

UNIVERSIDAD DE AVEIRO



**MODELADO DIGITAL DE GUÍAS DE ONDAS
PARA
SÍNTESIS DE SONIDO**

Proyecto fin de carrera

**Ingeniería técnica de Telecomunicaciones
especialidad sonido e imagen**

Autor: Noé Martínez Martínez
Tutor: José Viera y Guilherme Campos (Universidad de Aveiro)
Co-tutor: José Ignacio Moreno (Carlos III)

Aveiro, Junio de 2009

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este proyecto ha sido orientado a presentar una aplicación detallada de un modelo digital de guía de ondas (Digital Waveguide Model - DWM) en una dimensión (1-D), usando como lenguaje de programación MATLAB. En el interior se explica paso a paso todas las partes que componen un modelo de guía de onda digital implementado en cualquier lenguaje de programación, acompañado de fórmulas y cálculos matemáticos necesarios.

La segunda parte del proyecto es para experimentar con la implementación de código del modelo digital de ondas usado como sintetizador de sonidos, y buscando respuestas a cómo nuestro modelo trabaja. Analizando los resultados y la comprensión de los cambios aplicados a los parámetros de código que caracterizan el modelo, al final seremos capaces de comprender la utilidad y versatilidad de los modelos digitales de guía de ondas en los instrumentos musicales o síntesis de voz.

Como última parte crearemos un código que traducirá notas musicales y duraciones (partituras) de archivos de texto y conseguirá reproducir estas partituras con diferentes configuraciones del modelo digital, con lo que simulará el sonido de diferentes instrumentos musicales.

2. TEORÍA

Primera definición hay que hacer es definir el componente principal de todo modelo digital de guía de ondas acústica, la línea de retardo.

Línea de retardo digital

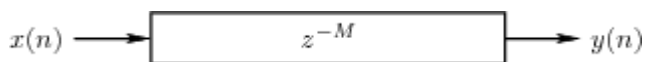


Figure 2.1: The M -sample delay line.

$n \equiv 0, 1, 2, \dots, N$
 $x(n) \equiv$ señal de entrada $\rightarrow x(n) \equiv 0$ for $n < 0$
 $M \equiv$ Número de retardos
 $y(n) \equiv$ Señal de salida

$$y(n) = x(n - M), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Utilizamos líneas de retardo para simular el desplazamiento lineal horizontal de las ondas que viajan en la guía de ondas. Una onda viajera es cualquier tipo de onda que se propaga en una sola dirección sin cambiar casi de forma.

2.1 Ondas viajeras

La ecuación de una onda viajera en una cuerda estrecha en una dimensión se deriva de

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2},$$

donde $c = \sqrt{T/\epsilon}$ es la velocidad de la onda viajera en la cuerda, T es la tensión, y ϵ es la densidad de lineal de la cuerda.

La solución de la ecuación de onda, fue publicada por d'Alembert en 1747. Tiene la forma general:

$$y(t, x) = y_r(t - x/c) + y_l(t + x/c),$$

Para funciones arbitrarias $y_r(\cdot)$ y $y_l(\cdot)$. En función de $(t - x/c)$, puede interpretarse como un onda con forma fija viajando hacia la derecha (dirección x positiva) y una función $(t + x/c)$, puede interpretarse como una onda de forma fija viajando hacia a izquierda (dirección x negativa), ambos con velocidad c.

Necesitamos muestrear las ondas en tiempo y en espacio para llevar el modelo a un dominio discreto.

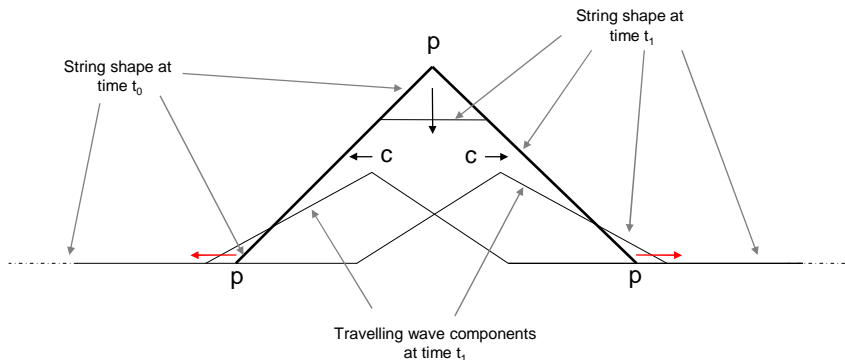
$$\begin{aligned} x &\rightarrow x_m = mX \\ t &\rightarrow t_n = nT, \end{aligned}$$

