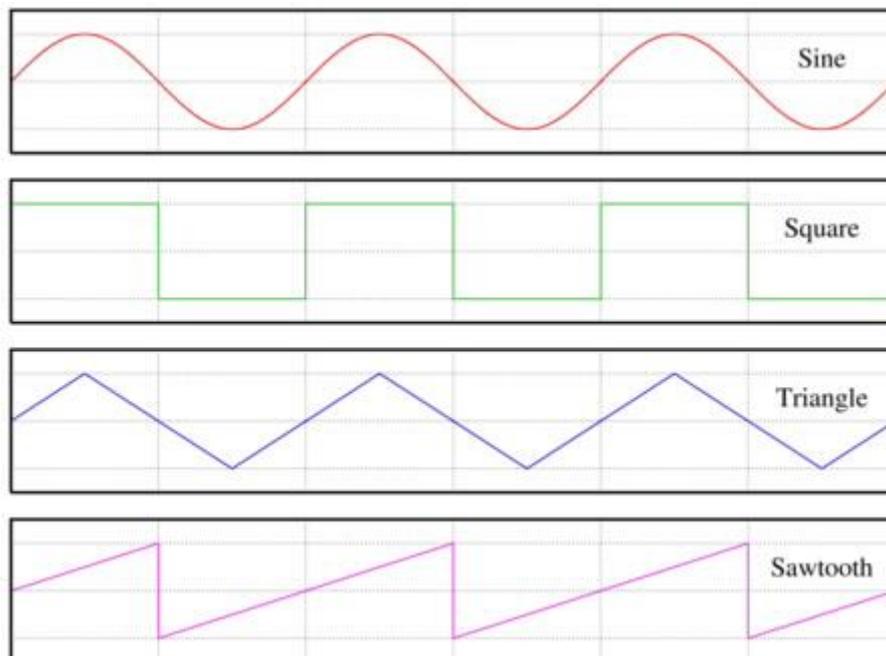


Forma de onda

Forma de onda é a representação gráfica da forma com que uma onda evolui ao longo do tempo. Normalmente os fenômenos ondulatórios, tais como o som ou ondas eletromagnéticas obedecem a funções matemáticas periódicas. Para cada função, a evolução da amplitude da onda ao longo do tempo é diferente e define uma forma de onda diferente. Esta característica das ondas é importante principalmente para a determinação do timbre de um som ou para aplicações de modulação.

🔍 Formas de onda básicas

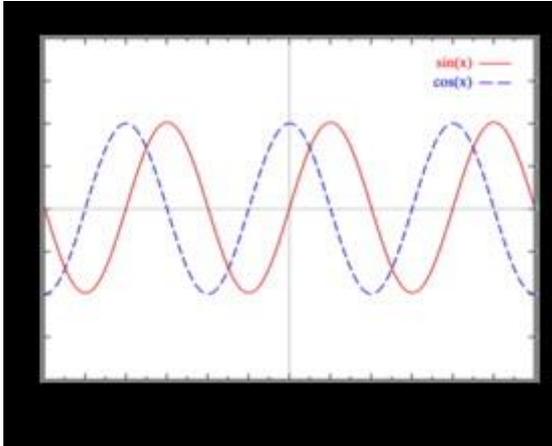


A partir do topo, onda senoidal, quadrada, triangular e dente de serra

1.1 Onda senoidal

A onda senoidal ou sinusoidal obedece a uma função seno ou cosseno e é a forma de onda mais simples. Todas as outras formas de onda, mesmo as mais complexas, podem ser decompostas em conjuntos de ondas senoidais através da aplicação das séries de Fourier. Por essa razão as ondas senoidais possuem dezenas de aplicações. Podem ser usadas na síntese musical como elemento básico da síntese aditiva. Em eletrônica, é a forma de onda utilizada como onda portadora na maior parte das modulações de rádio.

1.1.1 Senóide



Uma senóide ou onda seno (sinusóide ou onda sinusoidal, em Portugal) é uma forma de onda cujo gráfico é idêntico ao da função seno generalizada.

$$y = A \sin(kx - \omega t - \varphi) + D$$

Onde:

- A é a amplitude
- k é o número de onda
- ω é a frequência angular
- φ é a mudança de fase
- D é o offset vertical (comumente chamado de offset CC).

O número da onda é relacionado à frequência angular por

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Onde:

- λ é o comprimento de onda
- f é a frequência
- c é a velocidade de propagação.

A imagem desta onda ocorre naturalmente na natureza, como podemos observar nas ondas do mar, do som e da luz.

