



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD CULHUACAN

“EMISORES”

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA
PRESENTA:

ISRAEL REYES SANJUAN

ASESORES:
ING. LUIS GERARDO HERNANDEZ SUCILLA
ING. SERGIO VAZQUEZ GRANADOS



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD CULHUACAN**

TESINA

QUE GENERA EL TITULO: INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA
POR LA OPCION DE TITULACION: SEMINARIO
DENOMINADO: TECNICAS DE GRABACION Y REPRODUCCION DEL SONIDO
VIGENCIA: FNS30697/11/2007
DEBERA DE REALIZAR: ISRAEL REYES SANJUAN

“EMISORES”

INTRODUCCION

CAPITULO I: El Difusor Schroeder

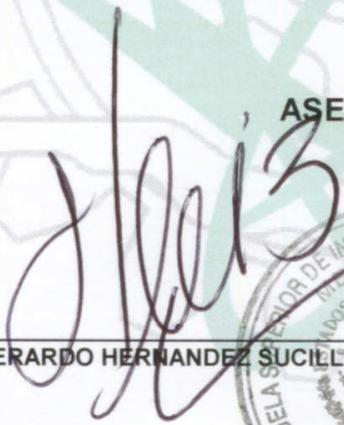
CAPITULO II: Modos de resonancia en espacios cerrados

CAPITULO III: Reflexiones de Sonido en Espacios Cerrados

CAPITULO IV: Efectos de filtro peine

CAPITULO V: Acústica de los cuartos de Escucha

ASESORES.


ING. LUIS GERARDO HERNANDEZ SUCILLA


ING. SERGIO VAZQUEZ GRANADOS.


M. EN C. HECTOR BECERRIL MENDOZA.

JEFE DE LA CARRERA DE INGENIERIA EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA

INDICE

INTRODUCCION.....	6
CAPITULO I: El Difusor Schroeder.....	7
Primer Difusor Acústico de Schroeder.....	7
Secuencia de Máxima-Longitud.....	9
Difusores con Reflexiones de “Phase-Grating”.....	10
Difusores con Residuos Cuadráticos.....	11
Difusores de Raíz Primitiva.....	13
Aplicaciones de los Residuos Cuadráticos.....	14
Desempeño de los Difusores de Difracción-Grating.....	15
Expansión de la Línea QRD.....	21
Resolviendo Problemas de Ondas.....	21
Aplicación de Fractales.....	23
Difusión en Tres Dimensiones.....	25
Blocks Acústicos de Concreto.....	26
Medición de la Eficiencia de Difusión.....	28
Comparación de Gatings con Aproximaciones Convencionales.....	29
CAPITULO II: Modos de Resonancia en Espacios Cerrados.....	32
Resonancia en un Tubo.....	33
Acústica del Cuarto de Baño.....	34
Reflexiones Dentro de Cuarto.....	35
Resonancia de Dos Muros.....	37
Ondas vs. Rayos.....	38
Regiones de Frecuencia.....	38
Dividiendo el Espectro de Audio.....	41
Ondas Acústicas.....	41
Cálculos de Modo – Un Ejemplo.....	43
Verificación Experimental.....	46
Identificación de Modos.....	46
Decaimiento del Modo.....	48
Modo Ancho de Banda.....	49
Planos de los Modos de Presión.....	54
Densidad Modal.....	56
Espaciado y Coloración del Modo.....	57
Experimentos con Coloración.....	59
Simplificando el Análisis del Modo Axial.....	61
El Criterio de Benello.....	63

Controlando los Problemas de los Modos.....	63
Puntos importantes de los Modos.....	65
CAPITULO III: Reflexiones de Sonido en Espacios Cerrados.....	67
Ley de los Primeros Frentes de Onda.....	67
Medida de Trayectoria Libre.....	67
El Efecto de una Reflexión.....	69
Percepciones de las Reflexiones de Sonido.....	69
Percepción de Amplitud.....	71
Cambios de Imagen.....	71
Ecos Discretos.....	71
Efectos del Angulo de Incidencia en la Audibilidad de la Reflexión..	71
Efecto del Tipo de Señal en la Audibilidad de la Reflexión.....	72
Efecto de Espectro en la Audibilidad de la Reflexión.....	72
Usando Datos de la Reflexión.....	73
Espacios Grandes.....	73
Amplitud.....	74
Capitulo IV: Efectos de Filtro Peine.....	75
¿Qué es un Filtro Peine?.....	75
Superposición de Sonido.....	75
Señales Tonales y Filtros Peine	77
Combinación de Señales de Música y Voz.....	79
Combinación de Sonido Directo y Reflejado.....	80
Filtro Peine y Bandas Críticas.....	83
Filtro Peine en Stereo	86
Audibilidad de Efectos por Filtro Peine.....	86
Filtros Peine en la Práctica.....	86
Estimación de la Respuesta de Filtro Peine.....	91
CAPITULO V: Acústica de los cuartos de Escucha.....	95
Los Vínculos Acústicos.....	95
Peculiaridades de la Acústica de Cuartos Pequeños.....	96
Tamaño del Cuarto.....	96
Proporciones del Cuarto.....	97
Tiempo de Reverberación.....	98
El Cuarto de Escucha: Baja Frecuencia.....	98
Control de Resonancias Modales.....	101
Tapaderas Graves para Cuartos de Escucha.....	101
Coloración Modal.....	103

El Cuarto de Escucha: las Frecuencias Medias-Altas.....	103
Identificación de Tratamientos para Puntos de Reflexión.....	106
Reflexiones Laterales: Control de Amplitud.....	108
Bibliografía.....	109

INTRODUCCION

Todo tiene movimiento en el universo, siempre con transformaciones constantes, hasta podríamos decir que lo único constante en el universo es el mismísimo cambio... Son justamente, las transformaciones en tiempo de los sonidos, sus orígenes, su vasta variedad de "personalidades" o "colores", las que evocan estas sensaciones gratas, en ocasiones indeseables, suaves o intrigantes, y que además, nos servimos de ellas, al comunicarnos, en la música, incluso hasta en las palabras. Emisores, conociéndoles, nos ayudamos a identificar como es que, desde la ciencia, se generan sonidos característicos básicos, muy usados por todos, y claro, experimentado por todos. Alma-música están íntimamente relacionados, como también lo están ciencia y arte, acústica y movimiento, sensaciones capaces de ser medidas, predecibles y comprendidas, que al final, sin haberlo meditado, desde el nacer, hemos sido parte de ello. El ritmo eterno del corazón es una asombrosa demostración de que somos parte de este constante pulso que no controlamos, que a su vez, haciendo su función en nuestro interior, podemos enfocarnos en particularidades como lo es la acústica. Todos los proyectos acústicos están enfocados en un solo objetivo, el deleite humano. Es en esta búsqueda de confort al oír, que incluso puede suceder en la comodidad del hogar, lo que genera inquietudes como lo son buscar maneras de adecuar el lugar donde se habrá de escuchar.

CAPITULO 1

El Difusor Schroeder

La difracción es un evento físico muy particular e importante en acústica. El estudio de la difracción supone un comportamiento amplio entre espacio y tiempo.

Allí hay tres cuadros de mariposas montadas en la pared, un dulce recordatorio a primera vista de sus magníficos destellos de color al revolotear en las claras junglas de Panamá. Su color cambia en las más brillantes formas. Ellas son aun más fascinantes para mí cuando aprendí que este color no es pigmentado- sino color estructural.

Las alas de la mariposa son sutilmente bronceadas, los colores vividos son el resultado de la separación de la luz que esta dentro del arco iris producido por la difracción. Visto, no obstante por el microscopio, la superficie de las alas esta echa de muy pequeñas protuberancias y ranuras que reflejan-difractan la luz.

En el observatorio Wilson la difracción fue usada por Edwin Hubble para hacer mediciones de luz de las estrellas distantes. Usando la difracción él formulo su teoría de la expansión del universo basado en el "corrimiento al rojo" de la luz en las estrellas que observó. Usó una placa de cristal de precisión, líneas paralelas que la cortan, en muchos miles de pulgadas. La luz del sol baja en rayos, es separada en sus componentes de color, igual que la luz de las estrellas.

En los primeros días, la difracción de rayos X por cristales fue estudiada en el Physics Departament at Stanford University en una jaula segura hecha de malla para enjear a pollos, en un rincón del sótano. Los cristales eran básicamente naturales produciendo graficas de difracción en tres dimensiones. Los rayos X, teniendo una longitud de onda del mismo orden que el espacio del átomo en el cristal enrejado, son dispersados por el cristal en una ordenada y predecible forma.

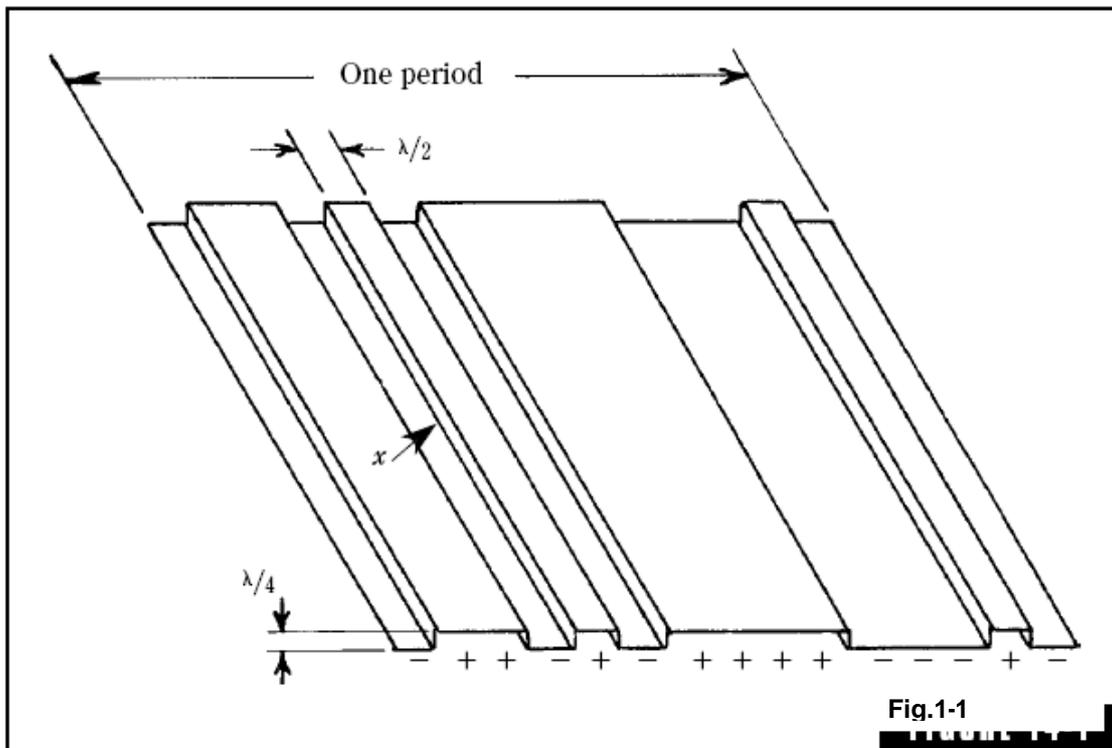
Primer Difusor Acústico de Schroeder

En un remarcable surgimiento de frescas y nuevas ideas, Manfred R. Schroeder de la Universidad de Gottingen Germany, y ATT&T Bell Laboratorios en Murria Hill, New Jersey, se abrió una nueva vista en la difusión del sonido. Schroeder aporto su programa y teoría para un arreglo de pared perforada para poder difundir el sonido a un grado inalcanzable en el pasado. Máxima-extensión del programa puede ser usada para crear ruidos seudo-aleatorios para aplicación de secuencias obligadas de +1 y -1. El espectro (de la trasformada de Furier) de tal ruido es esencialmente plano. Un ancho y plano espectro es relacionado para coeficientes y ángulos de reflexión, y esto da paso a la idea de aplicar el +1 y -1 en una máxima-extensión secuencial de alguna cosa acústicamente interesante que pudiera resultar. El -1 sugiere una reflexión desde el fondo de una ranura en un muro con una profundidad de un cuarto de longitud de onda. El +1 sugiere reflexión desde el muro mismo sin ninguna ranura.

El siguiente movimiento del profesor Schroeder fue experimentar la idea. El ordeno las piezas de hoja de metal para ser dobladas como lo muestra la figura 1-1, planeando el experimento de la idea con 3cm para microondas. Esta forma siguió la máxima-extensión secuencial binaria con periodos de longitud 15:

- + + - + - + + + + - - - + -

El patrón de reflexión resultante (fig. 1-2 (B)) indica que esta hoja de metal fue mejor a otras piezas de metal; este dio una fuerte reflexión predecible, pero poca difusión de energía. El se pregunto como son los pasos y aprendió que ellos están a media longitud de onda, no en cuarto de onda. No fue sorpresa que reflejó las microondas como una lamina plana de metal! Las ranuras de una media longitud de onda dan un coeficiente de reflexión de +1, justo como una lamina plana. Regresando al taller para una nueva hoja de metal con ranuras de cuarto de onda de profundidad.

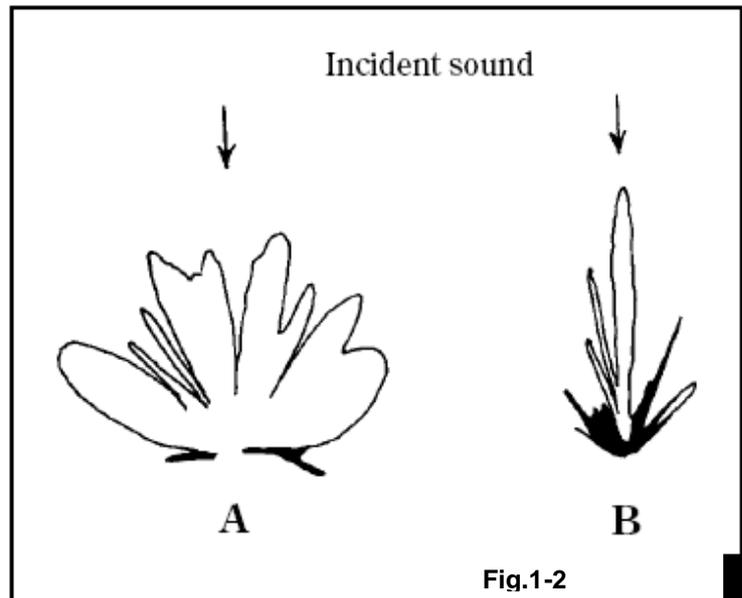


Una placa de metal doblada conforme a la secuencia de máxima-longitud usada por Schroeder para revisar la difusión de 3cm para ondas de radio. Los espesores son todos de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda.

Esta vez los patrones de radiación de la figura 1-2A resultó en un desarrollo alentador.

Los asociados con el profesor Schroeder, quienes también amoldaron el metal, fueron quienes siempre se interesaron en revisar sus teorías. El, quietamente realizó otras pruebas con una cinta angosta de metal cubriendo sólo una de las ranuras, el marcado con x en la fig.1-1.

El patrón de reflexión de la figura 1-2B resultante, demuestra esencialmente la supuesta reflexión del mayor regreso de la energía hacia la fuente. En otras palabras, cubierto sólo uno de los canales destruye casi completamente el favorable patrón de radiación de la fig.1-2A. Estos logros animan a futuros desarrollos de las ideas básicas para aplicaciones acústicas.



Cuando la fuente de la figura 1-1 está accidentalmente echa de media longitud de onda de espesor, la sola suposición de la reflexión de B resultó en la misma como para una placa plana de metal. Cuando otro difusor fue echo con el correcto espesor de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda, el patrón de radiación más favorable obtenido es el de A. Con permiso de M.R. Schroeder and Applied Science Publishers, Ltd., London.

Secuencia de Máxima-Longitud

Este experimento fue un punto importante en la acústica. Los patrones de reflexión de la figura 1-2A aun están lejanos del mejor sonido de difusor previamente disponible. Por encima de la mitad del siglo, los difusores fueron buscados a través de de las proporciones de los cuartos, despliegue de muros, el uso de semiesferas, poli cilíndricos, triangulares, cúbicas, y deformaciones geométricas rectangulares, y la distribución de material absorbente. El grado de difusión alcanzado por tales medios fue alejado para conocer los suficientes requerimientos. Considerada esta idea, la importancia del experimento del profesor Schroeder con la pieza de metal doblada vino a ser evidente.

Porque una ranura de un cuarto de longitud de onda de profundidad o espesor requiere del doble difusor de máxima longitud, las propiedades del sonido reflejado por la superficie dependen de la longitud de onda del sonido incidente. La experiencia ha indicado que los resultados de un difusor razonable sobre una banda de mas o menos una mitad de octava alrededor de la frecuencia que el difusor fue diseñado. Por ejemplo, considere un difusor con secuencia de

máxima-longitud con secuencias de longitud de 15. El diseño para una frecuencia de 1000Hz da una media longitud de onda de 7.8, y para $\frac{1}{4}$ de longitud de onda de espesor da 3.9. Un solo periodo de este difusor habría de ser de 5ft de ancho y efectivo entre 700hz y 1400hz. Muchas unidades semejantes habrían de ser requeridas para proporcionar difusores por encima de una porción razonable de banda audible.

Difusores con Reflexiones de “Phase-Grating”

La difracción que sólo se aplicaba en el campo de la óptica ahora esta aplicado a la acústica. El desarrollo comercial de las ideas tuvo un seguimiento muy celoso por RPG Diffusor Systems, Inc., de Upper Marlboro, Maryland. En el pasado, básicamente los diseñadores acústicos solo le dieron el uso de absorción y reflexión. La difusión fue algo seriamente cotizado, pero sólo parcialmente llevada a cabo. Con la grande variedad de grating-type unidades de difusor son validadas comercialmente, esta situación fue cambiando rápidamente.

El tratamiento acústico de grandes espacios es bien realizado por tales difusores. Un espacio grande es definido como uno cuyos modos normales de frecuencias son así cerradamente espaciados como para problemas de resonancia en baja frecuencia. Esto incluye salas de espectáculos musicales, auditorios de conciertos o conferencias, e iglesias. La calidad del sonido musical en recintos de concierto es influenciado grandemente por las reflexiones de los lados de las paredes. No realizarlas prolongadas dependen completamente de los lados de las paredes para las necesarias reflexiones laterales. Una fila de paneles difusores por debajo del centro del recinto al nivel del techo puede distribuir el sonido del escenario lateralmente a la gente que se encuentra sentada. Cualquier reflexión molesta puede controlarse por una estratégica colocación del difusor.

En iglesias este es siempre un conflicto entre la inteligibilidad de los hablantes de la palabra y las condiciones para un mayor disfrute de la música. La pared trasera es muchas veces la fuente de reflexiones que crean disturbios de ecos. Para hacer este muro absorbente es a menudo perjudicial para las condiciones de música. Haciendo un muro difusor, sin embargo, minimiza el problema del eco mientras al mismo tiempo conserva la preciosa energía de la música y el habla. Los directores musicales son a menudo quienes se dan cuenta del problema de que los cantantes o instrumentistas no se escuchan bien unos a otros. Envolviendo la música del grupo con un arreglo de difusores de reflexión phase-grating ambos conservan la energía musical y propagándolo alrededor para alcanzar un ensamble entre los músicos.

Las dificultades acústicas de cuartos pequeños es especialmente ayudada por difracción de elementos difusores grating-type. La necesidad para hacer paredes y distribuir materiales de absorción para conseguir alguna semblanza de sonido disperso es sustentada por el apropiado uso de los difusores. Para el primer momento esto es posible, por el correcto diseño, para dar una aceptable grabación de la voz de pequeños “anuncios de cabina” porque los elementos difusores crean un sonido de cuartos grandes. Esto es seguro de decir del futuro

diseño del cuarto de audio que, nunca va a ser el mismo por causa de los difusores.

Difusores con Residuos Cuadráticos

El principio de la reflexión phase-grating es ahora aplicada al sonido, de nuevo se echa mano de la comprensión intuitiva de la limitación de las difusores de máximas-longitudes. Schroeder razono que una onda incidente de sonido desciende en la físicamente llamada reflexión de grating que habría de reflejar el sonido casi uniformemente en todas direcciones. La fase invertida (o periodo invertido) puede obtenerse por un arreglo de pozos de profundidad determinada por una secuencia de residuo cuadrático. El máximo pozo de profundidad es determinado por la longitud de onda mas grande que se va ha reflejar. El ancho del pozo, ranura, u orificio es alrededor de la mitad de la longitud de onda a causa de la onda que va ha dispersarse. La profundidad de la secuencia de orificios o ranuras es determinada por la afirmación:

$$\text{Factor de proporcionalidad de profundidad de ranura} = n^2 \text{ modulo } p \quad [\text{Ec.1-1}]$$

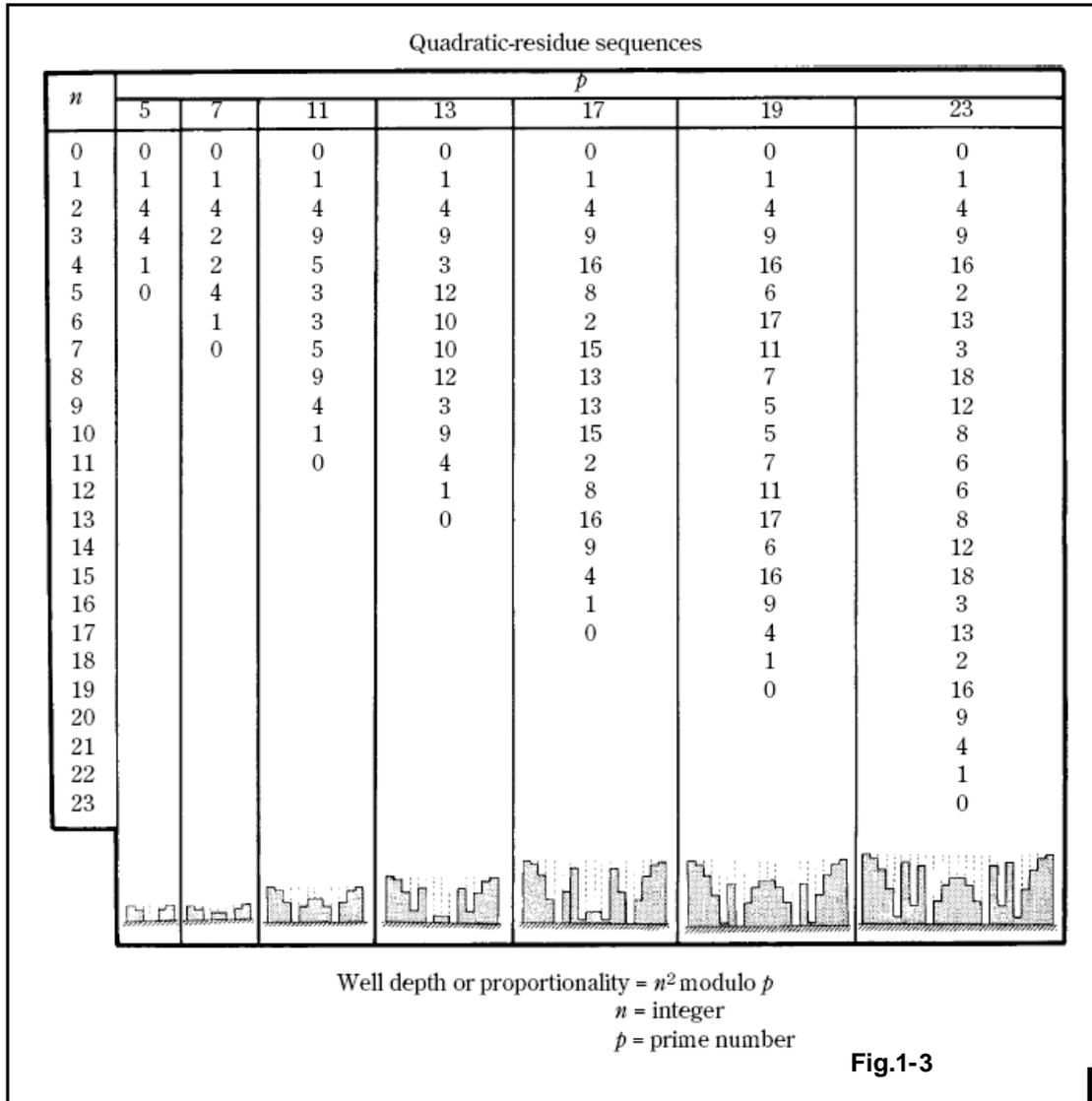
en el cual

p = un número primo

n = un número entero entre cero e infinito.

El noveno diccionario estudiantil Webster define un número primo como cualquier numero (de otra manera que 0 y ± 1) este no es divisible sin residuo por cualquier otro entero (excepto ± 1 y \pm el entero en si). Ejemplos de los números primos son 5, 7, 11, 13 etc. El modulo refiere simplemente al residuo. Por ejemplo, introduzcamos $p=11$ y $n=5$ en la ecuación (1-1) dando 25 al modulo 11. El modulo 11, este 11 es sustraído de 25 hasta que el residuo significativo es izquierdo. En otras palabras, 11 es sustraído de 25 dos veces y el residuo 3 es nuestra respuesta.

En la fig. 1-3 la secuencia de residuos cuadráticos son listados para los números primos 5, 7, 11, 13, 17 y 23, una columna de separación para cada uno. Para comprobar sobre el ejemplo para $n=5$ y $p=11$, revisar la columna marcada como 11, encontrar para $n=5$ y descubriremos 3. La figura 1-4 es un modelo para las reflexiones de residuos cuadráticos por difusor de phase-grating para $p=17$. Los números en cada columna de la figura1-3 son proporcionales a las profundidades de los orificios de diferentes difusores de residuos cuadráticos. El diseño de la figura1-4 esta basado en la secuencia de número primo 17. En el fondo de cada columna de la figura1-3 esta un boceto del perfil de un difusor de residuo cuadrático con la profundidad de los orificios proporcional a los números de la secuencia. Las líneas interrumpidas tenues indican clara división entre los orificios rectangulares.



Secuencia de residuo cuadrático para números primos desde 5 a 23. Al pie del perfil de cada columna del difusor las profundidades de los orificios (o pozos) son proporcionales a la secuencia de números encontrados arriba.

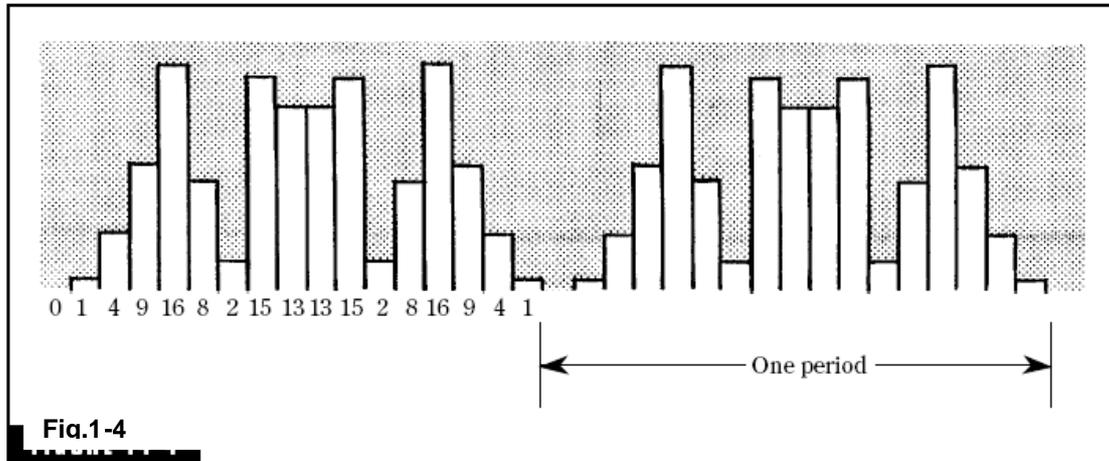


Fig.1-4

Un típico difusor de residuo cuadrático basado en la columna del número primo 17 de la figura1-3. Las profundidades de los orificios son proporcionales a la secuencia de números en la columna del numero primo 17. Dos periodos son demostrados en la ilustración como periodos adyacentes aplicados juntos.

Difusores de Raíz Primitiva

Los difusores de raíz primitiva emplean diferente teoría para secuencia de números, como sigue:

$$\text{Factor de proporcionalidad de profundidad de orificio} = g^2 \text{ modulo } p \quad [\text{Ec.1-2}]$$

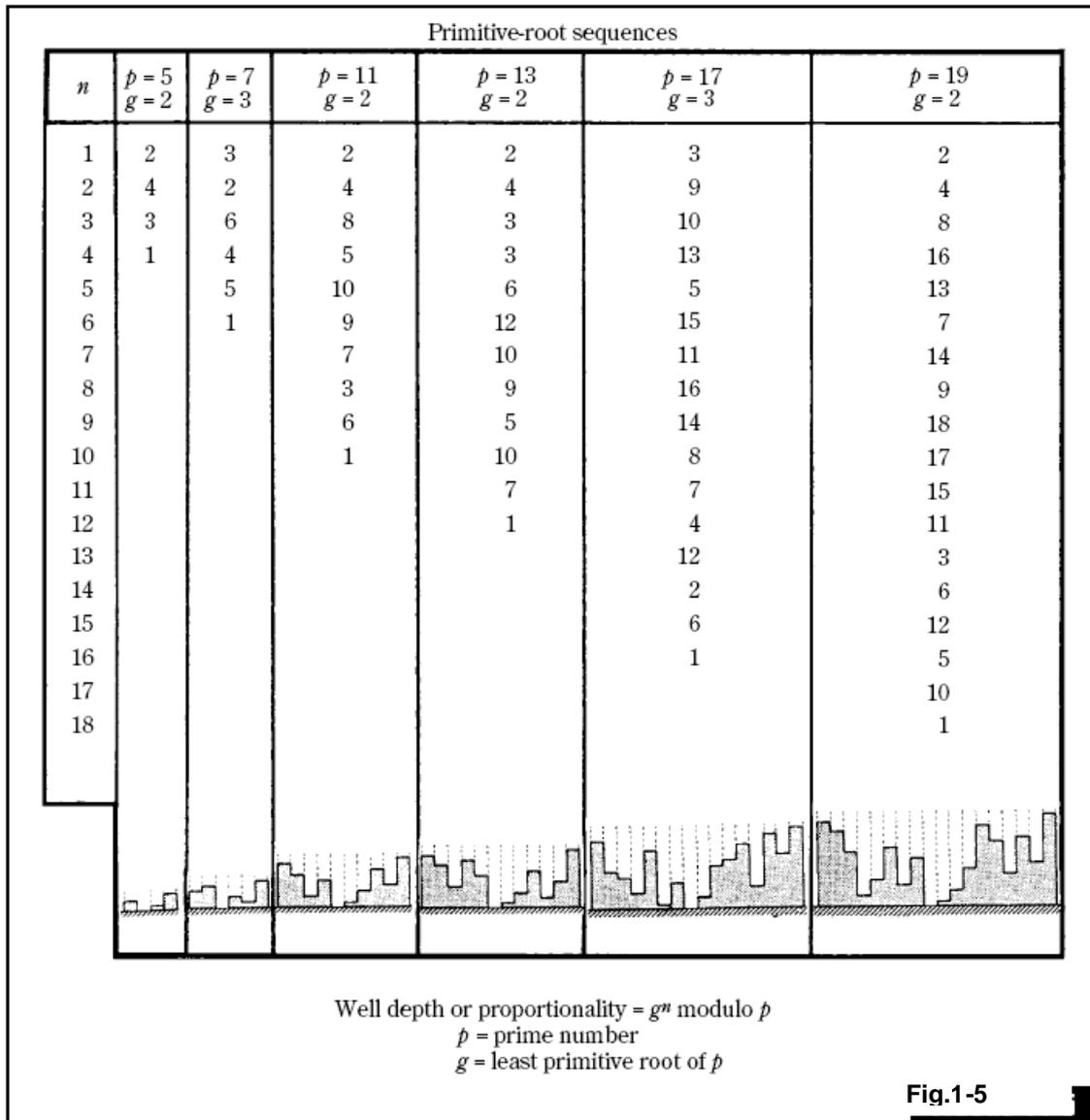
En el cual

- p es un número primo, y
- g es la menor raíz primitiva de p

La figura 1-5 incluye la secuencia de raíces primitivas para seis diferentes combinaciones de p y g . Los bocetos al fondo de cada columna no son simétricos como aquellos de los difusores de residuos cuadráticos. En la mayoría de los casos esto es una desventaja pero en algunos casos esto es una ventaja. Allí hay un problema acústico con los difusores de raíz primitiva en que el modo teórico no es suprimido tan bien así como lo es en el difusor de residuo cuadrático. El desarrollo comercial principalmente ha utilizado la secuencia de residuo cuadrático.

Separadores entre los orificios, usualmente metálicos, es comúnmente usado para mantener la integridad acústica de cada orificio.

Sin los separadores la efectividad de los difusores disminuye. Los anteriores pasos de cambio de fase para la llegada de sonido en otros ángulos de tendencia perpendicular viene a ser desconcertante en la ausencia de divisores.



La secuencia de raíces primitivas para seis combinaciones de número primo y la más pequeña raíz primitiva. El perfil del difusor de sonido al pie de cada columna tiene profundidad proporcional a la secuencia de números encontrados por encima. Nótese que ese difusor no es simétrico como el difusor de residuo cuadrático.

Aplicaciones de los Residuos Cuadráticos

Numerosas aplicaciones de la teoría de residuos cuadráticos han sido echas por RPG Difusor Systems, Inc. Por ejemplo, la fig.1-6 muestra dos de sus modelos QRD-4311 (debajo) y un QRD modelo 1911 (por encima). El 19 indica que este es construido con número primo 19 y el 11 especifica anchura del orificio de 1.1 pulgadas. La secuencia de números en la columna del primo 19 de

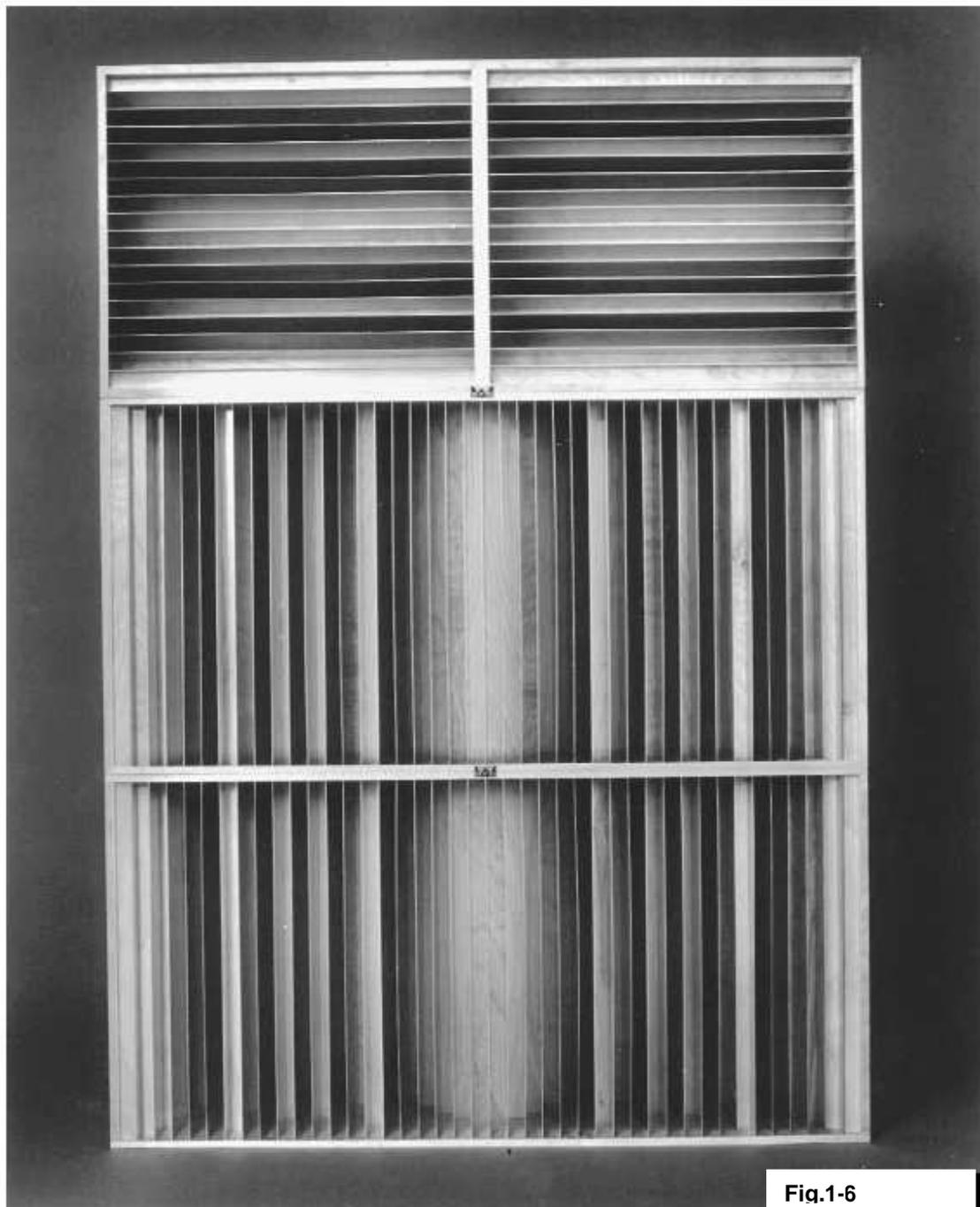
la fig. 1-3 especifica el factor de proporcionalidad para la profundidad del orificio del modelo de difusor QDR-911 de la fig. 1-6.

Siguiendo el mismo patrón, el QRD modelo 4311 en la parte baja de la fig. 1-6 esta basado en el numero primo 43 con un ancho de orificio de 1.1 pulgadas. Por razones practicas, la columna de la fig.1-3 detuvo el numero primo 23; los primos entre 23 y 43 son 29, 31, 37 y 41. Un buen ejercicio practico habria de ser para resolver n^2 modulo p para $n=0$ para 43 y $p=43$ y comparar la profundidad del orificio del modelo 4311 en la fig.1-6 conociendo esa profundidad del orificio si es oscuro o denso, con sombras o luz en los orificios. Este arreglo particular del difusor QRD ofrece excelente difusion en la horizontal semiesferica de la fig.1-7A. En la fig.1-6 la reflexion teorica de la cara del difusor es mostrada en la fig.1-7B. El orificio vertical del QRD 4311 difunde horizontalmente y el orificio horizontal del QRD 911 difunde verticalmente. Juntos producen un hemisferio virtual de difusion.

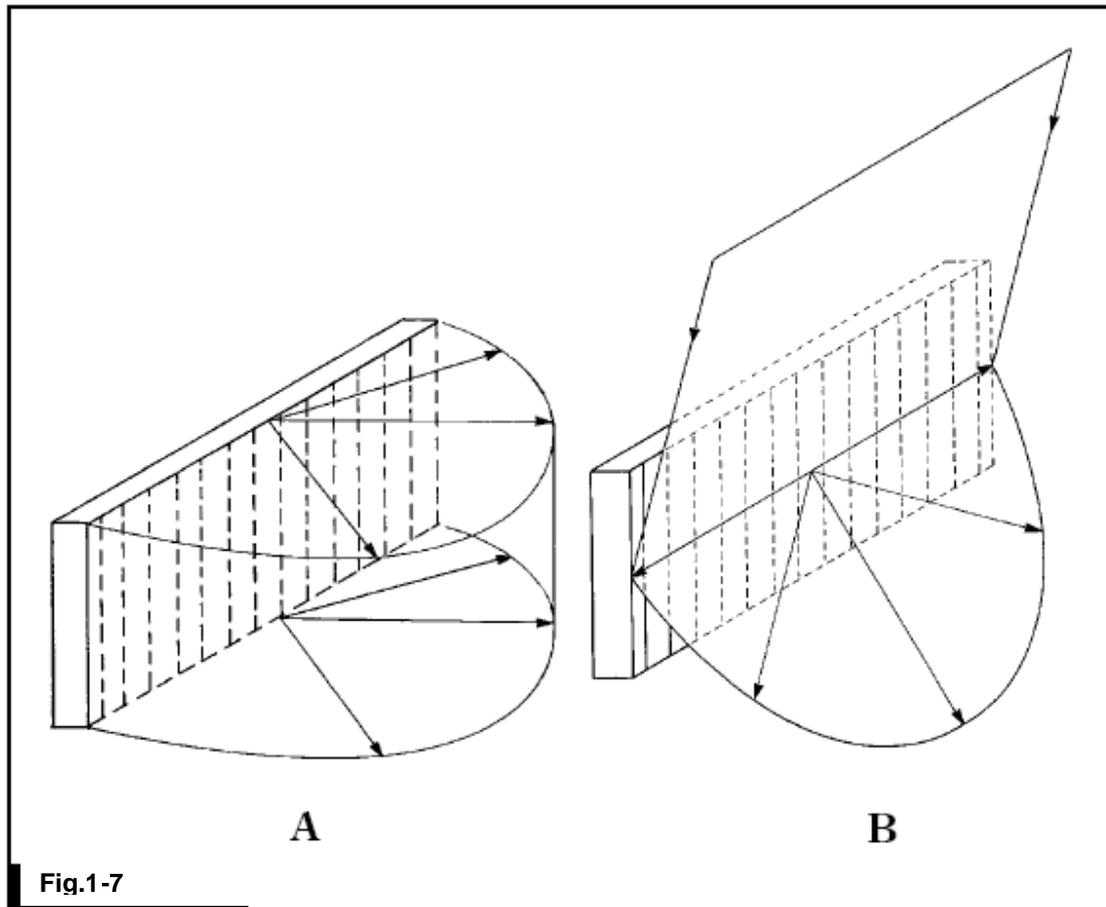
Desempeño de los Difusores de Difracción-Grating

En los diseños de espacios de audio de cualquier clase, los acústicos tienen tres bloques de construcción a su disposición: absorción, reflexión y difusión. En el pasado, esto fue una experiencia común para encontrar muchas más reflexiones pero muy pequeñas difusiones en el cuarto a ser tratado. Solo la absorción y un limitado número de trucos geométricos están avalados por el diseñador para cargar con esto en su diseño. Absorción, reflexión y difusión son ahora el mejor balance, por lo menos potencialmente.

Los efectos en el sonido incidente de los tres principios físicos de absorción, reflexión y difusión son comparados en la fig. 1-8. El sonido que choca en la superficie absorbente de sonido es principalmente absorbida, pero una pequeña fracción es reflejada. La respuesta temporal demuestra una muy atenuada reflexión de la superficie del absorbente.



Un arreglo comercial para difusor de residuo cuadrático. Debajo son dos QRD-411 módulos difusores con un único modulo QRD-911 encima de ellos. El hemisferio de difusión para la unidad mas baja es horizontal, en comparación con la unidad superior que es vertical. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. y la Audio Engineering Society, Inc.



A) Difusor unidimensional QRD dispersor alrededor en forma de hemisferio. B) Este hemisferio tal vez una dirección teórica por orientación de la fuente con respecto a la del difusor.

La misma onda de sonido incidente es fuerte, la superficie reflejante produce un reflexión de casi la misma intensidad como el sonido incidente en su superficie, justamente reduce un poco por pérdida en la superficie reflejante. El plano polar muestra la energía concentrada con respecto del ángulo de reflexión. El ancho en el plano polar es una función de la longitud de onda y de la pieza de la superficie reflejante.

Una onda de sonido incidente en al difusor, como un tipo de residuo cuadrático, es difractada por todas partes del hemisferio de la fig.1-7A. La energía dispersada decrece exponencialmente. El diagrama polar muestra la cobertura de energía más o menos igual por todas partes en los 180 grados, pero un poco reducido en ángulos específicos.

La uniformidad de la distribución angular de propagación de energía a través de un intervalo de frecuencias es mostrada dramáticamente en la fig.1-9. Ese experimental plano polar, obtenido por un difusor comercial de residuo cuadrático, es aplanado por promediar sobre las bandas de octava. Los planos polares comparables a los generados en computadora, para una sola frecuencia

basado en la teoría de difracción de campo lejano, muestra un organizador de paquetes apretados de lóbulos que tienen un pequeño significado parcial. La teoría de Kirchhoff sobre difracción de campo cercano muestra un lóbulo menor. La columna izquierda de la fig.1-9 muestra la distribución polar de bandas de octava de energía centrada en 250hz a 8000hz, un espacio de cinco octavas. En la columna derecha muestra el efecto para sonidos incidentes a 45 grados para las mismas frecuencias. El resultado de todos los ángulos de sonido incidente para baja frecuencia es dependiente de la profundidad de orificio. Las frecuencias altas son directamente proporcionales a el número de orificios por periodo e inversamente proporcional a la anchura del orificio. En la fig.1-9 la difusión de un panel plano es mostrada por una línea de luz para comparación.

