

UMA MALHA DE RECUPERAÇÃO DE PORTADORA PARA IMPLEMENTAÇÃO
EM MODEMS PSK DE ALTA VELOCIDADE COM O
RECURSO DE TECNOLOGIA DIGITAL

Leon Lonneux

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq
C.P. 515 - 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

A utilização de malhas convencionais de recuperação de portadora em modems implementados através de técnicas digitais, é dificultada pelo volume de processamento que elas necessitam. Uma solução alternativa na qual as componentes de banda base usadas para a detecção do erro de fase são subamostradas já foi abordada anteriormente. Porém, testes práticos com esta malha de recuperação de portadora experimental revelaram dificuldades significativas quanto à obtenção de um desempenho satisfatório do ponto de vista da estabilidade absoluta e relativa. Este trabalho mostra como a inserção de um elemento apropriadamente selecionado na malha fechada pode contribuir significativamente para a estabilidade do sistema. Neste caso, elementos auxiliares são necessários para tornar eficiente o desempenho do sistema quando em regime estático, bem como para obter uma resposta transitória relativamente rápida. Resultados obtidos a partir da implementação física do modelo através de técnicas digitais são apresentados.

ABSTRACT

The use of conventional carrier recovery closed loops, in modems implemented through digital techniques, is made difficult by the volume of signal processing that they require. An alternative solution in which the baseband components used for detecting the phase error are under-sampled was already presented. But, practical tests with this experimental carrier recovery closed loop revealed significant difficulties in order to obtain a satisfactory overall system performance. The purpose of this work is to show how the insertion of a properly selected element in the closed loop can contribute significantly to the system stability. In this case, auxiliary elements are necessary to provide an efficient system performance, when in steady state, while obtaining a relatively fast transient response. Results obtained with the physical implementation of the model supported by digital techniques are presented.

1. INTRODUÇÃO

Os modems são utilizados como parte integrante dos circuitos de transmissão de dados.

Geralmente, estes circuitos utilizam-se de linhas telefônicas como meio de transmissão através do qual é realizada a transferência de informação entre os terminais remotos, por exemplo, de um sistema de teleprocessamento. Devido às características das linhas telefônicas, os modems de alta velocidade operam no modo síncrono. Neste caso, muitos receptores usam o princípio de detecção coerente no qual há a necessidade de regenerar uma portadora local não-modulada com frequência e fase desejavelmente iguais à frequência e à fase da portadora do modulador.

Este objetivo pode ser alcançado de diversas maneiras, uma delas consiste em gerar uma portadora local de frequência próxima à do modulador e processar as componentes demoduladas de banda base, de forma a determinar a polaridade e o valor do erro de fase. Deslocando a fase da portadora local no sentido contrário ao do erro, este tende a diminuir. Trata-se, portanto, de um sistema realimentado.⁽¹⁾

O processo de correção deve se dar de forma automática, rápida e estável, devendo o sistema também possuir uma certa imunidade ao ruído. Este processo não pode também apresentar erro estático substancial, de forma a observar com certa precisão a simetria das regiões de decisão do decodificador.

Como o sistema de recuperação da portadora tem um efeito direto sobre a validade dos dados recebidos e sobre a sua taxa de erros, na recepção, é fundamental que ele apresente bom desempenho.

2. O SISTEMA ORIGINAL

Normalmente existem várias alternativas para implementar uma malha de recuperação de portadora em que a detecção de erro é feita através do processamento das componentes de banda base demoduladas. Citando-as, tem-se o "I-Q Loop", o "I-Q-Loop" tipo polaridade, o "Costas Loop" convencional e o "Costas Loop" tipo polaridade. Estas implementações de malha fechada são motivadas pela teoria da estimação do erro de fase máximo a posteriori (Map

Estimation Theory). ⁽²⁾ Porém, em todas elas, os sinais de banda base devem ser reconstituídos na íntegra para que possam receber o processamento adequado ao tipo de malha escolhido.

No caso de uma modulação do tipo BPSK, por exemplo, em que se escolhe o "Costas Loop" convencional, os sinais de banda base são multiplicados entre si. Este produto, devidamente filtrado, é usado para controlar o VCO (Oscilador Controlado por Tensão).

Para um sistema multifase, este processamento torna-se mais complexo a medida que cresce o número de fases. ⁽²⁾

A reconstituição, na íntegra, das componentes de banda base constitui um sério obstáculo quando a implementação de um receptor deste tipo é feita através de técnicas digitais de processamento de sinais por microprocessador, em vista do tempo de processamento em tempo real exigido ser restrito.

O sistema proposto neste artigo é uma solução alternativa que possibilita a redução drástica do número de manipulações aritméticas fazendo com que um único processador seja apto, não somente para a recuperação da portadora, mas também para a incumbência de todas as tarefas essenciais do receptor (aquisição de dados, demodulação propriamente dita, recuperação do sincronismo, equalização, decodificação, etc.).

