



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Faculdade de Engenharia elétrica
Trabalho de Princípios de Telecomunicações I
Resumo do capítulo 12
Modulação com sinais Digitais

Trabalho de Princípios de Telecomunicações I

Aluno:
Adriano Martins Moutinho

Turma: 01

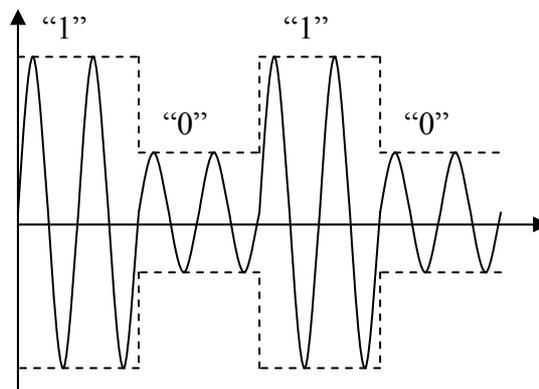
Trabalho de Princípios de Telecomunicações I Resumo do capítulo 12 – Modulação digital

1) Introdução:

Sinais digitais podem ser aplicados a moduladores PM, AM e FM convencionais e o resultado desta modulação é um sinal com certos estados fixos de fase, amplitude e frequência.

Então, convencionou-se chamar de PSK, ASK e FSK os sistemas de modulação PM, AM e FM cujos sinais de entrada são digitais. Logicamente, estes sinais modulados em ASK, por exemplo, podem ser gerados por um modulador AM em que na entrada é aplicado um sinal digital.

Na saída deste modulador AM, que agora chamamos de ASK, terá um número finito de amplitudes possíveis para a portadora. Isso é que caracteriza neste caso, a modulação digital.

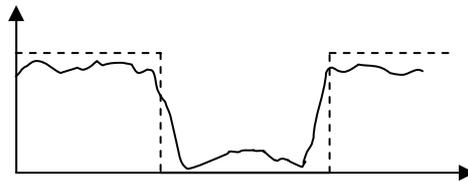


Modulação AM com sinal digital, ou ASK (Amplitude Shift Keying).

Utilizar moduladores analógicos convencionais, no entanto, seria caro demais para a aplicação desejada. Já que o que se deseja é que a portadora tenha uma certa amplitude para cada estado lógico, pode-se perfeitamente usar-se um seletor controlado pelo sinal de entrada. Quando o sinal de entrada for “1”, por exemplo, o sinal de saída é comutado por uma chave, para que o mesmo possua uma certa amplitude A_1 e quando o mesmo for “0” será novamente comutado para que tenha uma amplitude menor, igual a A_0 .

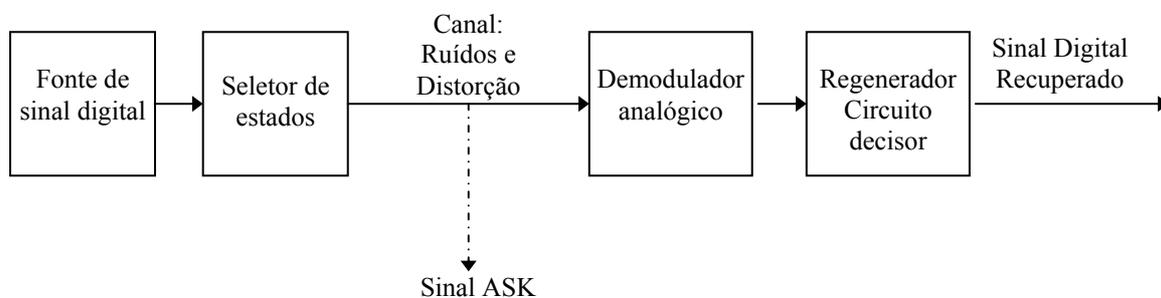
Embora haja esta simplificação no sistema transmissor, o receptor necessita ser um pouco mais elaborado. O sinal digital tende a gerar variações rápidas, ou componentes de alta frequência. Como a banda de transmissão é finita e ainda há a presença de ruído, o sinal recebido será bem diferente do que fora transmitido. Porém, como em qualquer transmissão digital, o sinal recebido poderá passar por um

regenerador que “limpa” os ruídos e restaura o aspecto original, dentro de limites aceitáveis de ruído.



Sinal ASK detectado em um receptor AM convencional e o sinal que é regenerado por circuitos de decisão.

Assim, o sistema de modulação digital deve ser composto da seguinte forma:



A associação de regeneradores permite que a modulação digital trabalhe com níveis maiores de ruído e distorção dos que são aceitáveis na modulação analógica. Por isso, existe cada vez uma maior procura por transmissão digital.

2) Modulação digital em amplitude:

Moduladores por amplitude são frequentemente referidos como membros da família ASK. Isso ocorre pois existem diferentes tipos de modulação ASK, bem como PSK e FSK. Apresentaremos as mesmas agora:

♦ Família ASK:

A modulação ASK pode conter apenas dois níveis possíveis de amplitude para a portadora, caracterizando um sinal binário. Se isto ocorrer, assim como mostra a figura na página 2, temos uma modulação BASK (Binary amplitude shift keying).

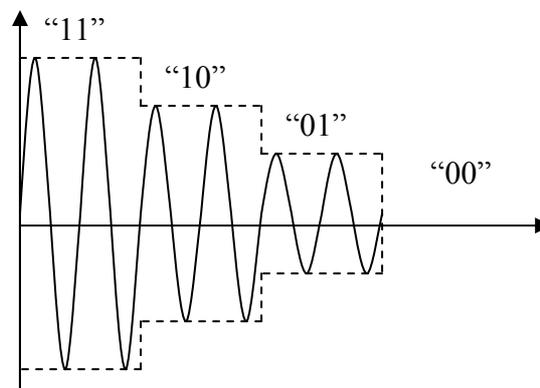
Se houver vários níveis de amplitude possíveis, caracteriza-se um sinal MASK, ou (multiple amplitude shift keying).

Uma outra variação possível para o sinal ASK, bastante semelhante ao BASK, é aquela que utiliza nível zero de amplitude para quando o sinal modulante é “0”. Este tipo de modulação é conhecido como ON-OFF keying, ou OOK. Este tipo de modulação é o mais importante na família ASK.

Os três tipos básicos de modulação da família ASK serão discutidos a seguir:

- **Sinal MASK:**

O sinal mask tem m amplitudes possíveis. Este sinal pode ser obtido em uma seleção/comutação de vários divisores de tensão, possibilitando que a saída tenha diversos níveis de amplitude possíveis. No caso mostrado abaixo, o sinal digital possui 4 diferentes níveis, representados por dois bits cada:

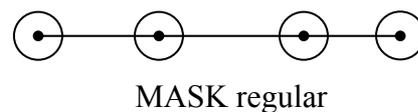
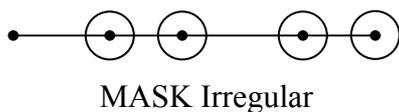


Sinal Mask – Quatro níveis

Como já foi anteriormente comentado, o ruído e a distorção do canal farão com que o sinal detectado seja diferente do apresentado acima (por linhas pontilhadas). Isso faz com que haja a necessidade de um decisor/regenerador no receptor.

A distribuição dos níveis de amplitude para cada nível de sinal pode, ou não, ser feita uniformemente. Para que haja um melhor aproveitamento dos níveis do decisor, há uma necessidade de deixar as amplitudes as mais afastadas possíveis umas das outras, por isso dá-se a preferência por distribuições regulares e uniformes.