Simplificando las ecuaciones nos queda:

$$y(t_n, x_m) = y^+(n - m) + y^-(n + m).$$

Que gráficamente corresponde la figura siguiente:

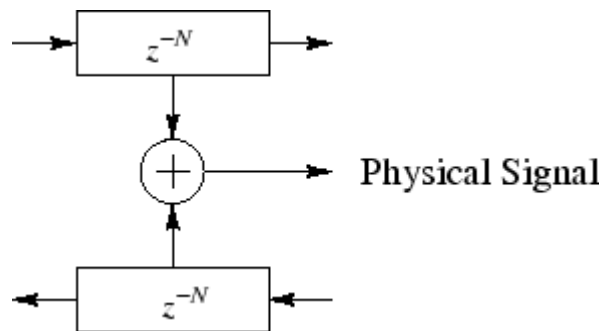
En t_0
el



desplazamiento inicial es el triángulo grande que a continuación se divide en dos triángulos que sumados equivaldrían al grande, pero representando el tiempo t_1 . Cuando las ondas viajeras (triángulos de la misma altura) se separan totalmente el valor en la cadena será cero, pero habrá dos triángulos con la mitad de la amplitud de la del triángulo en t_0 que se desplazan a la izquierda y la derecha con velocidad c hacia el infinito.

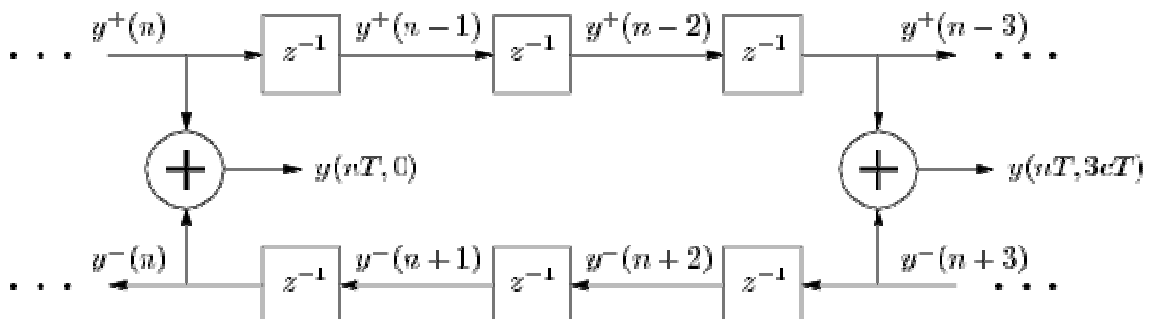
2.2 Salida física

La salida física se muestra sumando componentes de las ondas viajeras. Las dos ondas viajeras en un modelo digital de guía de ondas son componentes de una vibración acústica.

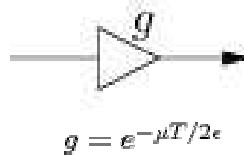


2.3 Modelo digital

El término $y_r[(n - m) T] = y^+(n - m)$ puede interpretarse como la salida de una línea de retardo con m retardos y con entrada $y^+(n)$. Asimismo, el término $y_l[(n + m) T] = y^-(n + m)$ puede ser interpretado como la entrada a una línea de retardo con m retardos y de salida $y^-(n)$.

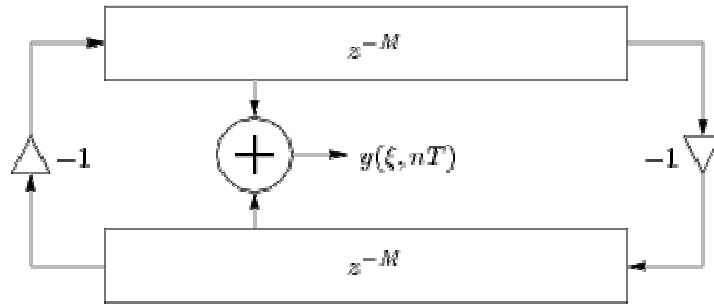


Este es un modelo de guía de ondas sin pérdidas. Podríamos añadir pérdidas si entre cada bloque de retardo añadiéramos una atenuación de la onda mediante un factor g .



