



Sonido y Resonancia

Rafael Martínez Olalla

Grupo de Informática Aplicada al Procesamiento de Señal e Imagen (GIAPSI)

Universidad Politécnica de Madrid, Campus de Montegancedo, s/n, 28660 Boadilla del Monte, Madrid, Spain

e-mail: rmolalla@junipera.datsi.fi.upm.es



Resonancia

- La resonancia es una **propiedad física de un objeto**.
- Todos los objetos resuenan.
 - ◆ Los patrones de resonancia pueden ser más o menos complejos.
- Algunos resonadores están fuertemente amortiguados y otros no. Ejemplo: una campana.
- Como consecuencia del patrón de resonancia de un objeto es posible producir sonido. Sin embargo **sonido y resonancia no son lo mismo**. Por ejemplo: una cuerda de guitarra con una masa, longitud y tensión dados tiene un patrón de resonancia característico independientemente de si produce sonido o no.

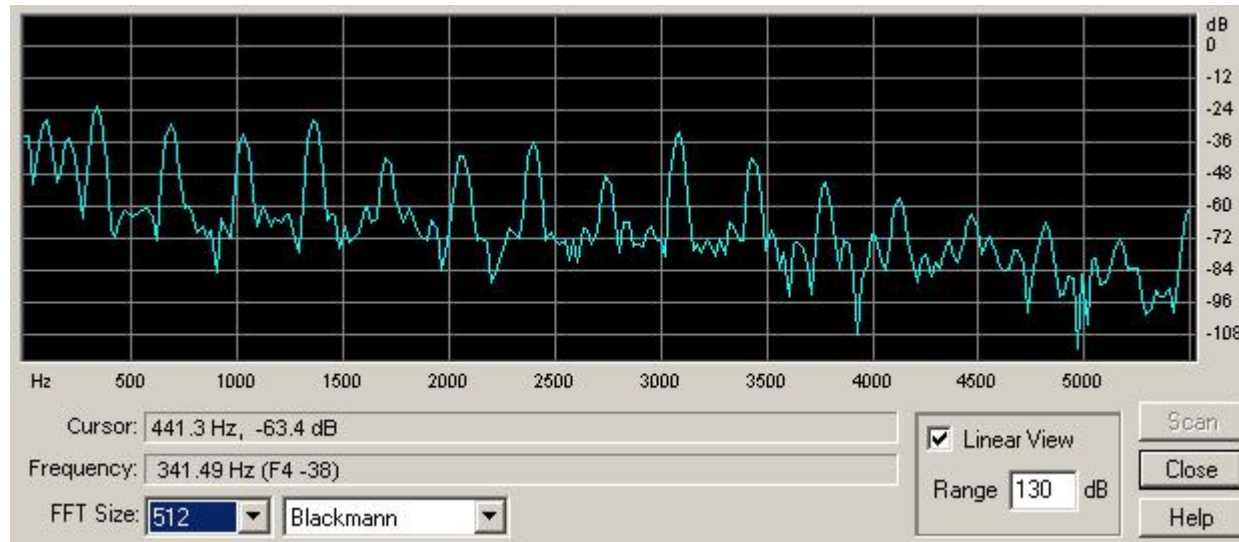
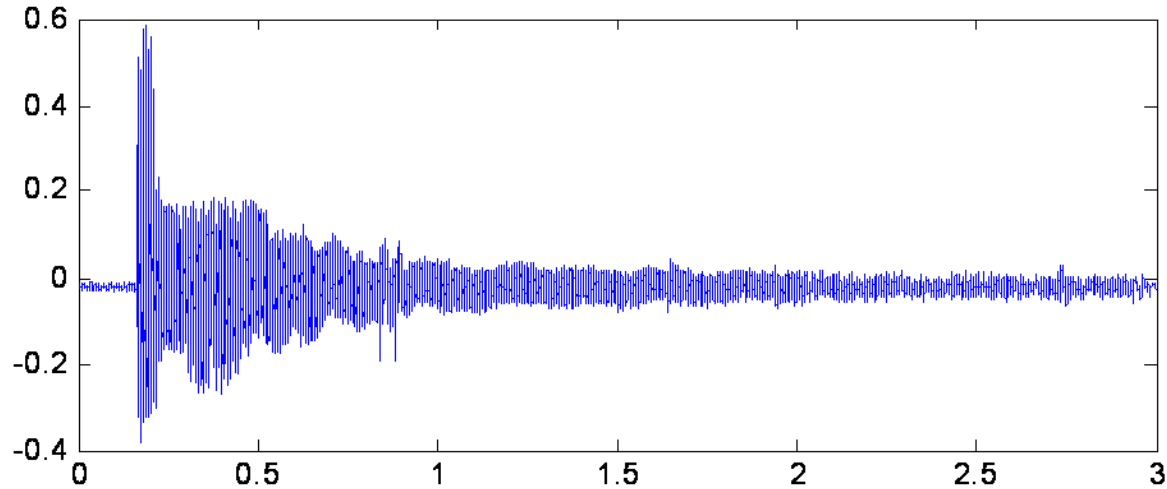


Sonido y resonancia

- Algunos resonadores generan sonido “moviendo” el aire adyacente.
 - ◆ Ejemplo: Presionamos la cuerda de guitarra.
- Las **vibraciones** de la cuerda son **transversales** y están caracterizadas por las propiedades físicas de la cuerda (longitud, masa y tensión).
- La cuerda de guitarra genera **ondas de presión longitudinales** (sonido) en el medio.
- Los **patrones frecuenciales** de las ondas de presión sonoras en el aire están relacionados con los patrones de frecuencia de la cuerda (y con sus características de resonancia). Sin embargo, la forma de onda del sonido resultante no recuerda visualmente al patrón de vibración que lo generó.
- Algunos resonadores (como el tracto vocal) pueden actuar sobre las ondas generadas en otra parte (ej. la glotis) y **permitir de forma selectiva** el paso de ciertas frecuencias sin atenuar (frecuencias de resonancia): El resto se ven atenuadas de algún modo.



