

Rumore Aeroacustico

- Parte I
- Fondamenti di Acustica dei flussi
- Esempi
- Meccanismi di generazione
- Analogie acustiche
- Parte II
- Microfoni e misure
- Misure aeroacustiche in Galleria del Vento

Rumore Aeroacustico

Rumore aeroacustico:

- Rumore generato aerodinamicamente, le principali sorgenti sono flussi non stazionari
- Rumore cresce rapidamente al crescere del numero di Mach, problema particolarmente sentito nelle applicazioni che coinvolgono **flussi ad alta velocità**:
 - Problema riconosciuto e sviluppato in ambito aeronautico a partire dall'introduzione dei motori turbojet
 - Lo studio del rumore aerodinamico è applicabile a molte altre applicazioni:
 - ✓ Cooling fans
 - ✓ Sistemi di ventilazione
 - ✓ Automotive
 - ✓ Treni ad alta velocità
 - ✓ Wind turbines

Rumore Aeroacustico

Fondamenti di acustica nei flussi

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = \rho q \quad \text{equazione di continuità}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \vec{f} \quad \text{equazione della quantità di moto}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = 0 \quad \text{equazione dell'energia}$$

q : sorgente di volume esterna

\vec{f} : forza di volume esterna

ρ : densità

\vec{u} : velocità del fluido

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} \vec{i}_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \vec{i}_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \vec{i}_3$$

IPOSTESI:

- Flusso non viscoso
- Conduttività termica nulla
- Gradienti spaziali hanno o.d.g. non superiore alle variabili stesse

$$c_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s}$$

Velocità di propagazione dei disturbi nel fluido, fluido con composizione costante e in equilibrio termodinamico

Rumore Aeroacustico

Fondamenti di acustica nei flussi

Linearizzazione delle equazioni di moto:

Il suono è la percezione delle fluttuazioni di pressione che si propagano nell'atmosfera. Le variabili fluidodinamiche possono essere scomposte in due termini uno **stazionario** e uno **instazionario** i cui o.d.g. soddisfano le seguenti relazioni:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'(\vec{x}, t)$$

$$\frac{\varphi'(\vec{x}, t)}{\langle \bar{\varphi} \rangle} \ll 1$$

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{D_0^2 p'}{D^2 t} = \nabla \cdot \vec{f}' - \rho_0 \frac{D_0 q'}{Dt} \equiv -\gamma$$

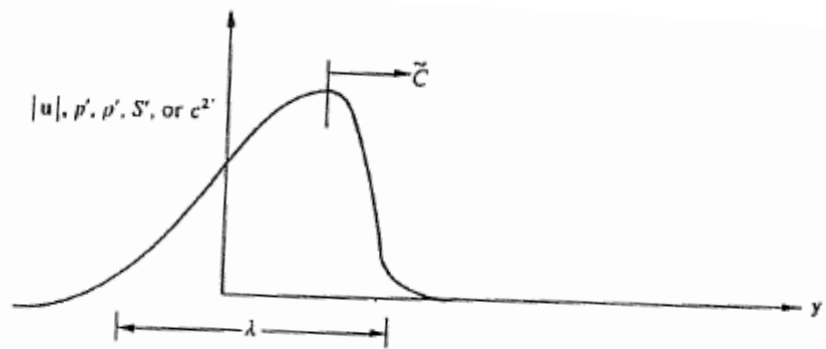


Fig. 1.1 Propagating disturbance.

**Flusso medio uniforme
(variabili medie costanti) con
velocità $U\mathbf{i}_1$**

$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x_1}$$

f =forza di volume non stazionaria,

q =sorgente di volume non stazionaria

Rumore Aeroacustico

Fondamenti di acustica nei flussi

Wave like solution

La soluzione dell'equazione delle onde omogenea, con fluido in quiete e in assenza di superfici solide ha la forma:

$$\hat{p}' = \hat{P} e^{j(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad \left| \vec{k} \right| = \frac{\omega}{c_0}$$

- Ottenuta nelle ipotesi di **soluzione armonica nel tempo** o applicando la **trasformata di Fourier** all'equazione delle onde.
- E' un'onda piana, le superfici a fase costante sono piani ortogonali alla direzione di propagazione.
- L'equazione delle onde omogenea è lineare → la soluzione generale è una combinazione lineare di onde piane

$$\Phi = \vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t - \Phi_0 \quad \Phi_0 = \arctg(\text{Im}(\hat{P}) / \text{Re}(\hat{P}))$$

La soluzione generale in caso di flusso non in quiete e con presenza di superfici solide è in generale data dalla sovrapposizione di soluzioni semplici che soddisfano opportune condizioni al contorno dette **autofunzioni** o **MODI**:

$$\hat{p}' = \hat{P}_{\omega, \alpha}(\vec{x}) e^{-j\omega t} \quad \alpha : \text{numero ordine dell'autofunzione}$$

Rumore Aeroacustico

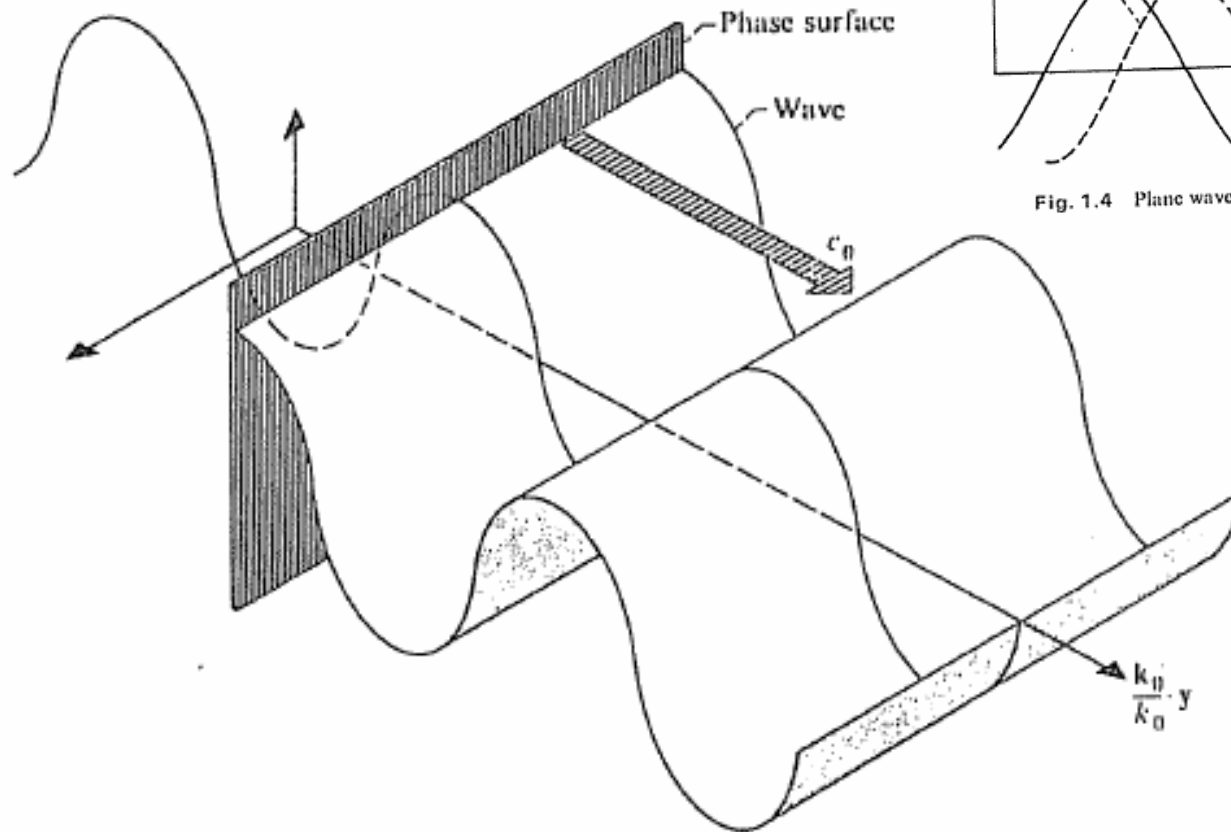


Fig. 1.5 Motion of phase surfaces for plane wave.

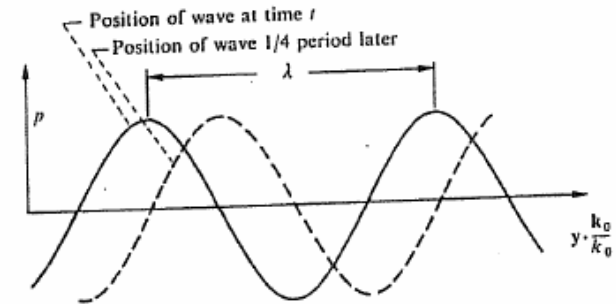


Fig. 1.4 Plane wave propagation 1/4 period after time t .

Rumore Aeroacustico

Fondamenti di acustica nei flussi

Ex: Acustica dei Condotti

La soluzione dell'equazione delle onde omogenea, con flusso uniforme lungo la direzione z in un condotto nell'approssimazione 1-D ($D/\lambda \ll 1$, onda piana) ha la forma:

$$\hat{p} = \hat{A}e^{j(\omega t - k_+ x)} + \hat{B}e^{j(\omega t + k_- x)} \quad k_{\pm} = \frac{\omega}{c_0 \pm U} = \frac{\omega}{c_0(1 \pm M_0)}$$

La soluzione dell'equazione delle onde omogenea, con flusso uniforme lungo la direzione z in un **condotto cilindrico** è una serie di modi che assumono la forma:

$$p' = A_{mn}^{\pm} e^{(i\omega t + im\theta + ik_{\pm}z)} f_{mn}(r) \quad \hat{p} = R(r)\Theta(\theta)Z(z)e^{j\omega t}$$

$$k_{\pm} = \frac{M_0\omega \mp \sqrt{\omega^2 - c_0^2 \lambda_{mn}^2 (1 - M_0^2)}}{c_0(1 - M_0^2)} \quad \frac{1}{rR} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2\Theta} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \theta^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = -\frac{\omega^2}{c^2}$$

$f_{mn}(r) = J_m(\lambda_{mn} r)$ **Radial pressure function:** definita dalla geometria e dalle condizioni al contorno (funzione di Bessel del !° tipo)

$\omega_c^2 = c_0^2 \lambda_{mn}^2 (1 - M_0^2)$ Cut-on frequency

Rumore Aeroacustico

SORGENTI SEMPLICI

Soluzione equazione delle onde in coordinate sferiche

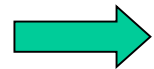
$$a(t) \ll Tc_0 \equiv \lambda$$

$$\frac{a'(t)}{a(t)} \ll 1$$

“small” Pulsating-Sphere

$$u|_a = Q(t) / 4\pi a(t)^2 \text{ sulla sfera}$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p$$



$$p' = \frac{1}{R} f_{\pm} \left(t \mp \frac{R}{c_0} \right)$$

$$p' = \frac{\rho_0}{4\pi R} \frac{\partial}{\partial t} Q \left(t - \frac{R}{c_0} \right)$$

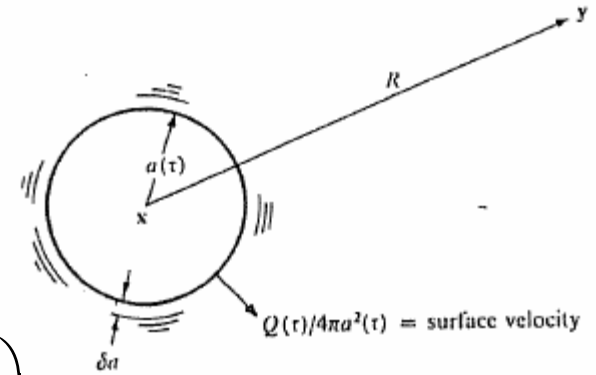


Fig. 1.12 Pulsating sphere.

