figura 18: Conversão K=4 - binário. Diagramas de Constelação. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

**- Vantagem da Modulação M-QAM**

O sistema QPSK é normalmente identificado como QPSK, 4-QAM e 4-PSK. Com diagramas de constelação iguais, tem espectros idênticos. Um sinal M-PSK também pode ser colocado na forma de componentes em fase e em quadratura:

Portanto, os espectros de sinais M-PSK e M-QAM são idênticos para o mesmo número M de estados. Porém, na modulação M-PSK, as componentes em fase e em quadratura não são independentes entre si, como na modulação M-QAM. O resultado é que o diagrama de constelação é circular, para M-PSK, e quadrado, para M-QAM.

A *Figura 19* compara os diagramas de constelação 16-PSK (amplitude constante) e 16-QAM (amplitude máxima , para a mesma amplitude máxima (.

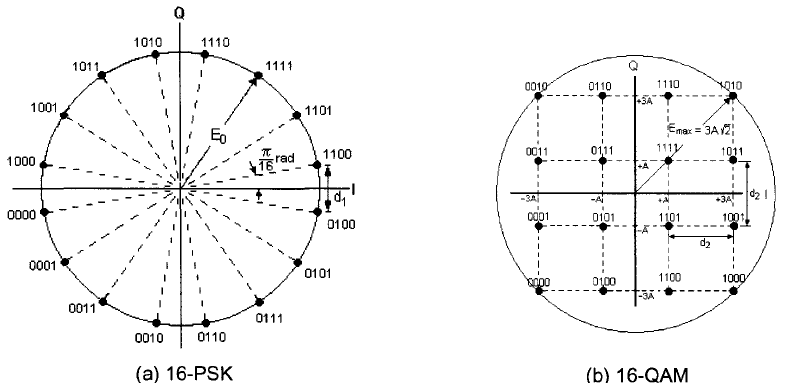


Figura 19: Comparação de diagramas de constelação 16-PSK e 16-QAM. CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

A distância elétrica entre estados adjacentes é para 16-PSK e para 16-QAM. Para mesma amplitude máxima em 16-PSK e 16-QAM, , a distância é maior em 16-QAM: . Para mesma potência média nos dois sinais , a vantagem do sistema 16-QAM é ainda maior: . Maior distância entre estados elétricos adjacentes correspondendo à menor probabilidade de erro regeneração de sinal e, por isso, o sistema de modulação M-QAM, ocupando a mesma largura de faixa que M-PSK, apresenta significativa vantagem em relação a este.

Bibliografia

TV DIGITAL II: MODOS DE TRANSMISSÃO E MODULAÇÃO. Disponível em: <  [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdconsis2/pagina\_4.asp>. Acesso](%20http://webx.ubi.pt/~felippe/texts2/an_sinais_cap7.pdf%3e.%20Acesso) em: 6 dez. 2018.

TECNOLOGIA PLC I: MODULAÇÃO. Disponível em: < http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplcalt1/pagina\_4.asp>. Acesso em: 7 dez. 2018.

APLICAÇÃO DE 16-QAM PARA AUMENTAR O VALOR DO MODEMS A CABO. Disponível em: < https://www.cisco.com/c/pt\_br/support/docs/broadband-cable/radio-frequency-rf-hybrid-fiber-coaxial-hfc/49777-implement16-qam.html>. Acesso em: 09 dez. 2018.

Haykin, S; Moher, M. Sistemas de Comunicação: 5. ed. São Paulo: Editora Bookman, 2011.

CARVALHO, MUNIZ, R. Comunicações Analógicas e Digitais: 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.