En la práctica hemos implementado este tipo de modelo con pérdidas.

Para simular la pérdida de las reflexiones al final de la guía de ondas necesitaríamos una estructura similar a esta:



En este caso simularía una reflexión perfecta. Si cambiáramos el coeficiente de -1 por otro entre 0 y -1 (K), tendríamos reflexiones con pérdida. Los bloques inferior y superior indican el número de líneas de retardo (M) que tendría el sistema, y sería la salida física en un punto de la guía de ondas.

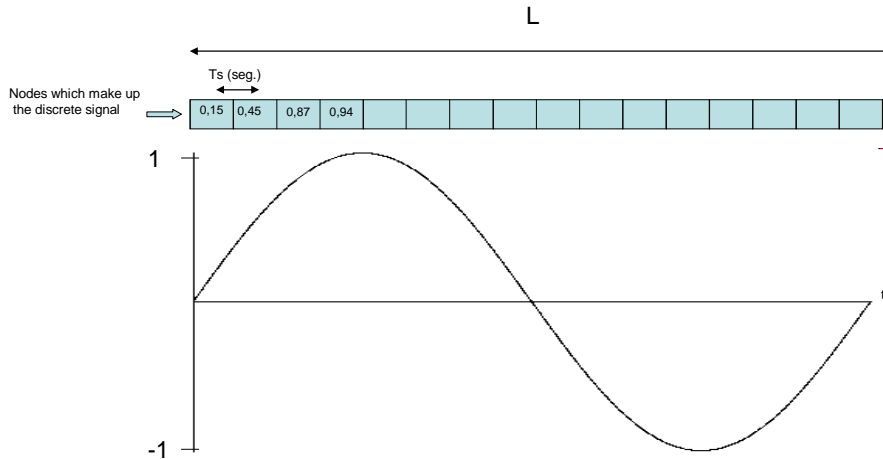
3. CÓDIGO E IMPLEMENTACIÓN

De acuerdo con los elementos mencionados en la parte anterior de teoría, llega la hora de diseñar e implementar en MATLAB el modelo digital de guía de ondas.

Primero diseñaremos un modelo de referencia, es decir un modelo con una serie de características de la guía de ondas y de los parámetros que a ella y al viaje de las ondas afectan.

3.1 Creación de la señal viajera

Lo más importante de esta parte es primero saber que seña vamos a insertar en la guías de ondas (triangulo, pulso, ruido blanco, gaussiana...). Cuando sepamos esto habrá que elegir una frecuencia de muestreo (F_s) y con ello un periodo de muestreo (T_s) con el que muestreamos la señal preparándola para insertarla en la guía digital de ondas.

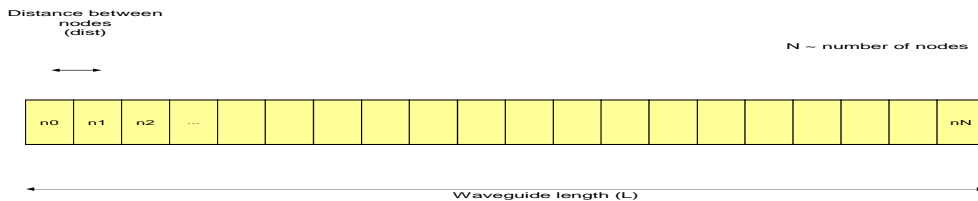


En nuestro modelo de referencia la frecuencia de muestreo será 44.1 kHz audio CD calidad estándar. Respecto a la señal de entrada utilizaremos un triángulo.