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\gamma \quad \rightarrow$$

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} Q(t) \delta(\vec{x} - \vec{y})$$

Sorgente di Volume unsteady in $\mathbf{y} = \mathbf{x}$

FAR-FIELD $kR \gg 1$

$$I = p' \vec{u}' = \frac{p'^2}{\rho_0 c_0}$$

$$\bar{I} = \frac{\overline{p'^2}}{\rho_0 c_0} \equiv \frac{p'^2_{RMS}}{\rho_0 c_0}$$

$$p'(\vec{x}, t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} P_n(\vec{x}) e^{-j\omega_n t}$$

$$\bar{I} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} |P_n|^2$$

Periodic source

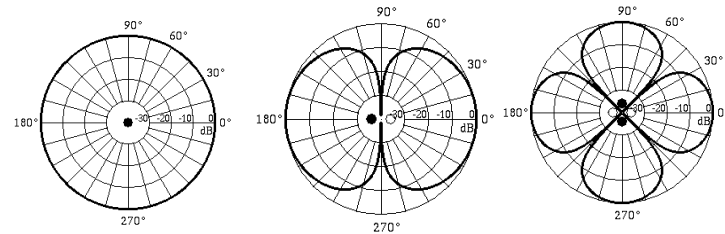
$$\bar{I} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pp}(\omega) d\omega$$

$$\bar{I}_{\omega} = S_{pp}(\omega) / \rho_0 c_0$$

Time stationary source

Rumore Aeroacustico

- Esistono altre forme di sorgenti semplici: **dipoli** e **quadrupoli** costituiti da una specifica distribuzione di sorgenti semplici tipo monopolo e da differenti caratteristiche del campo acustico radiato.

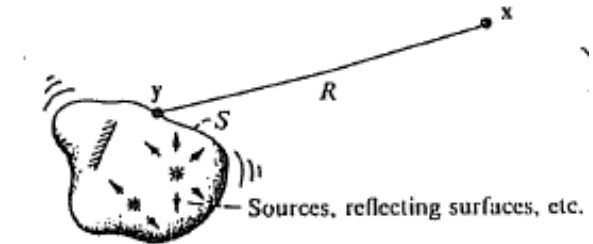


- E' possibile dimostrare che ogni campo acustico in una regione \mathbf{v} delimitata da \mathbf{S} –che soddisfi opportune condizioni nel suo dominio di definizione- al quale siano imposte condizioni al contorno lineari (relazioni tra p' e le sue derivate) può essere pensato come sovrapposizione dei campi generati da una distribuzione di sorgenti di volume in \mathbf{v} e superficiali su \mathbf{S}

EX: Fluido in quiete, assenza di pareti solide, γ distribuzione volumetrica di sorgenti acustiche concentrata

Free-Space

$$p' = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\gamma\left(\vec{y}; t - \frac{R}{c_0}\right)}{R} d\vec{y}$$



Ogni elemento di volume emette come una point-source

- Una sorgente sonora lontana dal punto di misura $kR \gg 1$ e confinata in una regione di spazio la cui dimensione caratteristica L sia tale che: $kL \ll 1$ può essere espressa come una somma di sorgenti tipo **multipolo**

Rumore Aeroacustico

Analogie Acustiche – Chu & Kovaszny (1958)

Le fluttuazioni presenti in un gas possono essere suddivise in tre categorie (modi):

- **Vortical mode:** incomprimibile e rotazionale, è dovuto alla viscosità ed è trasportato per convezione.
- **Acoustic mode:** irrotazionale e isentropico, associato alla comprimibilità, si propaga come suono.
- **Entropy mode:** dovuto alla conduttività termica, è trasportato per convezione.

$$q_j = q_j^0 + q_j' \quad q_j' = q_j^{(1)} + q_j^{(2)} + \dots$$

Espansione delle variabili nelle loro componenti steady e unsteady, espansione in ordini di grandezza differenti

$$\Lambda(q_1^{(1)}, q_2^{(1)}, \dots) = S$$

Equazione differenziale della gas-dinamica

➤ L' approssimazione al primo ordine non riesce a descrivere l' accoppiamento dei modi che avviene in presenza di gradienti delle grandezze medie e delle superfici solide

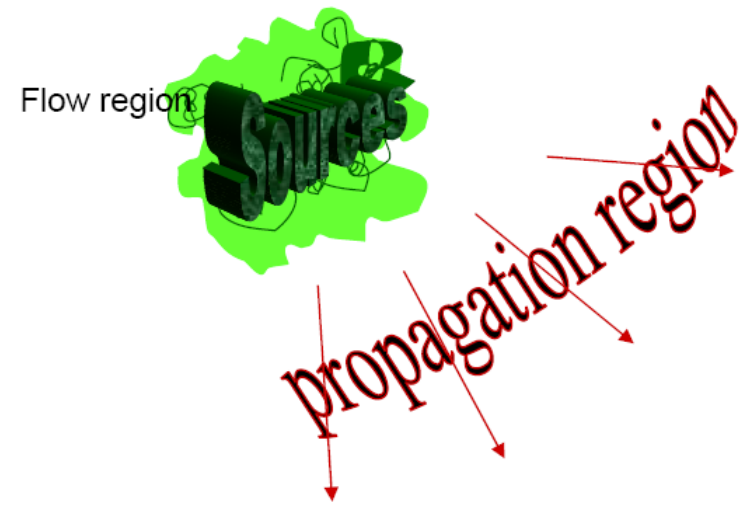
$$\Lambda(q_1^{(2)}, q_2^{(2)}, \dots) = -NL(q_i^{(1)} \times q_j^{(1)})$$

approssimazione al 2° ordine

Rumore Aeroacustico

Analogie Acustiche

- **Obiettivo:** determinare il rumore irradiato da un'instazionarietà localizzata
- **Analogia:** sorgente complessa = somma di sorgenti acustiche equivalenti
- Poi si calcola il campo irradiato risolvendo un'equazione delle onde
- **Difficoltà:** Caratterizzazione delle sorgenti
 - ⇒ Considerazioni teoriche
 - ⇒ Analisi CFD
 - ⇒ Analisi sperimentali



$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_j^2} = \gamma$$

Rumore Aeroacustico

Analogie Acustiche – Analogia di Lighthill

fluido omogeneo con zone localizzate di flusso turbolento, \mathbf{c} e ρ costanti, in assenza di superfici solide

➤ Da equazioni di Navier-Stokes:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_j^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left[\rho V_i V_j + (P - c_0^2 \rho) \delta_{ij} - \tau_{ij} \right] \rightarrow \text{Tensoriale di Lighthill, } T_{ij}$$

➤ Elevato Re $\longrightarrow \tau_{ij} \ll \rho V_i V_j$

➤ Effetti termici trascurabili $\longrightarrow (P - c_0^2 \rho) \delta_{ij} \ll \rho V_i V_j$

$$|\mathbf{v}'_a| \ll |\mathbf{v}'_t|, \mathbf{V}_0 = 0 \longrightarrow \begin{cases} V_i \cong v'_{ti} \\ \rho \cong \rho_0 \end{cases}$$

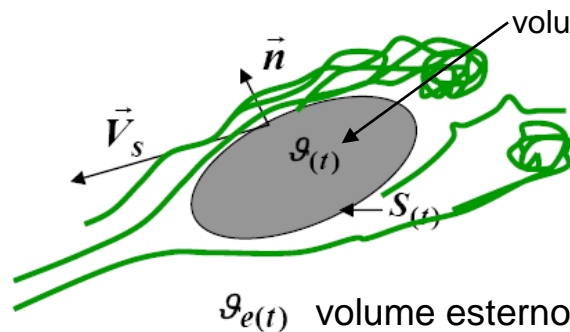
$$T_{ij} \cong \rho_0 v'_{ti} v'_{tj}$$

Rumore dovuto alla **turbolenza** (sorgente quadrupolare)

Rumore Aeroacustico

Analogie Acustiche – Formulazione di Ffowcs Williams e Hawkings

Ffowcs Williams e Hawkings (1969) hanno esteso l'analogia di Lighthill considerando la presenza di superfici solide all'interno di una zona confinata ed **includendo il loro effetto nei termini di sorgente dell'equazione delle onde.**



- \vec{n} = versore normale alla superficie del corpo;
- \vec{V}_s = campo di velocità di un punto appartenente alla superficie.

$S(t)$ = funzione che rappresenta la superficie del corpo (in movimento);

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_j^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sigma_{ij}' \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_0 V_{si} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$$

$f(\mathbf{x}, t)$ = legge di moto del corpo;
 $\sigma_{ij}' = \tau_{ij} - (P - P_0) \delta_{ij}$
 δ = funzione delta di Dirac
 V_s = velocità normale alla superficie.

distribuzione volumetrica di sorgenti (**quadrupoli**) esterna al corpo e dovuta alla turbolenza

distribuzione superficiale (**dipoli**) dovuta all'interazione tra il flusso e il corpo (**loading noise**).

distribuzione superficiale (**monopoli**) dovuta alla cinematica del corpo (**thickness noise**).

Rumore Aeroacustico



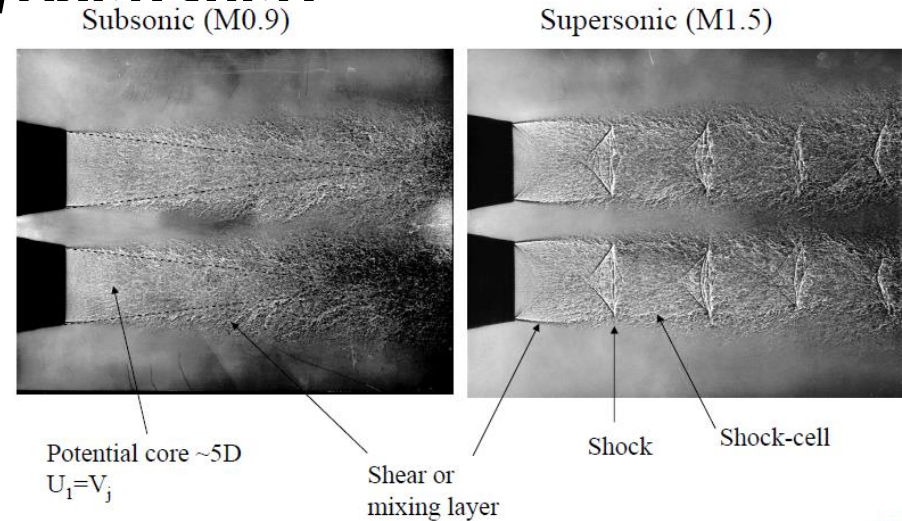
MECCANISMI DI GENERAZIONE

Rumore Aerodinamico

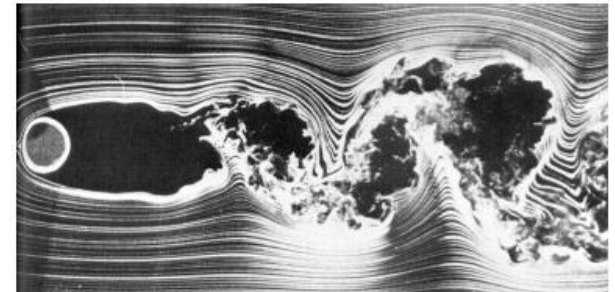
Meccanismi di Generazione

agli sforzi di taglio e al mescolamento tra il getto ad elevata velocità e l'aria ambiente in quiete. Non c'è il contributo di alcuna superficie solida.