3. O SISTEMA MODIFICADO

Numa modulação dos tipos PSK, DPSK, MPSK ou MDPSK, o sinal de sincronismo que determina o instante de amostragem de banda base pode ser extraído do sinal modulado (processamento do seu envelope, por exemplo). ⁽³⁾ Neste caso, o demodulador pode prescindir dos cálculos de todas as amostras de banda base com excessão daquela que coincide com o instante de amostragem; uma vez que esta é a amostra que contém a informação a ser decodificada.

Uma amostra por intervalo de transmissão (período do sinal de sincronismo) é suficiente para recuperar a portadora mediante o uso de um algoritmo de detecção de erro apropriado, desde que o oscilador de precisão não tenha desvio de frequência significativo em relação à frequência da portadora do modulador. ⁽⁴⁾

Esta condição pode ser satisfeita com relativa facilidade na transmissão de dados por canal telefônico.

No caso de um modem de 4800 bits/seg. (8PSK), o desvio máximo de frequência da portadora do modulador permitido pela CCITT é da ordem de 0,05%, ou seja, a frequência da portadora é de $1800 \pm 1\text{Hz}$.⁽⁴⁾

De certa forma, a preocupação neste tipo de aplicação é a de recuperar a fase da portadora sem haver compromisso nenhum com a frequência.

Com efeito, os pequenos desvios de frequência serão vistos como um erro de fase residual máximo da ordem de $\pm 0,4$ graus.

Como visto na Figura 1, a malha é constituída por um oscilador de precisão, dois multiplicadores, dois filtros de amoldamento F1 e F2, dois circuitos amostradores-seguradores, um circuito de detecção de erro, um filtro de malha F3 e um elemento de ganho K. ⁽¹⁾

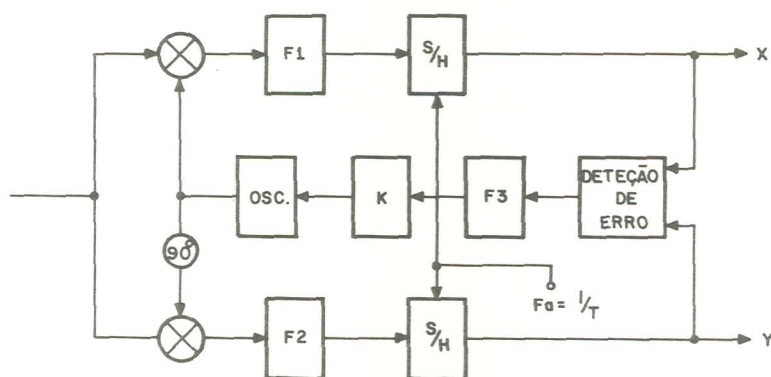


Fig. 1 - Malha de recuperação de portadora.

Nos testes efetuados, este sistema mostrou-se altamente propenso à instabilidade absoluta e relativa, mesmo com valores de ganho K não muito grandes. Com valores de ganho pequenos, o sistema é estável, mas o erro estático decorrente é inaceitável para esta aplicação.

De fato, neste caso, entre a precisão e a estabilidade não existe compromisso satisfatório que pudesse ter sido obtido. O ajuste de ganho por si só não pode prover alterações suficientes no comportamento do sistema, de forma a satisfazer as especificações desejadas. Para tanto, foi necessário re projetar o sistema (modificar a estrutura ou incorporar componentes adicionais) de forma a alterá-lo como um todo.

Quando o elemento inserido na malha é linear, permitindo corrigir as deficiências originais do sistema, diz-se que o sistema foi compensado.⁽⁵⁾ Qualquer especulação em torno de uma presumível compensação requer um modelo matemático do sistema para que se possa compensá-lo de forma conveniente.

Devido às características dos elementos que normalmente compõem um sistema deste tipo, a formulação do seu modelo matemático pode tornar-se bastante complexa e trabalhosa.

Além disso, os sistemas lineares, muitas vezes, são inferiores do ponto de vista de economia, espaço, peso e confiabilidade aos sistemas não-lineares adequadamente projetados para executar a mesma tarefa.⁽⁵⁾

Este fato é na maioria dos casos um fator decisivo quanto à escolha dos métodos empregados para atingir o índice de desempenho solicitado.

4. RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Ao se reapresentar o sistema da Figura 1, pode-se obter o modelo clássico da Figura 2, onde G é a função de transferência do sistema visto como um todo.

A solução aqui apresentada para melhorar o sistema consiste em introduzir um elemento não-linear do tipo liga-desliga, com zona morta; um integrador; um módulo de lógica e um dispositivo para reconduzir o integrador a uma condição inicial nula.

A configuração resultante é apresentada na Figura 3.

