



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE



I microfoni

A.Carini – Elettronica per l'audio e l'acustica

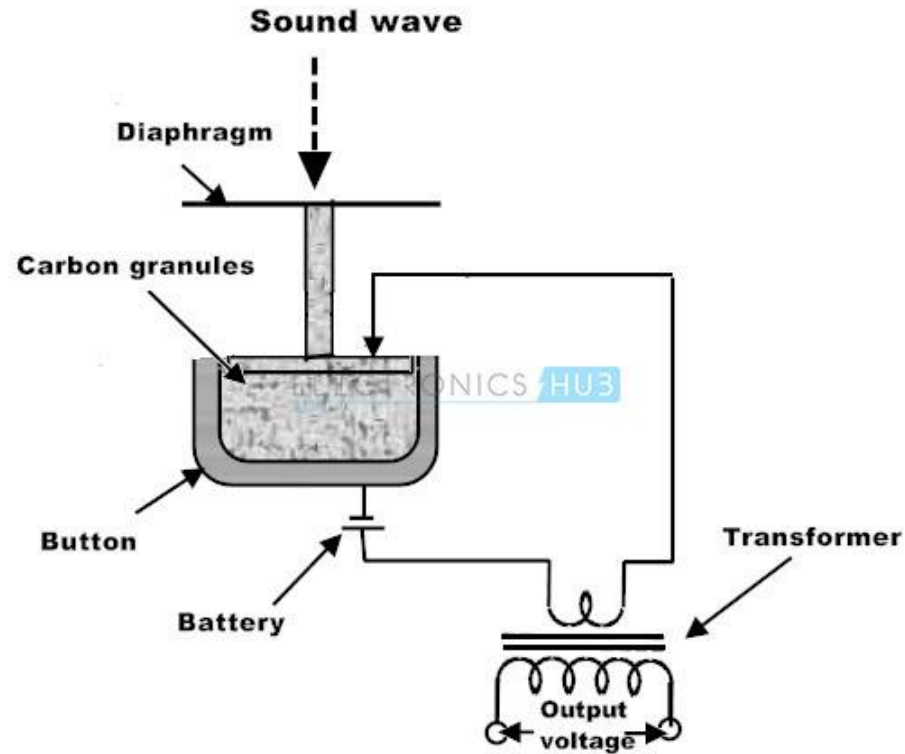
I microfoni

- Il microfono è un sensore capace di rivelare i piccoli cambiamenti di pressione che chiamiamo suono e di convertirli in un segnale elettrico.
- Quasi tutti i microfoni convertono dapprima i cambiamenti di pressione dell'aria in movimenti meccanici con un *diaframma*, una membrana flessibile che si piega sotto l'effetto di una differenza di pressione tra i due lati.
- I movimenti meccanici sono convertiti in un segnale elettrico.
- Il meccanismo sfruttato per la conversione consente di classificare i microfoni in varie tipologie.

Microfoni a carbone

- Sono stati i primi microfoni di ampio impiego.
- I movimenti del diaframma applicano una pressione a della polvere di carbone e ne cambiano la conduttività.
- Sono stati usati in ambito telefonico per più di 50 anni, ma ormai sono stati abbandonati.
- Hanno una risposta in frequenza che copre a malapena la qualità richiesta da una linea telefonica e hanno un piccolo range dinamico.

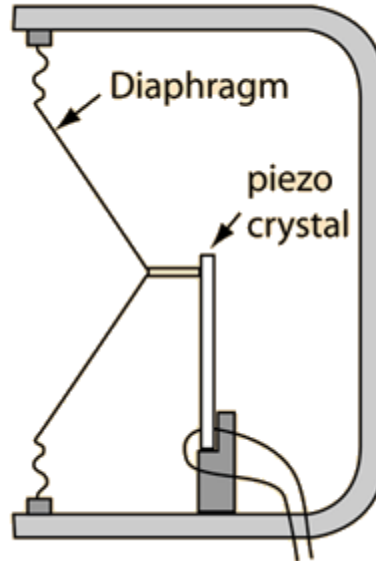
Microfoni a carbone



Microfoni piezoelettrici

- Il diaframma piega un cristallo piezoelettrico che converte la deformazione meccanica in una tensione elettrica.
- Forniscono una più elevata qualità nella cattura del suono ma la tensione d'uscita è nel range 50-100 mV e hanno una elevata impedenza d'uscita.
- Richiedono un circuito elettronico per l'amplificazione del segnale e la conversione dell'impedenza.
- E' stato possibile utilizzarli solo dopo l'invenzione dei tubi a vuoto.