Sorgente quadrupolare: $P \propto U^8$



Vortex-shedding noise: Dovuto all'interazione tra flusso e un corpo non aerodinamico. Produce **rumore a banda larga** e **componenti tonali** (toni Eoliani) associate alla frequenza di distacco dei vortici di Von Karman che generano forze non stazionarie.



Airfoil broadband noise

Dovuto all'interazione tra un flusso turbolento e il leading edge di un profilo alare.



Rumore Aeroacustico

Meccanismi di Generazione

Trailing edge noise: Si ha generazione di solo trailing edge noise quando un profilo alare è immerso in un flusso laminare. Ad una certa distanza dal leading edge lo strato limite diventa turbolento. La generazione di rumore avviene al trailing edge, dovuta **all'istantaneo cambiamento di condizioni al contorno**; il meccanismo di generazione è soltanto quello di mutua interazione tra vortici.



Rumore Aeroacustico

Esempio:

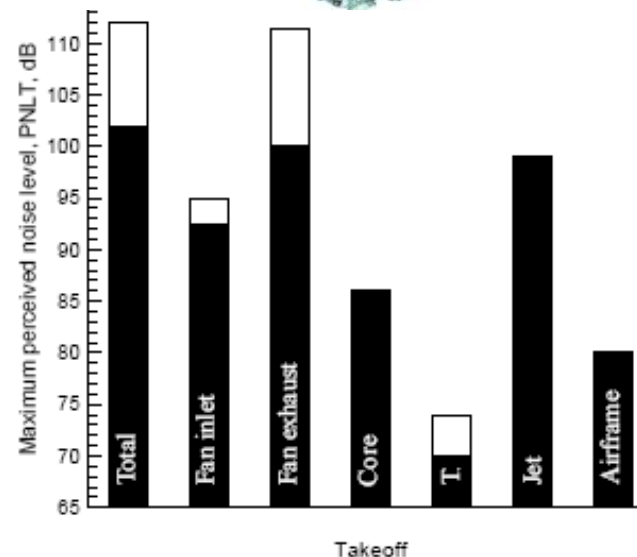
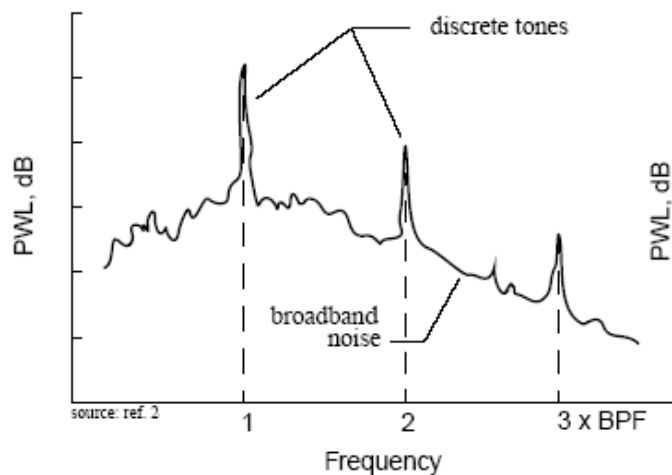
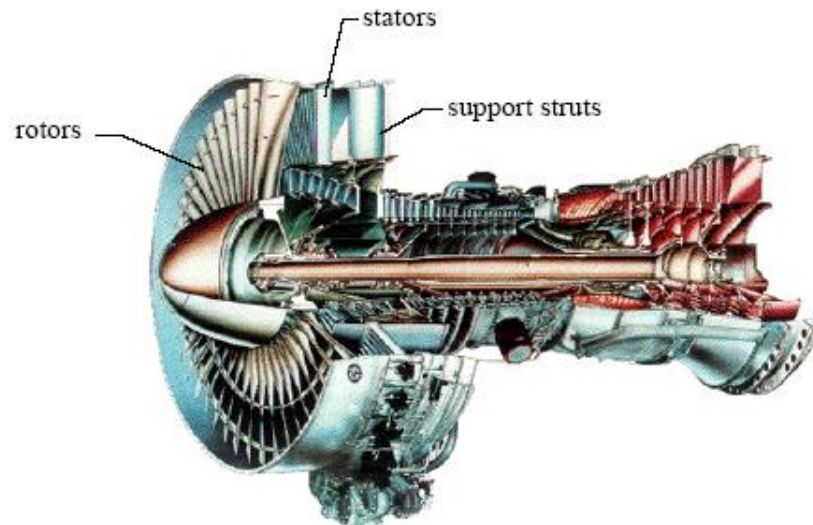
Rumore generato da motori aeronautici

• Rumore generato internamente:

- Fan
- Compressore
- Turbina
- Combustione (core-noise)

• Rumore generato esternamente

- Jet noise
- Airframe noise



Rumore Aeroacustico



Fig. 3A — Pressure distribution

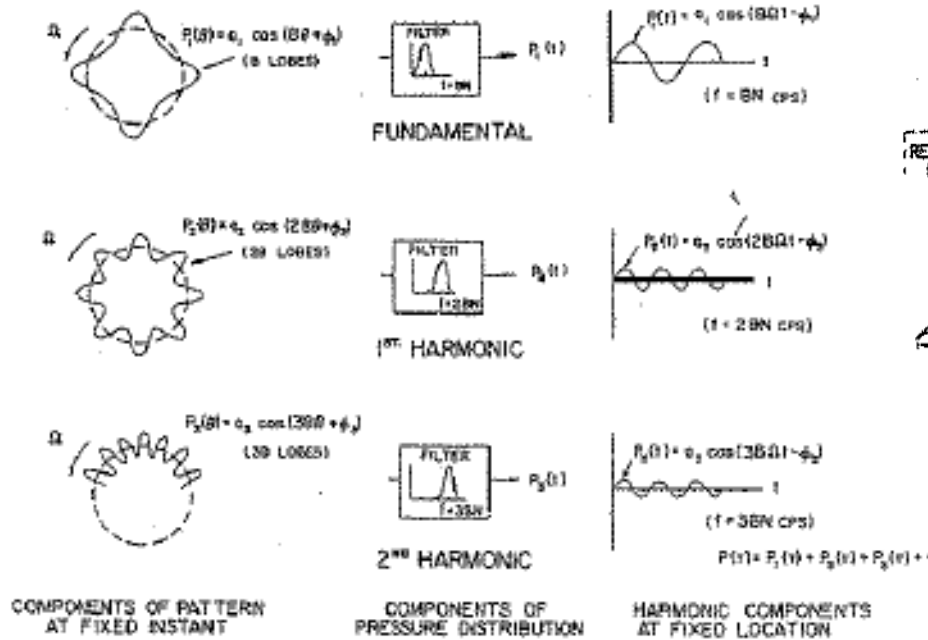


Fig. 3B — Pressure distribution

Tyler & Sofrin Axial Flow Compressor Noise Studies(1961)

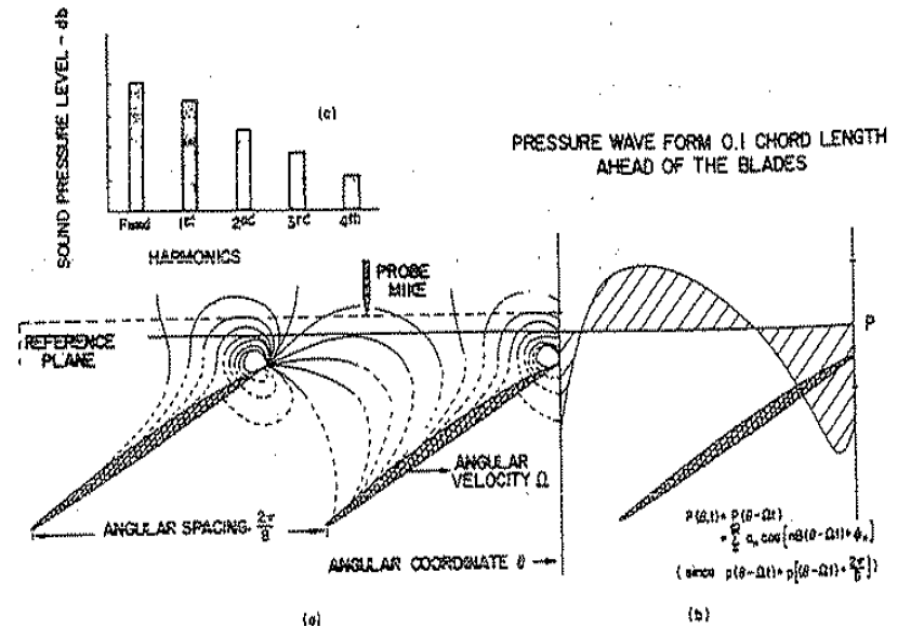


Fig. 2 — Rotor pressure field characteristics

Rumore Aeroacustico

Teoria di Tyler & Sofrin (1961)

Per una particolare armonica della frequenza di passaggio pala il campo di pressione dovuto all'interazione rotore statore è una sovrapposizione di un numero infinito di campi rotanti

$$p(r, x, \theta, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} a_{n\mu} p_{\mu}(r) \cos[m(\theta - \omega t) + k_{x\mu} x + \phi_n(r)]$$

Il numero di lobi circolari (ordine modale circolare m) che possono essere prodotti per un singolo stadio è definito da

$$m = nB - kV$$

n : numero di armonica BPF

k : numero intero

B : numero pale rotore

V : numero di vani statorici



Rumore Aeroacustico

AEROACUSTICA SPERIMENTALE

Rumore Aeroacustico

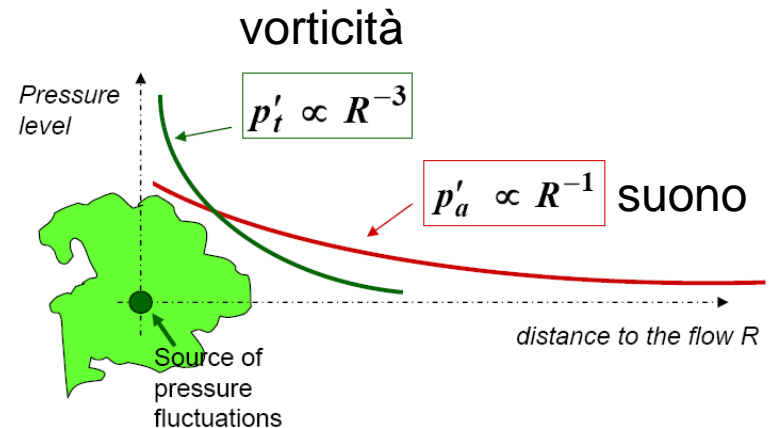
Sound e pseudo-Sound

Quando il rumore è generato da un flusso instazionario, solo una piccola parte dell'energia associata alle fluttuazioni di pressione viene irradiata come suono (“**sound**”). Per la maggior parte, queste fluttuazioni sono di tipo aerodinamico, cioè associate a moti di bilanciamento indotti da variazioni nell'inerzia dei vortici, le quali prendono il nome di “**pseudo-sound**”

$$p' = p_t' + p_a'$$

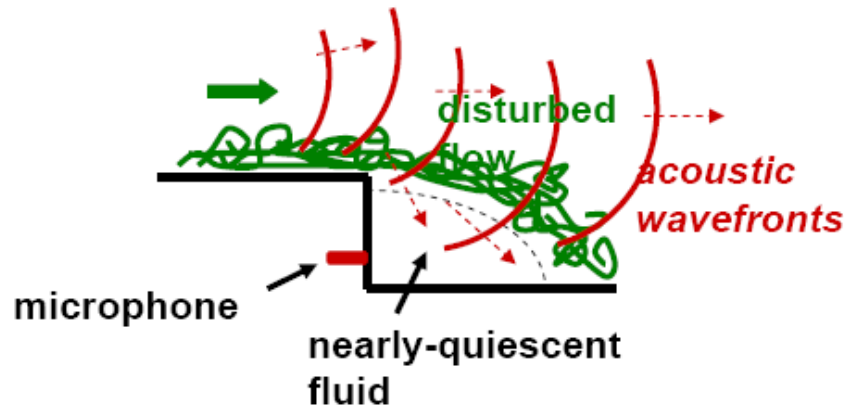
Se il mezzo in cui si propaga il suono è in quiete, allora il campo di pressione vicino alla sorgente (**near-field**) sarà dominato dallo pseudo-sound, mentre a sufficiente distanza (**far-field**) si troverà soltanto la componente acustica

