

Nota de aula: Sistemas de Comunicações Móveis

Capítulo 2 – Modulação em Sistemas de Comunicações Móveis

O capítulo detalha conceitos fundamentais em sistemas de comunicações móveis, focando-se particularmente na modulação utilizada nesses sistemas. A modulação é essencial para adaptar as características do sinal transmitido às propriedades do meio e às dimensões físicas dos elementos irradiantes, como antenas.

Destaca-se a distinção entre os esquemas de modulação analógica e modulação digital.

Dentre os tipos de modulação analógica, a modulação em amplitude (AM) é destacada como a mais comum, principalmente pela sua simplicidade e economia. No entanto, ela é suscetível a ruídos e interferências que podem afetar a amplitude do sinal portador, representando uma desvantagem em ambientes ruidosos. Por outro lado, a modulação em frequência (FM) é valorizada por sua robustez contra ruídos, modificando a frequência do sinal portador em resposta ao sinal modulante, o que permite uma melhor qualidade do sinal, tornando-a preferível quando a relação sinal-ruído é uma preocupação.

O capítulo também aborda as vantagens da modulação digital sobre a analógica, como maior taxa de dados, eficiência espectral, e segurança. São discutidos os esquemas de modulação digital, incluindo as técnicas como a Modulação por Amplitude de Pulsos (PAM), Modulação com Chaveamento por Deslocamento de Fase (PSK) e Modulação em Quadratura (QAM).

Um aspecto importante discutido é o canal, um modelo teórico usado para simular a presença de ruído em sistemas de comunicação.

2.1 Introdução

Um ponto comum a todos os sistemas, incluindo radiodifusão, televisão, telefonia, comunicações por satélite e comunicações móveis celulares, é a transmissão da informação de um lugar para outro, por meio de sinais, usando um meio de propagação.

O meio de propagação pode ser não guiado como a atmosfera para a transmissão de comunicações móveis, por exemplo, ou guiado como as linhas telefônicas. Para que a energia do sinal passe convenientemente do transmissor ao meio de propagação e deste ao receptor são necessários elementos de transição, que funcionem como radiadores ou captadores de energia.

Por exemplo, no caso acústico o elemento radiador é o alto-falante, cujas dimensões físicas dependem da frequência e da quantidade de energia a ser transferida. No caso de radiotransmissores seria impraticável a transmissão de sinais na frequência da voz humana, pois, a partir da teoria de ondas eletromagnéticas, pode-se demonstrar que um sinal só é irradiado com eficácia se a antena irradiadora tiver dimensões da ordem de um décimo ou mais do comprimento da onda correspondente às frequências dos sinais a serem transmitidos. Desta forma as antenas necessitariam de dimensões da ordem de centenas de quilômetros para irradiar com eficiência na frequência da voz.

Para que seja possível irradiar eficientemente nas transmissões radioelétricas, são utilizadas **ondas portadoras**, cujos parâmetros são compatíveis com as dimensões do elemento irradiador e com as características do meio. Essas ondas servem como um suporte para levar a informação, **sinal modulante ou modulador**.

A Figura 1 apresenta o espectro eletromagnético disponível para a transmissão de sinais, com as seguintes designações: RF (radiofrequência), MO (microondas), OM (ondas médias), IV (infravermelho) e UV (ultravioleta).

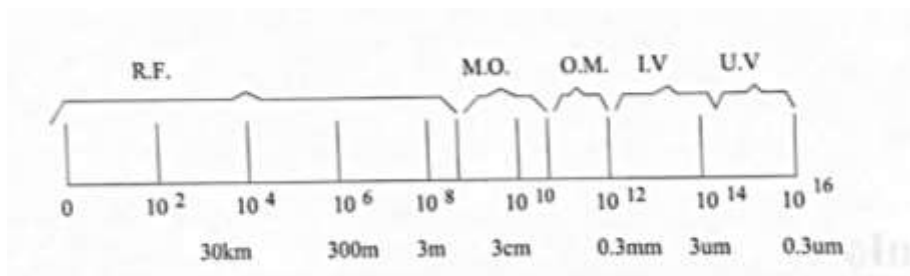


Figura 1 – Espectro eletromagnético para radiofrequências

A modulação consiste na variação de uma característica, ou parâmetro, da onda portadora, em função de um sinal modulante.

Os avanços observados nas três últimas décadas em hardware e em processamento digital de sinais tornam os sistemas de comunicações digitais mais baratos, mais rápidos e mais eficientes, quanto ao consumo potência, do que os sistemas de comunicações analógicos. A modulação digital apresenta uma série de vantagens sobre a modulação analógica, dentre as quais maiores taxas de dados, poderosas técnicas de correção de erros, resistência a imperfeições do canal, estratégias de acesso múltiplo mais eficientes e maiores segurança e privacidade. Avanços em codificação e modulação codificada aplicadas à sinalização digital tornam o sinal menos suscetível ao ruído e ao desvanecimento, podendo ser utilizada equalização para remover imperfeições multipercurso. Técnicas de espalhamento espectral aplicadas à modulação digital podem ser usadas a remover ou combinar multipercurso, reduzir a interferência e detectar usuários múltiplos simultaneamente.

Atualmente, a modulação digital é mais adequada à criptografia, resultando um nível mais alto de segurança. Por todas essas razões, os sistemas atualmente propostos ou em desenvolvimento para aplicações envolvem comunicações pessoais e sem fio são todos digitais.

A modulação digital consiste em mapear **símbolos em formas de onda** para transmissão por um dado canal. As principais considerações usadas na escolha de uma determinada técnica de modulação digital são:

- alta taxa de dados;
- elevada eficiência espectral (mínima ocupação de largura de faixa);
- elevada eficiência de potência (mínima potência de transmissão requerida);
- robustez a imperfeições do canal;
- robustez a imperfeições de hardware;
- baixo custo de implementação.

Frequentemente, os tópicos citados configuram em requisitos conflitantes, sendo a escolha da modulação baseada na determinação da técnica que alcança o melhor compromisso entre esses requisitos.

