

Estimación y análisis de la simetría de las ondas de variación de frecuencia y de amplitud con respecto a la calidad de vocales sostenidas en voces sobresalientes

Estimation and analysis of the relationship between the symmetry of the frequency and amplitude variation waves on the quality of sustained vowels from outstanding voices

Díaz, José-Antonio

Departamento de Electrónica y Comunicaciones. Facultad de Ingeniería. UC
Naguanagua 2005, Venezuela
jadiaz@uc.edu.ve

Howard, Rothman¹ y Arroyo, Antonio²

¹Departamento de Ciencias y Desordenes de la Comunicación. Universidad de Florida. UF

²Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación. Universidad de Florida. UF
Gainesville 32611, USA

Recibido: 11-02-2010

Revisado: 14-09-2010

Resumen

Para la realización de este trabajo se seleccionaron diez muestras de voz de vocales sostenidas provenientes cantantes sobresalientes, de las cuales se extrajeron las ondas de variación de frecuencia y de variación de amplitud. Luego se desarrollaron e implementaron algoritmos matemáticos para medir cuantitativamente la simetría de las ondas. Estos algoritmos se utilizaron para generar un total de cuarenta y un parámetros, de los cuales se seleccionaron doce. A estos doce parámetros se le realizó un análisis estadístico, para determinar como influía la simetría de las ondas en la calidad de las muestras.

Palabras clave: Vibrato, modelado de la voz, procesamiento del habla.

Abstract

In this research ten samples of sustained vowels from outstanding singers were chosen, from which the frequency and amplitude variation waves were extracted. Then, mathematical algorithms were developed and implemented in order to measure objectively the wave symmetry. These algorithms were used to generate forty one parameters, from which twelve were selected. A statistical analysis was performed on these twelve 12 parameters in order to find the relationship between the wave symmetry and the sample quality.

Key words: Vibrato, speech models, speech processing.

1 Introducción

Las ondas de variación de frecuencia y amplitud en vocales sostenidas provenientes de voces sobresalientes (vibrato) han sido estudiadas por muchos años. En los años 1930, el Dr. Carl Seashore realizó el primer y más detallado estudio de estas señales (Seashore, 1932 y 1936). Desde ese

entonces solo se han realizado pocos y aislados esfuerzos para estudiar este tipo de señales. Las técnicas de procesamiento de señales digitales se desarrollaron mucho tiempo después de la época en que el Dr. Carl Seashore realizó sus estudios, sin que hasta el momento se hayan aplicado en profundidad estas técnicas, las cuales, mediante una selección y uso apropiado, permitirían extraer información de las

señales de voz, para luego aplicar los resultados obtenidos a los modelos de voz actuales.

Trabajos más recientes (DeJonckere y col., 1995), (Hakes, J. y col., 1987 y 1988), (Horii, 1989); (Maher y col., 1990); (Shipp y col., 1984), y (Sundberg, 1978), solo se limitan a la extracción de la onda de variación de frecuencia de la voz, y no aplican las técnicas de procesamiento digital de señales para el análisis de los datos. Otros trabajos (Díaz, 1995 y 1998); (Rothman y col., 2000), y (Amir y col., 2006), utilizan algunas de las técnicas de procesamiento digital de señales para analizar la onda de variación de frecuencia, pero no extraen ni analizan la onda de variación de amplitud.

2 Procesamiento del habla en función del tiempo

La Fig. 1 muestra una secuencia de muestras que representan una señal de voz típica muestreada a 22.050 Hz. Es evidente de esta figura que las propiedades de la señal de voz cambian con el tiempo. Por ejemplo, la excitación cambia de entre habla sonora y no sonora, hay variación significativa en la amplitud pico de la señal, y hay una variación considerable de la frecuencia fundamental dentro de las regiones sonoras. El hecho de que estas variaciones sean

tan evidentes en una gráfica de la forma de onda, sugiere que técnicas sencillas de procesamiento en el dominio del tiempo deben ser capaces de proveer representaciones útiles de características de la señal tales como intensidad, modo de excitación, frecuencia fundamental, y aún posiblemente parámetros del tracto bucal, tales como la frecuencia de los formantes.

La suposición principal en la mayoría de los esquemas de procesamiento del habla es que las propiedades de la señal de voz cambian relativamente lentamente con el tiempo. Esta suposición conlleva a una variedad de métodos de procesamiento en "tiempo corto", en los cuales segmentos cortos de la señal de voz se aíslan y procesan como si fueran segmentos cortos de un sonido sostenido con propiedades fijas. Esto se repite usualmente de forma periódica, tan frecuentemente como se desee. Frecuentemente estos segmentos cortos, los cuales a veces se llaman marcos de análisis, se solapan unos con los otros. El resultado del procesamiento de cada marco, puede ser un número único, o un conjunto de números. Por lo tanto, este procesamiento produce una nueva secuencia dependiente del tiempo, la cual puede servir como una representación de la señal de voz.