$kR \rightarrow \text{inf.} = \text{far field}$

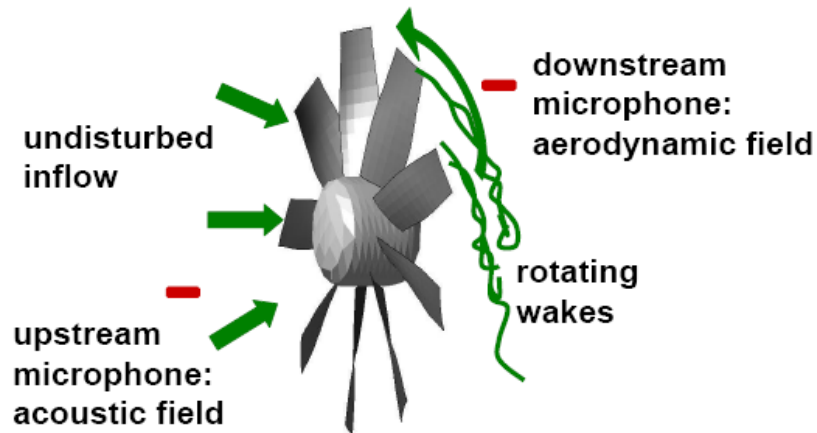


Rumore Aeroacustico

Misure Acustiche - Esempi



Backward facing step

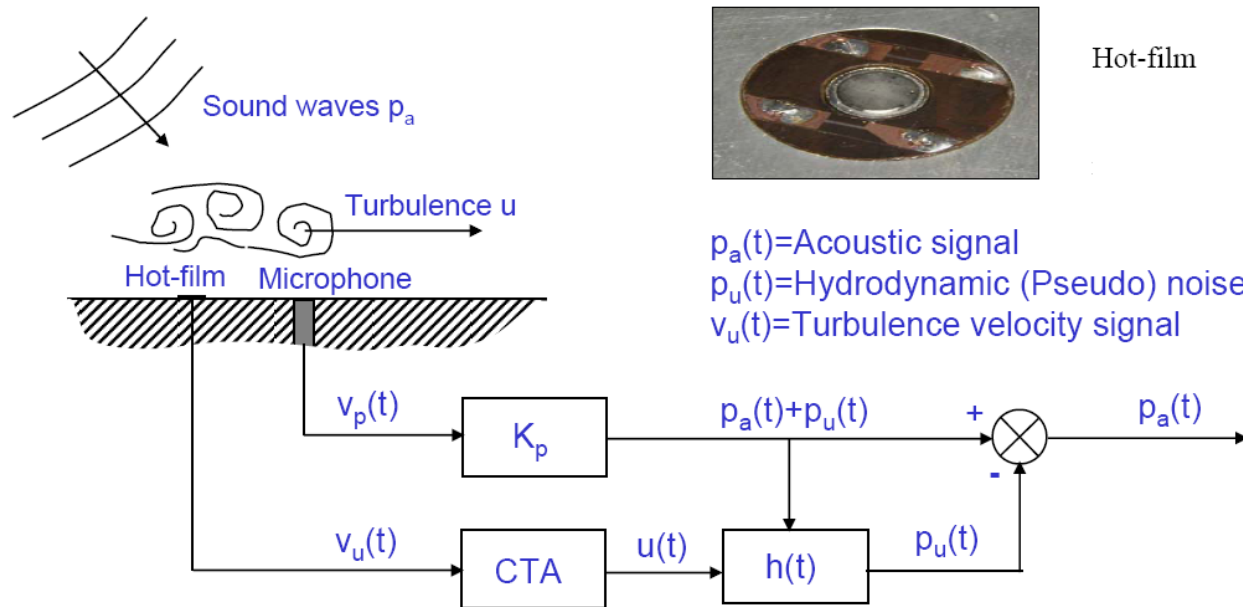


Near-field di un fan

Rumore Aeroacustico

Misure Acustiche - Esempi

La parte **non coerente** può essere estratta anche attraverso l'utilizzo di hot-films che possono essere montati attorno al diaframma del microfono.



Rumore Aeroacustico

Misure Acustiche – Esempi: Potenza Acustica Secondo Metodo Standard

- ❑ La norma internazionale **ISO 5136** descrive la tecnica standardizzata di misura della potenza acustica generata da fan in condotti (ducted fan) mediante misure ***in-duct***
- ❑ La norma si applica a macchine intubate con diametro compreso tra 0.150m e 2m, con velocità del flusso tra 15 e 40 m/s, temperatura tra -50°C e +70°C.
- ❑ Le misure vengono effettuate in un condotto connesso alla macchina e provvisto di terminazione anecoica. La norma specifica le dimensioni e la geometria del canale.
- ❑ Il flusso deve essere uniforme altrimenti dovrebbe essere inserito un raddrizzatore.
- ❑ Le condizioni operative della macchina devono essere misurate seguendo la norma ISO5801.

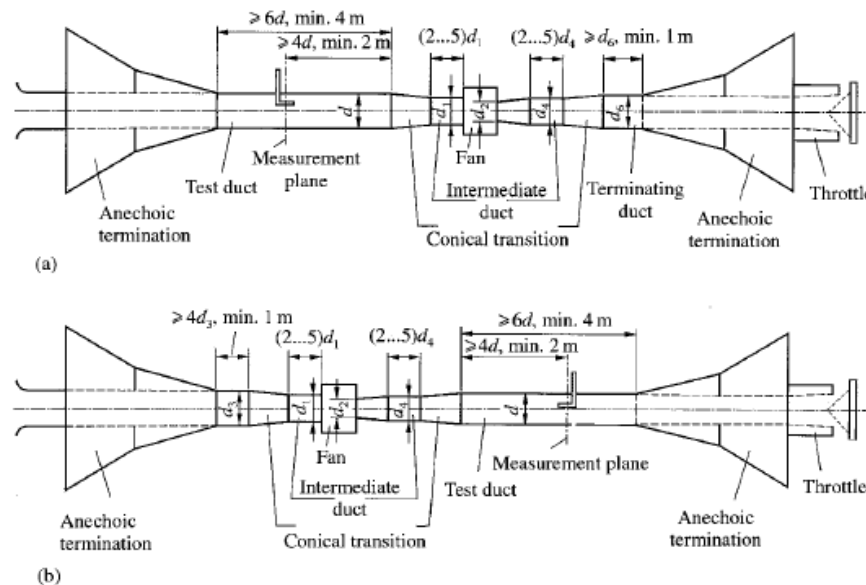


Figure 5. Test arrangement for the in-duct method ISO 5136:1990 [1]: (a) Sound measurement on the fan inlet side (b) Sound measurement on the fan outlet side.

Rumore Aeroacustico

Misure Acustiche - Esempi

- ❑ Le misure di rumore vengono effettuate in una posizione assiale predeterminata mediante **microfono** provvisto di **sampling tube** per ridurre il contributo aerodinamico. La norma richiede almeno tre misure in direzione circonferenziale a un raggio fissato.

- ❑ Viene quindi calcolato il livello sonoro medio:

$$\bar{L}_p = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}}}{n} + C$$

Dove n è il numero di misure in senso circonferenziale, L_{pi} è l'SPL medio misurato alla i-esima posizione di misura e C è un fattore di correzione per la risposta in frequenza.

- ❑ C è dato dalla somma di diversi coefficienti utilizzati per correggere la risposta in frequenza del microfono in base alla calibrazione, agli effetti del flusso medio e della propagazione di modi non piani nel condotto.
- ❑ La potenza può essere calcolata come segue:

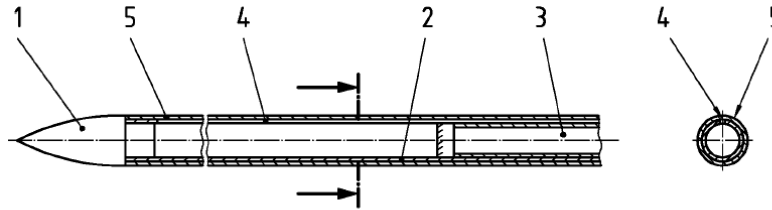
$$L_W = \bar{L}_p + 10 \log \frac{S}{S_0} - 10 \log \frac{\rho c}{(\rho c)_0}$$

Dove S è l'area della sezione del condotto di test e ρc è l'impedenza caratteristica, 0 indica i valori di riferimento uguali a 1m^2 e 400Ns/m^2 rispettivamente

- ❑ L'analisi viene effettuata in bande di 1/3 di ottava e si applica al range 50Hz-10kHz

Rumore Aeroacustico

Misure Acustiche - Esempi



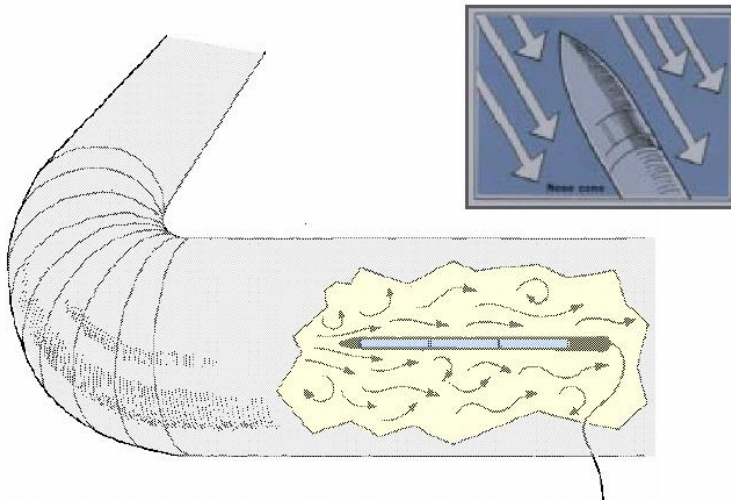
Key

- 1 nose cone
- 2 slit-tube
- 3 microphone
- 4 slit
- 5 porous material

Sampling tube – fonte: ISO 5136

Specifica delle misure *IN-DUCT*

*Attenuazione di 10dB delle
fluttuazioni turbolente*



Nose-cone – fonte: ISO 5136

Foam-Ball – fonte: ISO 5136

Flush-Mounted mic.+analisi di
coerenza

Rumore Aeroacustico

- Esistono una varietà di tecniche di misura differenti utilizzate in aeroacustica:
 - ⇒ Misure di acustica esterna
 - ➔ ARRAY DI MICROFONI
 - ⇒ Misure in-duct
 - ➔ ARRAY DI MICROFONI E/O DI SENSORI DINAMICI DI PRESSIONE