Se representarmos as amplitudes da portadora fasorialmente, podemos ter uma idéia do trabalho do decisor:



Os pontos são as diferentes amplitudes que a portadora pode assumir e os círculos são as áreas de indecisão, que poderão provocar erros no sinal regenerado. Comparando os diversos esquemas apresentados, podemos definir que o sinal OOK é muito mais imune a erros que o BASK, pois possui maior diferença entre os estados.

A irregularidade na distribuição também causa mais erros, entre os estados 1 e 2 da figura referente ao MASK irregular, existe uma distância pequena, o que causará mais erros.

Adicionalmente, quando se aumenta o número de bits transmitido, ou seja, o número de estados e amplitudes, mantendo-se a mesma potência de transmissão, também se diminui a distância entre os círculos e conseqüentemente aumenta-se o erro no receptor.

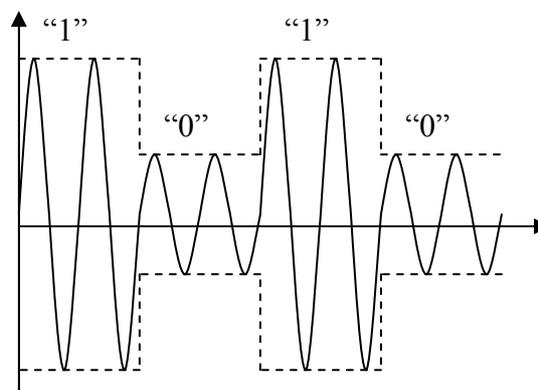
- **Sinal BASK:**

O sinal bask é formado através da modulação de uma onda quadrada por uma portadora cossenoidal. Se considerarmos a amplitude da portadora no nível “1” como E_1 e a amplitude da portadora no nível “0” como E_2 temos:

$$\text{Estado "1"} : E_{PORTADORA}(t) = E_1 \cdot \cos(\omega_0 t)$$

$$\text{Estado "0"} : E_{PORTADORA}(t) = E_2 \cdot \cos(\omega_0 t)$$

Podemos considerar então, que em um sinal como o mostrado abaixo, sendo a quantidade de uns e zeros igualmente provável, a amplitude média do sinal BASK seria igual à média das amplitudes E_1 e E_2 .



Sinal Bask - Índice de modulação < 1.

Ou seja, em um sinal BASK:

$$E_0(\text{Média}) = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

Assim, considerando que E_0 é a média da amplitude do sinal BASK, podemos obter o seu índice de modulação em função das amplitudes E_1 e E_2 :

$$I_m = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E_0 - E_2}{E_0} = \frac{\frac{E_1 + E_2}{2} - E_2}{\frac{E_1 + E_2}{2}}$$

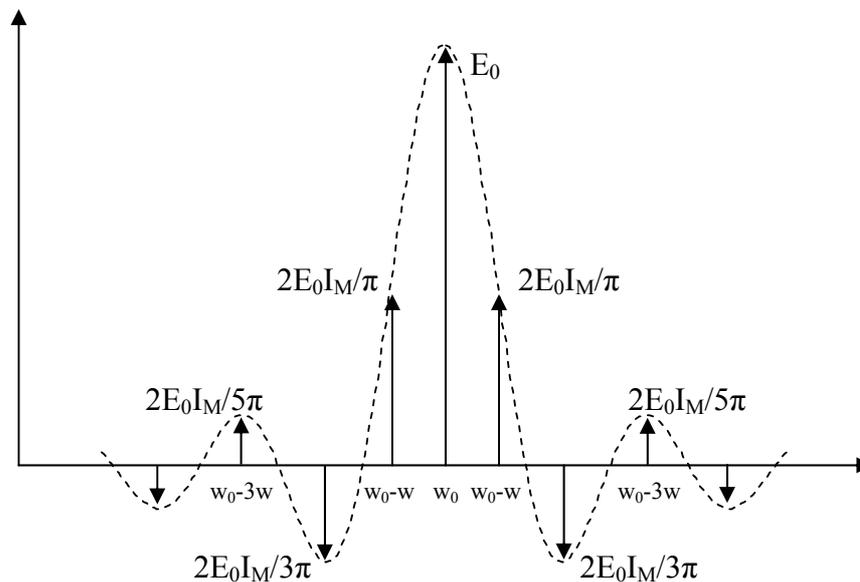
$$I_m = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}$$

Nota-se que para um sinal BASK, o índice de modulação é menor que um pois o valor de E_1 é menor que o valor de E_2 .

O espectro do sinal BASK pode ser conseguido considerando que a portadora é uma cossenóide cuja amplitude é multiplicada por uma onda quadrada, ou seja.

$$\psi_{BASK}(t) = E_0[1 + I_M Q(t)]\cos(w_0 t)$$

O espectro então será a transformada de Fourier do sinal acima. Considerando que a multiplicação no tempo é a convolução na freqüência, e que uma onda quadrada tem transformada na forma de $\text{sen}(w)/w$, o espectro do sinal BASK pode ser representado por um sinc “cortado” por diversos impulsos, como mostrado a seguir:



O espectro necessário para transmissão deste sinal é a raia do centro, e as duas primeiras raias laterais. Nessas raias estão concentrados mais de 90% da potência do sinal, portanto, a banda necessária para a transmissão do sinal é a diferença entre as freqüências das bandas laterais superiores e inferiores, ou seja:

$$BW_{MIN} = (w_0 + w) - (w_0 - w) = 2w$$

Onde w é a frequência fundamental da onda quadrada $Q(t)$.

Analisando-se novamente a expressão do sinal, utilizando-se o teorema da potência para séries de cossenos, temos:

$$\psi_{BASK}(t) = E_0 \cos(w_0 t) + E_0 I_M Q(t) \cos(w_0 t)$$

Considerando apenas as bandas laterais:

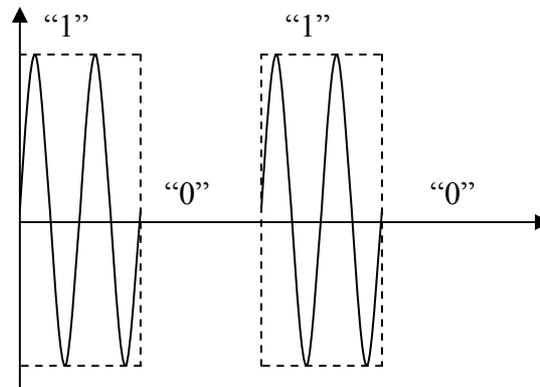
$$\psi_{BASK}(t) = E_0 \cos(w_0 t) + \frac{E_0 I_M}{2} (\cos([w_0 + w]t) + \cos([w_0 - w]t))$$

A potência do sinal BASK é:

$$P_T = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2 I_M^2}{4} + \frac{E_0^2 I_M^2}{4} = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2 I_M^2}{2}$$

- **Sinal OOK:**

Considera-se o sinal OOK como um caso particular do BASK, para I_M igual a 1. Este sistema é o mais simples e o mais antigo dos sistemas de modulação digital. Pode-se modular um sinal em OOK dispondo-se simplesmente de um oscilador e de um comutador que irá cortar a portadora quando o sinal digital for “0” e deixar passar quando for “1”. O sinal OOK pode ser visualizado abaixo:



Sinal OOK - Índice de modulação = 1.

Obviamente todos os resultados obtidos no BASK podem ser aplicados diretamente no OOK. Apenas considera-se E_2 como zero. A banda mínima necessária para a transmissão é a mesma, duas vezes a frequência fundamental da onda quadrada:

$$BW_{MÍN} = 2w$$

Na prática, por exemplo, nos sistemas telegráficos, utiliza-se uma banda 3 a 5 vezes maior que a banda mínima. Isso se deve ao fato de que para receber um sinal com banda mínima necessita-se de filtros ideais, ou quase ideais. O aumento da banda simplifica o projeto do filtro passa-faixas do receptor.