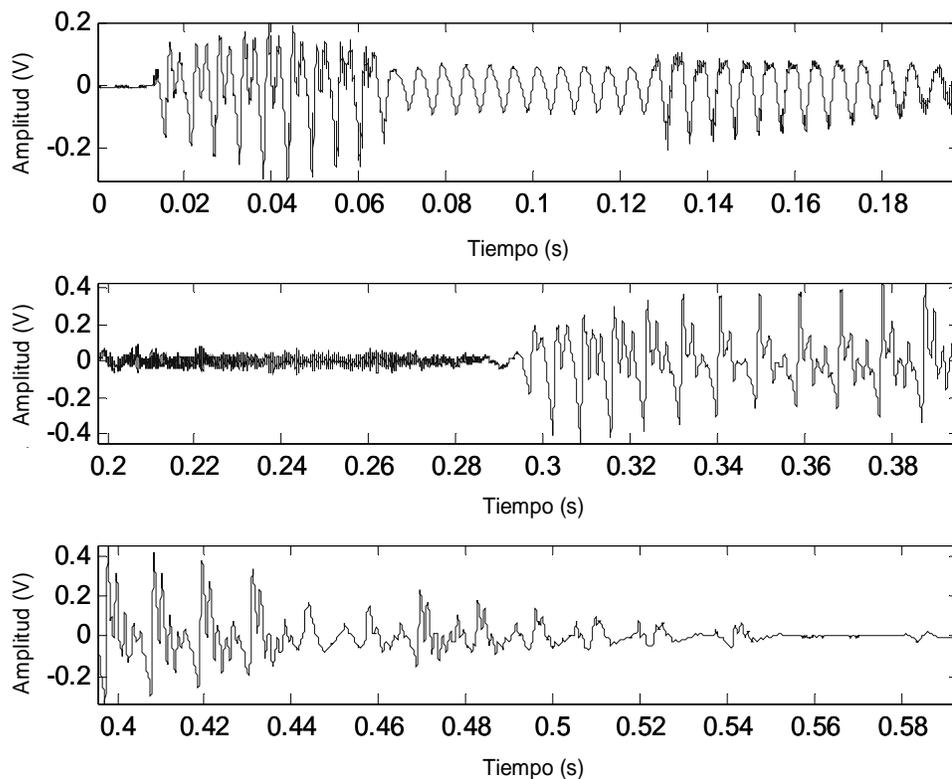


Fig. 1. Muestras de una forma de onda típica de voz a una tasa de muestreo de 20050 Hz

La mayoría de las técnicas de procesamiento en tiempo corto, así como la representación de Fourier en tiempo cor-

to, pueden representarse matemáticamente de la forma:

$$Q_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T[x(m)]w(n-m) \quad (1)$$

La señal del habla (posiblemente filtrada linealmente para aislar una banda de frecuencias) se sujeta a una transformación $T[\]$, la cual puede ser lineal o no, la cual puede depender de algún parámetro ajustable o conjunto de parámetros. La secuencia resultante, es entonces multiplicada por una ventana en un instante correspondiente a la muestra de índice n . El producto es entonces sumado para todos los valores. Usualmente la ventana es de duración finita, aunque este no es siempre el caso. Los valores Q_n son por lo tanto una secuencia de valores promedio ponderado locales de la secuencia $T[x(n)]$.

La energía en tiempo corto de una señal es un ejemplo simple, el cual ilustra las ideas discutidas anteriormente. La energía de la señal en tiempo discreto se define como:

$$E = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^2(m) \quad (2)$$

Tal cantidad tiene poco significado o utilidad para voz ya que da poca información acerca de las propiedades dependientes del tiempo de la señal de voz. Una definición simple de la energía de tiempo corto es:

$$E_n = \sum_{m=n-N+1}^n x^2(m) \quad (3)$$

Esto es, la energía de tiempo corto en una muestra n , es simplemente la suma de los cuadrados de las N muestras $n - N + 1$ hasta n . En términos de nuestra expresión general, ecuación (1), la operación $T[\]$ es simplemente el cuadrado, y:

$$\begin{aligned} w(n) &= 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ w(n) &= 0 & \text{para otros valores.} \end{aligned} \quad (4)$$

En el cálculo de la secuencia de energía en tiempo corto se observa que la ventana literalmente se desliza a lo largo de la secuencia de valores cuadráticos (en general $T[x(n)]$), seleccionando el intervalo a involucrar en el cálculo.

Una característica importante de la expresión general (1), es que esta es exactamente de la forma de la convolución discreta de la ventana $w(n)$ con la secuencia $T[x(n)]$. Así, Q_n puede interpretarse como la salida de un sistema lineal e invariante en el tiempo con respuesta impulso $h(n) = w(n)$.

3 Selección de las muestras a utilizar como entrada a los programas

Para la selección de las muestras se realizó una búsqueda en la base de datos del laboratorio de Fonética Acústica del Departamento de Ciencias y Desordenes de la Comunicación de la Universidad de Florida, de donde se

seleccionaron diez muestras de vibrato bueno y deficiente, proveniente de cantantes de ópera con voces sobresalientes. Las muestras seleccionadas para este estudio se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Muestras utilizadas en este estudio

Cantante	Muestra	Calificación
Jeannette MacDonald	Jmac09	Buena
Luciano Pavarotti	Pav68	Buena
Giuseppe Di Stefano	Dist08a_1944aa	Buena
Plácido Domingo	Pldom44_1968aa	Buena
Glanz Leib	Leib 15	Buena
Jeannette MacDonald	Jmac05	Deficiente
Conchita Supervia	Superv24	Deficiente
Bežion Miller	Bz55	Deficiente
María Callas	Mc22_1958_aa	Deficiente
Laura Green	Lg02	Deficiente

4 Selección del software a utilizar para la extracción del vibrato

Las ondas de variación de frecuencia y de variación de amplitud se definen como las ondas de frecuencia fundamental y amplitud instantánea de la señal de voz, con respecto a su valor promedio. Para la selección del software a utilizar extracción de las ondas de variación de frecuencia y de variación de amplitud, se llevó a cabo una discusión sobre los métodos y programas más apropiados para la extracción de señales provenientes de cantantes, entre el Dr. Howard Rothman, el Dr. Antonio Arroyo, el Dr. Rahul Shrivastav, y el autor principal de este manuscrito, donde llegamos a la conclusión de que deberíamos utilizar el software MMSV (Diaz, 1998), ya que hasta ese momento no teníamos conocimiento de otro software que pudiera producir resultados similares o mejores.