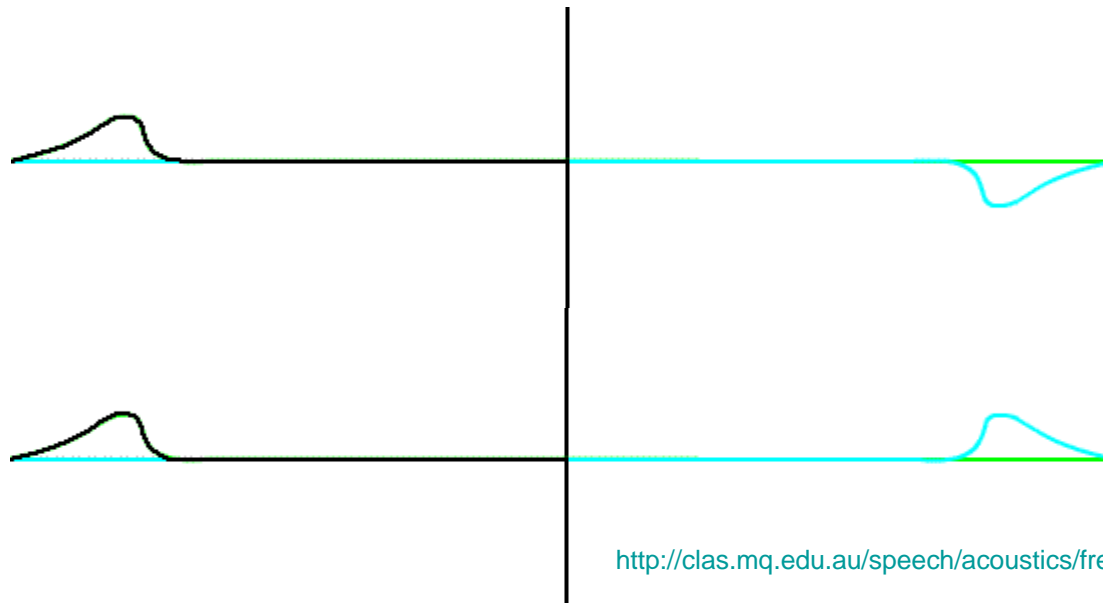
Sonido y resonancia





Reflexión, interferencia y ondas estacionarias

- Al aproximarse dos pulsos en sentido contrario pueden pasar el uno a través del otro.
- De este modo sus patrones interfieren de modo constructivo o destructivo para producir patrones temporales de composición de ondas.
- Las formas originales se restauran cuando terminan de pasar el uno sobre el otro.



http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html



Reflexión, interferencia y ondas estacionarias

- En un medio resonante típico las ondas pueden pasar de forma aleatoria en cualquier dirección de las tres dimensiones.
- Mientras las ondas puedan interferir temporalmente entre sí, pasarán unas sobre otras quedando intactas.
 - ◆ Ejemplo: olas creadas por dos barcos.
- Algunos de los patrones de interferencias constructivas o destructivas son preferidos por el medio resonante sobre los demás. Esos patrones preferidos están relacionados con las características de resonancia del medio.
- Además, las ondas también interfieren con ellas mismas. Cuando una onda se refleja contra una superficie, el patrón de la onda reflejada interfiere con el de la onda original.

Reflexión

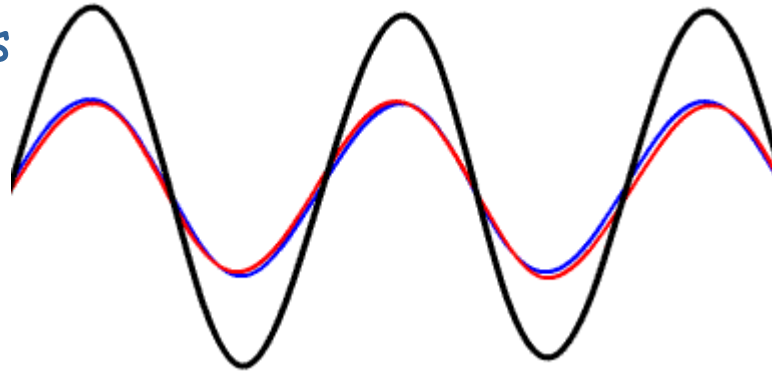
- La reflexión sin inversión es la habitual excepto cuando se produce contra un extremo fijo (es la única forma de reflejar la energía en un extrem



http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Ondas estacionarias en cuerdas

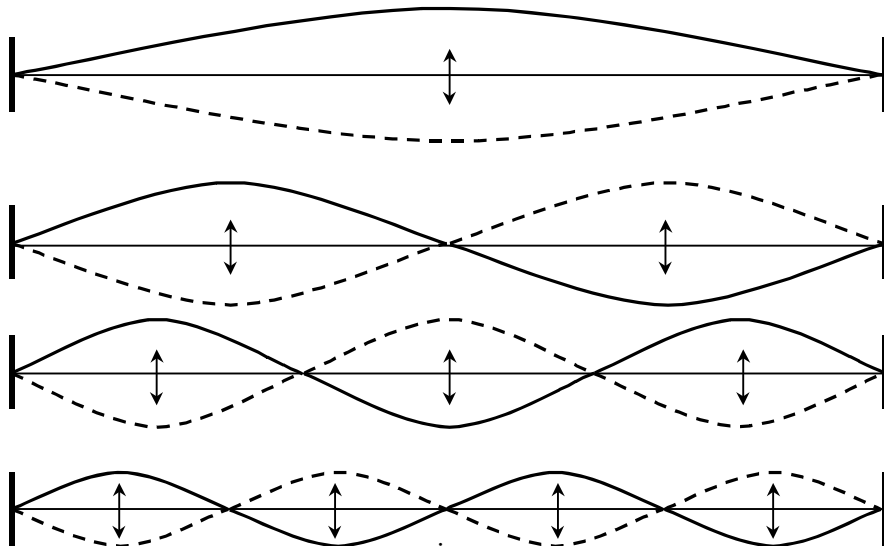
- Si sujetamos una cuerda por sus dos extremos, éstos no permiten movimiento. Al reflejarse una forma de onda debe hacerlo con inversión. Por tanto, el patrón de interferencia resultante mantiene siempre el cero en cada extremo. Todas las ondas que no tengan un cero en los extremos se verán fuertemente atenuadas.
- Excepciones: uno de los extremos no está fijado convenientemente. En ese caso se producen interferencias constructivas



http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Ondas estacionarias

- En la imagen anterior se ha observado que existen puntos de la cuerda que están siempre en posición cero para esa onda. Esos puntos son los **nodos**. Además hay otra serie de puntos en los cuales la cuerda se mueve entre un máximo y un mínimo (**antinodos**).
- Las ondas que se mueven así (con nodos y antinodos) se denominan **ondas estacionarias** y son cruciales en el fenómeno de la resonancia.
- Además de la mostrada en la transparencia anterior, hay infinitas longitudes de onda que permiten que los extremos estén fijos.