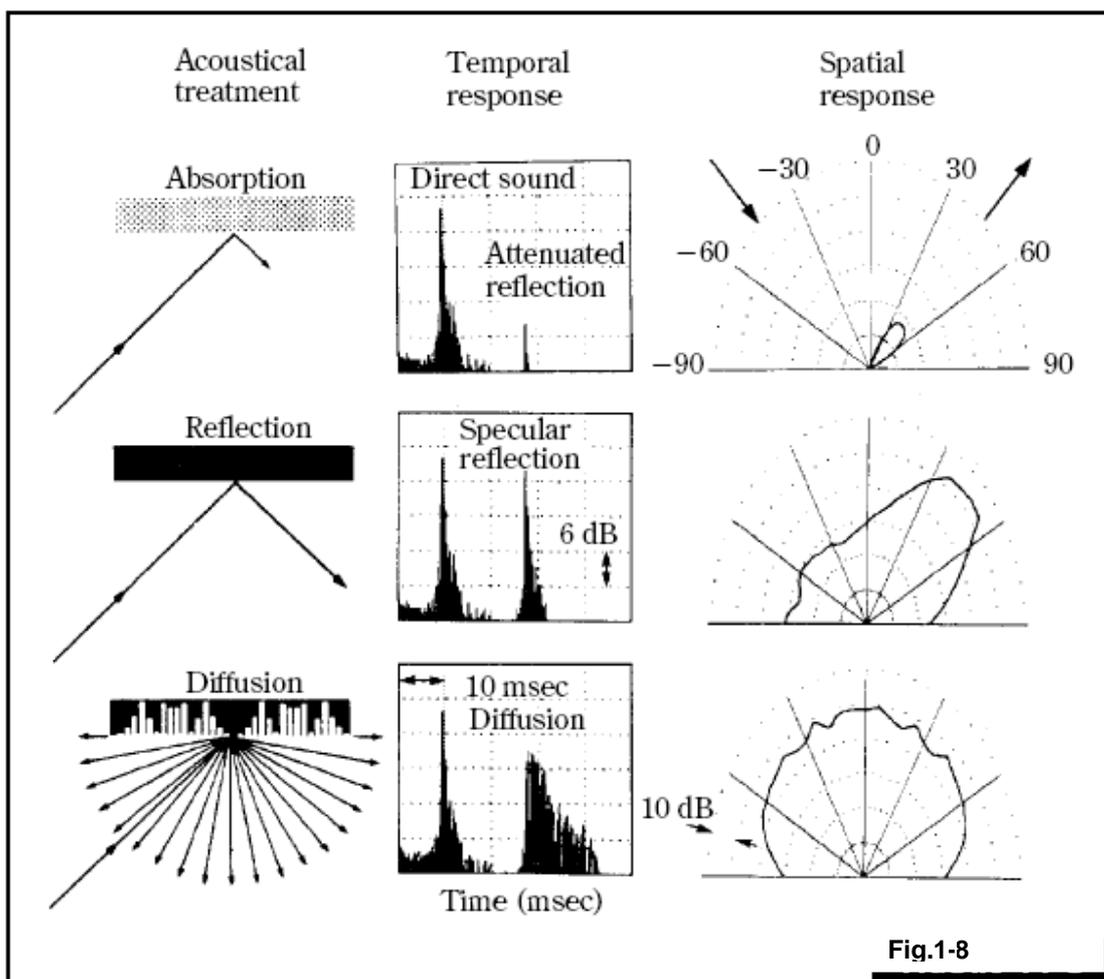


Fig.1-8

Comparación de tres principios físicos: absorción, reflexión y difusión.
 Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.

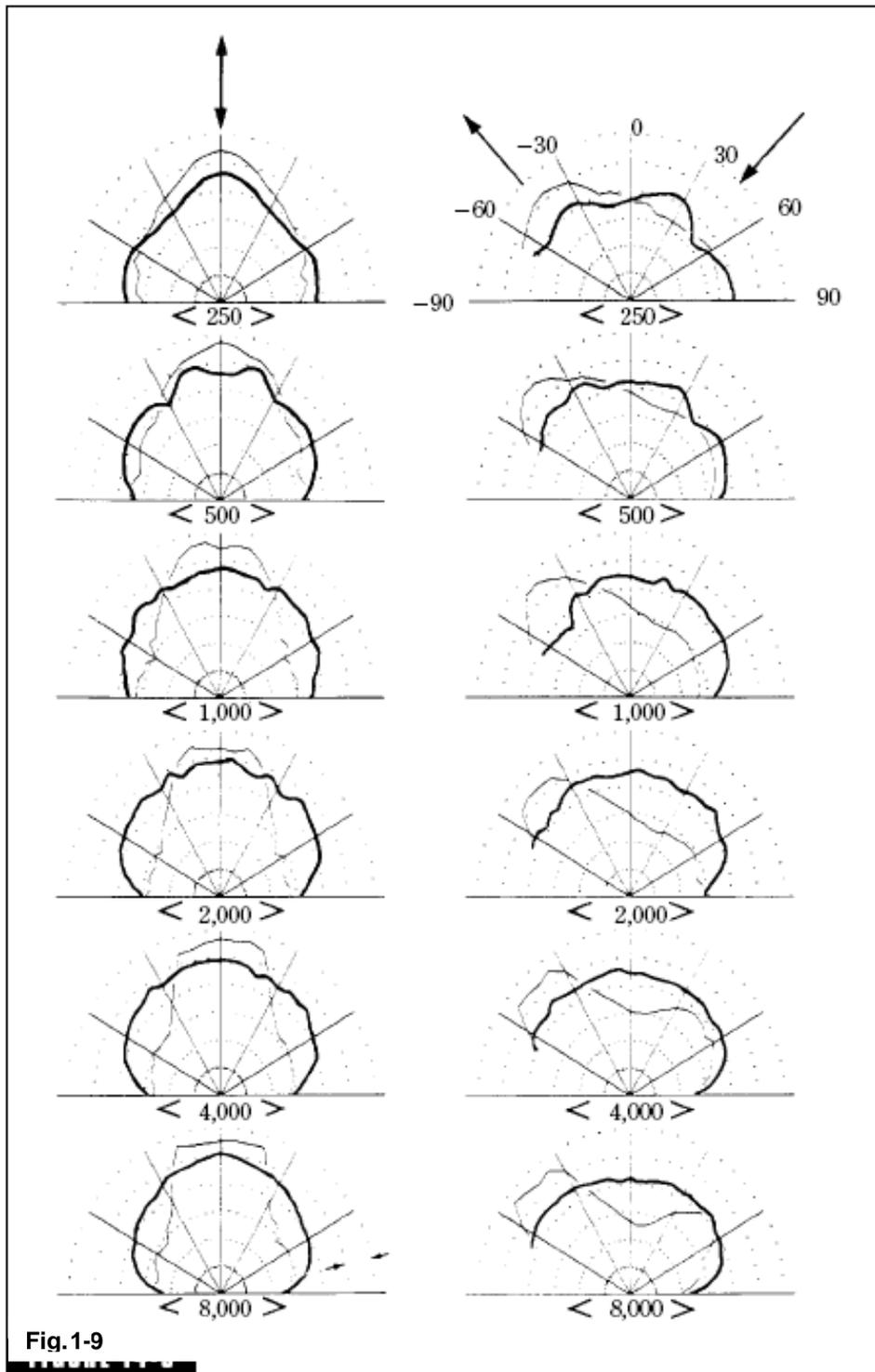
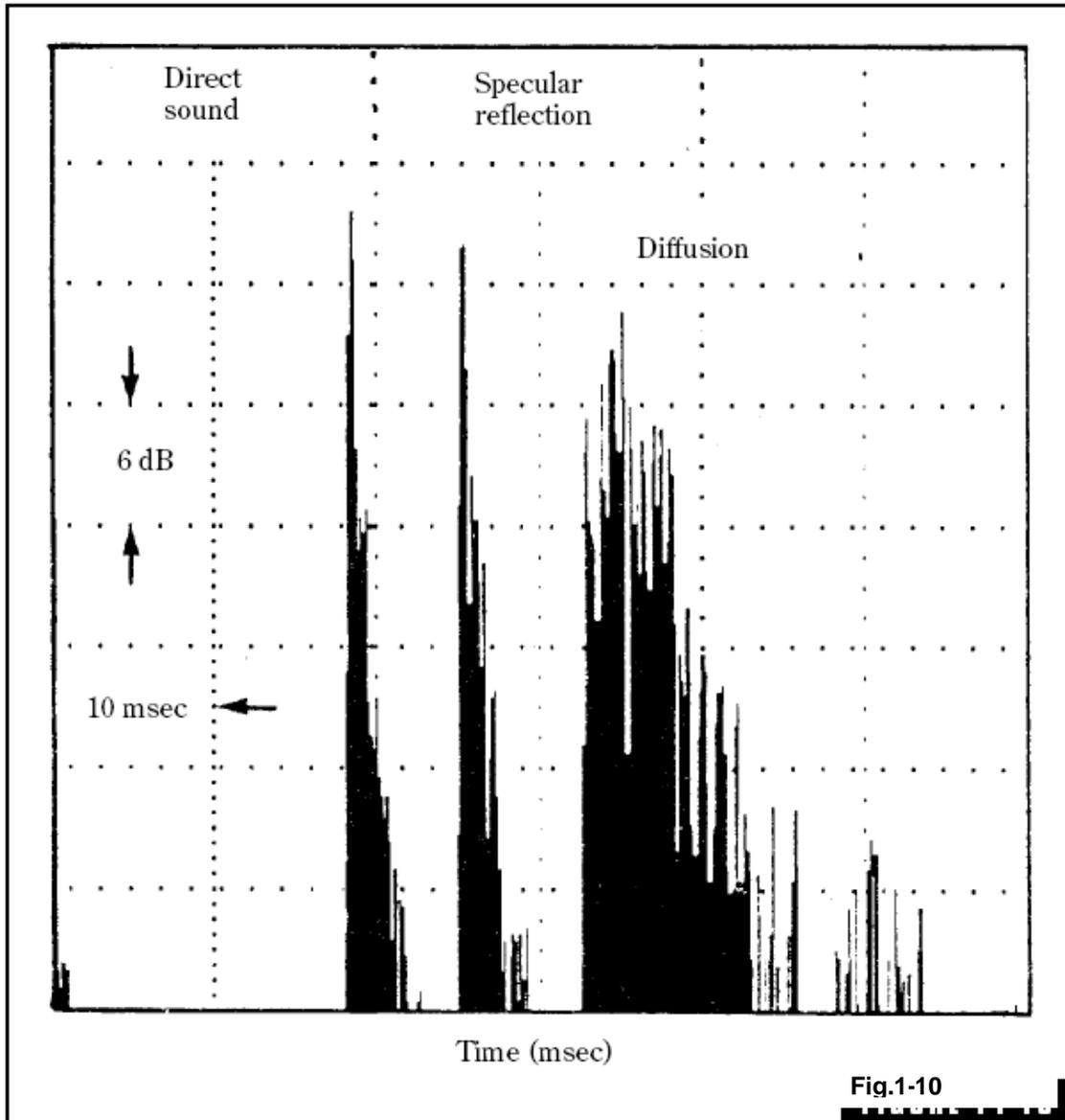


Fig. 1-9

Planos polares experimentales de un difusor comercial de residuo cuadrático, aplanado por promedio sobre bandas de octava. La distribución angular de la energía es excelente para un amplio rango de frecuencia y ángulos de incidencia. Peter D'Antonio, RPG Difusor System, Inc.

La difusión uniforme del espacio es determinada por la longitud del periodo. Un buen extenso ancho de banda, difusión con ángulo muy abierto, entonces, requiere un periodo grande con un número grande de profundidad y orificios estrechos. Este es el porque del QRD4311 fue 43, orificios de solo 1.1pulgadas de anchura y una máxime profundidad de orificio de 16 pulgadas. Una buena pregunta acerca de esto puede ser “¿que hace ser al difusor firme, que no habría de hacer la pared plana?”. La respuesta es encontrada en la fig.1-10. Esta figura compara el regreso de un panel plano con



Un contraste de tiempo-energía de una reflexión teórica de un panel plano y de energía difundida de un difusor de residuo cuadrático. Los picos de energía de una fuente difusora es un poco bajo que ese de el panel plano pero es desplegado fuera en tiempo. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.

aquel de un difusor de residuo cuadrático. El pico grande de la izquierda es el sonido directo (direct sound). El segundo pico grande es la reflexión teórica (specular reflection) de un panel plano. Nótese con cuidado que la energía abrupta de reflexión teórica del panel es solo algunos dB menor que ola del sonido incidente. La energía dispersada del difusor de residuo cuadrático es propagada fuera significativamente en tiempo. Mas pretenciosamente y revelado en el diagrama polar de la fig.1-9 la difracción de sonido grating a lo largo de los 180 grados, no solamente en la dirección teórica como en el panel plano.

Ahí es una rica y creciente literatura en el desarrollo del difusor Schroeder de difracción de sonido grating. Cuidando de frente los rápidos cambios en el campo.

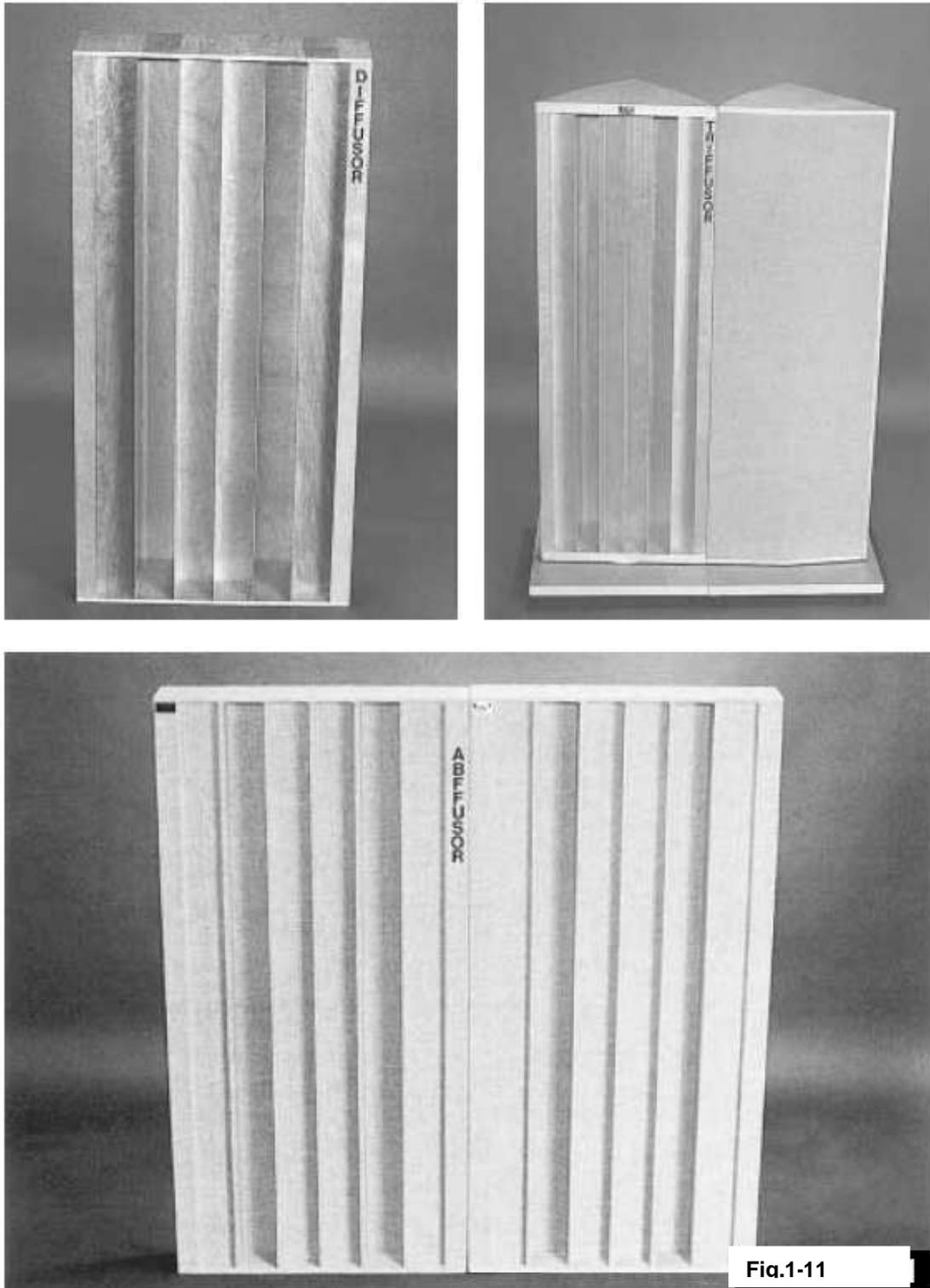
Expansión de la Línea QRD

La apariencia de los difusores de phase-grating, modelos QRD-4311 y QRD-1711 fueron seguidos por otros numerosos modelos diseñados para encontrar necesidades específicas. Por ejemplo, la fig.1-11 muestra el modelo QRD-743, de 2ft x 4ft que es un modelo conveniente para uso en techos, colgados con T-marcos, así como de otras maneras. También muestra en la fig.1-11 es el “AbffusorTM”, que combina difusión con absorción en la misma unidad. El “TriffusorTM”, también mostrado en la fig.1-11, tuvo fases reflectivas, absorptivas y dispersivas. Un grupo de estos, fijados en la pared, ofrece amplias opciones en la acústica de es espacios por rotación de unidades individuales.

Resolviendo Problemas de Ondas

Si dos fuentes reflejantes opuestas de un cuarto son paralelas allí hay siempre la posibilidad de ecos ondulantes. Esto aplica para ambos modos horizontal y vertical. Sucesivo, reflexiones repetitivas, igual espacio en tiempo, pueden incluso producir una percepción de un “pitch” o “coloración del timbre” de música y degradación de la inteligibilidad de la voz. La falta de ornamentación en la arquitectura moderna resulta en una grande posibilidad de ondulación.

Las ondulaciones pueden ser reducidas por una cuidadosa colocación de material absorbente de sonido, o por paredes desplegadas. Desplegar es impractico en muchos de los casos e incrementar la absorción frecuentemente degrada la calidad acústica de un espacio. Algo necesario es un tratamiento de una pared que reduce las reflexiones por dispersión más que por absorción. El RPG FlutterfreeTM hace exactamente esto. Este es de arquitectura de madera dura con 4 moldes de ancho por 4ft o 8ft de largo, mostrado en la fig.1-12,



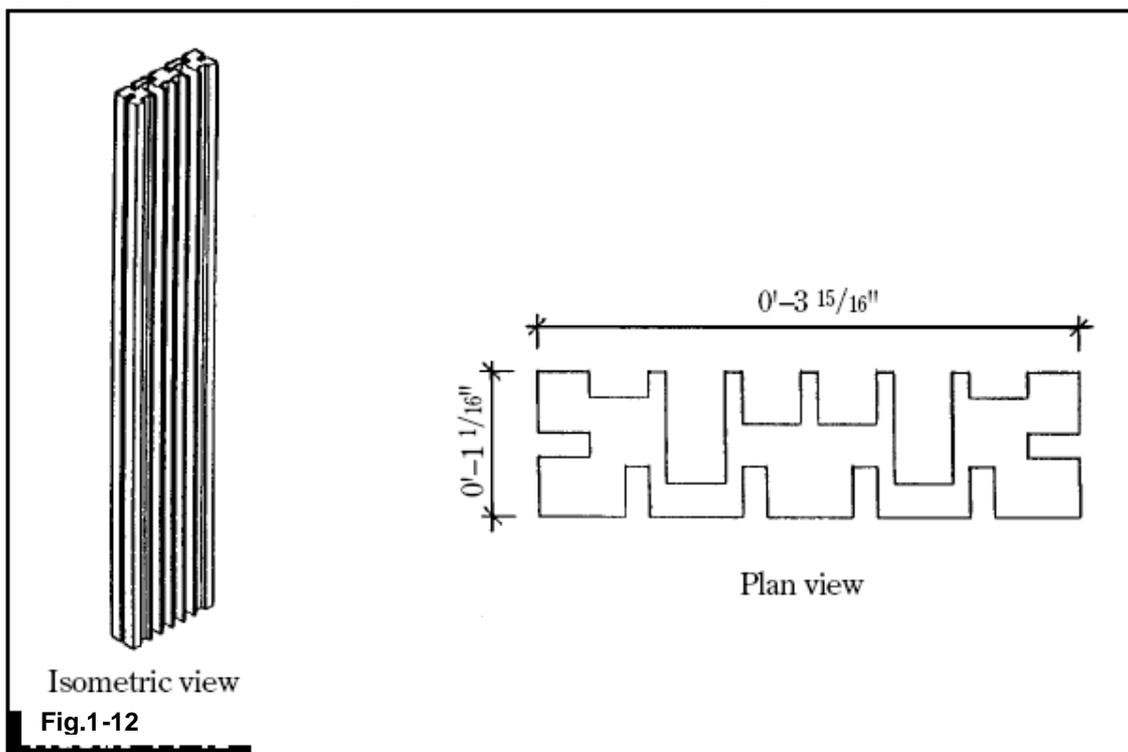
Tres propiedades de los difusores de sonido: (arriba a la izquierda) un extenso ancho de banda y un amplio ángulo QRD 743 Diffusor™, (debajo) el Abffusor™ extenso ancho de banda difusor/absorbente y (arriba a la derecha) el Triffusor™ teniendo un lado absorbente, uno difusivo y uno reflejante para variabilidad acústica. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.

que reduce las reflexiones teóricas así como contribuir con la difusión del sonido. Las molduras trabajan como reflexión de phase-grating en una dimensión debido a que los orificios dirigen hacia dentro de la superficie. La profundidad de los orificios es de número primo 7 para secuencia de residuo cuadrático. Estas molduras tal vez añaden a la pared un tope, juntas o espaciadas, horizontalmente o verticalmente. Si son verticales, la reflexión espectral es controlada en el plano horizontal y vice versa.

Las molduras de Flutterfree™ pueden ser empleadas como tablillas para un Helmholtz, un tipo de tablilla para absorber baja frecuencia. Todo el rato el sonido de baja frecuencia está siendo absorbido por el absorbente de Helmholtz (resonador de Helmholtz), la superficie de cada tablilla funciona como difusor de sonido en frecuencia media-alta.

Aplicación de Fractales

Ciertas limitaciones de producción han sido encontradas por RPG Diffusor System, Inc. en el desarrollo de difusores de reflexión phase-grating. Por ejemplo, el límite de la baja frecuencia es determinado principalmente

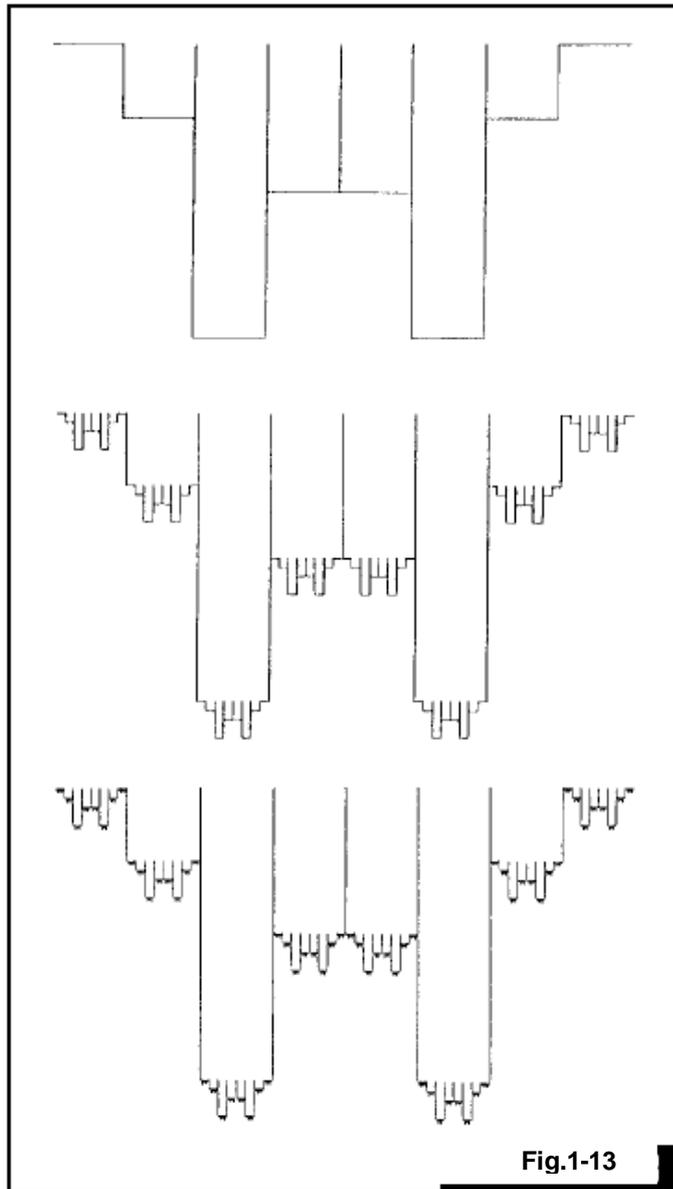


El Flutterfree™ no es un absorbente control de ondulaciones o ecos. Este es un difusor de residuo cuadrático basado en el número primo 7. Este también puede servir como tablillas de carácter de resonador de Helmholtz para absorber baja frecuencia. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.

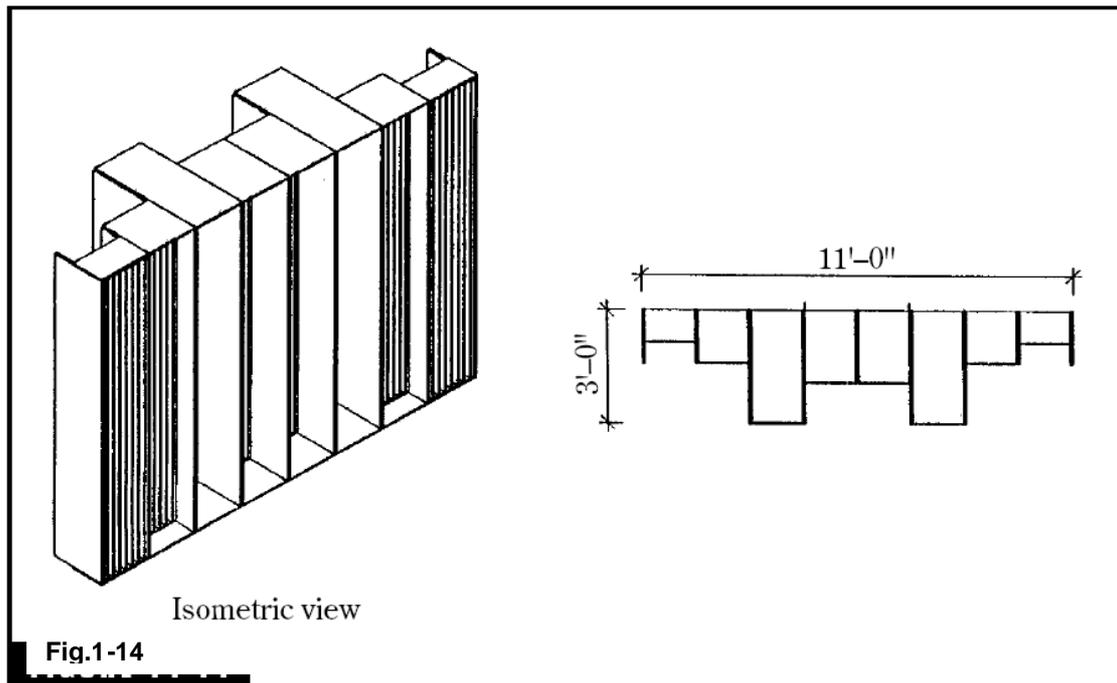
por la profundidad del orificio y el límite de la alta frecuencia es determinada principalmente por la anchura del orificio. Manufacturando restringiendo el espacio en un límite de 1 al ancho del orificio y 16 en lo profundo del orificio, más allá de estas unidades se vuelve diafragmática.

Para incrementar la efectividad del ancho de banda el principio autosuficiente ha sido aplicado en la forma de fractales produciendo unidades llamadas Diffractals™. Estos son en realidad difusores dentro de difusores como se muestra en la ilustración progresiva de la fig. 1-13. Tres piezas de difusores de residuo cuadrático son requeridos para constituir el Diffractal™. La operación es similar como el de multi-unidades de altavoces. Los diferentes difusores que constituyen el Diffractal operan independientemente incluso como operan independientes las unidades de altavoces woofer, rango medio y tweeter para crear el ancho de banda del sistema.

La fig.1-14 muestra el Diffractal™ DFR-82LM ese es 7.10ft de alto y 11ft de ancho con profundidad de 3ft. Esta es una unidad de segunda generación, baja-media-frecuencia, esta cubre el intervalo de 100hz a 5khz. La porción de baja frecuencia es basada en el numero primo 7 de la secuencia de residuo cuadrático. Un Diffractal™ de rango medio es integrado en el fondo de cada pozo de unidad grande. El



El Diffractal™ difusor con ancho de banda es un sistema con dos o tres vías compuesto de fractal difusor de sonido de alta frecuencia anidado dentro de un difusor de baja frecuencia. El sistema de tres vías ilustrado es un difusor dentro de un difusor dentro de otro difusor, análogo a sistemas de altavoces a tres vías compuestas por la unidad de woofer, rango medio y tweeter. Peter D'Antonio, RPG Difusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.



La evaluación del modelo DRF-83LMH Diffractal™, un sistema a dos vías compuesto de una unidad de baja frecuencia (num. primo 7) con un difractal de rango medio integrado en el fondo de cada pozo. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc.

rango de frecuencia de cada sección así como el punto de cruce en frecuencias de esta unidad compuesta es completamente calculable.

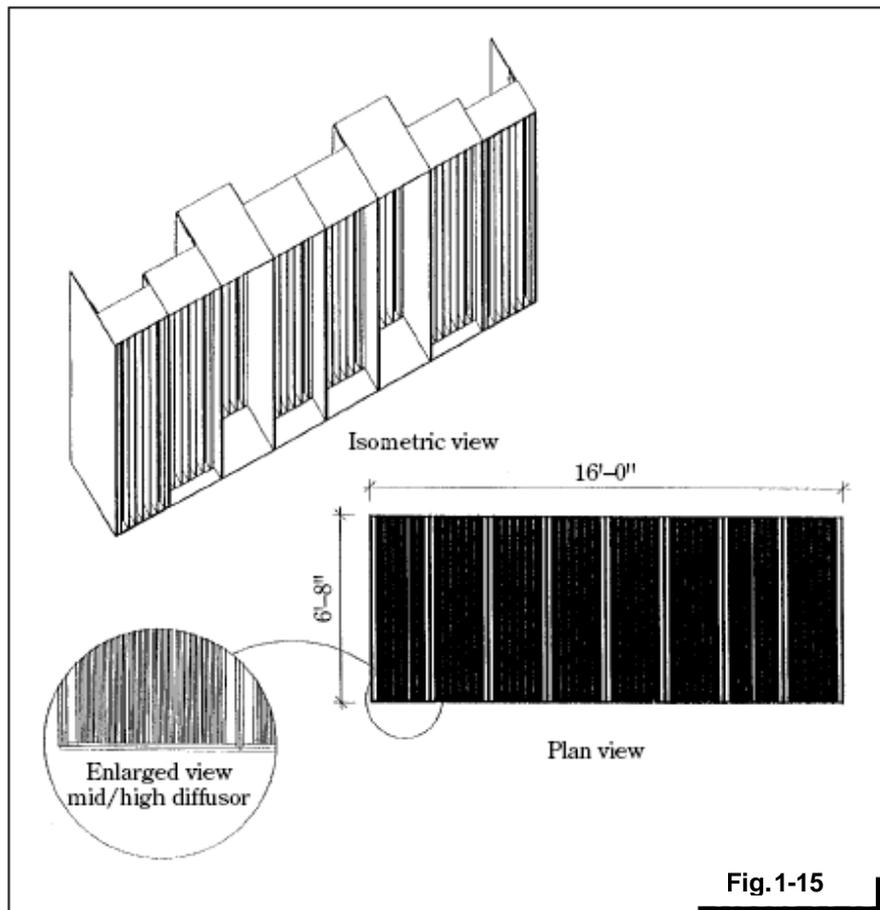
La figura 1-15 muestra la gran unidad DFR-83LMH™ esta es 16ft de ancho, 6.8ft de alto y 3ft de profundidad. Esta es una unidad a tres-vías cubriendo un rango de 100hz a 17khz. La profundidad de los pozos de la unidad de baja frecuencia sigue el un número primo 7 de la secuencia de residuo cuadrático. Los Fractales son colocados en los pozos de fractales, y estos a su vez son colocados en el pozo de baja frecuencia.

Difusión en Tres Dimensiones

Todo sobre los difusores de reflexión phase-grating discutidos previamente tiene una línea paralela de pozos. Esos pueden llamarse unidades de una dimensión porque el sonido es esparcido en un hemisferio como lo muestra la fig.1-16A. Ahí hay una oportunidad que es diseñado el lóbulo hemisférico, como se muestra en la fig.1-16B. RPG Diffusor Systems™ se ha encontrado con esta necesidad para ofrecer el Omnifusor™. El Omnifusor™ consiste en un arreglo simétrico de 64 celdas cuadradas como lo muestra la fig.1-17. La profundidad de esas celdas esta basado en la fase invertida para el número primo 7 de la teoría de números de secuencia de residuo cuadrático.

Un off-shoot del Omnifusor (que es echo de madera) es el FRG Omnifusor, el cual consiste en un arreglo de 49 celdas cuadradas basadas en dos dimensiones para fase invertida de la teoría de número de residuo cuadrático.

Esta unidad es hecha de yeso y fibra de vidrio reforzada. Este es ligero en peso y un tercio del costo de un Omnifusor™, es por lo tanto el mejor adaptado para aplicaciones de superficies grandes.



Modelo DFR-83LMH™ Diffractal, unidad a tres vías que cubre un ancho rango en frecuencia. En este modelo los fractales son colocados en los pozos de los difractales. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.

Blocks Acústicos de Concreto

El Cinderblox y sus muchos derivados han estado en uso desde 1917. En 1965 la Proudfood Company llegó con su Sound-Blox™, el cual suplió no solo la habilidad de carga de presión y la masa requerida para aislamiento de sonido, pero además aumentando la absorción en baja frecuencia a través del resonador de Helmholtz formado por ranuras y cavidades en los bloca. El RPG Diffusor System introdujo su Diffusor-Blox™ en 1990 ese fue un paso más extenso: habilidad de carga de presión, pérdida de transmisión, absorción de baja frecuencia y difusión de sonido. El sistema DiffusorBlox es hecho de tres bloca distintos, todos son normalmente de 8x16x12 pulgadas. Un típico block es mostrado en la fig.1-18. Estos blocks de concreto son caracterizados por

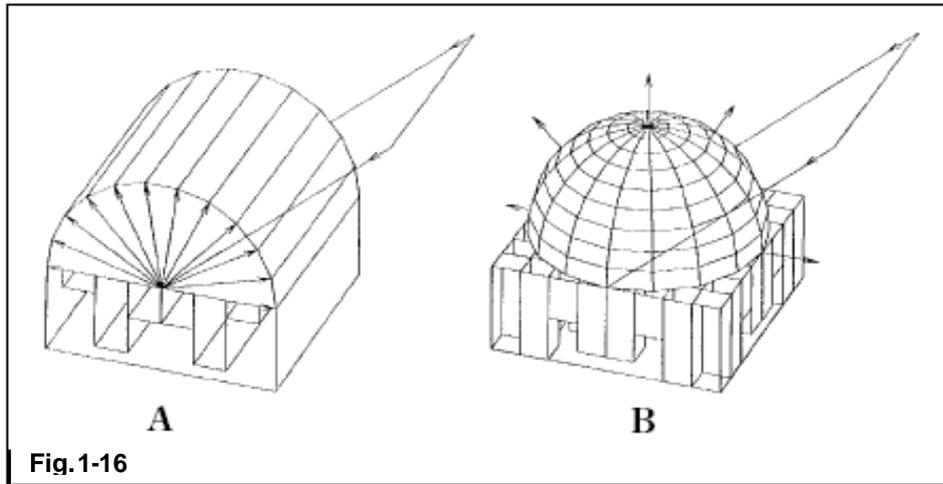


Fig. 1-16

Comparación de los patrones de difracción de (A) la forma semicilíndrica del difusor unidimensional de residuo cuadrático y (B) la forma semiesférica del difusor para dos dimensiones. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc.

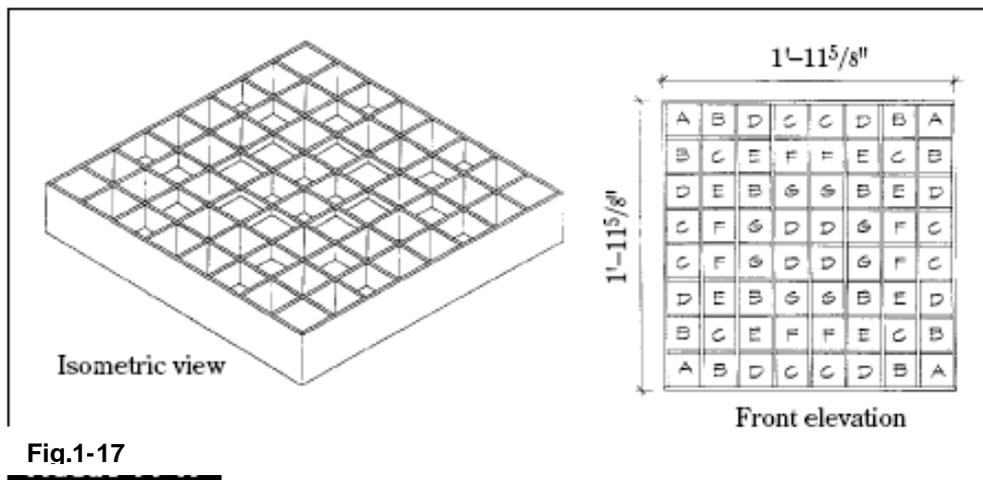


Fig. 1-17

El Omnifusor, unidad para dos dimensiones el cual propaga el sonido en ambos planos horizontal y vertical para todos los ángulos de incidencia. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc.

una superficie que contiene una secuencia parcial de variables profundidades de pozos, separadas por divisores: una cavidad interna de 5 lados este puede aceptar insertos de fibra de vidrio; una opción posterior de media pestaña para reforzar su construcción; y una ranura de absorción opcional para baja frecuencia. El Diffusorblox es fabricado en block Standard con maquinas automáticas usando moldes certificados por RPG Diffusor Systems, Inc. Una típica pared construida con DiffusorBlox es ilustrada en la fig. 1-19.

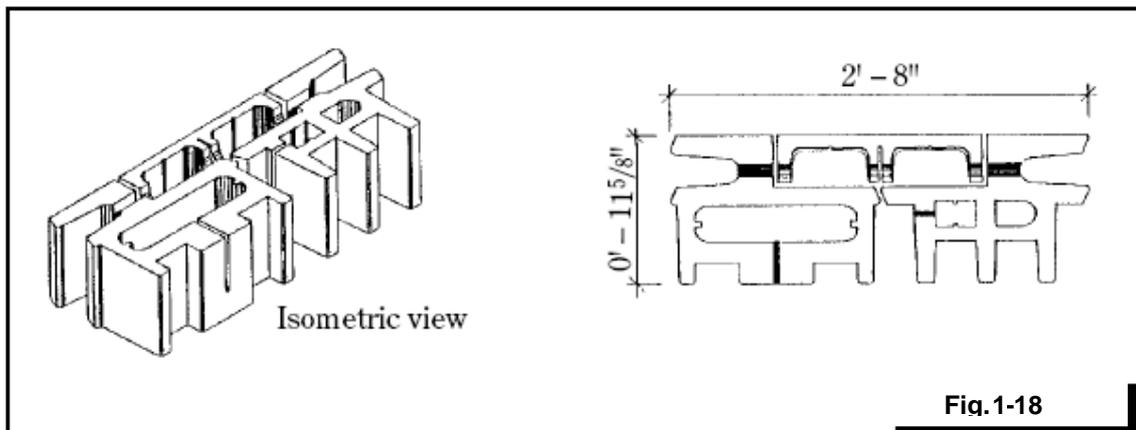
Medición de la Eficiencia de Difusión

La medida de la efectividad de un difusor puede ser obtenida comparando la intensidad en la dirección teórica con la intensidad a $\pm 45^\circ$ de esa dirección. Esta puede ser expresada como:

$$\text{Coeficiente de difusión} = \frac{I(\pm 45^\circ)}{I(\text{teórica})}$$

El coeficiente de difusión es 1.0 para el difusor perfecto. Este coeficiente varia con la frecuencia y es comúnmente expresado en forma grafica. La variación en el coeficiente de difusión con la frecuencia para algunas unidades típicas es mostrada en la fig.1-20. Para comparación, la difusión para un panel plano es incluida en la línea intermitente. Estas mediciones fueron hechas bajo condiciones de reflexiones libres en una muestra de área de 64sq ft y usando una técnica con espectrometría con retraso de tiempo.

El número de pozos y su anchura afecta la función de las unidades. El modelo QRD 4311 (fig.1-6) teniendo la profundidad del pozo y la estrechez de su



El block de concreto DiffusorBox, ofrece una buena perdida de transmisión en un muro duro, absorción por la vía de la acción del resonador de Helmholtz, y difusión por medio de la acción del residuo cuadrático. El block es formado en una maquina para block Standard usando moldes con licencia. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc.

anchura (factible desde un punto de vista manufacturable) da un alto coeficiente de difusión sobre el mejor rango de frecuencia. Para comparación, otras dos unidades son mostradas en la fig.1-20, el 1925 y el 743, construidos con los números primos 19 y 7 con anchura de pozo de 25 pulgadas y 3.4 pulgadas. El desempeño de estos, aun cuando es bueno, es algo inferior para el modelo QRD4311.

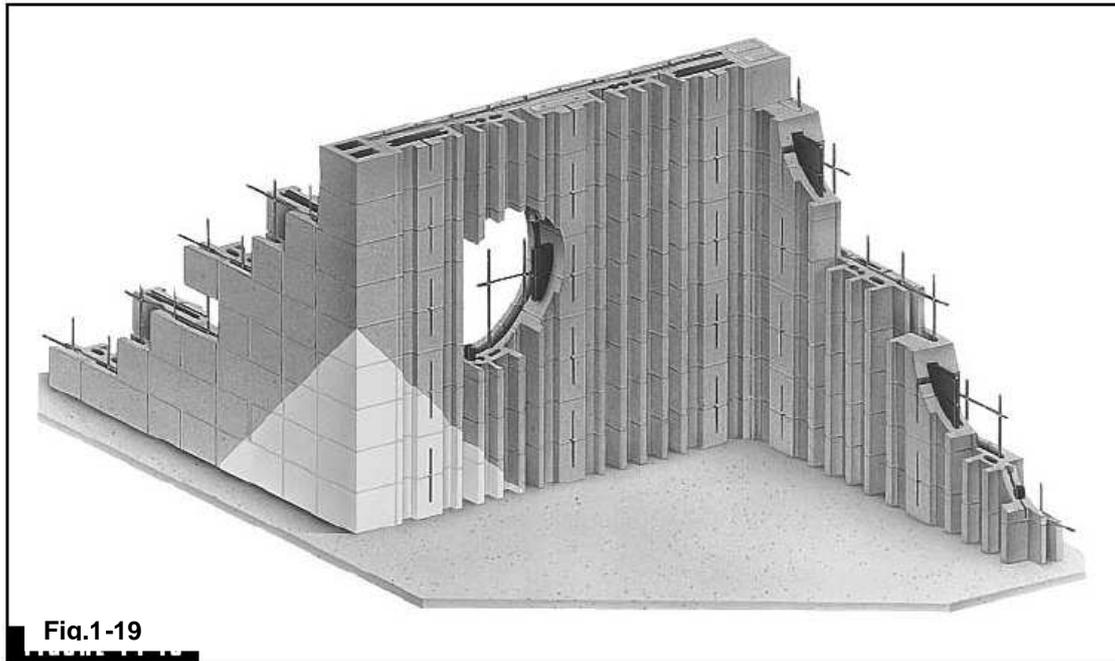


Fig.1-19
 Una configuración típica de muro usando DiffusorBlox. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc.