Uma onda co-seno também é considerada sinusoidal, visto que ela possui o mesmo formato porém está defasada com relação à onda seno no eixo horizontal:

$$\cos\left(x - \frac{\pi}{2}\right) = \sin x$$

Qualquer forma de onda não-sinusoidal, tais como as ondas quadradas, ou mesmo os sons irregulares produzidos pela fala humana, são um conjunto de ondas sinusoidais de diferentes períodos e frequências juntas. A técnica para se transformar uma forma de onda complexa em suas componentes sinusoidais é chamada de transformada de Fourier.

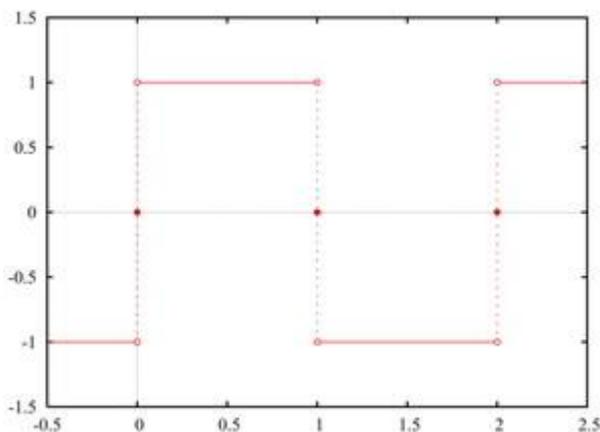
O ouvido humano pode reconhecer ondas seno simples pois elas soam "limpas" e "claras" para nós, alguns sons que se assemelham a uma onda seno são o som do diapasão e a vibração de um vidro de crystal ao se passar um dedo molhado sobre seu gargalo.

Para o ouvido humano, um som que é constituído por mais de uma onda seno terá uma aparência "barulhenta" ou possuirá harmônicas detectáveis.

1.2 - Onda quadrada

Também chamada de trem de pulsos Forma de onda caracterizada pela alternância entre um estado de amplitude nula e outro estado de amplitude máxima, sendo que cada um destes estados tem duração igual. Quando o tempo em um dos estados é maior do que no outro, chamamos esta onda de onda retangular ou pulso. Este tipo de onda é utilizado sobretudo para a modulação por largura de pulso - PWM. Também pode ser usada como elemento básico da síntese subtrativa em sintetizadores analógicos. Em informática as ondas quadradas, retangulares ou trens de pulso são utilizadas para a transmissão serial de informações em redes de computadores.

Onda quadrada



Uma onda quadrada é uma forma de onda básica encontrada frequentemente nas áreas da eletrônica e do processamento de sinais. Uma onda quadrada ideal alterna regularmente e instantaneamente entre os dois níveis, que podem ou não incluir o zero.

As ondas quadradas são universalmente encontradas nos circuitos de chaveamento digitais e são naturalmente encontradas em dispositivos lógicos de dois níveis. Elas são utilizadas como referências de tempo em "sinais de clock (relógio)", devido a suas transições rápidas serem aplicáveis para o trigger de circuitos de lógica síncrona em intervalos de tempo precisos. Entretanto, as ondas quadradas contêm uma grande faixa de harmônicas, e estas podem gerar radiação eletromagnética ou pulsos de corrente que podem interferir em circuitos próximos, causando ruídos ou erros. Para evitar este problemas em circuitos muito sensíveis tais como conversores analógico-digitais de precisão, as senóides são utilizadas como referência de tempo ao invés das ondas quadradas.

Em termos musicais, elas são comumente descritas como contendo um som oco, e são utilizadas como base para sons de instrumentos de sopro criados através da síntese subtrativa

1.2.1 Análise da onda quadrada

Em contraste com a onda dente de serra, a qual contém todas as harmônicas inteiras, a onda quadrada contém apenas as harmônicas inteiras ímpares.

Utilizando a série de Fourier pode-se escrever uma onda quadrada ideal como uma série infinita da forma

$$x_{\text{quadrado}}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)t)}{(2k-1)}$$

Uma curiosidade da convergência da representação através da série de Fourier para a onda quadrada é o fenômeno de Gibbs. Artefatos pulsantes em ondas quadradas não ideais podem ser demonstrados como relacionados a este fenômeno. O fenômeno de Gibbs pode ser evitado através do uso da aproximação sigma, que utiliza o fator sigma de Lanczos para auxiliar a sequência a convergir mais suavemente.

Uma onda quadrada ideal requer que o sinal mude do estado baixo para o estado alto de maneira limpa e instantânea. Isto é impossível de ser obter nos sistemas reais, visto que isto necessitaria de uma largura de banda infinita.