- Tipologie di analisi
 - ⇒ Localizzazione delle sorgenti:
 - ➔ ACOUSTIC BEAMFORMING
 - ➔ ACOUSTIC HOLOGRAPHY
 - ⇒ Analisi del campo acustico radiato ON/DUCT
 - ➔ ANALISI MODALE RADIALE

- Problematiche delle misure in aeroacustica
 - ⇒ Doppler shift
 - ⇒ Effetto di convezione del flusso medio
 - ⇒ Rifrazione dello strato limite

Rumore Aeroacustico

MICROFONI-Caratteristiche

GRANDEZZA MISURATA:

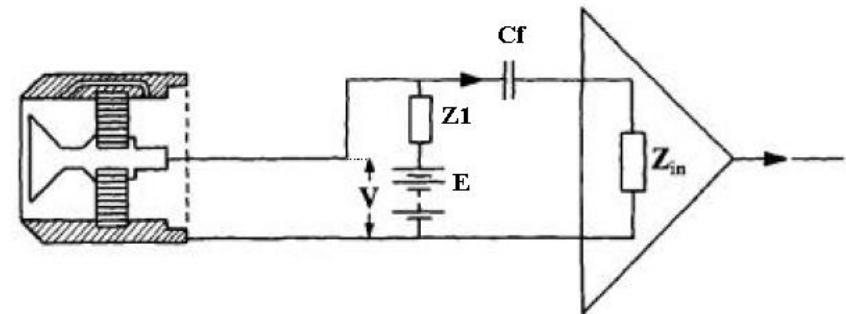
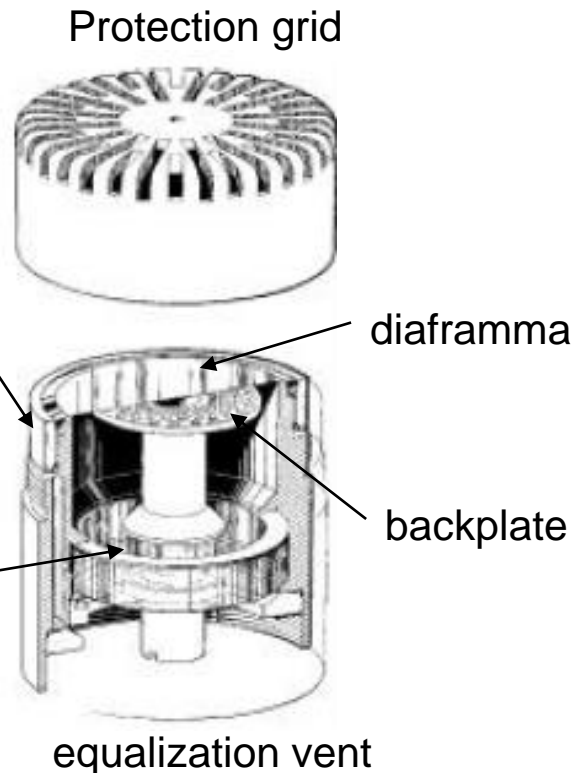
Pressione acustica corretta in funzione del tipo di campo di pressione atteso

CARATTERISTICHE:

- **Sensibilità**
 - **Risposta in frequenza**
 - **Range dinamico**
 - **Range di frequenza**
 - **Campo di pressione**
 - **Direttività**
 - **CLASSIFICAZIONE:**
 - **Principio di funzionamento**
 - **Pressure field**
 - **Taglia**
- curva di risposta in frequenza piatta in un ampio intervallo di frequenza
 - bassa distorsione
 - rumore interno molto basso
 - ampio range dinamico
 - elevata sensibilità
 - elevata stabilità, in molteplici condizioni ambientali

Rumore Aeroacustico

Microfoni capacitivi: principio di funzionamento



$$\left. \begin{aligned} Q &= CV \\ C &= \epsilon \frac{A}{d} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\epsilon A} d \Rightarrow \Delta V = \frac{Q}{\epsilon A} \Delta d$$

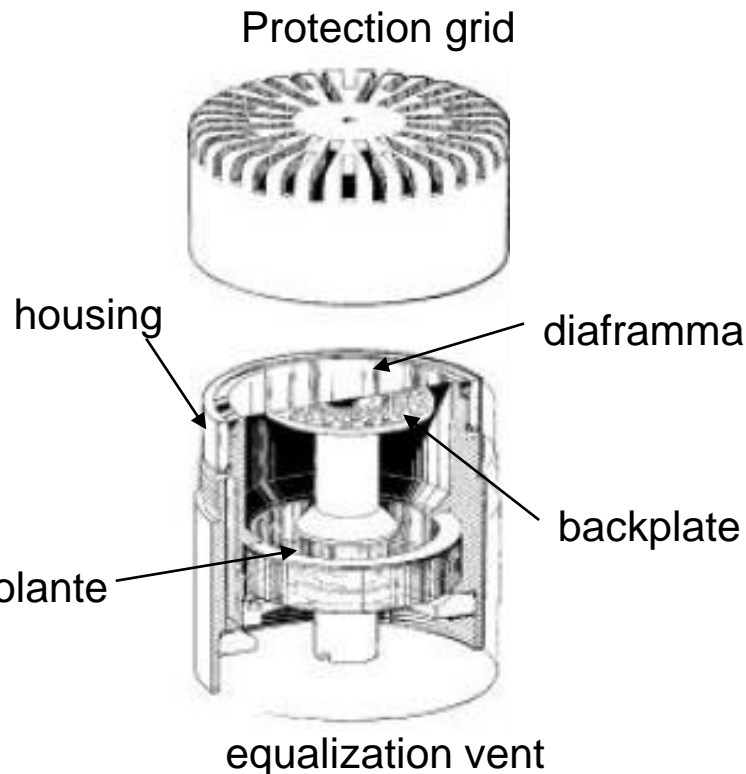
- C = capacità del condensatore;
- ϵ = costante dielettrica dell'aria;
- A = area del condensatore (piano);
- d = distanza tra le armature del condensatore

Diameter of diaphragm	Pressure (level re 20 μ Pa)	Diaphragm's movement
12.5mm	1Pa (94dB)	5nm (5 x 10 ⁻⁹ m)
12.5mm	0.02Pa (60dB)	1 Å (10 ⁻¹⁰ m)

taglie classiche : 1", 1/2", 1/4", 1/8"

Rumore Aeroacustico

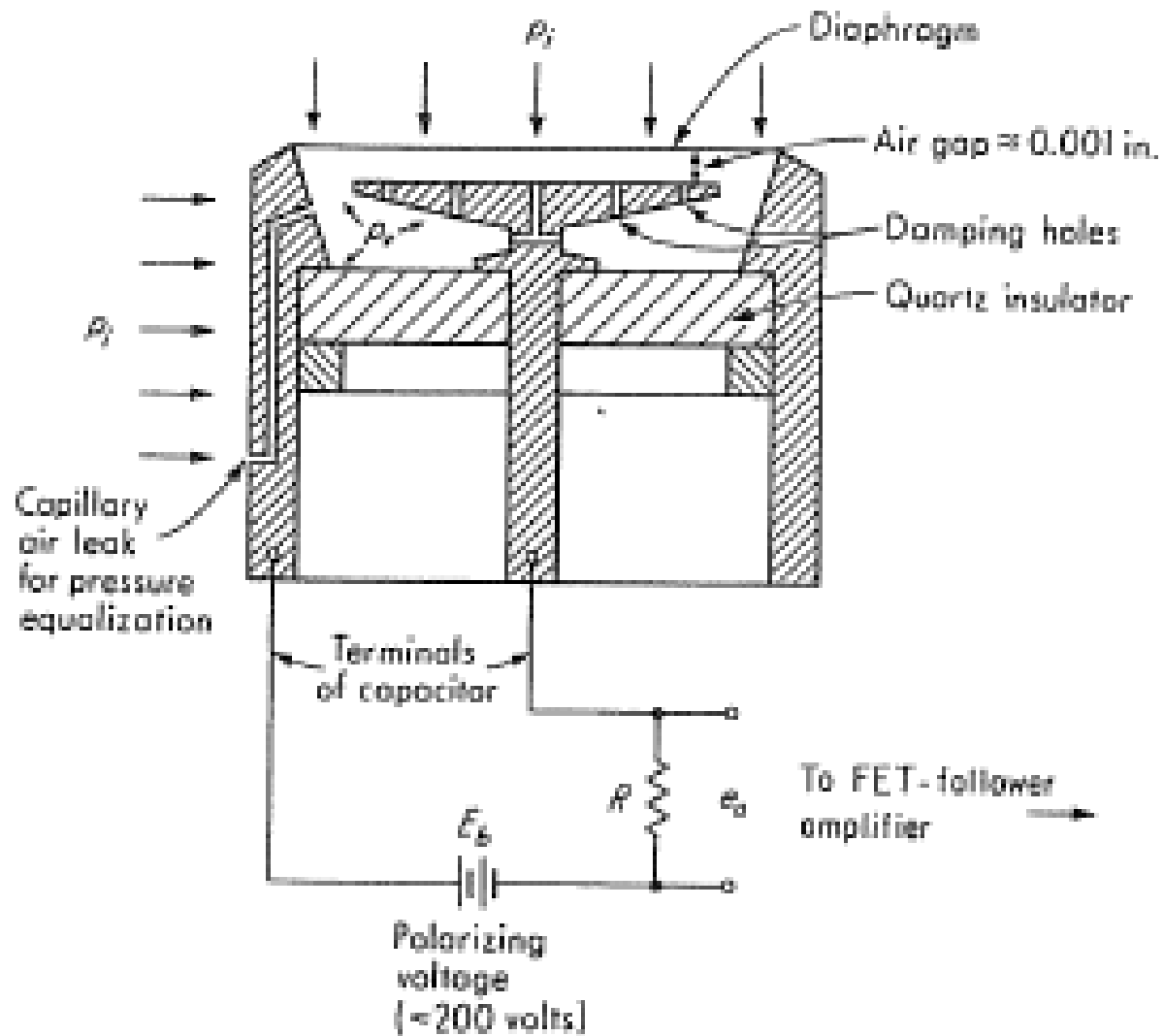
Microfoni



- Distanza tra le armature: 15-30 μm
- Spessore diaframma: 1.5-8 μm
- Capacità: 2-60 pF
- Sensibilità inversamente proporzionale alla tensione del diaframma
- Tensione diaframma fino a 600N/mm²
- Tensione di polarizzazione: 200V tip.
 - Superfici di alta qualità, prive di impurezze
- Air gap 20 μm circa

