

João Baptista Bayão Ribeiro

TELECOMUNICAÇÕES

3º Volume

Parte 2

1ª Edição

Rio de Janeiro

J. B. Bayão

2012

Curriculum do Autor

João Baptista Bayão Ribeiro é formado em Engenharia de Telecomunicações pela UFF (Universidade Federal Fluminense) em 1971. Trabalhou na Philips do Brasil como Engenheiro Instalador, na Divisão de Equipamentos Científicos e Industriais e simultaneamente como professor da UFF em tempo parcial. Depois ingressou no Laboratório de Desenvolvimento da antiga Telerj, onde trabalhou em Normas Técnica de Operação e de Sistemas. É pós-graduado em Engenharia Elétrica pelo COPPE-UFRJ, onde obteve o título de MsC em 1979. Na década de 80 trabalhou no CpqD em Campinas, na especificação do projeto Trópico, como Engenheiro da Telecom, de S. Paulo. De volta à Telerj, trabalhou no Planejamento de Redes Telefônicas e de Dados. Fez inúmeros trabalhos para a antiga Telebrás, tendo participado ativamente do processo de digitalização do Sistema Telefônico no Brasil. Participou de vários Congressos e foi Professor em várias turmas de técnicos e engenheiros do SBT no Centro Nacional de Treinamento da Telebrás, em Brasília. Aposentou-se como professor em DE pela Escola de Engenharia da UFF, onde lecionou por vários anos após a privatização do Sistema Telebrás e extinção da antiga Telerj. Foi também Professor Substituto no IME, e Professor do curso à distância “Tecnologias Modernas de Telecomunicações”, promovido pelo Centro de Estudos de Pessoal (CEP) do Exército Brasileiro em convênio com a UFF.

Sumário

Na Parte 1 e Parte 2 deste Volume 3 apresentamos ao estudante de engenharia de Telecomunicações, alguns aspectos relativos a modulação em amplitude (AM), utilizada principalmente em sistemas de radiodifusão (ondas médias, ondas curtas, faixa do cidadão, rádios da polícia, militares, etc) e televisão analógica.

Palavras Chave

Modulação em amplitude, AM, portadora, banda básica, espectro, sinal modulado, largura de banda, LB, portadora suprimida, banda lateral dupla, detecção, detetor de envoltória, banda lateral vestigial, AM-SSB-IC, Super heteródino, Multiplex, FDM, Estéreo, FM Estéreo.

Direitos Autorais

Este documento é protegido por Copyright © 2010 por seu autor listado abaixo. Você pode distribuir e/ou modificar este trabalho, tanto sob os termos da Licença Pública Geral GNU (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>), versão 3 ou posterior, ou da Licença de Atribuição Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), versão 3.0 ou posterior.

Autor: João Baptista Bayão Ribeiro

Feedback: jribeiro@telecom.uff.br

Índice

Introdução.....	6
Modulação AM-DSB com Portadora Inserida.....	8
Detetor de envoltória.....	11
Índice de modulação AM.....	11
Potência das bandas laterais e da portadora.....	12
Rendimento máximo para modulação tonal:.....	13
EXERCÍCIOS - Sequência K.....	15
Moduladores para AM-DSB-IC.....	17
EXERCÍCIOS – Sequência L.....	18
Laboratório 3-3.....	20
Objetivo:.....	20
Diagrama em blocos:.....	20
Material:.....	20
Equipamento:.....	20
Montagem:.....	21
Procedimento:.....	21
Sinais SSB com Portadora Inserida (IC).....	22
EXERCÍCIOS – Sequência M.....	23
Modulação AM-VSB-SC.....	25
Filtro VSB.....	25
Modulação AM-VSB-IC.....	28
Receptor Super Heteródino.....	30
EXERCÍCIOS -Sequência N.....	32
Sistemas FDM	35
Transmissão Estereofônica em Sistemas FM	39
EXERCÍCIOS -Sequência O.....	42
Bibliografia.....	43

Introdução

Nestes Volume 3 – Parte1 e Parte 2 estudamos um processo de modulação onde a informação contida no sinal de banda básica é transportada através do meio de transmissão por um outro sinal, denominado portadora, pela variação analógica da amplitude da portadora em conformidade com a amplitude do sinal modulante (banda básica de entrada). Este processo é chamado modulação em amplitude (AM genericamente falando).

Na modulação em amplitude, existe uma relação linear entre a qualidade do sinal demodulado e a potência total do sinal modulado recebido (isto é, o sinal que chega na entrada do receptor). Assim, aumentando-se a potência do sinal modulado na entrada do receptor amplia-se linearmente a qualidade do sinal demodulado e vice-versa, uma vez que sinais modulados em amplitude atuam superpondo a amplitude relativa do sinal modulante na portadora. Por isso é também classificada como uma modulação linear.

A denominação “modulação em amplitude” é geral, cobrindo algumas variantes, que atendem aplicações específicas. Por exemplo, a transmissão radiofônica é feita com modulação em amplitude, banda lateral dupla e portadora inserida (AM-DSB-IC). Os transmissores para rádio amador e faixa do cidadão (ver site http://www.guiadoradioamador.com/faixa_do_cidadao.htm e <http://py2mok.tripod.com/diferenca-px-py.htm>) empregam a modulação em amplitude com banda lateral singela e portadora suprimida. (AM-SSB-SC).

Nesta Parte 2 veremos a modulação AM-DSB-IC, AM-SSB-IC, AM-VSB-(SC e IC), o receptor super heteródino e uma aplicação (MUX FDM na transmissão estereofônica de sinais FM).

As aplicações acima citadas correspondem ao tipo geral analógico. Nos casos acima, o sinal modulante, ou a banda básica de entrada no modulador, é um sinal analógico. A banda básica de saída também é um sinal analógico.

A modulação em amplitude pode ser digital. A modulação digital será vista em outros volumes desta série.

É desejável também o conhecimento e a possibilidade de uso de pelo menos um

dos *softwares* matemáticos, como o *Scilab* ("free" -pode ser baixado gratuitamente da Internet), *Matlab*®, *Maple*® ou *MathCad*® (esses são pagos).

Conforme Wikipedia, em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Scilab> ; "*O **Scilab** é um software científico para computação numérica semelhante ao Matlab que fornece um poderoso ambiente computacional aberto para aplicações científicas*".

Essa possibilidade irá facilitar a realização de alguns Exercícios propostos ao longo do texto.

A realização desses Exercícios, apesar de ser uma tarefa um tanto cansativa para o leitor, é uma atividade muito importante ao perfeito entendimento da matéria exposta, pois proporcionará a oportunidade para a realização de pesquisas e a fixação de conceitos relativos ao assunto em pauta. Portanto, recomendamos que não tenham pressa e tentem realizar os exercícios na sequência proposta. Alguns exercício se apresentam com respostas expostas para conferência , porém destaca-se que o mais importante é o processo empregado em sua execução, e a realização dos gráficos pedidos.

O uso de recursos informáticos para acesso à Internet também é fundamental para o estudo dos assuntos tratados no livro, pois permite a consulta de referências e fontes disseminadas pela rede, além das citadas no texto. Esses recursos podem vir na forma de um PC Desktop, Laptop, Notebook, Netbook ou Tablet.

Modulação AM-DSB com Portadora Inserida

Conforme visto até agora, a modulação em amplitude permite a uma portadora, que é de fácil propagação no meio disponível, o transporte da informação contida na banda básica (sinal modulante). O espectro da banda básica é deslocado na frequência, passando a ocupar uma nova banda.

A recuperação da banda básica original é feita na recepção redeslocando-a para a banda original, no processo de demodulação.

O problema com esse processo é a “sincronização”. O receptor tem que reconhecer a fase e a frequência da portadora sendo recebida, do contrário ocorrerão sérias distorções ao sinal demodulado. É a chamada demodulação síncrona.

Quando se trata de sistemas ponto a ponto, full-duplex, com necessidade de aproveitamento ao máximo da banda disponível para transmissão, como é o caso de sistemas FDM, usados em telefonia e em sistemas de acesso em satélites, o tipo de modulação utilizado é o AM-SSB-SC, apesar de sua complexidade, que é compensada pela economia de banda e de potência de transmissão.