Microfoni piezoelettrici

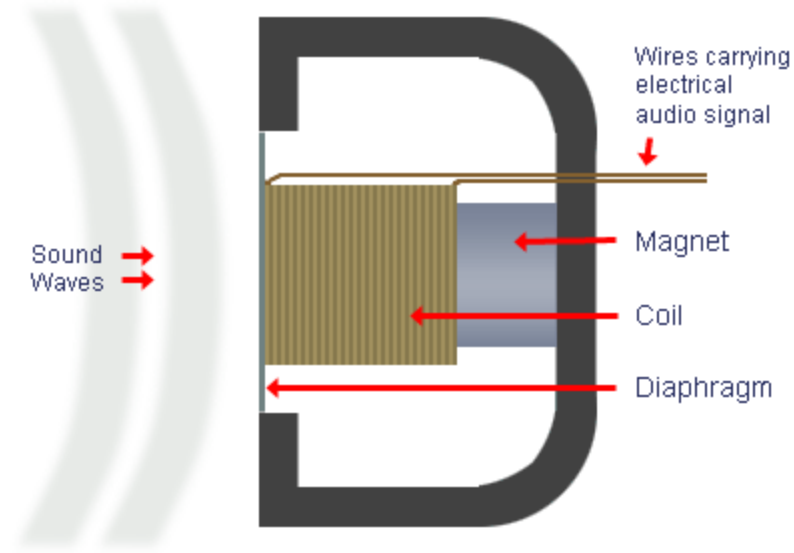


Microfoni elettrodinamici

- Convertono il movimento del diaframma in una tensione elettrica mediante il movimento in un campo magnetico di una bobina collegata al diaframma.
- Siccome non c'è alcun contatto metallico, il diaframma può essere reso piccolo e leggero.
- La tensione d'uscita è dell'ordine di molti millivolt e l'impedenza è bassa.
- Richiedono una buona schermatura dei cavi e l'amplificazione del segnale.

Microfoni elettrodinamici

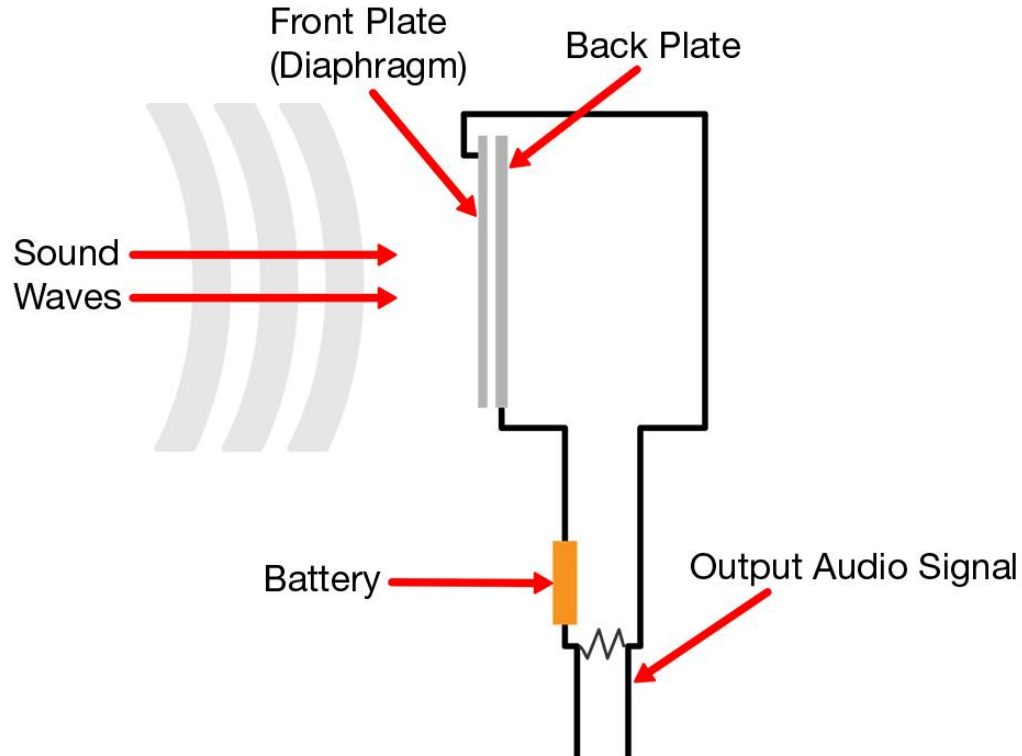
Cross-Section of Dynamic Microphone



Microfoni a condensatore

- Convertono il movimento del diaframma in una capacità variabile mediante una membrana fissa posta parallelamente al diaframma.
- I cambiamenti della capacità possono essere rilevati applicando una tensione costante (e.g. 48 V – phantom power) e misurando la corrente di carica/scarica.
- Circuiti molto precisi potrebbero includere un generatore ad alta frequenza per misurare l'impedenza del condensatore.
- Per molti anni sono stati usati solo per calibrazioni e misure acustiche a causa dei loro costi elevati, fino all'introduzione dell'elettrete.