Comparación de Gratings con Aproximaciones Convencionales

La fig.1-21 compara las propiedades de difusión del panel plano (a y b), el panel plano con absorción distribuida en el (c y d), el monocilindro (e y f), el bicilindro (g y h), y el difusor de residuo cuadrático (i y j). La columna izquierda es para incidencia de sonido a 0° y la columna derecha es para incidencia de sonido a 45° . El frente y atrás de la escala es difracción de 90° entre 0° a -90° . La escala de frecuencia horizontal es básicamente de 1 entre 10khz. Estas lecturas de tres dimensiones cubren todas las variables pertinentes y proporciona una abundancia de información, la cual requiere algo de habilidad en la interpretación. Comentarios específicos por el Dr. D'Antonio fueron hechos incluyendo los siguientes:

- Las primeras seis curvas de energía-frecuencia contienen artefactos en el proceso de medición que debieran despreciarse porque ellos no tienen efecto en condiciones de cámara anecoica.
- Para 0° de incidencia las propiedades teóricas del panel plano con absorción distribuida es totalmente evidente por el poco pronunciado ángulo teórico de 0° .

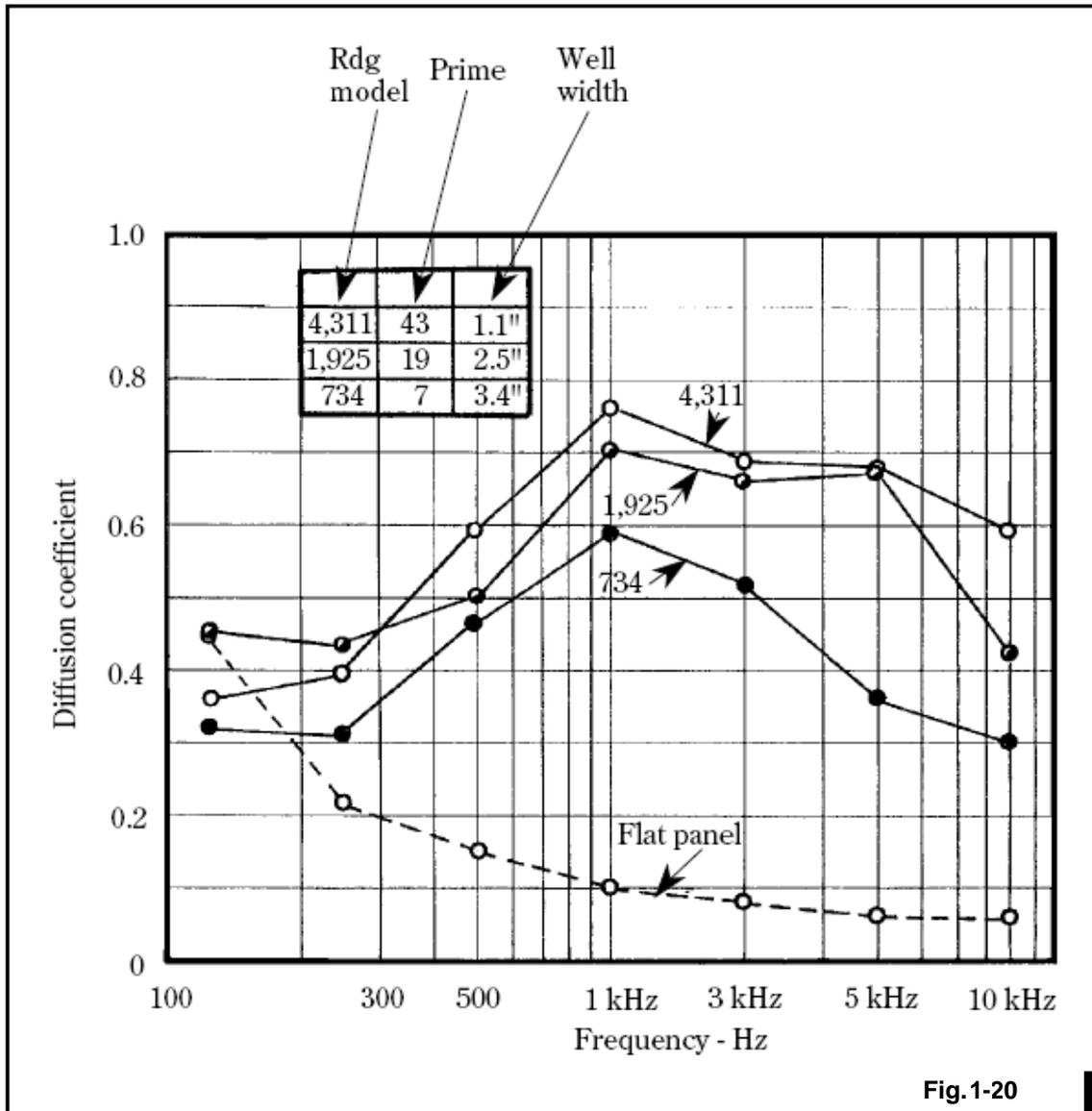
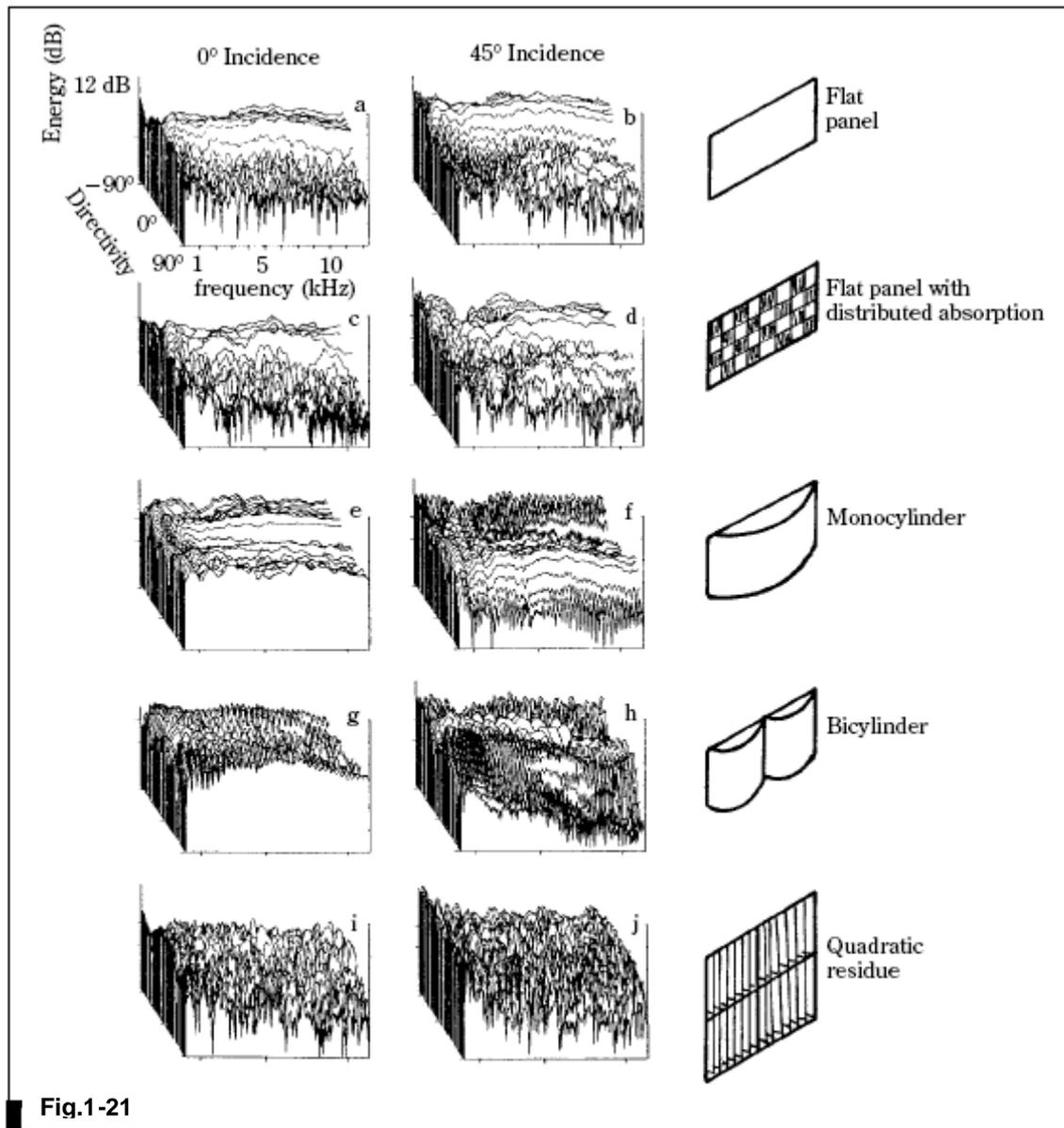


Fig.1-20 Comparación de la variación del coeficiente de difusión con frecuencia de tres difusores RPG y un panel frontal. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc.

- La buena difusión espacial del monocilindro (e) es ilustrado por la relativa respuesta de constancia de energía de 90° a -90° . El bicilindrico (g) muestra dos picos estrechamente espaciados en la respuesta en tiempo. A pesar de que la difusión espacial se mira bien, allí es apreciable el filtro peine con espaciado igual y atenuación en alta frecuencia en el ancho de banda. Este cálculo, en parte, por el pobre desempeño del difusor cilíndrico.
- El difusor de residuo cuadrático (i y j) mantienen una difusión espacial buena incluso a incidencia de 45° . Las densas muescas están

uniformemente distribuidas a través del espectro en frecuencia y la energía es relativamente constante con los ángulos de dispersión.



Planos de difusión de energía-frecuencia-directividad de (a,b) un panel plano, (c,d) un panel plano con absorción distribuida, (e,f) monocilindro, (g,h) bicilindro y (i,j) difusor de residuo cuadrático. Esos planos comparan muchos de los intentos tempranos a causa de la difusión con los modernos difusores de residuo cuadrático. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society.

CAPITULO 2

MODOS DE RESONANCIA EN ESPACIOS CERRADOS

Hermann Von Helmholtz (1821-1894) ejecutor de algunos interesantes experimentos acústicos con resonadores. Sus resonadores son una serie de esferas metálicas de piezas clasificadas, cada ajuste con un cuello, apareciendo algo como un frasco redondo-profundo forma encontrada comúnmente en los laboratorios de química. En suma para el cuello, ahí fue otra pequeña abertura para que el aplicara su oído. Los resonadores de diferentes piezas resonantes para diferentes frecuencias y por señalamiento, el cuello, sus efectos de sonido bajo investigación el pudo estimar la energía para cada frecuencia por la intensidad del sonido de los diferentes resonadores.

Allí hubo numerosas aplicaciones de este principio antiguo antes del tiempo de Helmholtz. Ahí hay evidencia que las jarras de bronce por los griegos en sus teatros al aire libre, posiblemente para proveer alguna reverberación artificial. Mil años antes los tipos de resonadores Helmholtz fueron integrados a los muros de de las iglesias en Suecia y Dinamarca con sus bocas vacías con la superficie del muro, aparentemente para absorción del sonido. Los muros del moderno santuario de la iglesia Tapiola en Helsinki, Finlandia, son dotados con aberturas en los blocks de concreto (fig.2-1). Esos son resonadores de "cuello", que abren detrás cavidades hacia dentro, juntos formando estructuras resonantes. Energía absorbida por el sonido en el cuarto causando a cada resonador vibrar en sus propias características de frecuencia. Parte de la energía es absorbida, parte nuevamente radiada. La energía re-radiada es enviada en todas direcciones, contribuyendo a la difusión de sonido en el cuarto.

El principio de resonador, viejo como el mismo, continuamente aparece en la modernidad, en aplicaciones a cada minuto.



Fig.2-1

Tipo de resonador Helmholtz construido dentro del muro de la Topiola Church en Helsinki, Finland. Las ranuras y cavidades detrás de ellos actúan como ambos absorbedores y difusores de sonido.

Resonancia en un Tubo

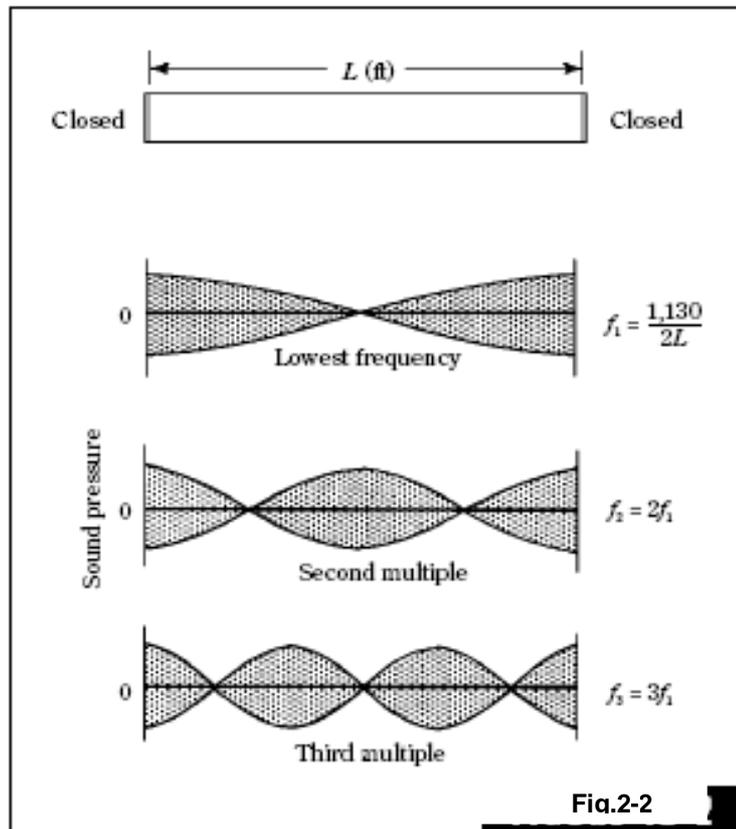
Los dos finales del tubo de la fig.2-2 pueden ser comparados a dos muros opuestos de un cuarto de escucha o estudio de grabación. El tubo nos da un fácil ejemplo unidimensional para trabajar con el. De estos, sucede que entre muros opuestos de un cuarto rectangular puede ser examinado, sin que sea molesto, por las reflexiones de las otras cuatro superficies. El tubo, cerrado en ambas salidas y llenado con aire, es un resonador capaz de vibrar en sus características de frecuencia cuando es excitado en alguna manera. El aire dentro de un órgano de tubos puede ser fijado para vibrar por el flujo del sople de aire a través de un labio en el borde del tubo. Una señal de onda senoidal puede ser mantenida por el altavoz y variada en frecuencia. Un pequeño orificio taladrado en el tubo en el lado opuesto al altavoz, puede hacer posible escuchar los niveles bajos de tonos radiados por el altavoz. Como la frecuencia es incrementada, nada inusual es nombrado hasta que la frecuencia radiada del altavoz coincide con la frecuencia natural del tubo. En esta frecuencia, f_1 ,

moderada energía del altavoz es fuertemente reforzada y un relativamente sonido ruidoso es escuchado en el orificio del oído. Como la frecuencia esta incrementándose, la intensidad es otra vez baja hasta que una frecuencia de $2f_1$ es alcanzada, cerca de que otro punto fuerte reforzado es notado. Tales picos de resonancia también pueden ser detectadas en $3f_1$, $4f_1$...etc.

Ahora permitámonos asumir aquellos medios de medición y grabación de la presión de sonido todo a lo largo del tubo que esta disponible. En la fig.2-2 los bocetos de los tubos muestran como varia la presión de sonido a lo largo de la longitud del tubo para frecuencias de excitación diferentes. Una onda de sonido viajando a la derecha es reflejada desde el tapón de la derecha y una onda sonora hacia la izquierda regresa del tapón izquierdo. La onda que va hacia la izquierda reacciona con la onda que va hacia la derecha para crear, por superposición, una *onda estacionaria* en la frecuencia natural del tubo o uno alguno de sus múltiplos. Examinando mediciones insertadas a través de orificios pequeños a lo largo del tubo pudieron realmente medir cerca la alta presión, las salidas tapadas, cero en el centro, etc. Similares nodos (puntos con valor cero) y antinodos (valor máximo de presión) pueden ser observados a causa de $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$,...etc., como lo muestra la figura 2-2. Las dimensiones de un cuarto de estudio o conferencias determina estas características de frecuencia aunque allí fue un tubo norte-sur, un tubo este-oeste, y un tubo vertical; los tubos corresponden a la longitud, anchura y altura del cuarto, respectivamente.

Acústica del Cuarto de Baño.

El por que de cantar en la ducha o tina de baño es una experiencia satisfactoria (o por lo menos para los cantantes). Porque aquí los sonidos de voces se



Un tubo cerrado por ambos extremos ayudándonos a entender como ocurre la resonancia entre dos muros opuestos de un cuarto de escucha o estudio. La distancia entre los muros determina la frecuencia característica de resonancia.

enriquecen, es lleno, y mas potente que en el resto de cualquier parte! El caso del barítono en el baño claramente ilustra el efecto de resonancia en un cuarto pequeño y el resultado refuerza el sonido ciertas frecuencias relacionadas con las dimensiones del cuarto. Excitando el aire en el baño a causa de las frecuencias lejanas distantes de esas frecuencias características resulta en un sonido débil, excepto los múltiplos de esas frecuencias, donde los efectos pueden ser mucho mas como los producidos bajo las frecuencias naturales. Las personas que cantan en el baño están, en un sentido, dentro del resonador de Helmholtz o un inmenso órgano de tubos, pero con una gran diferencia; este es ahora tres en lugar de esencialmente una dimensión como lo es el tubo. Las paredes duras en el baño son altamente reflejantes. Esa es una característica modal de frecuencia de resonancia asociada con la longitud, otra con el ancho, y todavía otro con la altura del baño. En el caso de un cuarto cúbico todos los tres modos de frecuencia coinciden para dar un potente refuerzo de la voz del barítono a causa de la característica modal básica de frecuencia y múltiplos de ella.

Reflexiones Dentro de Cuarto.

Cualquiera puede apreciar la diferencia entre las condiciones de sonido en el interior del cuarto y fuera de él. Fuera de la puerta la única reflexión tal vez son por la superficie de la tierra. Si pasa que la superficie empieza a cubrirse de nieve, el cual es un excelente absorbente de sonido, tal vez difícilmente llevaría una conversación con alguien a 20ft de camino. Al interior del cuarto la energía de sonido es contenida, resultando en un ruidoso sonido con un esfuerzo dado. Los altavoces pueden ser escuchados y entendidos por cientos de personas sin refuerzo pero son reflejados por las superficies.

Considerar las reflexiones sonoras de un solo muro. En la fig.2-3, un punto de fuente de sonido, S, esta a una distancia del muro macizo. La onda esférica frontal (líneas continuas, viajando a la derecha) es reflejada desde esta fuente (líneas intermitentes). Físicamente trabajando en varias formas de radiación (luz, ondas de radio, sonido) recurren al concepto de imagen porque este hace su estudio matemático mucho mas sencillo. En la fig.2-3 las reflexiones de la fuente viajan hacia la izquierda actuando exactamente como si ellas fueran radiadas desde otro punto idéntico de fuente, S1, una distancia igual desde la superficie reflejante pero de lado opuesto. Este es el simple caso de imagen de una fuente, una imagen y una superficie reflejante, todo en el espacio libre.

La reflexión aislada de la fuente en la fig.2-3 es ahora llevada a la tierra y dispuesta hacia el norte del muro de un cuarto rectangular como en la fig.2-4. La fuente S aun fue esta imagen S1 es que es ahora el muro norte del cuarto. La fuente además fue otras imágenes. S2 es la imagen en el muro este de la superficie reflejante, S3 es la imagen de S en el oeste del muro y S4 es la imagen de S en el sur del muro. Usa tu imaginación para visualizar S5, la imagen en el piso y S6, es la imagen del techo. Todo sobre estas seis imágenes es supuesto a ser justamente vibrantes como S y enviando energía sonora de

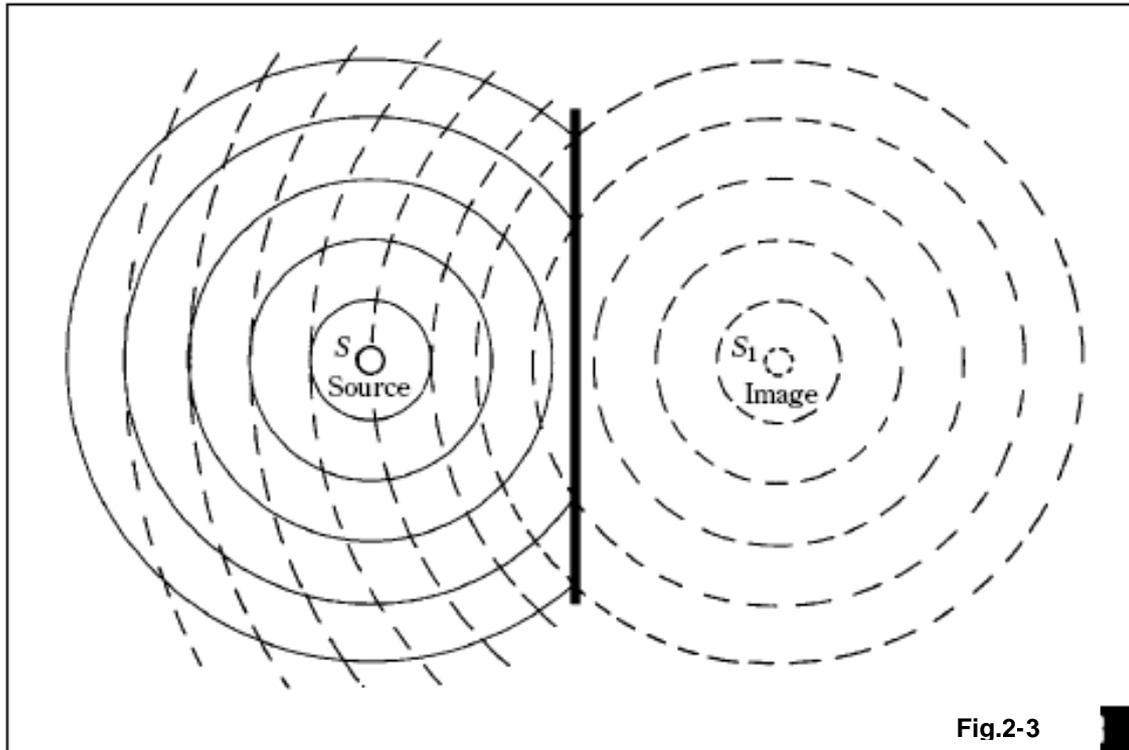


Fig.2-3

Sonido radiado por un punto S es reflejado por una pared rígida. La onda reflejada puede ser considerada como proveniente desde S_1 , una imagen de S .

regreso dentro del cuarto. La lejanía de las imágenes es desde el plano reflejante, el débil quiere ser su contribución en un punto dado, P , en el cuarto, pero todos ellos quieren hacer su contribución.

Estos son imágenes de las imágenes como pozos. La imagen S_1 ha tenido su imagen al sur del muro en S_1' , la imagen de S_2 al oeste en S_2' y similarmente las imágenes S_3 , S_4 , S_5 y S_6 aparecen en S_3' , S_4' , S_5' y S_6' (de igual manera puede imaginarse el plano). Y entonces, allí están las imágenes de las imágenes de las imágenes, y así sucesivamente añadirse infinitamente. Las imágenes más remotas son para que el más débil de ellos pueda estar descuidado por causa de simplicidad. Nosotros hemos discutido esto para extender solamente para mostrar como para visualizar la manera en que el campo de sonido para el mismo punto P en un cuarto es acumulado desde el sonido directo proveniente de la fuente S más la suma de vectores contribuyentes por todas las imágenes de S . Este es justamente otra manera de decir que el sonido en P es acumulado

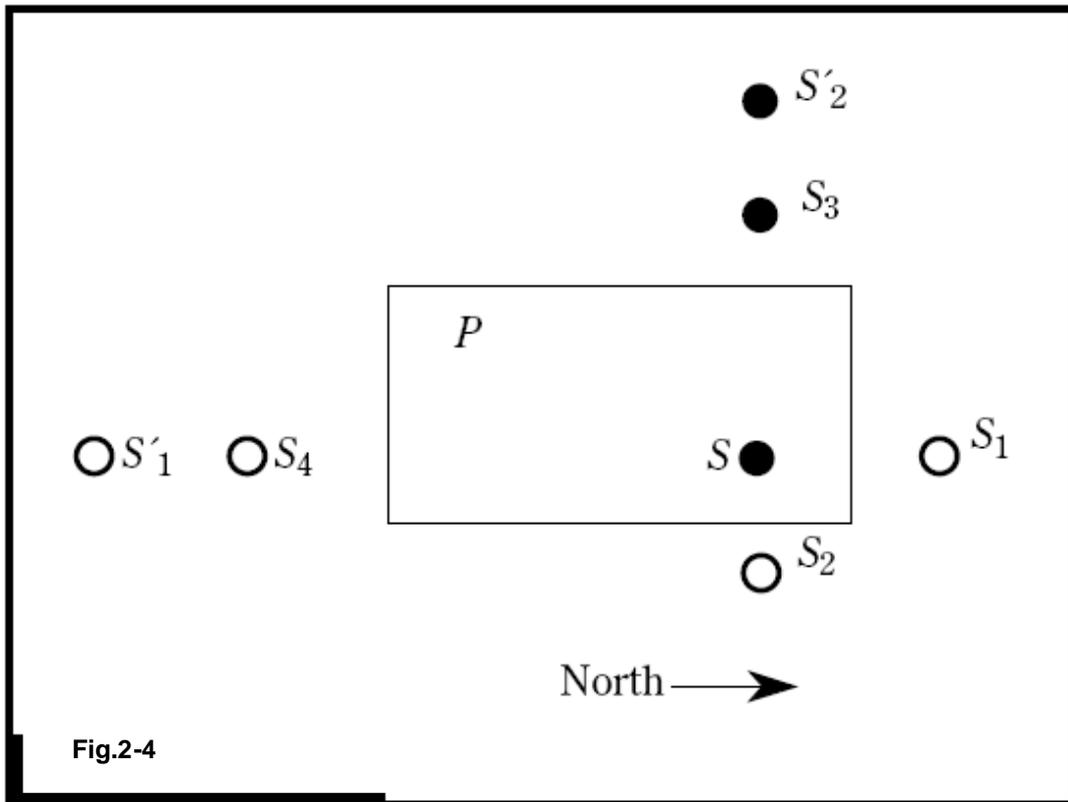


Fig.2-4

La superficie de la fig.2-3 es echa ahora para visualizar dentro del muro norte de un encerramiento. La fuente S ahora tiene seis imágenes primarias, una en cada una de las superficies del cuarto cerrado. Imágenes de las imágenes resultan teóricamente de un infinito número de imágenes de S . La intensidad de sonido de un punto P es echo del sonido directo desde S mas las contribuciones de todas las imágenes.

desde el sonido directo de S mas solo o múltiples reflexiones de todas las seis superficies.

Resonancia de Dos Muros.

La fig.2-5 muestra dos paralelos, muros reflejantes de extensión infinita. Cuando un altavoz radiando ruido rosa excita el espacio entre el muro, el sistema pared-aire-pared exhibe una resonancia a causa de una frecuencia de $f_0=1,130/2L$, donde L = la distancia en pies entre los dos muros y 1,130 la velocidad del sonido en pies por segundo. Una resonancia similar ocurre por causa de $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$..., etc. a lo largo del espectro. La frecuencia fundamente f_0 es considerada una frecuencia natural de un espacio entre los muros reflejantes y estas son acompañados por un tren de modos cada uno del cual también exhibe resonancia. Otros nombres que habrían de aplicarse para tales resonancias es *eigentones*-“tono característico” (obsoleto), *resonancias de cuarto*, *frecuencias*

permisibles, frecuencias naturales o simplemente *modos*, que es preferido para hacer un estudio o un cuarto de escucha. En suma, dos mas pares mutuamente perpendiculares de paredes, para desde un lugar cerrado, nosotros también sumamos más dos sistemas de resonancia, cada uno con su propia fundamental y series modales.

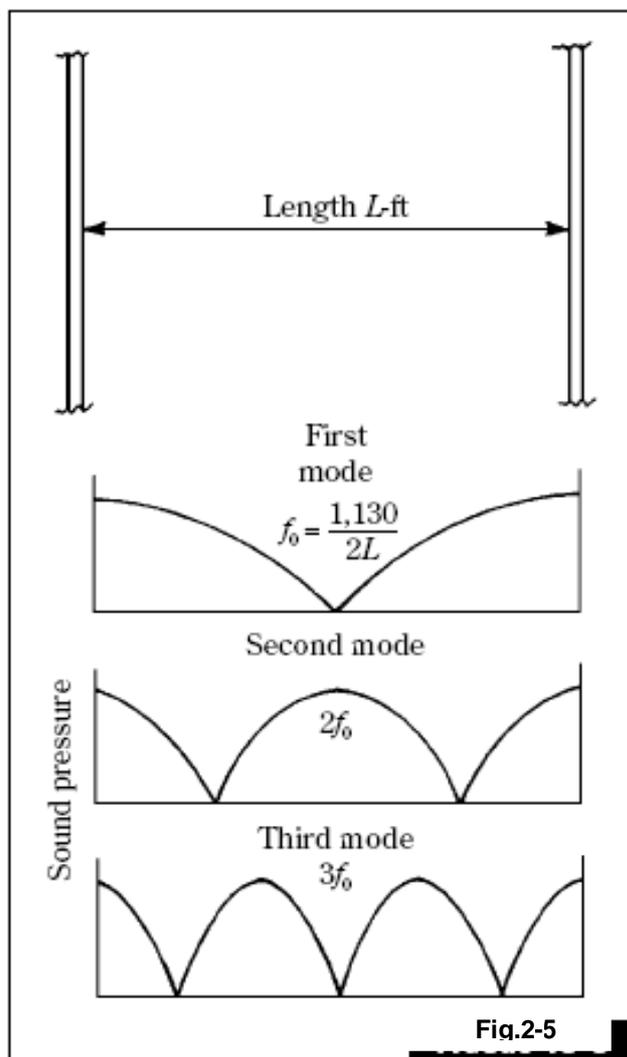
Actualmente, la situación esta más alejada de complicarse. Así solo alejada son los modos *axiales* que habrían sido discutidos, de que cada cuarto rectangular tuvo tres, más trenes modales para cada uno. Cada modo axial involucra solo dos superficies opuestas y paralelas. Los modos *tangenciales*, en cambio, involucra cuatro superficies. Los modos *oblicuos* involucran todas las seis superficies del cuarto.

Ondas vs. Rayos

Que los diagramas de la fig.2-6 ofrece en términos de claridad, ellos carecen de rigor. En esos diagramas, los rayos de sonido son pintadas como obedece a la ley: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Para audio frecuencias altas el concepto de rayo es totalmente fructífero. Cuando el tamaño del encerramiento llega a ser comparable para la longitud de onda del sonido en el, sin embargo, problemas especiales surgen y el rayo se aproxima al colapso. Por ejemplo, un estudio de 30ft de longitud es solo 1.3 de la longitud de onda para 50Hz. Los rayos pierden todo significado en semejante caso. Los trabajos físicos de ondas acercan a estudiar el comportamiento del sonido de grandes longitudes de onda.

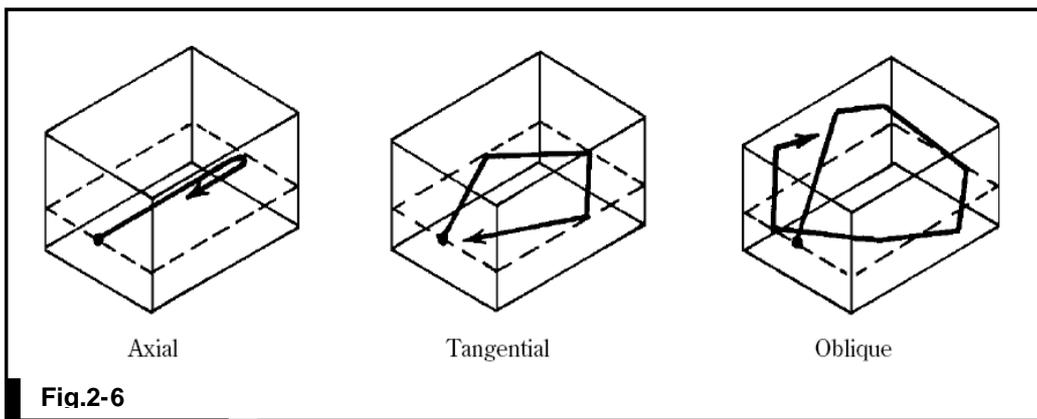
Regiones de Frecuencia

El espectro audible es muy amplio cuando miramos en términos de longitud de onda. Para 16Hz, considerando los limites de baja frecuencia del



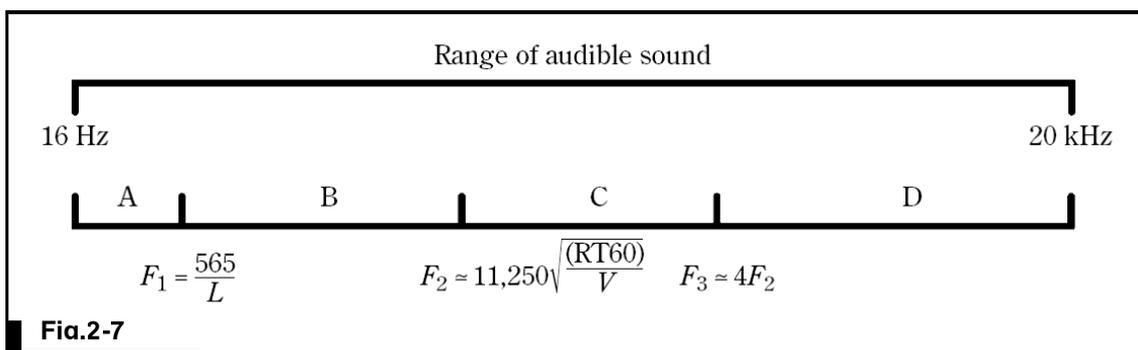
El aire entre dos paredes paralelas y reflejantes pueden ser consideradas un sistema resonante con una frecuencia de resonancia de $f_0=1,130/2L$. Este sistema es también resonante en integrar múltiplos de f_0 .

promedio en el oído humano, la longitud de onda es $1130/16=70.6\text{ft}$. Para el extremo superior de audición, se dice $20\,000\text{Hz}$, la longitud de onda es solo $1130/20,000=0.0565\text{ft}$ o alrededor de $1_{1/16}$ de una pulgada. La conducta del sonido es afectada grandemente por la longitud de onda del sonido en comparación al tamaño de los objetos encontrados. En un cuarto, el sonido de $1_{1/16}$ en longitud de onda es esparcida (difundida) significativamente por una irregularidad del muro de unas pocas pulgadas. El efecto de la misma irregularidad para un sonido de 70ft de longitud de onda habría sido insignificamente pequeño. El corazón del problema de la acústica en el usual



Visualización de modos axial, tangencial y oblicua en cuartos usando el concepto de rayo

cuarto de audio es aquel, no solo el acercamiento analítico que puede cubrir el sonido de cosas así, sino el amplio rango de longitudes de ondas. Considerando la acústica de cuartos pequeños, el espectro audible es dividido



Cuando procedemos con la acústica de espacios cerrados, esto es importante a considerar el rango de frecuencia audible como compuesto por cuatro regiones: A, B, C y D demarcado por la frecuencia F_1 , F_2 y F_3 . En la región D, las reflexiones teóricas y predominantes rayos acústicos. En la región B, lo modos dominantes del cuarto. Región C es una zona de transición en la que dominan la difracción y difusión. Allí no hay refuerzo en los modos para sonido, la región A.

según la dimensión mas larga del cuarto. Debajo de la frecuencia de este modo axial, no hay un soporte resonante para el sonido en el cuarto. Esto no significa que tales frecuencias muy bajas de sonido no puedan existir en el cuarto, solo que este no es ayudado por las resonancias del cuarto porque en esa región no hay ninguna.

La región B es esa región que nosotros hemos estudiado en detalle en el cual las dimensiones del cuarto son comparables a la longitud de onda de sonido que son consideradas. Esto es limitado al final de la baja frecuencia por el mas bajo modo axial, $565/L$. El límite superior no es definido pero una aproximación es dada por cual habría sido llamado la frecuencia cutoff o crossover dado por la ecuación:

$$F_2 \approx 11,250 \sqrt{\frac{(RT60)}{V}} \quad \text{Eq.2-1}$$

Donde

F_2 = frecuencia de corte (cutoff) o crossover, en Hz

$RT60$ = tiempo de reverberación en el cuarto, en segundos

V = volumen del cuarto, en pies cúbicos, cu ft

Un cuarto de 10x16x23.3 ft tuvo un volumen de 3,728 cu ft. Para un tempo de reverberación de 0.5 segundos la frecuencia de crossover es 130Hz. En la fig.2-7, $F_1=565/23.3=24.2\text{Hz}$, y $F_3 \approx 4F_2 \approx (4)(130) \approx 520\text{Hz}$.

La región D cubre las frecuencias audibles altas por el cual las longitudes de onda son bastante pequeñas para las aplicaciones geométricas acústicas. Las reflexiones teóricas (ángulo de incidencia igual al ángulo de reflexión) y el rayo de sonido aproximados a la acústica prevaleciente. En esta región el planteamiento de estadísticas es generalmente posible.

Regresando unos pasos, la región C es una región de transición entre la región B, en la cual la onda acústica debe ser usada, y la región D en la cual los rayos acústicos son validos. Esto es limitado al final de la baja frecuencia aproximadamente por la frecuencia de corte F_2 de la Ec.2-1 y al final de las altas aproximadamente por $4F_2$. Esta es una región dificultosa a menudo por la longitud de onda, largos a causa de rayos acústicos y también cortas a causa de ondas acústicas.

Para el cuarto de 10x16x 23.3 ft, debajo de $565/23.3=24.2\text{Hz}$ es la región A en el cual no tiene refuerzos de sonido. Entre 24.2Hz y 130Hz (Ec.2-1) la onda acústica se aproxima esencialmente a los modos de resonancia. Entre 130Hz y $(4)(130)=520\text{Hz}$ es la transición a la región C. Por encima de 520Hz la densidad modal es muy alta, condición estadística generalmente predominante, y la geometría acústica simple puede ser usada. El tamaño del cuarto determina como el espectro audible debe ser dividido para el análisis acústico. Cuartos muy pequeños, con también algunos espacios de resonancia modal también lejanas, apartados, son caracterizados por la dominación de una gran extensión del espectro audible por los modos de resonancia. Este es el "problema del pequeño estudio" en pocas palabras.

Dividiendo el Espectro de Audio

El muy amplio rango en frecuencia del oído nos fuerza para aplicar diferentes aproximaciones para diferentes rangos de frecuencia en el estudio del campo de sonido de los cuartos pequeños. Una apreciación de este hecho es necesaria antes de la presentación de esas diferentes aproximaciones. El espectro audible en la fig.2-7 es dividido dentro de cuatro partes. Para el extremo de la alta frecuencia es la región D, en la cual el uso de rayos de sonido es aplicable. En esta región, los rayos de sonido lanzados alrededor como bolas de billar, siguiendo la regla genera que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. En esta región, la longitud de onda del sonido es muy pequeña comparada con las dimensiones del cuarto.

Ahora podemos deslizarnos hacia abajo del espectro audible para el rango de frecuencias etiquetado como B. En esta región la longitud de onda es comparable con las dimensiones del cuarto. Aquí el concepto de rayo es sin significado, y el concepto de ondas acústicas debe ser aplicado.

Las frecuencias intermedias de la región D y B de la fig.2-7 es la región C, que es una transición natural. La longitud de onda en este rango de frecuencia no ajusta aproximadamente entre la onda o el rayo; es demasiado corto para la onda acústica, demasiado largo para la aplicación de aproximarse a rayo. Esta es la región en la cual la difusión y difracción de sonido dominan.

La región A de la fig.2-7 es una especie de país de ensueño acústico. Nosotros estamos todavía al interior, allí están superficies reflejantes todo a nuestro alrededor, aun sonidos no comportados como lo hacen al aire libre. Ni hace este comportamiento como al interior en algo como las altas frecuencias. Cuando la longitud de onda del sonido es del mismo orden de magnitud como las dimensiones del cuarto, como en la región B, el modo de resonancia incrementa la intensidad de sonido. La frecuencia superior de la región A, sin embargo, esta bien marcada por el modo axial de la más baja frecuencia como determinada por las grandes dimensiones del cuarto. Debajo de esa frecuencia allí no hay modos de resonancia reforzados. El sonido de la muy baja frecuencia de la región A no es de características al aire libre porque esta es contenida por reflexiones desde los muros, techo y piso, pero sin refuerzo de resonancia. La respuesta en baja frecuencia de este cuarto es baja en la región A, es reforzado por las resonancias en la región B, y es tema para las extravagancias de difracción y absorción en las regiones C y D.

Ondas Acústicas.

La geometría usada en la fig.2-8, mutuamente perpendicular x , y , z son coordenadas en tres dimensiones espaciales para nuestro cuarto de estudio o escucha. Para satisfacer las necesidades en orden, la dimensión mas grande L es puesta en el eje x , las siguientes dimensiones grandes W (para anchura) es puesta en el eje y , finalmente, las dimensiones más pequeñas H (para la altura) en el eje z . El objetivo es ser capaz para calcular las frecuencias permisibles

correspondientes para los modos de un recinto rectangular cerrado. Podemos ir directamente a la respuesta de la ecuación manifiesta por Rayleigh en 1869:

Ec. 2-2

$$\text{Frequency} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

Donde

c = velocidad del sonido, 1,130ft/seg

L, W, H = largo, ancho y alto del cuarto, en pies ft

p, q, r = números enteros 0,1,2,3...,etc.

La importancia de esta ecuación es que da frecuencia de los modos en todos los ejes, tangencial y oblicuo de un cuarto rectangular.

Los enteros p, q y r son las únicas variables cuanto L, W, H son fijas para un cuarto dado. Estos enteros no solo proveen la clave para la frecuencia de un modo dado, pero además sirve para identificar el modo como axial, tangencial u oblicuo. Si $p=1, q=0$ y $r=0$, es decir, modo (1,0,0), los términos de la altura y la anchura saltan fuera de la ecuación y esta viene a ser:

$$\text{Frequency} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2}} = \frac{c}{2L} = \frac{1,130}{2L} = \frac{565}{L}$$

Este es el correspondiente modo axial para el largo del cuarto. El modo (0,1,0) es el axial del ancho y el de la altura es modo (0,0,1) son calculados similarmente sustituyendo la apropiada dimensión. Si dos de los enteros son cero, un modo de frecuencia axial es identificado porque solo un par de superficies están involucradas. En forma similar, un cero identifica el modo tangencial y ningún cero en todas las paredes es modo oblicuo.

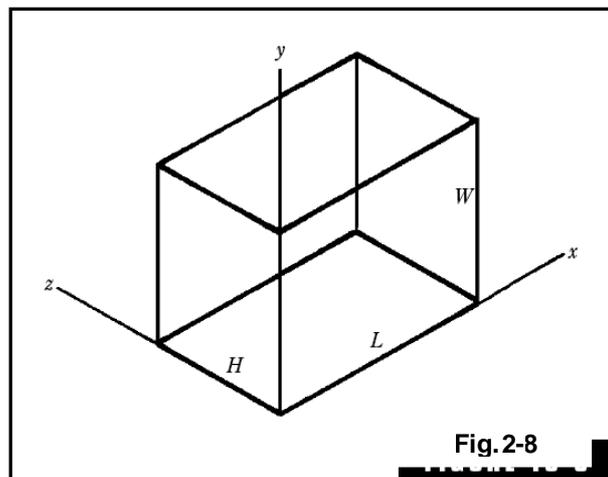


Fig.2-8

Orientación de un cuarto rectangular de largo L , ancho W y altura H con respecto a las coordenadas x, y, z para cálculos de frecuencias modales en cuartos.

Cálculos de Modo – Un Ejemplo

La utilidad de la Ec.2-2 es la mejor demostración para un ejemplo. El cuarto es pequeño, pero conveniente para la verificación experimental. Las dimensiones del cuarto son: longitud $L=12.46\text{ft}$, anchura $W=11.42\text{ft}$ y el promedio de altura es $H=7.90\text{ft}$ (el techo actualmente está inclinado a lo largo de la longitud del cuarto con una altura de 7.13ft en un final y 8.67ft en el otro). Estos valores de L , W , H han sido insertados a lo largo de la Ec. 2-2 con una variedad de combinaciones de los enteros p , q , r .

