

TP 547- Princípios de Simulação de Sistemas de Comunicação

Prof. Samuel Baraldi Mafra



Análise de sistemas com componentes/funções não lineares

Referências para estudo:

- William Tranter, K. Shanmugan, Theodore Rappaport, and Kurt Kosbar. 2003. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications (First ed.). Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Michel C. Jeruchim, Philip Balaban, K. Sam Shanmugan. 2003. Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques (Second ed.). Springer Science & Business Media, 2000

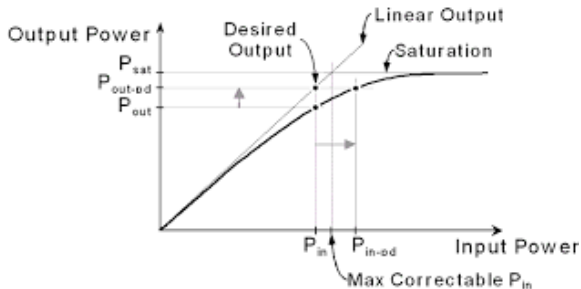
Existem muitos blocos funcionais em sistemas de comunicação cujo objetivo ou o comportamento desejado é linear, mas os dispositivos físicos usados para implementar as funções podem produzir efeitos não lineares em certas faixas de operação

Exemplos de componentes/funções não lineares:

- Amplificadores de potência;
- Mixers;
- Limitadores;
- Fibras ópticas;
- Detectores de cruzamento de nível;
- Extração de parte inteira ou fracionária;
- Funções de mapeamento tipo look-up-table;
- Funções max e min;
- Quantização;
- Amostragem com retenção.

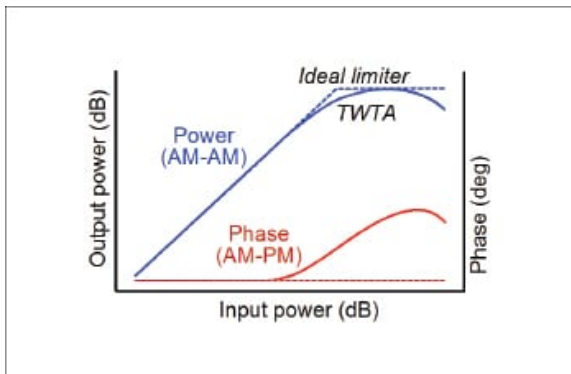
A não linearidade é responsável pela introdução de componentes de sinal que contribuem para degradar o desempenho do sistema de maneira semelhante ao ruído do sistema, interferência ou deficiências do canal.

Amplificadores de potência



- Normalmente é desejável operar o PA próximo à sua região de saturação para obter a máxima eficiência energética;
- Entretanto, isso significa que uma distorção não linear é introduzida na saída do PA, o que é indesejável, especialmente quando o sinal de entrada tem uma amplitude variável.

Distorções AM-AM/AM-PM



Distorção AM-AM

- A distorção AM-AM é a diferença entre a tensão de alimentação e o envelope da tensão de saída de RF.
- Essa diferença é causada por uma relação não linear entre a tensão de alimentação e o envelope do sinal de saída de RF.
- Em outras palavras, a tensão de alimentação do estágio do driver PA será mantida alta para garantir a natureza de comutação do amplificador.

Distorção AM-PM

- A fase do sinal de saída se desvia da fase de entrada por um ângulo que depende da potência do sinal de entrada.
- A distorção AM-PM é uma modulação de fase indesejada da portadora de saída de RF devido às características dos transistores implementados.
- A mudança na fase de saída para um incremento de 1 dB na varredura de potência aplicada à entrada do amplificador (ou seja, no ponto de compressão de ganho de 1 dB). É expresso em graus por dB.
- Um amplificador ideal não teria interação entre sua resposta de fase e o nível de potência do sinal de entrada.

- A análise matemática dos efeitos das não linearidades é, em geral, muito difícil;

$$y(t) = x(t) - 0.2x^3(t) \quad (1)$$

- Em muitos casos não é possível calcular a distribuição da saída $y(t)$ dada a distribuição da entrada $x(t)$.
- Usando a simulação, no entanto, é muito fácil gerar valores amostrados da entrada $x(kTs)$ e, em seguida, gerar valores amostrados da saída $y(kTs)$.