Pode-se obter a potência de um sinal OOK substituindo-se $I_M=1$ na fórmula da potência do sinal BASK. Tem-se assim:

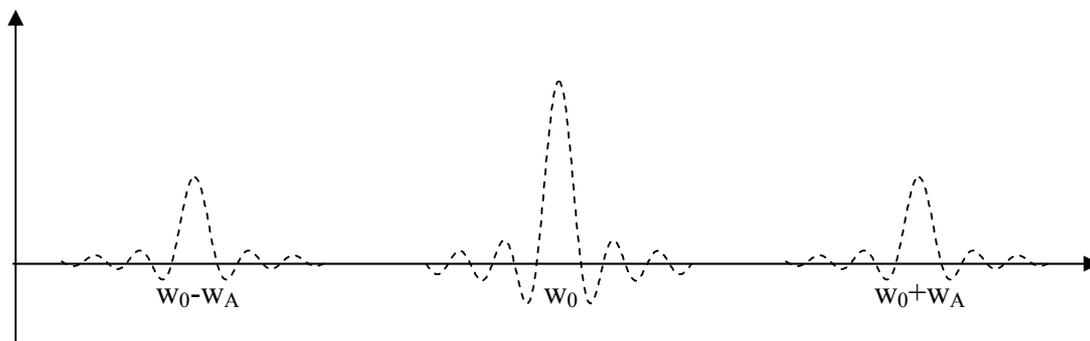
$$P_T = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2}{2} = E_0^2$$

Pode-se notar que o sinal OOK é mais eficiente que o sinal BASK convencional. Ocorre o mesmo que na modulação AM convencional, há um máximo de eficiência quando o índice de modulação é 1.

Sinais OOK têm sua aplicação principalmente em sinais telegráficos. Quando demodulado, o sinal restaurado é uma seqüência de pulsos DC que pode não ser adequada para recepção auditiva.

Duas opções podem ser usadas para corrigir este problema: Ou um relé comuta o oscilador local, ou modula-se o sinal OOK com um sinal de áudio.

Quando se modula o sinal OOK novamente, ou seja, faz-se uma modulação composta, o sinal resultante é um sync principal, e dois outros syncs menores servindo como bandas laterais. Este espectro pode ser visualizado a seguir:



Deve-se tomar cuidado na escolha de w_0 e w_A , para que não haja superposição dos espectros.

- **Demoduladores ASK:**

Pode-se usar qualquer demodulador analógico, como o detector de envoltória ou demodulação síncrona. Entretanto este último possui melhor desempenho em sistemas ruidosos e em casos onde a relação sinal ruído é muito baixa, deve ser o mais utilizado.

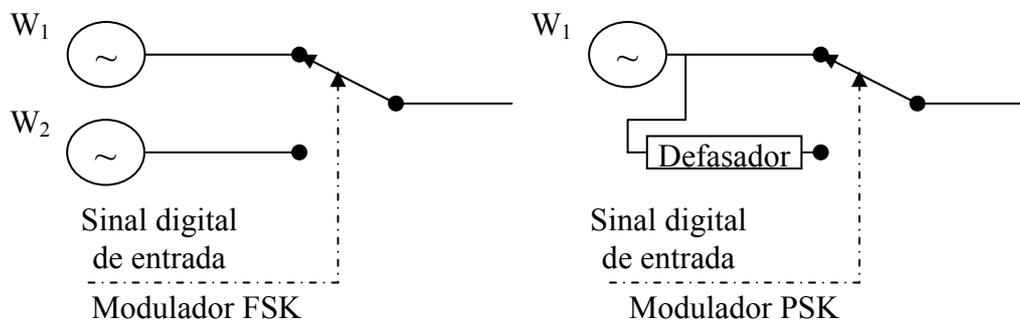
3) Modulação angular – Famílias PSK e FSK:

Um sinal digital pode ser também aplicado em um gerador PM ou FM, dando origem aos sinais PSK (Phase Shift Keying) e FSK (Frequency Shift Keying).

De forma análoga aos sinais da família ASK, os sinais PSK/FSK podem ser obtidos através de seleção ou comutação de diferentes fontes. No caso do FSK, dois geradores de frequências distintas são selecionados de acordo com a entrada digital (“0” ou “1”).

Já o PSK pode ser obtido por processo semelhante. Quando a entrada digital é “1”, por exemplo, o sinal de um gerador é colocado na saída do modulador, e quando a entrada digital é “0” o sinal do gerador é passado por um circuito que defasa o sinal, e só então é colocado na saída.

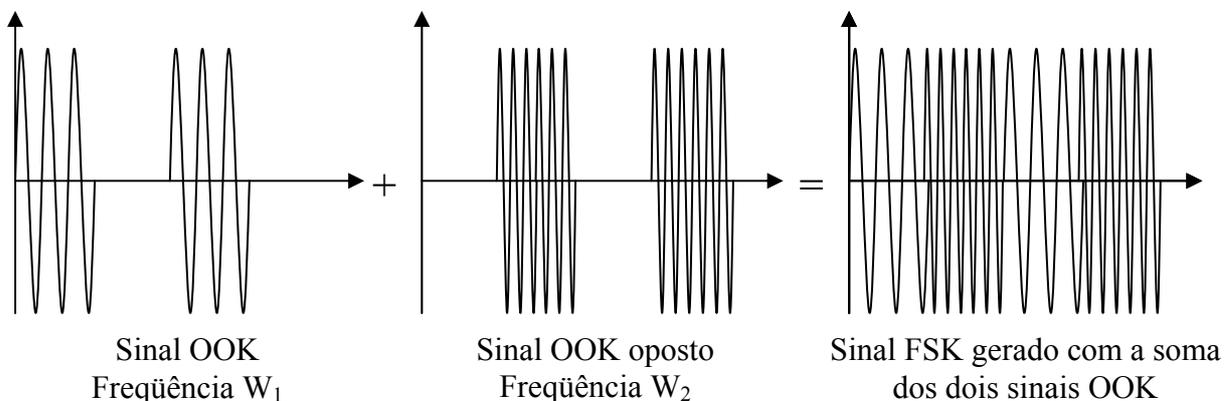
O diagrama em blocos de um modulador PSK e FSK é mostrado abaixo:



Assim, durante o intervalo de tempo em que o sinal digital mantém um valor, seja ele “0” ou “1”, a saída estará apresentando uma senóide pura. Isso dá características diferentes aos sinais FSK/PSK em relação aos sinais FM/PM.

Podemos perceber que um sinal digital modulado angularmente pode ser simplificado por somas de sinais OOK modulados opostamente, isto é modulando com uma amplitude não nula para os uns e nula para os zeros em uma e o contrário na outra.

Se um dos sinais OOK possuir uma certa frequência e o outro oposto possuir outra frequência, a soma destes dois sinais é igual a um sinal FSK. O mesmo ocorre para os sinais PSK, neste caso, os sinais OOK precisarão ter fases diferentes.