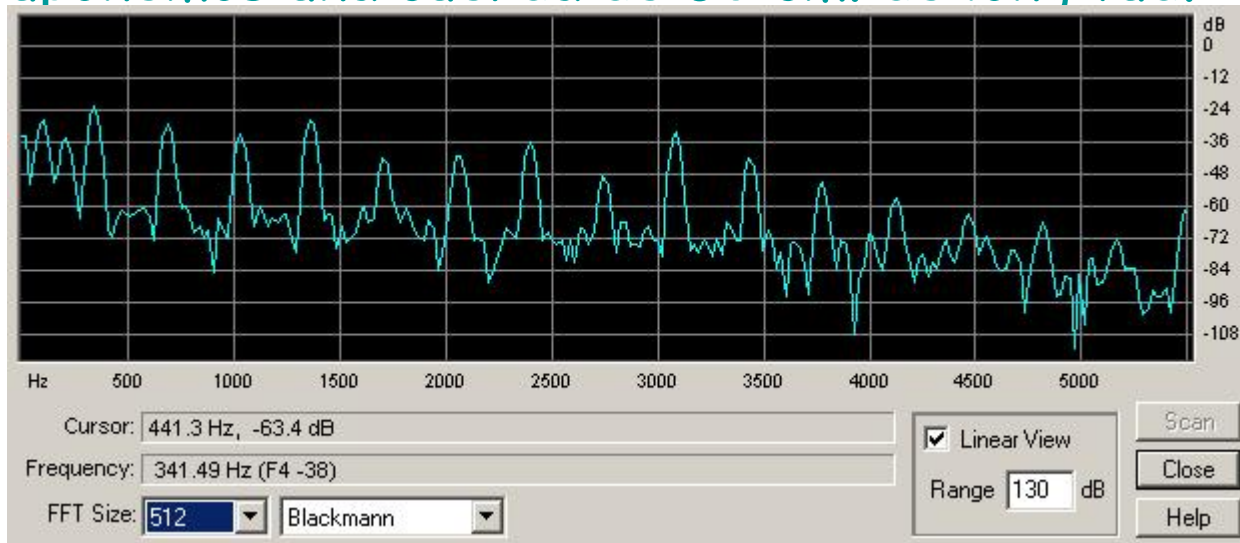
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \text{Longitudes de onda permitidas}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f_n = \frac{nc}{2L} \quad \text{Frecuencias de los modos normales de vibración}$$

Velocidad de propagación

- Velocidad a la que se propagan las ondas en la cuerda de guitarra anterior.
 - ◆ Suponemos una cuerda de 60 cm. de longitud.



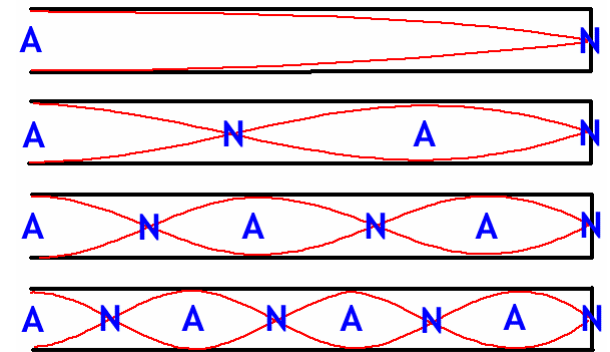
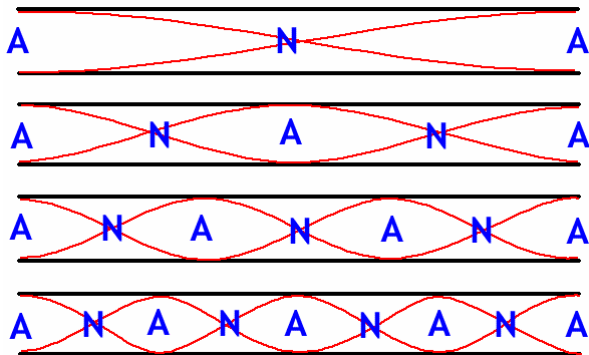
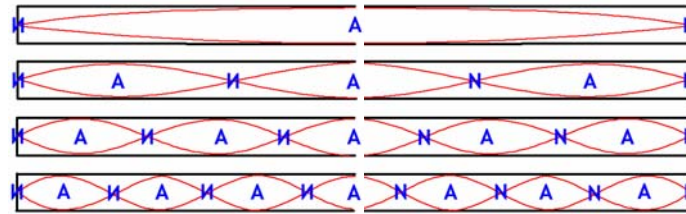
$$f_n = \frac{nc}{2L}$$

$$c = \frac{2Lf_n}{n}$$

$$C = 2 \cdot 0,6 \cdot 345 / 1 = 414 \text{ m/s}$$

Ondas estacionarias en tubos

- Los tubos uniformes podemos clasificarlos en base a si sus extremos están cerrados o no:
 - Tubos cerrados en sus dos extremos.
 - Tubos abiertos en ambos extremos.
 - Tubos abiertos en un extremo y cerrados en el otro



http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html



Ondas estacionarias en tubos

- De los tres tipos de tubos, el de más relevancia en la producción de voz es el abierto en un extremo y cerrado en el otro.
- El tracto vocal en la producción de vocales puede describirse como un tubo abierto en un extremo (la boca) y cerrado en el otro (la glotis).
 - ◆ Durante la producción de vocales la apertura y cierre de la glotis es muy pequeña en comparación con la radiación en los labios.
- Los tubos cerrados en ambos extremos pueden caracterizar las resonancias en el tracto vocal producidas con las oclusivas sonoras. En estos tubos sólo las bajas frecuencias son capaces de escapar por radiación a través de las paredes del tracto.
- Los tubos abiertos en ambos extremos pueden caracterizar cavidades paralelas como la cavidad nasal durante la pronunciación de sonidos nasales. Sin embargo su resonancia está acoplada acústicamente con la de la cavidad principal.