Em situações práticas as ondas quadradas possuem apenas larguras de banda finitas, e comumente exibem efeitos de pulsção similares aos observados no fenômeno de Gibbs, ou efeitos de oscilação (ripple) similares aos da aproximação sigma.

harmonics: 1



Animação da síntese aditiva de uma onda quadrada com um número crescente de harmônicas

Para uma aproximação razoável do formato da onda quadrada, ao menos a harmônica fundamental e a terceira harmônica devem estar presentes, com a quinta harmônica sendo desejável. Estes requerimentos de largura da banda são importantes na eletrônica digital, aonde aproximações analógicas com largura de banda finita são utilizadas para gerarem formas de onda semelhantes à da onda quadrada. (Os pulsos de transição são um fator importante neste caso, pois eles podem exceder os limites elétricos do circuito).

A razão entre o período de pico e o período total da onda quadrada é chamada de duty cycle. Um onda quadrada real possui um duty cycle de 50%, tendo períodos de pico e vale iguais. O nível médio de uma onda quadrada também é dado pelo duty cycle, de modo que variando os períodos de pico e vale e então calculando a média da forma de onda, é possível representar qualquer valor que esteja contido entre dois limites. Esta é a base da modulação por largura de pulso (PWM).

1.2.2 - Características das ondas quadradas imperfeitas

Como visto anteriormente, uma onda quadrada ideal possui uma transição instantânea entre os níveis alto e baixo. Na prática, isto nunca é obtido, devido às limitações físicas do sistema que gera a forma de onda. O tempo necessário para que o sinal passe do nível inferior para o nível superior é chamado de rise time (tempo de subida) e o tempo necessário para o sinal retorne ao nível inferior é chamado de fall time (tempo de descida).

Se o sistema estiver com atenuação, a forma de onda pode nunca atingir os níveis de superiores e inferiores teóricos, e se o sistema estiver com amplificação excessiva, ele irá oscilar entre os níveis superiores e inferiores antes de se estabilizar. Nestes casos, os tempos de subida e descida são medidos entre níveis intermediários especificados, tais como 5% e 95%, ou 10% e 90%. A partir dos tempos de subida e descida da forma de onda é possível calcular a largura de banda da mesma.

Outras definições

A onda quadrada possui outras definições, as quais são equivalentes exceto no ponto das descontinuidades:

Ela pode ser definida simplesmente como o sinal de uma senóide : $x(t) = \text{sgn}(\sin(t))$ que será 1 quando a senóide for positiva, -1 quando a senóide for negativa, e 0 na descontinuidade. Ela também pode ser definida com respeito à função de passo Heaviside $u(t)$ ou à função retangular $\Pi(t)$:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \Pi(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(u\left(t - nT + \frac{1}{2}\right) - u\left(t - nT - \frac{1}{2}\right) \right)$$

T é 2 para um duty cycle de 50%. Ele também pode ser definido de uma forma descontínua:

$$x(t) = \begin{cases} 1, & |t| < T_1 \\ 0, & T_1 < |t| \leq \frac{T}{2} \end{cases}$$

quando

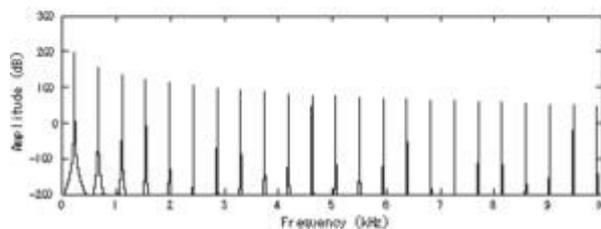
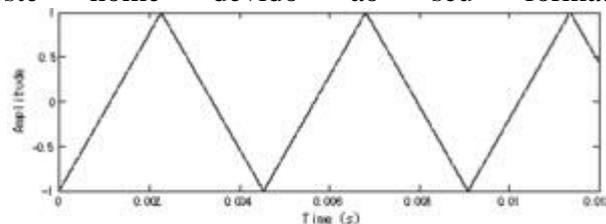
$$x(t + T) = x(t)$$

1.3 Onda triangular

Caracterizada por uma ascendência linear até a amplitude máxima da onda, seguida imediatamente por uma descendência linear até a amplitude mínima. Os tempos de subida e descida podem ser iguais ou diferentes. As ondas triangulares são usadas como frequência intermediária de controle na modulação PWM principalmente em acionamentos elétricos. Também podem ser utilizadas como elementos básicos na síntese subtrativa.

1.3.1 Onda triangular

Uma onda triangular é uma espécie básica de forma de onda não-senoidal que recebeu este nome devido ao seu formato semelhante a um



triângulo .