Quando, porém, se trata de transmissão em “broadcasting”, unidirecional, em que existe um só transmissor para diversos receptores, como é o caso da rádio transmissão comercial em AM, é interessante adotar um sistema mais simples para a demodulação.

Neste caso, é importante tornar o receptor o mais barato possível, pois será pago pelo usuário, e o sistema como um todo é beneficiado.

Existe um tipo de demodulador, que é muito simples; ele é conhecido como detetor de envoltória. Como o nome sugere, este circuito deteta a envoltória do sinal modulado em AM. Na prática, para as aplicações onde é utilizado, é composto fisicamente por apenas 3 componentes, numa configuração passiva: um diodo, um resistor e um capacitor.

O detetor de envoltória fornece em sua saída a envoltória do sinal modulado em AM aplicado em sua entrada. Para que funcione adequadamente como demodulador, fornecendo $x(t)$, o sinal modulante, é necessário que este

corresponda sempre à envoltória do sinal modulado.

Já vimos que, na modulação AM-DSB-SC, a envoltória positiva corresponde a $|x(t)|$, conforme mostra a Figura 3-6. Para que a envoltória corresponda a $x(t)$, a Figura 3-6 precisa ser modificada. A Figura 3-55 apresenta um exemplo de sinal modulado onde a envoltória corresponde a $A+x(t)$. A é uma constante.

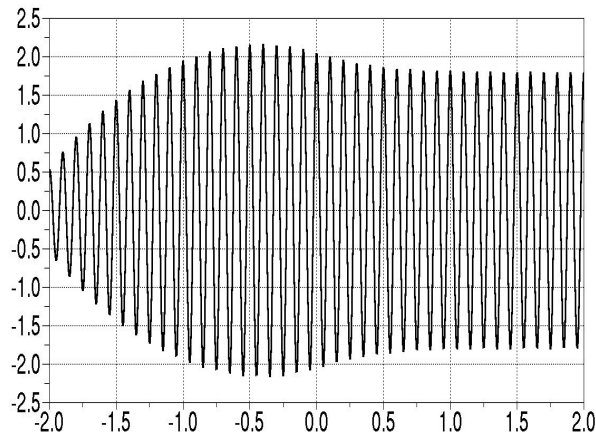


Figura 3-55

O sinal modulado da Figura 3-55 corresponde à expressão:

$$\varphi_{\text{AM-DSB-IC}}(t) = (A + x(t)) \times \cos \omega_p t \quad (3-13)$$

A condição necessária (e suficiente) para que a envoltória da Equação 3-13 seja igual a $A+x(t)$ é $A > |x(t)|_{\text{máx}}$. A Equação 3-13 pode se escrever:

$$\varphi_{\text{AM-DSB-IC}}(t) = A \cos \omega_p t + x(t) \times \cos \omega_p t$$

Esta equação mostra claramente que uma grande parcela da portadora deve ser transmitida, pois $A > |x(t)|_{\text{máx}}$. Esta parcela é inserida na transmissão. Daí a sigla IC ("Inserted Carrier"). A consequência deste fato é que uma grande parcela de potência deve ser gasta na transmissão da portadora, tornando o sistema bastante ineficiente, já que a portadora por si só é um sinal senoidal constante, e portanto não leva informação útil.

Historicamente, a modulação AM-DSB-IC foi a primeira a ser empregada na

transmissão comercial de rádio. Naquele tempo, em que o rádio estava em seus primórdios e a teoria dos semicondutores ainda não havia sido desenvolvida, sabia-se ser possível a construção experimental de receptores em que o papel do diodo era realizado por um estilete metálico pressionado contra um cristal de galena.

Mais tarde, soube-se que a ponta metálica do estilete pressionada contra o cristal formava uma junção semicondutora, realizando assim o papel do diodo. Era o receptor “galena”, que alguns de vocês já deve ter ouvido falar por alguém mais velho.

A modulação AM-DSB-IC é normalmente designada simplesmente como modulação AM, sendo empregada na radio difusão comercial, operando na faixa de 535KHz à 1605KHz (Ondas Médias - OM), com largura de banda DSB de 10KHz , num total de 107 canais a partir de 540Khz, segundo a resolução Anatel 116/99.

A transmissão em AM de radio comerciais é feita empregando-se antenas do tipo meio dipolos verticais, que transmitem de forma omnidirecional (isto é, igualmente em todas as direções) em ondas com polarização elétrica vertical que seguem a curvatura da terra. São torres verticais estaiadas com alturas de algumas dezenas de metros, dependendo da frequência particular da portadora, e geram altas potências de transmissão (podendo chegar a varias dezenas de kW).

O modo de propagação é através de ondas terrestres, que acompanham a curvatura da terra. Normalmente, o alcance geográfico é restrito a área de um município ou cidade (cerca de 100Km de raio). Por isso, não captamos no Rio de Janeiro estações AM de São Paulo, e vice-versa, mesmo que operem na mesma frequência de portadora.

A equação do AM-DSB-IC permite a seguinte indagação: porque não inserir a portadora na recepção, ao invés de fazê-lo na transmissão, transmitindo em SC, ao invés de IC? Isto economizaria bastante potência de transmissão, e aparentemente não complicaria tanto assim o receptor. Entretanto, pode-se demonstrar que este procedimento exigiria o reconhecimento da fase da portadora sendo recebida, mesmo que o receptor utilize o detetor de envoltória. Ou seja, recairíamos no problema da sincronização.

Detetor de envoltória

A Figura 3-56 apresenta o circuito de um detetor de envoltória. Conforme vemos, é um simples retificador de sinal. O diodo empregado é um elemento de baixa potência e boa resposta em alta frequência.

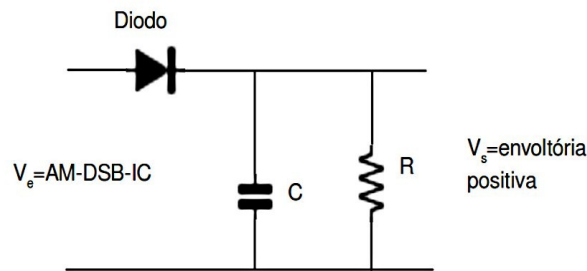


Figura 3-56

O sinal de saída do detetor de envoltória apresenta um “ripple” em alta frequência, causado pela descarga exponencial do capacitor entre picos sucessivos do sinal de entrada. Este “ripple” é geralmente eliminado pela resposta em frequência dos circuitos posteriores, que amplificam o sinal demodulado e agem como um FPB.

Índice de modulação AM

O índice de modulação AM é definido como:

$$\mu = \frac{|x(t)|_{\max}}{A} \quad (3-14)$$

sendo que $\mu \leq 1$, para que a envoltória do sinal AM-DSB-SC corresponda a $x(t)$ e o detetor de envoltória possa ser usado na demodulação.

Desta definição, conclui-se que $0 < \mu < 1$. Quanto maior o valor de μ , limitado a 1, maior a *profundidade* ou *intensidade* da modulação. Quando $\mu = 1$, estamos na intensidade máxima. Para $\mu = 0$, evidentemente, não temos modulação.

A modulação AM com portadora, devido a condição $A > |x(t)_{\max}|$, necessária para que se possa utilizar o detetor de envoltória, impõe um valor limite a $|x(t)_{\max}|$.

Para sinais $x(t)$ bem comportados, como são os sinais determinísticos (p.ex. um sinal senoidal) essa amplitude máxima é bem determinada, tendo um valor bem definido.

Para sinais de informação, que são sinais aleatórios, o valor máximo de $x(t)$ não é assim tão bem comportado.

Teoricamente, poder-se-iam ter picos de amplitude muito alta. Como se trata de sinal aleatório, existe não uma certeza da ocorrência desses picos, mas sim uma certa probabilidade de ocorrência.

Desta forma, o índice de modulação não pode ser regulado de modo a satisfazer qualquer ocorrência de picos, mas sim algum valor limite fixado em função de características do sinal aleatório.

Naturalmente, a fixação do índice de modulação precisa desta referência (ex.: para um certo sinal, o valor de 1 V corresponde a um índice de modulação de 0,8). Fica claro que sempre ocorrerão picos de sinal, que excederão a amplitude correspondente a índice de modulação = 1.