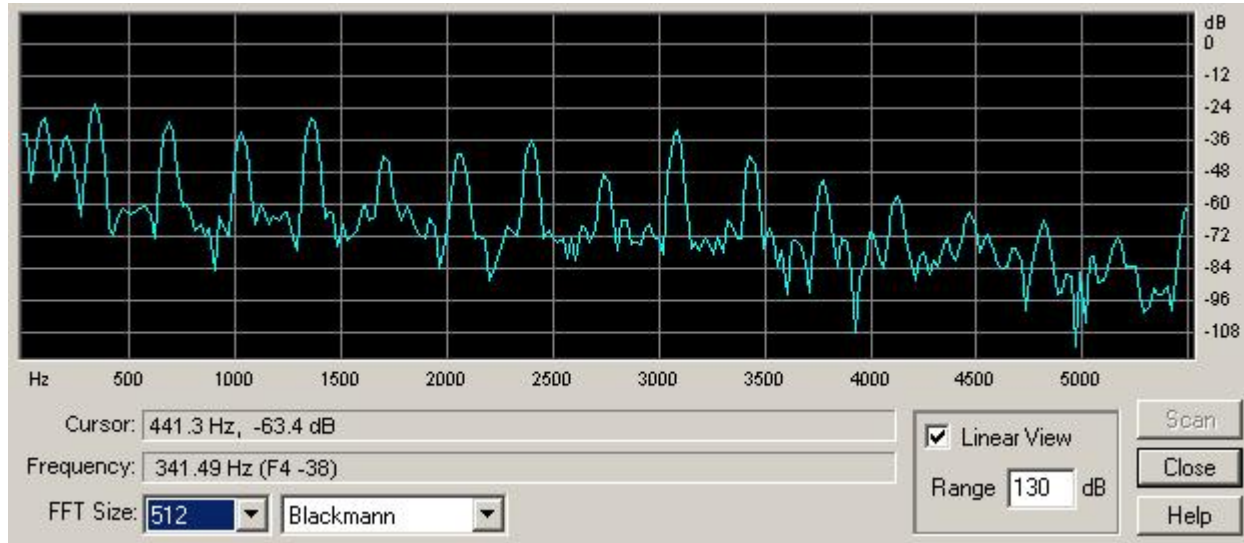


Ondas estacionarias en tubos

- La resonancia en un tubo de sección uniforme es una característica física del mismo y depende de su longitud y de si está cerrado o no en sus extremos.
- Las resonancias del tubo se definen en términos de longitudes de onda.
- Lo que realmente vibra es sin embargo el medio contenido en el tubo. Sólo cuando tenemos un medio determinado que vibra en el tubo, podemos hablar de resonancia en términos de frecuencia. En el caso del tracto vocal, el medio que vibra es el aire. La velocidad de propagación del sonido en el aire es de 330 m/s.
- Ejemplo de voz con Heliox.

¿Por qué aparecen ondas estacionarias en tubos?

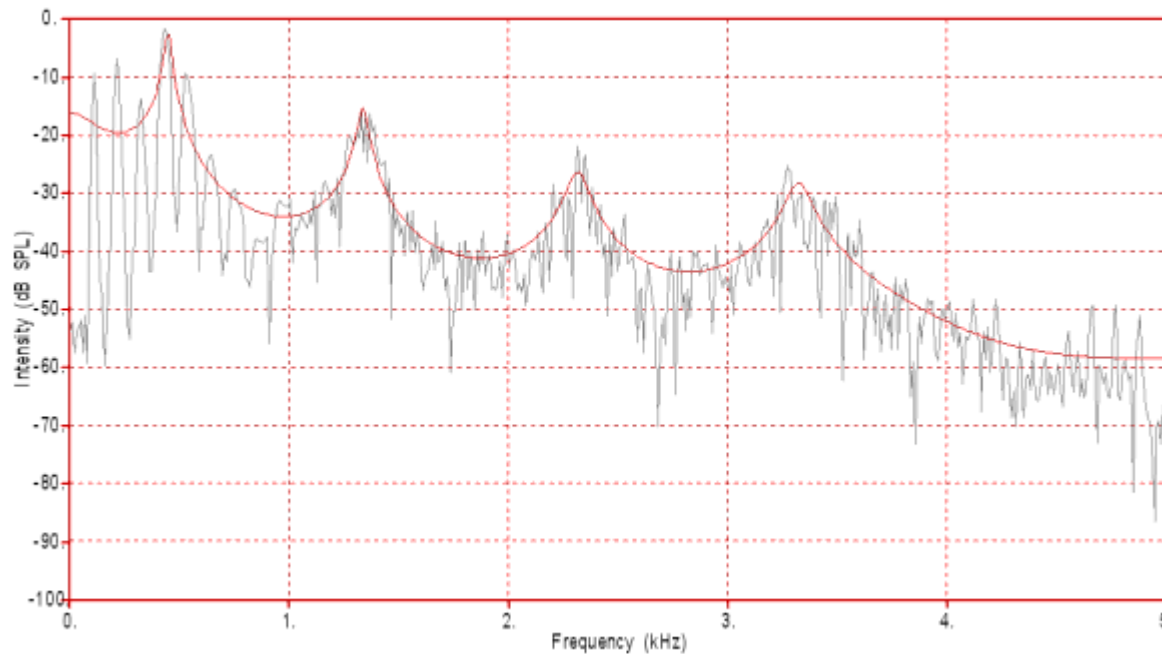
- En el caso de cuerdas vibrantes con extremos fijos, sólo son posibles las vibraciones que mantienen fijos los extremos.



- Vistos los picos de la figura (de anchura la que permite la resolución de la ventana de la FFT), Las frecuencias que se muestran son las que realmente aparecen.
- En una columna de aire que vibra en un tubo no hay moléculas del gas que estén "fijas".

Ondas estacionarias en tubos

- Vocal de la palabra inglesa "heard"
- Vemos que aparecen resonancias, pero que son más anchas que en el caso de cuerdas vibrantes.



http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html



Nodos y antinodos en un tubo

- Nodos en el extremo cerrado:
 - ◆ El aire posee una viscosidad o resistencia al movimiento. La viscosidad aumenta según nos aproximamos al extremo cerrado la viscosidad aumenta. El movimiento de las moléculas de aire en el extremo cerrado es frenado por el aumento de viscosidad y por las colisiones con el extremo del tubo. La reflexión se produce pues con inversión.
- Antinodos en el extremo abierto
 - ◆ La reflexión en el extremo abierto se produce debido a la impedancia de radiación. El tubo se abre en un espacio mucho más amplio. El movimiento de las partículas no es inhibido y la reflexión aparece sin inversión.



Ondas estacionarias

- El punto final del tubo no está determinado con total precisión. La resistencia al movimiento de las partículas aumenta según nos aproximamos al extremo del tubo. Por ello la probabilidad de reflexión de la onda aumenta según nos acercamos a ese extremo, pero se puede producir reflexión (aunque con menor probabilidad) a distancias próximas a ese extremo.
- Este comportamiento probabilístico ocurre en mayor medida en el extremo abierto. La máxima reflexión aparece justo después de los labios, aunque también hay una probabilidad de ocurrencia un poco antes o después.
- Sólo las ondas con nodos en el extremo cerrado y antinodos en el abierto son posibles. Las frecuencias de resonancia dependen de la longitud del tubo. Pero como los puntos de reflexión no están perfectamente definidos sino que varían un poco en cada extremo, hay un cierto rango de longitudes de onda que pueden originar resonancias. Las más fuertes son aquellas determinadas por los extremos, pero aparecen ondas estacionarias más débiles alrededor de las frecuencias de resonancia. Por eso los picos de resonancia son de mayor amplitud que en el caso de cuerdas vibrantes.