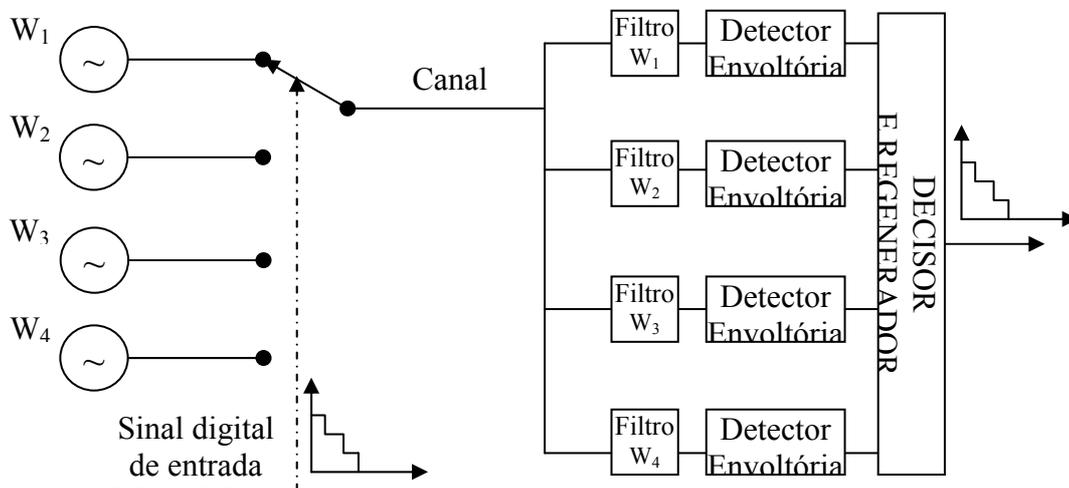
◆ **Família FSK:**

Analogamente à família ASK, os sinais FSK são classificados de acordo com o sinal digital que entra no sistema. Ocorrem as mesmas variações do ASK, como o BFSK (análogo ao BASK) e o MFSK (análogo ao MASK).

• **Sinal MFSK:**

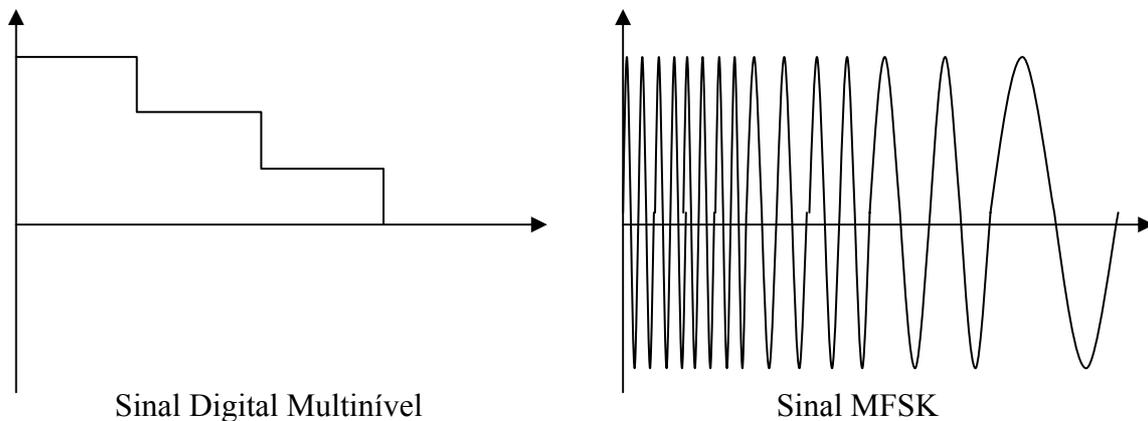
O sinal MFSK é composto por várias frequências diferentes, cada uma usada para codificar um determinado estado. Como existem m estados no sistema, haverá m frequências diferentes no MFSK.

No receptor, existe um filtro para cada um dos m estados, na saída de cada filtro haverá ruídos, a não ser naquele que estiver recebendo a frequência correta. Todas as saídas dos filtros entram em um regenerador, que restitui o sinal original.



Modulador e Receptor MFSK

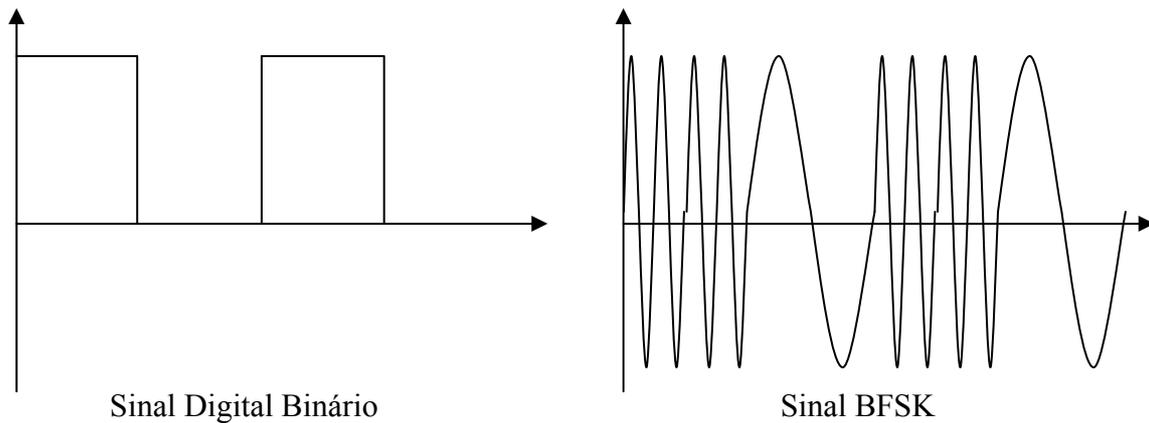
O sinal MFSK é mostrado a seguir:



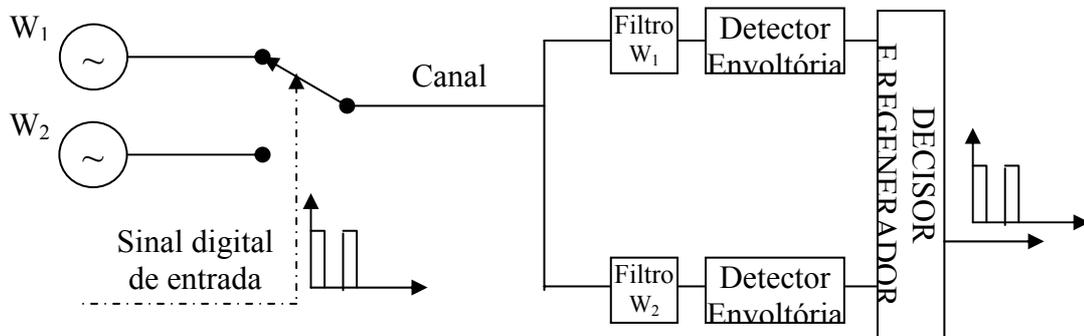
Assim como no sinal MASK, a distribuição espectral uniforme das frequências que geram o sinal MFSK propicia um melhor aproveitamento do espectro e consequentemente uma simplificação nos projetos dos filtros do receptor, além de um melhor discernimento no módulo decisor/regenerador.

• **Sinal BFSK:**

O sinal BFSK é análogo ao BASK e um caso particular do MFSK para dois estados possíveis somente. O sinal BFSK é mostrado a seguir:



O sistema de modulação/demodulação é idêntico ao do MFSK, porém apenas com dois geradores no modulador e dois sistemas filtro/detector de envoltória:



Para determinarmos o espectro do sinal BFSK, usaremos o artifício de dividi-lo em dois sinais OOK conforme dito anteriormente.