Potência das bandas laterais e da portadora

A simplicidade da detecção de envoltória tem um preço: a potência irradiada na frequência da portadora é perdida.

$$\varphi_{AM(t)} = \underbrace{A \cos \omega_p t}_{\text{Portadora}} + \underbrace{x(t) \cos \omega_p t}_{\text{Bandas Laterais - sinal útil}}$$

Assim, a potência dissipada pela portadora é igual a $A^2/2$. A potência dissipada pelas bandas laterais, que levam informação útil, é igual a $\frac{1}{2} \langle x^2(t) \rangle$.

Para que a envoltória do sinal modulado possa ser diretamente relacionada a $x(t)$, sendo detetada como $A+x(t)$ pelo detetor de envoltória, é preciso que $A > |x(t)|_{\max}$, o que leva a um relativamente grande valor de A .

Desta forma, vemos que uma grande parcela da portadora deve ser transmitida, representando um grande gasto de potência na transmissão.

Rendimento máximo para modulação tonal:

Para modulação tonal

$$x(t) = a_m \cos(\omega_m t + \theta_m) \quad (3-15)$$

O sinal modulado fica:

$$\varphi_{AM=DSB-IC} = [A + \mu A \cos(\omega_m t + \theta_m)] \cos \omega_p t \quad (3-16)$$

sendo $a_m = \mu A$ e $\mu \leq 1$

Potência do sinal útil:

$$\left\langle \frac{1}{2} x^2(t) \right\rangle$$

Potência total:

$$\frac{1}{2} A^2 + \left\langle \frac{1}{2} x^2(t) \right\rangle$$

Rendimento:

$$\eta = \frac{\left\langle x^2(t) \right\rangle}{A^2 + \left\langle x^2(t) \right\rangle} \times 100\% \quad (3-17)$$

Para a modulação tonal:

$$\left\langle x^2(t) \right\rangle = \frac{(\mu A)^2}{2}$$

Substituindo na Equação (3-17):

$$\eta_{\text{tonal}} = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2} \times 100\% \quad (3-18)$$

Como o valor máximo de $\mu = 1$, temos que:

$$\eta_{\max} = 33\% \quad (3-19)$$

para a modulação tonal (uma única frequência, ω_m).

Quando $x(t)$ é um sinal qualquer, não uma frequência única, por exemplo um sinal de voz, o rendimento é muito menor que o rendimento máximo da modulação tonal.

Isto também justifica as elevadas potências usadas nos transmissores e acopladas às antenas de transmissão das emissoras AM comerciais. A maior parte da potência jogada no ar não leva informação útil, sendo gasta apenas para a transmissão da portadora.

EXERCÍCIOS - Sequência K

K-3.1-Usando conhecimentos de eletrônica, descreva o funcionamento do detetor de envoltória. Ilustre sua explicação com gráficos dos sinais no domínio do tempo na entrada, no capacitor e na saída do detetor de envoltória. Faça aparecer a natureza não linear do circuito.

K-3.2-Discuta os efeitos da constante de tempo RC no detetor de envoltória.

K-3.3-A Figura 3-57 apresenta o espectro de densidade de potência de um sinal $\Phi_{AM-DSB-IC}$ com modulação tonal. Determine o índice de modulação.

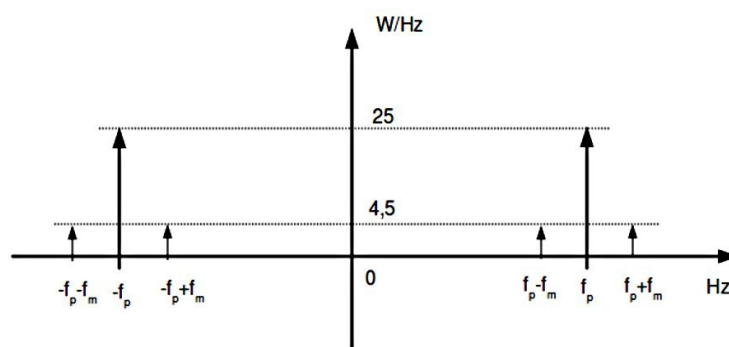


Figura 3-57

K-3.4-Supondo $x(t)=a_m\cos(\omega_mt)$, desenhe os gráficos aproximados da forma de onda e do espectro de densidade de frequência para $\mu = 0,5$ e $\mu = 1$.

K-3.5-Calcule as expressões para a envoltória e a fase de um sinal AM-DSB-IC.

K-3.6-Considere AM com modulação tonal, onde $x(t)=a_m\cos(\omega_mt)$. Obtenha uma representação fasorial para o sinal AM.

Sugestão: Considere o sinal equivalente em baixa frequência ao sinal AM.

K-3.7-Em um sistema AM o sinal modulante é dado por

$$x(t) = 0,5 u(t) - 1,5 u(t-2).$$

Esboce a forma de onda $\phi_{AM-DSB-IC}$ e indique a envoltória para $\mu = 0,5$ e $\mu = 1$. O que aconteceria se $\mu > 1$?

K-3.8-Em um sistema AM-DSB-IC, com $x(t) = a_m \cos(\omega_m t) + a_n \sin(\omega_m t)$ e um certo índice de modulação $\mu < 1$, qual a potência das bandas laterais e da portadora? Qual o rendimento da modulação? Compare com o rendimento se o índice de modulação fosse o mesmo, entretanto $x(t) = a_m \cos(\omega_m t)$.

K-3.9-Dê uma explicação para o fato de que o rendimento AM é menor para sinais de voz que para modulação tonal. Faça uma pesquisa e indique valores típicos. Apresente suas fontes.

Moduladores para AM-DSB-IC

Os moduladores para AM-DSB-IC seguem os mesmos princípios básicos que os moduladores para AM-DSB-SC.

Uma forma para realizar a modulação é implementar um modulador balanceado e acrescentar a portadora na saída do modulador.

A amplitude de portadora acrescentada pode ser regulada, de modo a possibilitar o ajuste do índice de modulação. Este esquema é bastante empregado na modulação em baixo nível, onde existe amplificação posterior do sinal modulado.

Um outro arranjo, é aquele apresentado na Figura 3-22.

Neste caso, o sinal modulante controla o ganho de um amplificador de RF, utilizado para amplificar o sinal da portadora .

Geralmente, este esquema pode ser usado na modulação em alto nível, onde a modulação é realizada já sobre a portadora amplificada, não necessitando estágio adicional de amplificação.

EXERCÍCIOS – Sequência L

L-3.1-Mostre que um sinal AM pode ser gerado a partir do circuito da Figura 3-22.

L-3.2-Mostre que um dispositivo não linear, com uma característica de transferência do tipo $v_{\text{saída}} = a_1 v_{\text{entrada}} + a_2 v_{\text{entrada}}^2$ pode ser utilizado para gerar um sinal AM. Apresente gráficos do espectro de densidade de frequência e das formas de onda no domínio do tempo em pontos significativos de seu esquema. Exemplifique para modulação tonal. Quantifique o índice de modulação em função dos parâmetros do dispositivo não linear e outros parâmetros significativos de seu circuito.

L-3.3-Mostre que um dispositivo não linear, com uma característica de chaveamento de sinal, como um diodo de silício operando em regime de grandes sinais, pode ser utilizado para gerar um sinal AM. Apresente gráficos do espectro de densidade de frequência e das formas de onda no domínio do tempo em pontos significativos de seu esquema. Exemplifique para modulação tonal. Quantifique o índice de modulação em função dos parâmetros do dispositivo não linear e outros parâmetros significativos de seu circuito.

L-3.4-Faça uma pesquisa relativa a circuitos usados para gerar um sinal modulado AM e apresente um resumo da mesma, citando suas fontes de referência.

L-3.5-Faça uma pesquisa relativa a faixas de frequência especificadas pela Anatel para serviços públicos e particulares de rádio transmissão AM, e apresente um resumo da mesma, citando suas fontes de referência.

L-3.6-Faça uma pesquisa relativa a potências de transmissão de radiotransmissores comerciais em broadcasting AM no Rio de Janeiro e grande Rio, e respectivas frequências de operação, apresentando um resumo da mesma e

respectivas referências.