5 Elaboración de software para el análisis de las señales y la extracción de parámetros

Para el análisis de las ondas de variación de frecuencia y de variación de amplitud se desarrolló el programa analysis6. El programa analysis6 primero calcula el espectro de la onda de vibrato en frecuencia, y utiliza un filtro FFT de 4 Hz, para separar los espectros del modelo y de la señal de error. Este filtrado se obtiene al multiplicar en el dominio de la frecuencia, el espectro de la señal a filtrar por la respuesta en frecuencia del filtro, tal como lo indica la ecuación 5:

$$Y(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega})X(e^{j\omega}) \quad (5)$$

La Fig. 2 muestra el espectro de la señal real de vibrato en frecuencia, y la Fig. 3 muestra el espectro del modelo como una línea continua, y el espectro del error como una línea punteada. Todos estos espectros pertenecen a la muestra Jmac09.wav. En Fig. 3 se puede apreciar como el modelo solo contiene el pico dominante de la señal de vibrato en frecuencia, y el espectro del error contiene las componentes de baja frecuencia.

Luego, el programa *analysis6* calcula el modelo y la señal de error en el dominio del tiempo, y los presenta en una figura. En la Fig. 4 se observan las ondas en el dominio del tiempo, resultantes de aplicar *analysis6* a la muestra *Jmac09.wav*. En esta figura, se observa la señal real de vibrato en línea continua, la señal sintetizada en línea punteada, y la señal de error en líneas interrumpidas. En la señal de error se puede apreciar claramente las variaciones lentas del vibrato en frecuencia.

A continuación el programa *analysis6* calcula el espectro de la señal de vibrato en amplitud y le aplica un filtro FFT de 4 Hz. Después, separa los espectros del modelo y de la señal de error y los presenta en la misma figura. La Fig. 5 muestra el espectro de la señal de vibrato en amplitud, y la Fig. 6 muestra los espectros del modelo y de la señal de error. Todos estos espectros se obtuvieron de la muestra *Jmac09*. En esta figura se puede apreciar como el modelo solo contiene los picos pertenecientes al vibrato en amplitud, y el espectro de la señal de error solo contiene las componentes de baja frecuencia.

Analysis6 también calcula el modelo y la señal de error

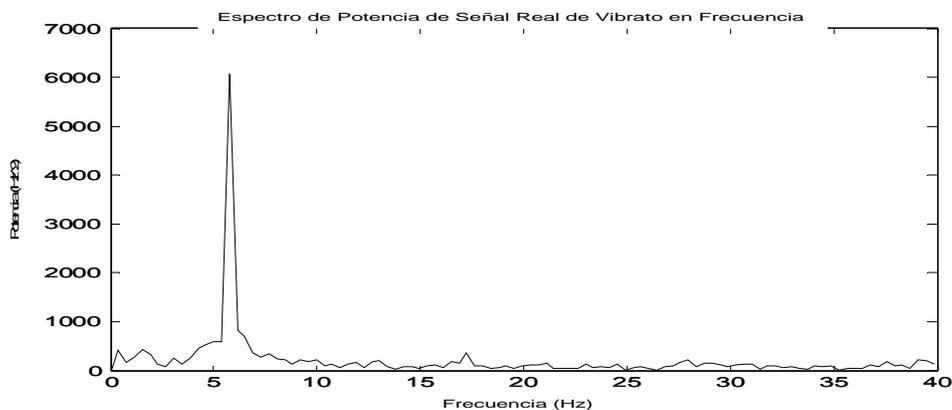


Fig. 2. Espectro de potencia de la señal real de vibrato en frecuencia para la muestra *Jmac09.wav*

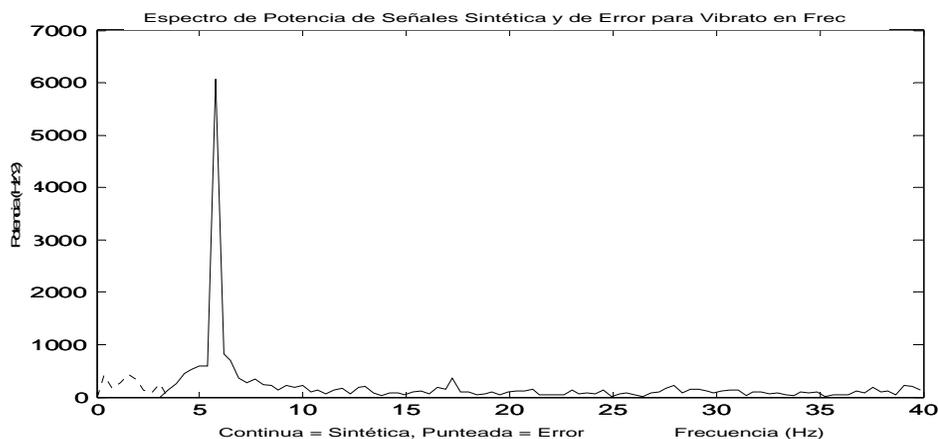


Fig. 3. Espectros de potencia del modelo y de la señal de error del vibrato en frecuencia para la muestra *Jmac09.wav*

en el dominio del tiempo para el vibrato en amplitud. La Fig. 7 muestra la señal real de vibrato en amplitud en línea continua, el modelo en línea punteada, y la señal de error en líneas interrumpidas. Todas estas señales se obtuvieron a partir de la muestra *Jmac09.wav*. En esta figura se puede apreciar como la señal de error contiene las variaciones lentas de la señal de vibrato en amplitud. Además, este programa calcula los valores máximos y mínimos de las señales de error, y sus varianzas las muestra en la pantalla.

