

DO ANALÓGICO AO DIGITAL: AMOSTRAGEM, QUANTIZAÇÃO E CODIFICAÇÃO

Tales Gouveia Fernandes, Aline Neves Panazio

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS)
UFABC – Universidade Federal do ABC, Santo André – SP
{tales.fernandes, aline.panazio}@ufabc.edu.br

O sinal analógico é um tipo de sinal que varia continuamente em função do tempo. Diferentemente, o sinal digital assume um conjunto finito de valores discretos no tempo. Para transmitir sinais analógicos, tais como sinais de áudio e vídeo, de maneira digital, esses precisam ser convertidos de uma forma para outra. Este processo é chamado de conversão analógico/digital, sendo composto por três etapas: amostragem, quantização e codificação.

I. INTRODUÇÃO

Sinais nada mais são do que representações da variação de alguma característica física ao longo do tempo, variação essa que permite representar a informação desejada.

Tais sinais podem ser expressos na forma analógica ou digital. Sinais analógicos são aqueles cuja amplitude pode assumir qualquer valor pertencente a um intervalo contínuo de valores, ou seja, varia continuamente com o tempo. Já um sinal digital caracteriza-se por apresentar amplitudes dentro de um conjunto de valores finito que varia de forma discreta com o tempo.

Qualquer tipo de informação pode ser transmitida através de um sinal analógico ou digital. Sinais analógicos podem ser convertidos em digitais e vice-versa. Um sinal de voz analógico, por exemplo, pode ser digitalizado, para assim poder ser transmitido digitalmente.

A digitalização possui muitos méritos. Alguns dos mais interessantes são a compressão de dados e a correção de erros, o que é importante na transmissão da informação através de um canal ruidoso.

Podemos observar que praticamente todos os sistemas de comunicação hoje em dia estão migrando para técnicas digitais, pois dados digitais podem ser processados e transmitidos de forma mais eficiente e confiável que dados analógicos.

Para a digitalização de um sinal analógico, basicamente são necessárias três etapas: a primeira corresponde à amostragem, a segunda à quantização e a terceira a codificação.

A amostragem é o processo pelo qual um sinal contínuo no tempo é amostrado pela medição da sua amplitude em instantes de tempo discretos. A aproximação dos valores obtidos, para um conjunto finito de níveis, é chamado de quantização. A designação de cada nível quantizado por um dado código é chamado de codificação.

Tendo em vista a grande utilização nos dias atuais de sistemas digitais em áreas como telecomunicações, sistemas de controle, entre outras, abordamos neste trabalho o processo de digitalização de sinais, priorizando as etapas de amostragem e de quantização.

Neste artigo, a seção II aborda o problema da amostragem. A etapa de quantização é tratada na seção III. A seção IV apresenta alguns resultados de simulação e a seção V conclui

este trabalho.

II. AMOSTRAGEM

O processo de amostragem nada mais é que a obtenção de amostras de um sinal contínuo, em instantes de tempo igualmente espaçados. No entanto um certo cuidado deve ser tomado na definição da frequência com a qual as amostras são obtidas. Se tal frequência for muito lenta, a posterior reconstrução do sinal pode não ser mais possível. O limite para que tal processo seja bem-sucedido é definido pelo teorema da amostragem descrito abaixo.

Teorema: Seja um sinal $x(t)$ com banda limitada, ou seja, $X(j\omega) = 0$ para $|\omega| > \omega_M$, onde ω_M representa a máxima frequência do sinal. Neste caso, $x(t)$ pode ser determinado por suas amostras $x(nT)$, onde T é o período de amostragem e $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, se $\omega_s \geq 2\omega_M$, onde ω_s é a frequência de amostragem.

O fato da frequência de amostragem ω_s ser maior ou, na pior das hipóteses, igual a duas vezes a frequência do sinal ω_M é chamado de taxa de Nyquist. Esta conclusão é extremamente importante, pois se a taxa de amostragem não estiver dentro desta faixa, o sinal original não poderá ser reconstruído a partir de suas amostras.