3.2 Creación de la guía de ondas

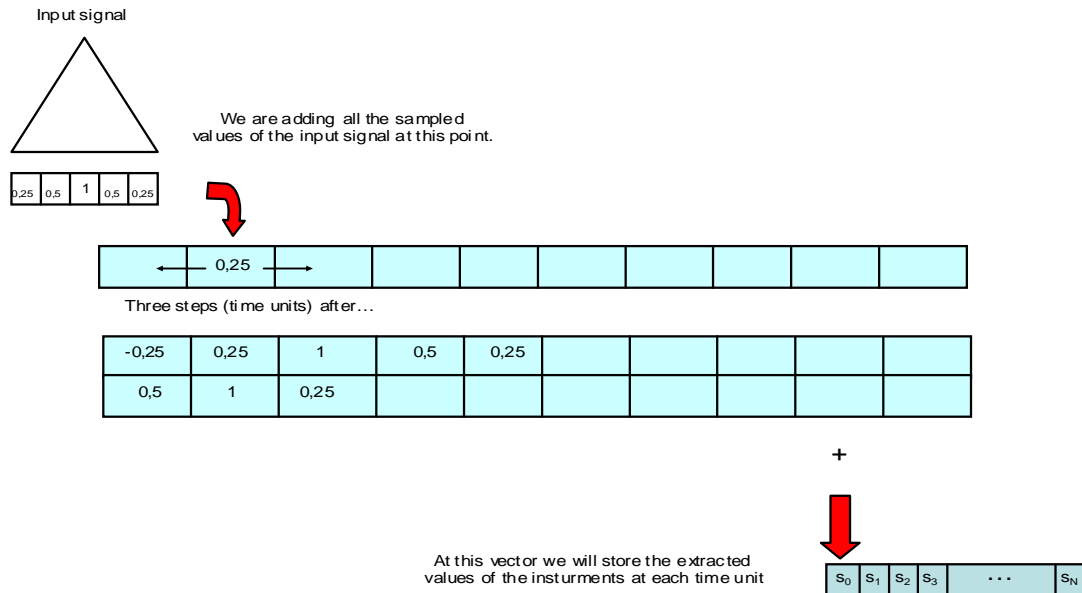
Los dos primeros parámetros a elegir para implementar la guía de ondas son la velocidad con la que viajará la onda por la guía de ondas (c) y la longitud que tendrá esta (L). Mediante estos dos parámetros usando el periodo de muestreo se calculará el número y la distancia entre nodos ($dist$) de nodos que deberá tener la guía, para posteriormente insertar cada muestra de la señal a insertar en estos nodos.

En la figura siguiente se definen las variables comentadas anteriormente y se muestra como sería la guía de ondas. En este caso cada nodo tiene solo un nivel, en la práctica mas adelante mostraremos que necesitamos dos niveles, uno para la componente de la onda que viaja a la derecha y otro para la que viaja a la izquierda.



Nuestro modelo de cómo longitud 0.4 m. y la onda viajara a la velocidad del sonido en aire seco a 20°C, 343m/s.

Otro punto importante en el comportamiento del modelo es dónde insertaremos la señal de entrada, y donde recogeremos la salida física que generará el sonido sintetizado. Estos dos parámetros tienen gran capacidad de modificar el sonido de salida.



En nuestro modelo de referencia la señal ha sido insertada en el 10% de la guía de ondas y la salida ha sido extraída al 90%.

Respecto a la reflexión en los finales de la guía el coeficiente de reflexión comparado a la amplitud de la onda reflejada con la amplitud del incidente.

$$R = \frac{A_r}{A_i}$$

En nuestro modelo de referencia $R = 0.97$ por tanto la señal reflejada será atenuada un 3%. Modificaremos este coeficiente en función del material o del cambio de medio que se da en los finales de la onda.

También hay que definir número de pasos o movimientos que dará la onda viajando a lo largo de la guía de ondas. Este parámetro lo llamaremos N mediante una simple fórmula transformaremos este número de pasos del viaje de la onda en el tiempo que estará la onda viajando en la guía. N , puesto que es el número de movimientos de la onda dentro de la guía corresponderá al número de muestras de la señal extraída en el punto de extracción, puesto que a cada movimiento se crea un nuevo valor de la señal de salida.