Rumore Aeroacustico

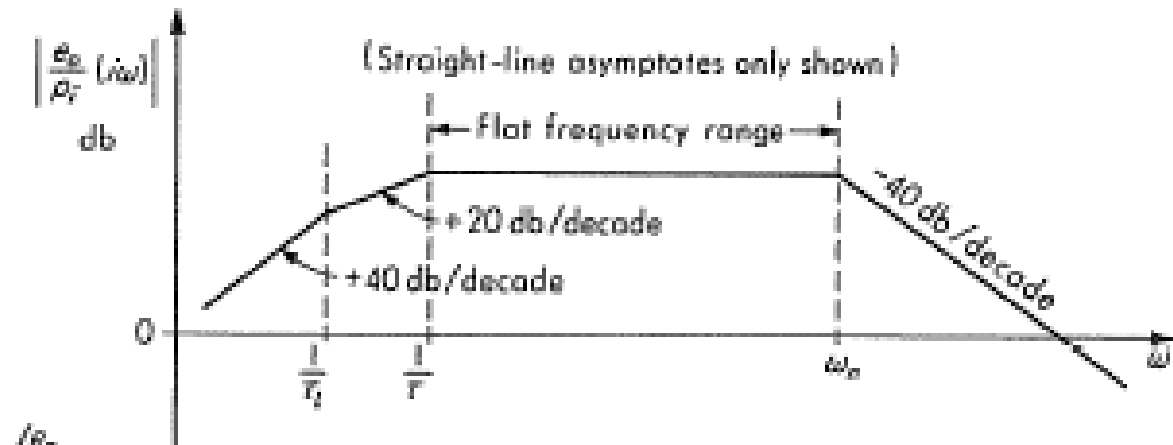
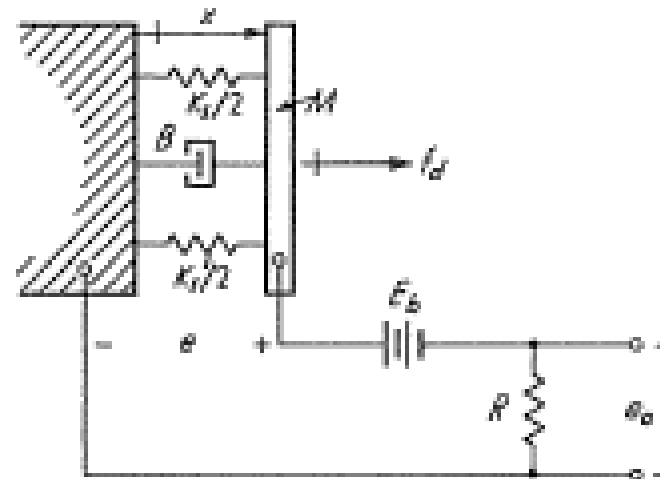
Microfoni



Rumore Aeroacustico

Microfoni

- Rigidezza: diaframma, aria
- Massa: diaframma, aria
- Smorzamento: effetti viscosi
- Capacità: geometria, aria, spostamento



Rumore Aeroacustico

Microfoni: sensibilità

- Espressa in V/Pa o in dB con riferimento a 1V/Pa
- Compresa tra 1 μ V/Pa e 100 μ V/Pa
- In calibrazione è determinata a 250Hz (tipico)
- Deve assicurare:
 - ⇒ Ampiezza del segnale maggiore del rumore di fondo dell'amplificatore
 - ⇒ Ampiezza del segnale non deve sovraccaricare l'amplificatore
- Dipende maggiormente dalla rigidezza del sistema diaframma-cavità:
 - ⇒ Tensione del diaframma
 - ⇒ Diametro del diaframma
 - ⇒ Air gap tra backplate e diaframma

$$S_0 = \frac{V_0 D_{\text{Mic}}^2}{8dT}$$

- V_0 : tensione di polarizzazione [V]
- T : tensione del diaframma [N/m]
- d air gap

Rumore Aeroacustico

Microfoni: curva di risposta in frequenza

- Espressa in dB con riferimento a 1V/Pa@250Hz
- Curva di risposta dinamica del sistema elettro-meccanico costituito da: diaframma+backplate+circuito di polarizzazione e raccolta del segnale
- Limitata in bassa frequenza dal comportamento dinamico del canale di equalizzazione
- A alta frequenza dipende da:
 - ⇒ Massa e rigidità del sistema che determinano la frequenza di risonanza
 - ⇒ Dal progetto del backplate e del'air-gap che determinano lo smorzamento

$$\frac{e_0}{p}(\omega) = f(\omega)$$

Rumore Aeroacustico

Microfoni: curva di risposta in frequenza

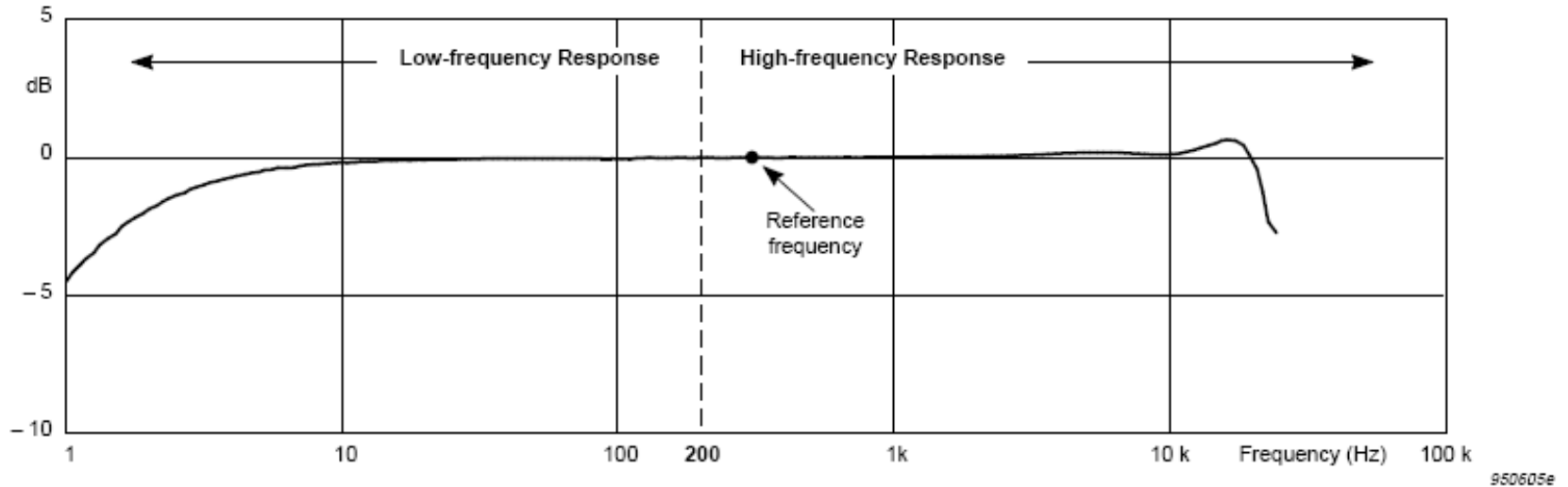


Fig. 3.3 The frequency response curve is composed of an individual high frequency response and a typical low frequency response. The curve is normalised to 0 dB at the reference frequency

Rumore Aeroacustico

Microfoni: sensibilità

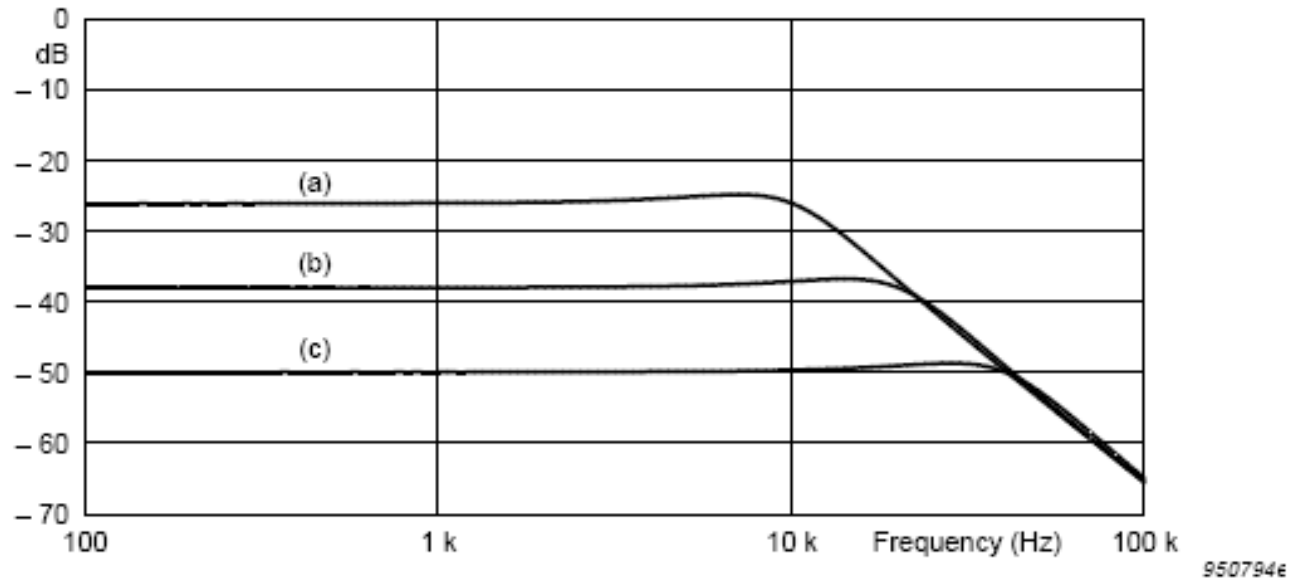
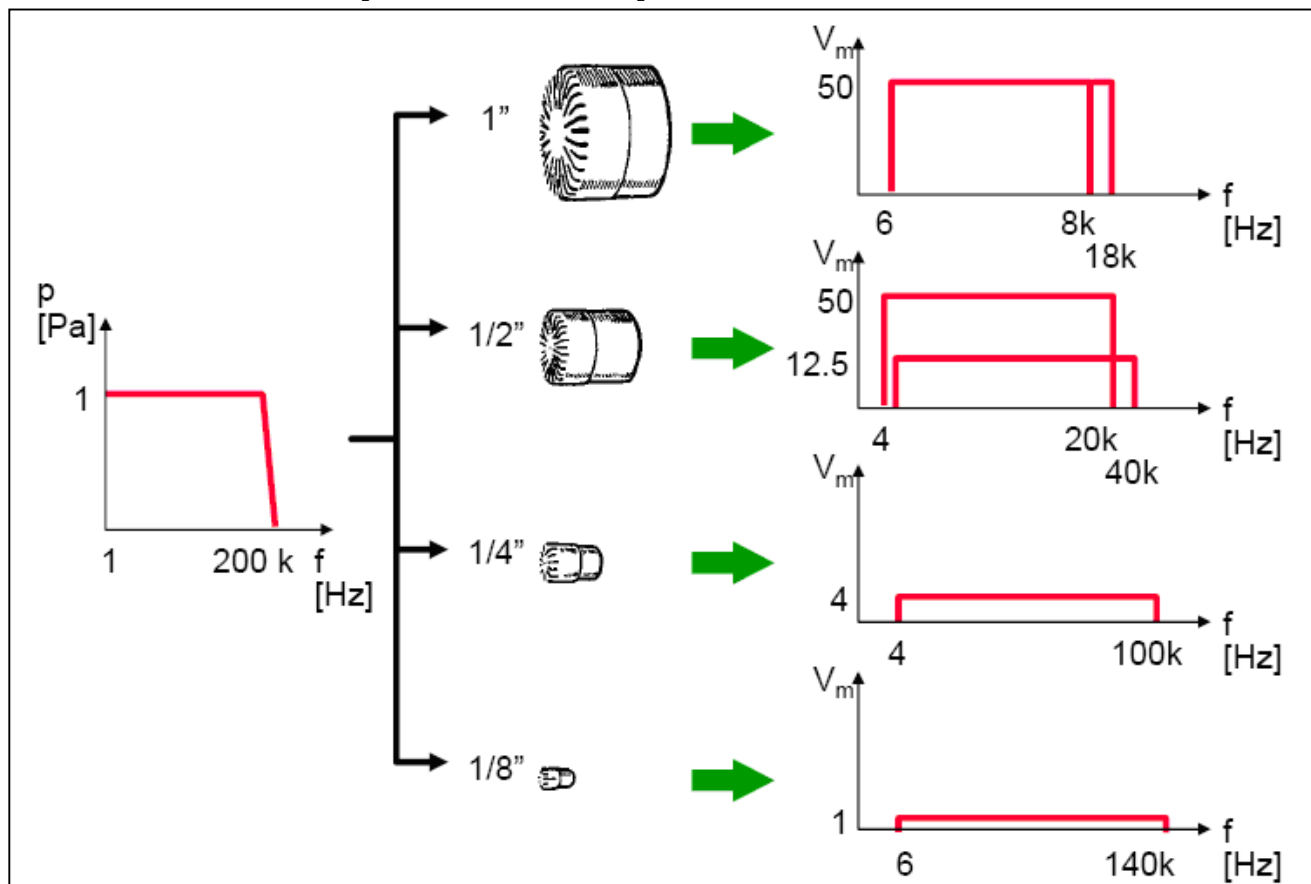


