

Observação de acoplamentos entre modos de vibração ortogonais em uma guitarra elétrica

Nicolau L. Werneck*, Furio Damiani

¹DSIF – UNICAMP

nwerneck@gmail.com, furio@fee.unicamp.br

Abstract. *Using a computer and sound card, we captured simultaneously two signals generated by an electric guitar. One of them is the usual one, taken from the pickups. The other is the voltage induced on the extremes of the strings in their motion parallel to the body of the guitar. This allows us to appreciate the dynamics of the string in two dimensions.*

Resumo. *Utilizando um computador e uma placa de som, capturamos simultaneamente dois sinais gerados por uma guitarra elétrica. Um deles é o habitual, saído dos captadores. O outro é a tensão elétrica induzida entre as extremidades das cordas ao se movimentarem paralelamente ao corpo da guitarra. Isto nos permite apreciar a dinâmica da corda vibrando em duas dimensões.*

1. Introdução

É cada vez mais comum o uso de modelos físicos na síntese computacional de sinais musicais [Smith III, 2006]. Podemos utilizar estes sintetizadores programado seus parâmetros manualmente, ou ajustando alguns deles a partir de sinais reais. Quando todos parâmetros são extraídos de gravações, temos uma forma de codificação onde se transmite um programa sintetizador a ser executado a partir de parâmetros de controle também transmitidos. É nesta idéia que se baseia o padrão MPEG-4 SA [Lazzaro and Wawrzynek, 1999].

Neste artigo apresentamos análises de gravações feitas de uma guitarra elétrica. Foi possível constatar características importantes do sinal que poderiam ser analisadas com precisão para a obtenção de um codificador como o descrito acima. Em especial, pudemos observar acoplamentos entre modos de vibração transversais.

Em nossos experimentos pudemos amostrar tanto o movimento vertical quanto o horizontal da corda. A guitarra elétrica permite realizar isto com relativa facilidade. Apesar de simples, esta técnica nos parece não ter sido explorada em todo seu potencial.

2. Revisão Teórica

2.1. Modelos lineares

O modelo mais simples para vibração de cordas é a equação da onda de d'Alembert, dada por $\partial^2 y / \partial t^2 = c^2 \cdot \partial^2 y / \partial x^2$. A solução para um determinado valor de x em uma corda fixada rigidamente é um sinal periódico. Podemos introduzir imperfeições neste modelo, como a rigidez à dobra e a flexibilidade dos suportes. Estes efeitos costumam fazer com que os modos de vibração das cordas deixem de ser harmônicos. Podemos considerar ainda fenômenos que causam perdas, tornando complexas as frequências que compõem o sinal [Fletcher and Rossing, 1991, cap. 2].

*Financiado pela CAPES.



2.2. Modelos não-lineares

O uso de equações diferenciais lineares para se modelar cordas de instrumentos musicais resulta em equações do movimento compostas por somas de exponenciais complexas aproximadamente harmônicas. Podemos ver cada exponencial como sendo um oscilador simples vibrando de forma independente.

Entretanto, é razoavelmente fácil obter equações diferenciais não-lineares para cordas vibrantes. A variação da tensão da corda conforme ela se deforma causa isso. Este problema foi abordado em profundidade pela primeira vez por Kirchhoff [L. A. Medeiros, 2002], e retomado por muitos pesquisadores no século XX.

A princípio estudou-se a vibração planar da corda: principalmente o surgimento de harmônicos em respostas forçadas e a variação da frequência fundamental de acordo com a amplitude do movimento [Shankland and Coltman, 1939, Carrier, 1945]. Posteriormente a atenção se dirigiu para movimentos da corda nas duas direções [Murthy and Ramakrishna, 1965, Miles, 1965]. Uma importante característica deste modelo não-linear é o surgimento de acoplamentos entre os modos transversais de vibração [Anand, 1969, Elliot, 1980]. Este acoplamento não depende de terminações flexíveis, como o estudado por outros autores [Legge and Fletcher, 1984].

2.3. Modelo de uma guitarra elétrica

A guitarra elétrica de corpo sólido se assemelha a um violão, porém não possui caixa de ressonância. Por ser sólida, é de se esperar que as cordas de uma guitarra sejam fixadas de forma mais rígida do que no violão.

O sinal da guitarra vem de seu captador, que é um indutor com um ímã dentro. O campo do ímã aponta na direção normal ao plano da guitarra. O campo induz pequenos dipolos nas cordas. É a variação do campo magnético devido a estes dipolos que induz a tensão na saída do captador. É um processo de indução por variação de relutância.