L-3.7-Demonstre que a portadora deve ser inserida na transmissão, na geração de sinais AM-DSB-IC, mostrando que o esquema de reinserção de portadora no receptor para possibilitar o uso do detetor de envoltória em uma modulação AM-DSB-SC exige a sincronização, de qualquer modo.

Laboratório 3-3

Objetivo:

Comprovar na prática as características da modulação AM.

Diagrama em blocos:

Conforme a Figura 3-59.

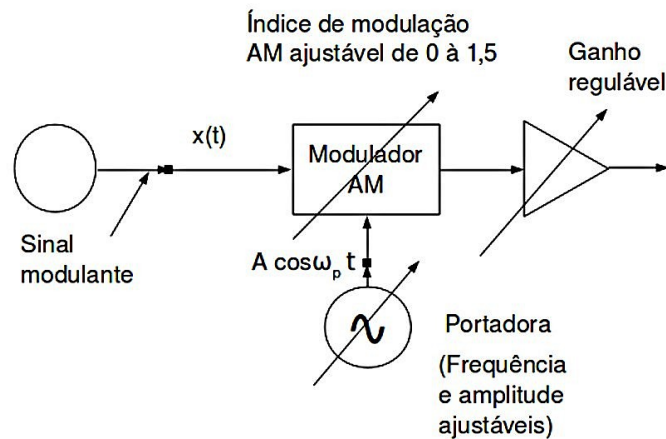


Figura 3-59

Material:

Material de eletrônica conforme especificação do circuito do modulador.

Material básico de montagem em Laboratório de Eletrônica.

Equipamento:

1 gerador de sinais capaz de gerar onda retangulares, senoidais e triangulares na bande nominal de 0Hz à 10KHz, baixa impedância de saída. Amplitude do sinal de saída ajustável na faixa de 0V à 1V.

1 gerador de RF na banda nominal de 100KHz à 10MHz, impedância de saída 75Ω , capaz de realizar modulação AM com entrada externa.

1 osciloscópio de 100MHz com 2 canais.

Montagem:

Conforme diagrama em blocos da Figura 3-59 e especificações de circuito do modulador.

Procedimento:

1-Realizar a montagem da Figura 3-59 para o circuito do modulador¹ a ser usado. O gerador de sinais deverá fornecer o sinal modulante.

2-Ajustar o gerador de RF para uma frequência compatível com o circuito do modulador utilizado. Preferencialmente, deve ser usada uma frequência na banda de RF, conforme especificado para o gerador que fornecerá a portadora. Regular a amplitude do sinal de saída para aproximadamente a metade do valor máximo.

3-Ajustar o gerador de forma de ondas para um sinal retangular, no caso uma onda quadrada, com uma fundamental de 1KHz e uma amplitude tal que o índice de modulação AM seja 0,8. Monitorar este valor observando com o osciloscópio na saída. Se preciso, reajustar a amplitude da portadora.

4-Repetir o item 3 para as formas de onda triangular e senoidal mantendo a frequência.

5-Repetir os itens 3 e 4 para índice de modulação AM igual a 1.

6-Repetir os itens 3 e 4 para índice de modulação AM igual a 1,2.

7-Para os itens 3, 4, 5 e 6 registrar a envoltória do sinal modulado, comparando com o sinal modulante

¹ O circuito do modulador pode ser oriundo de um equipamento ou instrumento de teste ou não. Em ambos os casos, deve ser detalhado e o princípio de funcionamento explicitado, sendo indicada sua referência de origem. Nada impede que seja empregado o modulador existente em algum equipamento de Laboratório (um gerador de RF, por exemplo).

Sinais SSB com Portadora Inserida (IC)

A Figura 3-60 apresenta um diagrama em blocos simplificado de um sistema SSB utilizando portadora inserida, de modo a poder usar o detetor de envoltória nos receptores para fazer a demodulação, como se fosse AM-DSB-IC. Teríamos então um sistema AM-SSB-IC.

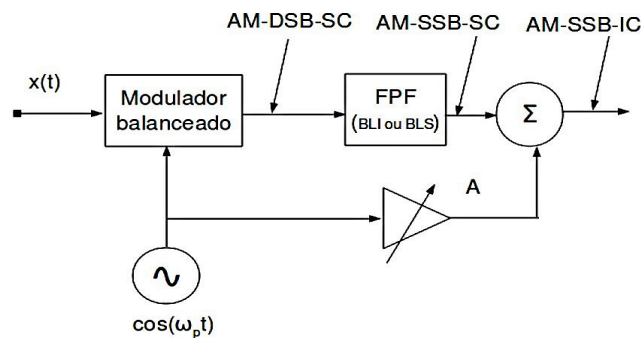


Figura 3-60

Usando resultados anteriores, a expressão para o sinal de saída no diagrama da Figura 3-60 será:

$$\varphi_{AM-SSB-IC} = A \cos(\omega_p t) + (1/2)x(t) \cos(\omega_p t) \mp (1/2)\hat{x}(t) \sin(\omega_p t)$$

Logo, neste caso, a envoltória do sinal AM-SSB-IC será

$$e(t) = \sqrt{[A + (1/2)x(t)]^2 + [(1/2)\hat{x}(t)]^2}$$

Conforme se verifica pela Equação acima, a envoltória do sinal AM-SSB-IC, de um modo geral, é bem diferente da envoltória de um sinal AM-DSB-IC (que gera $A+x(t)$).

Quando $A \gg |x(t)|_{\max}$, o índice de modulação AM $\ll 1$, e a envoltória aproxima-se de $A + 1/2 x(t)$ na equação acima.

Daí, se conclui que para AM-SSB-IC ser viável, ou, para que se possa usar o detetor de envoltória na modulação SSB, o índice de modulação AM $\ll 1$, o que ocasiona um rendimento muito baixo para este tipo de modulação.

EXERCÍCIOS – Sequência M

M-3.1-Apresente a representação fasorial de um sinal AM-DSB-IC para o caso da modulação tonal, e obtenha uma expressão para a envoltória deste sinal. Compare com a envoltória de um sinal AM-DSB-SC e de um sinal AM-SSB-SC (também para modulação tonal).

M-3.2-Apresente a representação fasorial e uma expressão para a envoltória de um sinal AM-SSB-IC para o caso de uma modulação tonal.

M-3.3-Calcule o valor do índice de modulação e respectivo rendimento da modulação para um sinal AM-SSB-IC com modulação tonal, tal que a distorção da envoltória assim obtida na saída do detetor de envoltória seja menor que 5%. Como critério de distorção use: $\% \text{ distorção} = \frac{\langle (\text{sinal-SSB} - \text{referência-DSB})^2 \rangle}{\langle \text{sinal-SSB}^2 \rangle}$. Como referência pode usar a saída de um detetor de envoltória em um sistema AM-DSB-IC sendo $\mu\text{-referência} = \mu\text{-sinal}$. Calcule também o rendimento final nestas condições para a modulação AM-SSB-IC.

M-3.4-Repita o Exercício M-3.3 para um sinal modulante $\cos 2\pi(1.000t) + \cos 2\pi 1.500(t+\pi/10)$. A frequência da portadora é $\gg 10\text{KHz}$.

M-3.5-Para o item 2 do Procedimento do Laboratório 3-3, indicar e justificar os valores obtidos para a amplitude e frequência da portadora.

M-3.6-Para o item 3 do Procedimento do Laboratório 3-3, indicar e justificar os valores obtidos para amplitude pico a pico e a forma de onda do sinal modulante. Repetir para outros valores de relação pulso/período, diferente de 0,5 [onda quadrada], P. ex., 1/3 e 1/5.

M-3.7-Modulando a portadora obtida com o sinal modulante produzido pelo gerador de sinais, apresente a forma de onda obtida na saída do modulador, apresentando o resultado obtido conforme o item 7 do Laboratório 3-3.

M-3.8-Aplique os sinais modulados obtidos conforme as especificações do Laboratório 3-3, usando todos os sinais retangulares, triangulares e senoidais como sinais modulantes a um detetor de envoltória construído conforme a Figura 3-56. De acordo com a teoria, qual seria a forma de onda obtida? O que você observa dessas formas de onda, e o que deve ser feito para obter finalmente $x(t)$ na saída do demodulador?