Se em cada estado do sinal de entrada temos uma determinada frequência, então temos

$$\begin{aligned} \text{Estado "1"} : E_{PORTADORA}(t) &= E_0 \cdot \cos(w_1 t) \\ \text{Estado "0"} : E_{PORTADORA}(t) &= E_0 \cdot \cos(w_2 t) \end{aligned}$$

Considerando W_d como um desvio igual a semidiferença entre as frequências:

$$\text{Estado "1"} : E_{\text{PORTADORA}}(t) = E_0 \cdot \cos([w_0 + w_D]t)$$

$$\text{Estado "0"} : E_{\text{PORTADORA}}(t) = E_0 \cdot \cos([w_0 - w_D]t)$$

$$\text{Onde : } w_D = \frac{w_1 - w_2}{2} \text{ e } w_0 = \frac{w_1 + w_2}{2}$$

Assim, se o sinal BFSK é a soma de dois sinais OOK₁ e OOK₂. Analisemos agora o sinal OOK₁:

$$\text{Estado "1"} : E_{\text{PORTADORA}}(t) = E_0 \cdot \cos(w_1 t)$$

$$\text{Estado "0"} : E_{\text{PORTADORA}}(t) = 0$$

Como o sinal acima é idêntico ao apresentado na sessão de sinais BASK, o espectro do sinal é também idêntico, ou seja, um sync cortado por diversos impulsos.

O sinal OOK₂ é definido da seguinte forma:

$$\text{Estado "1"} : E_{\text{PORTADORA}}(t) = 0$$

$$\text{Estado "0"} : E_{\text{PORTADORA}}(t) = E_0 \cdot \cos(w_2 t)$$

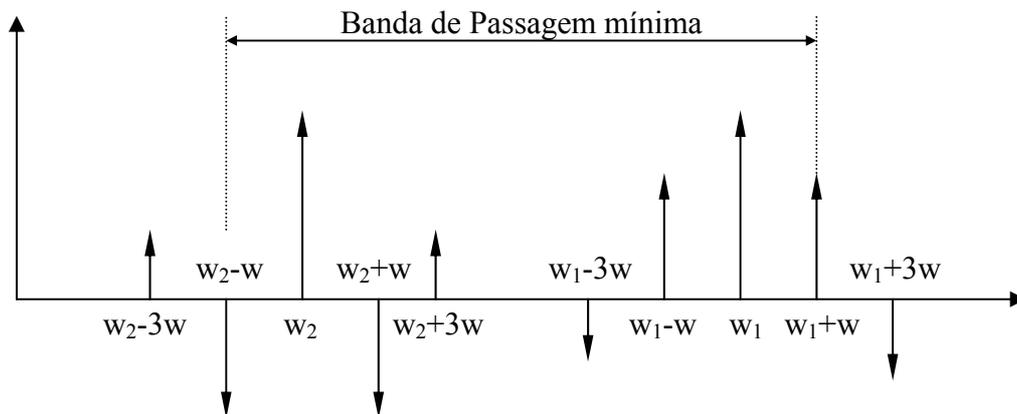
Considerando o sinal de entrada uma onda quadrada de período T, ou seja, alternando igualmente zeros e uns, o sinal de entrada de OOK₂ é igual ao sinal de entrada de OOK₁, mas com um retardo de T/2.

A transformada de Fourier do sinal de entrada de OOK₂ será igual ao de OOK₁ multiplicada por uma componente exponencial com argumento complexo, de acordo com a propriedade do deslocamento no tempo. Considerando $Q_1(W)$ a transformada de Fourier do sinal onda quadrada que entra em OOK₁ e $Q_2(W)$ a transformada de Fourier do sinal onda quadrada que entra em OOK₂, temos:

$$Q_2(w) = Q_1(w) \cdot e^{-jwT/2}$$

Isso fará com que o espectro de Q_2 , e conseqüentemente o espectro de OOK₂, seja igual ao de OOK₁, porém com todas as suas componentes invertidas em 180°, a exceção, obviamente, do valor DC.

Quando somamos os dois espectros, o de OOK₂ e o de OOK₁, temos como resultado o espectro do BFSK equivalente. Este espectro consiste em dois syncs cortados por impulsos, sendo que um deles tem todas as suas componentes invertidas 180°, como mostra a figura abaixo:



Espectro de um sinal BFSK – gerado a partir de dois sinais OOK

Sabendo-se o espectro do sinal BFSK, podemos determinar a sua largura de banda mínima de transmissão. De acordo com a figura acima, a banda para transmissão do sinal deve conter, pelo menos, a portadora principal em w_1 e w_2 e as duas bandas laterais de cada. Dessa forma:

$$B_w = (w_1 + w) - (w_2 - w) = w_1 + w_2 + 2w$$

Considerando $w_2 - w_1/2$ como o desvio w_d de frequência do sinal BFSK, a fórmula acima pode ser escrita:

$$B_w = 2 \cdot (w_d + w)$$

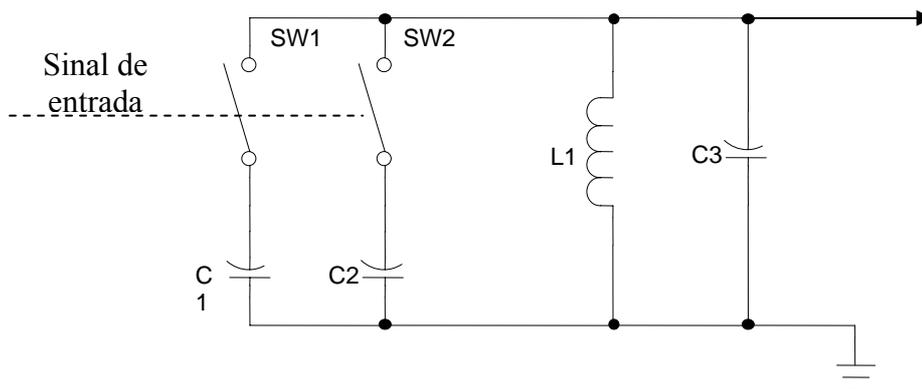
$$\text{onde: } w_d = \frac{w_1 - w_2}{2}$$

- **Demoduladores FSK:**

Para modular um sinal da família FSK pode-se usar um modulador FM convencional, ou um seletor de frequências.

Este seletor de frequências pode ser montado com um circuito de chaves que comutam osciladores independentes, conforme mostrado anteriormente. Porém, este tipo de montagem é pouco prático, sendo preferível montar um circuito com apenas um gerador, e multiplicadores de frequências chaveados pelo circuito seletor.

Outra solução frequentemente adotada é a utilização de um circuito LC oscilador, em que chaves seletoras adicionam mais, ou menos capacitância de acordo com a frequência que se deseja gerar para cada estado.



Exemplo de modulador FSK com circuito
Oscilador LC e chaveamento de capacitores.

Já a demodulação do sinal FSK pode ser feita por um demodulador FM convencional, onde se adiciona, obviamente, um decisor/regenerador para recuperar o sinal digital original. Porém, essa situação poderá ser bastante complicada no caso do sinal MFSK com muitos níveis.

Neste caso, prefere-se usar filtros para decompor o sinal FSK em vários sinais OOK e, a seguir, demodular com detector de envoltória, ou demodulação síncrona. A saída de cada demodulador OOK entra em um decisor/regenerador, para novamente poder recuperar o sinal digital original.

Embora complicada, a demodulação baseada em dividir o sinal FSK em vários OOK gera uma maior relação sinal/ruído. Isto ocorre, pois os filtros que separam os sinais OOK possuem um menor faixa de passagem, deixando menos ruído entrar no sistema, sendo o preferido para demodular sinais de dados de alta velocidade.

No caso do demodulador FM convencional, a faixa de passagem do mesmo teria que ser bem maior, aumento o ruído captado. Mesmo assim, devido a ser mais vantajoso economicamente, é usado em sistemas telegráficos onde a relação sinal ruído não é crítica.

