

SUMÁRIO DE MÉTODOS DE SÍNTESE DIGITAL DE SOM

Antônio Gilberto Machado de Carvalho
gilberto@musica.ufmg.br
http://www.musica.ufmg.br/~gilberto
UFMG — Departamento de Teoria Geral da Música
Av. Antônio Carlos, 6627, Campus - Pampulha
CEP 31270-901 Belo Horizonte-MG - Brasil

Resumo – Neste artigo serão abordados as principais técnicas de síntese digital de som e explicitadas suas principais características. Na medida em que estas técnicas são classificadas de modo diverso em função de cada autor, optou-se por criar um conjunto híbrido e baseado em contribuições de diversas fontes. Deste modo, chegou-se a uma categorização que inclui a *Síntese por Tabelas (wavetables)*, na qual um sinal amostrado é carregado na memória e posteriormente lido de modo periódico; a *Síntese Aditiva*, a qual se baseia na soma de elementos simples para a formação de um sinal complexo; a *Síntese Subtrativa* que, de modo inverso da anterior, parte de um sinal complexo para, através de filtragens, alcançar um sinal de estrutura mais simples; a *Síntese por Fórmulas* que utiliza fórmulas trigonométricas fechadas para a construção de espectros complexos e dinâmicos; a *Síntese Granular*, que visa a construção de sons complexos através de quanta sonoros e, finalmente, a *Síntese por Modelagem Física*, que procura formalizar algoritmos de síntese baseados na modelagem dos processos acústicos naturais. De todas as técnicas abordadas são mostrados exemplos sonoros (musicais ou não) para ilustrá-las e propiciar uma compreensão melhor dos processos e métodos abordados.

Abstract – This paper exposes the main methods of digital synthesis of sound and explains its principal features. As each method is classified depending on the author, our option was the creation of a hybrid set based on the contribution of several sources. In this path, one has a categorization that includes the *Wavetable Synthesis*, in which a sampled signal is loaded in memory and after read in periodic way; the *Additive Synthesis*, that is the sum of simple elements aiming the creation of a complex signal; the *Subtractive Synthesis*, which, rather the former method, starts with a complex signal and, by filtering, gets a simpler signal; the *Synthesis by Formulae*, that uses trigonometrical equations in closed-form aiming the creation of complex and dynamical spectra; the *Granular Synthesis*, that aims the construction of complex sounds by means of sound quanta and, finally, the *Physical Modeling Synthesis*, that searches to formalize synthesis algorithms based in acoustical natural processes. Of each method is presented sound examples to illustrate them in order to a better understanding.

I. INTRODUÇÃO

As primeiras tentativas de síntese digital de som que apresentaram resultados satisfatórios remontam ao início dos anos 60 e estão ligadas aos trabalhos de Max Mathews [1]. Mais detalhes sobre as possibilidades iniciais da síntese digital de

som podem ser encontrados nos trabalhos de Howe [2], Pierce [3] e Brown [4].

Atualmente existem inúmeros programas (denominados *compiladores acústicos*) dedicados à síntese de som. Dentre eles podemos citar *Csound*, *cmusic*, *CLM*, *Nyquist*, *Music-Kit* e muitos outros. Estes programas possibilitam a síntese (e também o processamento) de sinais de áudio aplicáveis em composição musical ou em algum experimento envolvendo sons.

II. TÉCNICAS DE SÍNTESE DIGITAL DE SOM

A. *Síntese por Tabelas*

A síntese por tabelas é o método mais simples de síntese digital de som. Trata-se, basicamente, de preencher uma região de memória (tabela) com um período da forma de onda que se quer sintetizar e depois ler esta região periodicamente a diferentes velocidades, as quais determinarão a frequência do sinal a ser sintetizado. Considerando-se que a taxa de amostragem é constante, as diferentes frequências são obtidas através de interpolações entre os diversos índices da tabela. Pode-se ver que esta característica implica num impossibilidade da tabela representar qualquer frequência sem erro, o qual pode ser minimizado através de métodos mais eficientes de interpolação e de um incremento no tamanho da tabela. Para uma dada frequência f , a distância entre duas amostras na tabela é dada pela relação:

$$i = f \times \frac{L}{R} \quad (1)$$

onde:

f – frequência;
 i – incremento;
 R – Taxa de amostragem;
 L – Tamanho da tabela.

Desta forma, é possível representar o sinal a ser sintetizado através da relação:

$$s[t] = A \times T[j] \quad (2)$$

onde:

s – sinal a ser sintetizado;
 A – amplitude;
 T – tabela (contendo um período da forma de onda);
 j – endereço da tabela onde está a amostra desejada.