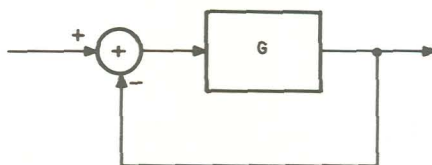


Fig. 2 - Sistema de controle de malha fechada.

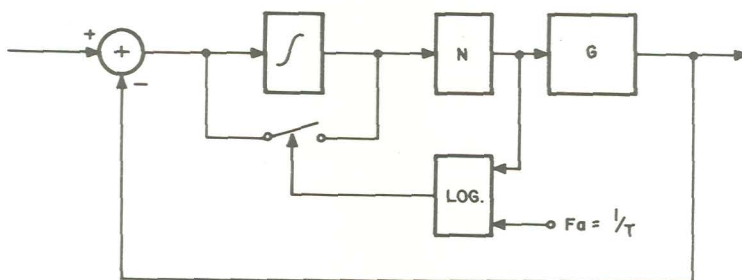


Fig. 3 - Configuração do sistema de realimentação.

A função descritiva de elemento não-linear escolhido é dado por:

$$N = \frac{4M}{\pi X} \sqrt{1 - \left[\frac{\Delta}{X}\right]^2},$$

onde:

M é a amplitude do sinal de saída quando o elemento é ativado;

X é a amplitude do sinal de entrada;

Δ caracteriza a extensão da zona morta. O lugar dos pontos $-1/N$ é visto na Figura 4. ⁽⁵⁾

A função $-1/N$ apresenta um máximo para $X = 2\Delta$ e este máximo é igual a $-\pi\Delta/2M$.

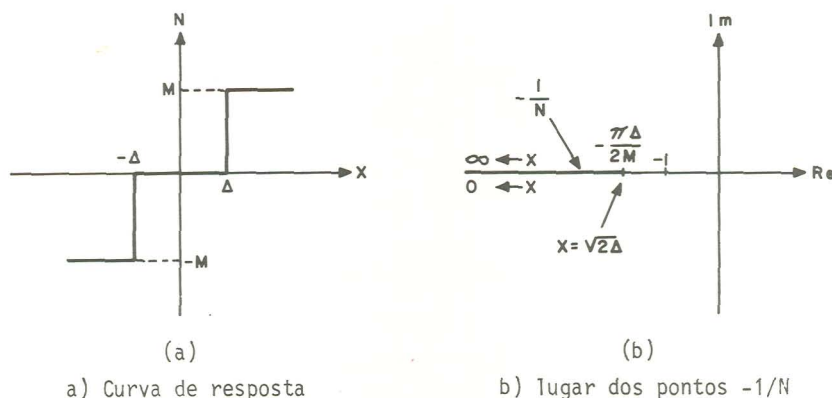


Fig. 4 - Característica do elemento liga-desliga com zona morta.

A inserção do elemento não-linear faz com que, do ponto de vista da estabilidade, a equação característica do sistema seja $1 + NG(j\omega) = 0$, ao invés de $1 + G(j\omega) = 0$.⁽⁵⁾

Esta formulação é perfeitamente válida, visto que as harmônicas de frequências altas são fortemente atenuadas pelo sistema $G(j\omega)$ que, como a maioria dos sistemas de controle, é um filtro passa-baixas. Por exemplo a análise dos filtros de amoldamento F1 e F2 de um Modem PSK de 4800 bits por segundo confirma este fato. ^(4, 6)

Estes são passa baixas que apresentam uma atenuação superior a 36 dB por oitava na faixa de transição, se forem respeitadas as recomendações da CCITT.

Portanto, os filtros têm uma ordem superior a seis e as frequências superiores à frequência de corte, que porventura existissem, são rejeitadas pelo sistema.

Portanto, ao manipular os parâmetros Δ e M , de forma que não haja intersecção entre os lugares dos pontos $-1/N$ e $G(j\omega)$, é possível estabilizar o sistema. ⁽⁵⁾

Em contrapartida, a introdução de um elemento com zona morta prejudica a precisão do sistema, ou seja, em regime estático, erros pequenos

inferiores ao limiar não são corrigidos. Torna-se, então, necessário o integrador depois do detetor de erro. Desta forma, um erro pequeno é continuamente integrado, fazendo com que a sua amplitude atinja um valor suficiente (Δ), para que possa ser detetado.

Quanto ao módulo de lógica e a chave, eles podem acelerar a resposta do sistema quando este é estimulado por perturbações.

Com efeito, se tais elementos não fossem introduzidos, o regime transitório poderia ter uma duração excessiva, pois a saída do integrador não voltaria a cruzar o limiar, enquanto o erro não mudasse de polaridade.

Assim, o sistema poderia apresentar uma saída oscilatória, com coeficiente de amortecimento muito baixo.