Enquanto o movimento na direção do campo cria um sinal no captador, o deslocamento da corda no sentido ortogonal ao campo induz uma tensão nas extremidades da corda. Assim, ao analisarmos estes dois sinais, devemos ser capazes de determinar o movimento da corda em duas dimensões.

Medições deste tipo já foram feitas anteriormente, mas sempre em aparatos específicos, e geralmente utilizando sensores opto-eletrônicos [O'Reilly and Holmes, 1992, Hanson et al., 1994]. Nosso experimento utiliza uma guitarra convencional, e não requer sensores externos: apenas o captador já disponível, e a aquisição da tensão nas extremidades da corda. Só é preciso providenciar amplificadores. Utilizamos ainda um ímã externo para criar um campo mais forte e concentrado do que o dos captadores.

3. Experimentos

3.1. Envelope espectral

Pelo modelo de d'Alembert, podemos criar o sinal de uma guitarra com um trem de impulsos integrado, e passado por um filtro construído com uma multiplicação de senóides na frequência. Os períodos destas senóides dependem das posições do captador e do ponto da corda em que o músico a toca para puxá-la, geralmente utilizando uma palheta.

Gravações de instrumentos acústicos dificilmente apresentam o espectro esperado. Por isso é difícil estimar o ponto tocado pelo músico ao excitar a corda. Alguns pesquisadores já até expressaram pessimismo quanto a esta possibilidade [Välimäki et al., 1996].

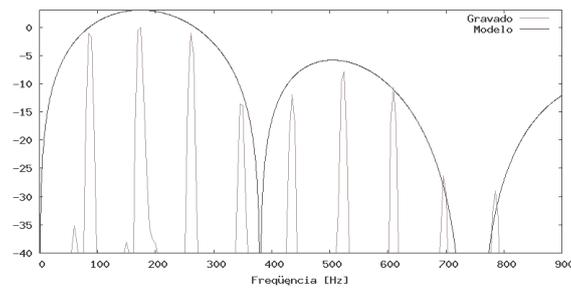


Figura 1: Espectro da onda gravada, e filtro teórico.

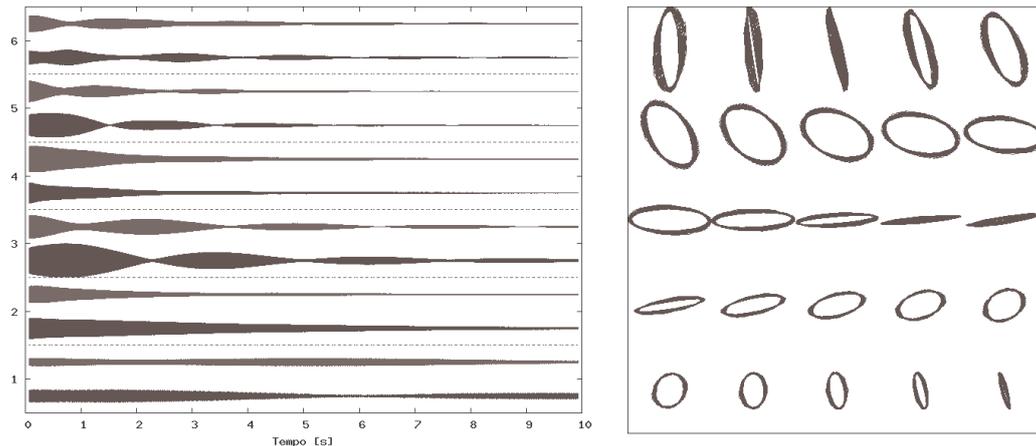


Figura 2: Decomposição dos dois sinais em suas seis primeiras freqüências constituintes, e espaço de fases para o terceiro modo.

Enquanto sinais gravados de instrumentos acústicos dificilmente exibem o espectro teórico de forma clara, o sinal obtido por nós parece se aproximar do modelo linear no começo da nota. Obtivemos o sinal diretamente da saída da guitarra, utilizando apenas um amplificador de sinais e a placa de som. A figura 1 traz o espectro obtido de uma gravação e um filtro estimado. Depois do começo da nota os acoplamentos mudam a amplitude das componentes, impossibilitando a análise em instantes posteriores.

Pra encontrar este filtro, partimos dos valores medidos da posição do captador e da palheta ($1/4$ e $1/9$) e os variamos até encontrar uma curva visualmente satisfatória. Os valores encontrados foram de aproximadamente $1/4.5$ e $1/8.7$. Este filtro suposto apenas ilustra o processo pelo qual se pode tentar medir as posições do captador e palheta numa gravação de guitarra elétrica. Ainda é necessário considerar filtros lineares no caminho do sinal e, naturalmente, automatizar o processo e avaliar sua precisão e complexidade.