Fig.2.11 Magnitude of frequency responses (pressure). The curves are valid for models of microphone with critical damping and different diaphragm diameters (relative scale: 1 (a), 0.5 (b), 0.25 (c)). The numbers chosen for the calculation approximate the parameters of existing 1", 1/2" and 1/4" microphones

Rumore Aeroacustico

Microfoni

Risposta in frequenza e Sensibilità @ 1Pa

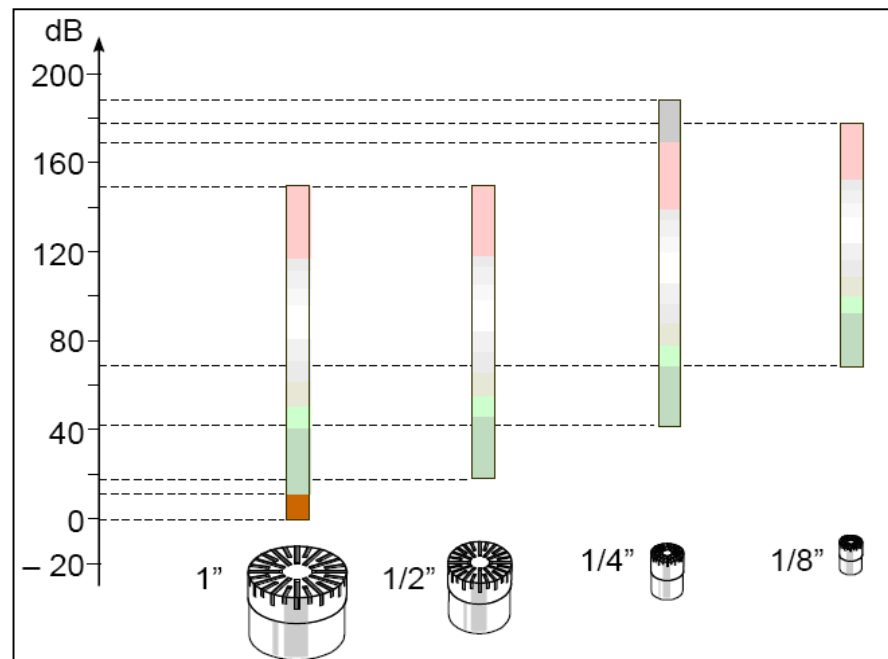


Ex: Freq.range= 3.15Hz to 20kHz (± 2 dB)

Rumore Aeroacustico

Microfoni

Range dinamico

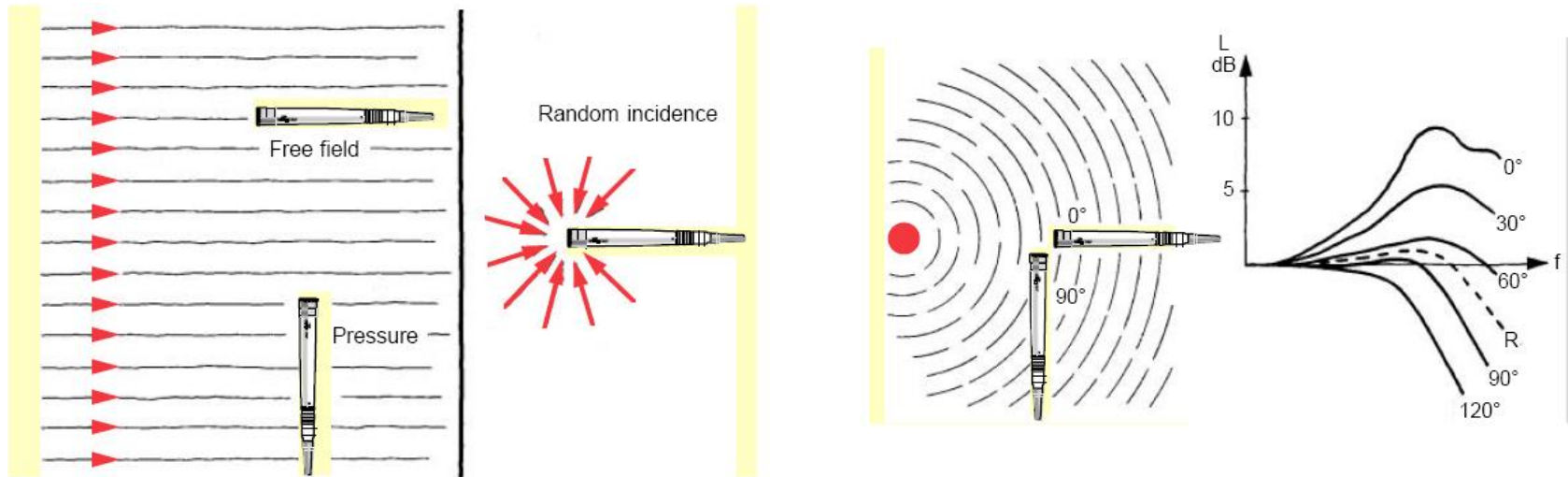


- Limite inferiore: rumore di natura elettrica del preamplificatore e termica del diaframma
- Limite superiore: distorsione non lineare del diaframma, clipping del preamplificatore

Rumore Aeroacustico

Microfoni

Esempio curve per free-field correction



- **Free-field**: questo tipo di microfono ha una risposta in frequenza uniforme per la misura della pressione che si ha in campo libero. Grazie a opportune correzioni infatti il segnale di uscita è la pressione che si avrebbe senza il disturbo dovuto al microfono stesso. Offre le migliori prestazioni se rivolto verso la sorgente

- **Pressure**: misura il reale livello di pressione presente. E' utilizzato nei montaggi a parete, infatti dà i migliori risultati se orientato a 90° rispetto alla direzione di propagazione delle onde sonore.

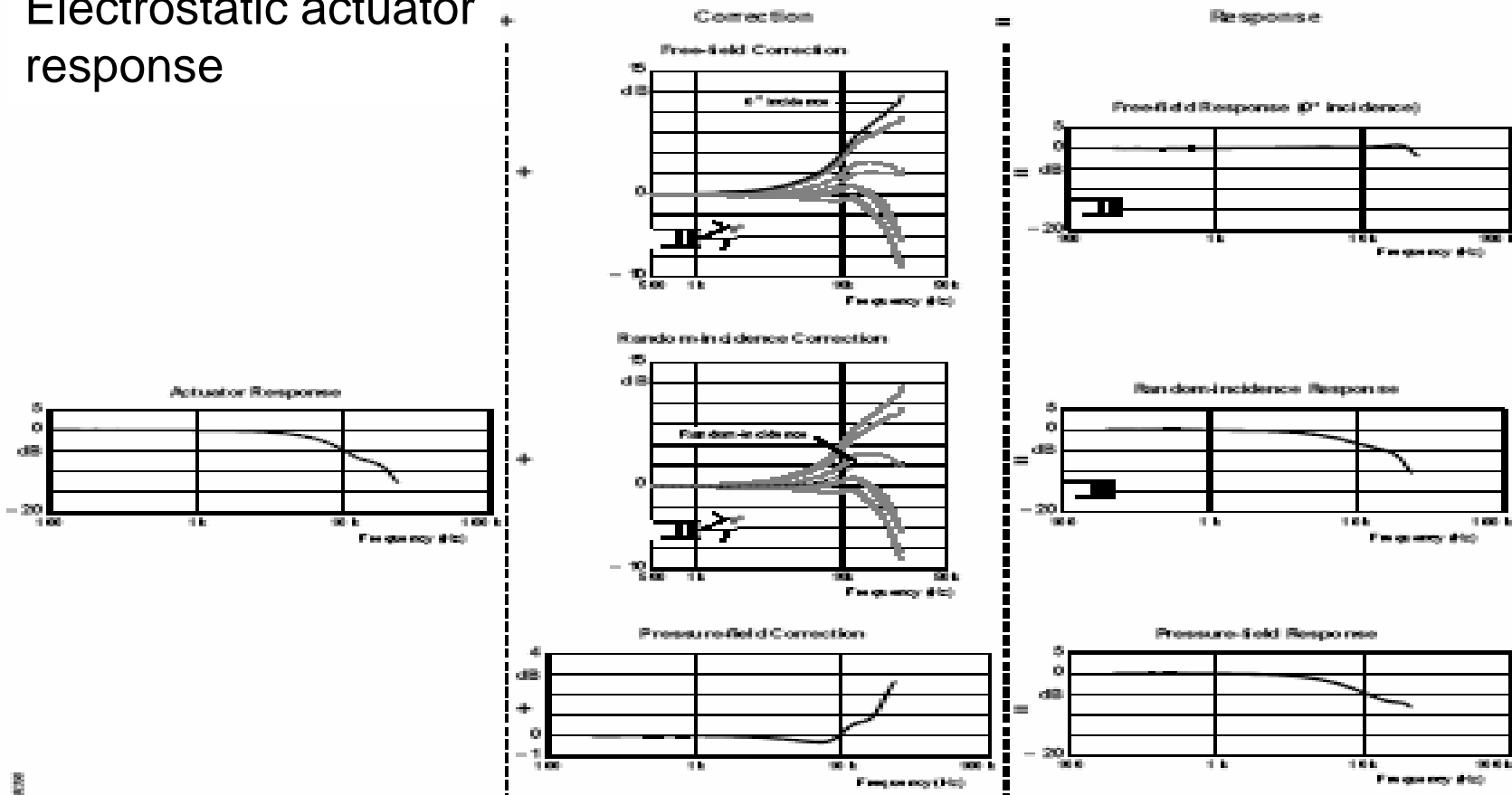
- **Random incidence**: progettato per rispondere uniformemente a segnali provenienti da ogni direzione con la stessa probabilità e livello.