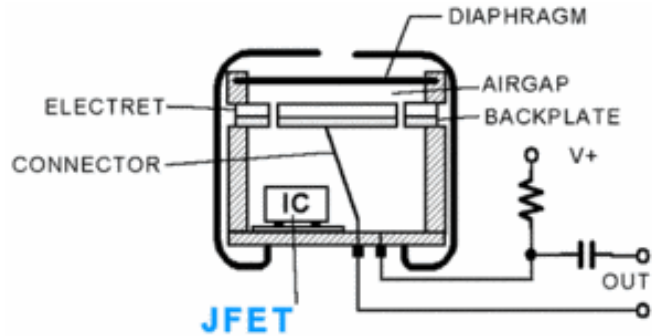
Microfoni a condensatore



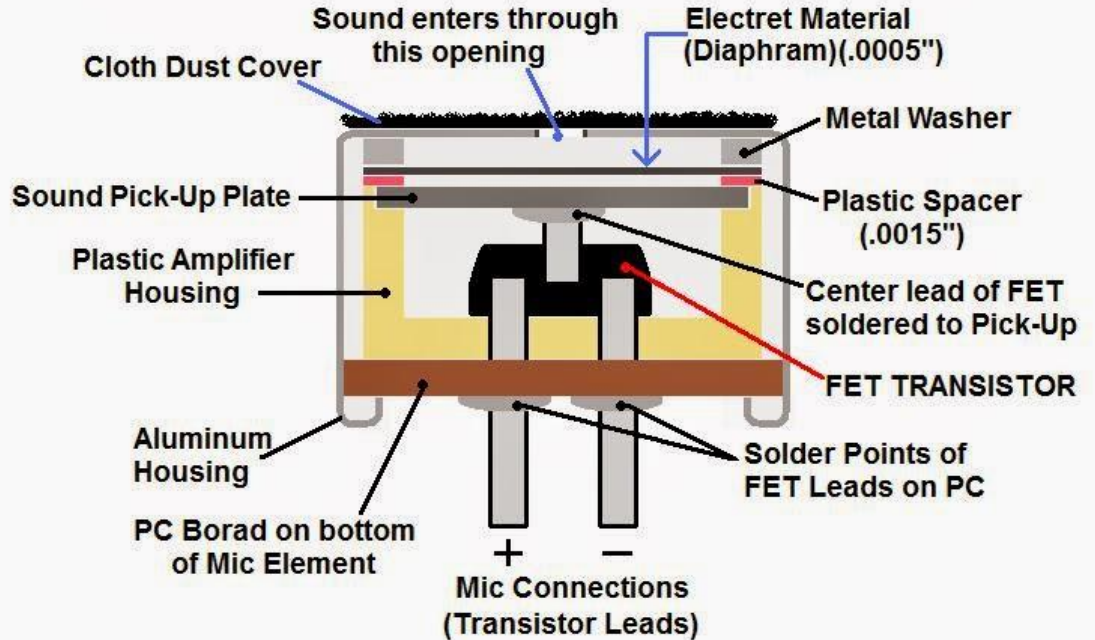
Microfoni a elettrete

- Un elettrete è un materiale dielettrico stabile con carica elettrostatica permanente incorporata.
- Mentre nei microfoni a condensatore abbiamo bisogno di una polarizzazione esterna, nei microfoni a elettrete la carica polarizzante è interna, situata nel diaframma o nell'armatura fissa del condensatore.
- Grazie a questa carica non abbiamo bisogno di alimentazione esterna per la polarizzazione.
- Si riducono le dimensioni del microfono ma dato il basso livello del segnale generato abbiamo ancora bisogno di uno stadio preamplificatore che necessita di alimentazione (di 1 -- 5 V).
- Un piccolo FET integrato nel microfono converte i cambiamenti di carica in una tensione elettrica.