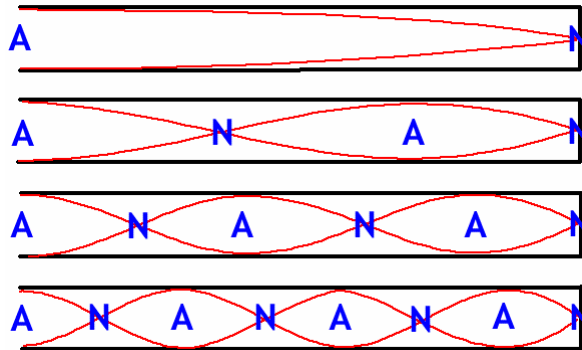
Amortiguamiento de las resonancias

- El pico de resonancia de un diapasón es muy estrecho y su sonido dura mucho.
- La anchura de banda de una resonancia está directamente relacionada con su amortiguamiento.
- La resonancia producida por un único pulso glótico desaparece en 10 - 20 ms.
- Para un tono fundamental de 100 Hz, se genera un pulso glótico cada 10 ms. En ese tiempo una onda viajando a 330 m/s recorre 3,3 m. si el tracto vocal es de unos 17 cm de longitud, la distancia recorrida por el sonido es de más de 19 veces el tamaño del tracto. Así pues, para cuando un pulso es reemplazado por el siguiente, la onda estacionaria puede ser reflejada 19 veces para producir su patrón característico.

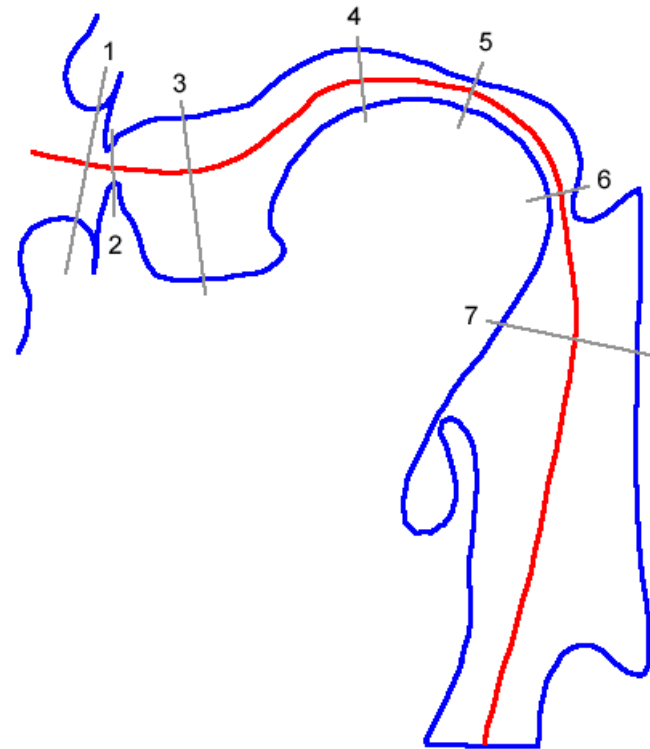
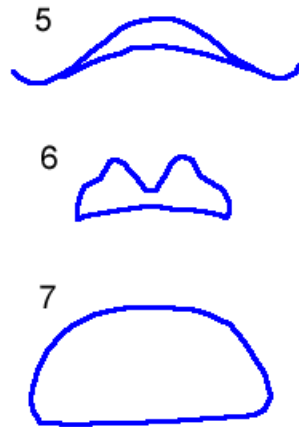
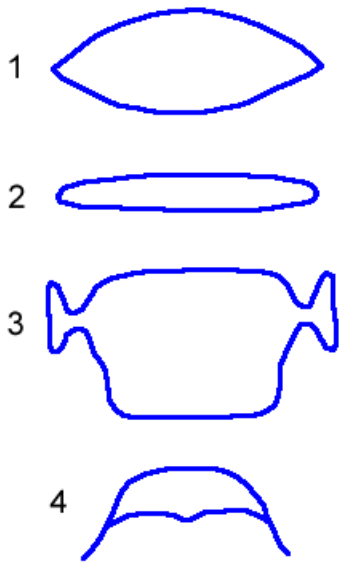
Frecuencia de las resonancias

- Las cuatro primeras ondas estacionarias para un tubo abierto en un extremo y cerrado en el otro se producen con $1/4$, $3/4$, $5/4$ y $7/4$ ciclos dentro del tubo.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad f_n = \frac{(2(n-1)+1) c}{4L} \quad f_1 = \frac{c}{4L}$$



Resonancias en el tracto vocal

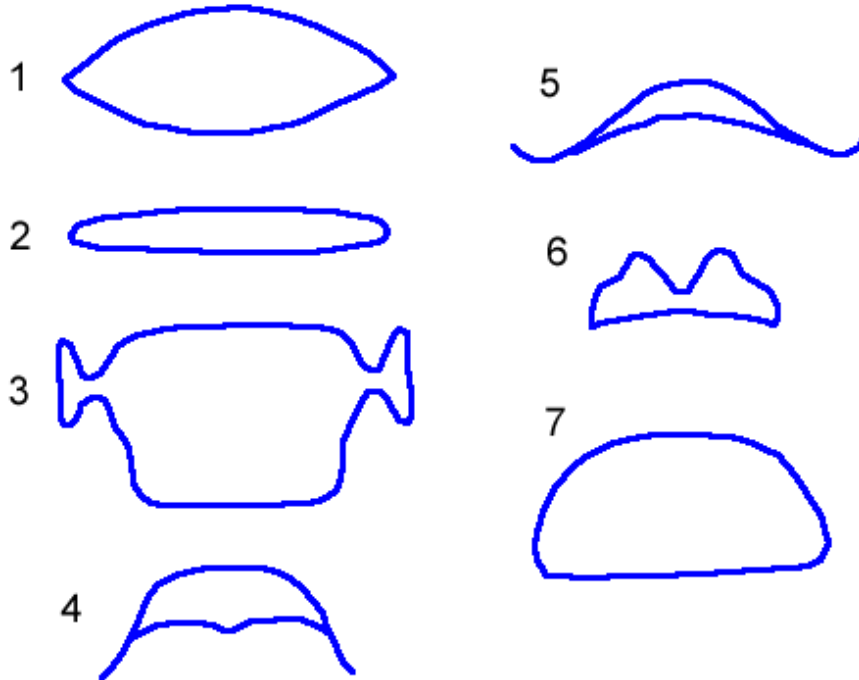


Sección del tracto vocal durante la articulación de una vocal abierta central producida por un hablante masculino de Rusia. La línea roja representa la línea media del tracto vocal durante la fonación. Cada 0.5 cm. se ha determinado la medida del área de la sección correspondiente a lo largo de esa línea desde los labios hasta la glotis.

Adaptado de Fant (1960)

http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Resonancias en el tracto vocal



Área de la sección del tubo en los siete puntos enumerados anteriormente.