Modulação AM-VSB-SC

A modulação AM-VSB-SC corresponde à um compromisso entre o AM-DSB-SC e o AM-SSB-SC.

É aplicável principalmente quando o sinal modulante tem fortes componentes em baixas frequências, próximas de zero, e altas larguras de banda. Nesta situação, o SSB tem dificuldades para ser realizado, porque a separação entre a BLS e a BLI exige o emprego de filtros com corte extremamente abrupto em ω_p , muito difíceis de serem construídos.

Por outro lado, o DSB transmite desnecessariamente 2 bandas laterais, o que é redundante e dobra a largura da banda de transmissão em relação ao SSB, além de gerar larguras de banda grandes para o sinal modulado, principalmente se a largura de banda do sinal modulante é alta.

Em VSB, o corte na região em torno de ω_p é gradual, deixando vestígios de ambas as bandas laterais. Esta região de transição tem uma largura $2\beta\text{rad/s}$, conforme ilustra a Figura 3-61. Nesta figura está mostrada a característica de corte de um filtro VSB¹⁶ que transmite a BLS até a frequência máxima de $x(t)$ e um resíduo (ou vestígio) da BLI.

Filtro VSB

Além do corte gradual, no filtro $H_{\text{VSB}}(\omega)$ esta característica deve ser simétrica em relação à ω_p .

O sinal AM-VSB-SC (BLS) pode ser modelado pela equação:

$$H_{\text{VSB}}(\omega) = u(\omega - \omega_p) - H_\beta(\omega - \omega_p) + u(-\omega - \omega_p) + H_\beta(\omega + \omega_p) \quad (3-23)$$

Na Equação (3-23) a característica de transferência $H_\beta(\omega)$ deve ser como está apresentada na Figura 3-62.

¹⁶ A sigla VSB significa “Vestigial Side Band”, Banda Lateral Vestigial em português.

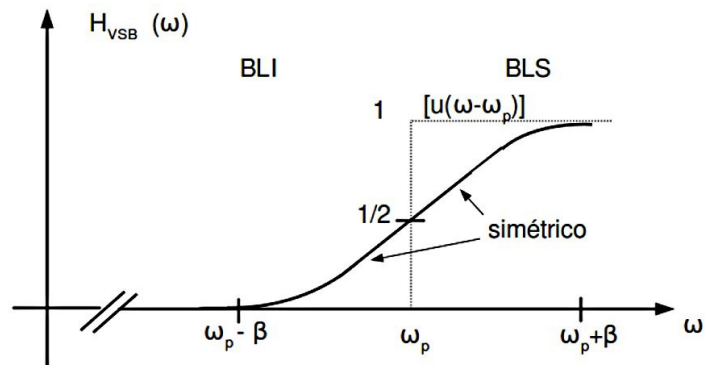


Figura 3-61

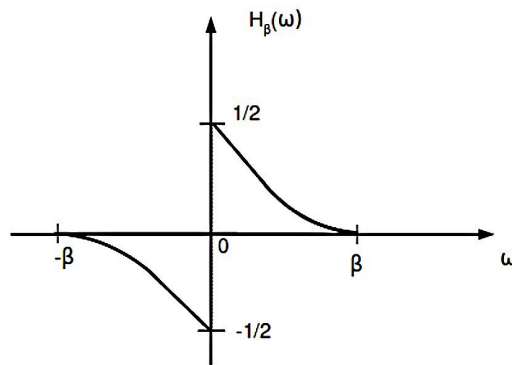


Figura 3-62

Sendo

$$H_{\beta}(\omega + \omega_p) - H_{\beta}(\omega - \omega_p) = |H_{\beta}| e^{j\theta(\omega)} * j\pi [\delta(\omega + \omega_p) - \delta(\omega - \omega_p)] \quad (3-24)$$

onde

$$\theta(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) \quad (3-25)$$

$|H_{\beta}(\omega)|$ define uma função par e positiva a partir da função de transferência da Figura 3-62, ou seja, $H_{\beta}(\omega) = H_{\beta}(-\omega)$.

Chamando $H_{2\beta}(\omega) = H_{\beta}(\omega - \omega_p) - H_{\beta}(\omega + \omega_p)$ e considerando a Equação 3-24:

$$\mathcal{F}^{-1}\{H_{2\beta}(\omega)\} = -h_{\beta}(t) \times \sin \omega_p t \quad (3-26)$$

Considerando que $H_{VSB}(\omega) = H_{SSB}(\omega) - H_{2\beta}(\omega)$, conforme a Equação 3-23, temos que:

$$\varphi_{VSB}(t) = \varphi_{SSB}(t) - [(x(t) * h_{\beta}(t)) \times \sin \omega_p t] \quad (3-27)$$

Portanto

$$\varphi_{AM-VSB-SC}^{(BLS)} = x(t) \cos \omega_p t - \hat{x}(t) \sin \omega_p t - x_{\beta}(t) \sin \omega_p t \quad (3-28)$$

Assim sendo, o sinal VSB pode ser considerado um sinal SSB do qual foi subtraída uma parcela $x_{\beta}(t) \sin(\omega_p t)$, sendo $x_{\beta}(t)$ decorrente do processamento do sinal modulante $1/2x(t)$ por um filtro $H_{\beta}(\omega)$.

Modulação AM-VSB-IC

Visando o uso do detetor de envoltória, foi desenvolvida a modulação AM-VSB-IC.

Conforme a Equação 3-28, o sinal AM-VSB-SC pode ser escrito como:

$$\varphi_{AM-VSB-SC(BLS)} = x(t) \cos \omega_p t - \hat{x}(t) \sin \omega_p t - x_\beta(t) \sin \omega_p t$$

A Equação acima pode ser escrita como:

$$\varphi_{AM-VSB-SC(BLS)} = x(t) \cos \omega_p t - \zeta(t) \sin \omega_p t \quad (2-29)$$

onde

$$\zeta(t) = \hat{x}(t) + x_\beta(t)$$

Inserindo-se a portadora temos que:

$$\varphi_{AM-VSB-IC(BLS)} = A \cos \omega_p t + x(t) \cos \omega_p t - \zeta(t) \sin \omega_p t \quad (3-30)$$

Mas

$$\mu = \frac{|x(t)|_{\max}}{A}$$

Portanto

$$\varphi_{AM-VSB-IC(BLS)} = A[1 + \mu x(t)] \cos \omega_p t - \zeta(t) \sin \omega_p t$$

Definindo-se

$$\zeta(t) = \mu \zeta'(t)$$

$$\varphi_{AM-VSB-IC(BLS)} = A[1 + \mu x(t)] \cos \omega_p t - \mu \zeta'(t) \sin \omega_p t \quad (3-31)$$

Desta forma, a envoltória do sinal acima fica:

$$e(t) = A \sqrt{[1 + \mu x(t)]^2 + [\mu \zeta'(t)]^2} \quad (3-32)$$

$\mu \zeta'(t)$ é o termo em quadratura que cancela uma das bandas laterais, no todo ou em parte.

A largura de banda do sinal VSB é inversamente proporcional ao valor de ζ' .

Se $\zeta'(t) = 0$, a Equação 3-31 reduz-se ao AM convencional, e a largura de banda é

a mesma de um sinal DSB, isto é, $B=2\omega_m$.

^

Se $\zeta'(t) = x(t)$ então temos o sinal SSB, com largura de banda $\omega_m=B/2$. Para valores intermediários, temos o VSB, com largura de banda $W= \beta+B$.

Se

$$\mu \zeta'(t) \ll 1 \quad (3-33)$$

Então

$$e(t) \approx A[1 + \mu x(t)] \quad (3-34)$$

Portanto, o detetor de envoltória pode ser usado e a distorção será pequena. Para a parcela em quadratura ser pequena, isto é, para a Equação 3-33 ser atendida, ou o índice de modulação é baixo, ou ζ' é pequeno, o que implica em aumento da largura de banda, em relação ao SSB. Desta forma, tem que haver um compromisso, o que depende da aplicação.

Para o caso da TV analógica, os sinais de vídeo são transmitidos em VSB-IC, e se utiliza $\beta \approx 0,3$ de ω_m .