Los modos del cuarto son posibles solo cuando p , q , y r son número enteros (o cero) porque esta es una condición que crea una *onda estacionaria*. Allí hay muchas combinaciones de enteros cuando fundamentalmente (asociado con 1), segundos modos (asociado con 2), y terceros modos (asociado con 3), etc., son introducidos. La lista de la tabla 2-1 muestra algunas de las varias combinaciones de p , q , y r , y el resultado de la frecuencia modal permisible para cada combinación. Además, cada frecuencia es identificada como axial, tangencial u oblicua por el número de ceros en esa particular combinación de p , q , r . La frecuencia mas baja natural del cuarto es 45.3Hz , que es el modo axial, asociado con la longitud del cuarto, la longitud L del cuarto, debajo del cual no hay un modo reforzado de sonido. En este caso, $p=1$, $q=0$, $r=0$. El modo 7, el modo $2,0,0$, produce una frecuencia de 90.7hz , el cual es el segundo modo axial asociado con la longitud L . En la misma manera, el modo 18, con enteros $3,0,0$, es el tercer modo del modo axial longitudinal, y el modo 34 es su cuarto modo. Cualquiera, allí hay muchos modos tangenciales y oblicuos entre estos, y la tabla 2-1 proporciona recursos para identificar con cuidado todos los modos y aumenta la posibilidad de estudiar sus relaciones.

Los modos axiales habrían sido enfatizados en el estudio de diseño, y la relación que estos habrían de dar después. El mensaje de la Ec. 2-2 y la tabla 2-1 es que allí hay mucho mas para los cuartos acústicos de los modos axiales y sus espaciamentos. Entre la frecuencia del modo axial están muchas otras frecuencias modales que tienen un efecto, incluso aunque son débiles.

Tabla 2-1 Mode calculations. Room dimensions: $12.46 \times 11.42 \times 7.90$ ft.

| Mode number | Integers
<i>p q r</i> | Mode frequency, Hz | Axial | Tangential | Oblique |
|-------------|--------------------------|--------------------|-------|------------|---------|
| 1 | 1 0 0 | 45.3 | x | | |
| 2 | 0 1 0 | 49.5 | x | | |
| 3 | 1 1 0 | 67.1 | | x | |
| 4 | 0 0 1 | 71.5 | x | | |
| 5 | 1 0 1 | 84.7 | | x | |
| 6 | 0 1 1 | 87.0 | | x | |
| 7 | 2 0 0 | 90.7 | x | | |
| 8 | 2 0 1 | 90.7 | | x | |
| 9 | 1 1 1 | 98.1 | | | x |
| 10 | 0 2 0 | 98.9 | x | | |
| 11 | 2 1 0 | 103.3 | | x | |
| 12 | 1 2 0 | 108.8 | | x | |
| 13 | 0 2 1 | 122.1 | | x | |
| 14 | 0 1 2 | 122.1 | | x | |
| 15 | 2 1 1 | 125.6 | | | x |
| 16 | 1 2 1 | 130.2 | | | x |
| 17 | 2 2 0 | 134.2 | | x | |
| 18 | 3 0 0 | 136.0 | x | | |
| 19 | 0 0 2 | 143.0 | x | | |
| 20 | 3 1 0 | 144.8 | | x | |
| 21 | 0 3 0 | 148.4 | x | | |
| 22 | 2 2 1 | 152.1 | | | x |
| 23 | 3 0 1 | 153.7 | | x | |
| 24 | 1 1 2 | 158.0 | | | x |
| 25 | 3 1 1 | 161.5 | | | x |
| 26 | 0 3 1 | 164.8 | | x | |
| 27 | 3 2 0 | 168.2 | | x | |
| 28 | 2 0 2 | 169.4 | | x | |
| 29 | 1 3 1 | 170.9 | | | x |
| 30 | 0 2 2 | 173.9 | | x | |
| 31 | 2 3 0 | 173.9 | | x | |
| 32 | 2 1 2 | 176.4 | | | x |
| 33 | 1 2 2 | 179.7 | | | x |
| 34 | 4 0 0 | 181.4 | x | | |
| 35 | 3 2 1 | 182.8 | | | x |

Tabla 2-1 *Continued.*

| Mode number | Integers
<i>p q r</i> | Mode frequency, Hz | Axial | Tangential | Oblique |
|-------------|--------------------------|--------------------|-------|------------|---------|
| 36 | 2 3 1 | 188.1 | | | x |
| 37 | 2 2 2 | 196.2 | | | x |
| 38 | 0 4 0 | 197.9 | x | | |
| 39 | 3 0 2 | 197.9 | | x | |
| 40 | 3 3 0 | 201.3 | | x | |
| 41 | 3 1 2 | 203.5 | | | x |
| 42 | 0 3 2 | 206.1 | | x | |
| 43 | 1 3 2 | 211.1 | | | x |
| 44 | 0 0 3 | 214.6 | x | | |
| 45 | 1 0 3 | 219.3 | | x | |
| 46 | 0 1 3 | 220.2 | | x | |
| 47 | 3 2 2 | 220.8 | | | x |
| 48 | 1 1 3 | 224.8 | | | x |
| 49 | 2 3 2 | 225.2 | | | x |
| 50 | 2 0 3 | 232.9 | | x | |
| 51 | 4 3 0 | 234.4 | | x | |
| 52 | 0 2 3 | 236.3 | | x | |
| 53 | 2 1 3 | 238.1 | | x | |
| 54 | 3 4 0 | 240.2 | | x | |
| 55 | 1 2 3 | 240.6 | | | x |
| 56 | 3 3 2 | 247.0 | | | x |
| 57 | 2 2 3 | 253.1 | | | x |
| 58 | 3 0 3 | 254.0 | | x | |
| 59 | 0 3 3 | 260.9 | | x | |
| 60 | 3 2 3 | 272.6 | | | x |
| 61 | 2 3 3 | 276.2 | | | x |
| 62 | 4 0 3 | 281.0 | | x | |
| 63 | 0 0 4 | 286.1 | x | | |
| 64 | 0 4 3 | 291.1 | | x | |
| 65 | 3 0 4 | 316.8 | | x | |
| 66 | 0 3 4 | 322.3 | | x | |

Verificación Experimental

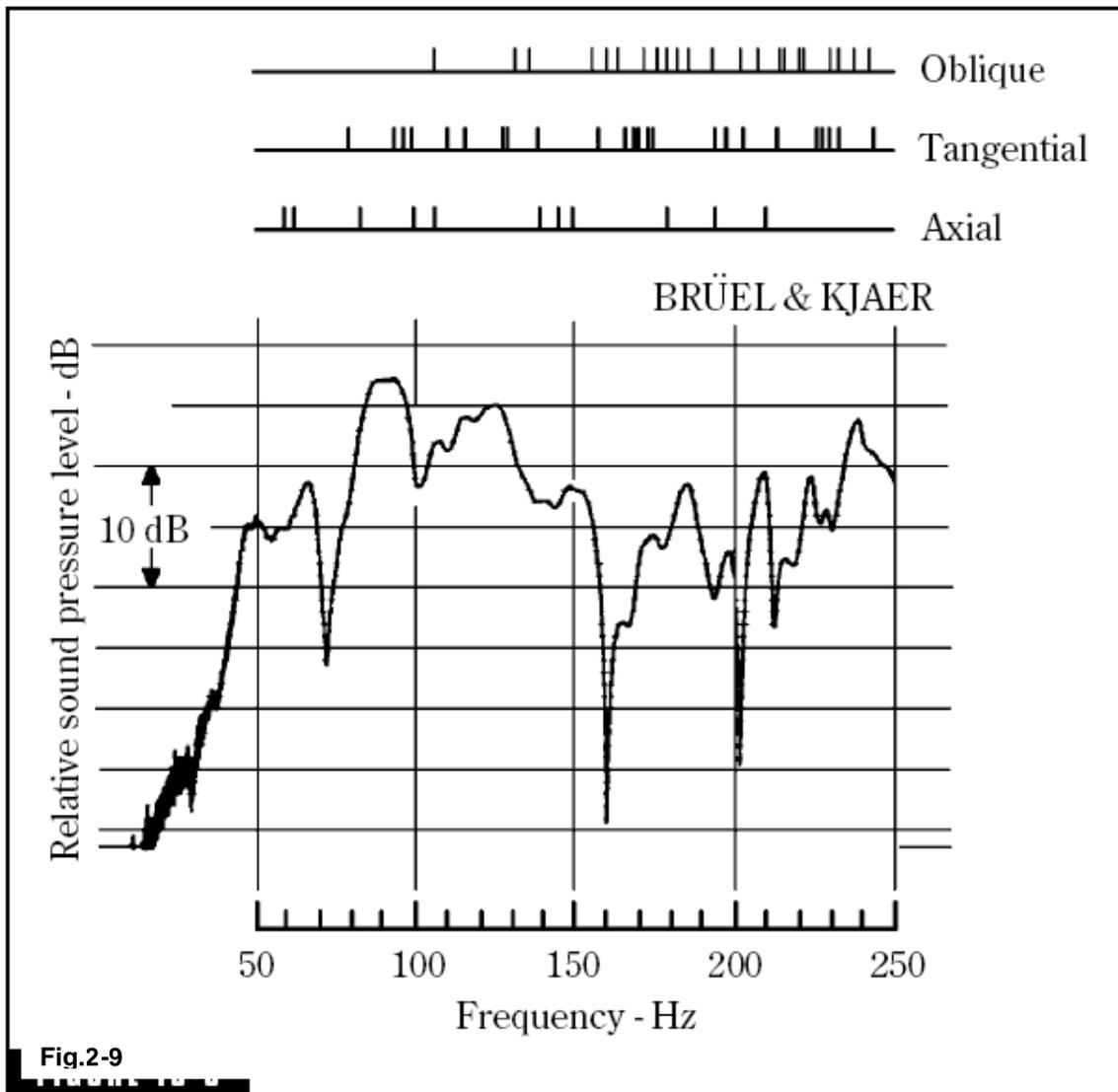
Todas las frecuencias modales listadas en la tabla 2-1 constituyen la acústica de este cuarto particular para el rango de frecuencia especificado. Para evaluar sus efectos relativos, fue estructurada una transmisión experimental de un barrido de ondas senoidales. En efecto, estas mediciones de la respuesta en frecuencia del cuarto. Conociendo que todos los modos de un cuarto terminan en las esquinas del cuarto, un altavoz puede estar colocado debajo en cualquiera de tres esquinas y un micrófono de medición en la diagonal producto de las tres esquinas altas del cuarto. El altavoz fue entonces energizado por un lento barrido con señal de onda senoidal. El cuarto responde a la señal, recogido por el micrófono, fue grabado en un grabador de nivel grafico teniendo una velocidad de papel de 3mm/segundo. Este resultado en un barrido lineal desde 50hz a 250hz en 38 segundos. Los trazos de los resultados son mostrados en la fig.2-9.

En el pasado, los intentos habían sido hechos para identificar los efectos de cada modo en cuartos reverberantes con todas las seis superficies endurecidas y reflejantes. En tales casos, los modos sobresalientes están fuera como púas abruptas en la grabación. El cuarto de prueba en el cual la grabación de la fig.2-9 fue hecha es una recamara disponible, no en una cámara reverberante. En lugar de concreto, los muros son de armazón de construcción cubiertos con paneles de yeso (pared seca); por encima de la madera laminada que constituye el piso se coloco alfombra, las puertas del closet casi cubren un muro. Ahí esta una ventana grande, cuadros en el muro y muebles, incluyendo una cama. Es evidente que este es un cuarto bastante absorbente. El tiempo de reverberación para 125hz (como nosotros lo consideraremos totalmente después) fue hallado para ser de 0.33 segundos. Este cuarto esta mucho mas cerca acústicamente para cuartos de estudios y control que para cámaras reverberantes, y este es el porque fue escogido.

Identificación de Modos

Un cuidadoso estudio de la fig.2-9 en un intento de ligar los picos y valles del correr de la transmisión para modo especifico axial, tangencial u oblicuo es bastante decepcionante. En primer lugar, la respuesta del altavoz (JBL 2135) es incluido, aunque este es bastante parejo sobre esta región de frecuencias. El generador de señal y el amplificador de potencia son muy planos. La mayoría de las subidas y bajadas son más atribuidas a modos y la interacción de modos. Modos cerrados a la vez habrían de ser esperados para reforzar la respuesta del cuarto si esta en fase, pero cancelar si esta fuera de fase. Allí hay 11 modos axiales, 26 modos tangenciales y 21 modos oblicuos en este registro de 45.3hz a 254.0hz, y lo mejor que podemos decir es que el trazo de transmisión que es mostrada en la fig.2-9 es el efecto compuesto de todos los 58 modos.

Los tres mayores declives son de manera estrecha que ellos habrían de tomar energía desde un espectro distribuido de voz o música. Si ellos son descuidados, las fluctuaciones restantes son más moderadas. Fluctuaciones de



Ejecución de transmisión de un barrido de sonido con onda senoidal en las pruebas del cuarto de la tabla 2-1. La localización de cada frecuencia modal axial, tangencial u oblicua es indicada.

esta magnitud entre semejantes pruebas de transmisión estado-constante barrido-senoidal son características de incluso el más cuidadoso diseñador y el más grato de los estudios, cuartos de control y cuartos de escucha. El oído comúnmente acepta tal desviación de llanuras de respuesta. La estructura modal de un espacio siempre da elevación para estas fluctuaciones. Ellos son normalmente omitidos porque la atención es enfocada en la respuesta del micrófono, amplificador, altavoz y otros equipos de reproducción. La respuesta del oído y del cuarto tiene aun la atención recibida que se merecen.

Decaimiento del Modo

La respuesta de estado-constante de la fig.2-9 dice solo una parte de la historia. El oído es muy sensible a efectos transitorios, voz y música son hechos a casi completamente de transitorios. El decaimiento de reverberación es un fenómeno transitorio que es fácilmente medible. Cuando la banda ancha de sonido semejante como la voz o música excita los modos de un cuarto, nuestro interés natural se centra en el decaimiento de los modos. Los modos en la banda de 43.3hz a 254hz de la fig.2-9 son la micro-estructura de la reverberación en el cuarto. La reverberación es comúnmente medible en bandas de octava. Los anchos de bande de octava de interés son mostradas en la tabla 2-2.

Cada decaimiento de reverberación por banda de octava así involucran un promedio de decaimiento de muchos modos, pero esto toma una comprensión del decaimiento de los modos individuales para explicar completamente el decaimiento de la banda de octava de sonido. La superior la frecuencia central de la octava, la mayor el numero de modos incluidos.

Todos los modos no hacen decaimiento a la misma velocidad. El decaimiento del modo depende, entre otras cosas, en la manera que el material absorbente es distribuido en el cuarto. La alfombra en el piso de la prueba del cuarto no tuvo efecto en los modos axiales 1,0,0 y 0,1,0 involucrando solo muros. Los modos tangenciales y oblicuos, que involucran más superficies, habrían de haber esperado para morirse rápidamente que los modos axiales que involucran solo dos superficies. Por otro lado, la absorción es mayor para el modo axial en el cual el sonido choca en la superficie en ángulo recto que para el ángulo

Tabla 2-2 Modes in octave bands.

| Octave | Limits
(-3 dB
points) | Modes | | |
|--------|-----------------------------|-------|------------|---------|
| | | Axial | Tangential | Oblique |
| 63 Hz | 45- 89 Hz | 3 | 3 | 0 |
| 125 Hz | 89-177 Hz | 5 | 13 | 7 |
| 250 Hz | 177-254 Hz | 3* | 10* | 14* |

*Partial octave.

inferior de incidencia común para los modos tangencial y oblicuo.

Los actuales decaimientos de reverberación en el cuarto de prueba usando ondas senoides para excitarlos son mostrados en las figs.2-10 y 2-11. Las mediciones del tiempo de reverberación varían como se muestran en la tabla 2-3. Las mediciones del tiempo de reverberación varían casi dos de uno por la

frecuencia seleccionada en el rango de 180hz a 240hz. El decaimiento del ruido en la banda de octava de 125hz (0.33seg) y la banda de octava de 250hz (0.37seg) de la fig.2-11 promedian muchos modos y deben ser consideradas mas o menos la verdad del valor para esta región de frecuencia, aunque normalmente muchos decaimientos para cada banda habrían de ser tomadas para proporcionar significado estadístico.

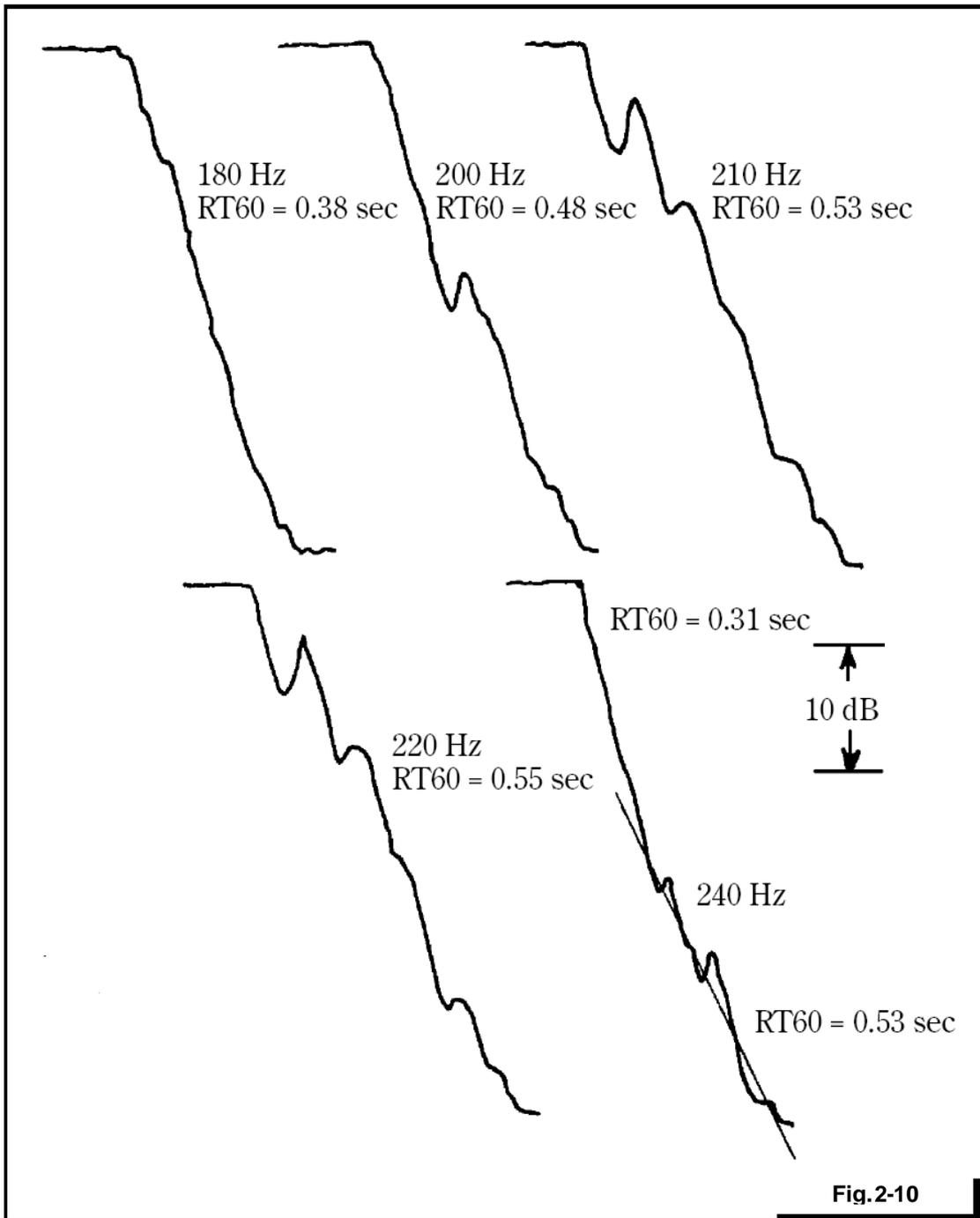
El decaimiento de doble inclinación para 240hz en la fig.2-10 es especialmente interesante porque el bajo valor de la primera inclinación (0.31seg) es probablemente dominado por un solo modo involucrando mucha absorción, después dando otra manera para otros modos de mucha menos absorción. Actualmente identificar los modos de la tabla 2-1 es difícil, aunque tu puedes esperar que el modo 44 muera lentamente y el grupo del cercano tres 220hz (45, 46, 47) a estar sumamente mojados. Esto es comúnmente para forzar los modos cercanos dentro de la oscilación, el cual entonces a causa de su frecuencia natural.

Modo Ancho de Banda

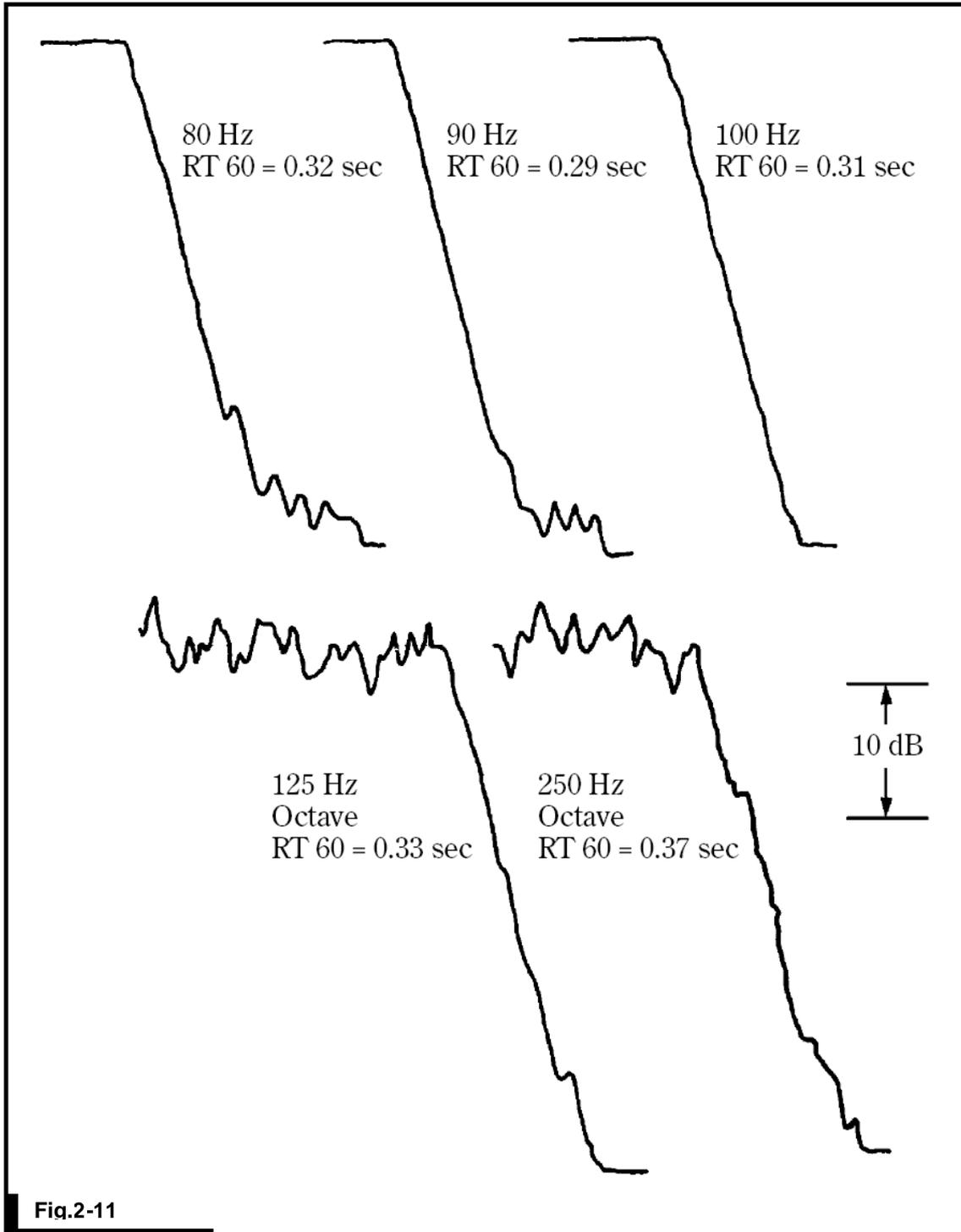
Los modos normales son parte y paquete de las resonancias del cuarto. Tomado separadamente, cada modo normal exhibe una curva de resonancia semejante como lo muestra la fig. 2-12. Cada modo, por consiguiente, tuvo un definido

Tabla 2-3 Measured reverberation time of test room.

| Frequency Hz | Average reverberation time, seconds |
|---------------------|-------------------------------------|
| 180 | 0.38 |
| 200 | 0.48 |
| 210 | 0.53 |
| 220 | 0.55 |
| 240 | 0.31 and 0.53 (double slope) |
| 125 Hz octave noise | 0.33 |
| 250 Hz octave noise | 0.37 |



Tono-puro reverberación-decaimiento, grabaciones echas en un cuarto de prueba. Único decaimiento de modos solo producen trazos uniforme y logarítmico. Pulsación entre modos adyacentes causa el decaimiento irregular. Los dos patrones de inclinación basados en rectas revelan el uniforme decaimiento de un solo modo sobresaliente, para el primero 20dB, después que uno o más ligeramente absorben modos dominantes.



El tope del decaimiento de reverberación para tres tonos puros es dominado por solo el modo sobresaliente como indicado por el uniforme apego a la forma logarítmica. Las dos inferiores grabaciones son de banda de octava de ruido rosa, los cuales dan el decaimiento promedio de todos los modos en esas octavas.

ancho de banda (bandwidth) determinado por la simple expresión:

Ec. 2-3

$$\text{Bandwidth} = f_2 - f_1 = \frac{2.2}{\text{RT60}}$$

RT60 = reverberation time, seconds

El ancho de banda es inversamente proporcional al tiempo de reverberación. En los circuitos eléctricos, la agudeza de la afinación de la curva depende de la cantidad de resistencia en el circuito. En el cuarto acústico, el tiempo de reverberación depende de la absorción (resistencia). La analogía es adecuada (además de la absorción, el corto tiempo de reverberación, y lo extenso de los modos de resonancia). Como referencia conveniente, tabla 2-4 a algunos valores del ancho de banda en relación al tiempo de reverberación.

El ancho de banda de los modos para un estudio típico es en la región general

de 5hz. Estos significan, esos modos adyacentes tienden a superponerse en el cuarto con cortos tiempos de reverberación, lo cual es deseable. Como los bordes de las curvas de resonancia de los modos adyacentes superpuestos A y B, energizando el modo A por impulso, el cuarto a la frecuencia A quiere asimismo tender a forzar la excitación interna del modo B. Cuando el tono de frecuencia A es detenido, la energía acumulada en B decae a causa de esta propia frecuencia B. Los dos quieren pulsar con cada una de las otras duraciones de decaimiento. El muy uniforme decaimiento, tal como el tope de la cima tres en la fig.2-11, es probablemente solo modos suficientemente alejados de sus vecinos como para actuar independientemente

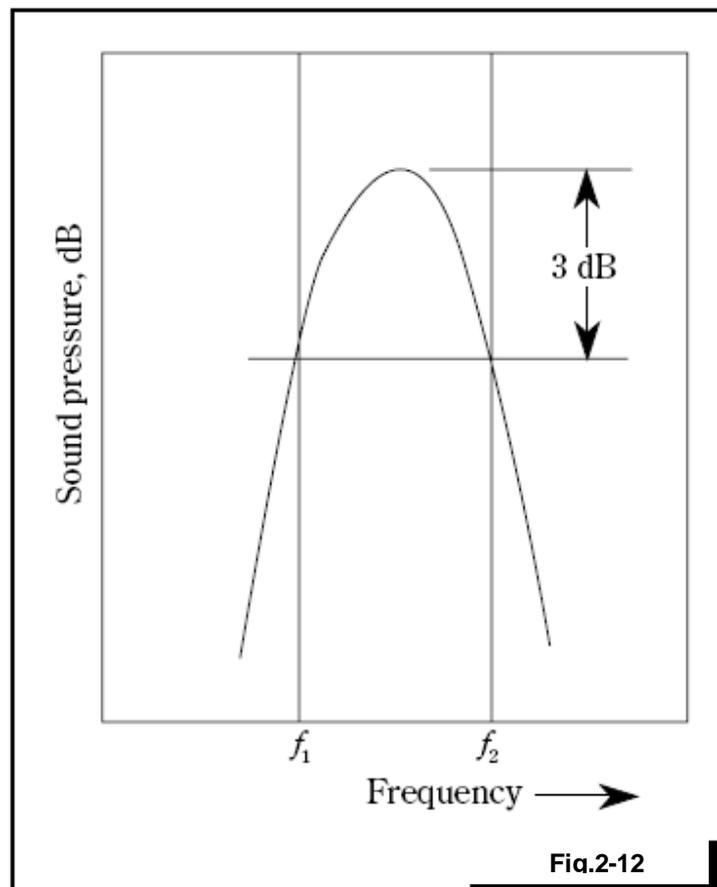


Fig.2-12

Cada modo tuvo un ancho de banda finito. El mas cuarto el mas absorbente, el ancho de banda, el mas amplio. Como medida de punto habitual de -3dB, el ancho de banda del modo es cerca de 5hz, de la grabación en un estudio.

sin irregularidades causadas por pulsos (beats).

Tabla 2-4 Mode bandwidth.

| Reverberation time, seconds | Mode bandwidth Hz |
|-----------------------------|-------------------|
| 0.2 | 11 |
| 0.3 | 7 |
| 0.4 | 5.5 |
| 0.5 | 4.4 |
| 0.8 | 2.7 |
| 1.0 | 2.2 |

La figura 2-13 muestra una expansión de la versión de 40hz a 100hz, que es la porción de la fig.2-9. El modo axial de la tabla 2-1 que cae dentro de este rango es trazado con un ancho de banda de 6hz en un punto de -3dB. El modo axial (fig.2-13A) esta con un máximo referencia de nivel cero. El modo tangencial solo tiene la mitad de la energía de los modos axiales, lo cual justifica el trazo de su pico de 3dB ($10\log 0.5$) por debajo los modos axiales en la fig. 2-13B. Los modos oblicuos solo tienen un cuarto de la energía de los modos axiales, desde el solo modo

oblicuo en 98.1hz que desciende dentro de este rango esta trazado en 6dB ($10\log 0.25$) por debajo los picos del modo axial en la fig.2-13C.

La respuesta en el cuarto de prueba, fig. 2-13D esta ciertamente hecho de la contribución colectiva de carios modos tabulados en la tabla 2-1. La fig.2-13 puede ser considerada por la colectiva contribución de los modos axiales A, los

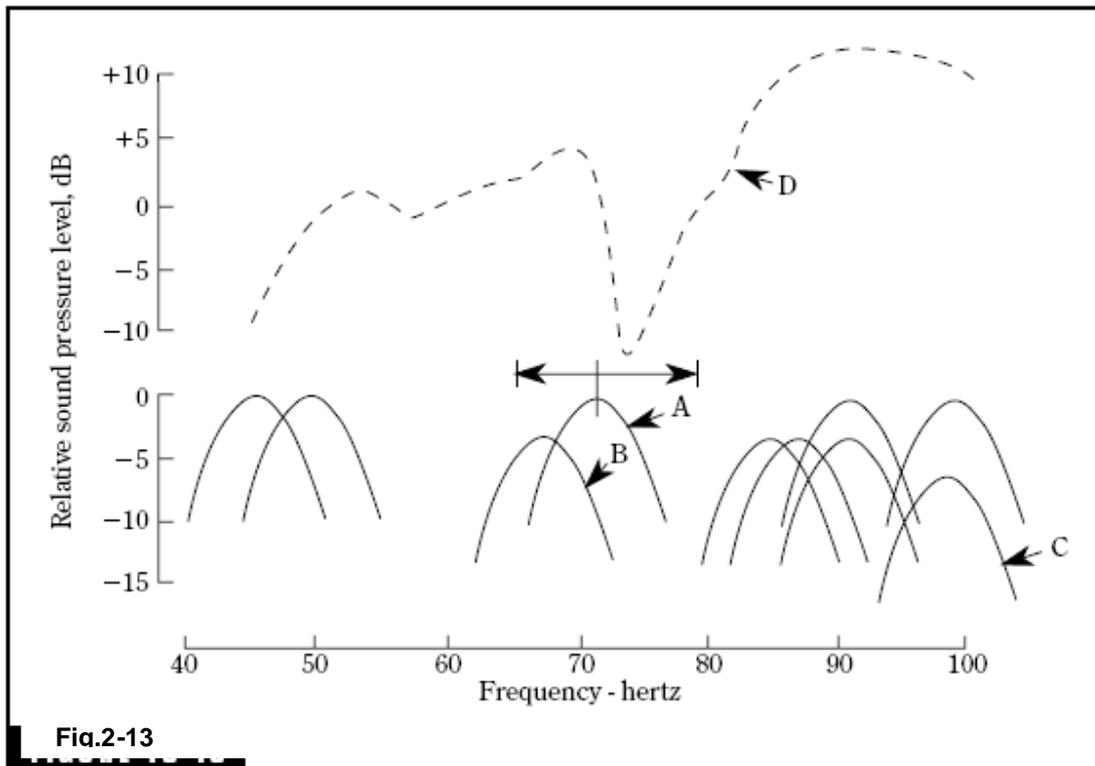


Fig.2-13 Intentando una correlación entre los cálculos de los modos y la medición de la respuesta del barrido con onda senoidal en el cuarto de prueba por encima del rango de frecuencia de 40hz a 100hz. (A) Modos axiales. (B) Modos tangenciales. (D) reproducción de la porción de 40hz a 100hz de la respuesta de la fig.2-9.

modos tangenciales B y ¿el solo modo oblicuo C? esto parece razonable para el calculo de picos a 12dB en la respuesta del cuarto entre 80hz y 100hz por el efecto combinado de los dos axiales, tres tangenciales y un modo oblicuo en ese rango de frecuencia. La caída fuera y por debajo de 50hz es indudablemente debido a la respuesta de los altavoces. Estos niveles de 12dB, la pendiente para 74hz, aun es por considerarse.

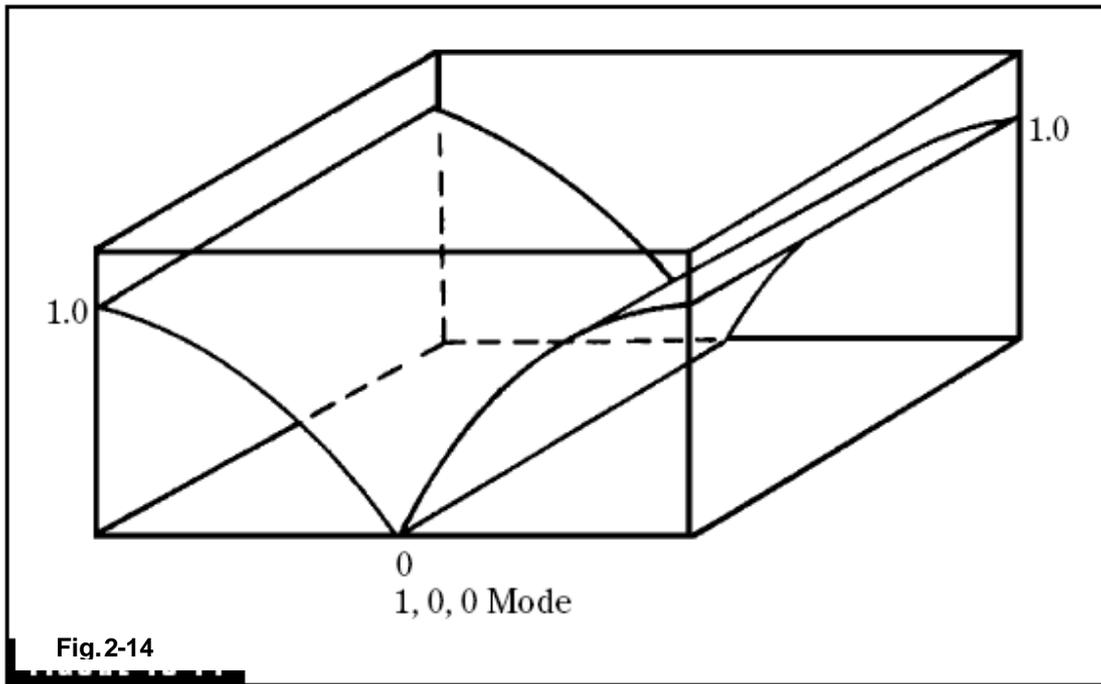
Examinando los modos axiales para 71hz, puede ser visto que este declive es de modo vertical en el cuarto medido, trabajando en contraste con un techo inclinado. Las frecuencias correspondientes para el promedio de la altura es de 71.5hz pero el primer correspondiente a altura menor del techo que es 79.3hz, y para la parte final mas alta este es de 65.2hz. La incertidumbre de la frecuencia de este modo es indicada por las flechas en la fig.2-13. Si este indeterminado modo axial fue cambiado un poco a baja frecuencia, la respuesta de 12dB del declive pudo ser mejor explicado. Este habría visto que la respuesta de un declive debe aparecer cerca de los 60hz, pero ninguno fue encontrado.

Hay bastante en un experimento absoluto para comprobación de la teoría, este experimento en el cuarto de prueba fue solo conduce a explicar las características básicas de la teoría. Faltaron condiciones y técnicas de rigor necesario para producir resultados exactos. El cuarto de prueba no es un paralelepípedo rectangular, el cual es la base de la fig.2-1. Ninguno representa exactamente la respuesta del altavoz conocida. En suma, allí esta el factor dominante que combinando el efecto de los modos de la fig.2-13 A, B, y C para obtener D en la fig.2-3, la fase debe ser tomado dentro del cálculo. Estos componentes deben ser combinados vectorialmente con la total consideración de ambas magnitud y fase. El propósito principal de la fig. 2-13 es para enfatizar que la respuesta del cuarto es hecha de la combinación de respuestas modales.

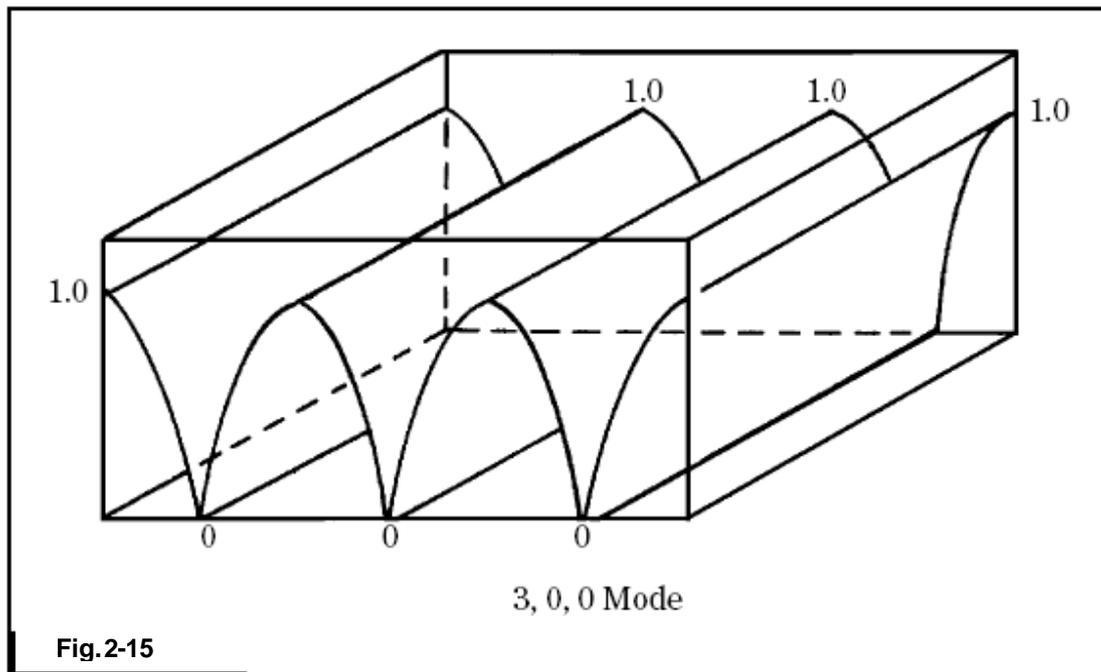
Planos de los Modos de Presión

Esto es sencillo de decir, que los patrones modales de un cuarto dado un muy complejo campo de sonido, pero para manejar realmente estos varios trazos de puntos en la casa debe ser incluida las distribuciones de presión del sonido. El órgano unidimensional de la fig.2-2 es un punto de partida que puede ser comparado con el modo 1,0,0 de la fig.2-14 para un cuarto tridimensional. La presión es alta cerca de los extremos (1.0) y cero a lo largo del centro del cuarto. La figura 2-15 muestra la distribución de la presión de sonido cuando solo el modo axial 3,0,0 es energizado. Los nodos de la presión de sonido y anti-nodos en este caso son líneas rectas como lo muestra la fig.2-16.

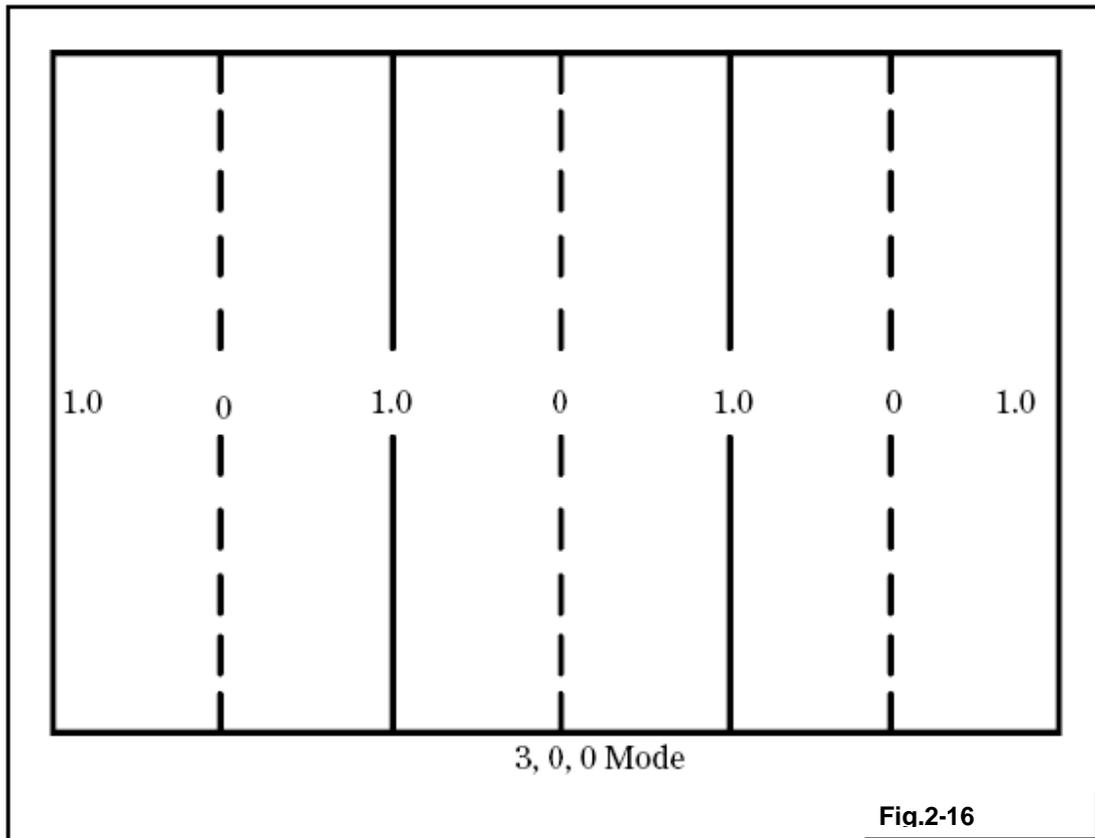
Los trazados tridimensionales de la distribución por todas partes del sonido en el cuarto viene a dificultarse, pero la fig.2-17 es un intento para el modo tangencial 2,1,0. Nosotros vemos la presión del sonido “amontonada” en cada esquina del cuarto con dos montones más a las orillas del centro. Este es más



Una representación grafica de la distribución de la presión del sonido del modo axial 1,0,0 en el cuarto. La presión del sonido es cero en el plano vertical en el centro del cuarto y es máximo en los extremos del cuarto. Esto es comparable a f_1 del órgano de tubos de la fig. 2-2.



Representación de la distribución de la presión de sonido del modo axial 3,0,0 del cuarto.