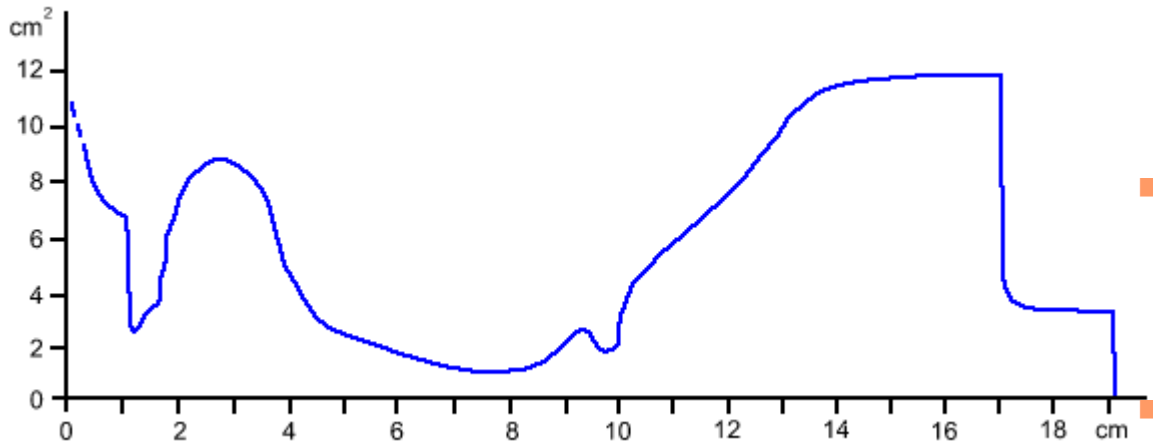
Hay una gran variación en la sección, pero sólo el área y no la forma contribuye de forma importante a las resonancias del tracto.

En la mayoría de modelos matemáticos de resonancias del tracto vocal cada una de las formas anteriores se sustituye por pequeño tubo

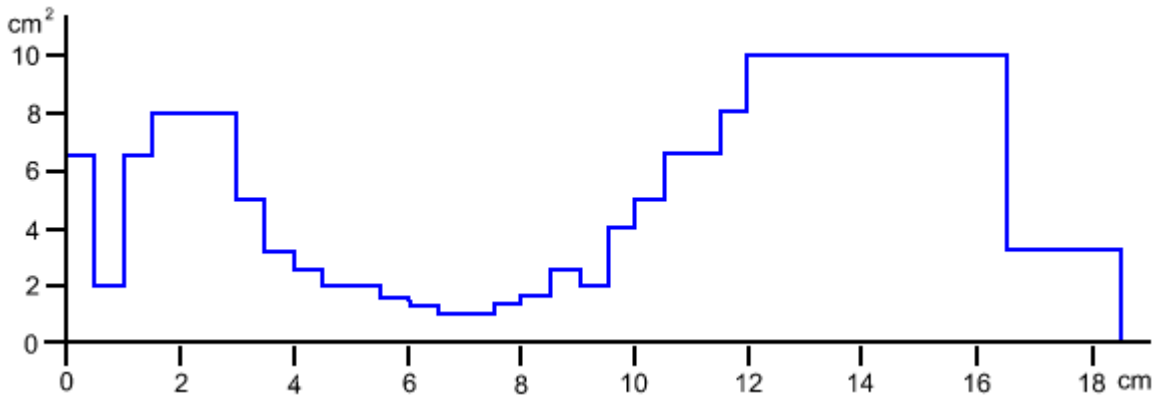
Adaptado de Fant (1960)

http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Resonancias en el tracto vocal



- Con estas medidas Fant configuró un sintetizador. El sintetizador se diseñó para simular las contribuciones a la resonancia de hasta 45 secciones, cada una de ellas de 0,5 cm de longitud.

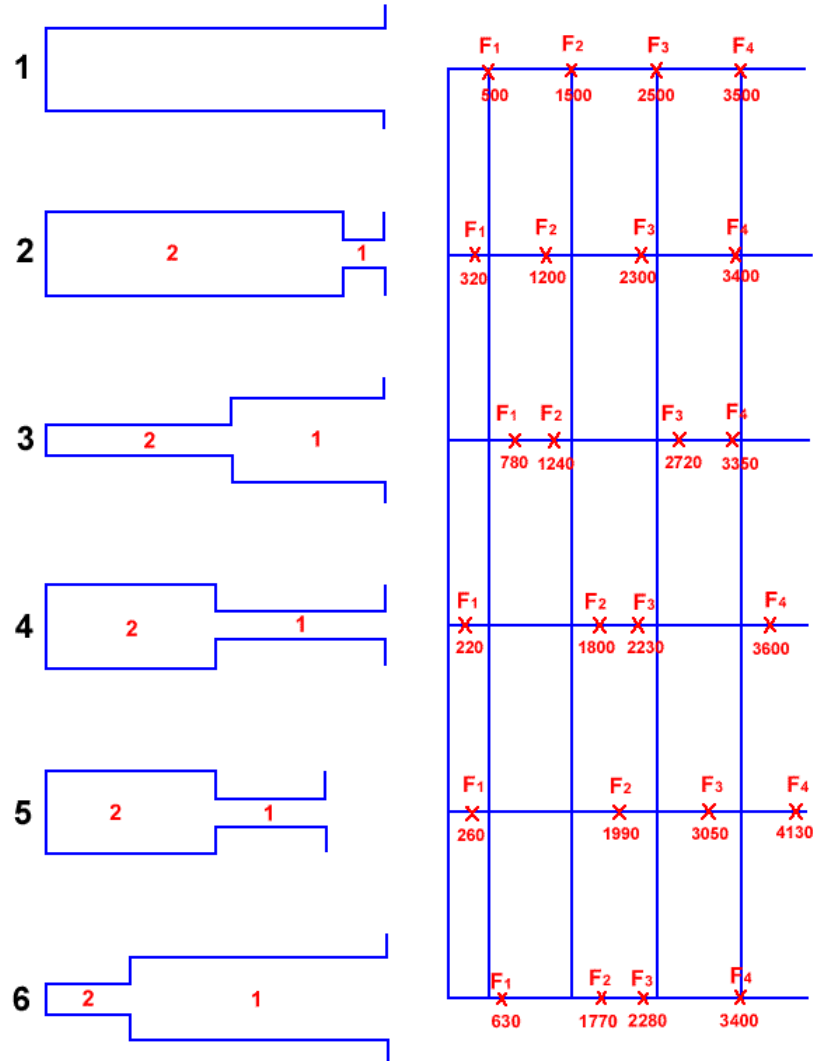


Adaptado de Fant (1960)

http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Resonancias en el tracto vocal

- Un modelo de dos tubos simplifica mucho la configuración del tracto vocal.
- En primer lugar, ignora la curvatura del tracto.
- El tracto se trata como si tuviese una constricción delantera o trasera.
- Como resultado de esto aparecen dos clases de vocales:
 - ◆ Una con un tubo delantero estrecho.
 - ◆ Otra con un tubo trasero estrecho.
- Las vocales de cada clase se distinguen por las longitudes relativas de ambos tubos.