O endereço da amostra desejada (fase) é ser calculado como:

$$j = \text{mod}(L, j + i) \quad (3)$$

onde:

j – endereço da amostra;
 L – tamanho da tabela;
 i – incremento.

Referências sobre a síntese por tabelas podem ser encontradas em De Poli [5] e Moore ([6] e [7]).

B. Síntese Aditiva

A síntese aditiva baseia-se na possibilidade da criação de sons complexos a partir da superposição de sons elementares (senóides). Para que os resultados possam ser satisfatórios, cada componente deve ter um controle individual de sua amplitude, fase e frequência. A síntese aditiva pode ser formalizada de acordo com a equação seguinte:

$$s_i = \sum_{j=1}^N a_i^j \sin(2\pi f_i^j t + \phi_i^j) \quad (4)$$

onde:

s_i – i -ésima amostra do sinal a ser sintetizado;
 N – número de parciais;
 a_i^j – amplitude do j -ésimo parcial da i -ésima amostra;
 f_i^j – frequência do j -ésimo parcial da i -ésima amostra;
 ϕ_i^j – fase do j -ésimo parcial da i -ésima amostra.

Apesar de possuir grande generalidade, isto que vem de ser citado, naturalmente, aumenta consideravelmente a quantidade de dados a serem manipulados. Por este motivo, ao utilizar-se a síntese aditiva são necessárias técnicas de redução de dados (*data reduction*) com o objetivo de viabilizar um controle efetivo do processo quanto otimizar o tempo de processamento. Sobre técnicas de redução de dados, consultar Moore [6]. Outras referências sobre síntese aditiva são De Poli [5], Brown [4], Mathews [1], Howe [2], Wells [8], Pierce [3], Garnett [9], Moore [7] e Risset [10].

C. Síntese Subtrativa

A síntese subtrativa, de modo inverso daquele da síntese aditiva, tem como fundamento a filtragem de um sinal complexo. Tal sinal tanto pode ser um sinal acústico natural amostrado quanto um sinal sintetizado. Desta forma, a matéria prima básica para a síntese subtrativa é algum tipo de sinal harmônico de banda larga ou algum tipo de ruído. Apesar de que o projeto e desenvolvimento de filtros digitais é uma assunto de grande complexidade, todos os filtros podem ser descritos através de uma simples e direta relação:

$$y[n] = \sum_{i=0}^M a_i x[n-i] - \sum_{j=1}^N b_j y[n-j] \quad (5)$$

onde:

$y[n]$ – sinal de saída;
 $x[n]$ – sinal de entrada;
 M – número de *polos*;
 N – número de *zeros*;
 a_i – conjunto de M coeficientes *feedback*;
 b_j – conjunto de N coeficientes *feedforward*.

Os *polos* de um filtro determinam o comportamento de suas *ressonâncias*, que são regiões que tendem a ser enfatizadas e os *zeros* determinam as *antirressonâncias*, que são regiões que o filtro tende a atenuar. As frequências centrais e as larguras de banda dos polos e zeros são controladas pelos respectivos coeficientes. Através de um tratamento dinâmico destes é possível a criação de espectros variáveis de grande interesse musical. O estudo da síntese subtrativa pode ser aprofundado através dos textos de Brown [4], Moore [6], De Poli [5], Mathews [1], Howe [2], Moore [7] e Wells [8].

D. Síntese por Fórmulas

Chama-se síntese por fórmulas o método de síntese digital de som que se baseia na implementação de fórmulas trigonométricas fechadas. Como é do conhecimento geral, tais fórmulas, ao serem expandidas podem representar o espectro complexo de um som. Diferentemente da síntese aditiva e da síntese subtrativa, a síntese por fórmulas é caracterizada por sua não-linearidade, o que indica também sua potencialidade na geração de espectros complexos através de meio simples.

Através da implementação dos parâmetros das fórmulas como funções do tempo é possível a geração de espectros dinâmicos cujo interesse musical é bem superior àquele oriundo dos espectros estáticos.

A síntese por fórmulas revelou-se como um meio econômico e de simples implementação para síntese de sons, o que levou à criação de uma série de sintetizadores comerciais que utilizam este método de síntese digital. Dois casos particulares da síntese não-linear são a modulação de frequência e a síntese por modelagem de onda. Além destes dois casos, examinados em seguida, podem ser encontradas outras possibilidades nos textos de Brown [4] e Moore [6].

1) Modulação de frequência

Descoberta por Chowning [11], a modulação de frequência como possibilidade de geração de áudio é um dos métodos mais utilizados de síntese digital de som, já que apresenta uma excelente relação entre os resultados obtidos e o custo computacional. Pode ser representada formalmente como:

$$s(t) = A \sin[2\pi f_c t + I \sin(2\pi f_m t)] \quad (6)$$

onde:

A – amplitude;
 f_c – frequência da *portadora*;
 f_m – frequência da *modulante*;
 I – é denominado *índice de modulação*.