2.2 Modulação Analógica

2.2.1 Considerações gerais

A onda senoidal é usada tradicionalmente como portadora, com a modulação podendo se processar geralmente de três maneiras:

- Modulação em Amplitude (AM), quando o parâmetro da portadora a ser variado é a **amplitude**;
- Modulação em Frequência (FM), quando o parâmetro da portadora a ser variado é a **frequência**;
- Modulação em Quadratura (QUAM), quando são variados os parâmetros de **amplitude e fase** ao mesmo tempo.

2.2.2 Modulação em Amplitude

O sistema AM comum, AM-SC, ou AM-DSB como é também conhecido, devido à terminologia em inglês (*Amplitude Modulation-Supressed Carrier, Amplitude Modulation-Double Side Band*), é o de mais larga utilização, sendo adotado na radiofusão comercial. Isso se deve às facilidades que oferece, tais como economia, simplicidade no projeto do receptor e facilidade de manutenção. No sistema AM a

portadora tem a sua amplitude instantânea variada proporcionalmente ao sinal modulador.

A portadora é do tipo $c(t) = A\cos(2\pi f_c t + \phi)$, em que A é a amplitude da portadora, f_c é a frequência espectral Hertz e ϕ é a fase aleatória da portadora.

A Figura 2 ilustra o modulador AM.

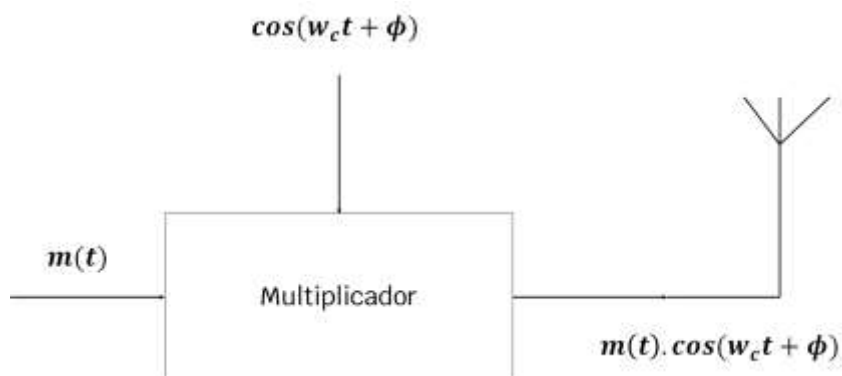


Figura 2 – Modulador AM

Variando a amplitude da portadora proporcionalmente a $m(t)$, tem-se a amplitude instantânea modulante dada por $x(t) = Am(t)\cos(2\pi f_c t + \phi)$. Considerando um sinal modulante uma senoide pura, observa-se o comportamento apresentado na Figura 3.

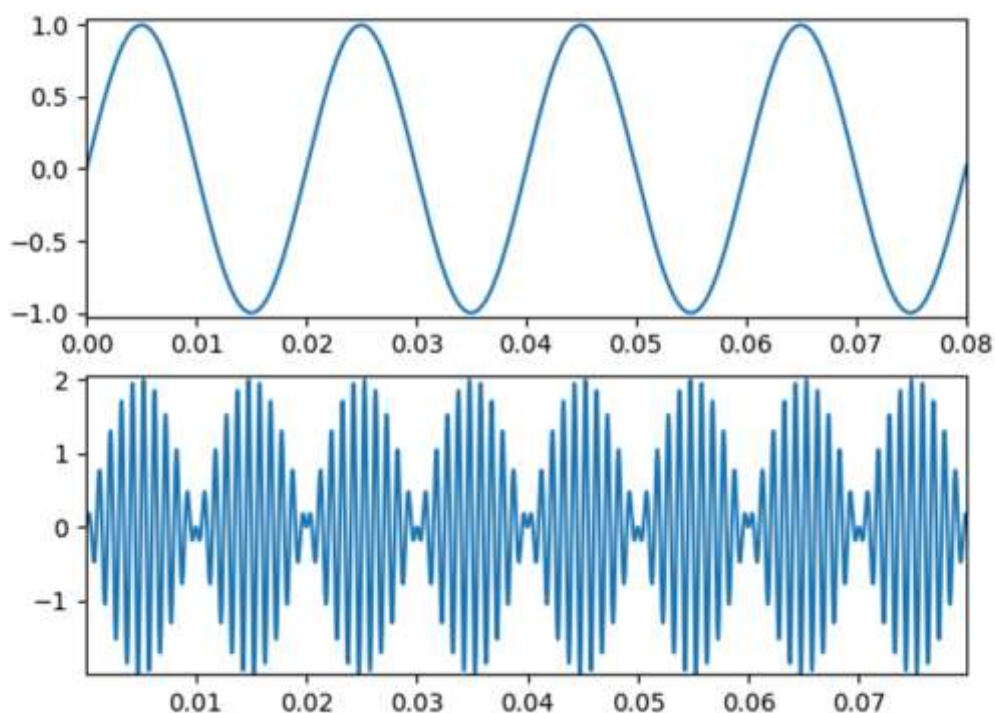


Figura 3 – Envoltória de onda modulada por uma senoide pura

O receptor recupera o sinal que contém a mensagem pela reprodução da envoltória. A onda modulada possui uma envoltória que reproduz o comportamento da onda modulante, o que permite descrever a amplitude instantânea do sinal modulado como proporcional ao sinal modulante, logo $a(t) = A + Bm(t) = A[1 + \Delta_{AM}m(t)]$, onde $\Delta_{AM} = B/A$ é chamado de índice de modulação.

A Figura 4 ilustra uma forma de onda que envolve o processo de modulação em amplitude, para índice de modulação igual a 0,5.