6 Generación de las ondas del modelo y del error

Seguidamente se procedió a aplicar cada una de las muestras seleccionadas restantes al software desarrollado, para generar el espectro de la señal real de vibrato en frecuencia, el espectro del modelo, el espectro de la señal de error, la señal real de vibrato en frecuencia, la señal del modelo, y la señal de error. Además, también se generó para estas muestras el espectro del vibrato en amplitud, el espectro del modelo, el espectro de la señal de error, la señal real de vibrato en amplitud, la señal del modelo, y la señal de error.

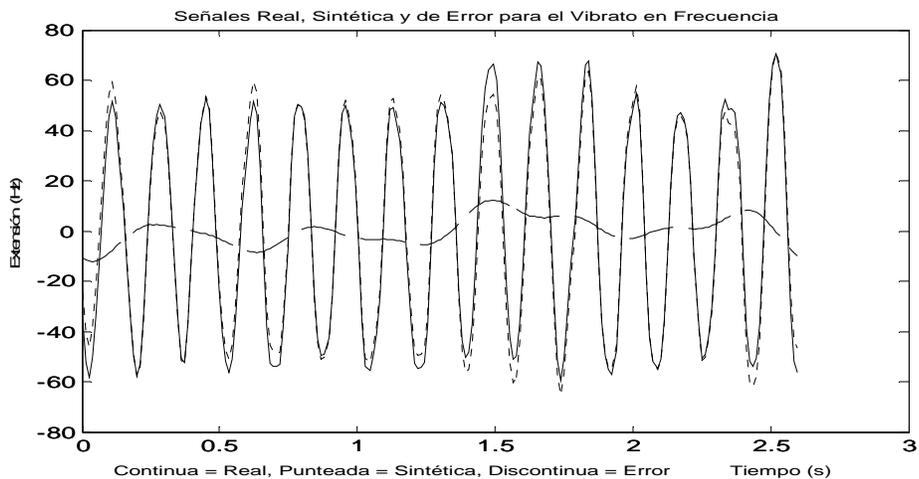


Fig. 4. Señales de vibrato en frecuencia real y sintetizada, y señal de error para la muestra Jmac09.wav

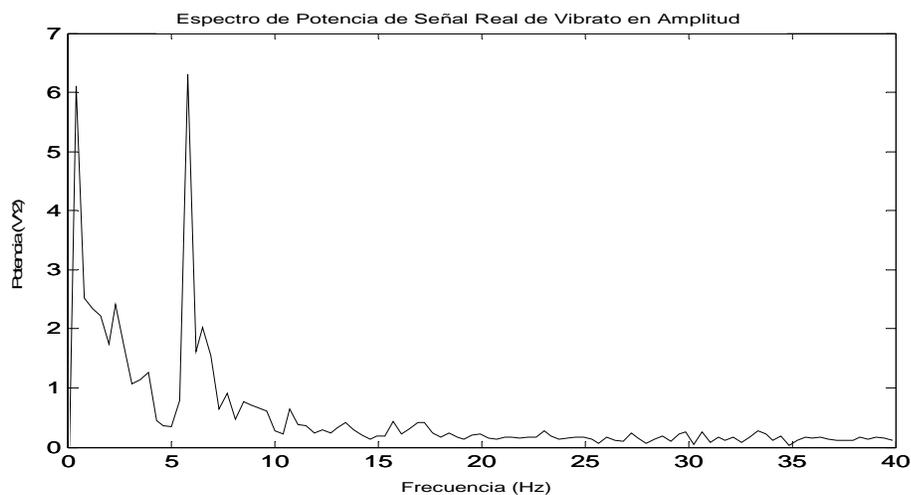


Fig. 5. Espectro de potencia de la señal real de vibrato en amplitud para la muestra Jmac09.wav