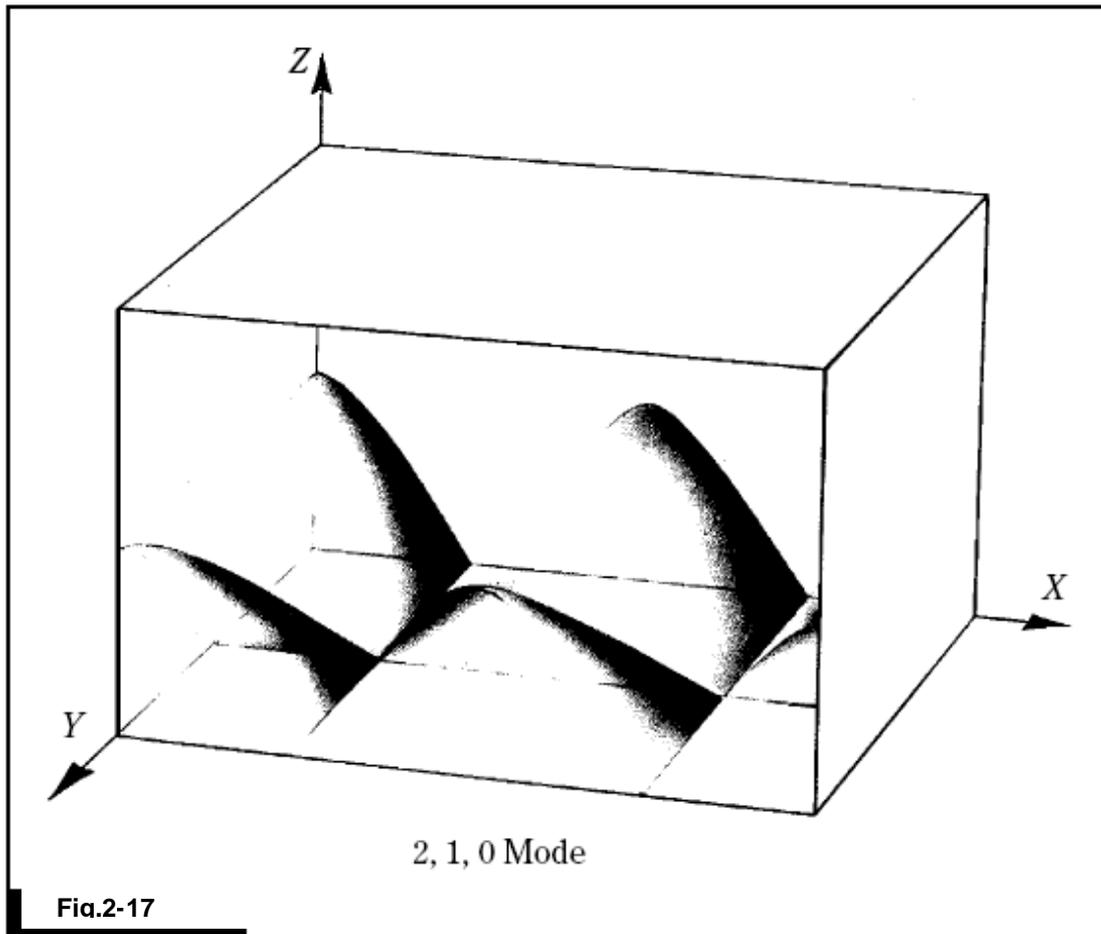
Contorno de presión de sonido en una sección a través de un cuarto rectangular del modo axial 3,0,0.

Gráficamente retratado en la fig.2-18 en el cual las líneas del contorno de la presión son dibujadas. Las líneas cortadas que están cruzando el cuarto entre los “montones” de sonido marcan la región de presión cero.

Imagina como se complican los patrones de la presión de sonido que habrían de ser si todos los modos de onda concurrentemente o secuencialmente excitados por energía de voz o música son perseguidos arriba y abajo del espectro mientras constantemente cambian de intensidad. El plano de la fig. 2-18 muestra la máxima presión en las esquinas del cuarto. Estos máximos siempre aparecen en las esquinas del cuarto para todos los modos. Para excitar todos los modos, el lugar de la fuente de sonido es la esquina. A la inversa, si tú deseas medir todos los modos, la esquina es el lugar para colocar el micrófono.

Densidad Modal

La densidad modal incrementa con la frecuencia. En la tabla 2-1 una banda de octava se extiende entre 45hz y 90hz, solo 8 frecuencias modales son contadas. En la próxima octava superior allí son 25 modos. Incluso en este mismo límite del rango de baja frecuencia por debajo de 200hz tú puedes ver la densidad



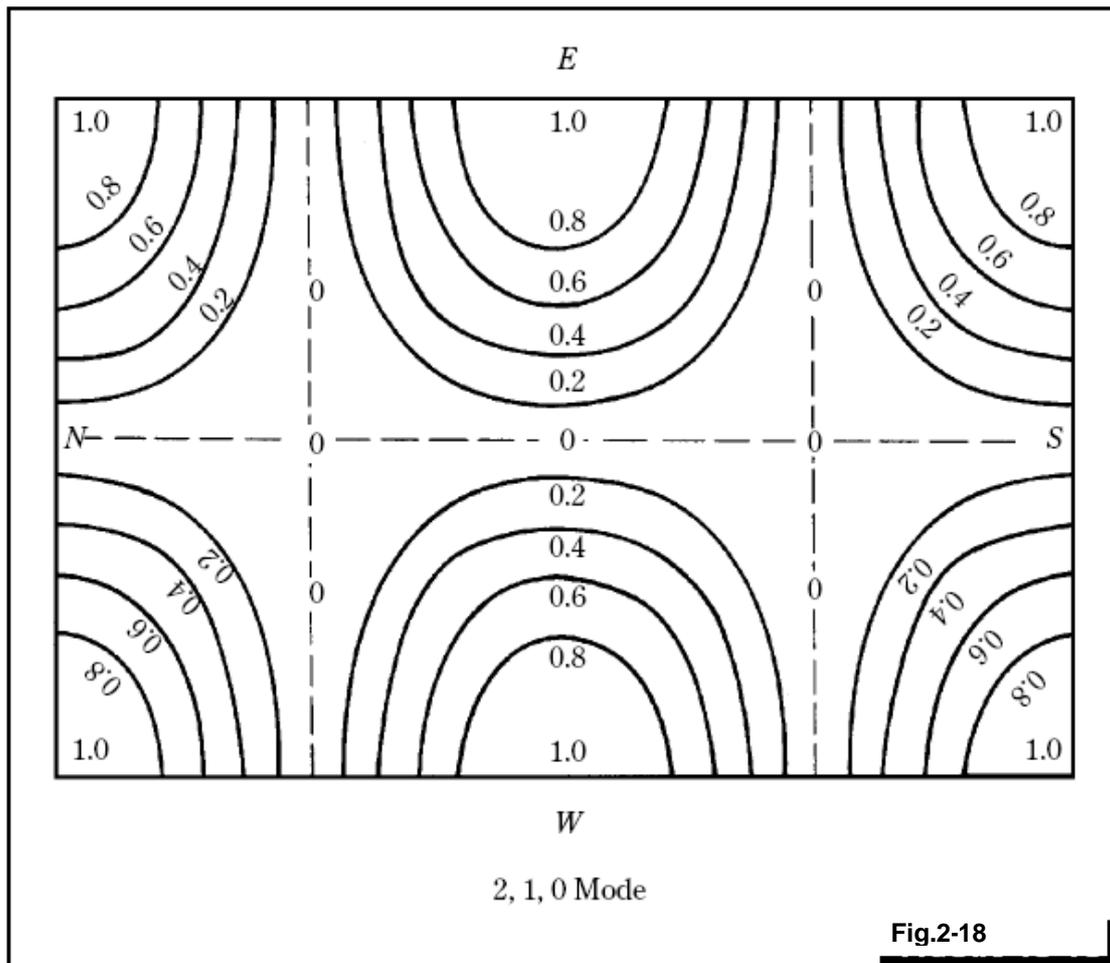
Representación en tres dimensiones de la distribución del sonido en un cuarto rectangular para el modo tangencial 2,1,0. Bruël and Kjaer Instruments, Inc.

modal incrementándose con frecuencia. La fig. 2-19 muestra que para una parte de la alta frecuencia la velocidad de la elevación se incrementa dramáticamente. Aproximadamente por encima de 300hz el espacio del modo es tan pequeño que la respuesta del cuarto se aplana notablemente conforme crece la frecuencia.

Espaciado y Coloración del Modo

La coloración determina principalmente la calidad del sonido para un estudio o cuarto de escucha. La gran tarea entonces es para determinar cual, o si alguno, del centenar de frecuencias modales en el cuarto probablemente son para crear la coloración.

El espaciado de las frecuencias modales es factor crítico importante. En la región D de la fig.2-7, las frecuencias modales de un pequeño cuarto están tan



Contornos de nivel de presión de un cuarto rectangular de la fig. 2-16 para el modo tangencial 2,1,0.

encerradas y juntas que ellas tienden a unirse servicial e inofensivamente. En las regiones B y C, por debajo de 300hz, su separación es grande y éste esta dentro de la región en donde pueden surgir problemas.

¿Cómo pueden evitarse problemas de coloración provocados por el encerramiento de todas las frecuencias modales? Gilford declara su opinión que un modo axial separado mas de 20hz desde el próximo modo axial tendería a aislar acústicamente. Este no tendería a excitar a través del acoplamiento debido a la superposición en los bordes pero si tendería a actuar independientemente. En esta situación aislada puede responder a un componente de la señal cercana esto es a una frecuencia propia y da a este componente un refuerzo proporcional de resonancia.

Otros criterios para los espacios modales han sido sugeridos por Bonillo quien considera todos los tres tipos de modos, menos el modo axial. El expresa que esto es deseable para tener todas las frecuencias modales en una banda critica

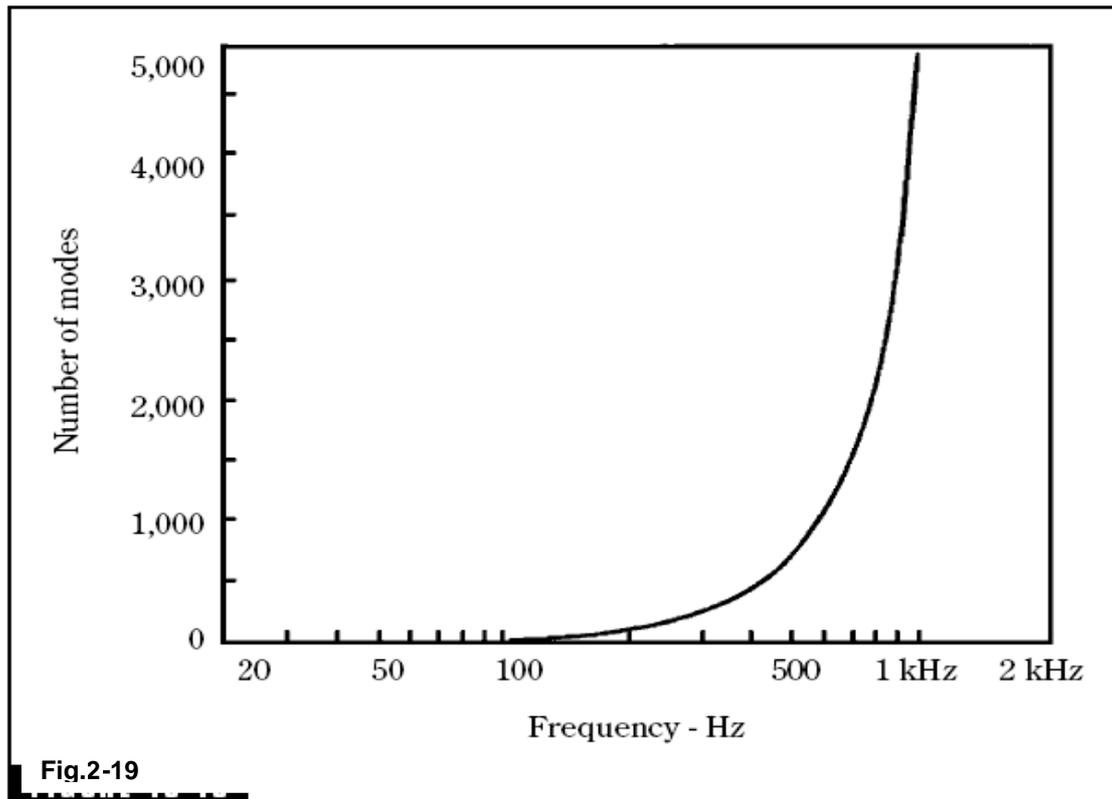


Fig.2-19

El número de frecuencias modales se incrementa dramáticamente con la frecuencia.

por lo menos 5% de separación de sus frecuencias. Por ejemplo, una frecuencia modal en 20hz y otra en 21hz apenas habría de ser aceptable. Sin embargo, similarmente una frecuencia espaciada 1hz no habría de ser aceptable para 40hz (5% de 40hz es 2hz). De esta manera podemos ver que las inquietudes de Gilford's fueron principalmente como remotamente apartadas de los modos axiales que deben ser espaciados para evitar resultados de problemas de acción modal desde independientes y desacoplados. El interés de Bonello lo llevo ha hacer separaciones para evitar la coincidencia del efecto.

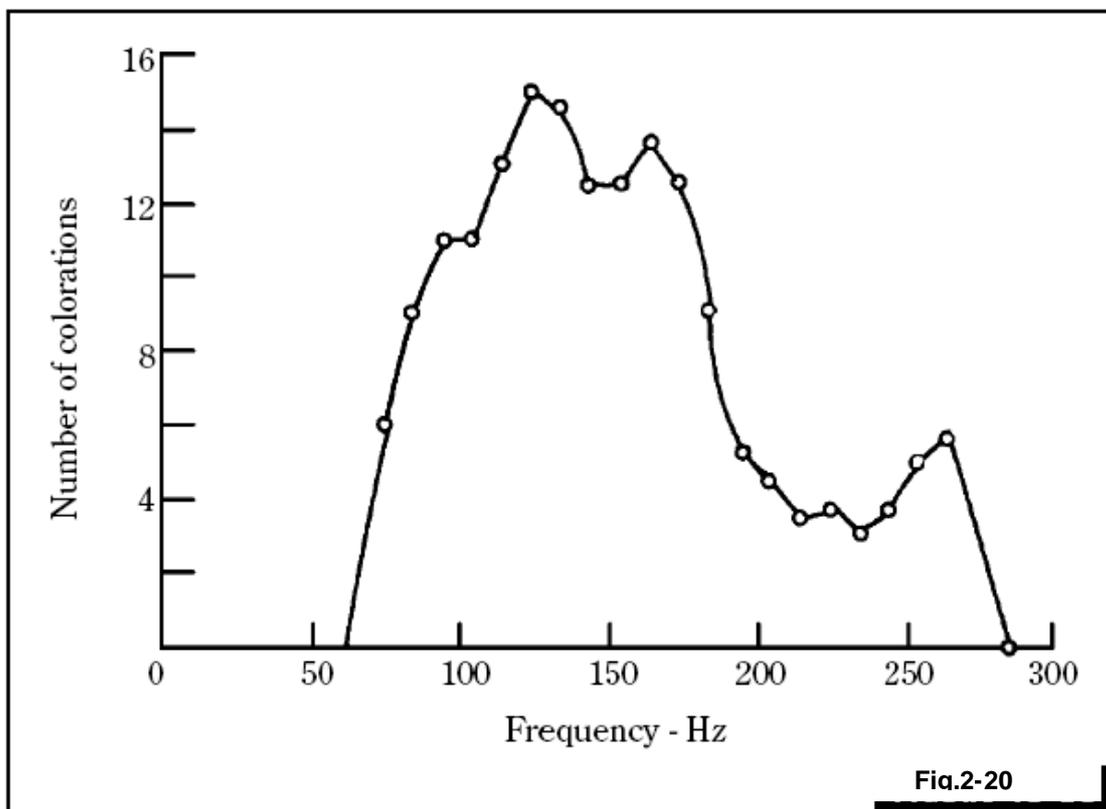
Un espaciado de cero entre las frecuencias modales resulta en una fuente común de coloración. Un espaciado de cero significa que dos frecuencias modales son coincidentes (llamado una degradación, por acústicos), y tales degradaciones tienden a sobre enfatizar los componentes de la señal en esa frecuencia.

Experimentos con Coloración

Cualquier oído puede ofenderse por las coloraciones causadas por los modos aislados, pero incluso un crítico y especializado oído necesita algunos

instrumentos de medición en la identificación y evaluación de semejante coloración. La BBC Research Department hizo un estudio interesante. Observadores escucharon a personas hablantes en un micrófono en el estudio bajo investigación, las voces son reproducidas en otro cuarto en un sistema de alta calidad. Los juicios finales de los observadores fueron ayudados por un selecto amplificador que amplificó una banda estrecha de frecuencia (10hz) a un nivel alrededor de 25dB por sobre el resto del espectro. La salida fue mezclada en una pequeña porción con la señal original para el altavoz, las proporciones estuvieron ajustadas hasta que este era apenas perceptible como una aportación a la salida completa. Ninguna coloración fue entonces hecha claramente audible cuando el amplificador selecto fue ajustado para las frecuencias apropiadas.

La mayoría de los estudios usan este camino, y nosotros podemos asumir que ellos fueron bien diseñados, solo uno o dos coloraciones obvias fueron encontradas en cada prueba. La fig. 2-20 es un plano de la coloración de 61 voces masculinas observadas sobre un periodo de 2 años. La mayoría esta entre 100hz a 175hz. La coloración de las voces femeninas ocurre mas frecuentemente entre 200hz a 300hz.



Un plano de la coloración observada de 61 voces masculinas en un periodo de 2 años en los estudios de la BBC. La mayoría cae en la región de 100hz a 175hz. La coloración de las voces femeninas ocurren entre 200hz a 300hz. Alter Gilford.

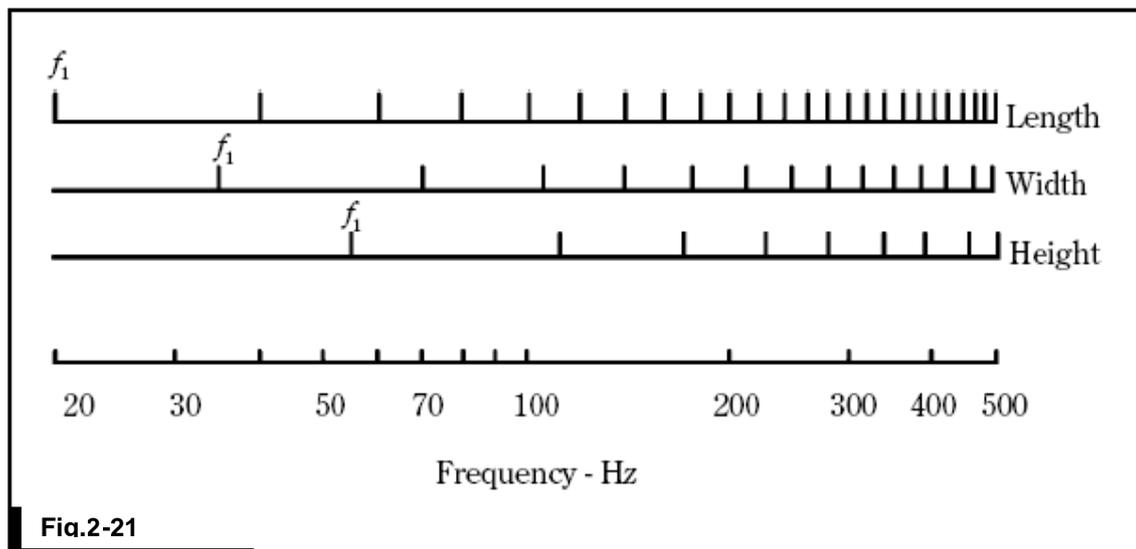
Simplificando el Análisis del Modo Axial

Apliquemos lo que hemos aprendido acerca de los modos axiales específicamente para un cuarto rectangular de estudio o de escucha. Las dimensiones de nuestro cuarto son 28x16x10 ft. Los 28ft de longitud resuenan a $565/28=20.2\text{hz}$, los dos lados del muro de 16ft separadamente resuenan en $565/16= 35.3\text{hz}$, y la combinación del piso-techo resuenan en $565/10=56.5\text{hz}$. Estas son tres resonancias axiales y el tren de sus múltiplos par cada uno son trazados en la fig.2-21. Allí hay 27 frecuencias axiales resonantes debajo de 300hz, y para este ejercicio, la multitud de los débiles modos tangenciales y oblicuos son omitidos.

Debido a que la mayoría de la coloración de señal es identificable para modos axiales, sus espaciamentos podrían ser examinados en detalle. La tabla 2-5 ilustra una forma conveniente para simplificar este análisis de modos axiales. Las frecuencias de resonancia de L, W, y H, columnas de la tabla 2-5 son arregladas en orden ascendente en la cuarta columna. Esto hace fácil examinar ese factor crítico, de los espacios ente modos axiales.

La L-f7, resonancia en 141.3hz coincide con la resonancia en W-f4. Esto significa que esos dos potentes modos axiales actúan juntos para crear una potencial coloración de sonido en esa frecuencia. Esta coincidencia también esta separada 20hz de sus vecinos. Esto también se nota desde la fig.2-20, estos 141.3hz esta en un rango de frecuencia que es especialmente molesto. Aquí, entonces, esta un peligro de un problema potencial.

En 282.5hz podemos ver un “amontonamiento” de L-f14, W-f8 y H-f5, modos que, juntos, habría parecido ser una fuente especialmente molesta de



Frecuencias y múltiplos de las frecuencias axiales del cuarto con medidas 16x28x10ft.

Tabla 2-5 Axial mode analysis form.

| Room dimensions: Length 28.0 ft.
Width 16.0 ft.
Height 10.0 ft. | | | | | |
|---|-----------------------------|----------|----------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | Axial mode resonances
Hz | | | Arranged in
ascending
order | Axial mode
spacing
Hz |
| | <i>L</i> | <i>W</i> | <i>H</i> | | |
| | | | | 20.2 | 15.1 |
| f_1 | 20.2 | 35.3 | 56.5 | 35.3 | 5.1 |
| f_2 | 40.4 | 70.6 | 113.0 | 40.4 | 16.1 |
| f_3 | 60.5 | 105.9 | 169.5 | 56.5 | 4.0 |
| f_4 | 80.7 | 141.3 | 226.0 | 60.5 | 10.1 |
| f_5 | 100.9 | 176.6 | 282.5 | 70.6 | 10.1 |
| f_6 | 121.1 | 211.9 | 339.0 | 80.7 | 20.2 |
| f_7 | 141.3 | 247.2 | | 100.9 | 5.0 |
| f_8 | 161.4 | 282.5 | | 105.9 | 7.1 |
| f_9 | 181.6 | 317.8 | | 113.0 | 8.1 |
| f_{10} | 201.8 | | | 121.1 | 20.2 |
| f_{11} | 222.0 | | | 141.3 | 0 |
| f_{12} | 242.1 | | | 141.3 | 20.1 |
| f_{13} | 262.3 | | | 161.4 | 8.1 |
| f_{14} | 282.5 | | | 169.5 | 7.1 |
| f_{15} | 302.7 | | | 176.6 | 5.0 |
| | | | | 181.6 | 20.2 |
| | | | | 201.8 | 10.1 |
| | | | | 211.9 | 10.1 |
| | | | | 222.0 | 4.0 |
| | | | | 226.0 | 16.1 |
| | | | | 242.1 | 5.1 |
| | | | | 247.2 | 15.1 |
| | | | | 262.3 | 20.2 |
| | | | | 282.5 | 0 |
| | | | | 282.5 | 0 |
| | | | | 282.5 | 20.2 |
| | | | | 302.7 | 20.2 |

coloraciones. Ellos están también separados de sus vecinos por 20hz. Sin embargo, mirando en el experimentalmente deducido plano de la fig.2-20, prácticamente no hay problema con la coloración de las voces que fueron encontradas en 282hz, por lo menor para las voces masculinas. La razón de esto es probablemente la saludable presencia de modos tangenciales y oblicuos omitidos en este estudio.

Con la amenaza de coloración en 141hz, el ajuste de dimensiones de un cuarto propuesto habría de ser un ataque lógico. Si este es un cuarto existente, un resonador de Helmholtz, nítidamente afinado y apropiadamente colocado, es una difícil pero posible solución.

El Criterio de Benello

Probar esas resonancias modales en cuartos es un problema internacional, este método de evaluación de su efecto viene de Buenos Aires Argentina. Bonello sugiere un nuevo método de determinación, por computadora, de la conveniencia acústica de las proporciones de un cuarto rectangular. El divide la más baja frecuencia del espectro audible en el ancho de banda de 1/3 de octava y considera el número de modos en cada banda por debajo de 200hz. Las bandas de 1/3 de octava son escogidas porque ellas se aproximan a las bandas críticas del oído humano.

Para conocer el criterio de Bonello, cada 1/3 de octava debe tener más modos que el anterior, o de menor para el mismo número. Las coincidencias modales son toleradas a menos que los 5 modos más pequeños estén en esa banda.

¿Como califican un cuarto de 15.4x12.8x10ft por este criterio? La fig.2-22 muestra que este comunica estas pruebas con colores para volar. Las subidas de la grafica firmemente ascendentes sin anomalías descendentes. La sección horizontal en 40hz es permitido. La ventaja del plan de Bonillo es que este esta bien adaptado a los cálculos por computadora y son imprimibles.

Controlando los Problemas de los Modos

La construcción general de un resonador de Helmholtz para el tratamiento de un cuarto normal con una entonación muy precisa (alto Q) es muy demandante. Los dobleces de las cajas de madera introducen pérdida que bajan el Q. Para lograr realmente un resonador de alto Q con entonación muy precisa, la cavidad debe ser echa de concreto, cerámica, u otro material duro, no materiales blandos, pero apropiado con algunos medios de variación de la frecuencia de resonancia. La resonancia de la botella de coca-cola fue medida en 185hz y fue encontrado que tiene un ancho de banda (en puntos de -3dB) de 0.67hz. Este rinde un $Q=185/0.67=276$, un valor muy alto. Así, si eres lo bastante afortunado para tener problema con un modo en 185hz.....!

Esto es asimismo importante donde la botella de coca (u otros absorbedores de Helmholtz) es colocada, si el objetivo es causar un modo o grupo estrechamente

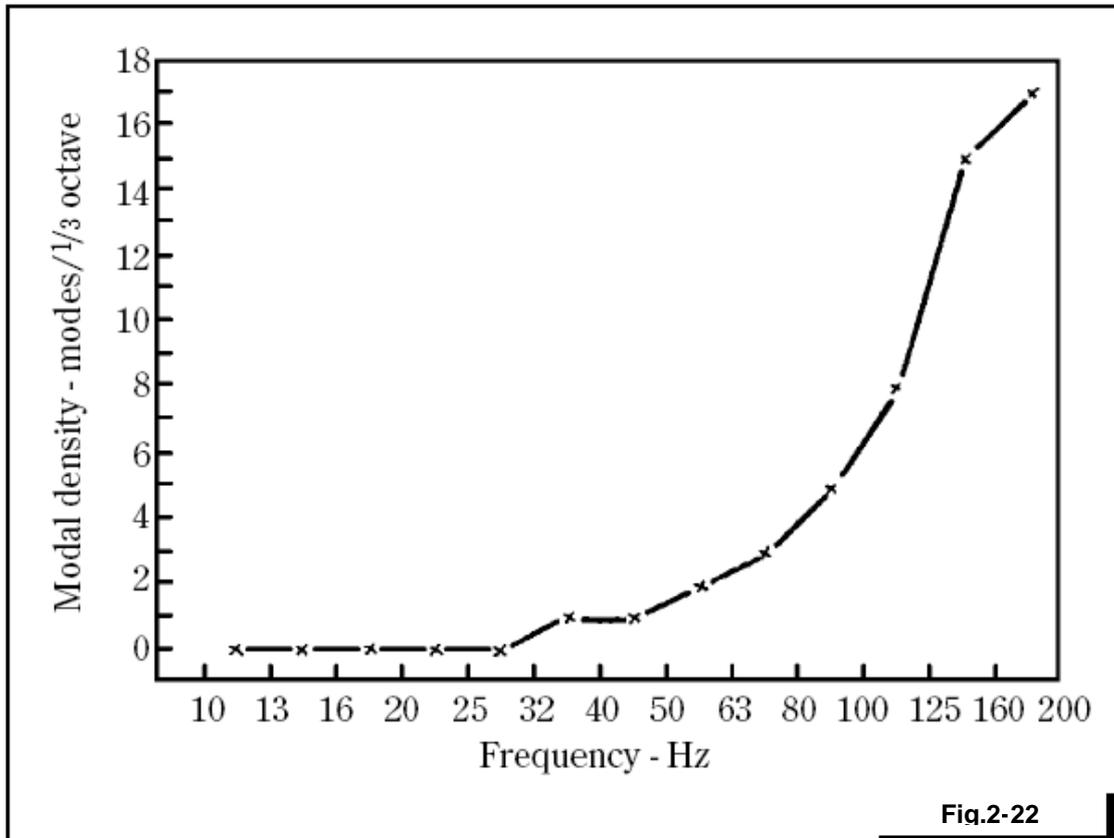


Fig.2-22

Un plano que muestra el número de modos en banda de 1/3octava para el cuarto 15.4x12.8x10ft. Las subidas de la grafica son firmemente ascendentes sin anomalías descendentes; De aquí, el cuarto se encuentra con el criterio de Bonello.

espaciado de modos bajo control. Vamos a decir que el modo 2,1,0 de la fig.2-18 es causante de la coloración en la voz y ese es necesario para introducir una astilla angosta de absorción para la frecuencia de 2,1,0. Si el absorbedor de Helmholtz fue colocado en un nodo de presión (cero presión) este habría de hacer, obviamente, ningún efecto. Colocar en uno de los antinodos (picos de presión) este habría de hacer firme interacción con el modo 2,1,0. Por consiguiente, cualquier esquina es aceptable, tal como habría picos de presión en los muros E y W.

Puntos Importantes de los Modos

- Allí hay tres tipos de resonancia acústica (frecuencia natural, ondas estacionarias, modos normales) en un lugar rectangular cerrado. Allí están los modos axial, tangencial y oblicuo.
- Los modos axiales son hechos de dos ondas que van en direcciones opuestas, viajando paralelamente al eje, y solo chocan en dos muros. Los modos axiales hace la mayor contribución para las características acústicas del espacio porque ahí hay tres ejes para el cuarto rectangular, hay tres frecuencias axiales fundamentales, cada uno con su propio tren de modos.
- El modo oblicuo envuelve ocho ondas viajeras reflejadas de todos los seis muros del lugar cerrado. Los modos oblicuos, teniendo solo $\frac{1}{4}$ de energía de los modos axiales, son menos prominentes que los otros dos.
- El número de modos normales se incrementa con la frecuencia. Los cuartos pequeños cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda del sonido audible tienen un problema de excesiva separación entre modos, lo cual puede contribuir para empobrecer las características en la grabación u otro crítico trabajo. Las notas musicales caen “en el chasquido” entre la extensa separación de modos que serán anormalmente débiles y que morirán más rápido que otras notas. Esto es casi como si esa particular nota estuvo sonando afuera del cuarto mientras las otras notas estaban sonando simultáneamente dentro del cuarto.
- Los modos axial, tangencial y oblicuo decaen en diferentes ritmos de tiempo. El material absorbente debe ser colocado en superficies cernas en la cual la presión modal es alta si es que este ha de ser efectivo en la absorción de ese modo. Por ejemplo, la alfombra en el piso no afecta en el modo axial horizontal. Los modos tangenciales son asociados con más superficies reflejantes que los modos axiales y oblicuos e incluso más que algunos tangenciales.
- Como la frecuencia se incrementa, el número de modos se incrementa. Por encima de 300hz, el promedio del espacio de los modos viene a ser tan pequeño que la respuesta del cuarto tiende a volverse uniforme.
- Las coloraciones causadas por las anomalías de los estudios, cuartos de monitoreo, cuartos de escucha y otros pequeños cuartos son particularmente devastados en la calidad de la voz. Las exposiciones de Gilford dice que el espacio entre modos es aproximadamente 20hz o más, o un par de modos coincidentes o unos muy cerrados, son fuentes frecuentes de coloración. El menciona que las coloraciones son probablemente audibles cuando un modo axial coincide con una fundamental o en la prime forma de un pequeño sonido de vocal de voz, y esta en la región de gran energía de voz. La coloración de la

voz por debajo de 80hz es rara porque allí hay poca energía de la voz en esa parte del espectro. Esencialmente ahí no hay coloración del habla por encima de 300hz para cualquiera de las voces femeninas o masculinas. Las coloraciones modales son más notables en la voz que en la música.

- El ancho de banda de los modos del cuarto, medidos en los puntos de -3dB, incrementa cuando el tiempo de reverberación es acortado. Los modos en ordinarios estudios tienen anchos de banda en el orden de 5hz. Los armónicos de los modos tienen el mismo ancho de banda en sus fundamentales.

CAPITULO 3

REFLEXIONES DE SONIDO EN ESPACIOS CERRADOS

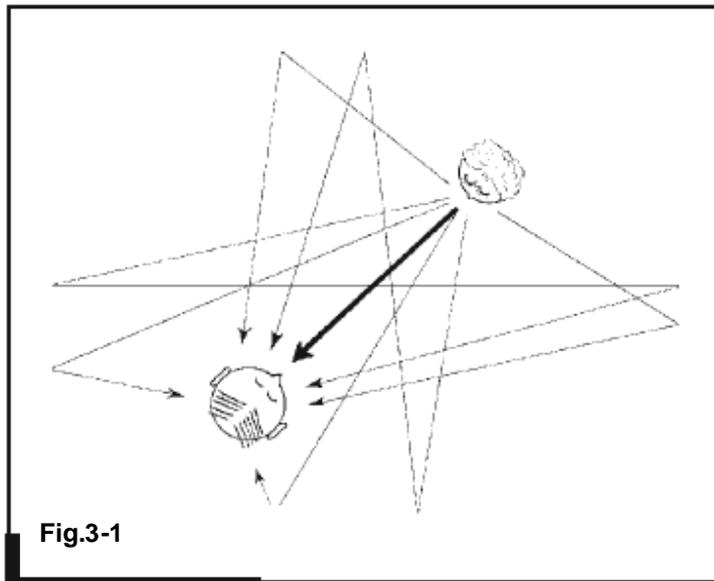
La percepción del efecto de las reflexiones de sonido depende de las medidas del cuarto. La situación en un estudio de grabación, cuarto de control o cuarto de escucha es bastante diferente que en una sala de conciertos o un grande auditorio. El caso de las reflexiones de sonido en un lugar pequeño es considerado primero en esta discusión.

Ley de los Primeros Frentes de Onda

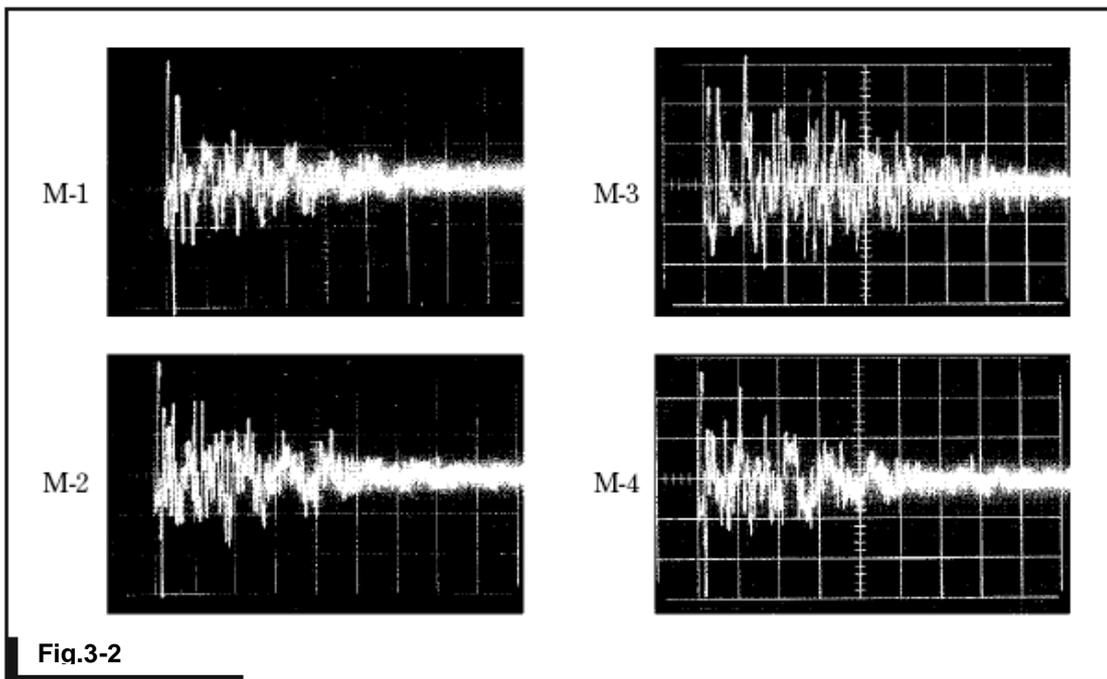
Imagine dos personas en un pequeño cuarto como se ilustra en la fig.3-1. El primer sonido de la persona produce para alcanzar al escucha es el que viaja en un camino directo porque este viaja la distancia mas corta. Este sonido directo, el cual llega primero a los oídos del oyente, establece la percepción de la dirección desde el cual el sonido viene. Aunque este es inmediatamente inundado por un flujo de reflexiones desde varias fuentes en el cuarto, esta percepción direccional persistente, tiende a mandar afuera los efectos de todos los retrasos de las reflexiones en la medida que la dirección es comprometida. Esta fijación de la dirección de la fuente de sonido es realizado dentro de una pequeña fracción de un milisegundo y, como ya se menciona, es sencillo por la avalancha de reflexiones siguiendo la llegada del sonido directo.

Medida de Trayectoria Libre

El promedio (medida) de la distancia de viaje del sonido entre consecutivas reflexiones es llamada "la medida de trayectoria libre". Este promedio de distancia es dado por la expresión $4V/S$, en el cual V es el volumen del espacio y S es el área de superficie del espacio. En un cuarto 25x20x10ft, el sonido viaja a una distancia de 10,5ft entre reflexiones en el promedio. El sonido viaja 1.13ft por milisegundo. A esta velocidad esto solo toma 9.3ms para atravesar la distancia del medio libre de 10.5ft. Visto de otro modo, aproximadamente 107 reflexiones toman lugar en el espacio de una segunda reflexión. La figura 3-2 muestra los oscilogramas producidos por rayos catódicos de las reflexiones que ocurrieron durante los primeros 0.18segundos es una grabación de estudio teniendo un volumen de 16,000ft³. El micrófono fue colocado, consecutivamente, en cuatro diferentes locaciones en el cuarto. La fuente de sonido impulsivo estuvo en una posición firme.



De las muchas reflexiones de sonido en un cuarto pequeño, la onda directa llega primero y establece la sensación de recepción de la llegada de las demás reflexiones de sonido. La llegada tarde de las otras reflexiones no afecta la percepción direccional.



Reflexiones individuales son resueltas, en este ecograma se toman muestras en cuatro posiciones diferentes en un estudio de 16,000 ft³ de volumen y teniendo un tiempo de reverberación de 0.51 segundos. La escala de tiempo horizontal es de 20ms/div.

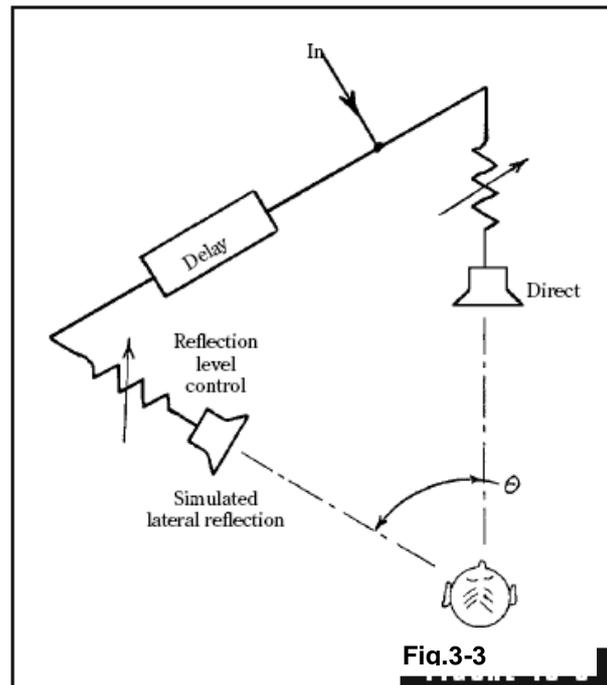
La fuente de sonido fue una pistola que apunto a un papel con una ráfaga de aire, dando un pulso intenso de sonido de menos de milisegundos de duración. Los patrones de reflexión de las cuatro posiciones se muestran diferentes pero, en cada uno, los valores individuales de reflexión son claramente resueltas. Esos “ecogramas” definen el campo de sonido transitorio del cuarto durante los primeros 0.18s en contraste con las condiciones de condiciones constantes. La pregunta ahora se reduce a los efectos percibidos de todas esas reflexiones en el sistema de audición humano.

El Efecto de una Reflexión

Numerosas investigaciones estudian la audibilidad de reflexiones simuladas han estado conducidas por encima de un periodo de muchos años. La mayoría de estos ha usado muchísimo un arreglo de altavoces como el de alta fidelidad tradicional, arreglos estereofónicos como se muestra en la fig.3-3. El observador es ubicado en el ápice, así, esas líneas dibujadas para los dos altavoces están aproximadamente separados 60grados (este ángulo varia a criterio del investigador). La señal mono (comúnmente voz) es alimentada por uno de los altavoces, el cual representa el sonido directo. La señal del otro altavoz puede retrasar cualquier valor: este representa una reflexión lateral. Las dos variables bajo estudio son: el nivel de la reflexión comparada con el del directo, y el retraso de la reflexión con respecto a la señal directa.

Percepciones de las Reflexiones de Sonido

Las primeras investigaciones en este campo fueron interesadas primeramente en el efecto de reflexiones, en la percepción de música en salas de concierto. El trabajo más reciente por Oliver y Toole fue mas direccionado específicamente a las condiciones de escucha en cuarto pequeños, tal como estudios de grabación, cuartos de control y cuartos de escucha caseros. El trabajo de Oliver y Toole es resumido en la fig.3-4. Esta grafica plasma el nivel de la



Arreglo típico de equipo usado por muchos investigadores del efecto audible de una reflexión lateral simulada sobre la señal directa. El nivel de la reflexión (con respecto a la directa) y el retarde de la reflexión son variables bajo control.

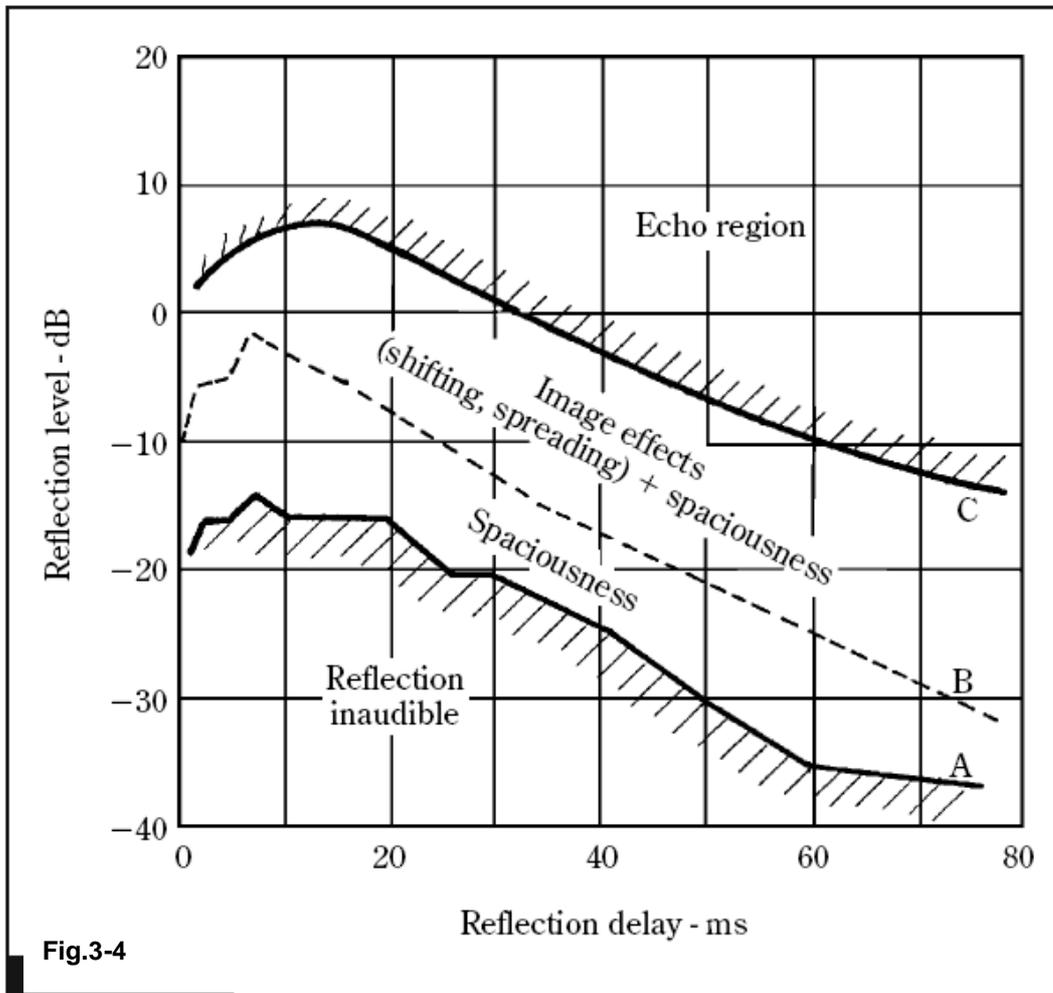


Fig.3-4

Resultados de investigaciones acerca del efecto de una reflexión lateral en un ambiente anecoico y con voz como señal de prueba. La curva A es el umbral absoluto de detección de la reflexión (Olive and Toole). La curva B es la imagen desplazada del umbral (Oliver and Toole). La curva C indica los puntos en el cual la reflexión es escuchada como un eco discreto. Journal of the Audio Engineering Society.

reflexión contra el retraso de la reflexión, sobre las dos variables mencionadas. Un nivel de reflexión de 0dB significa que la reflexión es del mismo nivel que la señal directa. Un nivel de reflexión de -10dB significa que el nivel de reflexión esta 10dB por debajo del directo. En todos los casos de retraso de reflexión están con un atraso de milisegundos con respecto al sonido directo.