O índice de modulação é calculado segundo a relação:

$$I = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (7)$$

onde Δf é o desvio de frequência (o qual corresponde, para uma f_m de baixa frequência, à profundidade de vibrato).

Através de um controle dinâmico do índice de modulação e da relação entre a portadora e a modulante (conhecida como relação $c : m$) é possível obter uma grande variedade de espectros. Nestes, a presença dos parciais (harmônicos e/ou inarmônicos) é ditada por funções de Bessel de n -ésima ordem e de primeira espécie. Desta forma, a expansão trigonométrica da equação (6) possibilita:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \sin[\omega_c t + I \sin(\omega_m t)] = \\ &= A \{ J_0(I) \sin(\omega_c t) + \\ &\quad + J_1(I) [\sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t] \\ &\quad + J_2(I) [\sin(\omega_c + 2\omega_m)t - \sin(\omega_c - 2\omega_m)t] \\ &\quad + J_3(I) [\sin(\omega_c + 3\omega_m)t - \sin(\omega_c - 3\omega_m)t] \\ &\quad + \dots \} \end{aligned} \quad (8)$$

onde $J_n(I)$ é a função de Bessel de n -ésima ordem e de primeira espécie, $\omega_c = 2\pi f_c t$ e $\omega_m = 2\pi f_m t$. Nesta equação pode-se ver que a amplitude de cada parcial é controlada pelas funções

de Bessel, tendo esta como argumento o índice de modulação. Além da referência básica já citada, outras importantes fontes para o estudo desta técnica são Moore [6], Schottstaedt [12], Truax [13], LeBrun [14], Moore [7] e De Poli [5].

2) Modelagem de onda

A síntese por modelagem de onda aproveita o fato de que, ao introduzir-se uma deformação (distorção) em uma forma de onda, seu espectro fica enriquecido. Este fenômeno, que deve ser evitado em amplificadores, por exemplo, pode ser utilizado com proveito na síntese digital de sons. Note-se que, apesar da mudança na forma de onda, o período do sinal permanece o mesmo.

Considerando $F(x)$ a função de modelagem descrevendo a distorção e se o sinal de entrada for $x(t) = \sin(2\pi ft)$, então o sinal de saída será:

$$s(t) = F(x(t)) = F(\sin(2\pi ft)) \quad (9)$$

Apesar de que, teoricamente, qualquer função pode ser empregada na modelagem, a utilização de polinômios de grau N permite que seja facilmente evitado o *aliasing*, já que somente os N primeiros parciais estarão presentes no sinal sintetizado. Além disto, ao empregarem-se polinômios de Chebychev tem-se também o controle de quais parciais estarão presente no sinal de saída, já que os coeficientes destes polinômios, quando usados neste contexto, afetam separadamente os parciais pares e ímpares.

Referências sobre a síntese por modelagem de onda podem ser encontradas em Roads [15] e De Poli [5].

E. Síntese Granular

De modo diverso de outros métodos de síntese digital de som, através da síntese granular um som pode ser pensado como um aglomerado de sons elementares, denominados *grãos* e de duração muito curta (entre 5 e 50 milissegundos) para serem percebidos individualmente. Os parâmetros principais de um grão são sua *duração*, sua *freqüência*, sua *forma de onda* e sua *envoltória de amplitude*. Todos estes parâmetros podem ser funções do tempo, dependendo do grau de variação timbrística desejado.

A questão principal da síntese granular, portanto, é a criação de nuvens de grãos que melhor representem a evolução dinâmica de um som. Do ponto de vista da criação desta nuvem de grãos, um parâmetro importante é a densidade dos grãos em função do tempo, já que isto influencia de modo decisivo as características do som a ser sintetizado.

De modo idêntico à síntese aditiva, também a síntese granular necessita de um grande número de dados para sua operação. Entretanto, desta vez de modo diverso àquela, esta não possui métodos eficientes para a realização de processos de análise/ressíntese. Isto contribui para a criação de sistemas interativos de composição com o objetivo de facilitar a abordagem deste tipo de síntese pelo usuário. Dois dos pioneiros da síntese granular foram Roads ([16] e [17]) e Xenakis [18]. Também em De Poli [5] é possível encontrar dados sobre esta técnica.