3.2. Visualização dos acoplamentos

Os sinais obtidos foram processados por um banco de filtros FIR projetados com funções sinc moduladas, e com suavização de Lânczos [Hamming, 1989]. A saída dos filtros nos permite visualizar o comportamento de cada modo de vibração. Na figura 2 (à direita), os números na vertical são o número da componente em questão, sendo que a mais grave é uma nota mi ($\simeq 82\text{Hz}$). As curvas mais claras, de cima, são as obtidas do captador. Este sinal foi gravado utilizando-se o captador mais próximo à extremidade da corda, e puxando-a em uma posição semelhante na outra extremidade.

A partir deste gráfico, é possível verificar que alguns dos modos de vibração se comportam como um par de osciladores com acoplamento fraco. Apenas para o segundo e quarto modos de vibração este comportamento não foi visível. O gráfico à direita na figura 2 mostra o espaço de fases do terceiro modo de vibração em um trecho de 3 se-

gundos. O resultado se aproxima de uma elipse em precessão [Elliot, 1980], mas existe uma grande variação da proporção desta elipse no tempo, o que só se poderá explicar com análises matemáticas um pouco mais sofisticadas do que as mencionadas aqui.

4. Conclusões

Demonstramos a possibilidade de se estudar a dinâmica em duas dimensões das cordas de uma guitarra com gravações do seu sinal tradicional e do sinal induzido nas cordas. As gravações mostram uma boa aproximação a um modelo com dinâmica não-linear. A obtenção dos dois modos de vibração contribui mais para o estudo do instrumento do que para a codificação. Mas conhecendo melhor o instrumento poderemos buscar benefícios numa codificação ao restringir os parâmetros de um sistema que utilize somas de senóides para representar sinais [Hermus et al., 2005].

Referências

- Anand, G. V. (1969). Large-amplitude damped free vibration of a stretched string. *J. of the Ac. Soc. of America*, 45(5):1089–1669.
- Carrier, G. F. (1945). On the non-linear vibration problem of the elastic string. *Quarterly of Applied Mathematics*, 3(2):157.
- Elliot, J. (1980). Intrinsic nonlinear effects in vibrating strings. *Am. J. of Physics*, 48(6).
- Fletcher, N. H. and Rossing, T. D. (1991). *The Physics of Mus. Inst.* Springer-Verlag.
- Hamming, R. W. (1989). *Digital Filters*. Dover Publications, Inc., third, 1998 edition.
- Hanson, R. J., Anderson, J. M., and Macomber, H. K. (1994). Measurements of nonlinear effects in a driven vibrating wire. *J. of the Ac. Soc. of America*, 96(3):1549–1556.
- Hermus, K., Verhelst, W., Lemmerling, P., Wambacq, P., and Huffel, S. V. (2005). Perceptual audio modeling with exponentially damped sinusoids. *Sig. Proc.*, 85:163–176.
- L. A. Medeiros, J. Limaco, S. B. M. (2002). Vibrations of elastic strings: Mathematical aspects, part one. *Journal of Computational Analysis and Applications*, 4(2):91–127.
- Lazzaro, J. and Wawrzynek, J. (1999). The mpeg-4 structured audio book. [Online; accessed 14-June-2007].
- Legge, K. A. and Fletcher, N. H. (1984). Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string. *J. of the Ac. Soc. of America*, 76(1):5–12.
- Miles, J. W. (1965). Stability of forced oscillations of a vibrating string. *J. of the Ac. Soc. of America*, 38:855–861.
- Murthy, G. S. S. and Ramakrishna, B. S. (1965). Nonlinear character of resonance in stretched strings. *J. of the Ac. Soc. of America*, 38:461–471.
- O'Reilly, O. and Holmes, P. J. (1992). Non-linear, non-planar and non-periodic vibrations of a string. *JSV*, 153(3):413–435.
- Shankland, R. S. and Coltman, J. W. (1939). The departure of the overtones of a vibrating wire from a true harmonic series. *J. of the Ac. Soc. of America*, 10(3):161–166.
- Smith III, J. O. (2006). *Physical Audio Signal Processing: for Virtual Musical Instruments and Digital Audio Effects*. <http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>.
- Välämäki, V., Huopanemi, J., Karjalainen, M., and Jánosy, Z. (1996). Physical modeling of plucked string instruments with application to real-time sound synthesis. *Journal of the Audio Engineering Society*, 44(5):331–352.