$$\frac{p_d}{p_{undist}} = f\left(\frac{d}{\lambda}\right)$$

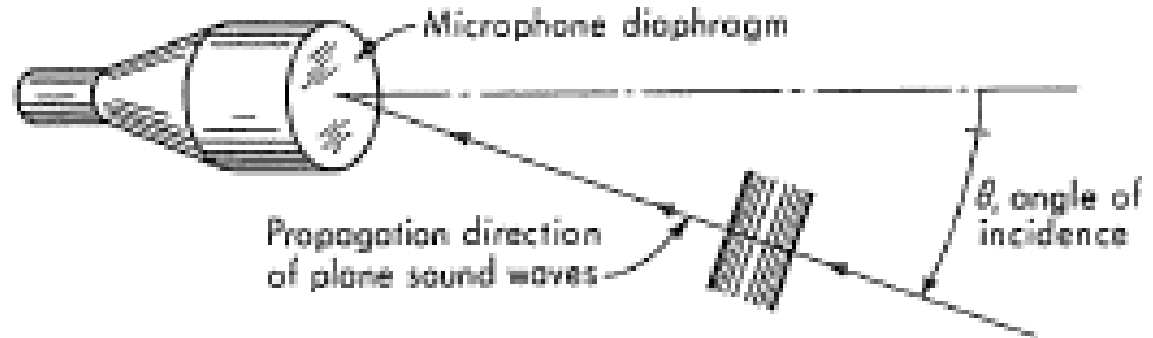
Rumore Aeroacustico

Microfoni- correzioni per tipi di campi di pressione

Electrostatic actuator response

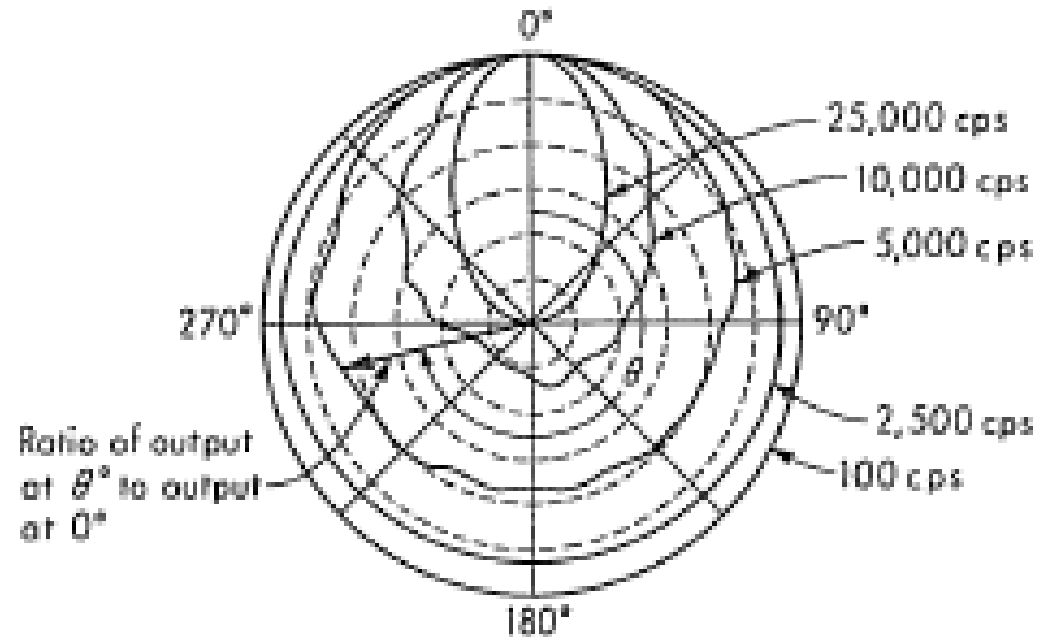


Rumore Aeroacustico



La risposta del microfono a alta frequenza assume caratteristiche direzionali dovute all'interazione del microfono col campo acustico, il fenomeno è aumenta di rilevanza al crescere del rapporto diametro lunghezza d'onda

- $kd < 1$ scattering
- $kd \gg 1$ diffrazione e riflessione



Rumore Aeroacustico

Microfoni – esempio di acquisizione dati

➤ Microfoni:

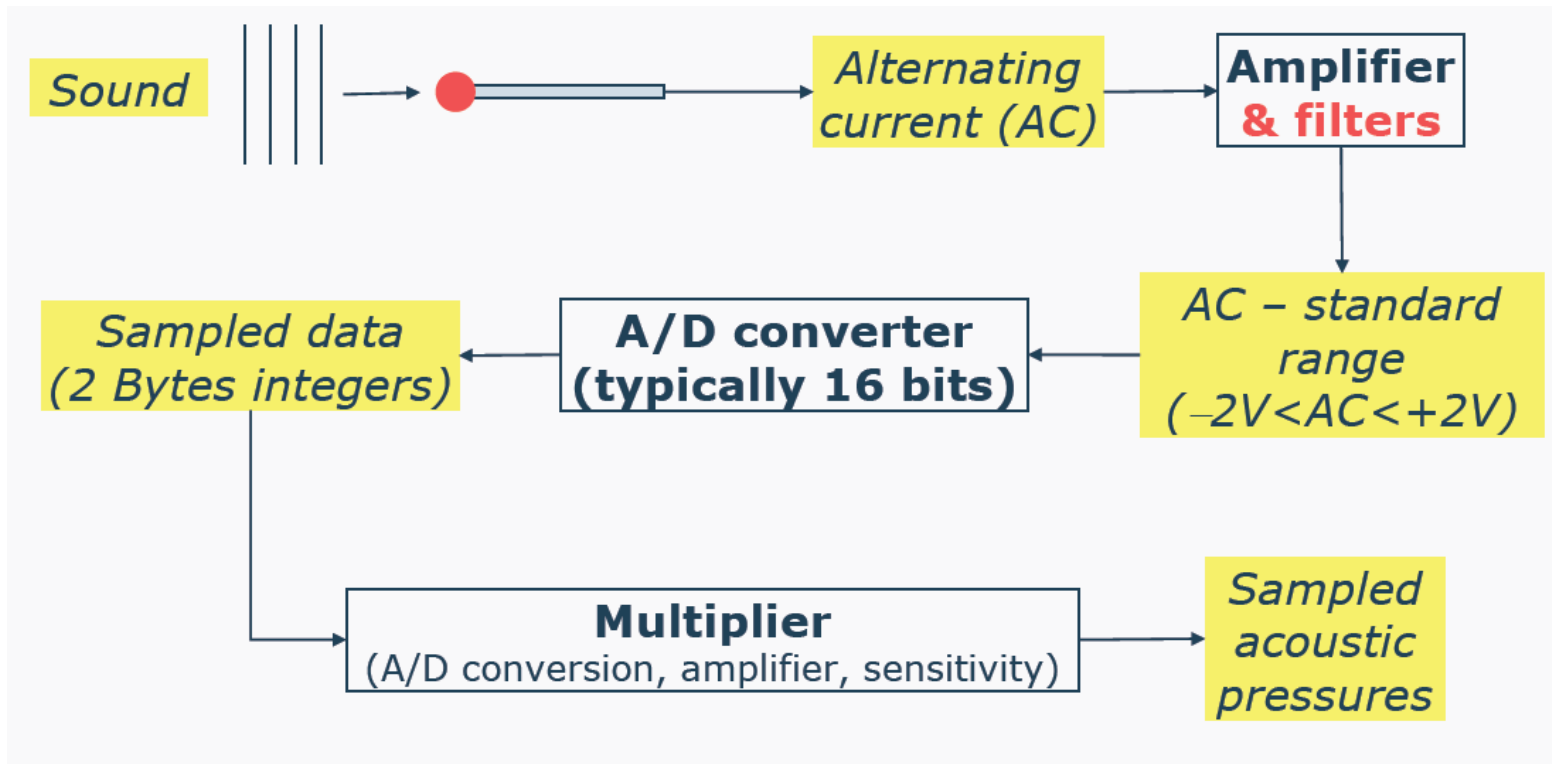
- ⇒ Basso livello di rumore elettronico ($< 20\text{dB}$)
- ⇒ Alta sensibilità ($> 10\text{ mV/Pa}$), per avere un elevato *SNR*
- ⇒ Ampio range di frequenza (100 Hz - 50 kHz)
- ⇒ In determinate applicazioni ne serve un numero molto elevato (anche più di 300)
- ⇒ Dimensioni limitate (dipende dall'applicazione)
- ⇒ In gallerie chiuse: $SPL_{max} > 130\text{ dB}$ (BL noise)

➤ Sistema Acquisizione:

- ⇒ Elevato numero di canali con acquisizione sincrona
- ⇒ Elevate frequenze di campionamento
- ⇒ Lunghi tempi di acquisizione, quindi elevata memoria per il salvataggio dati
- ⇒ Filtri, ne servono svariati, sia passa-alto che passa-basso
- ⇒ Conversione A/D almeno a 16 bit

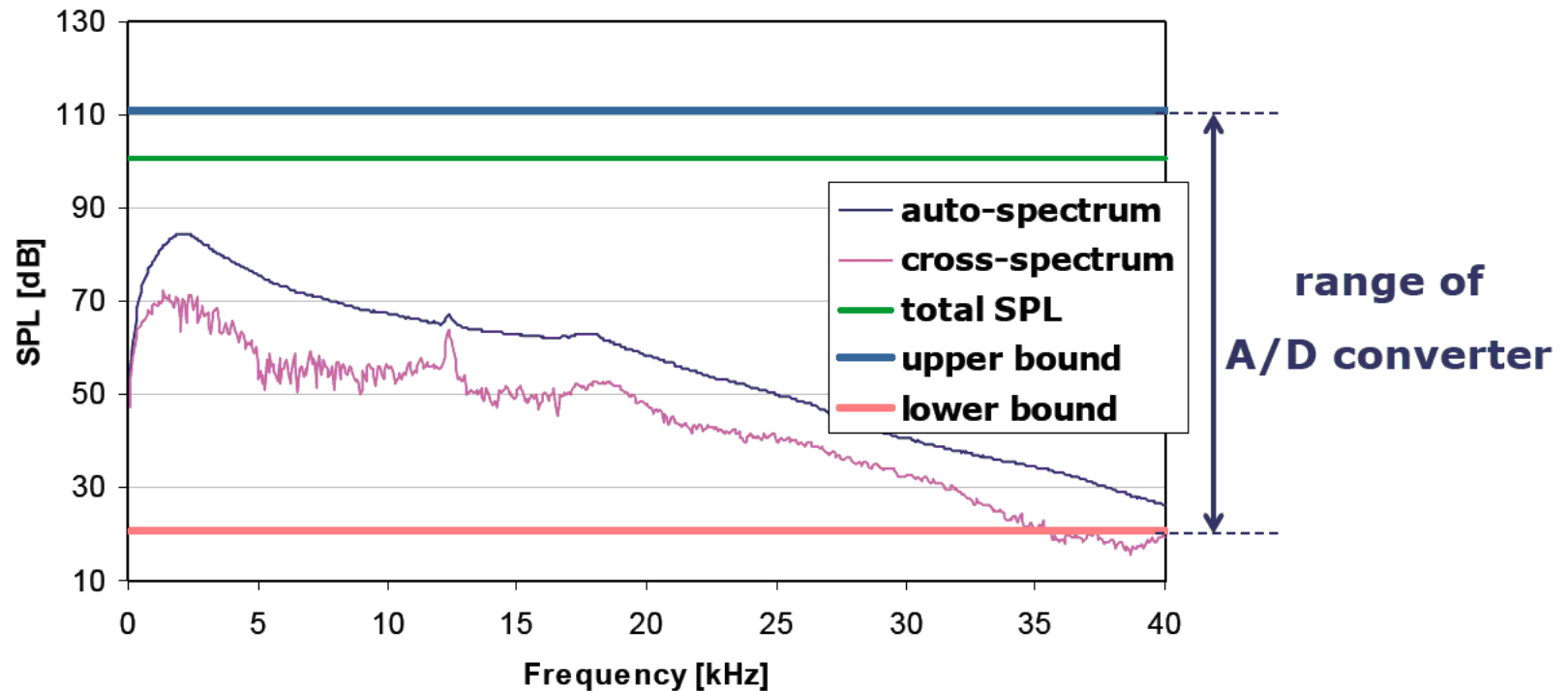
Rumore Aeroacustico

Microfoni – catena di misura



Rumore Aeroacustico

Microfoni – catena di misura



- 16 BIT A/D converter → 96dB dynamic range
- Max pressure level 130dB coincidente con max output amplificatore → non posso analizzare livelli inferiori a 34dB
- High+low pass filters risolvono la situazione