Receptor Super Heteródino

Conforme se encontra na Wikipedia, site <http://pt.wikipedia.org/wiki/Super-heteródino>, "O receptor **super-heteródino** foi criado por Edwin Howard Armstrong com o objetivo de reduzir os problemas do receptor AM-DSB padrão, no caso o receptor de Rádio-Frequência Sintonizada. O problema maior do tipo radiofrequência sintonizada era o fato da seletividade variar ao longo da faixa."

O esquema do receptor super heteródino básico está apresentado na Figura 3-63.

Ele é assim chamado porque a palavra heteródino significa batimento, e o batimento entre duas frequências significa conversão de frequências.

Na verdade, este esquema pode ser aplicado a qualquer tipo de sinal modulado, não apenas AM. Qualquer sinal de RF, possuindo uma banda básica, pode ser submetido a um esquema semelhante.

No esquema super heteródino o oscilador local, que gera uma frequência f_{LO} , é variável em uma faixa, e a saída do conversor ou misturador é ligada a um FPF centrado numa frequência fixa, denominada frequência intermediária, ou FI.

Considerando o misturador e sua f_{LO} , existem duas bandas de frequência que podem ser captadas pelo receptor, centradas nominalmente em $f_{LO} \pm FI$.

Suponha que a banda desejada na recepção seja $f_{LO} - FI$. A banda centrada em $f_{LO} + FI$ será também captada pelo receptor, e convertida para a FI, constituindo uma interferência.

A frequência central desta banda indesejada é chamada frequência imagem.

Geralmente, para reduzir a interferência da frequência imagem, costuma-se usar um FPF, também sintonizado em $f_{LO} - FI$, logo na entrada do receptor, que pode inclusive estar acoplado a um pré-amplificador de RF sintonizável..

A vantagem desta esquema é que a FI é fixa para todas as estações, tanto no valor central quanto na LB, facilitando assim o projeto de amplificadores de alto ganho para o sinal e boa seletividade em toda a faixa (ver http://en.wikipedia.org/wiki/Intermediate_frequency).

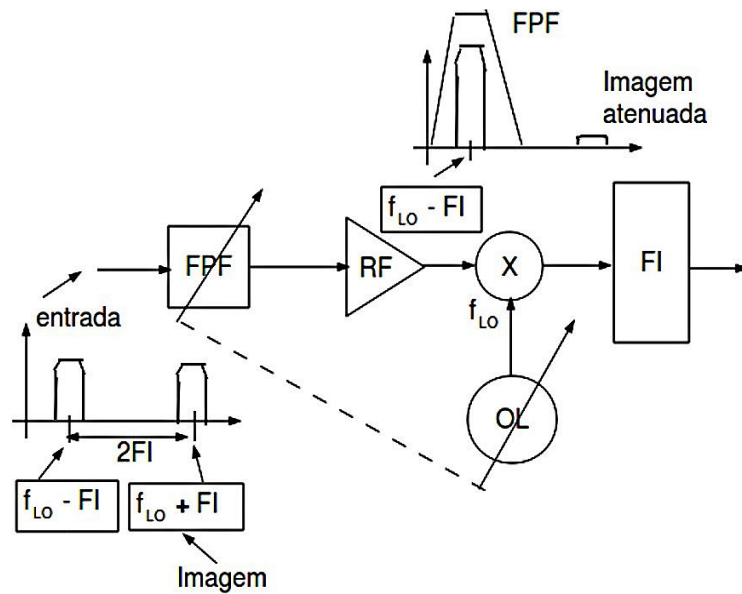


Figura 3-63

Como a diferença entre a frequência desejada e a frequência imagem é $2FI$, o FPF de entrada no receptor não precisa ter características de largura de banda e de curvas de corte muito rígidas, bastando que sua frequência central seja variável acompanhando $f_{LO} - FI$, tenha uma largura de banda razoável, porém apresente uma boa rejeição na frequência imagem.

A largura de banda do receptor e respectiva capacidade de sintonia será dada pelos filtros de FI. Além disso, o ganho do receptor é fornecido, em sua maior parte, por amplificadores sintonizados em FPF fixos na FI.

Após os amplificadores sintonizados na FI, o sinal pode ser demodulado ou novamente convertido para outra frequência, conforme a aplicação.

EXERCÍCIOS -Sequência N

N-3.1-Com auxílio de gráficos de funções de transferência, demonstre a Equação 3-23.

N-3.2-Faça um gráfico da função de transferência, similar ao da Figura 3-61, aplicável a um sinal AM-VSB-SC para a BLI.

N-3.3-Escreva uma equação, similar à Equação 3-23, aplicável a um sinal AM-VSB-SC para a BLI.

N-3.4-Com auxílio de gráficos de funções de transferência, demonstre a Equação 3-24 e Equação 3-25. Em particular, faça gráficos de $|H_{\beta}(\omega)|$, $\theta(\omega)$ e $H_{2\beta}(\omega)$.

N-3.5-Demonstre que a característica de corte do filtro VSB-SC deve ser simétrico em relação a ω_p , conforme mostra a Figura 3-61.

N-3.6-Demonstre a Equação 3-28. Utilize gráficos do espectro de frequências de sinais, funções de transferência e diagrama em blocos de sistemas.

N-3.7-Repita o desenvolvimento de Equação 3-28 para a BLI.

N-3.8-Justifique a Equação 3-32.

N-3.9-Considere uma modulação AM-VSB-IC, onde $A=1V$, $x(t)=0,1\cos(\omega_1 t) + 0,2\cos(\omega_2 t)$, onde $\omega_1=0,8\beta$ e $\omega_2=1,5\beta$. $\beta=0,2\omega_{\max}$. Calcule o índice de modulação AM e escreva a Equação 3-31 neste caso. Suponha que o filtro VSB $H_{\beta}(\omega)$ tenha a característica de módulo como mostrado na Figura 3-64. Trace o gráfico da envoltória do sinal VSB comparando com a envoltória se a modulação empregada

fosse AM-DSB-IC e o AM-SSB IC. Contemple pelo menos dois períodos de $x(t)$. Trace também o gráfico do espectro de densidade de frequência dos sinais AM-DSB-IC, AM-SSB-SC e AM-VSB-IC, determinando a largura de banda de cada um em função de ω_m .

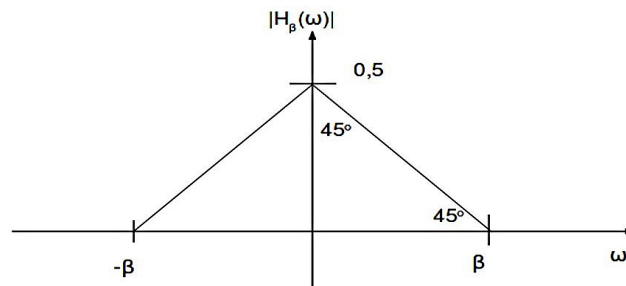


Figura 3-64

N-3.10-Faça uma pesquisa sobre aplicações do VSB, incluindo VSB-IC. Inclua aplicações práticas, inclusive em transmissão de TV. Apresente valores de parâmetros de transmissão. Apresente também um resumo da pesquisa, indicando as fontes de referência usadas.

N-3.11-Apresente uma discussão das vantagens de se utilizar o esquema do receptor super heteródino na sua parte de RF. Foque no aspecto da FI e suas consequências práticas.

N-3.12-Demonstre que o receptor super heteródino pode ser utilizado independentemente do tipo de modulação sendo aplicado ao sinal.

N-3.13-Faça uma pesquisa mostrando outros esquemas de receptores existentes além do super heteródino, apresentando suas vantagens e desvantagens relativas. Apresente suas fontes de consulta.

N-3.14-Faça uma pesquisa sobre diversas aplicações do receptor super heteródino em sistemas de comunicações, apontando principalmente para a aplicação e os valores de banda básica e FI utilizados. Apresente suas fontes de pesquisas.

N-3.15-Um receptor comercial padrão de operando na faixa de OM – Ondas Medias (500kHz a 1500kHz) utiliza o esquema super heteródino na sua parte de RF. Sabe-se que $f_{LO}-FI$ = frequência da estação, sendo $FI=455kHz$. Faça uma pesquisa e verifique o valor normalmente utilizado para atenuação de rejeição de frequência imagem. Indique suas referências.