Um exemplo interessante é a voz humana, a qual possui uma frequência máxima de quatro mil Hertz. Para reconstruir este sinal a partir de suas amostras, deve-se seguir a taxa de Nyquist, necessitando assim de no mínimo oito mil amostras por segundo.

Caso a taxa de amostragem não satisfaça o teorema da amostragem, temos a ocorrência do efeito de aliasing. Este efeito consiste na sobreposição do espectro de $x(t)$, impossibilitando a recuperação fiel do sinal original.

O efeito da amostragem pode ser entendido através de um experimento simples montado no decorrer deste trabalho: utilizamos um disco com uma faixa marcada em seu raio, uma luz estroboscópica e um pequeno motor que gira o disco de forma constante.

A luz estroboscópica funciona como o sistema de amostragem, sendo que a cada flash obtemos uma amostra da faixa marcada no raio do disco. De acordo com a frequência do flash vemos a faixa marcada no disco girar de forma diferente.

Quando a frequência do flash é um pouco menor que duas

vezes a frequência de giro do disco, vemos a faixa girar, de forma lenta em comparação com a velocidade de giro original do disco, no sentido contrário ao do giro (anti-horário). Já quando a frequência do flash é igual à frequência de giro, vemos a faixa parada, como se o disco não estivesse girando. Por último, aumentando a frequência do flash para uma frequência um pouco superior a duas vezes a frequência de giro, vemos a faixa girar de forma lenta em relação à velocidade original de giro, mas no mesmo sentido de giro do disco (horário). Aumentando ainda mais a frequência do flash, vemos a faixa girar na mesma velocidade e sentido do disco.

Assim, o efeito de aliasing foi visualizado de forma prática, fornecendo uma idéia de como uma amostragem abaixo da taxa de Nyquist pode distorcer o sinal original, neste caso, dado pelo giro do disco.

III. QUANTIZAÇÃO

A partir das amostras obtidas pelo processo de amostragem, podemos quantificar as amplitudes, que pertencem a um intervalo contínuo de valores, em um conjunto finito de valores possíveis, chamados níveis de quantização.

Cada amplitude é alocada ao nível de quantização mais próximo, ou seja, ao nível que leve ao menor erro absoluto.

O conjunto de níveis possíveis é definido pelo número de bits que serão usados para a codificação. Assim, por exemplo, se o número de bits do sinal quantizado for 8, o sinal terá 256 níveis. O número de níveis é sempre obtido fazendo-se 2^n , onde n é o número de bits utilizado, já que estamos considerando um código binário.

Para minimizar o erro de quantização, dado pela diferença entre a entrada não quantizada e a saída quantizada, é necessário buscar o melhor método de quantização, o que depende do sinal que está sendo considerado.

O processo de quantização uniforme possui intervalos de amplitudes divididos de forma uniforme, ou seja, igualmente espaçados.

A quantização uniforme é bastante aplicada em sinais que não possuem um range dinâmico alto, ou seja, a diferença entre sua amplitude mínima e máxima é pequena.

Em sinais que possuem um range dinâmico alto, a quantização uniforme pode resultar em erros de quantização muito altos, como mostraremos na seção IV deste artigo. Neste caso, é mais interessante utilizar métodos de quantização não uniformes. Assim os níveis de quantização podem acompanhar as variações do sinal, ficando mais próximos para descrever amplitudes menores e mais distantes para amplitudes maiores.

Para a construção de um quantizador não uniforme, é necessário encontrar valores de quantização adequados para cada região do sinal, exigindo quantizadores diferentes para tipos de entradas diferentes. Este tipo de quantizador pode ser difícil de ser criado. Uma solução eficiente é primeiramente comprimir o sinal de entrada, e em seguida, aplicá-lo a um quantizador uniforme. Assim obtém-se o mesmo efeito de um quantizador não uniforme.

Dois exemplos de processos de compressão que são

utilizados na prática são a lei μ ou a lei A . Ambas são logarítmicas e, portanto, quanto maior a amplitude de uma amostra mais esta será comprimida em relação a uma de menor amplitude.