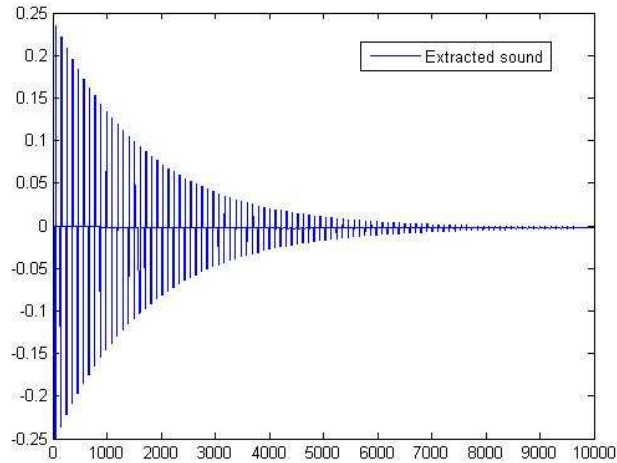


Figure 3.2.1 Señal de salida extraída

Dados estos parámetros de referencia, tendremos su salida correspondiente. La salida será una señal que corresponderá a un sonido. Con su respectivo espectrograma, en el cual el eje X es el tiempo en segundos y el Y es la frecuencia. Las zonas claras son las de mayor potencia sonora.

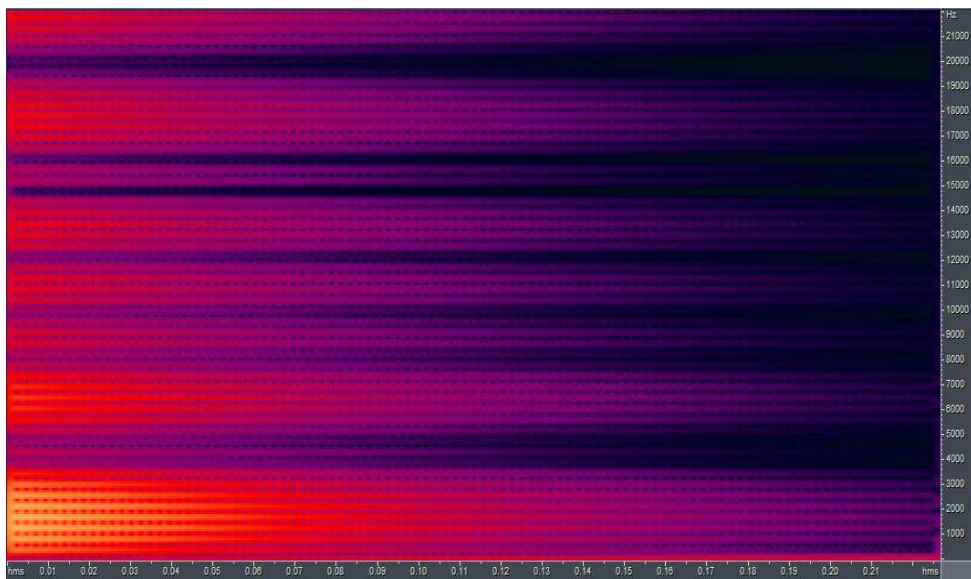


Figura 3.2.2. Espectrograma

4. MODO DE FUNCIONAMIENTO

Para demostrar que toda la teoría aplicada a modelos de guía de ondas digitales funciona, debemos comprobar que realmente nuestra guía de ondas se comporta consecuentemente a la teoría.

A continuación se desarrolla un ejemplo práctico de una inserción de una señal digital en una guía de ondas digital.

Primero debemos tener claro el esquema con el que trabajamos. Aquí hay un ejemplo del diagrama de bloques del modelo que utilizaremos para el ejemplo.