Sistemas FDM

FDM é a sigla correspondente a “Frequency Division Multiplex” em português *Multiplexação por Divisão de Frequência*. O conceito de Multiplexação já foi estabelecido no Volume1-1 como introdução e consequência da utilização de sistemas modulados de um modo geral. No Volume 3 – Parte-1 e Parte-2, estamos tratando de sistemas modulados analogicamente em amplitude.

Uma vez que a modulação em amplitude resulta em um deslocamento na frequência do espectro do sinal de banda base, o qual é movido para regiões próximas à frequência da portadora, este fato pode ser aproveitado para a realização prática de sistemas FDM, onde a separação da informação dos diversos canais é conseguida alocando-se uma portadora diferente para cada canal.

A Figura 3-65 apresenta uma ilustração que facilita a visualização dessa ideia.

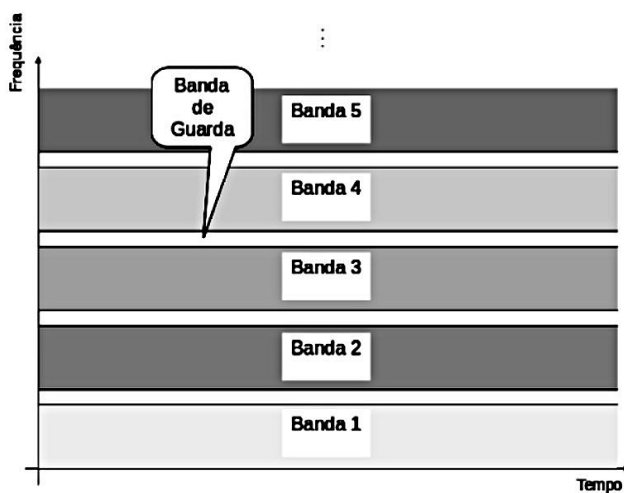


Figura 3-65

Na Figura 3-65, cada canal se traduz em uma banda que ocupa uma faixa definida de frequências do espectro. Esta faixa corresponde ao deslocamento da Banda Básica de cada canal, em função do valor de portadora utilizada na modulação de cada canal.

No meio de transmissão, os canais assim multiplexados são simultaneamente

transmitidos, ocupando uma banda total de $N \times (\text{Banda de cada canal} + \text{banda de guarda})$, sendo N o número de canais multiplexados). No receptor cada canal pode ser separado por filtragem.

Assim, diz-se que os canais estão misturados no domínio do tempo, mas separados na frequência.

A modulação empregada no deslocamento da banda básica pode ser de qualquer tipo, até uma modulação digital, não necessariamente uma modulação analógica em amplitude, conforme as estudadas nos dois Volumes 3 (Parte-1 e Parte-2).

A Figura 3-65 representa a ideia de sistemas FDM em sua forma mais básica. Pode-se dizer que *recursos de comunicação* (RC) do sistema são postos a disposição do usuário (um canal, por exemplo). Como um RC tem um custo, é importante prover métodos para que haja o *compartilhamento* desses RC pelos usuários do sistema.

Em se tratando de sistemas comerciais pode-se falar, de um modo geral, em multiusuários.

Considerando que um usuário produz uma determinada receita ao utilizar um sistema de comunicações, enviando ou recebendo algum tipo de informação, é claro que uma empresa operando determinado sistema, com finalidades comerciais², ou seja, com a finalidade de obter lucro financeiro na operação do sistema, irá sempre buscar a operação com o maior número possível de usuários, de modo a maximizar seus lucros operacionais.

Frequentemente o motivo acima mencionado é razão de desenvolvimentos e pesquisas, objetivando o aperfeiçoamento dos sistemas, de tal forma que mais usuários possam utilizar serviços de telecomunicações oriundos de um sistema.

Geralmente, busca-se aumentar a base de usuários de um sistema, ao mesmo tempo em que são incorporadas melhorias ao serviço. Essas melhorias podem ser buscadas em um sentido horizontal, isto é, mantendo a tecnologia usada, ou em um sentido vertical, mudando essa tecnologia.

Esta mudança pode ser no sentido de aproveitar tecnologias existentes ou criar

² Um operador de um sistema de comunicações pode, também, ter outras finalidades. Por exemplo, pode ser militar, da polícia ou mesmo particular. Neste caso, sua principal motivação não seria o lucro financeiro, apesar do custo global do sistema ser um fator importante, que deve ser considerado.

novas tecnologias. O foco é sempre no custo financeiro.

Assim, a ideia do FDM não é a única hoje existente. Mas compreende-se sua aplicação em aumentar os RC de um sistema. É fácil ver que o número de canais pode ser aumentado ampliando-se a banda total ou reduzindo-se a banda individual ocupada por cada canal.

Se a modulação empregada for uma modulação analógica em amplitude, para a geração de um sistema FDM, razões inerentes à banda básica de entrada em um canal (ou seja, relativa ao sinal modulante) pode influenciar na escolha do tipo de modulação AM empregada.

Por exemplo, se este sinal modulante não contiver energia significativa em frequências muito baixas, uma escolha adequada seria o AM-SSB-SC, caso se justificasse a complexidade resultante desta técnica.

A separação entre bandas é feita deixando-se um espaço vazio de frequência entre elas, chamado Banda de Guarda, conforme mostrado na Figura 3-65. Esta Banda de Guarda tem a função de facilitar a construção de filtros separadores dos canais individuais, já que cada canal ocupa uma faixa de frequências diferente, que não se sobrepõe em espectro.

Esta técnica pode ser usada na implementação de um equipamento denominado MUX FDM, com o objetivo de aumentar os RC disponíveis. Eles foram muito utilizados até a década de 60 do século passado, no sistema de telecomunicações que constituía a rede³ telefônica (o serviço telefônico não é o único a trafegar por essa rede – inclusive fala-se muito em convergência das redes-uma só rede para diversos serviços).

Na época (anos 60 do século XX) a rede telefônica era a maior rede implantada (a nível mundial), e era inteiramente baseada em “backbones”⁴ de transmissão construídos com base em equipamentos MUX FDM (esses equipamentos forneciam até 900 canais de usuários telefônicos em um único meio de transmissão, cada canal

3 O conceito de rede é bem amplo, envolvendo enlaces e nós de comunicação. Normalmente, tem-se a topologia da rede, bem como sua aplicação, os serviços envolvidos e outros. Vários influem diretamente no RC da rede. Geralmente, os enlaces estão relacionados a recursos de transmissão, como os MUX's, transmissores e receptores e os nós a recursos de comutação e encaminhamento. Neste livro, estamos focando principalmente em técnicas usadas para a transmissão analógica de sinais. São, portanto, técnicas diretamente aplicáveis a partes de enlaces de uma rede.

4 Esta palavra, “backbone”, que em português significa *espinha dorsal*, refere-se aos RC principais de uma rede, responsáveis pelo transporte de informação de usuários em maior concentração de sinais.

tendo uma largura de banda nominal de 4KHz e utilizando modulação AM-SSB-SC, hierarquizados em estruturas de multiplexação FDM padronizadas, transmitindo sobre enlaces de rádio de micro-ondas, enlaces satélites, cabos coaxiais ou cabos metálicos telefônicos).

Hoje em dia os equipamentos MUX FDM são obsoletos, não sendo mais usados, tendo sido substituídos por outros utilizando tecnologias, principalmente digitais, mais adequadas a novos meios de transmissão, como os cabos de fibras óticas.

Entretanto, a tecnologia FDM continua válida, sendo empregada em diversas situações, inclusive em sistemas digitais, como em técnicas de Múltiplo Acesso, que serão estudadas em outros Volumes desta série.

Uma aplicação simples, que será vista agora, é na constituição de codificadores e decodificadores para a transmissão estereofônica em sistemas FM⁵.

5 A modulação FM será ainda estudada, provavelmente no Volume 4, mas isso não impede que seja visto agora o processo de multiplexação empregado na transmissão estereofônica de sinais modulados em FM.

Transmissão Estereofônica em Sistemas FM

Um exemplo de aplicação de sistema multiplexado na frequência e usando modulação AM-DSB-SC, está na implementação da transmissão estereofônica de canais de áudio, em sistemas de transmissão de rádio FM em “broadcasting”⁶

A técnica de transmissão em FM será estudada na Parte 4, entretanto isto não impede que se compreenda a formação da banda básica, ou seja, o sinal útil que irá constituir o sinal modulante.