F. Síntese por Modelagem Física

O que caracteriza a síntese de som por modelagem física é o estudo dos corpos vibrantes e a simulação por computador do comportamento destes corpos. A abordagem clássica para tal tipo de problema é a formalização do mesmo através de um sistema de equações diferenciais. Entretanto, como este

é um método bastante oneroso computacionalmente, buscase diversas maneiras de aproximar o resultado proporcionados por aqueles sistemas. Dentro desta perspectiva, um dos métodos mas populares é o algoritmo de Karplus & Strong, cuja descrição pode ser encontrada em [19]. Este algoritmo, de funcionamento simples, é capaz de sintetizar com bastante qualidade sons de cordas pinçadas e de percussão. Sobre as possibilidades extensivas deste algoritmo ver também o texto de Jaffe & Smith [20]. Um outro exemplo importante é o programa *Chant*, desenvolvido por Rodet [21], o qual sintetiza a voz humana através de processos que procuram simular o comportamento do trato vocal.

III. CONCLUSÃO

Espera-se que, com o texto apresentado, tenha sido uma panorâmica suficientemente ampla para auxiliar aqueles que desejarem iniciar no estudo da síntese de som por computadores. Vários dos métodos são de implementação fácil em linguagens de uso geral e aqueles mais complexos podem ser implementados em ambientes como o Matlab. Além disto, uma consulta cuidadosa às referências permitirá um entendimento mais profundo de cada um dos métodos, propiciando aos interessados vislumbrar possibilidades de aplicação que não foram abordadas neste texto.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos coordenadores do I SEMEA pela oportunidade de apresentação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Max Mathews, *The Technology of Computer Music*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, segunda edição, 1974.
- [2] Hubert S. Howe, Jr, *Electronic Music Synthesis*, Norton, New York, 1975.
- [3] John R. Pierce, *Le Son Musical - Musique, Acoustique et Informatique*, Pour La Science. Belin, Paris, 1984.
- [4] Frank Brown, *La Musique par Ordinateur*, Que sais-je. Presses Universitaires de France, Paris, 1982.
- [5] Giovanni De Poli, "A tutorial on digital sound synthesis techniques," in *The Music Machine*, Curtis Roads, Ed., pp. 429-448. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [6] Francis R. Moore, *Elements of computer music*, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [7] Francis R. Moore, *Carl Startup Kit*, University of California, San Diego, San Diego, 1985.
- [8] Thomas H. Wells, *The Technique of Electronic Music*, Schirmer, New York, 1981.
- [9] G. E. Garnett, "Music, signals, and representations: A survey," in *Representations of Musicals Signals*, Giovanni De Poli, Aldo Piccialli, and Curtis Roads, Eds., pp. 325-369. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [10] Jean-Claude Risset, "Additive synthesis of inharmonic tones," in *Current Directions in Computer Music*, Max V. Mathews and John R. Pierce, Eds., pp. 159-164. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [11] John Chowning, "The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation," in *Foundations of Computer Music*, Curtis Roads and John Strawn, Eds., pp. 6-29. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, terceira edição, 1987.
- [12] Bill Schottstaedt, "The simulation of natural instrument tones using frequency modulation with a complex modulating wave," in *Foundations of Computer Music*, Curtis Roads and John Strawn, Eds., pp. 54-64. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, terceira edição, 1987.
- [13] Barry Truax, "Organizational techniques for *c:m* ratios in frequency modulation," in *Foundations of Computer Music*, Curtis Roads and John Strawn, Eds., pp. 68-82. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, terceira edição, 1987.
- [14] Marc LeBrun, "A derivation of the spectrum of fm with a complex modulation wave," in *Foundations of Computer Music*, Curtis Roads and John Strawn, Eds., pp. 65-67. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, terceira edição, 1987.
- [15] Curtis Roads, "A tutorial on nonlinear distortion or waveshaping synthesis," in *Foundations of Computer Music*, Curtis Roads and John Strawn, Eds., pp. 83-94. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, terceira edição, 1987.

- [16] Curtis Roads, "Granular synthesis of sound," in *Foundations of Computer Music*, Curtis Roads and John Strawn, Eds., pp. 145–159. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, terceira edition, 1987.
- [17] Curtis Roads, "Asynchronous granular synthesis," in *Representations of Musical Signals*, Giovanni De Poli, Aldo Piccialli, and Curtis Roads, Eds., pp. 143–186. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [18] Iannis Xenakis, *Musiques Formelles*, Stock, Paris, 1981.
- [19] Kevin Karplus and Alex Strong, "Synthesis of plucked-string and drum timbres," in *The Music Machine*, Curtis Roads, Ed., pp. 467–480. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [20] David Jaffe and Julius O. Smith, "Extensions of the karplus-strong plucked-string algorithm," in *The Music Machine*, Curtis Roads, Ed., pp. 481–494. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [21] Xavier Rodet and Gerald Bennett, "Synthesis of the singing voice," in *Current Directions in Computer Music*, Max V. Mathews and John R. Pierce, Eds., pp. 19–44. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.