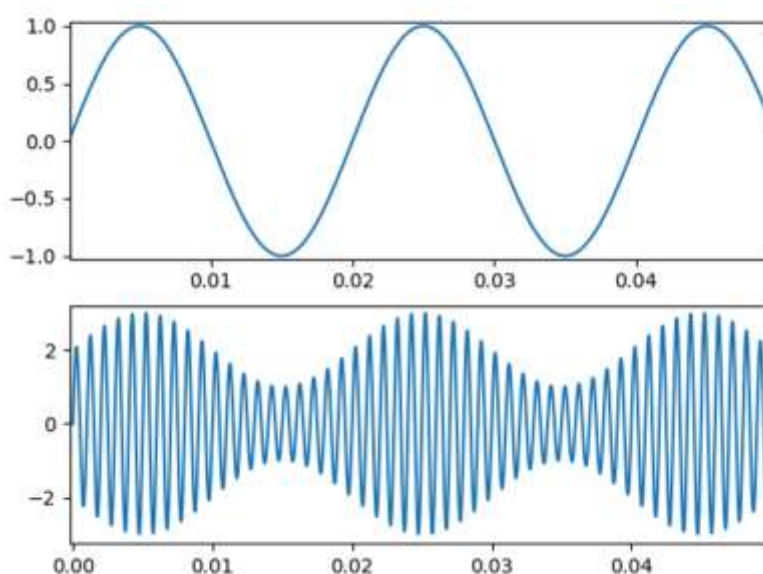


Figura 4 – Modulação AM com índice de modulação = 0,5, submodulação

Nota-se que a onda modulada tem a envoltória com o mesmo formato do sinal modulador. Isso acontece pelo fato de $A + Bm(t) > 0$. Na Figura 3 o índice de modulação é unitário, usualmente referido como 100% de modulação. Na Figura 4 o índice de modulação é maior que 0, no entanto menor do que 1. O índice de modulação indica o aprofundamento que o sinal modulador imprime à portadora. O índice não deve ser maior que 100%, para evitar problemas de distorção no momento da recuperação do sinal modulador por um detector de envoltória.

O índice de modulação é um parâmetro usado para verificar a qualidade do processo:

- $\Delta_{AM}=1$, 100% de modulação;
- $\Delta_{AM}>1$, sobremodulação – indica rotação de fase – implica distorção na recepção;
- $\Delta_{AM}<1$, submodulação – indica desperdício de potência.

O sinal mensagem, ou modulante, que se designa genericamente $m(t)$, deve ser tal que a frequência máxima do espectro seja bem menor que f_c , ou seja, $f_{m\acute{a}x}[m(t)] \ll f_c$.

Usualmente a banda passante útil, devido a restrições na região linear do equipamento transmissor, fica entre 0,1% e 1% da frequência da portadora, ou seja,

$$f_{m\acute{a}x}[m(t)] \sim \frac{f_c}{1000} \text{ a } \frac{f_c}{100}.$$

Comportamento Espectral do sinal AM

No domínio da frequência, o processo de modulação AM é aproximadamente a convolução do espectro do sinal modulante com $\delta(f_c)$ na frequência da portadora, pois $f_{m\acute{a}x}[m(t)] \ll f_c$, do que se pode obter que

$$\mathfrak{F}[m(t) \cdot \cos(w_c t + \phi)] \sim M(f) * \delta(f_c)$$

Assim, o **espectro do sinal modulado ocupa duas vezes mais largura de banda que o mesmo sinal em banda base**. A Figura 5 ilustra o comportamento espectral de um sinal AM com $f_c = 1$ kHz, com sinal modulante uma senoide pura de 50 Hz.

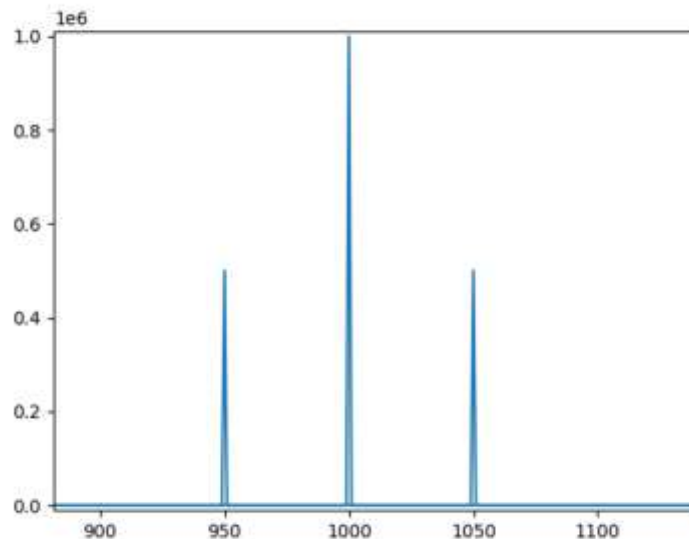


Figura 5 – Espectro dobrado de onda AM

Fica evidenciado que a largura de faixa de transmissão necessária à transmissão de um sinal AM é exatamente duas vezes a do sinal mensagem. Em radiofusão, a máxima frequência permissível por norma para o sinal mensagem é 5 kHz, portanto a largura de faixa liberada para radiofusão comercial AM é 10 kHz. No Brasil, o rádio AM comercial ocupa a faixa de 550 kHz a 1.650 kHz.

Sensibilidade ao ruído

Os sinais modulados em AM são muito sensíveis ao ruído e interferência aditivos, uma vez que a informação é transportada pela amplitude da portadora.

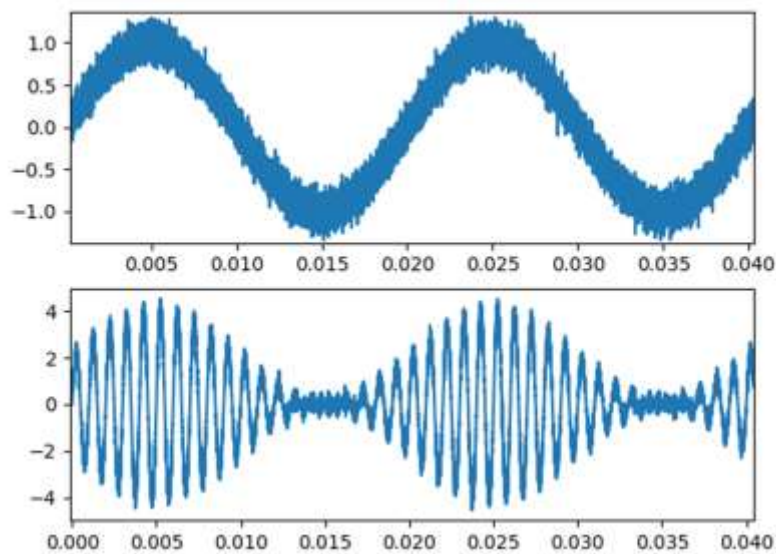


Figura 6 – Sensibilidade da modulação AM ao ruído

A Figura 6 mostra como o sinal modulado copia o ruído presente no sinal modulante.