As não linearidades em sistemas de comunicação podem ser banda base ou em banda passante. Por exemplo, um limitador é um exemplo de não linearidade de banda base, enquanto um amplificador de radiofrequência (RF) é uma não linearidade em banda passante.

- Outra classificação de não linearidade é baseada em se a não linearidade é, ou não, sem memória.
- A saída de uma não linearidade sem memória no tempo t dependerá apenas do valor instantâneo da entrada no tempo t ;
- Enquanto uma não linearidade com memória irá gerar uma saída no tempo t que é uma função do presente e do passado valores da entrada.

Modelos de análises:

- Modelos de blocos;
- Modelos analíticos;
- Modelos baseados em equações diferenciais.

Taxa de amostragem

- O primeiro fator que devemos considerar é a taxa de amostragem. Para um sistema linear, normalmente definimos a taxa de amostragem em 8 a 16 vezes a largura de banda do sinal de entrada. No caso de uma não linearidade da forma

$$y(t) = x(t) - 0.2x^3(t). \quad (2)$$

onde a entrada $x(t)$ é um sinal determinístico de energia finita, a transformação $Y(f)$ da saída $y(t)$ será dada por

$$Y(f) = X(f) - 0.2X(f) \circledast X(f) \circledast X(f). \quad (3)$$

A convolução tripla levará a um aumento de três vezes na largura de banda de $Y(f)$ sobre a largura de banda de $X(f)$.

- A taxa de amostragem deve ser definida com base na largura de banda de $y(t)$, que possui largura de banda muito maior do que $x(t)$.

- As não linearidades nem sempre aumentam a largura de banda. Na verdade, eles podem aumentar, diminuir ou deixar inalterada a largura de banda de um sinal de entrada.

Não linearidades em banda base

- A entrada para uma não linearidade de banda base é um sinal de valor real $x(t)$ e sua saída também é um sinal de valor real, $y(t)$. A não linearidade é modelada como $y(t) = F(x(t))$;
- Modelo de série de potência:

$$y(t) = \sum_{k=0}^N a_k * x_k^k(t) \quad (4)$$

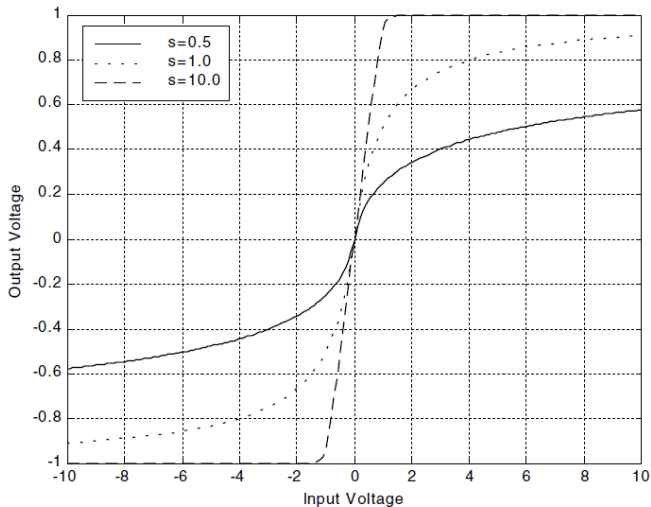
- Em uma aplicação prática, os coeficientes seriam obtidos ajustando um polinômio de grau N a uma característica medida.
- Pode ser que, para obter um bom ajuste, seja necessário um grande valor de N , o que reduziria a eficiência de tal modelo. Uma alternativa, neste caso, pode ser tentar um ajuste usando um tipo diferente de função de ajuste.
- Frequentemente, o modelo mais eficiente e preciso é usar os próprios dados experimentais brutos em uma look-up-table, usando a interpolação apropriada entre os pontos de dados tabulados