O módulo de lógica faz com que o integrador seja reconduzido a uma condição inicial nula, quando há coincidência entre a saída ativa do elemento não-linear e a subida do sinal de sincronismo responsável pela amostragem. Tem-se, neste novo sistema, diversas variáveis que permitem otimizar a sua resposta (K , Δ , M , e a constante de integração CI).

É aconselhável, no entanto, optar por valores de M não muito grandes porque são responsáveis pelas oscilações residuais no regime estático. Também é interessante notar que o integrador age como filtro de ruídos. A rejeição de ruídos torna-se melhor à medida que cresce o período de integração.

A Figura 5 representa um diagrama de rejeição de ruídos em função da relação entre o período de integração e o inverso da frequência do ruído.⁽⁷⁾

É justamente no fim do regime transitório, portanto já no regime estático, que o período de integração é maior. Este fato se apresenta como uma vantagem adicional, visto que é nesses instantes que a relação sinal de erro versus ruído é menor, fazendo com que o ruído seja bem filtrado.

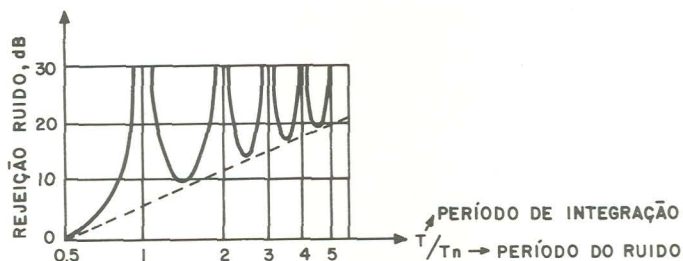


Fig. 5 - Rejeição de ruído.

4. CONCLUSÃO

Esta malha de recuperação de portadora foi implementada digitalmente em um modem de 4800 bits/segundo e apresentou resultados expressivos sob todos os aspectos, isto é, estabilidades absoluta e relativa, erro estático e rejeição de ruído. A Figura 6 mostra a resposta do sistema a um degrau unitário.

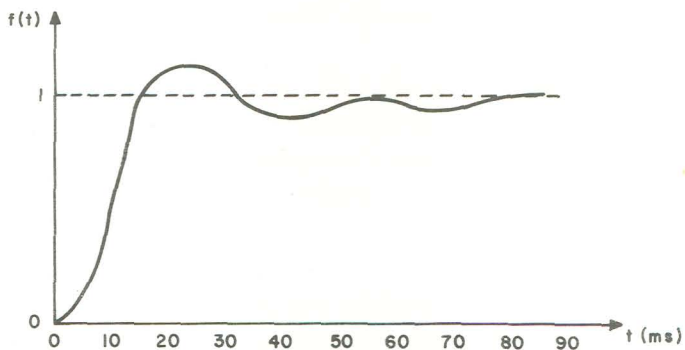


Fig. 6 - Curva de resposta a um degrau unitário.

Este resultado foi obtido atribuindo valores experimentais aos diversos parâmetros ($\Delta = 0.25$, $M = 0.008$, $K = 1$, $CI = 0.99 \times 10^{-6}$ s).

Os critérios usados para esse fim foram o valor máximo do erro residual e o tempo de resposta que deve ser compatível com a utilização da sequência de treinamento padronizada pela CCITT. ⁽⁴⁾

Para obter o desempenho máximo, é desejável que haja alterações dinâmicas do parâmetro M em coincidência com os trechos específicos da sequência de treinamento.

Este resultado contrasta com o mesmo obtido com o sistema representado na Figura 1 no qual nenhuma compensação experimental mostrou-se satisfatória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LONNEUX, L.; MAMMOLI, M.; BERGAMINI, E.W. Sistema de recuperação de portadora para aplicação em modems com processamento digital utilizando modulação dos Tipos PSK ou DPSK. *Ciência e Cultura*, v. 28, n. 7 (Suplemento), jul. 1981. Resumo da 33ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), realizado em Salvador, 8-15 jul. 1981.
2. SIMON, M.K. Optimum receiver structures for phase-multiplexed modulations. *IEEE Transactions on Communications*, COM-26(6):865-881, June 1978,
3. MURANO, K.; UNAGAMI, S.; TSUDA, T. LSI Processor for Digital Processing and its Applications to 4800 bit/s. modem. *IEEE Transactions on Communications*, COM-26(5):499-506, May 1978.
4. ITU CCITT. *4800 bits per second modem standardized for use on leased circuit*. Geneve, 1972. (Série V-27 Recommendation).
5. OGATA, K. Modern control engineering. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1970.
6. BENNETT, W.R.; DAVEY, J.R. *Data transmission*. New York, McGraw-Hill, 1965.
7. ZUCH, E.L. *Principles of data acquisition and conversion*.