De la fig.3-4, la curva A es el absoluto umbral de audibilidad del eco. Estos medios que para cualquier retraso particular, la reflexión no es escuchada para niveles por debajo de esta línea. Nótese que para los primeros 20 milisegundos este umbral es esencialmente constante. Para los grandes retardos, progresivamente niveles mas bajos de las reflexiones son requeridas para una

reflexión apenas oída. Este pronto vendrá a aparentar que para un cuarto de escucha casero u otro cuarto pequeño, el retardo en el rango de 0seg.-20seg. son de gran significado. En este rango el umbral de audibilidad de la reflexión varía poco con el retardo.

Percepción de Amplitud

Asuma una reflexión con retraso de 10ms con la reflexión viniendo de un lado. Como el nivel de la reflexión esta incrementándose desde un nivel muy bajo la reflexión es completamente inaudible. Como el nivel de la reflexión se esta incrementando, esta viene finalmente a ser audible conforme este alcance 15dB por debajo del la señal directa. Como el nivel de la reflexión se incrementa mas allá de este punto, el cuarto toma una sensación de amplitud; el cuarto anecoico en el cual fue sonada la prueba más como en un cuarto normal. Los escuchas no son concientes de las reflexiones cuando es un evento continuo, ni el efecto de muchas direcciones, solo esta sensación de amplitud.

Cambios de Imagen

Como el nivel de las reflexiones es incrementado mas allá de otros efectos viene ha hacerse audible. Acerca de los 10dB por encima del umbral de audibilidad de reflexión, cambian a un aparente tamaño y la imagen de la localización frontal del auditorio se hace aparente. En el retraso mayor, tiende a volverse una "mancha" hacia la reflexión.

Repasando que pasa en el rango de retraso de los 10ms a 20ms, como el nivel de reflexión es incrementado por encima del umbral de audibilidad, los efectos espaciales son dominantes. Como el nivel de reflexión se incrementa aproximadamente 10dB por encima del umbral de audibilidad, la imagen del efecto se esta introduciendo, incluyendo el tamaño de la imagen y cambiando la posición de la imagen.

Ecoss Discretos

Las reflexiones teniendo otro nivel por encima de 10dB la imagen cambia el umbral e introduce otra percepción de umbral. Las reflexiones son ahora ecos discretos sobrepuestos en la imagen central. Semejantes ecos continuos (discretos) son muy nocivos para la calidad del sonido en muchas situaciones prácticas. Por esta razón, la combinación en las reflexiones de nivel/retardo que resultan en tales ecos están para ser evitados en las instalaciones prácticas.

Efectos del Angulo de Incidencia en la Audibilidad de la Reflexión.

Los investigadores Germanos han demostrado que la dirección desde cualquiera de las llegadas de las reflexiones prácticamente no han afectado en la percepción de la reflexión con una importante excepción. Cuando las reflexiones llegan desde la misma dirección como el sonido directo, este puede elevarse ruidosamente de 5dB a 10dB que el directo antes de ser detectado.

Esto es debido al enmascaramiento de la reflexión por el sonido directo. Si la reflexión es grabada a lo largo con el sonido directo y reproducido en los altavoces, este sería enmascarado por este valor de 5dB a 10dB.

Efecto del Tipo de Señal en la Audibilidad de la Reflexión

El tipo de señal tiene un mayor efecto en la audibilidad de las reflexiones. Considere las diferencias entre sonidos continuos y no continuos. Unos Impulsos, en forma de 2 clicks por segundo son del tipo no continuo. El ruido rosa ilustra un tipo continuo. La voz y música no son del todo continuo y no continuo. En la fig. 16-5 la diferencia en el umbral de audibilidad de continuos vs. no continuos es ilustrada. La voz en una cámara anecoica viene estrechamente a ser un sonido más no continuo que cualquier música o ruido rosa. En retrasos menores de 10ms el nivel del impulso para la detección del umbral debe ser más alto que el de sonidos continuos. Las curvas del umbral para la música de Mozart y ruido rosa son muy cerradas y juntas. Esto confirma la creencia que el ruido rosa es un razonable sustituto de música para mediciones.

Efecto de Espectro en la Audibilidad de la Reflexión

La mayoría de los investigadores usan sonidos

que tienen el mismo espectro para ambos, el directo y la simulación del reflejado. En la vida real, las reflexiones parten desde el espectro original porque invariablemente los materiales absorbentes absorben las altas frecuencias más que las bajas frecuencias. En adición a esto, el altavoz fuera de eje responde disminuido incluso más el contenido de alta frecuencia. Los experimentos del umbral de audibilidad han mostrado bastante radical el filtro de pasa bajas de la reflexión de señal producida solo con menores diferencias en umbrales. La conclusión es que tales alteraciones de reflexión en el espectro no han echo cambios apreciables en el umbral de audibilidad.

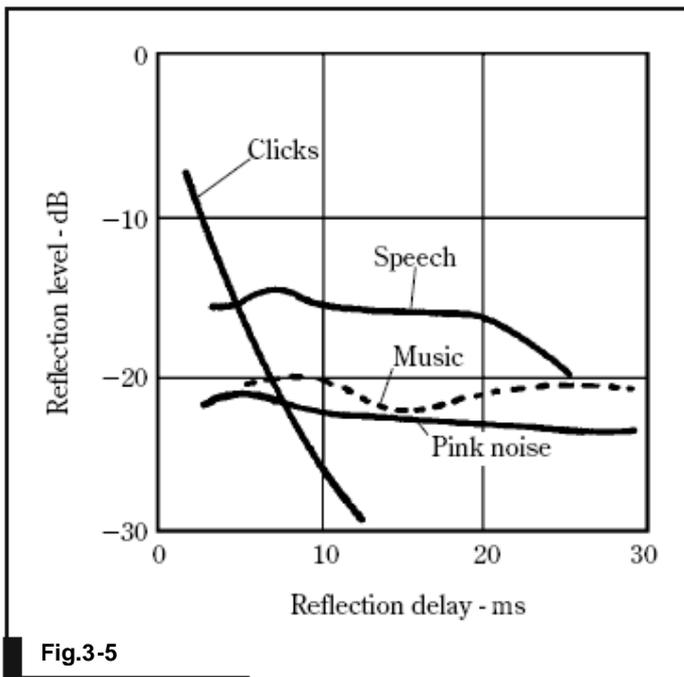


Fig.3-5 Umbral absoluto de percepción de reflexiones de diferentes tipos de señales, yendo desde los clicks 2/seg (no continuos), al ruido rosa (continuo). La densidad para la música de Mozart da la seguridad que el ruido rosa es un sustituto razonable para la música en su mediciones. Posterior a Olive and Toole. Journal of the Audio Engineering Society.

Usando Datos de la Reflexión

La fig.3-4 es una extraordinaria concentración de efectos percibidos de las reflexiones laterales. Una sola reflexión lateral afecta el tamaño y posición de la imagen del auditorio y el control de amplitudes. Y ¿Qué hay sobre la instalación stereo de los dos altavoces? Olive & Toole investigo esto y encontró que el efecto obtenido de un solo altavoz son aplicables directamente al caso del stereo. Esto significa que la información presentada anteriormente es inmediatamente disponible para aplicaciones de situación de escucha stereo tal como el cuarto casero para reproducción musical.

Aquellos interesados en la reproducción de sonido para alta-fidelidad deben ver la practicidad de los resultados de esos estudios de reflexiones. La posibilidad de ajuste de la amplitud del cuarto de escucha así como la agudeza de la imagen stereo es intrigante. Todo esto es posible por una cuidadosa e inteligente manipulación de reflexiones laterales. Por supuesto, las reflexiones laterales pueden venir de ellas mismas solo después de interferir con las primeras reflexiones que son reducidas en su nivel.

Espacios Grandes.

Ecos

Espacios cerrados grandes, tal como teatros, salas de concierto, iglesias y auditorios son potenciales productores de ecos discretos. Los arquitectos deben estar continuamente alerta en las superficies que pueden producir reflexiones de nivel suficiente y retrasos para ser distinguido como un eco continuo. Esta es la totalidad del defecto por el cual ahí esta un pequeña tolerancia, audible para todos con audición normal.

La fig.3-6 es trazada en las mismas coordenadas generales como la fig.3-4. La diferencia principal es que la escala de retraso (delay) es llevada fuera de los 600ms, en línea con el largo del espacio.

El tiempo de reverberación afecta la audibilidad de ecos. El tiempo de reverberación de la grafica en la fig.3-6 es 1.1seg. Las líneas intermitentes muestran la velocidad de decaimiento representando este tiempo de reverberación (60dB en 1.1seg. o 30dB en 550ms). El sombreado esta representando combinaciones de nivel de eco y retraso de eco, determinado experimentalmente, el cual resulta en ecos molestos para la gente. El borde superior es para 50%, el borde inferior es para 20% de la gente molesta por el eco. El tiempo de reverberación en una sala de concierto usualmente ronda alrededor de los 1.5 seg; muchas iglesias están estrechamente en 1seg para favorecer la voz. Mediciones de este tipo, hecho en espacios que tienen otro tipo de tiempos de reverberación, muestran que el sombreado esta indicando la región de nivel/retraso causando ecos molestos es concluir para tener una tangente par la línea de decaimiento de reverberación. Este presenta la posibilidad de estimar el eco amenazante de muchos cuartos grandes por el solo dibujo de la línea de reverberación. Por ejemplo, la línea intermitente clara en la fig.3-6 es trazada para un tiempo de reverberación de 0.5seg (60dB de decaimiento en 500ms o 30dB de decaimiento en 250ms). Un área de la

interferencia del eco justo por encima de esta línea de decaimiento puede ser muy aproximadamente inferida en esta manera.

Amplitud

Consultores acústicos y arquitectos rutinariamente diseñan salas de concierto para dar reflexiones laterales de niveles apropiados y retrasos para sumar una sensación de amplitud para la música para deleite de la audiencia. Estas aplicaciones han enfatizado la importancia de informar la manipulación de reflexiones en espacios grandes para alcanzar resultados deseables, incluso en cuartos menores.

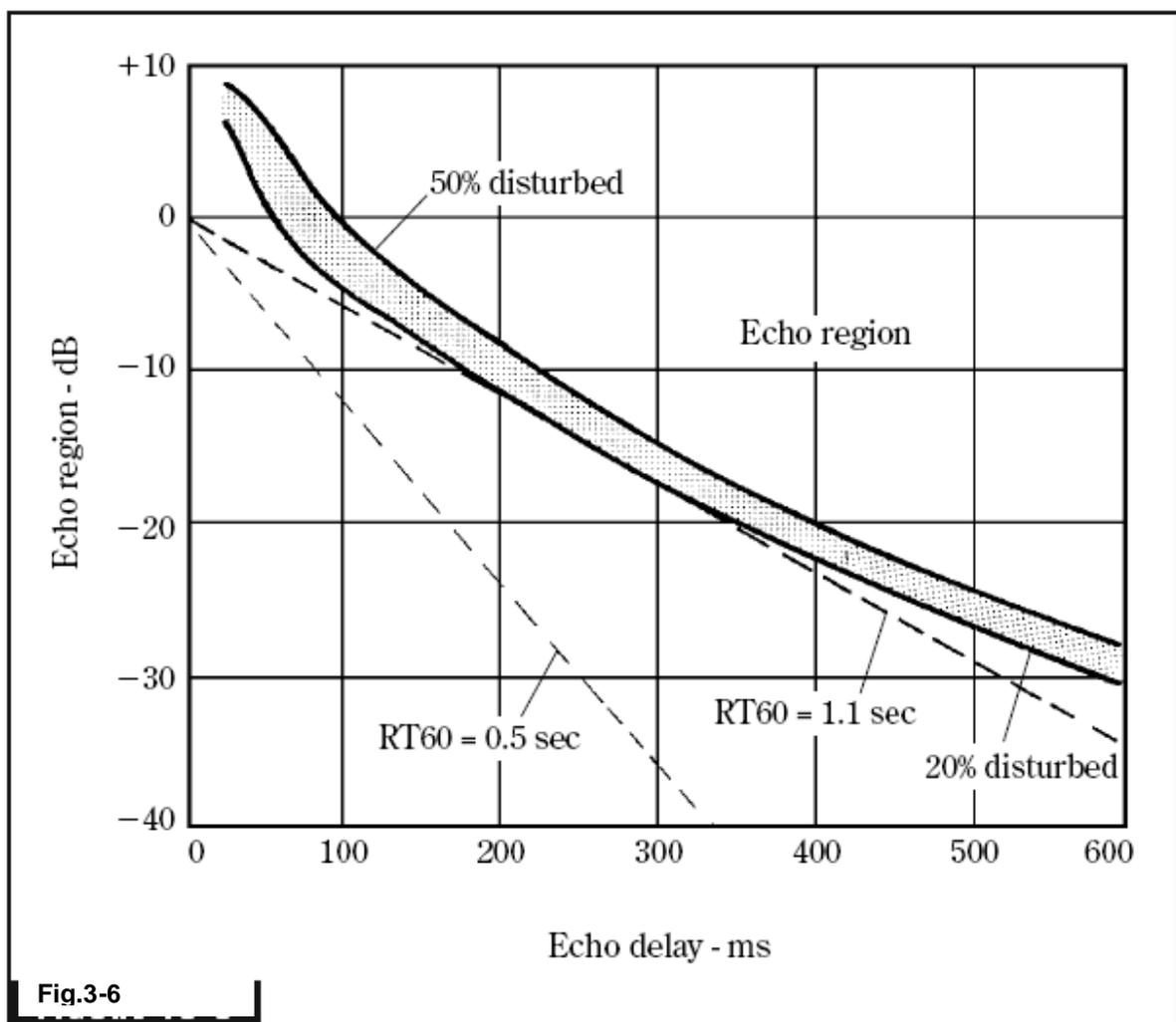


Fig.3-6

Niveles de eco aceptables para voz bajo condiciones de reverberación (tiempo de reverberación de 1.1seg). After Nickson, Muncney, and Dubout.

Capítulo 4

Efectos de Filtro Peine.

El término filtro peine ha sido usado ampliamente en la prensa de audio popular como una explicación de efectos de reflexión retrasada. El filtro peine es un fenómeno de estado-continuo. Este ha limitado aplicaciones para música y voz, el cual es un fenómeno sumamente transitorio. Con los sonidos transitorios, la audibilidad de una replica atrasada es más el resultado de eventos sucesivos de sonido. Un caso puede ser hecho para aplicaciones apropiadas de peinadura para breves arrebatamientos de voz y música que aproximadamente sostengan la condición, pero ya ahí es un etimológico callejón sin salida. El estudio de los efectos audibles de reflexiones retrazadas es mejor manejado con los aproximados umbrales generalizados del capítulo 3.

¿Qué es un Filtro Peine?

Un filtro cambia la forma de la respuesta en frecuencia o transfiere funciones de un sistema. Un circuito electrónico usado para formar la respuesta en frecuencia de un sistema para lograr un cierto deseo y finalmente poder ser un filtro. Un filtro también puede ser un sistema de tubos y cavidades usadas para cambiar un sistema acústico, tal como es usado en algunos micrófonos para ajustar los patrones.

En los primeros días de grabación multitrack, experimentadores constantemente desarrollaron nuevos, diferentes y distintivos sonidos. Phasing (Poniendo en fase) y flanging (rebordeando) fueron palabras populares entre esos experimentadores. Del primer multiple-head tape recorder (grabador de cinta con múltiples cabezales) fue usado para proporcionar replicas retrazadas de sonidos que eran en aquel tiempo mezcladas con el sonido original para producir algunos inusuales y asustadizos efectos. Actualmente los circuitos de electrónica especial son usados para generar esos retrasos (delays). Lo que sea de medios, esa coloración audible de sonidos es el resultado de filtros de peine.

Superposición de Sonido

Un contratista de sonido estuvo interesado sobre el apuntador de su cuerno en un cierto auditorio. Un simple mecánico armador habría causado la emisión del tocar un cuerno para interferir con la emisión con otro cuerno. ¿Qué pasa en esos pulsos de espacio cuando las dos emisiones se acercan? ¿Habrían las emisiones de tender a desparramarse hacia fuera? ¿La energía del sonido habría de perderse desde la emisión así como una emisión interactúa con otra? Relax- no pasa nada.

Imagina un laboratorio de física con un grande pero poco profundo tanque ondulado de agua en la tabla de lectura. El instructor posiciona a tres

estudiantes alrededor del tanque, dirigiéndose ellos a dejar caer piedras en el tanque simultáneamente. Cada piedra causa ondas circulares con un flujo hacia fuera desde el punto de chapoteo. Cada conjunto de ondas se expande como si los otros dos patrones de ondas no estuvieran allí.

El principio de superposición establece que todos los volúmenes infinitesimales de un medio es capaz de transmitir muchas perturbaciones continuas en diferentes direcciones, todas simultáneamente y con ningún efecto perjudicial en ninguno con los otros. Si tú eres capaz de observar y analizar el movimiento de una sola partícula de aire en un instante dado bajo la influencia de varias perturbaciones, tú pondrías encontrar que este movimiento es la suma de vectores de varias partículas en movimiento requerido por todas las perturbaciones que van pasando por ahí. En ese instante, la partícula de aire se mueve con la amplitud y la dirección de vibración para satisfacer los requerimientos de cada perturbación justo como una partícula de agua responde para varias perturbaciones en la onda del tanque.

Para un punto dado en el espacio, asumimos una respuesta de la partícula del aire para una perturbación pasajera con amplitud A y 0° de dirección. En el mismo instante otra perturbación requiere la misma amplitud, pero con una dirección de 180° . Esta partícula de aire satisface ambas perturbaciones en ese instante por no movilizarlas del todo.

Un micrófono es un instrumento bastante pasivo. Su diafragma responde a cualquier fluctuación en presión de aire que ocurra en su superficie. Si la velocidad de tales fluctuaciones (frecuencia) caen dentro de su rango de operación, este obliga una salida de voltaje proporcional a la magnitud de la presión involucrada. En la fig.4-1, un tono de 100hz desde el altavoz A pone en acción el diafragma de un micrófono en el espacio libre, y un voltaje a 100hz aparece en las terminales del micrófono. Si un segundo altavoz B pone abajo una segunda señal de 100hz en el diafragma del micrófono, idéntico en presión pero con 180 grados fuera de fase con la primera señal, una cancela a la otra acústicamente, y el voltaje del micrófono baja a cero. Si un ajuste es echo para que la segunda señal acústica sea 100hz de idéntica amplitud y este en fase, el micrófono entregara dos veces la salida de voltaje, un incremento de 6dB. El micrófono servilmente a la acción de la presión en su diafragma. En breve, el micrófono responde a la suma de vectores de las fluctuaciones de la presión de aire que están chocando en el. Esta característica del micrófono es íntimamente envuelto en los efectos acústicos de filtro-peine.

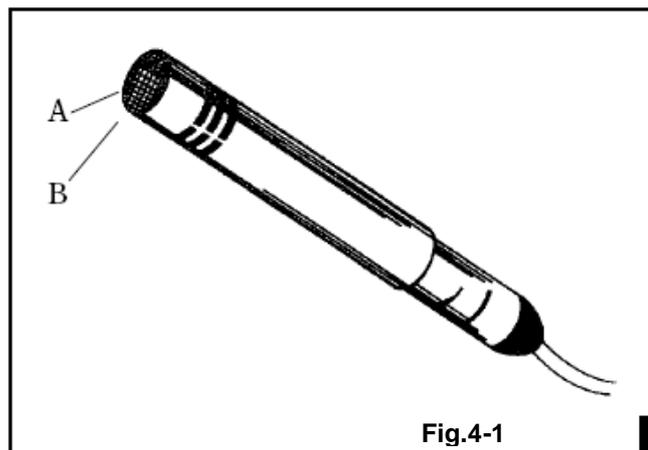


Fig.4-1

El diafragma del micrófono responde a la suma de vectores de presión de sonido desde múltiples fuentes

Señales Toniales y Filtros Peine

Un tono de 500hz es mostrado como una línea en una escala de frecuencia en la fig.4-2A.

Toda la energía concentrada en este tono puro es localizada en esta frecuencia. La fig.4-2B muestra una señal idéntica excepto que esta es retrazada por 0.5ms en respecto de la señal de A. la señal tiene la misma frecuencia y amplitud, pero su tiempo cronometrado es diferente. Considerar ambas A y B como señales acústicas combinadas en el diafragma del micrófono. La señal A podría se una señal de sonido directo y B una reflexión de A lejos de un cercano lado del muro. ¿Qué combinación natural de señal pondría el micrófono a la salida? Debido a que la señal A y B son tonos puros, simples ondas senoidales, ambas varían de un pico positivo a negativo en 500 tiempos por segundo. Debido a que el retraso de 0.5ms estas dos señales tonales no alcanzan sus picos positivos o negativos en el mismo instante. Frecuentemente a lo largo del eje de tiempo ambos son positivos, o ambos son negativos, y en tiempos uno es positivo mientras que el otro es negativo. Cuando la onda senoidal de presión de sonido representa la señal A y la onda senoidal de presión de sonido representa la señal B se combinan (con debido respecto a señales positivas y negativas), ellas

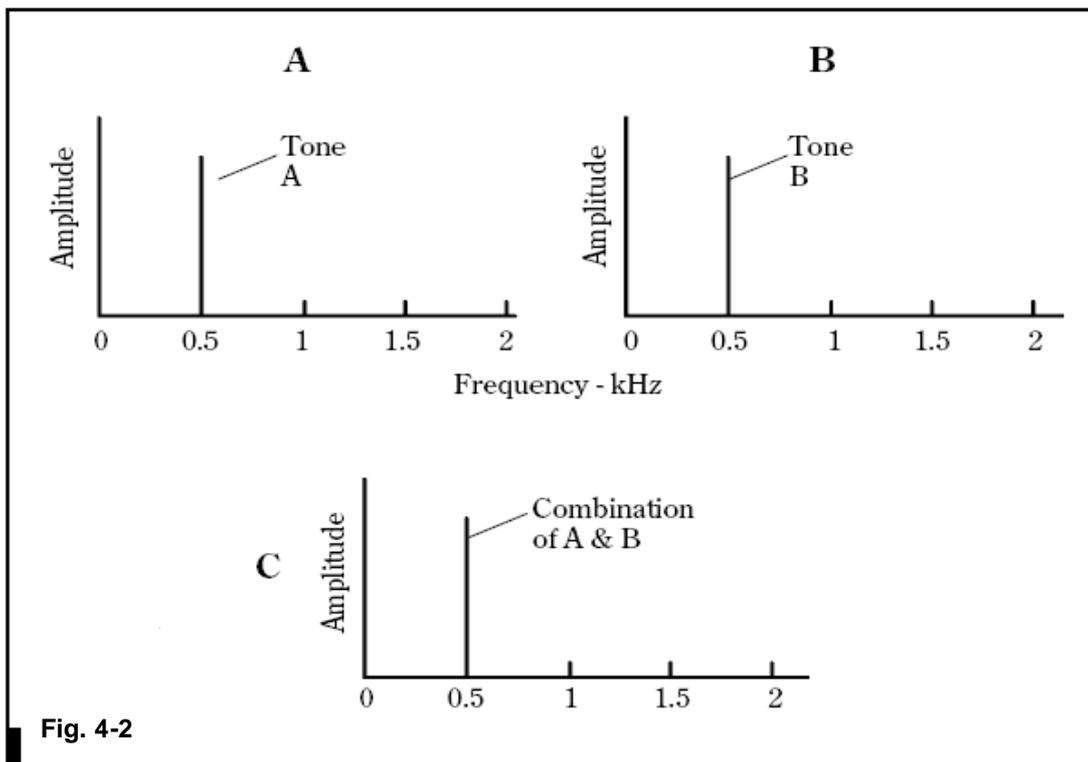


Fig. 4-2

Señal tonal y filtro peine; (A) una onda senoidal teniendo una frecuencia de 500hz, (B) otra onda senoidal de 500hz que es atrasada 0.5ms desde A, y C es adición de A y B. La señal de 500hz y su retraso complementario alcanza sus picos en ligeramente diferente tiempo, pero sumándose ellos juntos simplemente producen otra onda senoidal; allí no hay filtro peine.

producen otra onda senoidal de igual frecuencia pero de diferente amplitud. La fig.4-2 trata los dos tonos de 500hz como líneas en una escala de frecuencia. La fig.4-3 trata el mismo tono directo de 500hz y el tono retrasado en la forma más familiar onda-senoidal. El retraso es logrado por alimentación, el tono de 500hz es introducido a un dispositivo delay digital y combinando el tono original y el atrasado es un circuito común sumador de tres resistores.

En la fig.4-3A el tono directo de 500hz es mostrado iniciando en un tiempo cero. Este toma 2ms para un ciclo del tono de 500hz ($1/500=0.002\text{seg}$). Un ciclo es también equivalente a 360 grados. La señal de 500hz, e , es trazada acorde con las escalas de tiempo y grado en el fondo de la figura.

Un retraso de 0.1ms es equivalente a 18 grados; un delay de 0.5ms es equivalente a 90 grados; un delay de 1ms es equivalente a 180 grados. El efecto de esos tres delays en el tono de la señal es mostrado en la fig.4-3B (después el mismo delays puede ser comparado con música y voz). La combinación de e y e_1 alcanza un pico de aproximadamente el doble que el de e (+6dB). Si A cambia 18grados es un muy pequeño cambio, y por tanto e y e_2 están prácticamente en fase. La curva $e+e_1$, en 90grados de diferencia de fase esta en baja amplitud, pero aun es una forma seno. Sumando e a e_3 (delay de 1ms, cambio a 180grados) da cero como sumando dos ondas de idéntica amplitud y frecuencia pero con cambio de fase de 180grados resultando en cancelación de una por la otra.

Sumando las ondas senoidales directa y retardada de la misma frecuencia resulta en otra onda seno de igual frecuencia. Sumando la onda seno directa y retardada de diferente frecuencia da ondas periódicas de irregular forma de onda. Conclusión: sumando las ondas periódicas de sonido directo y el retardado no crean filtros peine. El filtro peine requiere señales que tengan energía distribuida semejante a la voz, música y ruido rosa.

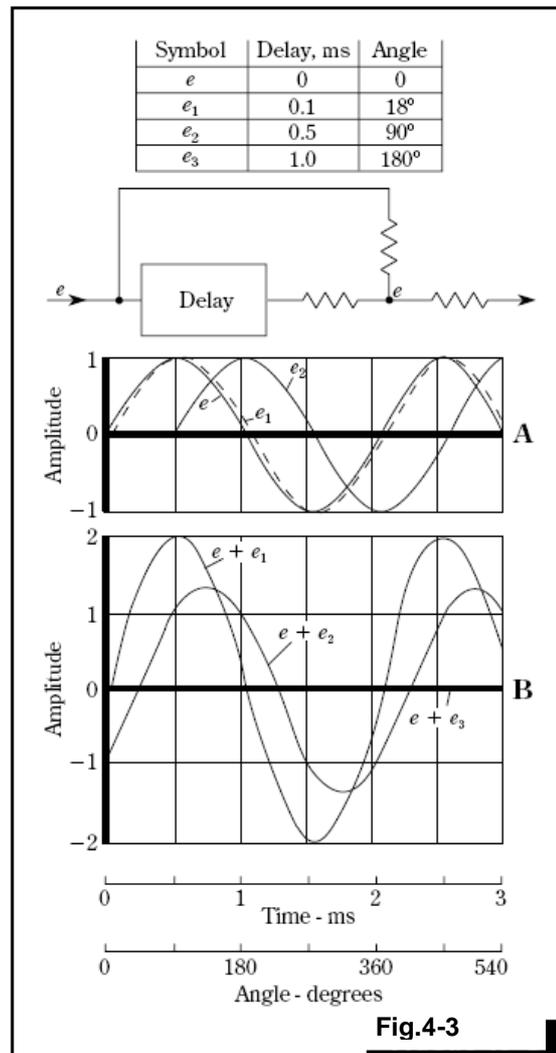


Fig.4-3

Un ejercicio para demostrar que la combinación de ondas senoidales no produce filtro peine, pero simplemente otras ondas senoidales. Una distribución en el espectro es requerida para la formación de filtros peine. Ondas senoidales de 500hz son visualizadas con delays de 0.1sm, 0.5ms y 1ms para conformar los casos de espectro distribuido en la fig.4-5.

Combinación de Señales de Música y Voz

El espectro de la fig.4-4A puede ser considerada una instantánea rebanada de música, voz o cualquier otra señal teniendo un espectro distribuido. La fig.4-4B es esencialmente el mismo espectro pero retrasado 0.1ms con respecto a la fig.4-4A. La fig.4-4C es la combinación acústica de las presiones sonoras espectrales de A y B en el diafragma del micrófono. La respuesta global resultante de la fig.4-4C aparece como una onda senoidal, pero combinando espectros es una forma diferente de combinar señales tonales. Esta apariencia de onda senoidal es natural y es actualmente una forma de onda senoidal con las curvas negativas echas positivas.

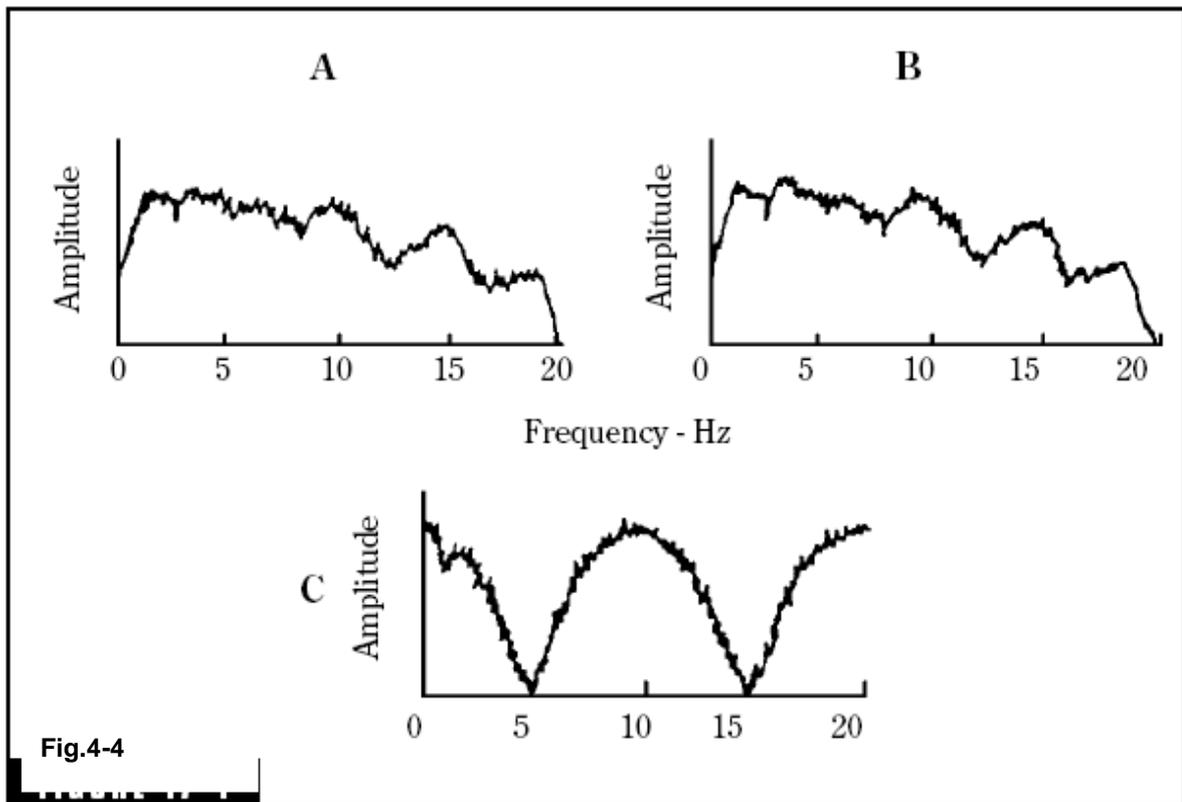


Fig.4-4

Combinación de señales teniendo espectros distribuidos; (A) espectro instantáneo de señal. (B) una replica de A, la cual esta retrasada 0.1ms desde A. (C) una suma de A y C mostrando un filtro peine típico.

Combinación de Sonido Directo y Reflejado

El retraso de 0.1ms en la fig.4-4 se podría obtener desde un dispositivo digital-delay, o podría tenerse de una reflexión desde la pared u otro objeto. La forma espectral de una señal podría ser cambiada un poco en reflexión, dependiendo del ángulo de incidencia, las características acústicas de la superficie, etc.

Una reflexión retrasada de 0.1ms podría haber estado viajando $(1,130\text{ft/seg})(0.001\text{seg})=1.13\text{ft}$ mas allá que el la señal directa. Esta diferencia en extensión de trayectoria, solo alrededor de $1\frac{11}{32}$ pulgadas, podría resultar desde un ángulo raso con ambas fuentes y escuchas, o micrófono, cerrado a la fuente reflejante. Los grandes retrasos son esperados en más situaciones normales tal como esos de la fig.4-5. El espectro de la fig.4-5A es desde un generador de ruido. Este es un "shhh" sonido familiar a la sintonización con ruido de FM radio. El ruido aleatorio de este tipo es usado extensamente en mediciones acústicas porque este es señal continua, su energía esta distribuida entre toda el rango audible de frecuencias, y es exclusivo para señales de voz y música, seno u otra onda periódica. En la fig.4-5B, esta señal de ruido aleatorio las maneja un altavoz, una superficie con caras reflejantes; un no direccional micrófono es entonces colocado a varias distancias desde la superficie reflejante.

En la fig.4-5B, el diafragma del micrófono es colocado alrededor de 0.7 pulgadas desde la fuente reflectante. La interferencia toma lugar entre le sonido directo del micrófono recogida desde el altavoz y el sonido reflejado desde la fuente. La salida del micrófono muestra los patrones característicos del filtro peine de un retraso de 0.1ms.

Poniendo el diafragma del micrófono alrededor de 3.4 pulgadas desde la barrera reflejante, como en la fig.4-5C, produce un retraso de 0.5ms, el cual resulta en los patrones mostrados del filtro peine. El trazado en la escala de la línea de frecuencia, los patrones se miran como un peine; desde, el nombre "filtro-peine". Incrementando el retraso desde 0.1ms a 0.5ms se ha incrementado el numero de picos y el numero de nulos, cinco-plegues.

En la fig.4-5D, el micrófono esta 6.75pulgadas desde la barrera reflectiva dando un retraso de 1ms. Duplicando el retraso se obtiene el doble de picos/nulos una ves mas.

Incrementando el retraso entre los componentes del directo y el reflejado se incrementa el numero de interferencia constructiva y destructiva, incluso proporcionalmente. Empezando con el espectro plano de la fig.4-5A, lejos del espectro plano de B es deformado por la presencia de una reflexión retrasada solo 0.1ms. Una supuesta expectación de cambio en la respuesta audible. Un poderoso sospechoso que el espectro deformado de D puede ser menos notable porque el múltiple, picos estrechamente espaciados y muescas angostas tienden a promediar fuera las aberraciones de respuesta global.

Reflexiones siguiendo estrechamente tras la llegada del componente directo son esperados en un cuarto pequeño porque las dimensiones del cuarto son limitadas. Recíprocamente, las reflexiones en grandes espacios habrán de tener grandes retrasos, lo cual genera mas estrechamiento entre los picos y nulos del filtro peine. De esta manera, los efectos del filtro peine resultan desde

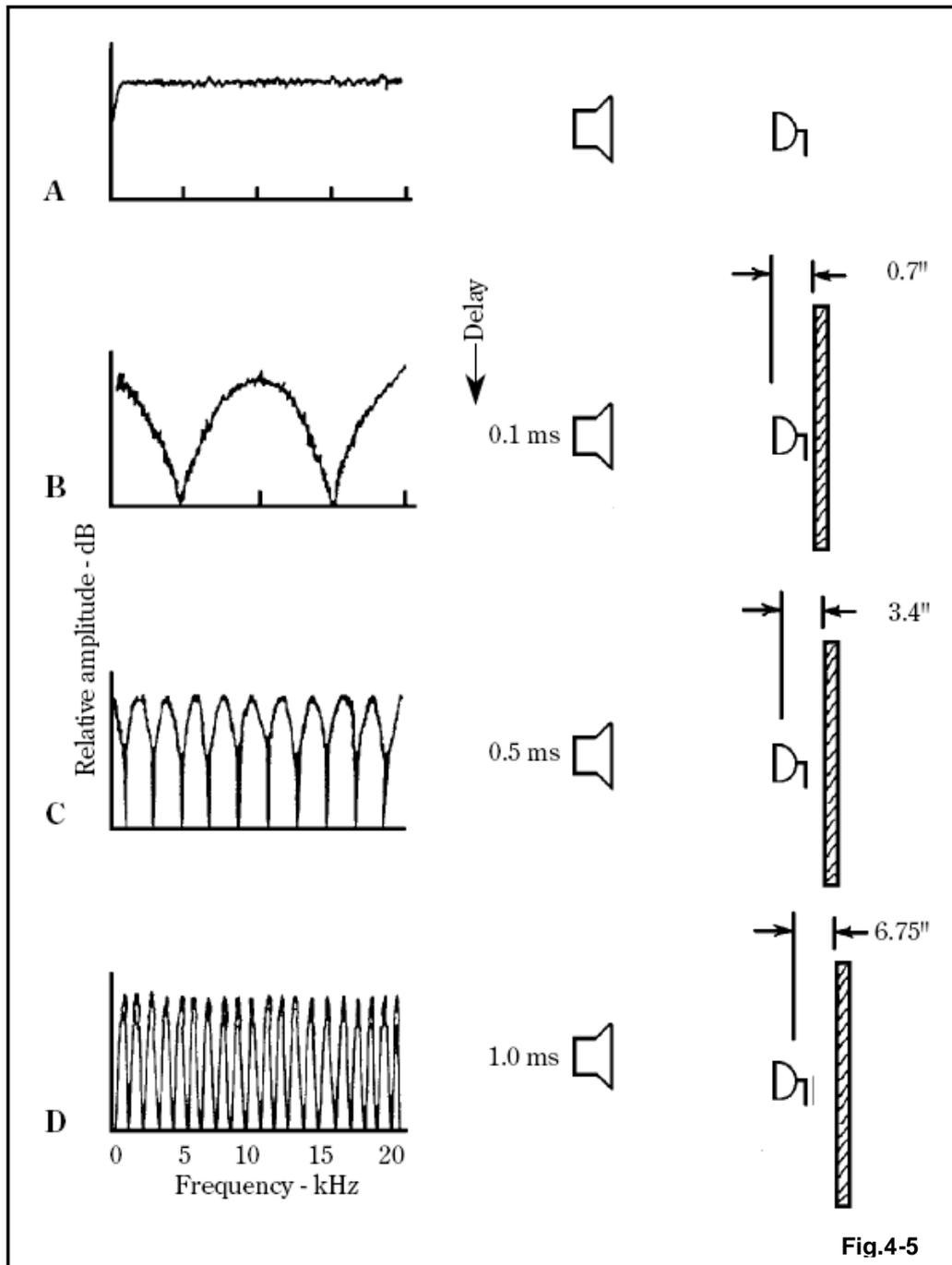


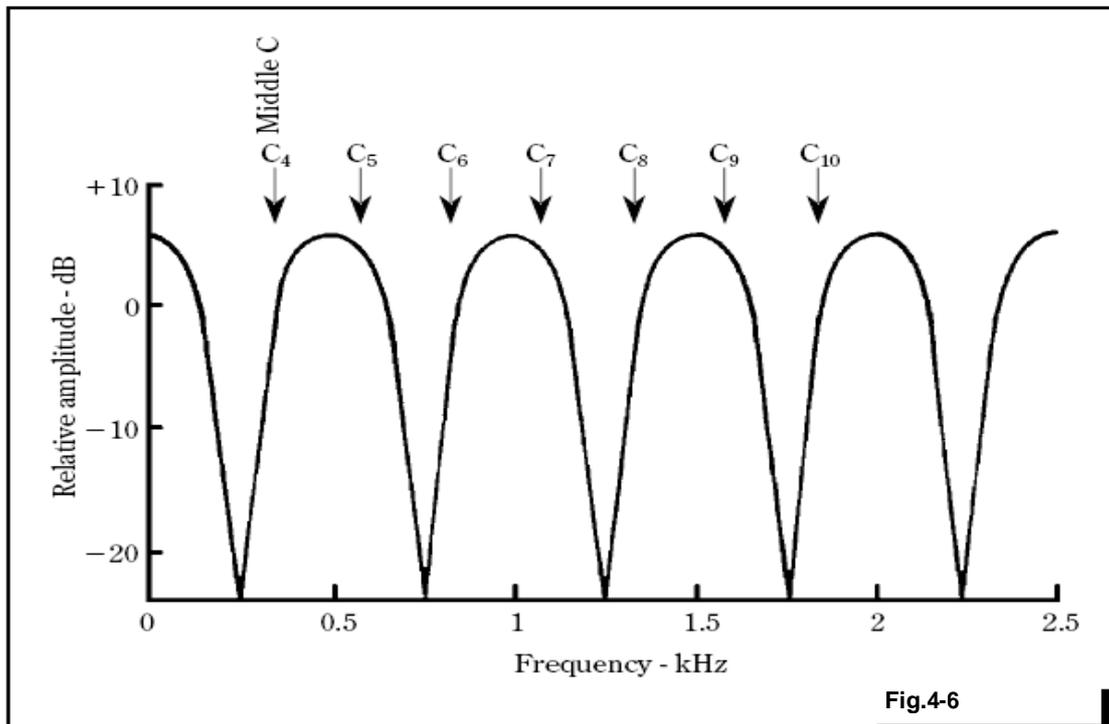
Fig.4-5

Una demostración de filtro peine en el cual el sonido directo de un altavoz es acústicamente combinado con una reflexión desde una superficie en el diafragma de un micrófono. (A) no superficie, no reflexión. (B) colocación el micrófono 0.1 pulgadas desde la superficie que crea un retraso de 0.1 ms y la combinación del sonido directo y los rayos reflejados muestran para 5 kHz y 15 kHz y todo 10 kHz. (C) un delay de 0.5 ms crea muchas cancelaciones en espacios cerrados. (D) un delay de 1 ms resulta en cancelaciones cada vez más estrechas. Si t es conducido como un delay en segundos, el primer nulo es $\frac{1}{2} t$ y el espacio entre los nulos o entre los picos es $1/t$.