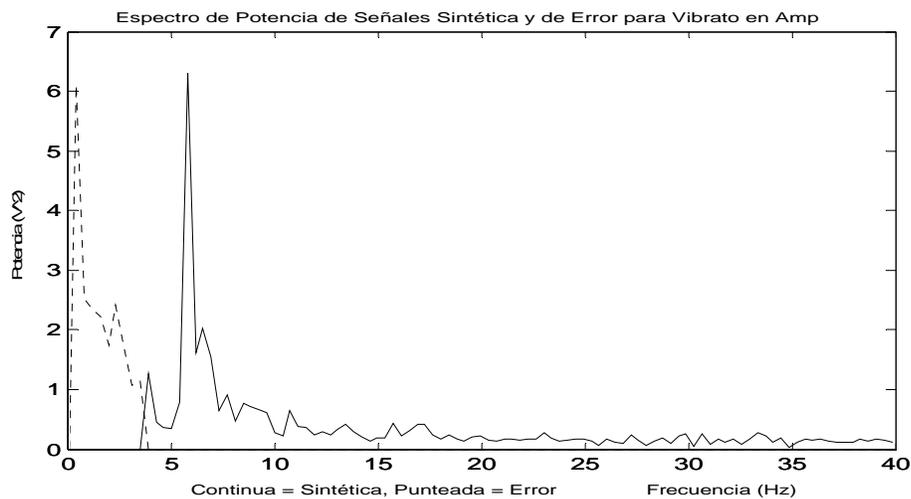
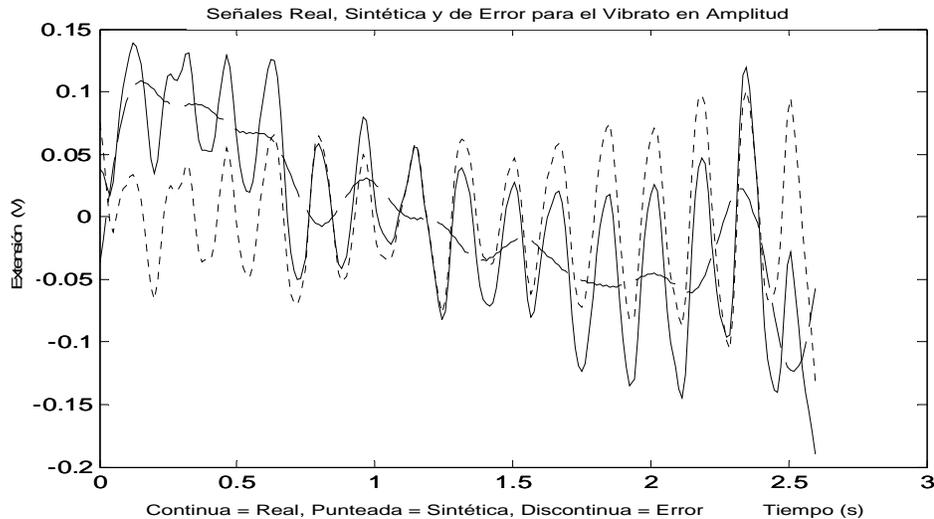


Fig. 6. Espectros de potencia del modelo y de la señal de error del vibrato en amplitud para la muestra Jmac09.wav



7. Señales de vibrato en amplitud real y sintetizada, y señal de error para la muestra Jmac09.wav

7 Generación de resultados

A fin de realizar un análisis completo de las muestras se desarrolló el programa analysis9, el cual determina diferentes parámetros a partir de las ondas reales de vibrato en frecuencia, su modelo y su error, la onda real de vibrato en amplitud, su modelo y su error. Las variables que se generaron mediante el programa analysis9 fueron las siguientes:

Para el vibrato en frecuencia:

1. Real signal mean frequency.
2. Real signal total extension in percent.
3. Maximum peak amplitude of spectrum.
4. Normalized maximum peak amplitude of spectrum.
5. Average amplitude of the spectrum.
6. Frequency at the maximum amplitude.
7. Real signal maximum extension in Hz.
8. Real signal minimum extension in Hz.
9. Real signal total extension in Hz.
10. Real signal power in Hz^2 .
11. Estimated signal maximum extension in Hz.
12. Estimated signal minimum extension in Hz.
13. Estimated signal total extension in Hz
14. Estimated signal power in Hz^2
15. Estimated signal power in percent of the total power
16. Error signal maximum extension in Hz
17. Error signal minimum extension in Hz
18. Error signal total extension in Hz.
19. Error signal power in Hz^2 .
20. Error signal power in percent of the total power.

Para el vibrato en amplitud:

1. Real signal mean amplitude.
2. Real signal total amplitude variation in percent.
3. Maximum peak amplitude of spectrum.

4. Normalized maximum peak amplitude of spectrum.
5. Average amplitude of spectrum.
6. Frequency at the maximum amplitude
7. Amplitude vibrato autocorrelation.
8. Real signal maximum extension in V.
9. Real signal minimum extension in V.
10. Real signal total extension in V
11. Real signal power in V^2
12. Estimated signal maximum extension in V.
13. Estimated signal minimum extension in V.
14. Estimated signal total extension in V.
15. Estimated signal power in V^2 .
16. Estimated signal power in percent of the total power.
17. Error signal maximum extension in V.
18. Error signal minimum extension in V.
19. Error signal total extension in V.
20. Error signal power in V^2 .
21. Error signal power in percent of the total power.

Además de las variables indicadas anteriormente, se generaron las siguientes dos variables a partir de las variables calculadas por el programa analysis9.

Para el vibrato en frecuencia:

- Peak to average ratio.

Para el vibrato en amplitud:

- Peak to average ratio.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos del análisis de las muestras bajo estudio.

8 Análisis estadístico

Como puede observarse en la tabla 2, se generó una cantidad apreciable de variables y resultados a partir de las muestras seleccionadas. Debido a que en este estudio

estamos interesados en determinar la relación existente entre la calidad de la señal con la simetría de la onda, se seleccionaron las siguientes variables para realizar el análisis estadístico:

Para el vibrato en frecuencia:

1. Maximum peak amplitude of spectrum.
2. Normalized maximum peak amplitude of spectrum.
3. Peak to average ratio.
4. Error signal total extension in Hz
5. Error signal power in Hz^2 .
6. Error signal power in percent of the total power.

