

# Rozamiento en Modelos Físicos con Guías de Onda por Bandas

Juan Reyes

CCRMA, Center for Computer Research in Music and Acoustics

Stanford, California, EUA.

juanig@CCRMA.Stanford.EDU

**Abstract**—Modelos Físicos de instrumentos musicales es una técnica para obtener una fiel representación o señal con las características típicas que describen un sistema acústico en un medio real y con las condiciones necesarias para generar un sonido. Estas condiciones normalmente dependen de una excitación, un medio elástico y un cuerpo resonante. En este artículo se enfoca una excitación por medio de una tabla de valores obtenida a partir del arco de los instrumentos de cuerda. El medio elástico se modela a partir de guías de onda y la resonancia con líneas de retardo y filtros pasa-banda. Este tipo de modelo es útil en Modelos Físicos de instrumentos de percusión frotados con el arco de los instrumentos de la familia del violín. Entre estos se encuentran las barras de una marimba o vibrafono e inclusive recipientes de cristal.

## I. MOVIMIENTO Y FRICCIÓN DEL ARCO CON TABLA DE VALORES

Para el sonido de cuerdas con arco o sonido de orquesta, es necesaria la interacción del arco que está compuesto de un mecanismo de madera al que se sujetan varias fibras que tradicionalmente son pelo de caballo. Para lograr el fenómeno de fricción se adiciona una sustancia coloidal del tipo resina que actúa como goma o pegamento. De esta manera el “pelo de caballo” ocasiona resistencia al movimiento del arco o fricción y también condiciona el momento de vibración de la cuerda (o superficie del medio) con la que se está rozando. Este rozamiento se puede describir como pegamiento y despegamiento y depende de la presión y tensión de las fibras del arco. La presión es función de la fuerza y del tipo de movimiento que utiliza el intérprete al generar un sonido.

Al tocar la cuerda (u otra superficie) con el arco ocurre un tipo de oscilación debida al pegado y despegado que hace vibrar la cuerda, arrastrándola con la misma velocidad que el arco. Cuando la tensión excede un punto determinado, la cuerda tira para el otro lado una y otra vez hasta establecer equilibrio. Este tipo de movimiento en las cuerdas frotadas (rozadas) se denomina como Movimiento de Helmholtz. Los parámetros que afectan este tipo de interacción cuerda-arco incluyen la fuerza norma entre el arco y la cuerda, la velocidad del arco y los coeficientes de fricción [6].

Una simple simulación de este sistema utiliza un diferencial con el valor absoluto entre la cuerda y el arco:  $|V_b - V_s|$ , (i.e. la velocidad del arco menos la velocidad de la cuerda). Esto es inverso al factor de la fuerza del arco ( $F_b$ ), y se utiliza en una tabla de valores o tabla de fricción (figura-1). Cuando ( $F_b = 0$ ), no hay movimiento en el arco y el valor es descartado.

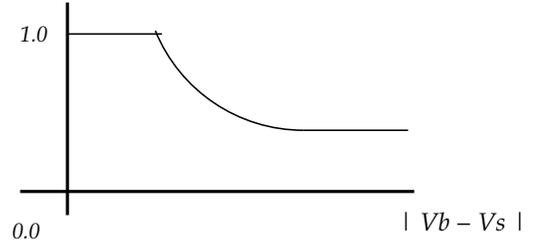


Fig. 1. Función para la tabla de fricción

Los valores de esta tabla son usados como el coeficiente de dispersión en un filtro de guías de onda que simula la vibración de la cuerda. Al calcular la velocidad instantánea en el momento de interacción con la cuerda que es igual a  $\mu V_b + (1 - \mu)V_s$ , si el delta de velocidad es lo suficientemente pequeño implica que  $\mu = 1,0$ , y la velocidad de la cuerda es igual a la velocidad del arco. Al incrementar el delta de velocidad, el coeficiente de fricción decrementa y viceversa. Esto significa que a mayor presión en el arco, mayor el diferencial en la velocidad y por lo tanto la cuerda y el arco permanecen mas juntos o pegados. Este esquema funciona en modelos de instrumentos de cuerda y puede ser aplicado al frotar el arco con barras de una marimba, vibrafono, platillo e inclusive vasos o copas de cristal, la taza tibetana o en otras circunstancias con algunas superficies corrugadas. Un caso especial es la interacción del arco con el serrucho [7].

## II. GUIAS DE ONDA

Filtros basados en guías de onda son de mucha utilidad al construir modelos de computación de sistemas acústicos que poseen un significado físico y que son eficientes para síntesis de audio digital. La característica básica al construir guías de onda es la interpretación exacta de la señales discretas contenidas en un sistema oscilante compuesto de ondas de presión o velocidad. Según esta definición y para este artículo una guía de onda es cualquier medio en el cuál el movimiento ondulatorio puede ser caracterizado por la ecuación de la onda en una dimensión. En el caso de un sistema sin pérdida de energía, las soluciones están dadas en términos de ondas que viajan de izquierda a derecha y de derecha a izquierda en un medio elástico. Las ondas se propagan perpetua-mente siempre y cuando la impedancia de la onda se mantenga constante [11]. Por ejemplo la impedancia  $R$ , en la onda de una cuerda esta dada por  $R = \sqrt{T\rho} = \rho c$ , donde  $\rho$ , es la densidad de la cuerda

(masa por unidad de longitud y  $T$ , es la tensión instantánea de la cuerda.