◆ Família PSK:

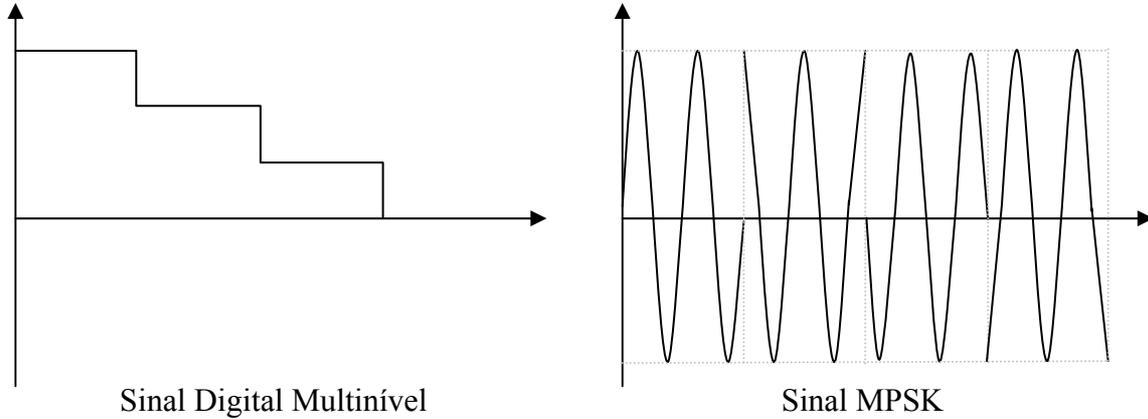
Exatamente como no ASK e no FSK, os sinais da família PSK são divididos da mesma forma. Quando o sinal de entrada é digital binário, o sistema se chama BPSK. Quando o sinal de entrada é digital multinível, chamamos o sistema de MPSK.

O sinal BPSK é conhecido também como PRK (Phase reversal Keying). Isso ocorre, pois no BPSK a fase da portadora é invertida quando se muda o estado lógico de “0” para “1”, ou vice versa.

Ainda existem outros elementos da família PSK que se diferenciam nos modos de detecção das diferenças de fase. São os sinais CPSK e DPSK, como será visto mais adiante.

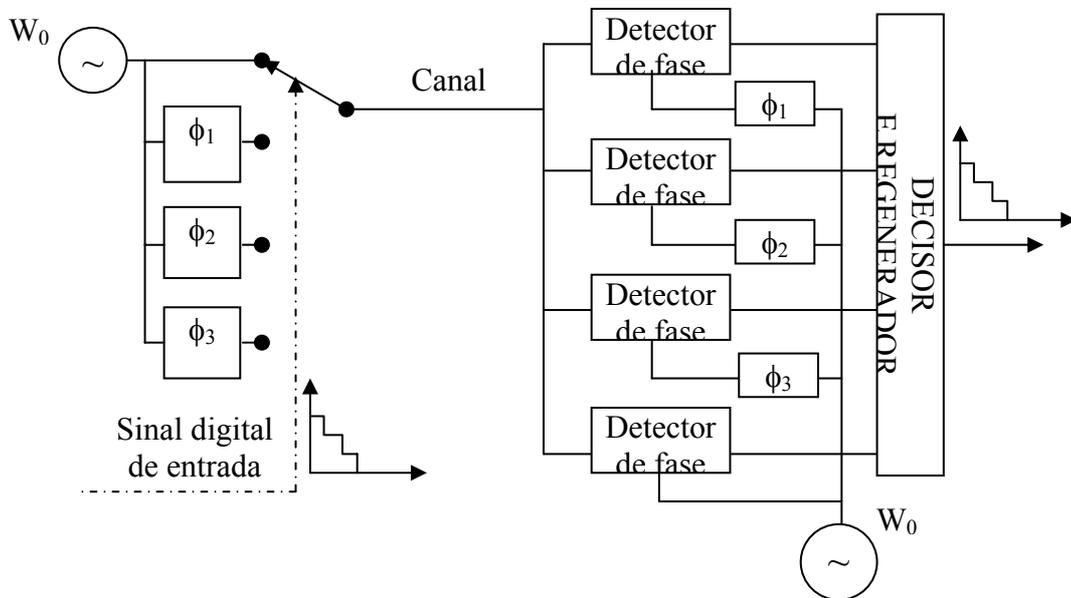
- **Sinal MPSK:**

O sinal MPSK possui uma codificação onde cada nível do sinal digital de entrada representa uma fase diferente da portadora. Um exemplo deste sinal é mostrado abaixo:



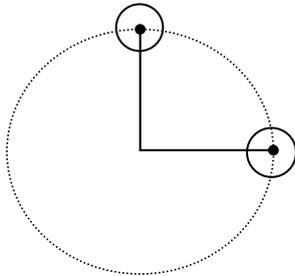
No receptor usa-se detectores de fase para cada fase codificada. As saídas destes detectores serão levadas aos decisores e regeneradores, sendo que a saída será máxima no detector que estiver recebendo a portadora em fase com a referencia local.

Um esquema de transmissão e recepção MPSK com quatro níveis é mostrado abaixo, sua configuração é bastante parecida com o MFSK, porém a grandeza variada na chave seletora é a fase, não a frequência:

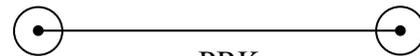


A representação fasorial do sinal PSK pode dar uma idéia da capacidade de discernimento que o sistema de demodulação precisa ter para ser capaz de restaurar o sinal original.

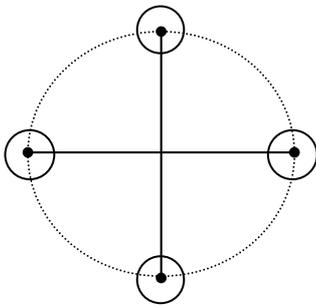
Da mesma forma que foi feita nos sistemas ASK, os círculos representam os intervalos de indecisão:



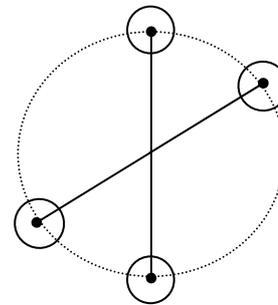
PSK Irregular – 0° e 90°



PRK
 PSK com 0° e 180°



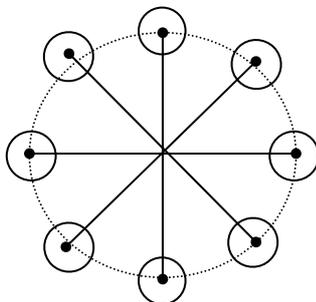
PSK regular – 0° , 90° , 180° e 270°



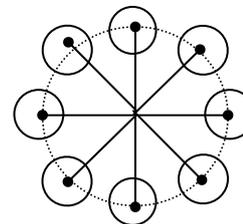
PSK irregular

Exatamente como no esquema ASK, a modulação PSK regular tem vantagens em relação ao irregular pois facilita na identificação das fases, fazendo com que as mesmas fiquem as mais distantes possíveis umas das outras.