Para el vibrato en amplitud:

1. Maximum peak amplitude of spectrum.
2. Normalized maximum peak amplitude of spectrum.
3. Peak to average ratio.
4. Error signal total extensión in V.
5. Error signal power in V^2
6. Error signal power in percent of the total power.

Se realizó un análisis de varianza a cada una de las doce variables indicadas anteriormente. La hipótesis nula planteada para estas variables fue que las medias eran iguales, con el objetivo de determinar si existen diferencias entre las medias de los grupos.

La tabla 3 muestra un resumen de los resultados de los análisis de varianza de las doce variables, donde se indican los valores promedio de las variables para cada uno de los grupos (muestras buenas y deficientes), valores de F, probabilidad y F crítico.

Las variables de la tabla 3 miden la simetría o asimetría de las muestras. Así tenemos que las siguientes variables miden la simetría de las ondas:

Para el vibrato en frecuencia:

1. Maximum peak amplitude of spectrum.
2. Normalized maximum peak amplitude of spectrum.
3. Peak to average ratio.

Para el vibrato en amplitud:

1. Maximum peak amplitude of spectrum.
2. Normalized maximum peak amplitude of spectrum.
3. Peak to average ratio.

Por lo tanto, el resto de las variables miden la asimetría de las ondas.

Para el vibrato en frecuencia:

1. Error signal total extension in Hz.
2. Error signal power in Hz^2 .
3. Error signal power in percent of the total power

Para el vibrato en amplitud.

1. Error signal total extension in V.
2. Error signal power in V^2 .
3. Error signal power in percent of the total power.

Por lo tanto, un mayor valor promedio de cualquiera de estas variables indicará que la señal es más simétrica o asimétrica, dependiendo de la variable. De acuerdo con los valores promedio de la tabla 3, vemos que las siguientes variables indican que las ondas más simétricas fueron juzgadas como buenas:

Para el vibrato en frecuencia.

1. Maximum peak amplitude of spectrum.
2. Peak to average ratio.
3. Error signal power in Hz^2 .
4. Error signal power in percent of the total power.

Para el vibrato en amplitud.

1. Maximum peak amplitude of spectrum.
2. Peak to average ratio.
3. Error signal total extension in V.
4. Error signal power in V^2

Los valores promedio de las siguientes variables indican que las ondas más simétricas fueron juzgadas como deficientes:

Para el vibrato en frecuencia.

1. Normalized maximum peak amplitude of spectrum
2. Error signal total extension in Hz.

Para el vibrato en amplitud.

1. Normalized maximum peak amplitude of spectrum
2. Error signal power in percent of the total power.

Estos resultados nos indican que del total de 12 variables analizadas, ocho de ellas, es decir la mayoría, indica que las muestras más simétricas fueron juzgadas como buenas, mientras que la minoría, es decir cuatro variables, indican que las muestras menos simétricas fueron juzgadas como buenas. Sin embargo, no podemos concluir con certeza cual es el efecto de la simetría en la calidad de las señales, hasta que se analicen los resultados estadísticos.

Los resultados estadísticos se encuentran resumidos en la tabla 3. Aquí se observa que una de las variables (Peak to average ratio del vibrato en frecuencia) produjo resultados estadísticamente significativos, lo cual se muestra como un valor de 6.515 de F para un F crítico de 5.317, y una probabilidad de 0.034.

Estos resultados permiten llegar a varias conclusiones. Primero, que el efecto más importante del vibrato es causado por el vibrato en frecuencia, lo cual viene a confirmar estudios anteriores (DeJonckere y col., 1995, y Amir y col., 2006). Segundo, las oscilaciones causadas por la señal de error en el vibrato en frecuencia no influyen en la calidad de la señal de voz, es decir, las oscilaciones de baja frecuencia no influyen en la calidad de la señal. Tercero, las desviaciones de la señal estimada del modelo senoidal, causan el efecto principal para que una señal sea juzgada como de calidad deficiente.

Tabla 2. Resultados obtenidos para las muestras bajo análisis (continúa)