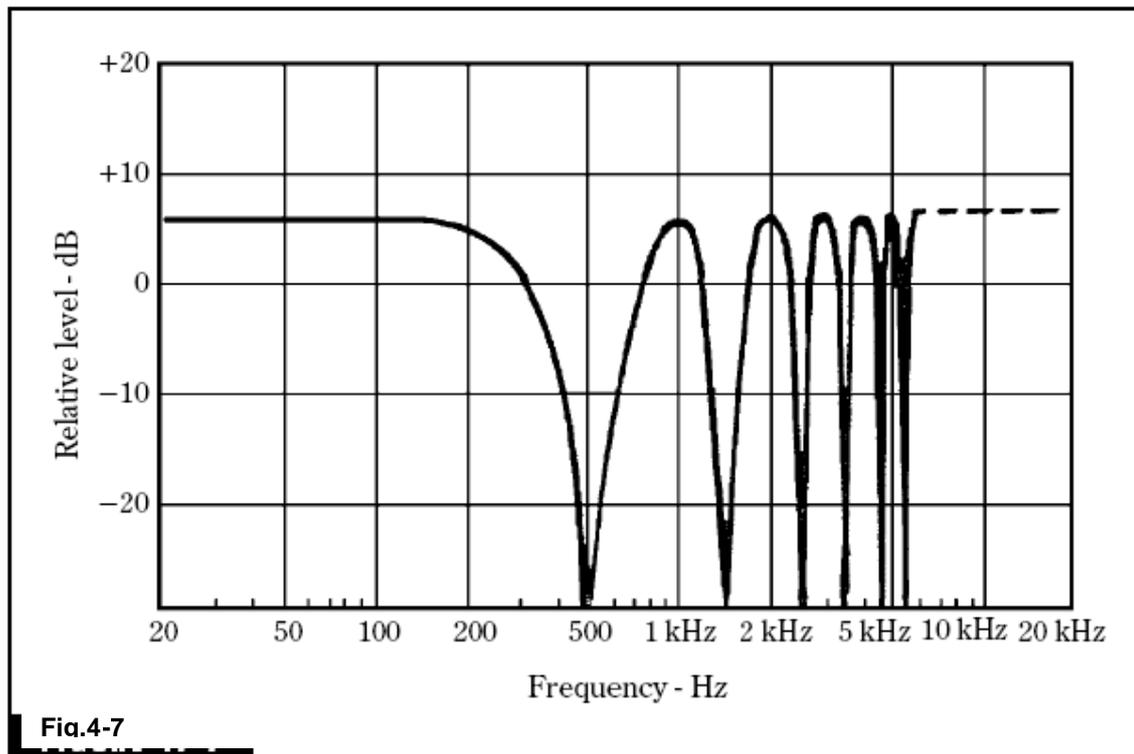
reflexiones que están más comúnmente asociadas con cuartos pequeños. El tamaño de varias salas de concierto y auditorios entregan ellos relativa inmunidad a la audible distorsión de efecto peine, porque los picos y nulos son tan numerosos y juntos estrechamente que ellos marginan dentro de una respuesta esencialmente uniforme.

La figura 4-6 ilustra el efecto del inicio de una señal musical entre 2ms de filtro peine. Las relaciones entre los nulos y los picos de respuesta son relatadas para el piano como indicación. A la mitad de C, (c4) hay una frecuencia de 261.63hz, y es cerrado para el primer nulo de 250hz. El siguiente alto C, (c5), es una frecuencia cerrada del doble de C4 y es tratada favorablemente con un pico de +6dB, otro Cs arriba del teclado del piano tampoco estará discriminada en contra de un nulo, o especialmente favorecido con un pico en la respuesta- o algo en medio. Si examinamos como fundamental frecuencias, o series de de armónicos, el timbre del sonido sufre.

El filtro peine ilustrado en la fig. 4-4, 4-5 y 4-6 es trazada para una escala de frecuencia lineal. En esta forma el peine, apariencia y visualización de los efectos de retraso son más gráficos. Una escala logarítmica de frecuencia, sin embargo, es más común en la industria de la electrónica y el audio. Un filtro peine resulta desde un retraso de 1ms, este es trazado para una escala logarítmica de frecuencia y es mostrada en la fig. 4-17.



Paso de una señal de música entre 2ms, efecto de filtro peine, los componentes de esa señal son como se indican. Los componentes están espaciados una octava, pueden ser ayudados con 6dB para un pico o esencialmente eliminados por un nulo, o pueden dar valores entre esos extremos.



Arriba de este punto todos los filtros peine han estado trazados en una escala lineal para demostrar el origen del termino peine. El trazado mas conveniente y familiar es el la escala logarítmica, ayuda a estimar los efectos que da un peine u otra señal.

Filtro Peine y Bandas Críticas

¿El sistema de audición humana es capaz de resolver las perturbaciones de la fig.4-5? La resolución de la audición humana es circunscrita por la afinación de las curvas en la banda crítica del oído interno. Los anchos de banda críticos en frecuencias representativas son grabados en la tabla 4-1. Por ejemplo, el promedio de ancho de banda crítico del sistema auditivo humano en 1kHz es alrededor de 128hz. Un pico a pico de un filtro peine de 125hz corresponde a un retraso en la reflexión de 8ms ($1/0.008=125\text{hz}$), el cual corresponde a una diferencia en longitud de trayectoria entre los componentes directo y el reflejado de cerca de 9ft ($1,130\text{ft/seg} \times 0.008\text{seg} = 9.0\text{ft}$). Esta situación es trazada en la fig.4-8B. Para ilustrar que pasa en grandes retrasos, la fig.4-8C es bosquejada para un retraso de 40ms. Retrasos cortos son representados por la fig.4-8^a para un retraso de 0.5ms.

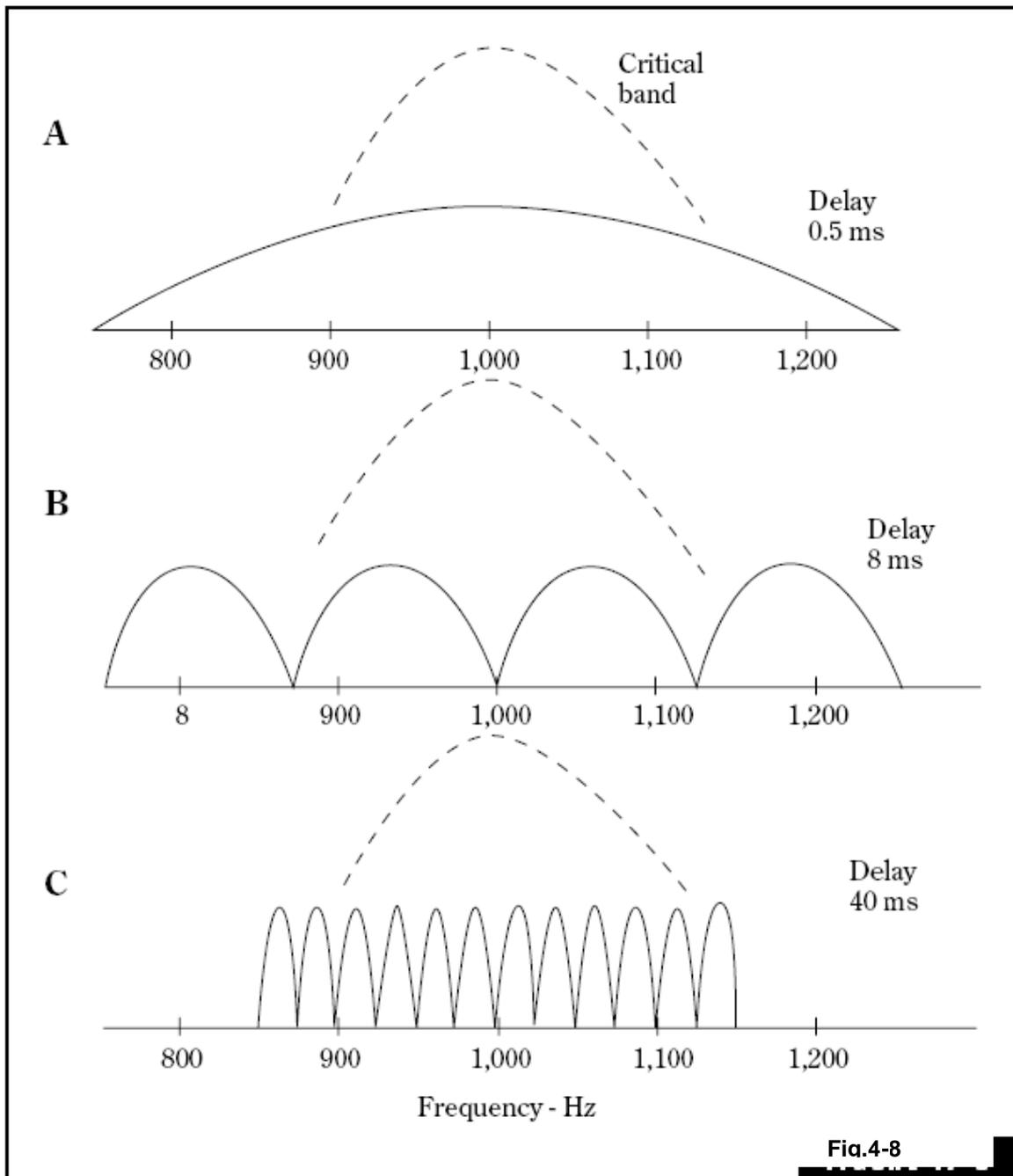
La relativa coherencia de las bandas criticas no pueden analizarse y delinear los numerosos picos y nullos resultantes desde un retraso de 40ms (fig.4-8C).

Tabla 4-1**Auditory critical bands.**

| Center frequency
(Hz) | Width of
critical band*
(Hz) |
|----------------------------------|---|
| 100 | 38 |
| 200 | 47 |
| 500 | 77 |
| 1,000 | 128 |
| 2,000 | 240 |
| 5,000 | 650 |

*Calculated equivalent rectangular band as proposed by Moore and Glasberg.³

Por eso el oído humano no debería de ser usado para interpretar la respuesta de las aberraciones resultantes desde 40ms porque combina como una coloración de la señal. Por otro lado, la peinadura da resultados desde 0.5ms de retraso (fig.4-8A) podría ser delineada por la banda crítica de los oídos en 1khz resultando en una coloración percibida de la señal. La fig.4-8B ilustra un ejemplo intermedio en el cual el oído es marginalmente capaz de analizar la señal "peinada". El ancho de la banda crítica del sistema auditivo se incrementa rápidamente con la frecuencia. Es difícil imaginar la complejidad de la interacción entre un conjunto de bandas críticas y un constante cambio de señal de música, con diversos patrones de peinado desde organizadores de reflexiones. Solo un cuidadoso, controlado experimento psicoacústico puede determinar cualquiera de los resultados de las coloraciones que son audibles.



La audibilidad de peinados es importante pero no un factor bien comprendido. Para ayudar a estimar la importancia de la percepción del filtro peine, ellos están comparando para el auditorio la banda crítica eficaz a una frecuencia de 1kHz. (C) para un retraso de 40ms el ancho de la banda crítica es tan ordinario, relativamente, que no es posible analizar el efecto del filtro peine. (A) por otro lado, el ancho de la banda crítica del auditorio es comparable al pico de peine para 0.5ms de retraso. (B) Es un ejemplo entre A y C. Este tendría de parecerse para confirmar la observación que en los grandes espacios (grandes retrasos) el filtro peine es inaudible mientras que en los pequeños espacios (pequeños retrasos) ellos a menudo están mas incómodos o molestos.

Filtro Peine en Stereo

Debido a que dos micrófonos separados en espacio captan un sonido en ligeramente diferentes tiempos, sus combinaciones a la salida pueden ser similares a la sola del micrófono con reflexiones retrasadas. Para eso, espaciar el micrófono stereo-pickup arreglado es susceptible a problemas de filtro peine. Bajo ciertas condiciones el peinado es audible, impartiendo una cancelación de pase por todas partes del sonido reproducido, interpretado por algunos como ambiente del cuarto. Este no es ambiente, pero la distorsión del tiempo e intensidad encuentran esta distorsión agradable, así espaciar el micrófono captor es favorable para muchos productores y escuchas.

Audibilidad de Efectos por Filtro Peine

En el capítulo 3 se muestra que la amplitud es el resultado de reflexiones combinadas con la señal directa. Este capítulo demuestra que la combinación de una señal con una replica de si misma retrasada en pequeña cantidad crea filtros peine. La audibilidad de los filtros peine es así claramente expuesta en el umbral de Olive-Toole de la fig.3-4. Solo entre mediciones psicoacústicas de este tipo puede la audibilidad de filtros peine se determinada.

Filtros Peine en la Práctica

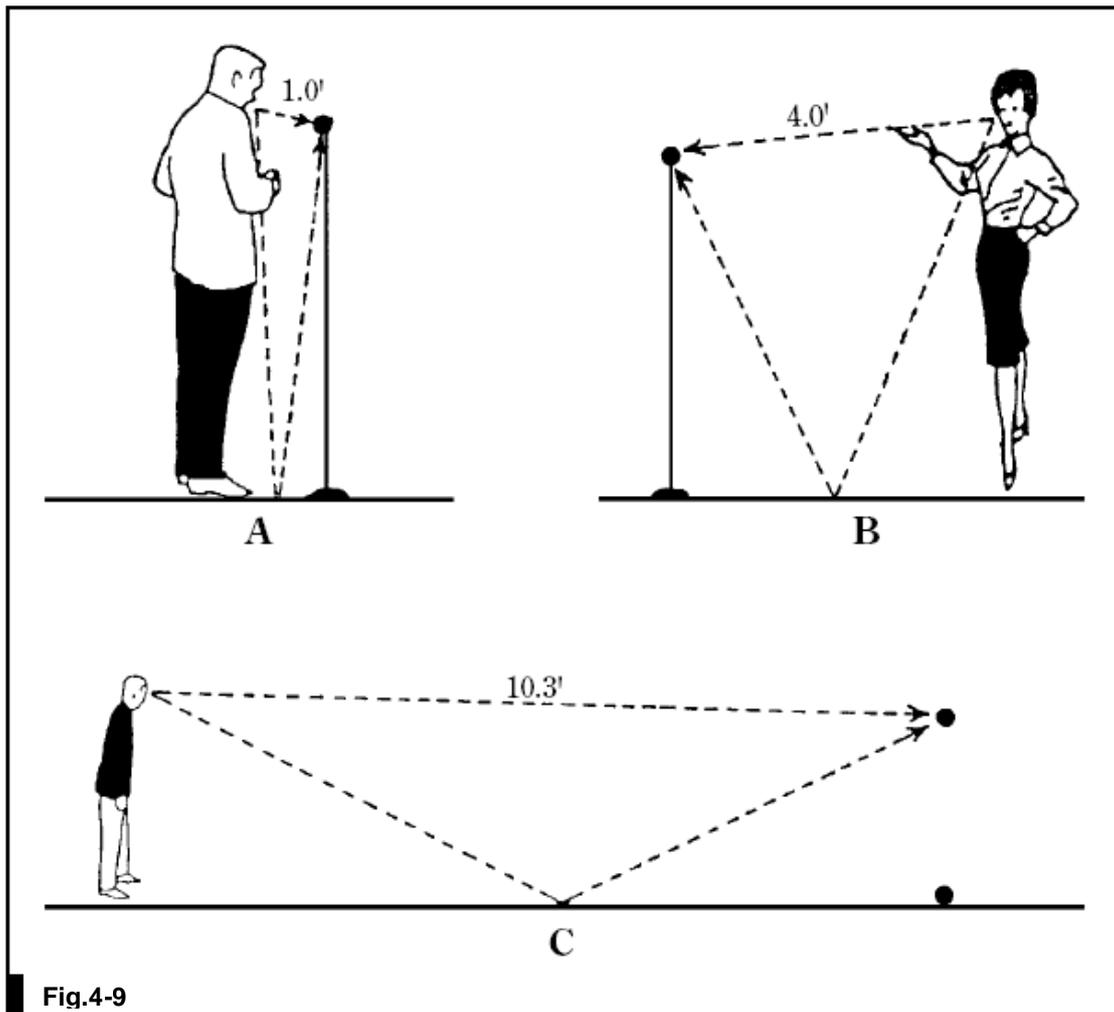
Ejemplo 1: la fig.4-9 ilustra tres micrófonos colocados que producen filtro peine de grados variantes. Una distancia demasiado cercana entre fuente y micrófono es mostrada en la fig.4-9A. El componente de sonido directo viaja 1ft y la componente de la reflexión del piso viaja 10ft (vea tabla 4-2). La diferencia entre estos (9.1ft) medios que el piso refleja es retrasado 8.05ms ($9.1/1130=0.00805\text{seg}$). El primer nulo es para eso en 62hz con subsecuentes nulos y picos espaciados de 124hz. El nivel de reflexión es -20dB para la componente directa ($20 \log 1.0/10.1=20\text{dB}$). Un cálculo similar para la fig.4-9B y

Tabla 4-2

Comb-filter situations (Refer to Fig. 17-9).

| Fig
8-13 | Path length,
ft. | | Difference | | First
null
$1/2t$ | Pk/null
spacing
$1/t$ | Refl.
level |
|-------------|---------------------|-------|------------|---------|-------------------------|-----------------------------|----------------|
| | Direct | Refl. | Ft. | (t) ms. | Hz | Hz | dB |
| A | 1.0 | 10.1 | 9.1 | 8.05 | 62 | 124 | -20 |
| B | 4.0 | 10.0 | 6.0 | 5.31 | 94 | 189 | -8 |
| C | 10.3 | 11.5 | 1.2 | 1.06 | 471 | 942 | -1 |

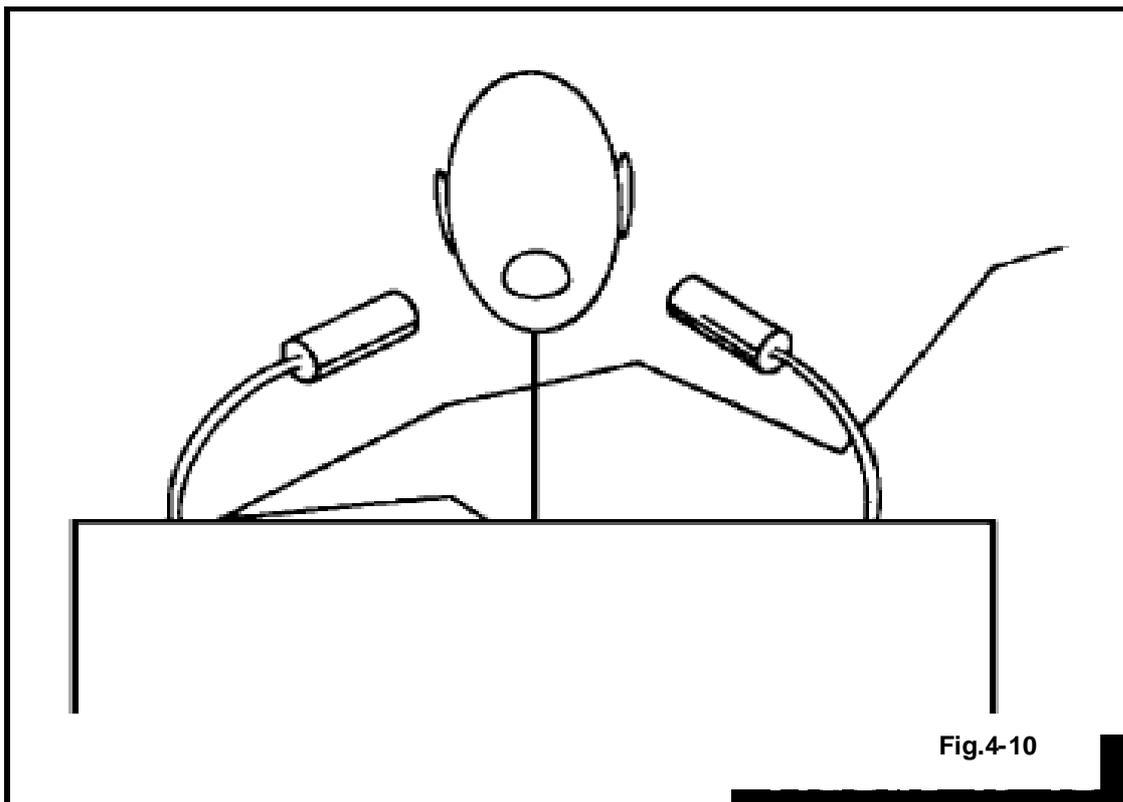
C es incluida en la tabla 4-2. En A el componente directo es 10 tiempos mas marcados que el de la reflexión del piso. El efecto de filtro peine puede ser despreciable. La fig.4-9C tiene una reflexión casi tan marcado como el directo, y el efecto de filtro peine puede ser máximo. La fig.4-9B es intermedia entre A y C. Un micrófono es mostrado en el piso en la fig.4-9C. En el piso habría de ocurrir un rebote, pero la diferencia entre el directo y el reflejado recorre una longitud que habría de ser muy corta, esencialmente eliminando el filtro peine.



Micrófonos comunes ubicados comparan con respecto a la producción de filtros peine (ver tabla 4-1). (A) reflexión 20dB por debajo, mínimos problemas por filtro peine. (B) reflexión solo 8dB abajo, se esperan problemas por filtro peine. (C) reflexión casi del mismo nivel como el directo, problemas seguros con filtro peine. Un micrófono en el piso de C podría reducir la diferencia en la longitud recorrida entre los componentes del sonido directo y reflejado (y el peinado) para casi ser cero.

Ejemplo 2: Dos micrófonos en un podium, fig.4-10, son ordinarios. ¿Lo estarán usando como micrófono stereo? Sistemas de reproducción stereo son bastante raros en auditorios. Las oportunidades son muy buenas que los dos micrófonos están alimentando dentro del mismo sistema mono y así vuelven una producción excelente de efectos de filtro peine. La excusa común para dos micrófonos es “para dar a los altavoces gran libertad de movimiento” o “para proveer un micrófono de repuesto en caso del fracaso de alguno”. Presuntamente los dos micrófonos son propiamente polarizados y el hablante es muerto en el centro, allí habría de haber un empujón útil de nivel de 6dB. Asumiendo también que el los micrófonos están separados 24 pulgadas y los labios del hablante están 18 pulgadas desde una línea dibujada entre los dos micrófonos y a nivel con los micrófonos. Si el hablante se mueve lateralmente 3 pulgadas, un retraso de 0.2ms es introducido, reduciendo importantes frecuencias de la voz. Si el hablante no se mueve, la calidad de la voz probablemente no habría sido buena, pero esta habría sido estable. Los movimientos de un hablante normal cambian nulos y picos arriba y abajo la escala de frecuencia con bastantes cambios notables en la calidad.

Ejemplo 3: una situación común con posibilidades de filtro peine es el cantar del



Un ejemplo infame de producción de filtro peine, dos micrófonos alimentan dentro del mismo amplificador mono con una fuente de sonido que se mueve alrededor.

grupo con cada cantante con su micrófono (fig.4-11), y cada micrófono alimenta a un canal diferente pero finalmente la mezcla es juntos. La voz de A, capturada por ambos micrófonos, es mezclada, produciendo filtros peines resultante desde las trayectorias diferentes. Cada voz de los cantantes es capturada por todos los micrófonos pero solo los cantantes mas cercanos crean notables filtros peine. Experimentos reportados por Burroughs indican que si la boca del cantante es en el más pequeño de los tiempos lejano del micrófono del cantante B que de su propio micrófono, el efecto del filtro peine es enmascarado por los otros problemas. Esta regla de 3:1 (3 a 1) trabaja porque manteniendo la distancia significa que las replicas atrasadas están mas pequeñas por debajo de 9dB de la señal principal. Estas afirmaciones de que los nulos y picos del filtro peine son +/-1 dB o menos en amplitud son esencialmente imperceptibles.

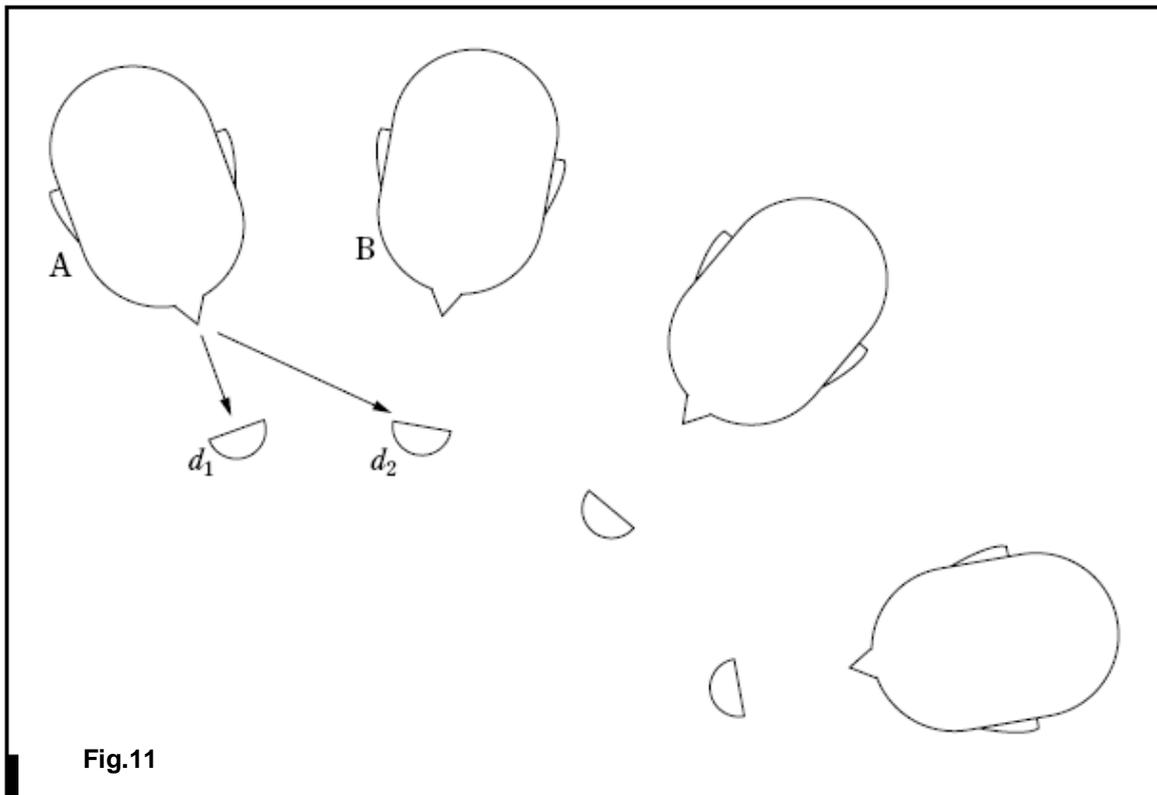
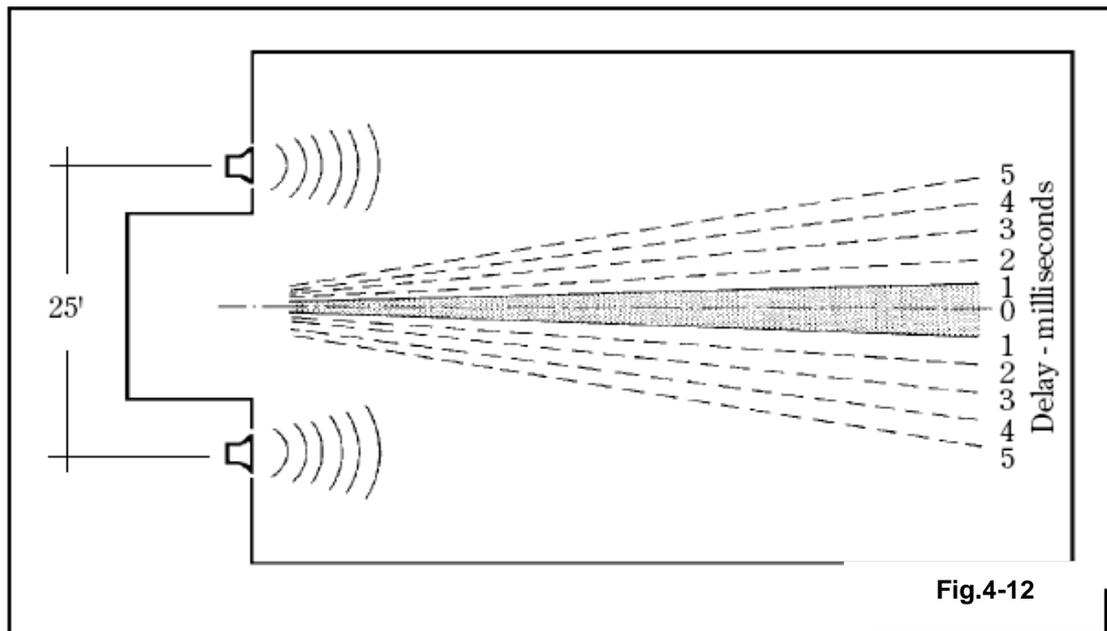


Fig.11
Un grupo de cantantes, si d2 es el mas pequeño de tres tiempos así como d1 es el mas grande, el efecto del filtro peine es minimizado.

Ejemplo 4: dos altavoces mono, uno a la izquierda del escenario y el otro en el lado derecho, o variaciones de este tema, son bastante comunes (fig.4-12). Dos fuentes radian señales idénticas creando filtros peine sobre el área de la audiencia. En la línea de simetría (muchas veces a lo largo del centro del pasillo) ambas señales llegan en el mismo tiempo y no son producidos filtros peine.



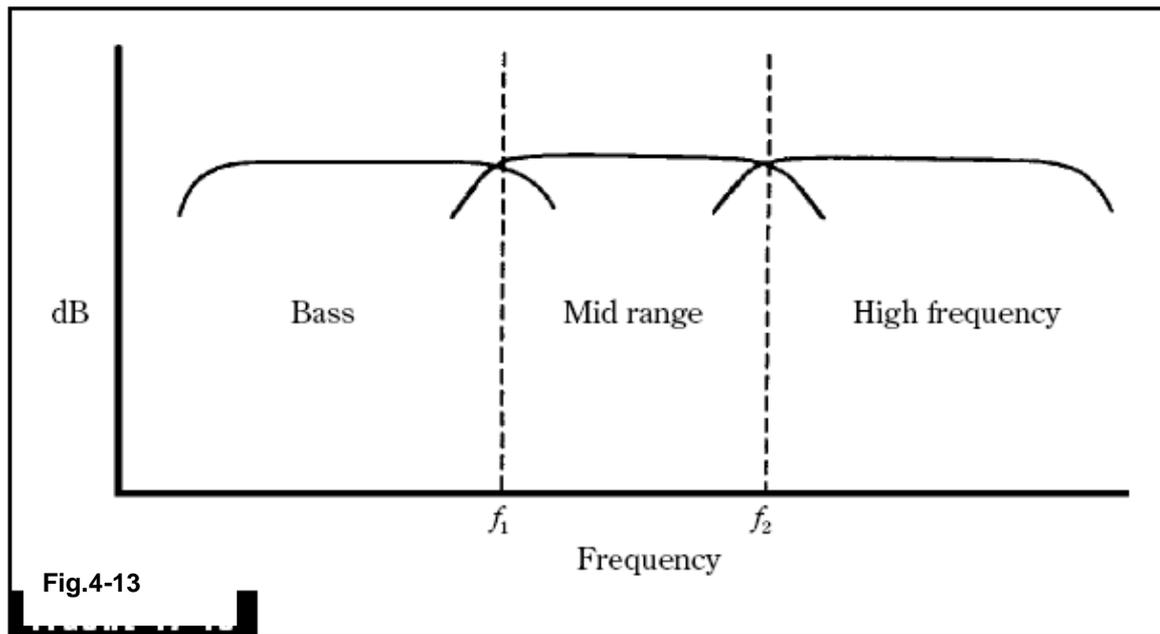
En la común división de sistema en el cual dos altavoces radian idénticas señales, zonas de interferencia constructiva y destructiva resultan, lo cual degrada la calidad del sonido en el área de audiencia.

Retardos iguales, contornos fuera de rango desde el centro del escenario sobre el área de audiencia, el contorno de retardo de 1ms, el mas cercano a la línea de centro de simetría, y el retardo mas grande como el de los lados del auditorio están aproximados.

Ejemplo 5: elementos múltiples de altavoces pueden tener sus propias fuentes de efecto peine. En la fig.4-13 este esta aparentando que la frecuencia f_1 es radiada por ambas unidades de bajos y medios, estas dos son esencialmente iguales en magnitud, y que los dos radiadores son físicamente desplazables. Estos son el ingrediente para la producción de filtro peine en el área de audiencia.

El mismo proceso esta en trabajar entre las unidades del rango medio y el tweeter. Solo una banda estrecha de frecuencias es afectada, el ancho del cual es determinado por la relativa amplitud de los dos radiadores. Lo excesivo de la curva del crossover, la estreches del rango de frecuencia afecta.

Ejemplo 6: micrófonos permanentemente montados, tal ves montados alineados con la ventaja de una ganancia de +6dB en sensibilidad debido a la elevación de presión en la tabla de superficie. Otra ventaja es minimizar la distorsión de filtro peine. En la fig.4-14, un rayo directo desde la fuente activa el diafragma del micrófono, el cual es protegido de las reflexiones.



La distorsión por filtro peine puede ocurrir en la región de crossover de multi-elementos de altavoces porque la misma señal es radiada desde dos unidades físicamente separadas.

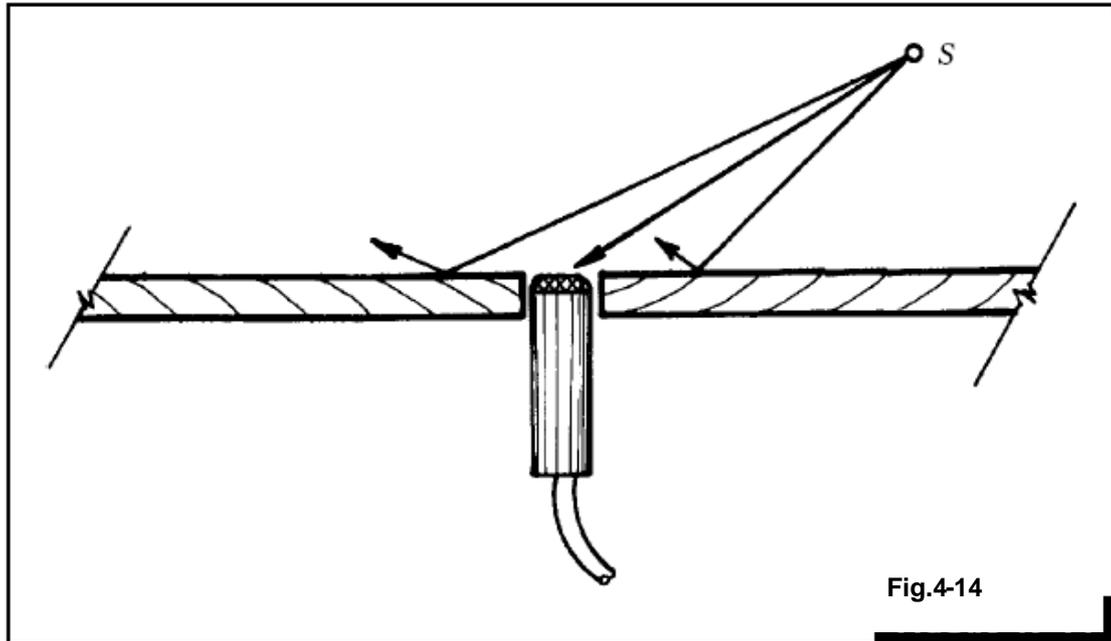
Estimación de la Respuesta de Filtro Peine

Recordando algunas simples relaciones validas tú también puedes estimar el efecto de filtros peine en la respuesta de un sistema. Si el retraso en t seg, el espaciamento entre picos y el espaciamento entre nulos es $1/t$ hz. Por ejemplo. Un retraso de 0.001 seg (1ms) produce un espacio entre picos $1/0.001=1\text{kHz}$, y los nulos quieren también estar espaciados el mismo valor (tabla 4-3).

La frecuencia en la cual el primer nulo (el nulo de baja frecuencia) quiere ocurrir es $1/(2t)$ hz. Para el mismo retraso de 0.001, s o 1ms, el primer nulo quiere ocurrir en $1/[2 \times 0.001]=500\text{hz}$. Para este retraso de 1ms tú puedes casi figurar la respuesta del sistema en tu cabeza; el primer nulo es en 500hz, los nulos están espaciados 1kHz, y los picos están espaciados 1kHz aparte. De acuerdo, allí hay un pico entre cada par adyacente con la misma frecuencia, la misma amplitud, en fase, doblada la amplitud, produce un pico de +6dB el mas alto que cualquier componente por si mismo ($20\log 2=6.02\text{dB}$). Los nulos, de acuerdo, quieren estar en un teórico infinito de máximos y mínimos como ellos se cancelan en la oposición de fase. En esta manera, la curva de respuesta completa puede ser mostrada como la fase de dos ondas alternadas entre la condición de en-fase y fuera de fase a lo largo del espectro.

Un punto importante a observar es que el la expresión anterior $1/(2t)$ da un nulo de 500hz, el cual roba energía desde cualquier señal distribuida expuesto a ese retraso. Una señal de música o voz pasando entre un sistema y teniendo un retraso de de 1ms tendera a tener importantes componentes removidos o reducidos. La frase común para este efecto es distorsión por efecto peine. Las

figuras 4-15 y 4-16 son incluidas como soluciones graficas de las funciones $1/t$ y $1/(2t)$.



Un montaje para micrófono flush-mounted. Los sonidos desde la fuente S que golpean la superficie no alcanzan al micrófono, así evitando efectos de filtro peine. Otras ventajas de este montaje es un incremento de nivel debido a la presión acumulada cerca de la superficie reflejante.

Tabla 4-3 Comb-filter peaks and nulls.

| Frequency of Delay (ms) | Spacing between nulls lowest null (Hz) | Spacing between peaks (Hz) |
|-------------------------|--|----------------------------|
| 0.1 | 5,000 | 10,000 |
| 0.5 | 1,000 | 2,000 |
| 1. | 500 | 1,000 |
| 5. | 100 | 200 |
| 10. | 50 | 100 |
| 50. | 10 | 20 |

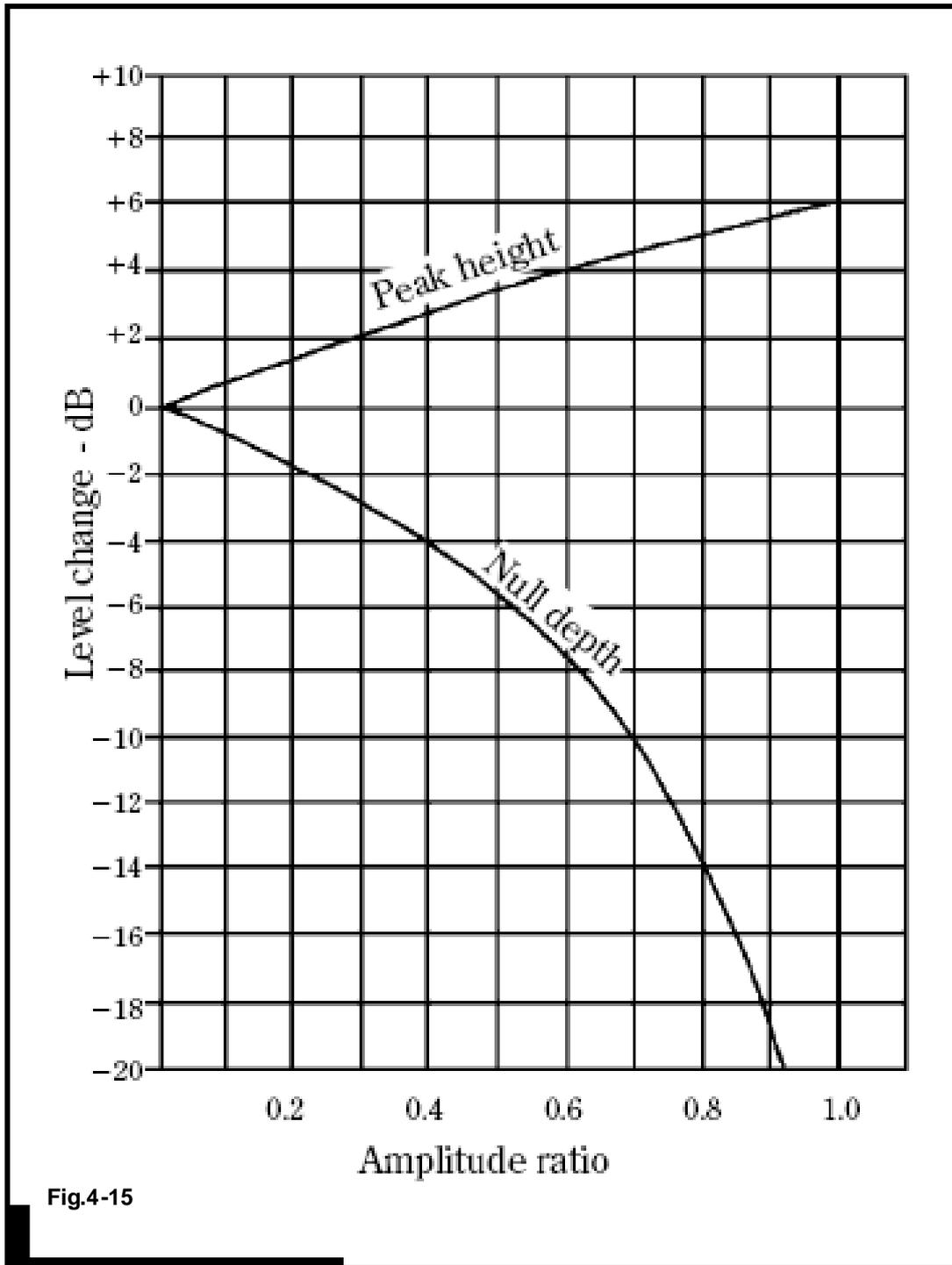


Fig.4-15

El efecto de relacione de amplitud (amplitude ratio) en los picos altos y nulos profundos del filtro peine.

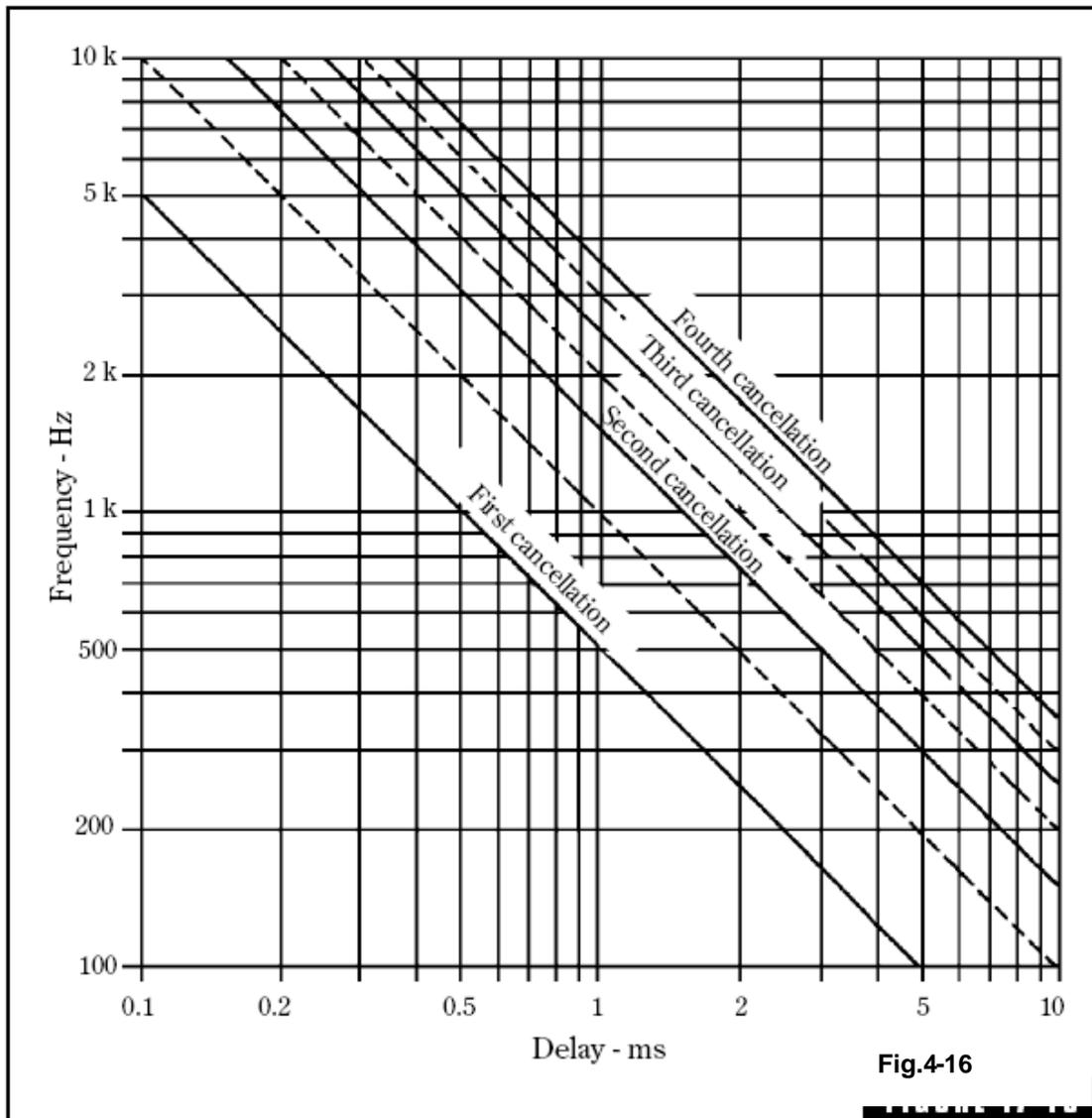


Fig.4-16

La magnitud de del retraso (delay) determina las frecuencias en la cual la interferencia destructiva (cancellation) e interferencia constructiva (peaks) ocurre. Las líneas intermitentes indican los picos entre cancelaciones adyacentes.