Modelar a não linearidade na forma de um limitador:

$$y(t) = \frac{M \operatorname{sgn}(x(t))}{[1 + (m/|x(t)|)^s]^{1/s}}$$

onde M é o valor limite da saída, m é o valor limite da entrada, e s é o parâmetro de "forma"

Modelar a não linearidade na forma de um limitador:



- Para a simulação dos modelos são gerados valores de amostra de $x(t)$, processados e gerados valores para as amostras de $y(t)$.

$$y(t) = \sum_{k=0}^N a_k * x_k^k(t) \quad (5)$$

- Para muitos sistemas não lineares, os coeficientes diminuem com k . Assim, a contribuição de para a energia de $y(t)$ torna-se relativamente menor para os maiores valores de k .
- Consequentemente, o erro de aliasing neste componente sozinho faria uma contribuição comparativamente menor para o erro geral.

- Em segundo lugar, a magnitude do espectro de não é uniformemente distribuída em kB . De fato, à medida que k aumenta, geralmente podemos esperar que o espectro de se concentre cada vez mais em torno da frequência zero e diminua mais rapidamente em direção ao valor zero perto da borda da banda.
- Em banda base não nos preocupamos com o efeito da escolha da taxa de amostragem.

Modelo em banda passante

- Modelos em banda passante sem memória são usados para caracterizar uma variedade de dispositivos não lineares encontrados em sistemas de comunicação.
- A palavra sem memória implica não apenas em uma relação instantânea entre a entrada e a saída, mas também implica que o dispositivo não exibe um comportamento seletivo em frequência na largura de banda de operação.
- A largura de banda do dispositivo não linear e a largura de banda do sinal são ambas consideradas muito menores do que f_c , onde f_c é a frequência da portadora.

- Quando a largura de banda se torna mais ampla, a não linearidade pode exibir comportamento seletivo em frequência e usamos modelos seletivos em frequência apropriados para tais dispositivos.
- Modelos com memória.

Vamos nos concentrar nas não linearidades em banda passante sem memória.

- Considere:

$$y(t) = x(t) - 0.2x^3(t), \quad (6)$$

onde $x(t)$ é um um sinal em banda passante:

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] \quad (7)$$

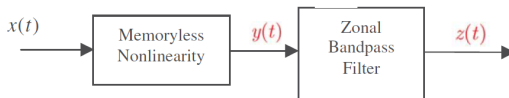
Substituindo a equação (7) em (6), temos:

$$\begin{aligned}y(t) &= A(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] - 0.2\{A(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)]\}^3 \\&= A(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] - \frac{0.2}{4}A^3(t)\{\cos[6\pi f_c t + 3\phi(t)] + 3\cos[2\pi f_c t + \phi(t)]\} \\&= [A(t) - \frac{0.6}{4}A^3(t)] \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] - \frac{0.2}{4}A^3(t) \cos[6\pi f_c t + 3\phi(t)]\end{aligned}$$

- Na equação anterior, o primeiro termo está no centro ou na frequência da portadora f_c e o último termo está no terceiro harmônico da frequência da portadora $3f_c$.
- A largura de banda do terceiro harmônico será da ordem de $3B$. Desde nossa suposição é que $f_c \gg B$, o segundo termo estará fora da largura de banda de interesse.

Podemos aproximar a saída da primeira zona da não linearidade como:

$$z(t) \approx \left[A(t) - \frac{0.6A^3(t)}{4} \right] \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] \quad (8)$$