2.2.3 Modulação em Amplitude com Faixa Lateral Única

A modulação em amplitude com faixa lateral única, ou AM-SSB (*Amplitude Modulation-Single Side Band*), utiliza para a transmissão dos sinais somente a faixa lateral superior ou inferior do sistema AM. A obtenção do AM-SSB é feita por meio da eliminação de uma das faixas do AM-SC.

Na realidade, a modulação SSB é, a rigor, em quadratura, mas há um costume de chamá-la de modulação em amplitude. A vantagem que se obtém com esse sistema em relação aos anteriores é a economia de faixa.

O processo mais comum de obtenção do AM-SSB é por filtragem de uma das faixas laterais do AM-SC. Outra maneira de obtenção do AM-SSB recebe o nome de método de defasagem, que utiliza a transformada de Hilbert, que não trataremos aqui.

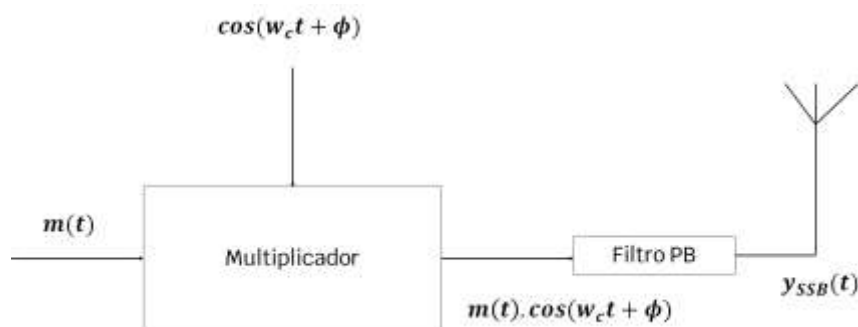


Figura 7 – Modulador AM-SSB com supressão da faixa lateral superior

2.2.4 Modulação em Frequência

No sistema com modulação FM a frequência da portadora varia proporcionalmente com a variação do sinal modulante $m(t)$. O sinal modulado tem a forma

$$c(t) = A \cos\{2\pi[f_c + \Delta_{FM}m(t)]t + \phi\}$$

, em que A é a amplitude, f_c é a frequência da portadora e Δ_{FM} é o índice de modulação. A Figura 8 mostra o comportamento espectral do sinal modulado.

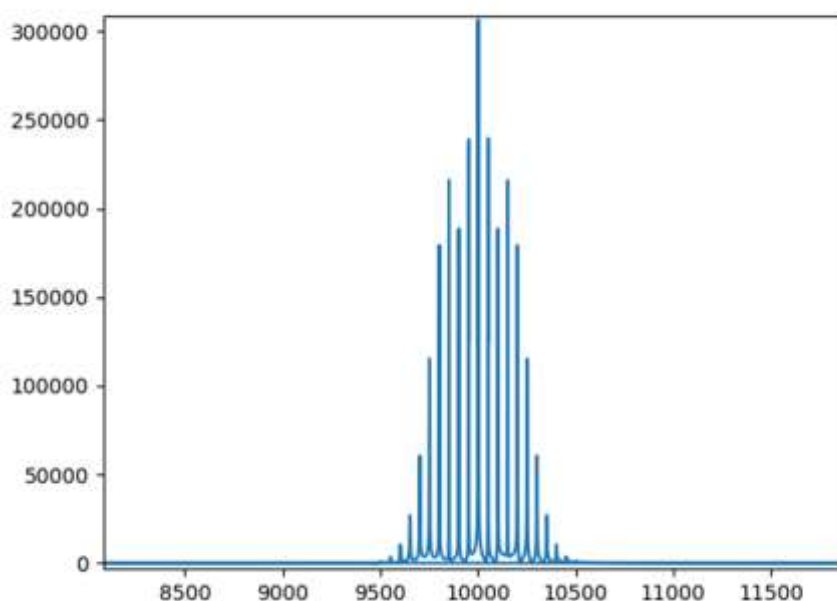


Figura 8 – Sinal FM, com portadora de $f_c = 10$ kHz, sinal modulante de 50 Hz

O índice de modulação determina a amplitude da variação da frequência do sinal modulado. Quanto maior for o índice de modulação, maior será a variação de frequência para o mesmo sinal a transmitir e mais largo será o espectro do sinal modulado.

Os sinais modulados em FM são **mais imunes ao ruído e à interferência** aditivos que os sinais AM, uma vez que a informação é transportada pela frequência instantânea do sinal modulado e não pela amplitude da portadora.

Assim, os sistemas de transmissão em que é necessária uma maior qualidade do sinal (relação sinal-ruído) é utilizada normalmente a modulação em frequência.

Um grande índice de modulação provoca um alargamento no espectro do sinal modulado, fazendo com que este ocupe uma faixa bem superior à do sinal de banda básica.

2.3 Modulação Digital

2.3.1 Considerações gerais

Nos esquemas de modulação digital os bits de informação são utilizados para selecionar a amplitude e/ou fase do sinal transmitido. Existem três tipos principais de modulação digital:

- Modulação por Amplitude de Pulsos (M-PAM, do inglês *Pulse Amplitude Modulation*): a informação modula somente a amplitude da portadora;
- Modulação com Chaveamento por Deslocamento de Fase (M-PSK, do inglês *Phase Shift Keying*): a informação modula somente a fase da portadora;
- Modulação em Quadratura (M-QAM, do inglês *Quadrature Amplitude Modulation*): a informação modula tanto a amplitude quanto a fase da portadora.

O valor de ***M*** define o número de símbolos ou formas de onda do espaço de sinais. Por exemplo, a modulação 4-PAM implica 4 símbolos no esquema de modulação PAM.