Cuando hay cambios en la impedancia de la onda, la señal se dispersa. Esto implica que en el punto de discontinuidad, el movimiento de la onda es parcialmente reflejado por un lado y por el otro el movimiento continua su recorrido aunque proporcionalmente dependiendo de un factor dado por la ley de conservación de la energía. Este punto de cambio de impedancia en teoría de señales se conoce como intersección de dispersión. En el caso de la guía de onda de la cuerda, las intersecciones de dispersión se encuentran en los extremos de la cuerda. En la cuerda del violín hay una intersección adicional en el puente y otra en el punto donde el arco roza la cuerda. Los coeficientes del filtro en el punto de interacción con la cuerda se toman de la tabla de valores del movimiento y fricción del arco antes descrito. La figura-2 representa una guía de onda:

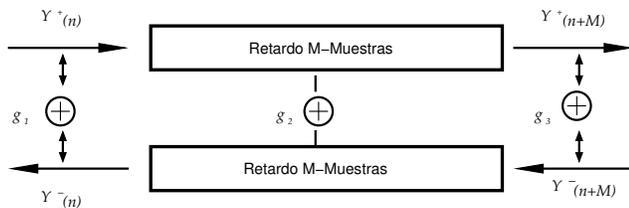


Fig. 2. Implementación de una guía de onda

En esta figura  $Y^+(n)$ , es la función de la onda que viaja a la derecha y  $Y^-(n)$ , la que viaja a la izquierda.  $Y(n+M)$ , es la señal con  $M$ , muestras de retardo y  $g_i$ , las intersecciones de dispersión en donde normalmente hay un cambio de impedancia o ganancia en la vibración de la onda [12].

### III. GUÍAS DE ONDA RESTRINGIDAS POR BANDAS

Al restringir la entrada de una guía de onda con filtros pasa-banda, se limitan las frecuencias de vibración y se cambian las fases del medio que se está simulando. Esto permite acercarse a los modos de vibración de cuerpos como las barras de una marimba o el vibrafono. En condiciones normales el extremo izquierdo o entrada de una guía de onda es la excitación del sistema. Con el rozamiento y fricción entre el arco y alguno de los objetos o instrumentos antes referenciados, las oscilaciones producidas por esta interacción, son la excitación e intersección de dispersión al extremo izquierdo de este modelo. Por lo tanto los coeficientes del filtro en esta intersección dependen de la tabla de valores del movimiento del arco. Esta vibración es subsecuente-mente dividida en señales independientes o bandas que son determinadas por filtros afinados a las frecuencias de los modos de vibración del objeto. La duración en las líneas de retardo también es función de los modos de vibración y de la frecuencia de la onda simulada [5].

### IV. SÍNTESIS DE AUDIO CON GUÍAS DE ONDA POR BANDAS

La síntesis de audio con guías de onda por banda es una técnica para Modelos Físicos de instrumentos originalmente

desarrollada para instrumentos de percusión frotados con el arco de violín [3]. La estructura básica de este sistema puede verse en la figura-3:

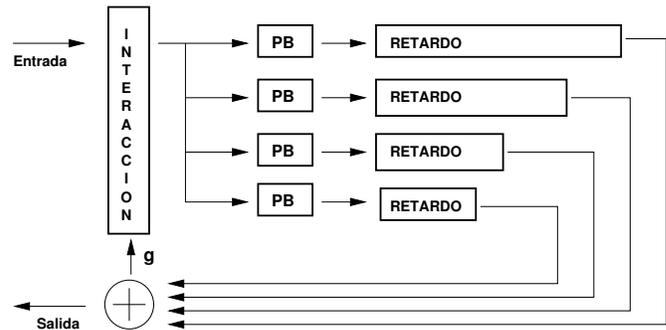


Fig. 3. Esquema de un sistema con Guías de Onda por Bandas

El sistema consiste de un número de filtros pasa-banda (PB) y un bloque o unidad de interacción que toma los parámetros de entrada. La señal proveniente de la interacción es separada en bandas de frecuencia por medio de los filtros PB para ser luego retardada y combinada en una suma, realimentando en parte la unidad de interacción. Esta estructura es una descomposición del algoritmo clásico de la cuerda pulsada, Karplus-Strong [10], en donde el filtro pasa-bajos es reemplazado por las ganancias de los filtros pasa-banda. Para la interacción es importante tener en cuenta que al aplicar una fuerza transversal  $f(x, t)$ , sobre el medio y en particular al utilizar una sola frecuencia  $y = Y(x)e^{j\omega t}$ , la velocidad de la onda puede ser calculada al considerar  $f(x, t) = 0$ , y  $a = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ , simplificando el resultado como  $v = \sqrt{a\omega}$ .  $EI$ , es la rigidez del medio y  $\rho A$  es el término de masa por unidad de longitud.