CAPITULO V

Acústica de los Cuartos de Escucha

En el presente contexto “cuartos de escucha” es tomado como el nombre de home high-fidelity music center (o, posiblemente, un área de escucha en cuarto de trabajo profesional). Las familias teniendo un modo para dedicar certeramente un espacio exclusivo para música, pero no todos tienen esa oportunidad. El resto, podría conformarse con un espacio multipropósito, típicamente un cuarto de servicio es también un cuarto de escucha.

Idealmente, todos los miembros de una familia tienen en mente un proyecto como este. Realmente, ahí hay que estar comprometido entre lo técnico y lo estético. Justo donde el punto de compromiso viene a descansar (si alguna vez) poder salir estar midiendo la relativa fuerza de personalidades y de fuerzas de voluntad. Si la personas involucradas comparten una genuina apreciación de buena música, la guerra es afuera, excepto por algunas escaramuzas a lo largo del camino.

Los Vínculos Acústicos

La acústica de los espacios es una parte vital de ambos, los procesos de grabación y reproducción. En todos los eventos acústicos, ahí hay una fuente de sonido y algunos clase de aparato receptor con un vínculo acústico entre los dos. Discos o grabadores de cinta tienen la impresión acústica de la grabación del espacio donde fueron grabados. Si la fuente de sonido es una orquesta sinfónica y la grabación es hecha en la sala de concierto, la reverberación de la sala es mucho más una parte del sonido de la orquesta. Si el tiempo de reverberación de las salas de concierto es 2 segundos, 2 segundos de cola son evidentes en cada sonido impulsivo y súbitamente la suspensión de la música, y esto afecta la llenura de toda la música. La reproducción de esta grabación en nuestras casas en el área de escucha, ¿Qué características mejorarían complementariamente este tipo de música?

Otras grabaciones pueden ser de tipo popular. Esa música fue probablemente grabada en muchos estudios muertos por un sistema multitrack. Básicamente la sección rítmica está tocando en este estudio muy muerto y bien separado acústicamente está depositado abajo en tracks separados. Durante sesiones subsecuentes las voces y otros instrumentos son grabados todavía en otros tracks. Finalmente, todos están combinados en niveles apropiados en una mix, con un bit (metrónomo) dulce. La posición en el campo stereo de los sonidos en cada track es ajustado por un potenciómetro. En la mix, muchos efectos, incluyendo reverberación artificial, están sumados. ¿Qué características del cuarto de escucha son mejores para la reproducción de esta grabación?

Si el gusto de la alta-fidelidad entusiasta es altamente especializada, las características del cuarto de escucha pueden ser ajustadas para relativos óptimos resultados para un tipo de música. Si el gusto es más universal, el tratamiento acústico del cuarto de escucha puede necesitar adornos para diferentes tipos de música.

El rango dinámico de reproducción de música en un cuarto de escucha depende del ruidoso extremo sobre el amplificador de potencia, la habilidad de manejo de los altavoces y la tolerancia de los miembros de la familia y vecinos. El nivel bajo final del rango dinámico de la escala es limitado por ruido, del entorno o electrónico. El ruido de la casa usualmente determina el límite baja. El rango usable entre estos dos extremos es lejano, menos lejano que, por decir, el rango de una orquesta es una sala de concierto. Expansores, compresores, companders, etc, son capaces de restaurar algo del rango original.

Peculiaridades de la Acústica de Cuartos Pequeños

Las diez octavas que cubren el espectro audible son tan grandes que el análisis acústico de cuartos pequeños es bastante diferente que el que es para los cuartos grandes.

La razón es aparente cuando el tamaño del cuarto es considerado en términos de la longitud de onda del sonido. La banda de audio de 20hz a 20khz cubre longitudes de onda de sonido desde 56.5ft a 0.0565ft ($1\frac{1}{16}$ pulgada). Por debajo de los 300hz (longitud de onda de 38ft), el estudio promedio o cuarto de escucha debe ser considerada como una cavidad resonante. Este no es el estudio de esas resonancias, este es el aire confinado dentro del estudio. Como la frecuencia aumenta por encima de 300hz la longitud de onda viene a ser menor y menor resultando en que puede ser considerada como rayos y reflexiones teóricas previas.

En este trabajo los cuartos pequeños son enfatizados. Reflexiones de sonido desde las superficies del cuarto cerrado dominan ambas regiones de baja y alta frecuencia. Las reflexiones de baja frecuencia resultan en ondas estacionarias, y el cuarto llega a ser una cámara resonante a muy diferentes frecuencias. Las reflexiones de sonido desde las superficies del cuarto también dominan en la banda media y alta de frecuencias audibles, sin la cavidad resonante, pero con reflexiones teóricas como mayor característica.

Para los profesionales acústicos e audiofilos críticos, el cuarto de escucha es tanto de un desafío como diseño de un estudio profesional de grabación, pero este no ha recibido como mucha atención.

Todos los problemas acústicos mayores están involucrados en el diseño de un cuarto de escucha y otros muchos pequeños cuartos de audio.

Tamaño del Cuarto

Los problemas son inevitables si el sonido es grabado o reproducido en espacios que también son pequeños. Gilford menciona que el volumen de los estudios es menos que aproximadamente 1500ft^3 , están tan inclinados a la coloración del sonido que ellos son imprácticos. Cuartos pequeños producen frecuencias modales esparcidas con espaciados exagerados, lo cual es la fuente de distorsiones audibles.

Proporciones del Cuarto

En los “home listening room” el tamaño y forma del cuarto en muchos de los casos ya esta fijo. Las dimensiones existentes del cuarto deben entonces se usadas para calcular los modos axiales después de los patrones de la tabla 5-1. Un estudio de esas frecuencias modales llegan entonces a revelar la presencia de coincidencias (dos o mas modos en la misma frecuencia) o modos aislados espaciados 25hz o mas desde sus vecinos. Tal falta de precisión de la frecuencia puede producir coloración.

Tabla 5-1

Axial modes.

| Room dimensions = 21.5' × 16.5' × 10.0' | | | | | |
|---|--|---|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| | Length
$L = 21.5$ ft
$f_1 = 565/L$
Hz | Width
$W = 16.5$ ft
$f_1 = 565/W$
Hz | Height
$H = 10.0$ ft
$f_1 = 565/H$
Hz | Arranged in
ascending
order | Axial
mode
spacing
Hz |
| f_1 | 26.3 | 34.2 | 56.5 | 26.3 | 7.9 |
| f_2 | 52.6 | 68.4 | 113.0 | 34.2 | 18.4 |
| f_3 | 78.9 | 102.6 | 169.5 | 52.6 | 3.9 |
| f_4 | 105.2 | 136.8 | 226.0 | 56.5 | 11.9 |
| f_5 | 131.5 | 171.0 | 282.5 | 68.4 | 10.5 |
| f_6 | 157.8 | 205.2 | 339.0 | 78.9 | 23.7 |
| f_7 | 184.1 | 239.4 | | 102.6 | 2.6 |
| f_8 | 210.4 | 273.6 | | 105.2 | 7.8 |
| f_9 | 236.7 | 307.8 | | 113.0 | 18.5 |
| f_{10} | 263.0 | | | 131.5 | 5.3 |
| f_{11} | 289.3 | | | 136.8 | 21.0 |
| f_{12} | 315.6 | | | 157.8 | 11.7 |
| | | | | 169.5 | 1.5 |
| | | | | 171.0 | 13.1 |
| | | | | 184.1 | 21.1 |
| | | | | 205.2 | 5.2 |
| | | | | 210.4 | 15.6 |
| | | | | 226.0 | 10.7 |
| | | | | 236.7 | 2.7 |
| | | | | 239.4 | 23.6 |
| | | | | 263.0 | 10.6 |
| | | | | 273.6 | 8.9 |
| | | | | 282.5 | 6.8 |
| | | | | 289.3 | 18.5 |
| | | | | 307.8 | |

Mean axial mode spacing = 11.7 Hz
Standard deviation = 6.9 Hz

Tiempo de Reverberación

El tiempo de reverberación ha estado degradado desde ser un primer determinante en la calidad acústica de cuartos pequeños a una nulidad. La cantidad de absorbencia global en el cuarto de escucha es aun importante en el establecimiento de las condiciones generales de escucha. Si el cuarto es excesivamente muerto o también vivo y reverberante, la fatiga de los escuchas puede mejorar y la calidad de la música puede deteriorarse.

La vieja ecuación de Sabine para tiempo de reverberación hace posible un estimado del valor de material absorbente requerido para una condición razonable de reverberación.

$$RT60 = \frac{0.049 V}{Sa}$$

Donde

RT60= tiempo de reverberación, en segundos

V= volumen del cuarto, en ft³

S= área total de superficie del cuarto, ft²

a= coeficiente de absorción promedio de las superficies del cuarto

Sa= absorción total, en sabinas

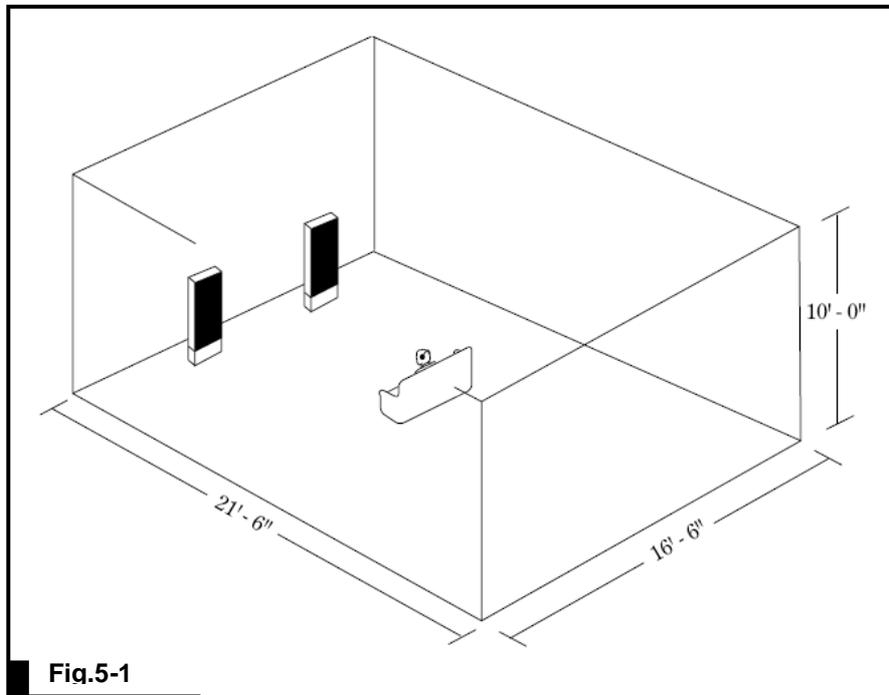
Incluso aunque nosotros demos poca importancia en la grafica en si del tiempo de reverberación, este es conveniente para asumir un tiempo de reverberación razonable, que dice que es alrededor de 0.3seg, para propósito de estos cálculos.

Desde esto, el número total de Sabinas de absorción puede ser estimado, lo cual habría de resultar en condiciones razonables de escucha. En la mayoría de los hogares con cuartos de escucha vivida (listening-living), la estructura y los muebles también proporcionan más de la absorción básica requerida. Cuidadosas pruebas de escucha deben determinar el grado de ambiente del cuarto más conveniente para el tipo de música favorita.

El Cuarto de Escucha: Baja Frecuencia

El cuarto descubierto de la fig.5-1 es el punto de inicio. El cuarto tiene 21.5ft de largo, 16.5ft de ancho con 10ft al techo. Estas dimensiones fijan la resonancia del modo axial y sus múltiplos (harmonics). Siguiendo la discusión del capítulo 2, los efectos de los modos axiales pueden ser enfatizados y los modos tangencial y oblicuos pueden ser omitidos. Los modos axiales de frecuencia fuera para 300hz son calculados para las dimensiones de longitud, anchura, altura y tabulados en la tabla 5-1. Estos modos axiales de frecuencia están entonces ordenados en orden ascendente de frecuencia, sin considerar las dimensiones de la fuente (altura, anchura o longitud). El espaciamiento entre los modos adyacentes están registrados en la columna de la derecha. No son notadas coincidencias; solamente un único par esta como cerrado estrechamente en

1.5hz. Las relaciones tridimensionales 1:1.65:2.15 están bien dentro del “Bolt area”, quiere decir que tiende a una buena distribución de frecuencias modales en el cuarto.

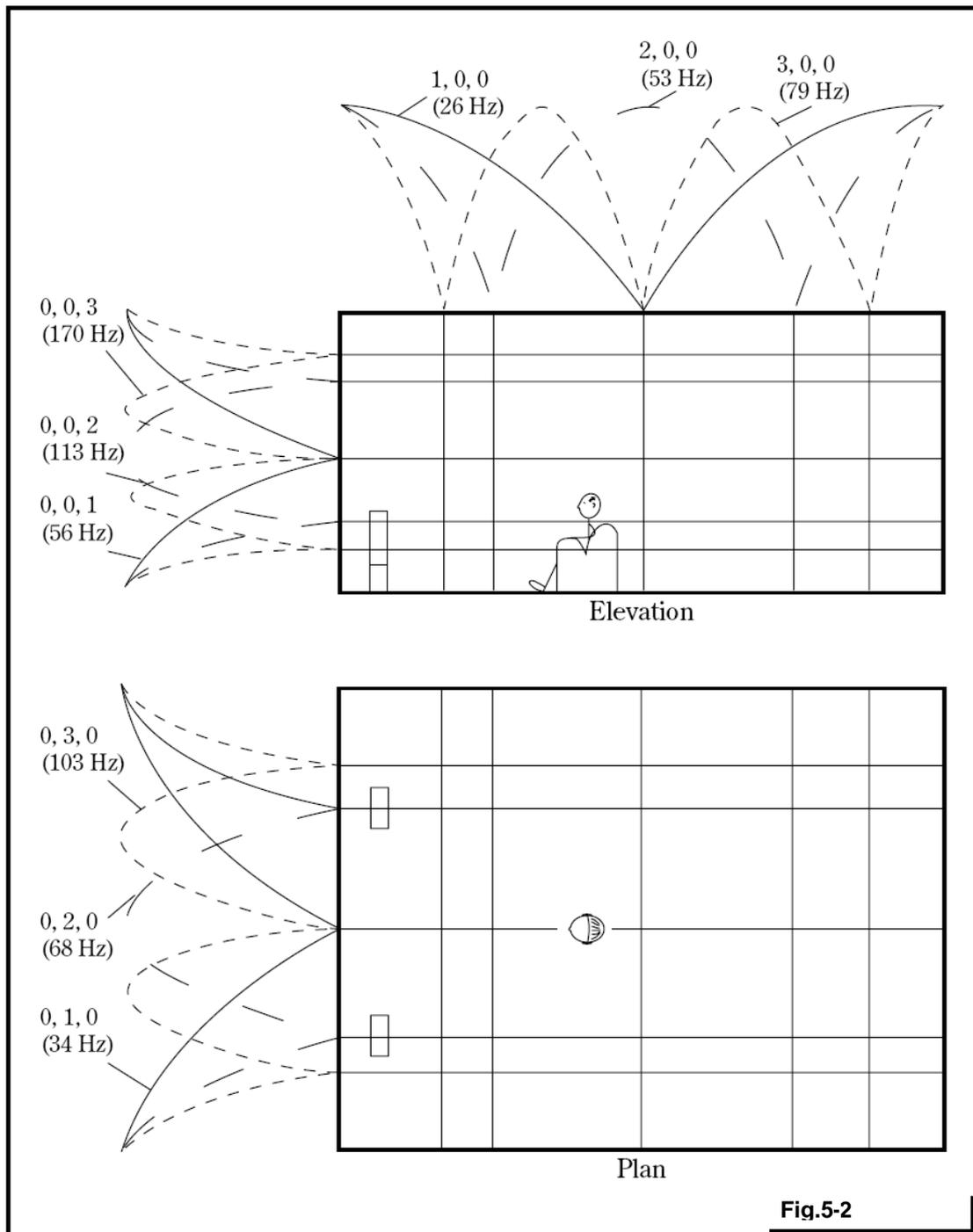


Dimensiones asumidas para el análisis del cuarto de escucha.

La lista de modos axiales de frecuencia calculados en la tabla 5-1 ahora debe ser aplicada para los espacios del cuarto de escucha. Este es echo gráficamente en la fig.5-2, siguiendo las “impresiones estilizadas” de Toole. La posición de los nulos situados nulo-línea, los cuales están dibujados entre el cuarto de escucha. Las líneas representan el nulo en modo-longitudinal, esta dibujado entre ambos, la elevación vista y el plano visto porque estos nulos realmente forman una “hoja de nulos” que se extiende desde el piso al techo. En otras palabras, la posición de las sillas de los escuchas puede se movido para evitar esos particulares nulos en 26.53hz y 79hz, pero recordar, allí hay 8 mas debajo de 300hz.

Los tres modos axiales nulos mas bajos asociados con la altura del cuarto (56hz, 113hz y 170hz), están mostrados en la elevación vista en la fig.5-2. Estos nulos son “hojas horizontales” en varias alturas. La cavaza del escucha en la elevación ve “imaginariamente” entre dos nulos y en el pico de la resonancia en 79hz.

Los tres modos axiales de mucha menor frecuencia están mostrados en la vista de un plano. Los nulos en este caso son “hojas verticales” extendidas desde el piso al techo. El escucha, situado en el centro del cuarto, intercepta los nulos de cada modo axial. La resonancia de los nulos tiene que estar bosquejada porque



Vistas plana y elevada de cuarto de escucha de la fig.5-1 mostrando la distribución de la presión modal en baja frecuencia de los primeros tres modos axiales de la tabla 5-1.

su ubicación es definida, pero, entre cualquier de los dos nulos de un modo axial dado, existe un pico. Aunque los nulos son capaces de remover un regular

pedazo corto y grueso de espectro, la acústica de la baja frecuencia de un cuarto es dominada por el ancho, relativamente picos planos.

Un extremo de complejidad de la estructura modal del cuarto de escucha acústico esta convenientemente claro. Solo el primero de los tres modos axiales de longitud, anchura y altura ha sido mostrado. Todo de las frecuencias modales axiales esta listada en la tabla 5-1 tiene una parte importante para actuar en la acústica de baja frecuencia de los espacios. Estos modos axiales existen solo cuando ellos son excitados por el sonido de baja frecuencia de la señal que esta reproducida en el cuarto. El espectro de la música es continuamente cambiado, por lo tanto, la excitación de los modos es asimismo continuamente cambiante. El modo axial de longitud en 105.2hz (tabla 5-1) viene en actividad solo como energía espectral en 105.2hz por los golpes de la música. Si solo nuestros ojos están sensibles a la presión del sonido (intensidad) y frecuencia (color), que impresionante vista de cambio constante de resonancias en el cuarto habría sido como la reproducción de la octava sinfonía de Beethoven! Y todo esto representa solo la energía de sonido por debajo de 300hz.

Control de Resonancias Modales

El campo de la baja frecuencia de sonido en los oídos de los escuchas es echo de una compleja suma vectorial de todos los modos axial, tangencial, oblicuo, de esa particular señal en el cuarto. Los altavoces energizan la resonancia modal prevaleciendo en sus ubicaciones. Los modos que tienen nulos a causa de la ubicación de sus altavoces no pueden ser energizados, pero esos teniendo parcial o máximo lleno en esta ubicación podrían energizarse proporcionalmente. La interacción de resonancias en baja frecuencia es también complicada y transitoria para agarrarlas completamente, pero ellos pueden comprender si pueden desmenuzarse las contribuciones de modos individuales.

Los altavoces deben ser colocados lejos del camino de superficies reflejantes como sea factible. La posición de los altavoces debe ser considerada provisional, moviéndolas un poco se es necesario para mejorar la calidad del sonido. Lo mismo es verdad para la posición de los escuchas.

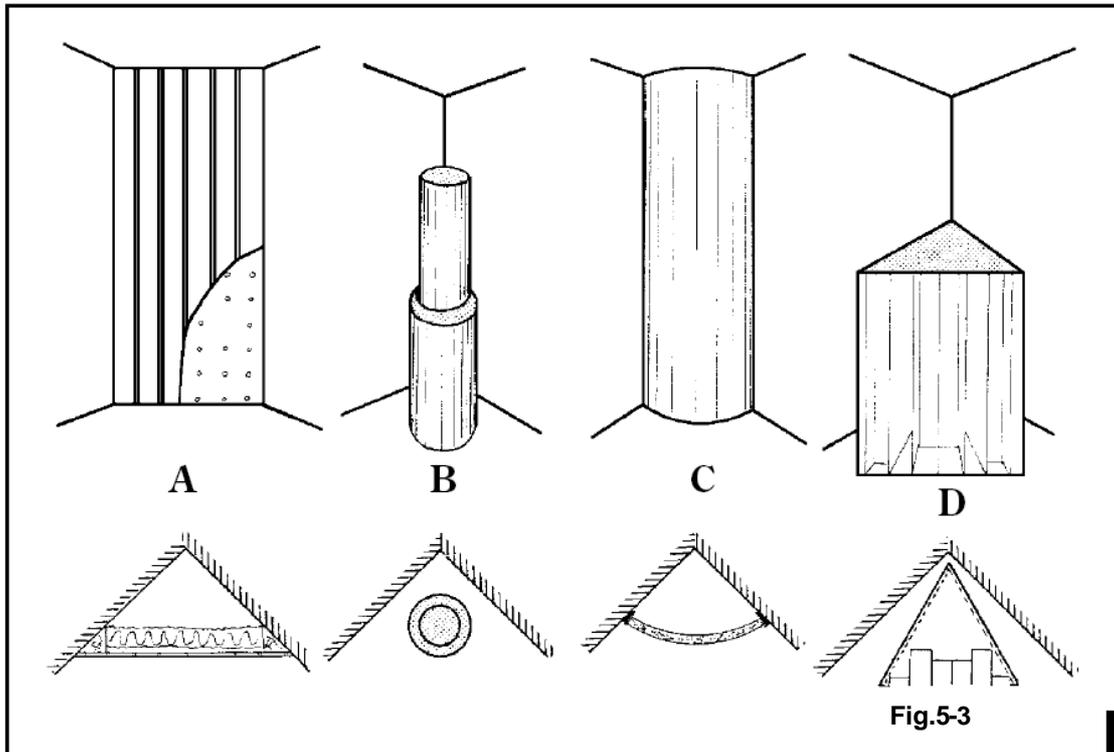
Tapaderas Graves para Cuartos de Escucha

Esto no es práctico para tratar acústicamente cada modo separadamente. Un tratamiento general de baja frecuencia es usualmente suficiente para controlar el "retumbe del cuarto" y otras anomalías resonantes. De hecho, un cuarto construido de madera puede tener muy buena y suficiente absorción estructural en baja frecuencia construida ahí adentro para proporcionar todo el control general modal necesario.

En adición a los ajustes de la ambientación general del cuarto, la absorción de baja frecuencia en las dos esquinas del cuarto cercanas a los altavoces puede tener un importante efecto en la imagen stereo. La fig. 5-3 sugieren cuarto caminos que tal absorción puede ser obtenida. La primera, fig.5-3A, es una tapa

de resonador de Helmholtz, de construcción casera ubicada en las esquinas. Este podría emplear cualquier cara perforada o tablillas espaciadas. Algunos diseños frecuentemente deben ser asumidos, quizás 100hz, y una profundidad promedio de la forma triangular debe ser estimada.

La solución más sencilla del problema habría de ser la selección de uno de los tres propietarios de absorbedores de la fig. 5-3B, C o D. Tubo Traps™, ofrecida por Acoustic Science Corporation, provee la necesaria absorción por



Cuatro posibles caminos para proveer de absorción en baja frecuencia en las esquinas del cuarto de escucha, cerca de los altavoces. (A) resonador de construcción casera. (B) Uso de Tube Trap™. (C) Snap Traps™ disponible por Acoustic Science Corporation. (D) uso de Corner Killer disponible por RPG Diffusor Systems, Inc.

apilamiento, una unidad de 9pulgadas de diámetro, una unidad de tope de 11pulgads, resultando en total de altura de 6ft. Estas trampas son cilindros fibrosos con esqueleto de malla de alambre, juntos actúan como cavidades resonantes. La mitad de la periferia es reflejante, hoja de masa flácida. La energía de baja frecuencia (por debajo de 400hz) sin esfuerzo penetra esta hoja mientras la energía de alta frecuencia es reflejada por este. Usado en una esquina como este, el cilindro abría sido girado de modo que el lado reflejante de la cara al cuarto. Así, el cilindro contribuye a la difusión del cuarto así como para absorber profundamente graves.

El tratamiento de la esquina de la fig.5-3C es basada en otro producto de Acoustic Science Corporation llamada el Snap Tap. Montando pistas de 1"x1/2" j-

metal es instalado en la esquina para sostener las orillas del panel. La hoja de Snap Tap es entonces doblada y cerrada de golpe en un lugar. El espacio de aire detrás del panel acústico asegura bien la absorción de baja frecuencia. Una membrana curva reflectora tira hacia adentro, el panel provee un ángulo ancho de absorción sobre 500hz.

Todavía otro posible tratamiento en la esquina ofrecido por RPG Diffusor Systems Inc., es mostrado en la fig.5-3D. El Triffusor es especialmente adaptado para variables controles acústicos con un lado absorbente, un lado difusor y un lado reflejante. Una adaptación de este triffusor llamado Koner Killer, tiene dos lados absorbentes y un lado de difusor de residuo cuadrático. Con el lado absorbente dentro de la esquina para control modal, el lado difusor da la cara al cuarto. Esta cara del RPG difusor no solo dispersa la energía de sonido haciéndolo caer, este también reduce la amplitud de la energía que regresa al cuarto. Sus dimensiones nominales son: altura 4ft, caras, 24 pulgadas.

Con un par de alguno de los dispositivos de la fig.5-3 en las esquinas del cuarto de escucha, cerca de los altavoces, la oportunidad es buena que suficiente control modal es introducido para limpiar cualquier problema de la imagen stereo resultado de las resonancias del cuarto. Allí hay dos esquinas más que requieren de un control modal.

Coloración Modal

La fuente mas obvia de baja frecuencia de sonido resulta desde la momentánea desviación de la trayectoria en la llanura dando una el cuarto una respuesta del cuarto, lo cual resulta en concentraciones de modos o grandes espaciamientos entre modos (véase fig.2-21). Un transitorio estallido de energía musical resulta en desigual, excitación forzada de los modos. Como la excitación transitoria es removida, cada modo decae en su frecuencia (y muchas veces diferente) natural. Pulsaciones (beats) pueden ocurrir entre el decaimiento de modos adyacentes. La energía de nuevas y diferentes frecuencias es inyectada, lo cual es una coloración de señal.

El Cuarto de Escucha: las Frecuencias Medias-Altas

La propagación del sonido de longitudes de onda cortas, sobre alrededor de 300hz, puede ser considerada en la forma de rayos que experimentan las reflexiones teóricas. La fig.5-4 muestra el mismo cuarto de escucha y el escucha para la consideración de las reflexiones de frecuencias media-alta del sonido desde los altavoces. El sonido desde el altavoz derecho es estudiado en detalle como características del cuarto simétrico.

El primer sonido que alcanza los oídos del escucha es el sonido directo, viajando desde corta distancia. La reflexión F desde el piso es el siguiente en llegar. La reflexión que viene del techo (C), el lado cercano al muro (W) y el lado lejano del muro (W) llega después. Entre si la primera reflexión es una etiquetada como D resultando desde la difusión del sonido desde el borde del

gabinete del altavoz. La reflexión de este sonido desde el frente del muro es mostrado en el plano visto de la fig.5-4.

Estos constituyen una primera reflexión, como contraste para las reflexiones desde las superficies posteriores del cuarto y reverberación general, llegando mucho mas tarde. Los rayos directos llevan información importante concerniente a la señal que ha sido radiada. Si este es acompañado por las primeras reflexiones, la notable percepción stereo del rayo directo tiende a ser borroso.

La importante investigación de Olive and Toole es parcialmente resumida en la fig.5-5 (una repetición de la fig.3-4 por conveniencia). Las variables aquí están reflejando nivel y reflejando retraso. Esto es instructivo para comparar los niveles y retrasos de cada, y de las primeras reflexiones identificadas en la fig.5-4. Esas reflexiones, trazadas en la fig.4-5, todas caen dentro de la región audible entre el umbral de reflexión y el umbral de producción de eco. La pura señal directa es inmediatamente seguida por un enjambre de primeras reflexiones de varios niveles y retrasos, produciendo distorsión de filtro peine.

Las necesidades son obvias: reducir el nivel de las competidoras reflexiones para que la señal de sonido directo quede libre, en toda su belleza. La fig.5-5 es un estudio de una señal directa y una sola reflexión lateral.

Permitiendo una sola reflexión lateral, de ajustable nivel, habría control de lugar de la amplitud y efectos de la imagen en las manos de los experimentadores/escuchas! El potencial de este concepto es asombroso. Por lo tanto, el siguiente paso es mejorando las condiciones de escucha en este cuarto de escucha que estará con la efectiva eliminación de todas la primeras reflexiones excepto aquellas reflexiones laterales lejos de los muros derecho e izquierdo que serán ajustados para una optima calidad de sonido.

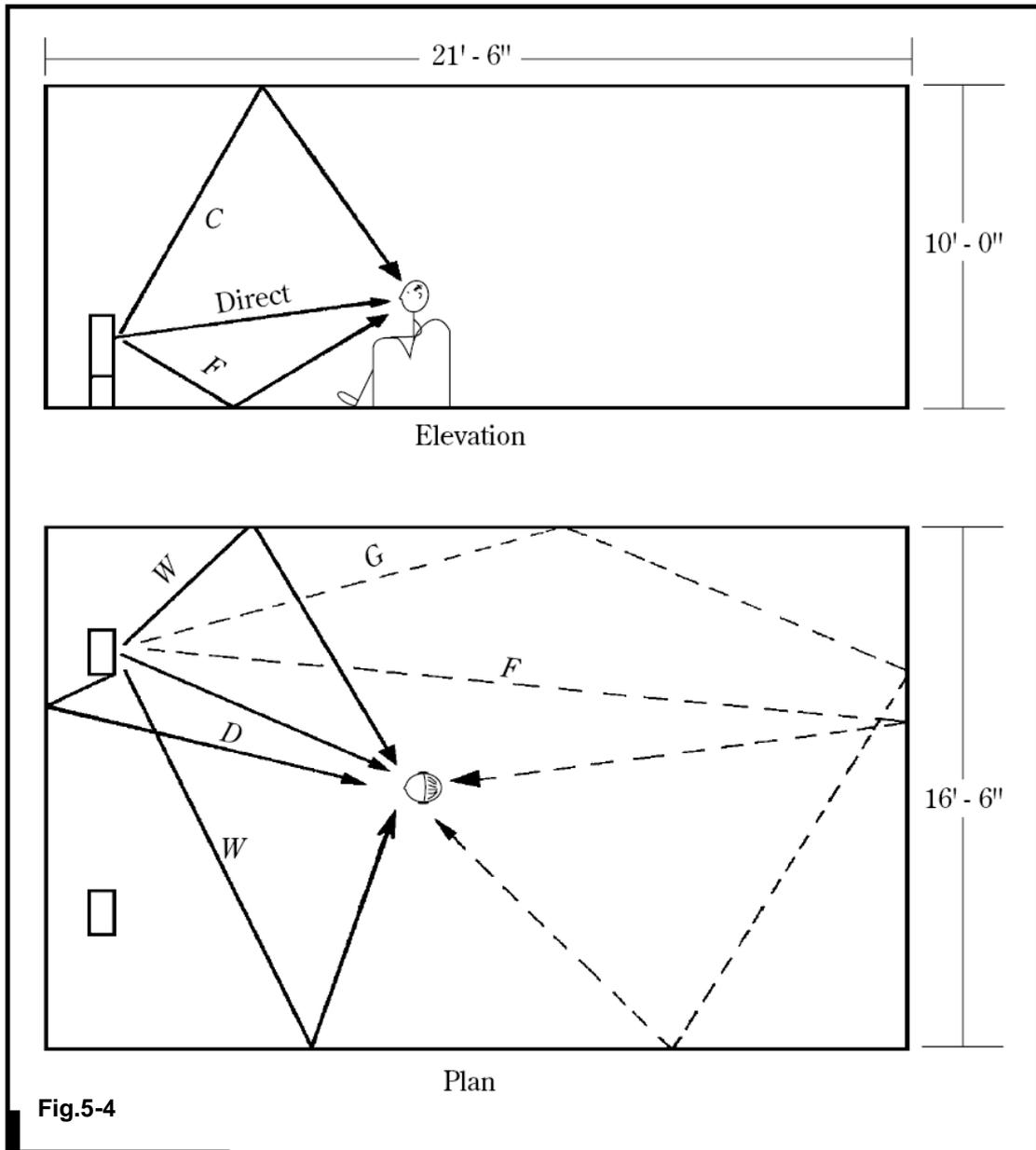


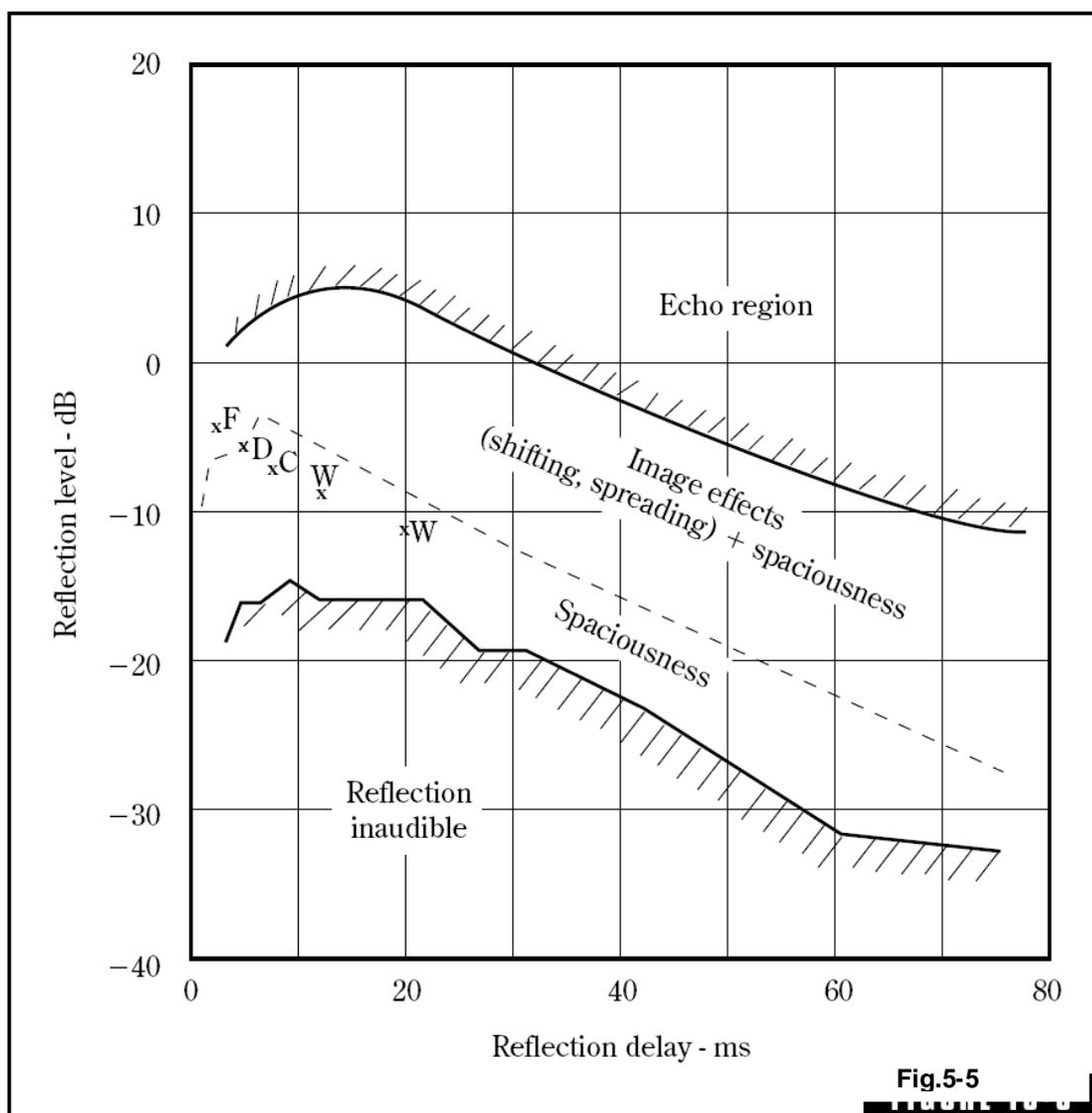
Fig.5-4

Vistas desde plano y elevación para cuartos de escucha mostrando las primeras reflexiones desde el piso, el techo, los lados del muro y la forma del difusor desde los bordes del gabinete del altavoz. Las reflexiones retardadas F y G son el principio de los componentes de la reverberación.

Identificación de Tratamientos para Puntos de Reflexión

Un método de reducción de niveles de las primeras reflexiones es para tratar la completa porción frontal del cuarto con el material absorbente de sonido. Esto habría de matar las reflexiones laterales y habría probablemente hecho al cuarto mas muerto para mayor confort al escuchar. La principal recomendación aquí es para añadir un mínimo de material absorbente para tratar solo la superficie específica responsable de las reflexiones.

Localizar estos puntos de reflexión es fácil, como ayudarse con un espejo. Con los críticos sentados en el "lugar dulce" un asistente mueve un espejo en el piso hasta que el observador pueda ver el tweeter del sistema de altavoces derecho reflejado en si.



Una repetición de la fig.6-4 con referencias más convenientes. La pequeña x representa el primer cuarto con las reflexiones calculadas en la tabla 5-2. Después de Olive end Toole.

Tabla 5-2

Reflections: Their amplitudes and delays.

| Path
Sound
paths | Path
length
(ft) | Reflection
direct
(ft) | Reflection
level*
(dB) | delay**
(ms) |
|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Direct | 8.0 | 0.0 | — | — |
| F (Floor) | 10.5 | 2.5 | -2.4 | 2.2 |
| D (Diff) | 10.5 | 2.5 | -2.4 | 2.2 |
| C (Cell) | 16.0 | 8.0 | -6.0 | 7.1 |
| W (near wall) | 14.0 | 6.0 | -4.9 | 5.3 |
| W (far wall) | 21.0 | 13.0 | -8.4 | 11.5 |
| F (rear) | 30.6 | 22.6 | -11.7 | 20.0 |
| G (rear) | 44.3 | 36.3 | -14.9 | 32.1 |

$$* \text{Reflection level} = 20 \log \frac{\text{direct path}}{\text{reflected path}}$$

$$** \text{Reflection delay} = \frac{(\text{reflected path}) - (\text{direct path})}{1,130}$$

(Assuming perfect reflection and inverse square propagation.)

Este es el punto en el piso donde la reflexión del piso pega. Este punto es cuidadosamente marcado y el proceso repetido para el tweeter izquierdo, y la segunda reflexión en el piso es marcado su lugar. Una alfombra pequeña que cubra esas dos marcas debe reducir las reflexiones del piso a una inaudibilidad.

El mismo procedimiento es usado para localizar los demás puntos de reflexión, para lados derecho e izquierdo y las reflexiones del techo. Cada uno de esos puntos debe también ser cubierto con bastante material absorbente para garantizar amplia cobertura de los puntos de reflexión.

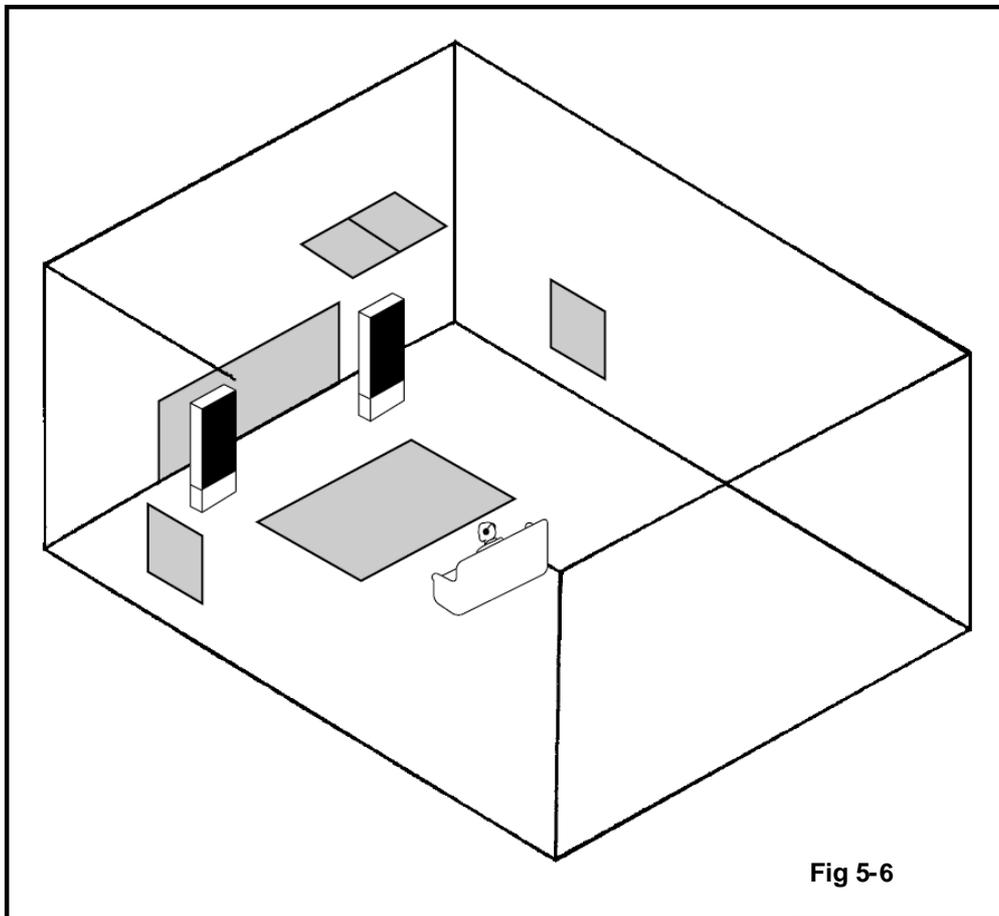
El punto de reflexión para la energía de sonido difractada desde el borde del gabinete del altavoz es más difícil de ubicar. Instalando un absorbedor en la pared entre el altavoz debe dominar reflexiones de difracción.

Cuando todos los puntos de reflexión son cubiertos (fig.5-6), intenta una prueba de escucha preliminar. La imagen stereo y la música quieren probablemente ser más claros y más precisos ahora que las primeras reflexiones han sido reducidas.

Reflexiones Laterales: Control de Amplitud

Las reflexiones laterales desde los lados del muro han sido esencialmente eliminadas por la colocación de material absorbente en el muro. El siguiente examen de escucha debe ser en la misma música con el lado del muro absorbente temporalmente removido, pero con el piso, techo y absorbedores de difracción todavía en su lugar. Las graficas de Olive/Toole de la fig.5-5 pueden ahora ser probadas. Las reflexiones laterales pueden ser reducidas un poco por colgamiento de tela en lugar del fuerte absorbente. El ajuste de la magnitud de las reflexiones laterales puede ser explorado usando absorbentes de sonido de variada absorbencia en los puntos de reflexión en los lados de las paredes.

Es la habilidad de ajustar las reflexiones para alcanzar la amplitud deseada y la imagen stereo para satisfacer la escucha individual o las óptimas condiciones para diferentes tipos de música lo que lo hace interesante.



El cuarto de la fig.5-1 con un mínimo material absorbente, tratado para reducir el nivel de cada reflexión desde las superficies.

Bibliografía

The Master handbook of Acoustics
F. Alton Everest
McGraw-Hill
2001

Acústica
Leo L. Beranek
Editorial Hispano Americana S.A.
1969

Fundamentos de Acústica
Laurence E. Kisler, Austin R.Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders.
Limusa, Noriega Editores.
Edición 2006

Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos
Antoni Carrion Isbert
Edicions UPC-Alfa Omega
2001