A técnica de modulação digital mais eficiente do ponto de vista espectral é a QAM. A eficiência espectral refere-se à capacidade de uma técnica de modulação transmitir a maior quantidade possível de dados em uma banda de frequência limitada, minimizando a largura de banda necessária.

A QAM combina duas técnicas de modulação: amplitude (AM) e fase (PSK - Phase Shift Keying), permitindo que ela transporte mais bits por símbolo, o que resulta em uma maior eficiência espectral. A eficiência espectral é uma métrica que indica quão eficientemente uma faixa de espectro de frequência é utilizada.

Na QAM, dois sinais são modulados, um em cosseno e outro em seno (daí o termo "em quadratura"), cada um carregando sua própria sequência de bits. Isso permite que a QAM aproveite tanto as mudanças de amplitude quanto as mudanças de fase para representar os dados. A modulação em quadratura geralmente alcança uma maior eficiência espectral porque combina duas dimensões de variação (amplitude e fase), diferentemente da PSK, que varia apenas a fase. Isso significa que, em uma mesma largura de banda, a QAM pode transmitir mais bits do que a PSK.

A modulação PSK usa apenas mudanças de fase para transmitir dados e, enquanto eficiente em termos de utilização de energia (especialmente em ambientes com ruídos), não atinge a mesma eficiência espectral que a QAM. Isso porque a PSK não utiliza variações de amplitude, o que limita o número de símbolos diferentes que podem ser representados em cada ciclo do sinal.

Portanto, enquanto a PSK pode ser mais robusta em ambientes ruidosos ou para aplicações onde a eficiência energética é crítica, a QAM é superior quando o objetivo é maximizar a quantidade de dados transmitidos em uma faixa de frequência limitada, sendo assim mais eficiente espectralmente.

A modulação com uma envoltória não constante é mais susceptível às variações de amplitude decorrentes de desvanecimento e interferência. Além disso, é preferível usar amplificadores não lineares, visto que são baratos e fáceis de construir. Entretanto, tais amplificadores não são eficientes para modulação com a envoltória não constante, tendo em vista que o ponto de operação do amplificador ser significativamente mais baixo que a região em que o amplificador torna-se não linear; caso contrário a amplitude é distorcida pela não linearidade do amplificador.

Portanto, o compromisso geral entre modulação em amplitude e em quadratura versus modulação em fase diz respeito à melhor eficiência espectral para QAM e à melhor eficiência de potência para PSK.

2.3.2 Análise do Espaço de Sinais

A modulação digital codifica uma sequência X de bits de comprimento finito N em um conjunto de símbolos transmitidos em blocos de k bits. O esquema digital codifica cada bloco de k bits em um símbolo único. O transmissor transforma cada bloco da sequência X a ser transmitida no seu respectivo símbolo do esquema de modulação. O receptor minimiza a **probabilidade de erro** de que um bloco de k bits seja recebido como outro bloco do conjunto possível de blocos.

Um exemplo simples

Considere uma sequência X de comprimento de 6 bits. Admita que o esquema divida a sequência em blocos de 2 bits, cada um. A sequência X será transformada pelo modulador em uma sequência de 3 símbolos de acordo com o esquema de modulação digital. Os símbolos possíveis do esquema codificam $s_1=00$, $s_2=01$, $s_3=10$ e $s_4=11$, uma vez que cada bloco possui 2 bits.

Uma sequência $X = \{1, 0, 0, 0, 1, 1\}$ será dividida em $\{1, 0\}$, $\{0, 0\}$ e $\{1, 1\}$. Em seguida será codificada como s_3 , s_0 , s_4 , para transmissão nos intervalos 0 a T , T a $2T$ e $2T$ a $3T$, em que T é o chamado intervalo entre símbolos.

O problema do receptor é decodificar corretamente cada símbolo recebido, em cada intervalo considerado.

A Figura 9 apresenta o esquema das mensagens, cada uma das quais se divide em sequência de bits, considerando o sistema de comunicações, como discutido preliminarmente.



Figura 9 – Modelo do sistema de comunicações – modulação digital

O canal AWGN

Lembrando que o canal insere no sinal efeitos indesejados. Para o estudo do sistema de comunicações é necessário admitir modelos. Um dos modelos é o chamado canal AWGN (do inglês, um acrônimo para *Additive White Gaussian Noise*), que é um modelo teórico usado em engenharia de telecomunicações para simular a influência do ruído nos sistemas de comunicação. Este modelo é fundamental para análises de desempenho de sistemas de comunicação e para o desenvolvimento de técnicas de modulação e codificação.

O ruído é considerado aditivo porque é somado ao sinal original sem alterar a estrutura do sinal. Isso significa que o ruído e o sinal coexistem sem interferência mútua, exceto pela degradação do sinal resultante da adição do ruído. A característica de ser "branco" significa que o ruído possui potência espectral uniforme em todas as frequências. Essa uniformidade é análoga à luz branca, que contém todas as cores (frequências) do espectro visível. No contexto do ruído, isso implica que todas as bandas de frequência são igualmente afetadas. O ruído é descrito como Gaussiano porque tem uma distribuição de probabilidade Gaussiana (ou normal), o que significa que a maioria dos valores de ruído está próxima da média, e valores muito altos ou muito baixos são menos prováveis. A distribuição Gaussiana é definida por duas características principais: a média (geralmente zero em um canal ideal) e o desvio padrão, que determina a largura da curva de distribuição e está diretamente relacionada à intensidade do ruído.

No canal AWGN, o ruído introduzido afeta aleatoriamente o sinal transmitido, causando erros na recepção e interpretação dos dados. A presença de ruído pode distorcer a amplitude, a fase ou outras propriedades do sinal, dependendo do tipo de modulação utilizada. A capacidade de um sistema de comunicação de tolerar ruído e ainda transmitir informações de forma eficaz é um indicador-chave da sua robustez e eficiência.