### V. PARÁMETROS DEL MODELO

En un espacio de parámetros (vectores que controlan este modelo) hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Número de filtros pasa-banda y retardos.
- Longitud de las líneas de retardo.
- Frecuencias de afinación de los filtros.
- Contenidos y parámetros de la unidad de interacción (tabla de rozamiento).

Las primeras tres categorías corresponden al contenido espectral. De hecho la frecuencia de afinación de cada filtro pasa-banda y la frecuencia del filtro "comb" de realimentación asociado con las líneas de retardo, deben ser la misma. Por lo tanto la línea de retardo y el filtro PB se pueden considerar en un solo bloque que define el aporte espectral.

### VI. ALGORITMO

El algoritmo original presentado por Essl y Cook [3], está disponible en varios paquetes o ambientes de síntesis de audio y tratamiento de señal en tiempo real. Estos son: El Synthesis Toolkit (STK) de Cook y Scavone, PerColate de Truemann y Pd de Puckette y Matthes. Adicionalmente *BandedWG.ins* es la aplicación de este algoritmo en Common Lisp Music (CLM) desarrollado por Juan Reyes (2004) con el

objetivo de integrar este modelo a otro programa de composición algorítmica [Taube, 2003]. El instrumento en CLM utiliza el método de tabla de valores para generar señal de audio a frecuencias de muestreo con calidad de Disco Compacto. Como ha sido descrito, la señal es distribuida en paralelo a varias guías de onda dependiendo el número de modos del medio en vibración y del tipo de sonido que se quiere generar. Se ha probado hasta doce modos característicos del análisis de vibración en la taza tibetana que es un instrumento típico de la China y el oriente. La salida de cada guía de onda es mezclada para producir una señal total y multiplicada por un factor de ganancia para retornar al sistema como reflexión. Las frecuencias de los modos de vibración en diferentes objetos han sido obtenidas por Cook y Essl al medir respuestas de impulso en cada uno de los objetos [2] [4].

Hay algunas diferencias con los algoritmos de los ambientes de síntesis y tratamiento de señal en tiempo real ya mencionados. Primordialmente un archivo de partitura puede ser generado con vectores que controlan el modelo. Cada vector contiene variables como frecuencia, duración, presión del arco y un factor para espacialización. Los modos de vibración de cada medio han sido previamente almacenados en un arreglo o estructura de datos. De esta manera en el archivo partitura, solo se especifica el objeto o medio que se quiere excitar. Sin embargo cada modo puede ser especificado por separado, concentrándose en anchos de banda pequeños para la optimización de frecuencias formantes y resonancias [8]. *BandedWG.ins* también puede ser utilizado como otra función en Lisp mejorando la integración con programas de tratamiento de señal en los que el sonido es rendereado y detallado con alta fidelidad. Este tipo de aproximación es muy utilizada en composición de obras para música en cinta magneto-fónica, con proyección multi-fónica o con medios mixtos.

## REFERENCES

- [1] Perry Cook. *Real Sound Synthesis for Interactive Applications*. AK Peters Ltd. , Natick MA., USA, 2002.
- [2] G. Essl and P. Cook. Measurements and simulation of bowed bars. *Journal of the Acoustical Society of America*, July 2000.
- [3] G. Essl and P. Cook. Banded waveguides: Towards physical modeling of bowed bar percussion instruments. In *International Computer Music Conference, Beijing*, Oct. 1999.
- [4] G. Essl and P. Cook. Banded waveguides on circular topologies and of beating modes: Tibetan singing bowls and glass harmonicas. In *Proc. Intl. Computer Music Conference, Gothenborg, Sweden*, Sept. 2002.
- [5] P. Cook G. Essl, S. Serafin and J. Smith. Musical applications of banded waveguides. *Winter 2004 Computer Music Journal*, 28(1), 2004.
- [6] J. O. Smith III. *Techniques for Digital Filter Design and System Identification with Application to the Violin*. PhD thesis, Stanford University, 1983.
- [7] J. Kojs S. Serafin. The voice of the dragon. a physical model of a rotating corrugated tube. In *Proc. DAFX 2003, London*, 2003.
- [8] J.O.Smith III S. Serafin, P. Huang. The banded digital waveguide mesh. In *Proc. Mozart meeting, Barcelona*, November 2001.
- [9] J.O. Smith III S. Serafin P. Huang S. Ystad, C. Chafe. Analysis and synthesis of unusual friction driven musical instruments. In *Proc. ICMC 2002, Gotheborg, Sweden*, September 2002.
- [10] J. O. Smith. Synthesis of bowed strings. In *Proceedings of the 1982 International Computer Music Conference*. Computer Music Association, 1982.
- [11] J. O. Smith. Waveguide filter tutorial. In *Proceedings of the 1987 International Computer Music Conference, Champaign-Urbana*, 1987.
- [12] Julius Smith. *Physical Audio Signal Processing*. W3K Press, CCRMA, Stanford CA, USA, 2004.

- [13] Rick Taube, editor. *Notes from the Metalevel*. Swets Zeitlinger Publishing, The Netherlands, 2004.