A Figura 3-66 apresenta o sistema de transmissão como se fosse uma *caixa preta* em relação ao sinal modulante de banda básica, com uma entrada (lado de transmissão, isto é, nas instalações físicas do transmissor) e uma saída (lado de recepção, isto é, no aparelho radio receptor do usuário, após o circuito de demodulação). O sinal modulante é injetado na entrada e retirado na saída da caixa preta, mantendo a banda básica que foi gerada no transmissor.

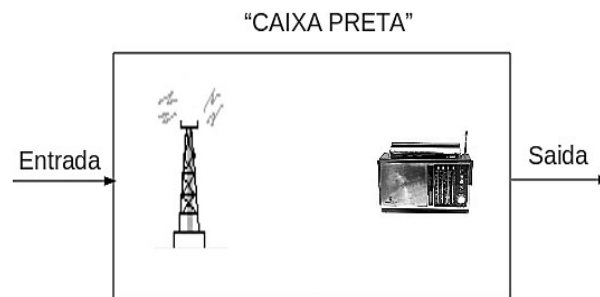


Figura 3-66

A transmissão estereofônica de sinais de áudio tem por finalidade proporcionar ao ouvinte a impressão da distribuição espacial dos sons. São transmitidos

⁶ A transmissão de rádio em “broadcasting” significa que temos apenas uma estação de transmissão (onde se localiza fisicamente o transmissor e a antena) enviando sinal para muitos receptores de rádio. Cada receptor representa um *usuário*. Geograficamente, os usuários estão espalhados ao redor da antena, numa distribuição aleatória. A antena então transmite o sinal da estação de forma *omnidirecional*, isto é, com a mesma intensidade para todas as direções.

simultaneamente dois sinais, gerados por dois microfones: o esquerdo (L) e o direito (R). No receptor, eles são enviados a dois conjuntos de sistemas de reprodução sonora, também chamados esquerdo (L) e direito (R).

A transmissão estereofônica exige, portanto, 2 canais. No início, quando a radiodifusão utilizando FM começou a ser utilizada em escala comercial no mundo todo, a transmissão era monofônica. Nos EUA, o sistema estereofônico proposto pelas corporações GTE e ZENITH foi aprovado pelo FCC em abril de 1961 e utilizado pela 1ª vez na América Latina pela estação 98 FM, de Belo Horizonte, Minas Gerais, que iniciou operação comercial em junho de 1969.

Um dos requisitos básicos para a transmissão estéreo em FM é que ela fosse compatível com a transmissão monofônica (1 só canal de áudio), que já estava sendo utilizada desde então. A razão para esta compatibilidade é que a base comercial dos receptores monofônicos já era muito grande para ser desprezada (isto é, não era viável comercialmente que usuários de sistemas monofônicos fossem repentinamente obrigados a trocar seus aparelhos por outros, mais caros, estereofônicos, para ouvir uma estação estéreo).

Além disso, durante certo tempo, a venda de aparelhos exclusivamente monofônicos ainda iria subsistir no mercado por algum tempo. Isto realmente ocorreu nos EUA, onde o sistema FM foi inventado pelo Eng.º Major Armstrong em 1939, e teve as primeiras estações FM.

Hoje em dia, a transmissão FM é realizada exclusivamente em estéreo por qualquer estação, e a recepção monofônica pode ser opcionalmente utilizada nos receptores (normalmente, existe uma chave comutadora, podendo o usuário escolher se quer uma recepção em estéreo ou mono).

Para garantir a compatibilidade, os canais L e R são inicialmente codificados nos sinais (L+R) e (L-R), sendo estes sinais subsequentemente multiplexados em FDM, gerando a banda básica do sinal modulante, conforme a ideia apresentada na Figura 3-67.

Para recuperar a informação estereofônica original, após a demultiplexação os sinais (L+R) e (L-R) devem ser decodificados, tornando a gerar L e R. Para a recepção monofônica, é suficiente a informação contida no sinal (L+R).

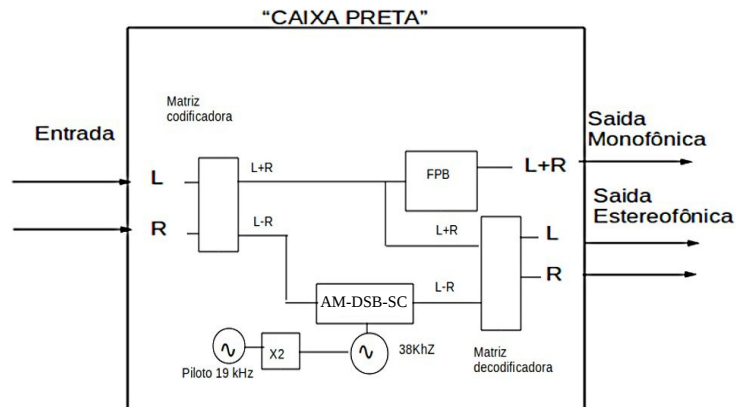


Figura 3-67

Conforme apresentado na Figura 3-67, a multiplexação utilizada pode ser considerada um FDM, sendo que a banda ocupada pela informação (L+R) é mantida inalterada, na faixa de 30Hz à 15kHz, e o canal (L-R) deslocado por uma modulação AM-DSB SC para a faixa de 23 à 53 kHz, com uma portadora de 38kHz. Assim, são geradas duas bandas laterais com o sinal (L-R), centradas em 38kHz, no sinal modulado FM.

Na recepção, uma matriz decodificadora reconstroi os dois canais L e R. A compatibilidade com a emissão monofônica é garantida, pois a recepção nesse caso se dará através de uma filtragem Passa Baixas do canal L+R, o qual não sofre modulação alguma. O canal L-R é modulado em AM-DSB-SC com uma portadora em 38 KHz, e assim transmitido.

Para recuperação da informação no canal modulado L-R, este é demodulado e reconvertido para a sua posição original no espectro, por um esquema de demodulação síncrona utilizando o piloto de 19KHz.

EXERCÍCIOS -Sequência O

O-3.1-Para o canal (L-R), na transmissão estereofônica FM , qual a faixa de frequências ocupada pela BLS da modulação AM-DSB-SC empregada no MUX FDM da Figura 3-67? Justifique sua resposta.

R: BLS: de 38kHz a 53kHz

O-3.2-Faça uma pesquisa e apresente uma justificativa para a utilização e frequência de 19kHz do piloto do MUX da Figura 3-67. Apresente suas fontes de pesquisa.

O-3.3-Faça uma pesquisa e apresente uma justificativa para a utilização da modulação AM-DSB-SC na constituição do 2º canal utilizado para transmissão da informação (L-R). Apresente suas fontes de consulta.

O-3.4-Faça uma pesquisa e apresente diagramas em blocos de circuitos que podem ser utilizados para gerar os sinais (L+R) e (L-R) a partir dos sinais L e R (matriz codificadora), e a recuperação dos sinais L e R a partir de (L+R) e (L-R) (matriz decodificadora). Apresente suas fontes de consulta.

O-3.5-Apresente uma justificativa para o uso da informação contida no canal (L+R) na transmissão do FM estereofônico. Apresente suas fontes de consulta.

O-3.6-Elabore o diagrama em blocos da Figura 3-7, separando-o em 2 partes: a que fica localizada no transmissor, que gera o sinal modulado enviado ao ar pela antena transmissora, e a parte localizada nos aparelhos radio receptores. Explique a função de cada bloco.

Bibliografia

1-Autor: A.B. CARLSON

Título: Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication

Editoria: McGraw-Hill, 1968

2-Autor: S. HAYKIN

Título: An Introduction to Analog and Digital Communications

Editoria: John Wiley and Sons, 1989

3-Autor: S. HAYKIN

Título: Communication Systems Third Edition

Editoria: John Wiley & Sons, 1994

Outros livros de interesse:

Proakis & Salhe (Ing. de sist. de com. em geral);

B. P. Lathi (Telecommunication Systems);

Clark Hess (circuitos eletrônicos para realizar modulação).