A solução ótima do receptor

O modelo de canal AWGN é usado para avaliar o desempenho de esquemas de modulação em termos de taxa de erro de bit (BER, do inglês *Bit Error Rate*) e eficiência espectral sob condições de ruído conhecidas. Embora seja um modelo idealizado, ele oferece uma base para comparar diferentes técnicas de comunicação e para desenvolver novos sistemas que sejam capazes de operar eficientemente em ambientes reais, que muitas vezes apresentam ruídos e distorções mais complexos.

Considere o modelo de canal AWGN, que tem resposta ao impulso $h(t) = \delta(t)$ e que ruído branco e estacionário com média zero e densidade espectral de potência $N_0/2$ é adicionado ao sinal transmitido para formar o sinal que chega ao receptor.

A cada T segundos, o sistema seleciona uma mensagem m_i de um conjunto $M = \{m_1, \dots, m_M\}$ que é posteriormente transmitida pelo canal. Admitindo que cada mensagem seja codificada com k bits, a taxa de bits da transmissão é dada por

k/T bps.

Cada mensagem m_i tem probabilidade P_i de ser selecionada para transmissão, dado o universo de M mensagens, do que $\sum_i P_i = 1$. Matematicamente, o receptor deve minimizar a probabilidade de erro, dada por

$$P_e = \sum_{i=1}^M P_i \cdot P(\hat{m} \neq m_i | m_i \text{ enviado})$$

, onde \hat{m} é a mensagem selecionada, m_i é a mensagem enviada e P_i sua probabilidade no conjunto de mensagens. **O problema do receptor é identificar a solução ótima do problema de minimização do erro.**

Dada a saída do canal $x(t) = s_i(t) + n(t)$, $0 \leq t < T$, investiga-se agora o projeto do receptor de determinar qual m_i - de forma equivalente, qual $s_i(t)$ foi enviado no intervalo de tempo $[0, T]$. Um processo similar é seguido para cada intervalo de tempo das demais mensagens, nos intervalos $[kT, (k+1)T]$.

O receptor faz sua estimativa \hat{m} da mensagem transmitida m_i em função do s_N símbolos possíveis utilizados pelo esquema de modulação para transmitir a mensagem. O receptor descarta qualquer formação no termo de ruído remanescente n . O objetivo do projeto do receptor é minimizar a probabilidade de erro na detecção da mensagem transmitida dado o sinal recebido $x(t)$. Para minimizar a probabilidade de erro.

Mapeamento de Gray

Para ilustrar esse processo podemos utilizar o recurso do mapeamento de Gray. A Figura 10 ilustra uma **constelação de símbolos** para modular uma sequência de bits, o qual define o espaço de sinais.

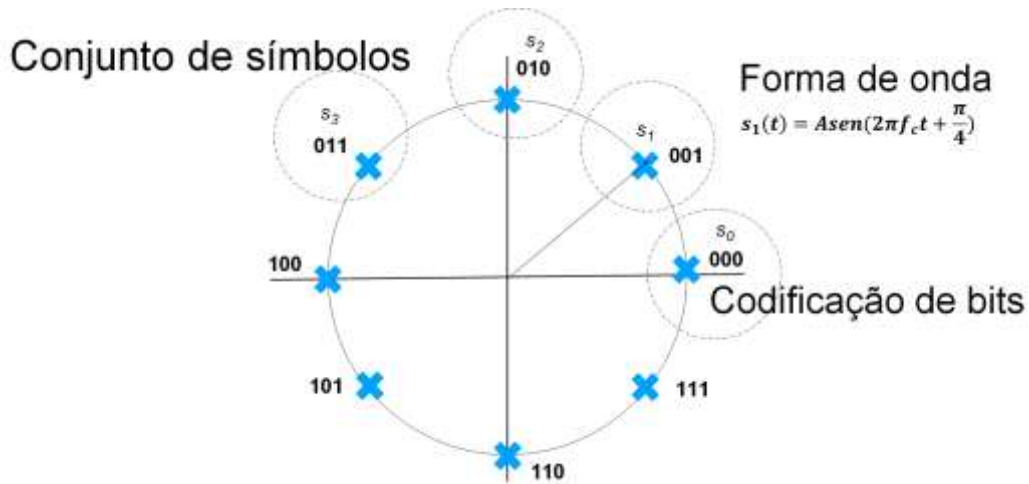


Figura 10 – Mapeamento de Gray de constelação de símbolos

Descrevendo de modo pormenorizado o modelo, devemos presumir uma sequência de bits referentes a elementos discretos de um conjunto finito,

$$S = \{b_0, \dots, b_{N-1}\}.$$

Cada **grupo** de k bits da sequência S é relacionado a uma mensagem m_i , consequentemente a um símbolo s_i de uma mensagem, que define a forma de onda do sinal a transmitir.

O mapeamento de Gray apresentado na Figura 10 ilustra a constelação de símbolos possíveis admitindo um esquema de modulação em que cada grupo de três bits é codificado em uma forma de onda s_i , ou seja, é possível codificar 3 símbolos em uma forma de onda, variando somente a sua fase, possibilitando 8 símbolos distintos. O conjunto m de mensagens implica o conjunto de símbolos \hat{m} símbolos recebidos alterados pelos efeitos adversos e indesejados do canal, resultando em uma constelação a ser identificada, como ilustra a Figura 11, a título de exemplo.

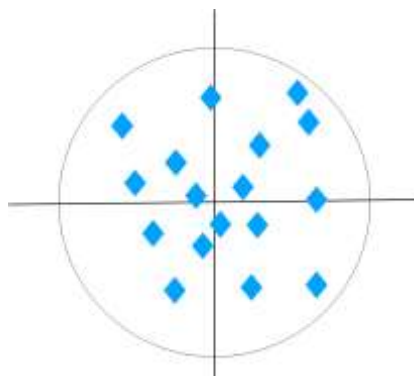


Figura 11 – Mapeamento de Gray de constelação de símbolos recebidos na transmissão de uma mensagem

Após o conjunto de símbolos ser recebido o receptor deve decidir qual é a constelação mais provável.