	Muestra				
	Jmac09	Pav68	Dist08a_1944	Pldom44_196	Leib15
Calificación	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Frequency vibrato					
Real signal mean frequency	1047.231	1061.538	2696.163	2549.745	2647.406
Real signal total extension in percent	3.796	2.396	2.074	2.202	2.061
Maximum peak amplitude of spectrum	6078.359	8180.488	6114.126	4899.087	15922.14
Normalized maximum peak amplitude of spectrum	28.945	12.489	36.612	30.429	34.841
Average amplitude of the spectrum	210.455	420.362	364.786	388.8	559.233
Peak to average ratio	28.881989	19.4605792	16.7608571	12.6005324	28.4713885
Frequency at the maximum amplitude	5.748	6.143	5.783	4.998	8.1
Real signal maximum extension in Hz	70.563	158.515	124.522	116.361	142.081
Real signal minimum extension in Hz	-59.445	-107.337	-172.6	-91.827	-126.242
Real signal total extension in Hz	130.008	265.852	297.122	208.189	268.323
Real signal power in Hz ²	1684.535	4313.634	5289.324	3520.222	3257.29
Estimated signal maximum extension in Hz	64.996	110.403	132.037	102.576	85.198
Estimated signal minimum extension in Hz	-65.532	-180.257	-112.777	-88.634	-101.473
Estimated signal total extension in Hz	130.527	290.66	244.815	191.209	186.671
Estimated signal power in Hz ²	1617.05	4015.063	4358.406	3344.9	2679.096
Estimated signal power in percent of the total power	95.994	93.078	82.4	95.02	82.249
Error signal maximum extension in Hz	17.371	117.583	52.612	38.549	68.19
Error signal minimum extension in Hz	-29.02	-50.217	-103.251	-20.849	-48.479
Error signal total extension in Hz	46.391	167.8	155.862	59.398	116.669
Error signal power in Hz ²	67.485	298.57	930.918	175.322	578.194
Error signal power in percent of the total power	4.006	6.922	17.6	4.98	17.751
Amplitude vibrato					
Real signal mean amplitude	3.42E-01	3.18E-01	2.78E-01	2.58E-01	2.23E-01
Real signal total amplitude variation in percent	18.181	12.48	6.203	18.058	11.916
Maximum peak amplitude of spectrum	6.31	13.147	0.933	2.887	1.859
Normalized maximum peak amplitude of spectrum	3.01E-02	2.01E-02	5.59E-03	1.79E-02	4.07E-03
Average amplitude of spectrum	5.36E-01	5.11E-01	1.78E-01	4.16E-01	3.38E-01
Peak to average ratio	11.78338	25.7531832	5.23569024	6.9449122	5.50814815
Frequency at the maximum amplitude	5.748	6.143	5.301	4.998	4.931
Amplitude vibrato autocorrelation	0.684	0.766	0.332	0.497	0.022
Real signal maximum extension in V	0.139	0.084	0.068	0.122	0.122
Real signal minimum extension in V	-0.19	-0.099	-0.057	-0.121	-0.068
Real signal total extension in V	0.328	0.183	0.125	0.242	0.189
Real signal power in V ²	5.50E-03	1.85E-03	4.51E-04	3.00E-03	1.47E-03
Estimated signal maximum extension in V	0.106	0.073	0.032	0.098	0.071
Estimated signal minimum extension in V	-0.127	-0.089	-0.034	-0.116	-0.085
Estimated signal total extension in V	0.234	0.162	0.066	0.214	0.157
Estimated signal power in V ²	2.31E-03	1.55E-03	1.98E-04	1.92E-03	2.16E-04
Estimated signal power in percent of the total power	42.023	83.979	43.843	64.18	14.744
Error signal maximum extension in V	0.109	0.037	0.036	0.064	0.124
Error signal minimum extension in V	-0.134	-0.042	-0.04	-0.057	-0.049
Error signal total extension in V	0.242	0.079	0.076	0.121	0.173
Error signal power in V ²	3.19E-03	2.96E-04	2.53E-04	1.07E-03	1.25E-03
Error signal power in percent of the total power	57.977	16.021	56.157	35.82	85.256

Tabla 3. (Continuación) Resultados obtenidos para las muestras bajo análisis

	Muestra				
	Jmac25	Superv24	Bz55	Mc22_1958_a	Lg02
Calificación	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala
Frequency vibrato					
Real signal mean frequency	792.378	3145.552	1054.659	1869.415	2838.227
Real signal total extension in percent	1.438	2.044	5.282	2.54	6.993
Maximum peak amplitude of spectrum	1455.269	5507.516	5190.622	5373.439	13084.868
Normalized maximum peak amplitude of spectrum	4.9	39.622	37.613	31.985	114.78
Average amplitude of the spectrum	167.506	460.087	324.738	364.396	1314.333
Peak to average ratio	8.687861927	11.97059687	15.9840302	14.74615254	9.955519644
Frequency at the maximum amplitude	8.671	8.105	4.665	4.311	5.647
Real signal maximum extension in Hz	29.273	110.075	125.287	93.027	224.969
Real signal minimum extension in Hz	-38.704	-134.711	-108.432	-125.191	-388.614
Real signal total extension in Hz	67.977	244.786	233.719	218.218	613.583
Real signal power in Hz ²	157.208	4678.34	3897.548	2702.503	14859.564
Estimated signal maximum extension in Hz	36.331	99.167	134.136	82.251	180.025
Estimated signal minimum extension in Hz	-24.019	-128.507	-110.003	-126.484	-238.545
Estimated signal total extension in Hz	60.349	227.674	244.139	208.735	418.57
Estimated signal power in Hz ²	93.659	4277.276	3717.239	2603.323	11102.715
Estimated signal power in percent of the total power	59.576	91.427	95.374	96.33	74.718
Error signal maximum extension in Hz	18.926	38.994	28.548	21.593	61.754
Error signal minimum extension in Hz	-21.24	-43.842	-30.225	-19.92	-182.903
Error signal total extension in Hz	40.166	82.835	58.773	41.513	244.657
Error signal power in Hz ²	63.55	401.063	180.309	99.18	3756.849
Error signal power in percent of the total power	40.424	8.573	4.626	3.67	25.282
Amplitude vibrato					
Real signal mean amplitude	3.43E-01	2.05E-01	2.63E-01	2.61E-01	1.58E-01
Real signal total amplitude variation in percent	25	33.351	11.688	19.682	23.085
Maximum peak amplitude of spectrum	3.305	4.996	2.826	5.527	1.508
Normalized maximum peak amplitude of spectrum	1.11E-02	3.59E-02	2.05E-02	3.29E-02	1.32E-02
Average amplitude of spectrum	6.52E-01	4.65E-01	1.97E-01	4.48E-01	2.40E-01
Peak to average ratio	5.068241067	10.74177596	14.3306288	12.34807864	6.280716368
Frequency at the maximum amplitude	8.671	8.105	4.665	4.311	5.647
Amplitude vibrato autocorrelation	0.849	0.812	0.588	0.518	0.366
Real signal maximum extension in V	0.176	0.249	0.088	0.139	0.079
Real signal minimum extension in V	-0.249	-0.113	-0.079	-0.142	-0.086
Real signal total extension in V	0.425	0.362	0.167	0.281	0.164
Real signal power in V ²	9.63E-03	6.53E-03	1.36E-03	3.68E-03	1.75E-03
Estimated signal maximum extension in V	0.075	0.135	0.071	0.091	0.072
Estimated signal minimum extension in V	-0.15	-0.141	-0.093	-0.13	-0.041
Estimated signal total extension in V	0.225	0.276	0.164	0.221	0.114
Estimated signal power in V ²	1.12E-03	3.86E-03	1.13E-03	3.06E-03	6.46E-04
Estimated signal power in percent of the total power	11.647	59.053	82.965	83.236	36.926
Error signal maximum extension in V	0.121	0.114	0.035	0.061	0.062
Error signal minimum extension in V	-0.222	-0.068	-0.023	-0.032	-0.068
Error signal total extension in V	0.343	0.182	0.058	0.093	0.131
Error signal power in V ²	8.51E-03	2.67E-03	2.31E-04	6.17E-04	1.10E-03
Error signal power in percent of the total power	88.353	40.947	17.035	16.764	63.074