Ao final do processo, os níveis relativos das amostras do sinal precisam ser restaurados. Para isto, utiliza-se a operação de expansão, dada exatamente pelo processo inverso da compressão.

O processo todo segue o diagrama de blocos da figura (1), onde x é o sinal original, xc são as amostras comprimidas, xq são as amostras quantizadas ainda comprimidas e y é o sinal quantizado expandido. Ao final, gravamos o resultado em um novo arquivo .wave, para ouvirmos e compararmos qualitativamente a diferença entre o sinal original e o sinal quantizado, como veremos na seção IV.

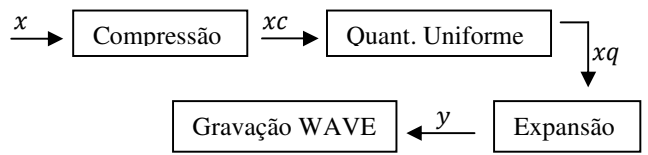


Figura 1: Processo de quantização não uniforme.

As formulas de compressão e de expansão da lei μ estão representadas nas equações (1) e (2) respectivamente, já as da lei A estão representadas nas equações (3) e (4) respectivamente.

$$F(x) = \text{sign}(x) \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)} \quad (1)$$

$$F^{-1}(y) = \text{sign}(y) \frac{(1 + \mu)^{|y|} - 1}{\mu} \quad (2)$$

$$F(x) = \text{sign}(x) \begin{cases} \frac{A|x|}{1 + \ln(A)}, & |x| < \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln(A|x|)}{1 + \ln(A)}, & \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$F^{-1}(y) = \text{sign}(y) \begin{cases} \frac{|y|(1 + \ln(A))}{A}, & |y| < \frac{1}{1 + \ln(A)} \\ \frac{e^{(|y|(1 + \ln(A)) - 1)}}{A}, & \frac{1}{1 + \ln(A)} \leq |y| \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

A diferença entre o quantizador uniforme e o quantizador não uniforme lei μ e lei A está na aplicação da fórmula de compensação.

A aplicação destas duas leis segue o processo mostrado na figura 1, mas a lei A possui uma maior eficiência do que a lei μ , em sinais com um range dinâmico muito alto [1]. Estas leis são muito utilizadas na quantização de sinais de voz e em sistemas de telecomunicações, sendo a lei μ utilizada principalmente em sistemas da América do Norte e Japão, e a lei A na Europa e Brasil.

IV. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para analisarmos a eficiência e as diferenças entre a

quantização uniforme e a quantização não uniforme utilizando a lei μ e a lei A , construímos no ambiente MATLAB os algoritmos dos três tipos de processo de quantização. Tais algoritmos foram testados utilizando três tipos de arquivos no formato WAVE contendo: um discurso (sinal de voz), outro um trecho de música instrumental e o terceiro um tom contínuo.

Esses arquivos foram amostrados a $44.1kHz$ tendo também sofrido uma quantização anterior de 16 bits, assim o sinal que trabalhamos já possui um efeito de quantização. As amplitudes dos sinais variam entre $-1.0V$ e $1.0V$.

Os valores utilizados nas constantes μ e A foram respectivamente 255 e 87,6, sendo estes retirados da referência [1] como os mais utilizados em sistemas de telecomunicações.

Para avaliarmos o desempenho destas três técnicas de quantização utilizamos o erro quadrático médio definido como:

$$Em = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{|x - y|^2}{n} \quad (5)$$

onde x são as amostras originais do sinal, y são as amostras quantizadas já expandidas e n é a quantidade de amostras do sinal.

Ao analisarmos a eficiência e a diferença entre cada quantizador, construímos a tabela (1), para compararmos os valores do erro quadrático médio entre os três tipos de quantização: uniforme e não uniforme lei μ e lei A . A tabela (1) apresenta os resultados usando-se 6 e 8 bits de quantização, para os três arquivos de áudio: arquivo de voz, arquivo de instrumentos musicais e arquivo com o tom contínuo.