Amplificadores em banda passante sem memória

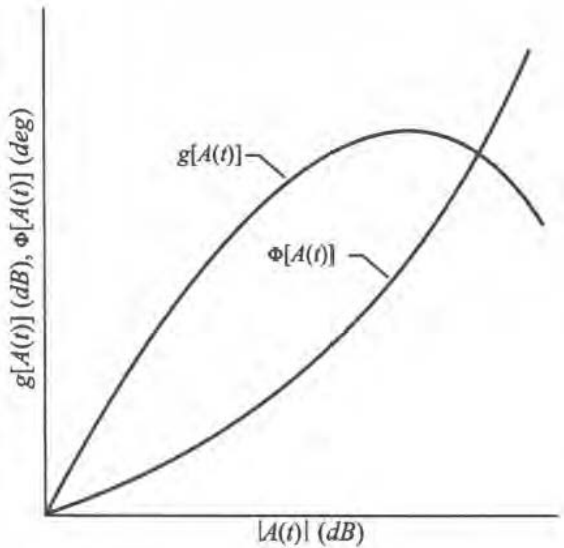
Sinal de entrada $x(t)$

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

Sinal amplificado $y(t)$

$$y(t) = g(A) \cos[2\pi f_c t + \theta + \Phi(A)]$$

- $g(A)$ é convencionalmente referido como a característica AM / AM
- A função de fase $\Phi(A)$ (geralmente) não linear é chamada de característica AM / PM, e também conhecido como conversão AM / PM



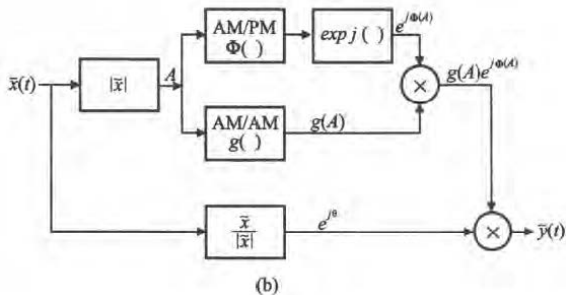
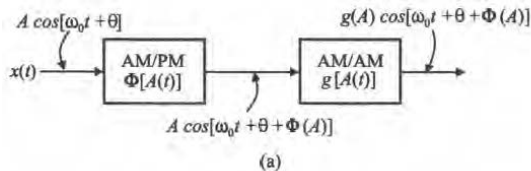
- Estendendo para o caso em que a amplitude e fase podem variar com o tempo.
- Modelo realístico de amplificadores de potência;
- A largura de banda em questão é relativamente pequena em comparação com a largura de banda inerente do dispositivo

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \theta(t)]$$

$$y(t) = g[A(t)] \cos\{2\pi f_c t + \theta(t) + \Phi[A(t)]\}$$

Este modelo tem sido usado há muito tempo em análise e simulação, mas começa a falhar quando a largura de banda do sinal de entrada torna-se grande o suficiente. É quando precisamos considerar o uso de um modelo com memória.

Simulação



As funções $G(A)$ e $\Phi(A)$ podem ser determinadas pelo modelo de Saleh como:

$$g(A) = \frac{\alpha_g A}{1 + \beta_g A^2}$$

$$\Phi(A) = \frac{\alpha_\Phi A^2}{1 + \beta_\Phi A^2}$$

Os coeficientes são obtidos através de ajustes com resultados experimentais através do método dos mínimos quadrados.

Através de transformações trigonométricas é possível escrever a saída $y(t)$ como

$$y(t) = S_p(t) \cos[2\pi f_c t + \theta(t)] - S_q(t) \sin[2\pi f_c t + \theta(t)]$$

onde:

$$S_p(t) = g[A(t)] \cos \Phi[A(t)]$$

$$S_q(t) = g[A(t)] \sin \Phi[A(t)]$$

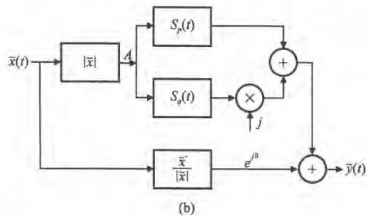
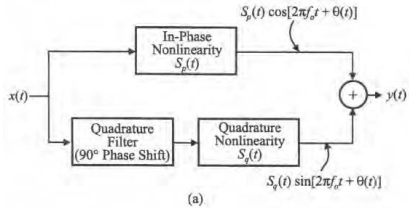
As funções podem ser determinadas pelo método de Saleh como:

$$S_p(A) = \frac{\alpha_p A}{1 + \beta_p A^2}$$

$$S_q(A) = \frac{\alpha_q A^3}{(1 + \beta_q A^2)^2}$$

Os coeficientes são obtidos através de ajustes com resultados experimentais através do método dos mínimos quadrados.