9 Conclusiones

Se desarrolló un nuevo algoritmo basado en un filtro FFT, para separar la señal de error, de la señal estimada de las ondas de variación en frecuencia y variación en amplitud. Se verificó que los resultados obtenidos por este nuevo método eran correctos, mediante la representación gráfica

de los espectros de las señales reales, estimada y de error, y el despliegue de estas mismas señales en el dominio del tiempo. Los resultados generados por este programa se utilizaron como entrada para extraer los parámetros de las ondas.

Se desarrollaron diversas expresiones matemáticas que midieran de manera objetiva la simetría y asimetría de las ondas de variación en frecuencia y variación en amplitud, se

implementaron las expresiones matemáticas, y se le aplicaron estos algoritmos a las muestras, para generar un total de cuarenta y un diferentes parámetros para cada una de las muestras bajo estudio. Estos resultados se muestran en la tabla 2.

Se realizó una selección de doce variables del total de las cuarenta y un variables generadas. Estas doce variables midieron el grado de simetría o asimetría de las ondas de variación de frecuencia y de variación de amplitud. Se tomaron seis variables que cuantificaban las variaciones de frecuencia y seis que cuantificaban las variaciones de amplitud. Se le aplicó un análisis de varianza a cada una de estas doce variables, para determinar si estas variables mostraban bajo el punto de vista estadístico, que existía una relación entre la simetría de las ondas y la calidad de las señales.

El resumen de los resultados del análisis estadístico se muestra en la tabla 3. El análisis de estos resultados muestra que el valor promedio de ocho de las doce variables empleadas, indica que las muestras más simétricas fueron juzgadas como de buena calidad. Además, la variable Peak to average ratio del vibrato en frecuencia arrojó resultados estadísticamente significativos, lo cual demuestra que existe una relación directa entre la simetría de las muestras y la calidad de las mismas.

Referencias

- Amir N, Michael O, and Amir O, 2006, "Acoustic and Perceptual Assessment of Vibrato Quality of Singing Students", *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 1 No. 2, p. 144-150.
- DeJonckere PH, Minoru H and Sundberg J, 1995, "Vibrato", Singular Publishing Group, Inc., San Diego, California.
- Diaz JA, 1995, "Frequency Characterization of Singers' Vibrato", Universidad de Florida, Gainesville, Florida.
- Diaz JA, 1998, "A Mathematical Model of Singers' Vibrato Based on Waveform Analysis", Universidad de Florida, Gainesville, Florida.
- Hakes J, Shipp T and Doherty T, 1987, "Acoustic Properties of Straight Tone, Vibrato, Trill, and Trillo", *Journal of Voice*, Vol.1 No. 2, pp. 148-156.
- Hakes J, Shipp T and Doherty T, 1988, "Acoustic Characteristics of Vocal Oscillations: Vibrato, Exaggerated Vibrato, Trill, and Trillo", *Journal of Voice*, Vol.1 No. 4, p. 326-331.
- Horii Y, 1989, "Frequency Modulation Characteristics of Sustained /a/ sung in Vocal Vibrato", *Journal of Speech and Hearing Research*, p. 1-8.
- Maher R and Beauchamp J, 1990, "An Investigation of Vocal Vibrato for Synthesis", *Applied Acoustics*, p. 219-245.
- Seashore, C., 1932, "The Vibrato", University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Seashore C, 1936, "Studies in the Psychology of Music", University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Shipp T, Sunberg J and Haglund S, 1984, "A Model of Frequency Vibrato", *Transcripts of the Thirteenth Symposium: Care of the Professional Voice*, p. 116-117.
- Sundberg J, 1978, "Effects of the Vibrato and the Singing Formant on Pitch", *Musicologica Slovaca*, p. 51-69.
- Rothman HB, Diaz JA and Vincent KE, 2000, "Comparing Historical and Contemporary Opera Singers with Historical and Contemporary Jewish Cantors", *Journal of Voice*. Vol. 14, No. 2.