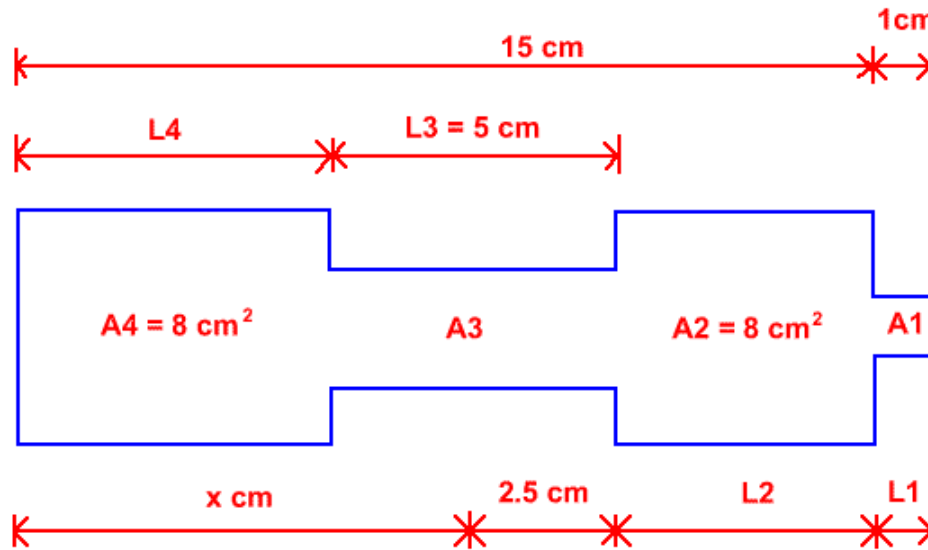


Adaptado de Fant (1960)

http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Resonancias en el tracto vocal

- Modelo de cuatro tubos (modela bien las vocales salvo por la nasalización):
- Modelo para un tracto de 15 cm. Se controla con tres parámetros:
 - ◆ La posición del centro del tubo 3 respecto a la glotis. (x cm.).
 - ◆ El área de la constricción de la lengua (A_3).
 - ◆ La relación (L_1/A_1).
- L_3 se fija a 5 cm salvo cuando el centro del tubo 3 está a menos de 2.5 cm del final del tracto.

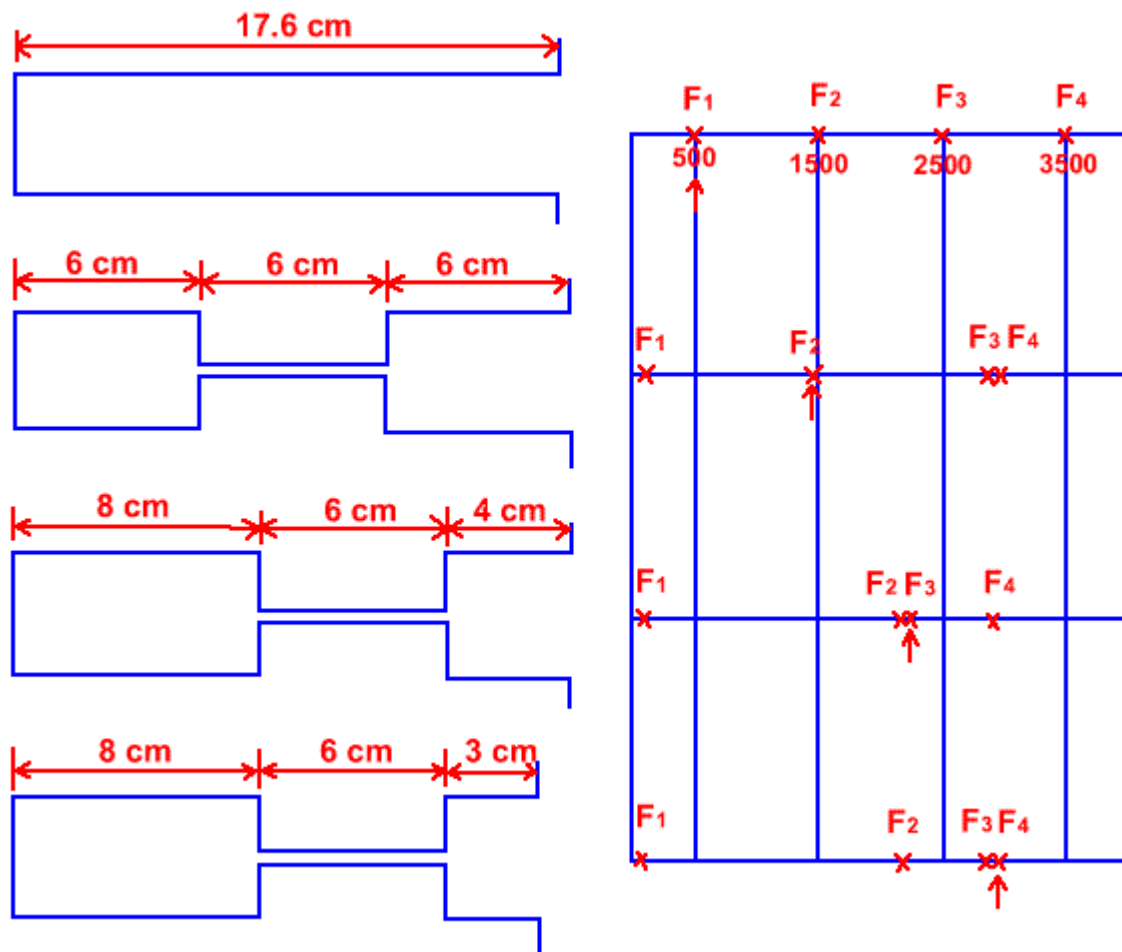


Adaptado de Fant (1960)

http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Resonancias en el tracto vocal