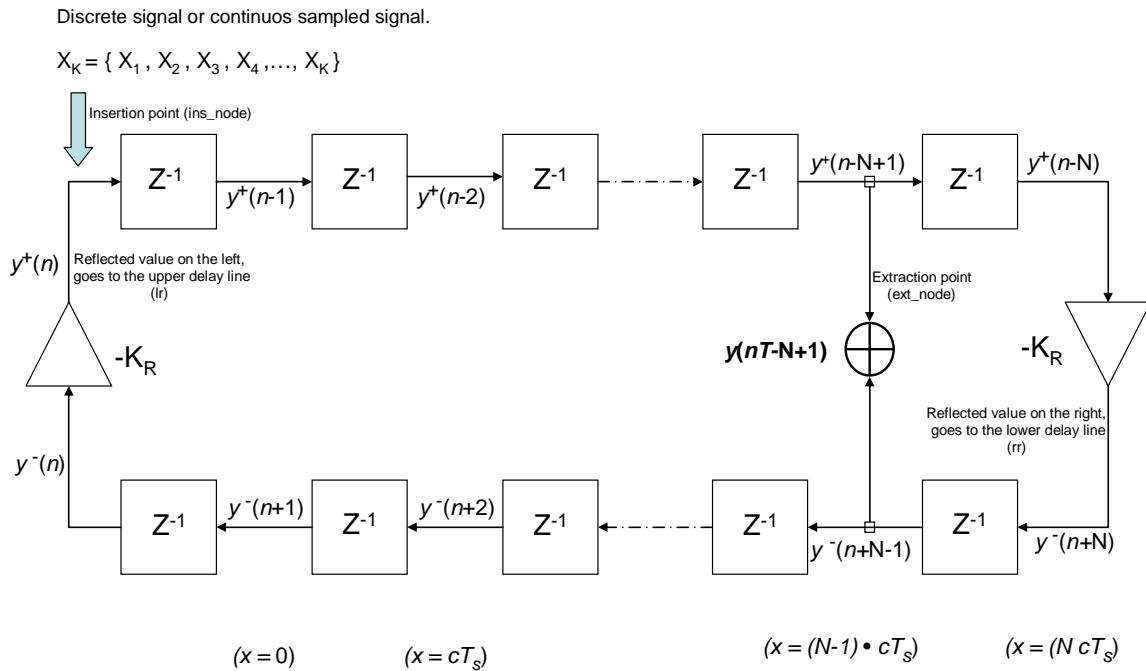


Figura 4.1 Diagrama de guía de ondas sin pérdida

Es un modelo sin pérdidas (lossless), dado que no hay impedancias entre los bloques de retardo, en el que en ambos finales tiene una atenuación de la onda debido a reflexión en relación al coeficiente K_R .

Con el fin de ajustar el modelo, la entrada debe ser una señal digital. Se puede obtener de una señal analógica por muestreo A/D conversión.

A continuación mostraremos un pequeño y arbitrario ejemplo, que pueda demostrar matemáticamente que la teoría funciona en un modelo de ondas real y compare el resultado al del modelo creado por nuestro código en MATLAB.

4.1 Funcionamiento paso a paso

El diagrama siguiente es físicamente similar al anterior pero en este caso, en cada nodo se muestra el recorrido de la señal y el valor actual de cada nodo por instante de tiempo (paso).

Al insertar la señal en el nodo correspondiente. El valor de la señal se divide en dos componentes, una que viaja de izquierda a derecha y otra que viaja de derecha a izquierda. Cada componente lleva la mitad de amplitud del valor total de la señal.

