

Divergencia esférica en sistemas de audio

La **divergencia esférica** en audio se refiere específicamente a cómo las ondas sonoras disminuyen su intensidad a medida que se alejan de una fuente puntual en un espacio acústico tridimensional.

Mecanismo en audio

Cuando un altavoz (o cualquier fuente sonora) emite sonido:

- La energía acústica se distribuye en frentes de onda esféricos
- La misma cantidad de energía debe repartirse sobre un área cada vez mayor
- Resultado: la **presión sonora** disminuye

Ley del inverso al cuadrado (para sonido)

Para una fuente sonora puntual ideal en campo libre:

$$\begin{aligned} \text{Nivel de presión sonora} &\propto \frac{1}{r^2} \\ \text{SPL}_2 &= \text{SPL}_1 - 20\log_{10}\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ dB} \end{aligned}$$

Ejemplo práctico: Cada vez que se duplica la distancia, el nivel de presión sonora disminuye aproximadamente **6 dB**:

- A 1 metro: 100 dB SPL
- A 2 metros: 94 dB SPL (-6 dB)
- A 4 metros: 88 dB SPL (-12 dB total)
- A 8 metros: 82 dB SPL (-18 dB total)

Consecuencias prácticas en sistemas de audio

1. Diseño de PA (Public Address) y refuerzo sonoro

- **Cobertura uniforme:** Se necesita más potencia para llegar a oyentes lejanos
- **Altavoces direccionales:** Para reducir la divergencia en ciertas zonas
- **Sistemas de delay:** Altavoces adicionales para zonas lejanas (con retardo temporal)

2. Grabación y acústica

- **Efecto de proximidad:** Los micrófonos captan más graves cuando están muy cerca de la fuente
- **Relación directo/reverberante:** A mayor distancia, más predominio de la reverberación
- **Microfonía a distancia:** Para captar el sonido "de la sala"

3. Mediciones acústicas

- Las mediciones de SPL deben especificar la distancia de medición
- Normalización a 1 metro para comparaciones estándar

Factores que modifican la divergencia esférica en audio

1. Fuentes no-puntuales

- **Altavoces line arrays:** Crean ondas cilíndricas (divergencia menor: -3 dB por doblar distancia)
- **Arrays de altavoces:** Pueden dirigir la energía específicamente
- **Bafles múltiples:** Patrones de radiación complejos

2. Condiciones del entorno

- **Campo libre** (aire abierto): Divergencia esférica pura
- **Espacios cerrados:** Reflexiones crean campo reverberante
- **Absorción del aire:** Afecta más a altas frecuencias y largas distancias

3. Frecuencia del sonido

- **Bajas frecuencias**: Se comportan más como fuentes omnidireccionales (divergencia más esférica)
- **Altas frecuencias**: Mayor direccionalidad, especialmente en altavoces con tweeters

Aplicaciones específicas

Diseño de sistemas de megafonía

text

Distancia	Pérdida esperada	Solución típica
0-10 m	0-20 dB	Altavoces principales
10-30 m	20-30 dB	Altavoces de delay
>30 m	>30 dB	Sistemas distribuidos

Calibración de sistemas

- **Ajuste de ganancia** por distancia al micrófono
- **EQ diferencial** para compensar pérdidas espectrales por distancia

Sonorización de grandes espacios

- **Estadios, teatros:** Uso estratégico de arrays para mantener SPL uniforme
- **Auditorios:** Combinación de altavoces principales y de refuerzo

Limitaciones y consideraciones

1. **Sólo aplica en campo directo:** En campo reverberante, el nivel sonoro se estabiliza

- Fuentes reales no son puntuales:** Los altavoces tienen dimensiones físicas
- Obstrucciones y difracción:** Objetos modifican el patrón de propagación
- Condiciones atmosféricas:** Viento, temperatura y humedad afectan la propagación

Regla mnemotécnica práctica

"6 dB por doble distancia" (en campo libre para fuente puntual)

Herramientas de cálculo comunes

- Calculadoras de SPL vs distancia**
- Software de predicción acústica** (EASE, CATT-Acoustic)
- Apps para móvil** de medición sonora con compensación de distancia

La comprensión de la divergencia esférica es fundamental para:

- Diseñar sistemas que suenen uniformemente en todo el espacio
- Posicionar correctamente micrófonos y altavoces
- Predecir niveles sonoros y cumplir normativas de contaminación acústica
- Optimizar la relación señal/ruido en grabaciones

Cómo se aplica la Divergencia esférica en un sistema de sonido

Aplicación práctica de la Divergencia Esférica en Sistemas de Sonido

1. Cálculo de niveles sonoros en diseño

Fórmula de trabajo para ingenieros de sonido:

$$SPL_2 = SPL_1 - 20 \cdot \log_{10}(r_2/r_1) \text{ [dB]}$$

Ejemplo rápido:

- Altavoz: 100 dB SPL @ 1m
- Distancia deseada: 16m
- Cálculo: Pérdida = $20 \cdot \log_{10}(16/1) = 20 \cdot \log_{10}(16) = 20 \times 1.204 = 24.08 \text{ dB}$
- Resultado: $100 - 24.08 = 75.92 \text{ dB SPL @ 16m}$

2. Posicionamiento de altavoces

Principio del "punto de cobertura óptimo"

$$\text{Distancia ideal} = \sqrt{(S_1/S_2)} \times D_1$$

Donde S_1 y S_2 son sensibilidades de altavoces diferentes.