- Modelo de tres tubos para consonantes

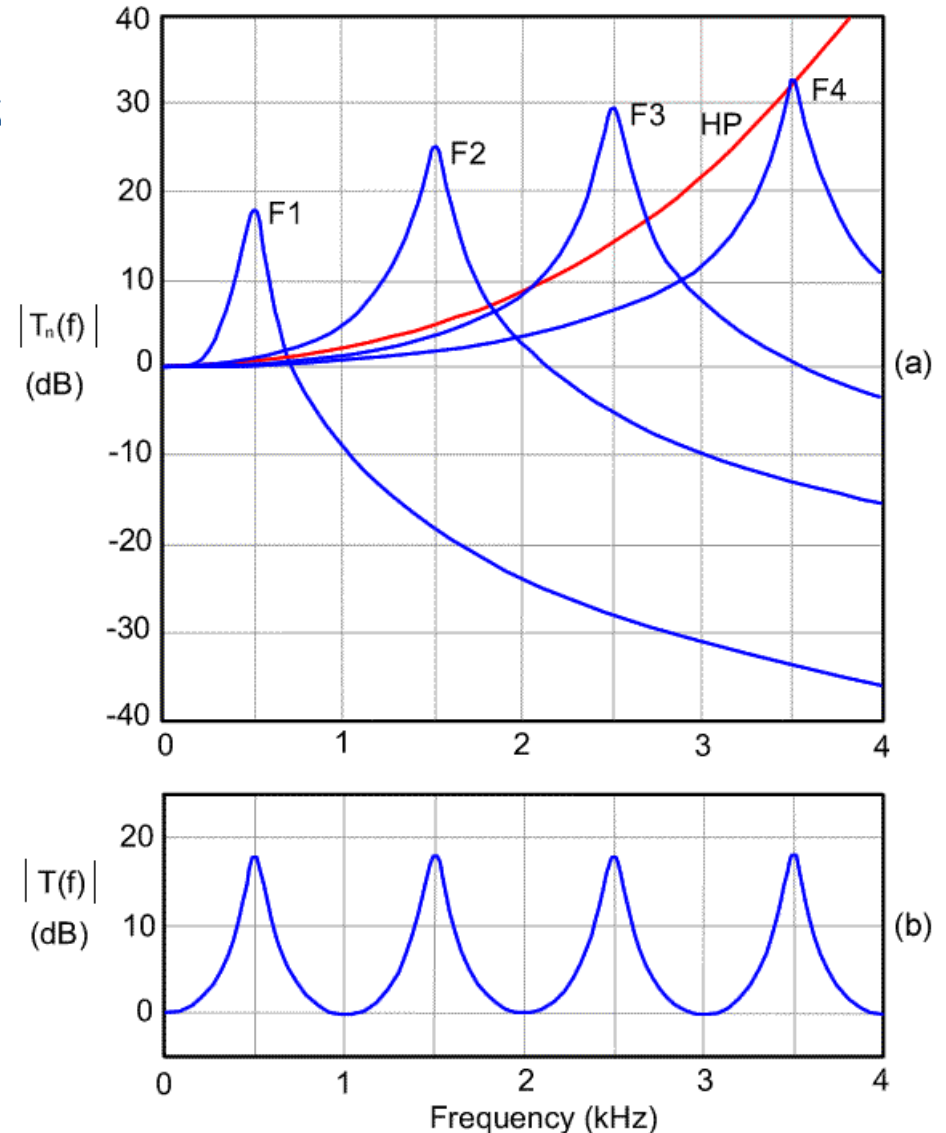


Adaptado de Fant (1960)

http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Funciones de transferencia

- Función de transferencia ideal para una vocal neutra
- Sin embargo no todas las resonancias deberían tener el mismo ancho de banda
- Las paredes del tracto vocal absorben energía (más eficientemente para altas frecuencias)

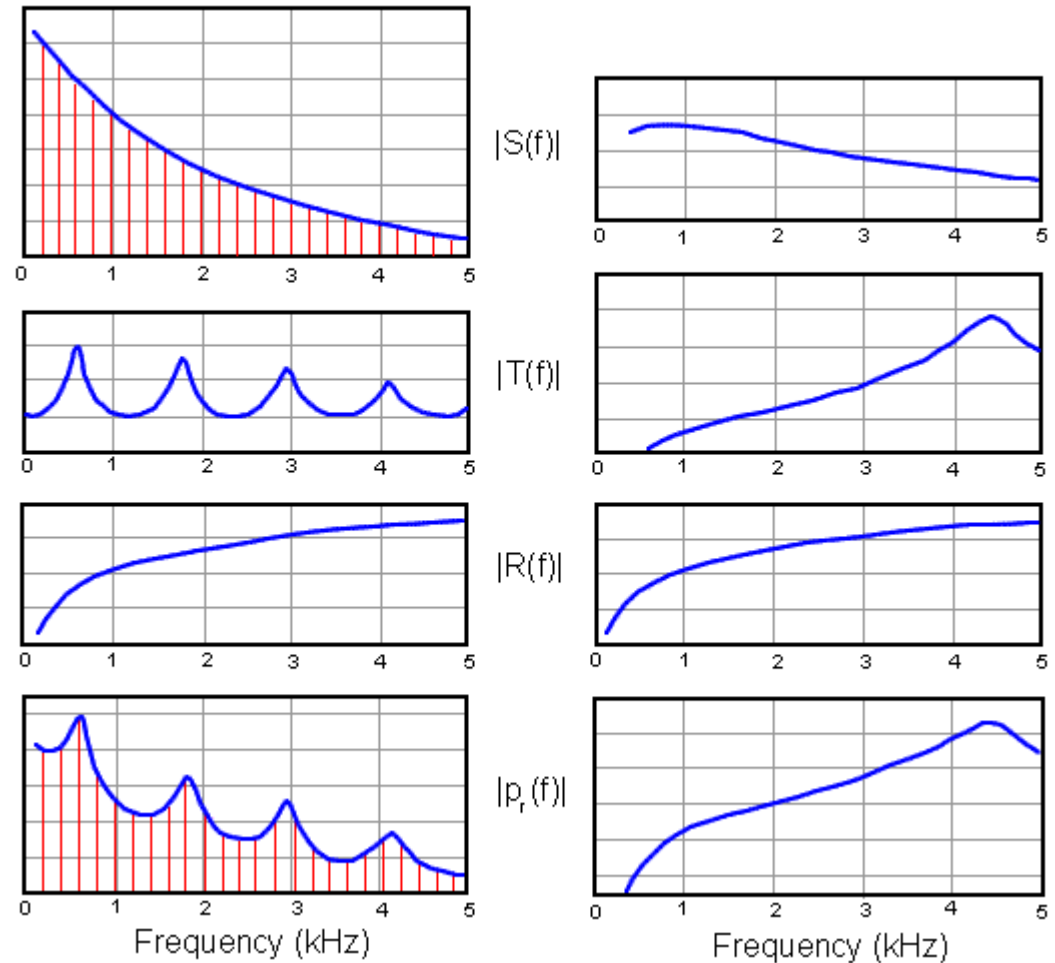


Adaptado de Stevens (1998) http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Tratamiento Digital de la Señal de Voz, Curso 2010/2011. Sonido y Resonancia



Espectro de la señal de voz



Adaptado de Stevens (1998) http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/acoustic_theory.html

Tratamiento Digital de la Señal de Voz, Curso 2010/2011. Sonido y Resonancia



Asignación de resonancias a cavidades

- ¿Pertenece un formante a una cavidad?.
- A menudo se afirma que F1 está correlado negativamente con la altura de la lengua (i, u, o, e, a).
- F2 está correlado con la posición más o menos adelantada de la lengua.
- Sin embargo, no se puede afirmar que F1 sea el resultado de la cavidad trasera de resonancia y que F2 aparezca como resultado de la cavidad delantera de resonancia.
- Las dos cavidades están unidas por una sección con baja impedancia acústica y las resonancias generadas son resultado de la interacción de ambas cavidades.