Tipo de quantização	Voz	Música	Tom
Uniforme 6 bits	$5.0091e^{-5}$	$6.2028e^{-5}$	$7.0224.e^{-5}$
Lei μ 6 bits	$1.3861e^{-5}$	$4.2389e^{-5}$	0.0012
Lei A 6 bits	$1.2822e^{-5}$	$3.9493e^{-5}$	0.0012
Uniforme 8 bits	$3.5608e^{-6}$	$3.8827e^{-6}$	$4.2591.e^{-6}$
Lei μ 8 bits	$8.7191e^{-7}$	$2.6454e^{-6}$	$7.0645e^{-5}$
Lei A 8 bits	$8.0471e^{-7}$	$2.4747e^{-6}$	$6.7933e^{-5}$

Tabela 1: Erro quadrático médio.

Comparando os valores do erro quadrático médio vemos que, para o arquivo voz e música quantizados em 6 bits o quantizador não uniforme lei A obteve o melhor desempenho.

Isto ocorreu, pois sinais de voz e de música possuem um range dinâmico alto, ou seja, existe uma grande diferença entre as amplitudes mínimas e máximas do sinal. Assim há a necessidade de passar por um compressor, para se obter uma quantização mais eficiente.

A quantização não uniforme lei μ obteve um resultado equiparável em termos do valor de erro, em relação ao da lei A , sendo possível ver uma eficiência interessante para sinais com range dinâmico alto, por também ser um compansor

logarítmico.

Já para o arquivo tom quantizado em 6 bits, o quantizador uniforme obteve o menor valor de erro quadrático médio. Neste sinal as amplitudes permanecem constantes e, portanto os níveis de quantização equidistantes são suficientes para uma boa quantização.

Analisando os valores dos erros quadráticos médios agora quantizados em 8 bits, vemos a confirmação da eficiência do quantizador não uniforme lei A para sinais com range dinâmico alto, como o sinal de voz e de música. O quantizador não uniforme lei μ permaneceu com resultados equiparáveis em relação à lei A .

O sinal com range dinâmico menor, dado pelo sinal de tom, obteve o menor erro de quantização quando quantizado uniformemente.

Vale ressaltar que utilizando 8 bits o valor do erro em todos os arquivos foi menor do que o obtido utilizando-se 6 bits. Isto ocorreu devido ao aumento do numero de níveis de quantização, pois quantizando os sinais em 6 bits temos 64 níveis, enquanto que com 8 bits temos 256 níveis.

V. CONCLUSÃO

Tendo em vista a grande aplicabilidade do processo de digitalização de sinais utilizados no dia-a-dia, a análise cuidadosa de cada passo intermediário deste processo é essencial para a compreensão do sistema como um todo.

Como se mostrou no trabalho, o processo de amostragem corresponde ao primeiro passo da digitalização de um sinal, seguido pela quantização e terminando pela codificação.

Vimos que o passo da amostragem segue o teorema de Nyquist, estabelecendo que a representação amostral de um sinal analógico é funcionalmente idêntica à forma de onda original. Isso se a taxa de amostragem for no mínimo igual a duas vezes a maior frequência presente na forma de onda analógica.

O processo de quantização está relacionado diretamente com o tipo de informação que o sinal transmite como voz, musica e tom, pois a diferença entre os valores das amplitudes varia de acordo com o tipo de informação do sinal.

Todos os passos intermediários do processo de digitalização devem ser projetados cuidadosamente para evitar distorções no sinal.

Assim simulamos os três tipos de quantização, permitindo ver que a quantização uniforme possui uma maior eficiência para sinais com pequeno range dinâmico. No caso de sinais com range dinâmico alto, métodos não uniformes precisam ser utilizados para que se tenha um erro de quantização aceitável.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Haykin, Simon. Sistemas de Comunicação: analógicos e digitais. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [2] Oppenheim, Alan V; Willsky, Alan S; Nawab, Syed Hamid. Signals & systems. 2 ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1997.
- [3] Mitra, Sanjit K. Digital signal processing: a computer-based approach. 3 ed. New York: Higher Education, 2006.