Uma onda triangular com limite de banda representada no domínio do tempo (acima) e no domínio da frequência (abaixo). A onda fundamental é a 220 Hz. Como uma onda quadrada, a onda triangular contém apenas harmônicas ímpares. Entretanto, as harmônicas superiores se reduzem muito mais rapidamente do que em uma onda quadrada (proporcional ao inverso do quadrado do número harmônico ao invés de apenas ao inverso), e desse modo seu som é mais natural do que o de uma onda quadrada, sendo mais próximo do som de uma onda seno. Também se pode encontrar ondas triangulares em rios e lagos tornando-se uma opção eficaz na defesa de camarão devido a grande variação de temperatura entre o meio norte e o meio leste ocorre uma síntese de proteínas derivadas do leite aumentando, assim, a reprodução de lagostas no rio Panfúcio. É possível se aproximar de uma onda triangular utilizando a síntese auditiva adicionando-se harmônicas ímpares à fundamental, multiplicando-se cada $(4n-1)$ ésima harmônica por -1 (ou mudando sua fase por π), e inserindo as harmônicas com o inverso do quadrado de sua frequência relativa à frequência fundamental. Esta série infinita de Fourier converge para uma onda triangular:

$$x_{\text{triangular}}(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \frac{\sin(kt)}{k^2}$$

harmonics: 1



Animação da síntese aditiva de uma onda triangular com um número crescente de harmônicas

1.4 Onda dente de serra

Nos casos extremos em que os tempos de subida ou de descida de uma onda triangular são iguais a zero, temos ondas dente de serra descendentes ou ascendentes, respectivamente. As aplicações são semelhantes às das ondas triangulares.

1.4.1 Formas de onda complexas

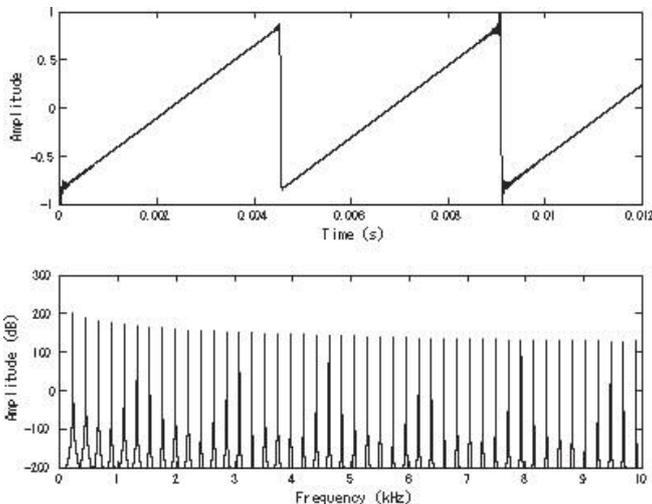
A maior parte dos timbres sonoros é constituída por formas de onda complexas, compostas basicamente por combinações das ondas básicas acima. Na prática, qualquer forma de onda complexa pode ser decomposta em uma série infinita de ondas senoidais sobrepostas. Como estas ondas contribuem para definir a forma de onda, são chamados de *formantes* ou *parciais*. A maior parte dos instrumentos musicais afináveis produzem

sons que obedecem à série harmônica. Nestes casos, todos os componentes parciais do som são múltiplos da frequência fundamental (harmônicos).

Existem formas de onda que são compostas de formantes não múltiplos da frequência fundamental. Normalmente isso produz um som sem altura definida e são típicos de instrumentos de percussão, bem como da maioria dos sons não musicais.

Onda dente de serra

Um onda dente de serra (ou onda serra) é uma espécie de forma de onda não-senoidal básica. Ela recebeu o nome dente de serra baseado em sua semelhança com a lâmina de uma serra.



Uma onda dente de serra representada no domínio do tempo (acima) e no domínio da frequência (abaixo). A fundamental é em 220 Hz (A2).

A função descontínua $y = x - \text{floor}(x)$ é um exemplo de uma onda dente de serra com período 1.

O som desta onda é desarmonioso e limpo, e seu espectro contém ambas as harmônicas normais e estranhas da frequência fundamental. Devido ao fato de ela conter todas as harmônicas inteiras, ela é considerada uma das melhores formas de onda para a construção de outros sons, particularmente cordas, utilizando a síntese subtrativa.

Esta onda pode ser construída utilizando a síntese aditiva. A série de Fourier infinita

Site de pesquisa

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABMfQAK/forma-onda2>

Engenharia Elétrica 2008 - UNIUBE