Receptor de máxima verossimilhança

O receptor pode utilizar uma estrutura chamada de **máxima verossimilhança**, que é muito simples de implementar, visto que o critério de decisão depende apenas de **distâncias entre vetores no espaço de sinais**. A estrutura busca minimizar a probabilidade de erro quando as mensagens transmitidas são equiprováveis. Para mensagens que não são equiprováveis, o critério de decodificação por distância mínima não é suficiente para minimizar a probabilidade de erro, uma vez que as probabilidades de mensagens a priori influenciam essa probabilidade.

Um algoritmo facilmente compreendido é aquele que objetiva $\hat{m}_l = \min \|x_l - s_i\|$, ou seja, decidir pelo símbolo do espaço de sinais que, para cada símbolo recebido, busca-se a menor norma com o conjunto de símbolos do esquema de modulação usado.

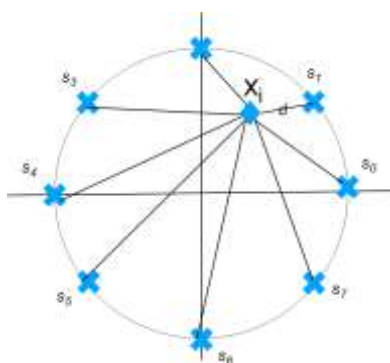


Figura 12 – Receptor com decisão baseada na distância do símbolo recebido com os símbolos do espaço de sinais

2.3.3 Modelo em blocos de modulador digital

A Figura 13 mostra o modelo em blocos de um modulador digital geral. O símbolo discreto a ser transmitido s_n pode ser representado na sua forma complexa retangular pela expressão $s_n = a_n + jb_n$, de modo a possibilitar a definição da fase do símbolo do espaço de sinais.

A amplitude do símbolo deve ser determinada por um **pulso de onda $g(t)$** cujo **formato requer uma análise adequada**.

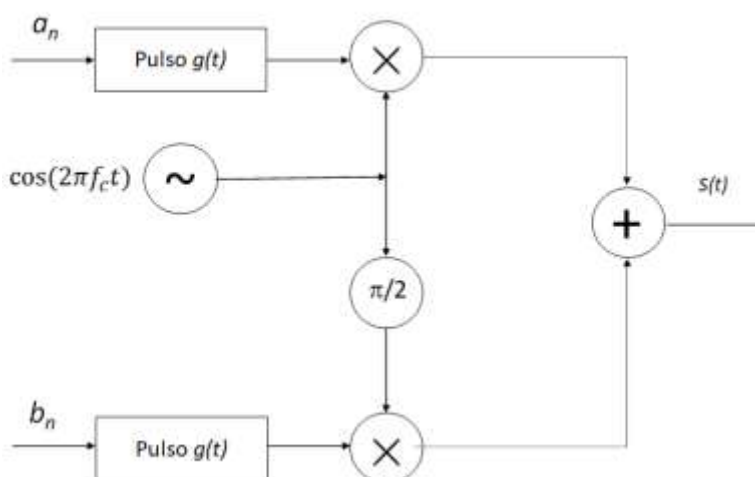
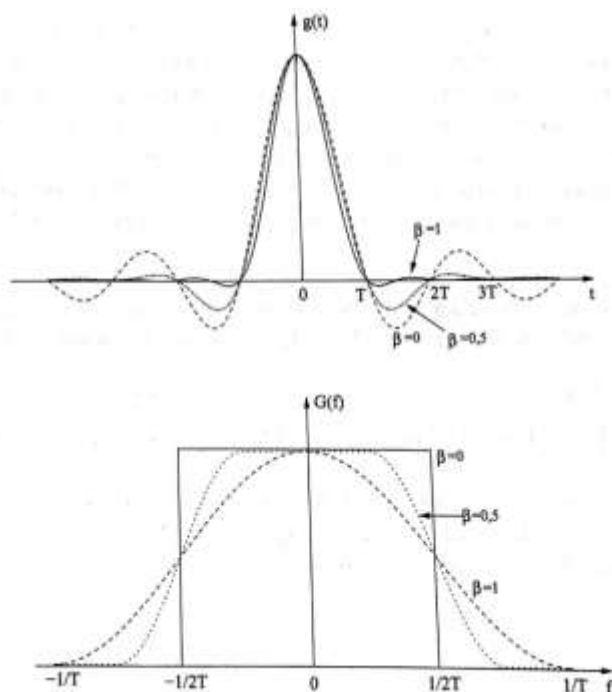


Figura 13 – Estrutura básica de um modulador digital

O **formato do pulso** deve ser convenientemente escolhido para o modulador, pois em virtude do seu comportamento no domínio da frequência, a sucessão de bits pode favorecer uma interferência intersimbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*). Para que não haja interferência, os pulsos devem satisfazer o critério de Nyquist, de tal modo que no instante de amostragem a ISI deve ser igual a nula. A Figura 14 ilustra pulso de formato cossenoidal levantado.


 Figura 14 – Pulso $g(t)$ de formato cosseno levantado

Observe que no instante de amostragem $1/T$ o valor do sinal é nulo exatamente para que não haja ISI. O comportamento espectral evidencia que para alguns valores de β ,

chamado de fator de *rolloff* (ou fator de excesso), um bit pode se sobrepor a outro, consequentemente um símbolo sobre outro.

A modulação consiste no produto de $s_n \cdot g(t)$ pelo sinal da portadora $\cos(2\pi f_c t)$.

2.3.4 Modulação por Amplitude de Pulsos (M-PAM)

O tipo de modulação mais simples, o M-PAM. Nesse esquema, toda informação é codificada na amplitude do sinal a ser transmitido em M símbolos distintos, tal que cada símbolo é definido por

$$s_m(t) = A_m g(t) \cos(2\pi f_c t)$$

, onde $A_m = (2m - 1 - M)d$, $m = 1, \dots, M$, e d é a distância entre símbolos.

Por uma mera simplificação, podemos admitir que o pulso é uma onda quadrada, ou seja, um pulso retangular. Também por simplificação, para facilitar a compreensão podemos admitir que $d = 1$, logo

$$s_m(t) = A_m \cos(2\pi f_c t)$$

, onde $A_m = (2m - 1 - M)$, $m = 1, \dots, M$.