Simulação

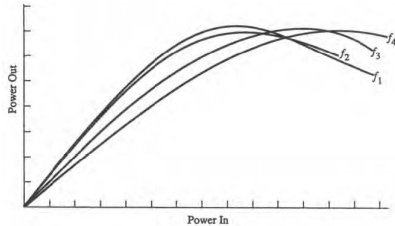


Modelagem e Simulação de não linearidades com memória

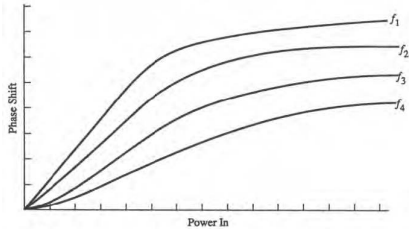
- Se a saída de um dispositivo não linear depende dos valores presentes e passados do sinal de entrada, o dispositivo é classificado como não linear com memória. Memória ou dependência em valores de entrada anteriores, é modelado em sistemas lineares pela resposta ao impulso e a convolução integral no domínio do tempo.
- Sistemas lineares são modelados em o domínio da frequência pela função de transferência, o que implica que a resposta do sistema de estado estacionário senoidal é dependente da frequência de entrada. Assim, memória e comportamento seletivo em frequência são sinônimos.

Modelagem e Simulação de não linearidades com memória

- Muitos dispositivos não lineares, como amplificadores de banda larga, exibem comportamento de seleção em frequência.
- Tal comportamento ficará evidente quando a resposta do dispositivo for medida em diferentes níveis de potência e em diferentes frequências. Se a relação entrada-saída não depende da frequência do tom usado nas medições, o dispositivo não tem memória.
- Caso contrário, o dispositivo exibe um comportamento seletivo de frequência e portanto tem memória.

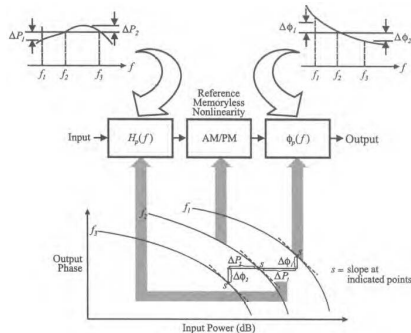
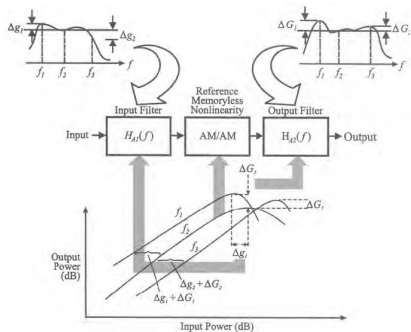


(a)



(b)

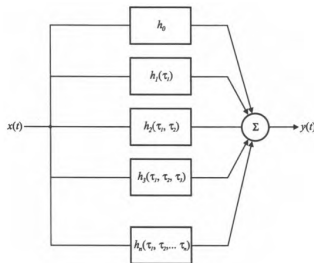
Método de ajuste de curvas: Modelo Poza-Sarkozy-Berger



Método analítico: Séries de Volterra

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n(t)$$

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) x(t - \tau_1) \cdots x(t - \tau_n) d\tau_1 \cdots d\tau_n$$



Quando o sistema não possui memória, a serie de Volterra converge na serie de Taylor.

Trabalho final parte II

- Escolher um artigo (congresso ou revista) relacionado ao seguintes temas:
 - Amostragem e quantização;
 - Comunicação em banda base;
 - Comunicação em banda passante;
 - Modulações digitais.
- Fazer um resumo do artigo;
- Fazer uma análise crítica;
 - O artigo está bem escrito;
 - O artigo apresenta uma contribuição relevante;
 - Os equacionamentos são bem explicados;
 - O autor demonstra a contribuição nos resultados.
- Reproduzir alguns resultados do artigo (não precisa ser por simulação);
- Prazo: 23/05/2024
- Usar os mesmos grupos do trabalho anterior.
- Este trabalho faz parte da segunda parcela da nota final (70%);
- Fazer um relatório em formato Word;
- Não serão aceitas entregas fora do prazo.