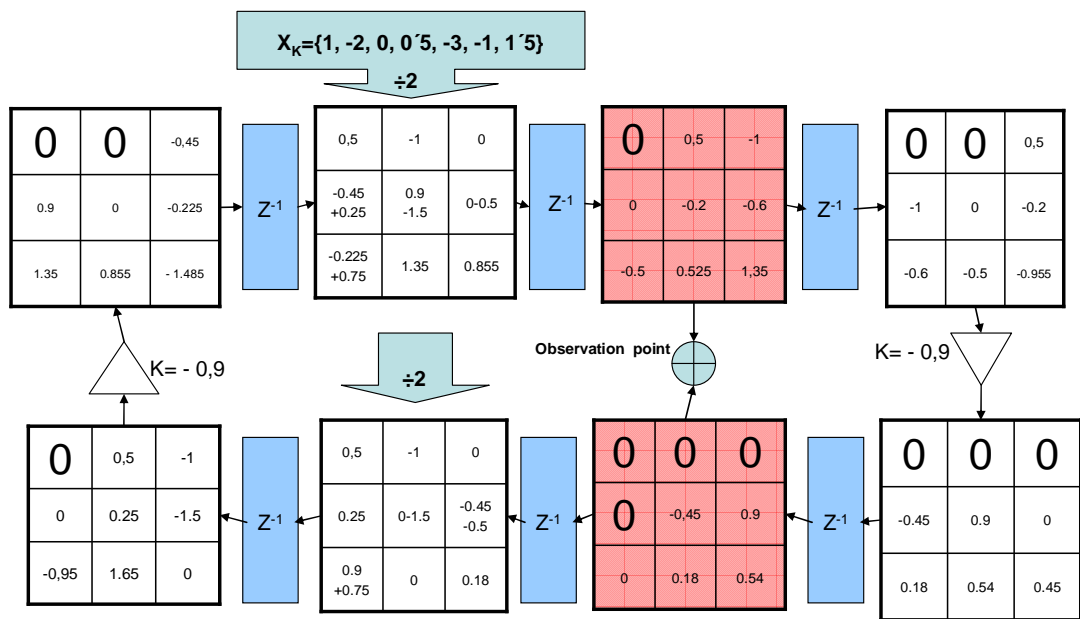


Figura 4.1.1 Diagrama de estados de la guía de onda (9 pasos)

El ejemplo muestra el viaje de la señal insertada en un modelo de cuatro nodos haciendo nueve movimientos. En los cuatro bloques de arriba se muestra la componente de la onda que viaja de izquierda a derecha en cada nodo, en los cuatro bloques inferiores se muestra la componente sentido derecha-izquierda.

En cada bloque tenemos nueve divisiones. Estas divisiones muestran el valor de la componente del nodo en cada instante de tiempo. El orden de arriba abajo y en cada línea de izquierda a derecha, por tanto el primer valor será el superior izquierdo y el último el inferior derecho.

Los cálculos han sido hechos a mano sin utilizar ningún tipo de código o programa, precisamente para contrastarlos con los que obtendrá nuestro guía de ondas en MATLAB.

En la salida física o punto de observación tendremos el siguiente resultado.

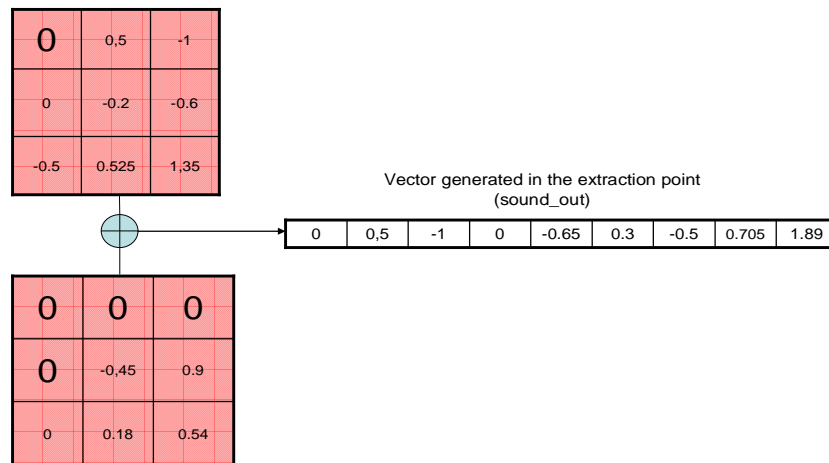


Figura 4.1.2 Señal de salida (punto de observación)

La variable *sound_out* sería el resultado de la salida en el punto de observación, es decir sería la señal de salida.