Ou seja, a amplitude do sinal transmitido pode assumir M valores possíveis, o que faz com que cada pulso corresponda a $\log_2 M = K$ bits por intervalo de sinalização T_s .

Normalmente se usa o código Gray para associar os bits aos símbolos da constelação. Nesse tipo de mapeamento, símbolos adjacentes são associados a conjuntos de bits que diferem um do outro em apenas um bit. Com esse método de codificação, se o ruído provocar um erro de demodulação de um símbolo para outro símbolo adjacente (tipo de erro mais provável), então somente um bit em uma sequência de K bits é decodificado erroneamente.

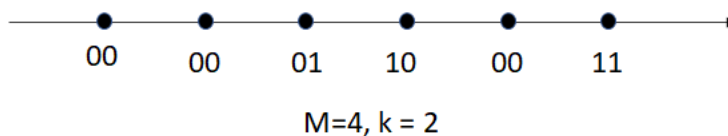


Figura 15 – Mapeamento Gray esquema 4-PAM

2.3.5 Modulação com Chaveamento por Deslocamento de Fase (M-PSK)

No esquema M-PSK, a informação é codificada na fase do sinal transmitido, ou seja,

$$s_m(t) = g(t) \cos \left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M} (m - 1) \right].$$

, onde $m = 1, \dots, M$. Ou seja, a fase do sinal transmitido pode assumir M valores possíveis.

A Figura 16 ilustra o exemplo de um esquema 8-PSK.

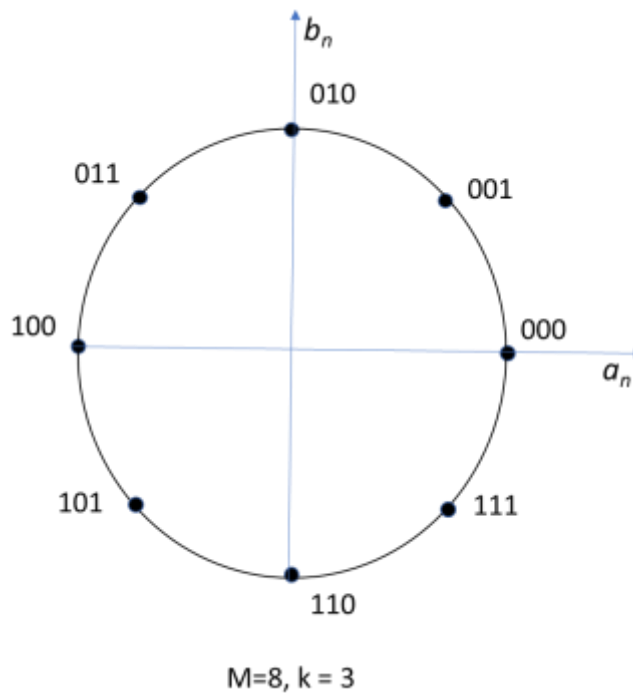


Figura 16 – Mapeamento Gray para o esquema de modulação 8-PSK

No caso do esquema 8-PSK, os símbolos são intervalos em fase $\phi = \pi/4$, possibilitando representar grupos de 3 bits.

Observe que para $g(t) = 1$

$$s_m(t) = \cos \left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(m - 1) \right].$$

, isto é, pulso retangular, o sinal transmitido tem envoltória constante, diferentemente esquemas de modulação M-PAM. Lembrando que pulsos retangulares são espectralmente pouco eficientes.

2.3.6 Modulação em Quadratura (M-QAM)

No esquema M-QAM, os bits de informação são utilizados para modular a fase e a amplitude do sinal transmitido. Assim, enquanto os esquemas M-PAM e M-PSK têm um grau de liberdade para codificar os bits de informação (amplitude ou fase respectivamente), o esquema M-QAM tem dois graus de liberdade.

Como resultado, o M-QAM tem melhor eficiência espectral do que os esquemas M-PAM e M-PSK, ou seja, para uma dada largura de faixa e uma dada potência média, o esquema M-QAM consegue codificar um número maior de bits por símbolo.

O sinal transmitido é dado por

$$s_m(t) = A_m g(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_m)$$

, onde

$$A_m = (2m - 1 - M)d, m = 1, \dots, M,$$

d é a distância entre símbolos,

$$\phi_m = \frac{2\pi}{M}(m - 1), n = 1, \dots, M.$$

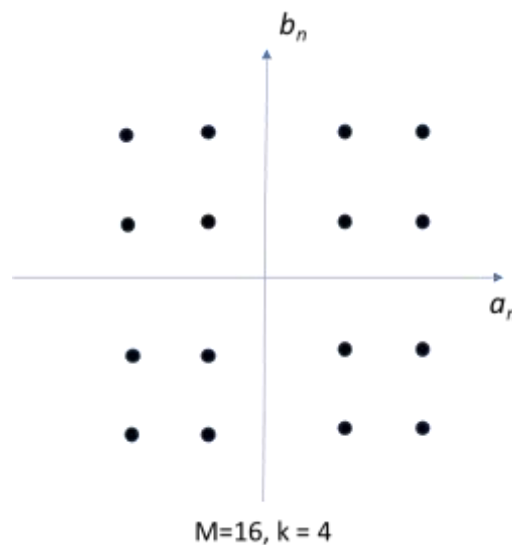


Figura 17 – Mapeamento Gray em esquema 16-QAM

2.4 REFERÊNCIAS

- Alencar, Marcelo S.; TELEFONIA CELULAR DIGITAL, 3a ed; érica Saraiva; 2014.
- HAYKIN, Simon. "Sistemas de Comunicação". Editora Bookman, 5ª Edição, 2008.
- PROAKIS, John G.; SALEHI, Masoud. "Comunicações Digitais". Editora McGraw-Hill, 5ª Edição, 2008.
- RAPPAPORT, Theodore S. "Telecomunicações sem Fio: Princípios e Práticas". Editora Prentice Hall, 2ª Edição, 2002.
- Stüber, Gordon L.; Principles of Mobile Communication; KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS; 2002.
- Wesolowski, Krzysztof; Mobile Communications Systems; JOHN WILEY & SONS; 2002.