Adicionalmente, quanto maior for a amplitude da portadora, melhor será a capacidade do receptor de discernir entre os estados lógicos. As duas figuras abaixo mostram essa peculiaridade, aplicada em uma modulação PSK regular de 8 estados:



PSK – 8 níveis lógicos
 Amplitude normal

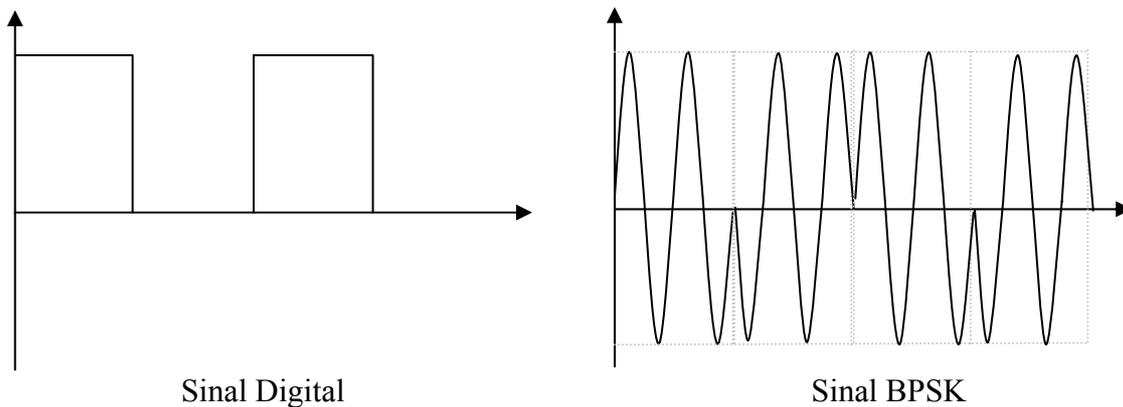


PSK – 8 níveis lógicos
 Amplitude Baixa

- **BPSK:**

O sinal BPSK é similar ao BASK e ao BFSK, ou seja, admite apenas dois estados lógicos do sinal de entrada, “0” ou “1”. Para cada um deles, no BPSK, a portadora possui uma fase distinta.

O BPSK é um caso particular do MPSK. Normalmente, para facilitar o trabalho do circuito decisor, são usadas as fases 0° e 180° para representar os níveis lógicos, fazendo com que os mesmos possuam a melhor distância possível. O sinal BPSK é mostrado abaixo:



Procedendo da mesma forma usada no BFSK, ou seja, dividindo o sinal BPSK em dois sinais OOK com fases diferentes, poderemos chegar ao gráfico do espectro do sinal BPSK. Assim:

$$\text{Estado "1"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_1)$$

$$\text{Estado "0"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_2)$$

Considerando Φ_0 como a fase inicial da portadora e Φ_D como o desvio de fase, as expressões acima podem ser reescritas como:

$$\text{Estado "1"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_D + \phi_0)$$

$$\text{Estado "0"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(\omega_0 t - \phi_D + \phi_0)$$

$$\text{Onde : } \phi_D = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \quad \text{e} \quad \phi_0 = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

O sinal OOK_1 será exatamente igual ao caso do OOK convencional, ou seja, um sinc centrado em ω_0 e cortado por diversos impulsos, mostrado na página 6. Porém, haverá uma diferença pois agora existe uma defasagem de $\Phi_0 + \Phi_D$. Assim, aparecerá uma exponencial com expoente complexo multiplicando o espectro OOK.

$$OOK_1(\omega) = OOK_{CONVENCIONAL_1}(\omega) \cdot e^{(\phi_D + \phi_0)j}$$

Com o sinal OOK₂ ocorrerá o mesmo, porém, a fase será $\Phi_0 - \Phi_D$. Similarmente ao que ocorreu no BFSK, haverá também uma exponencial complexa com expoente $T/2$, devido a defasagem do sinal OOK₂ em relação ao OOK₁.

$$OOK_2(W) = OOK_{CONVENCIONAL_1}(W) \cdot e^{(-\phi_D + \phi_0 - jwT/2)j}$$

Para facilitar a análise, avaliaremos as expressões acima considerando a fase inicial igual a zero, ou seja $\Phi_0 = 0$. Então, temos, para todo w (menos para $w=w_0$):

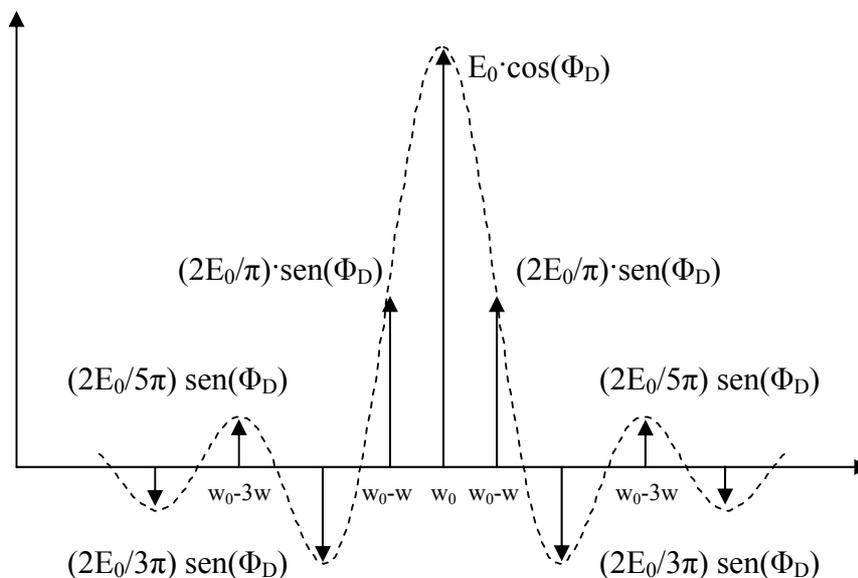
$$\begin{aligned} OOK_1(W) + OOK_2(W) &= BFSK(W) = \\ &= OOK_{CONVENCIONAL_1}(W) \cdot [e^{(-\phi_D)j} - e^{(-\phi_D)j}] \\ &= OOK_{CONVENCIONAL_1}(W) \cdot 2j \text{sen}(\phi_D) \end{aligned}$$

Para $w=w_0$ o termo $e^{-jwT/2}$ não será -1 e sim 1 . Assim, a portadora terá a seguinte forma:

$$BFSK(W) = OOK_{CONVENCIONAL_1}(W) \cdot [e^{(-\phi_D)j} + e^{(-\phi_D)j}]$$

$$BFSK(W) = OOK_{CONVENCIONAL_1}(W) \cdot 2 \cos(\phi_D)$$

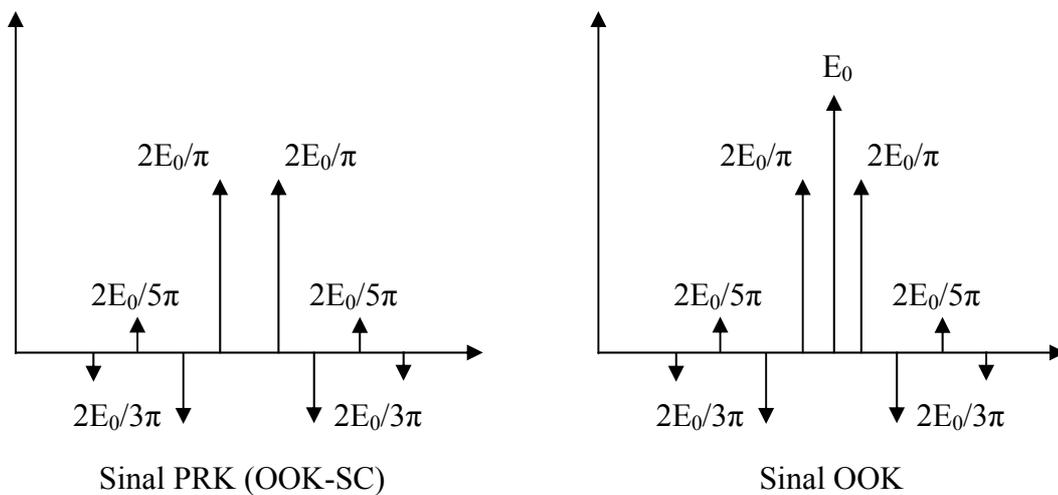
Assim, o espectro final do BFSK será igual ao BASK convencional, a exceção de que todas as componentes serão multiplicadas por $2j\text{sen}(\Phi_D)$ e a componente da portadora multiplicada por $\cos(\Phi_D)$. Este espectro pode ser visualizado na figura abaixo:



- **Sinal PRK:**

O sinal PRK (Phase reversal keying) é um tipo particular de modulação BPSK onde as fases escolhidas são opostas 180° . Para facilitar a nossa análise, vamos considerar que para codificar o nível lógico “0” a portadora assume 0° e para codificar o nível “1” a portadora assume 180° .