Técnica de espaciado en clusters:

- Altavoces separados $\leq 1/4$ longitud de onda:** Se comportan como fuente única

- **Separación mayor:** Patrón de interferencia (comb filtering)

3. Sistemas de Delay (retardo)

Criterio de implementación:

Regla 3:1 para sistemas de delay:

- **Distancia al delay** = 1/3 a 1/2 de distancia desde fuente principal
- **Retardo temporal** = Distancia / Velocidad sonido (≈ 343 m/s)
- **Ganancia del delay** = Compensa pérdida por divergencia

Ejemplo cálculo delay:

text

Distancia principal: 30m → SPL bajo

Posición delay: 10m desde principal (20m al público)

Retardo necesario: $20\text{m} / 343\text{m/s} = 0.058\text{s} = 58\text{ms}$

Compensación SPL: $+20 \cdot \log_{10}(30/20) = +3.5\text{dB}$

4. Configuración de ganancia por zonas

Matriz de ganancia típica:

Zona	Distancia a fuente	Pérdida teórica	Ganancia aplicada	Tipo de procesamiento
Frente	5m	-14dB	+0dB	EQ plano
Media	15m	-23.5dB	+9.5dB	EQ + compresión
Trasera	25m	-28dB	+14dB	EQ + limitador

5. Diseño de Line Arrays

Ventaja clave: Transforman divergencia esférica en cilíndrica

text

Divergencia esférica: -6dB por doble distancia

Divergencia cilíndrica: -3dB por doble distancia

Configuración de curvatura:

Ángulo entre cajas = $f(\text{Distancia al público}, \text{Altura del array})$

- **Público cercano:** Mayor curvatura (ángulos abiertos)
- **Público lejano:** Menor curvatura (ángulos cerrados)

- **Software de predicción:** ArrayCalc (d&b), JBL VerTec, etc.

6. Calibración con mediciones

Procedimiento paso a paso:

1. **Establecer referencia:**

- Micrófono a 1m del altavoz (en eje)
- Medir SPL a potencia nominal (ej: 1W a 1m = 95dB)

2. **Crear curva de respuesta por distancia:**

Posiciones: 1m, 2m, 4m, 8m, 16m, 32m

Medir: SPL por bandas de octava

Comparar con teórico: -6dB por cada duplicación

3. **Ajustar EQs zonales:**

- Compensar pérdida de agudos a distancia (absorción aire)
- Ajustar relación graves/agudos por zona

7. Soluciones para espacios problemáticos

A. Espacios muy largos y estrechos:

Solución: Arrays direccionales laterales

Configuración: Pattern control 90° horizontal × 40° vertical

Ventaja: Menor reflexión en paredes laterales

B. Techos muy bajos:

Problema: Reflexiones tempranas del techo

Solución: Altavoces con dispersión vertical reducida

Ejemplo: 60°H × 40°V en vez de 60°H × 60°V

C. Público en múltiples niveles:

Estrategia: Sistemas por nivel

Nivel 1: Array principal (planta baja)

Nivel 2: Altavoces de balcony delay

Nivel 3: Altavoces de under-balcony

8. Herramientas digitales modernas

Procesadores DSP con compensación automática:

python

```
# Pseudocódigo para algoritmo de compensación def compensar_divergencia(distancia,  
spl_referencia):
```

```
    perdida_teorica = 20 * math.log10(distancia)  
  
    ganancia_necesaria = perdida_teorica  
  
    # Aplicar con limitadores para evitar feedback  
  
    return min(ganancia_necesaria, ganancia_maxima_segura)
```

Sistemas con beam steering:

- **Meyer Galaxy:** Control de haz por software
- **L-Acoustics L-ISA:** Panoramización 3D
- **d&b Soundscape:** Control de divergencia por objetos

9. Caso práctico completo: Auditorio de 500 plazas

Datos:

- Dimensiones: 25m (largo) × 20m (ancho) × 10m (alto)
- Público: 20 filas, 2.5m entre filas
- Altavoces principales: 2× d&b V8 (131dB max SPL)

Implementación:

Zona	Distancia	SPL calculado	Solución	Ajuste
Filas 1-5	3-10m	105-95dB	Main L/R	EQ plano
Filas 6-12	11-18m	94-88dB	Main + primeros delays	+6dB, delay 25ms
Filas 13-20	19-25m	87-84dB	Segundos delays	+12dB, delay 50ms

Resultado: Uniformidad ±3dB en todo el auditorio

10. Errores comunes a evitar

1. Subestimar la absorción del aire:

- A 100m: 20kHz pierde ~15dB más que 100Hz
- Solución: EQ progresivo por distancia

2. Ignorar el campo reverberante:

- Distancia crítica = $0.1\sqrt{V/T60}$
- Más allá: nivel constante (no aplica divergencia)

3. Delay mal sincronizado:

- Máximo permitido: 30ms de diferencia
- Regla: Delay debe ser **inaudible como eco**

4. Sobre cargar ganancias de delay:

- Puede crear feedback
- Solución: Usar micrófonos supercardioides

11. Verificación final con RTA

Checklist post-instalación:

- Medir respuesta por octavas en múltiples puntos
- Verificar caída de -6dB por duplicación de distancia (campo directo)
- Ajustar delays por medición de impulso
- Test de inteligibilidad (STI ≥ 0.60)
- Balance L/R en todos los puntos