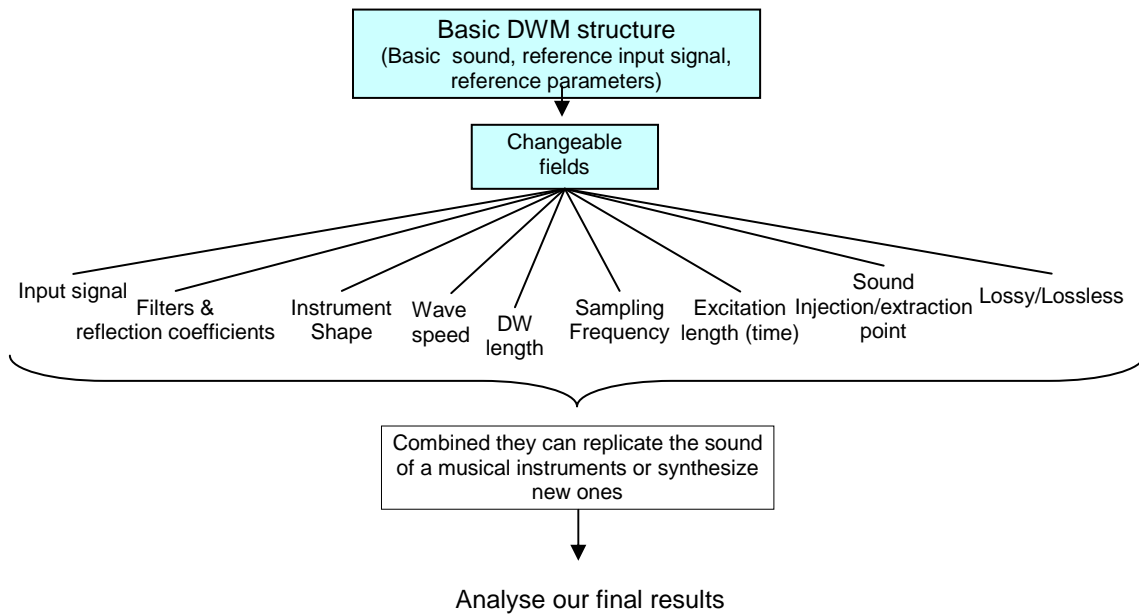
Name	Value
Kr	0.9
ext_node	3
ins_node	2
k	9
lr	1.485
nodes	4
rr	-0.45
signal	[1 -2 0 0.5 -3 -1 1.5]
sound_out	[0 0.5 -1 0 -0.65 0.3 -0.5 0.705 1.89]
steps	9
yleft	[0 0.18 0.54 0.45]
yright	[-1.485 0.855 1.35 0.525]

Vemos que los cálculos a mano coinciden con el resultado de ejecutar nuestro código en MATLAB con los mismos parámetros que los del ejemplo.

5. TEST Y EXPERIMENTACIÓN

A partir de nuestro modelo de referencia comenzaremos a hacer cambios en la configuración del funcionamiento de la guía de ondas. Así podremos comprobar de qué manera afecta cada factor al sonido de salida y podremos ajustar modelos para crear sonidos que se asemejen a algún instrumento, un sonido peculiar o simplemente sintetizar algún sonido que nos parezca interesante.

Conceptualmente los principales parámetros o factores que modifican el resultado del modelo son los que se indican a continuación.



Cada uno de estos factores por separado al ser modificados en calidad o cantidad, genera un cambio en la percepción de la señal de salida.

Aquí empieza a fase de experimentación. El objetivo es encontrar configuraciones del modelo que den algún sonido interesante o agradable al oído humano. También intentar simular algún instrumento musical si fuera posible.

Tras muchas pruebas usando diferentes señales de entrada, mayor duración o menor del sonido, modificando la longitud para cambiar el tono a la salida, usando filtros que dieran naturalidad y distintos coeficientes de reflexión, y usando modelo con perdidas o sin perdidas y añadiendo reverberaciones a la señal de salida, conseguimos varias configuraciones que nos dieron sonidos interesantes.

5.1 Demo

Para hacer una demostración de que realmente hemos conseguido hacer un sintetizador de sonidos. Hacemos una pequeña demostración con un traductor de partituras. Para que con un sonido configurado por nosotros con nuestro DWM, pueda tocar notas y figuras de una partitura.

El traductor lee un archivo *.txt* en el que anteriormente hemos traducido la partitura y que será ejecutado por un archivo *placer (play.m)* en el que el código será ejecutado con una longitud de la guía de ondas y una duración, generando así la melodía de la partitura.

6. CONCLUSIONES

La idea principal adquirida con este proyecto, con la bibliografía leída y el trabajo llevado a cabo es que, sonidos artificiales y sonidos simulando algún modelo físico pueden ser fácilmente implementados usando modelado digital de guías de ondas. Esta es la razón por la que actualmente la mayoría de los nuevos sintetizadores de audio utilizan esta tecnología.

Otro hecho es que igual que es fácil generar un buen sonido con DWM, crece mucho la dificultad para obtener el sonido natural de instrumentos musicales. Los resultados han sido buenos pero en lo relativo a naturalidad o realismo ha sido muy difícil mejorar el modelo.