De acordo com a análise feita no item anterior, o termo relativo a portadora desaparece, pois $\Phi_D=90$ e $\cos(\Phi_D)=0$. Já as outras componentes são mantidas idênticas já que $\sin(\Phi_D)=1$. Esse sinal resultante, o espectro do PRK, se mostra idêntico ao sinal OOK, a exceção de que não existe portadora. Assim, o sinal PRK pode ser considerado como um OOK-SC:



- **Demoduladores PSK:**

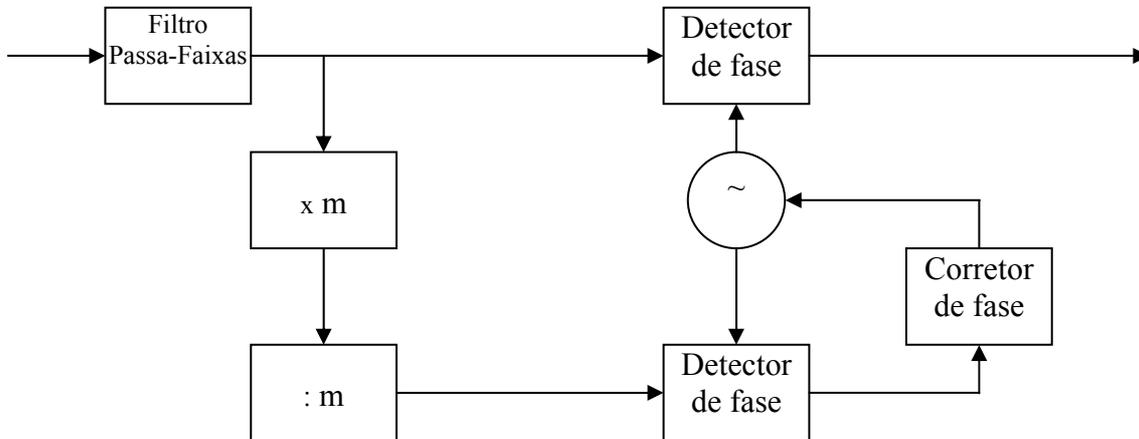
Para demodular o sinal PSK, podemos usar um demodulador PM convencional, e adicionar a sua saída um decisor/regenerador, exatamente igual a qualquer demodulação digital convencional.

Porém, principalmente no caso do MPSK, essa situação gera diferença de níveis muito pequena, o que dificulta muito a operação do decisor.

Para evitar este problema usa-se um circuito como o da figura na página 15. Uma portadora igual à do módulo transmissor é gerada no receptor e por meio de detectores de fase consegue-se comparar o sinal recebido com as referências locais, facilitando o trabalho do decisor.

Porém, gerar uma portadora local que seja coerente em fase e frequência com a do transmissor é bastante complexo. Um erro de fase na geração da portadora de referência poderia baixar o nível de amplitude do sinal recebido, ou até mesmo invertê-lo, causando perda de dados por dificultar a decisão do regenerador.

Gerar uma portadora local, precisa em fase e frequência, é uma tarefa bastante importante e necessita de um circuito em separado ao demodulador. O diagrama em blocos de um circuito gerador de portadora pode ser visualizado abaixo.



Multiplicado-se o sinal recebido pelo número de níveis do sinal MPSK (m), obtemos a mesma fase qualquer que seja a fase recebida, pois:

$$\text{Estado "1"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(4w_0t + 0^0) = E_0 \cdot \cos(4w_0t + 0^0)$$

$$\text{Estado "2"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(4w_0t + 4 \cdot 90^0) = E_0 \cdot \cos(4w_0t + 360^0)$$

$$\text{Estado "3"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(w_0t + 4 \cdot 180^0) = E_0 \cdot \cos(4w_0t + 720^0)$$

$$\text{Estado "4"} : E_{PORTADORA}(t) = E_0 \cdot \cos(w_0t + 4 \cdot 270^0) = E_0 \cdot \cos(4w_0t + 1080^0)$$

Observe que as quatro tensões possuem a mesma fase, pois todas os ângulos são múltiplos de 360° . A saída do circuito multiplicador é levada a um PLL que propicia toda a coerência necessária na demodulação. Na figura acima, o circuito PLL é composto pelo detector e pelo corretor de fase.

Quando o sistema PSK é usado com estes recursos de coerência local, chamamos o sinal de CPSK (coherent phase shift keying).

Um solução mais econômica usada quanto a estabilidade a longo prazo não é boa, o que ocorre com a maioria dos osciladores, é o sistema PSK diferencial, ou DPSK.

Ao invés de transmitir o sinal $m(t)$ modulado em fase. Codifica-se o mesmo diferencialmente usando-se um circuito de retardo. O bit $m(2)$ é comparado com o pulso anterior $m(1)$, transmitindo-se 0 quando forem iguais e 1 quando forem diferentes. Uma seqüência digital e sua codificação diferencial são mostradas abaixo:

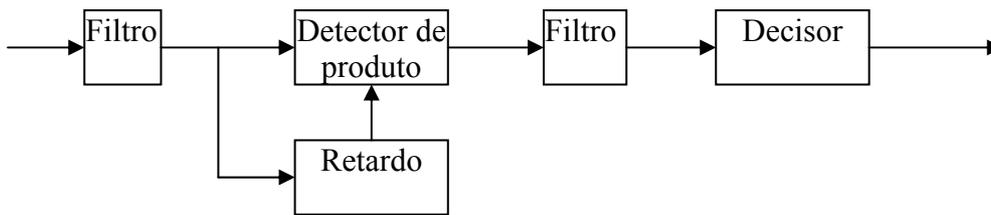
1100101011... Sinal digital

01000110010... Sinal Diferencial

O circuito de decodificação no receptor utiliza então, uma referência de fase para cada pulso, assumindo como referência o sinal do pulso anterior através de um circuito de retardo. Como a diferença de fase entre dois bits consecutivos não é significativa, o sistema se auto-ajusta permitindo a recuperação do sinal quando houver pequenas e lentas variações de fase ao longo do tempo, o que não seria possível com o CPSK.

Vamos a um exemplo: Se o receptor recebe um sinal com portadora a 0° o circuito compara este valor com o anterior que estava guardado no retardo. Se o mesmo for igual, coloca “0” na saída, caso contrário será “1”. O sinal recebido (a 0°) é também colocado no retardo e será comparado com o próximo bit.

O diagrama em blocos do receptor DPSK é mostrado abaixo:



Como podemos ver no diagrama acima, o receptor DPSK não necessita de osciladores locais. Conseguimos esta simplificação no receptor devido a uma sofisticação na codificação.

4) Co-modulação:

Vimos anteriormente que ao retirarmos a portadora de um sinal OOK, obtemos um sinal PRK. Convertia-se uma modulação em amplitude em modulação angular.