Microfoni a elettrete



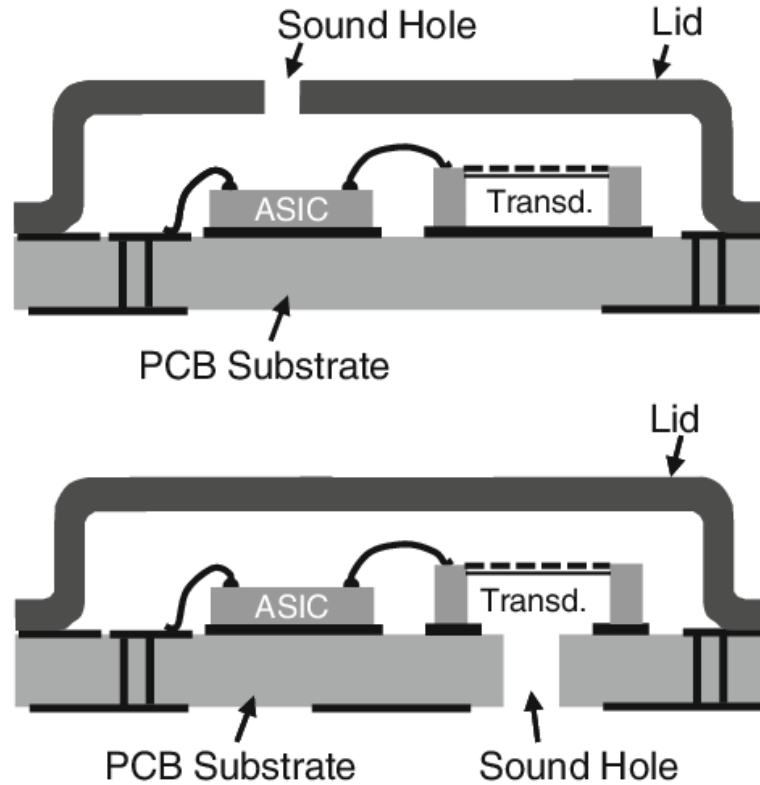
CROSSCUT VIEW OF AN ELECTRET CONDENSATOR ELEMENT



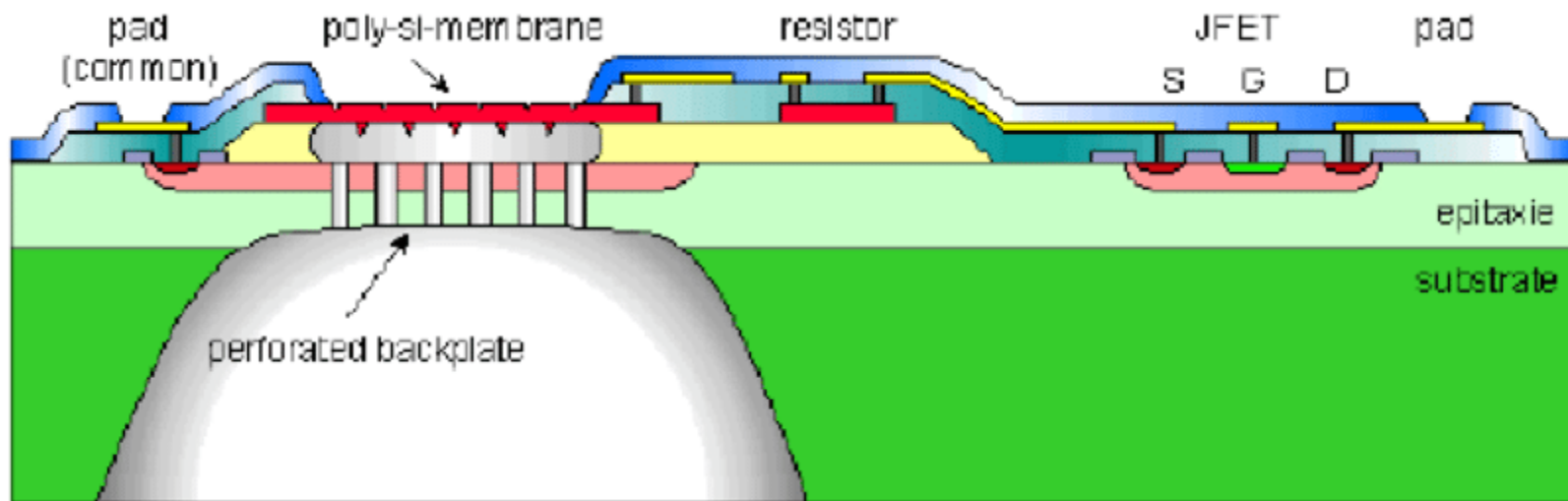
Microfoni MEMS

- I MEMS (miniature electro-mechanical systems) microphone sono fabbricati con la stessa tecnologia utilizzata per la fabbricazione dei circuiti integrati.
- La tecnologia consente la fabbricazione di un diaframma tenuto a una certa distanza dalla base.
- La conversione del movimento del diaframma in un segnale elettrico è basata sulla variazione di capacità tra diaframma e base.
- Sono ancora dei microfoni a condensatore.
- Vantaggi:
 - Ridotta dimensione (3 mm x 3 mm x 1mm)
 - Stesso package dei componenti montati su superficie
 - Basse tolleranze di fabbricazione.
 - Circuiti di accompagnamento (pre-amp, filtro e ADC) integrati su stesso chip.
- Svantaggi: alti costi e alto self-noise.

Microfoni MEMS



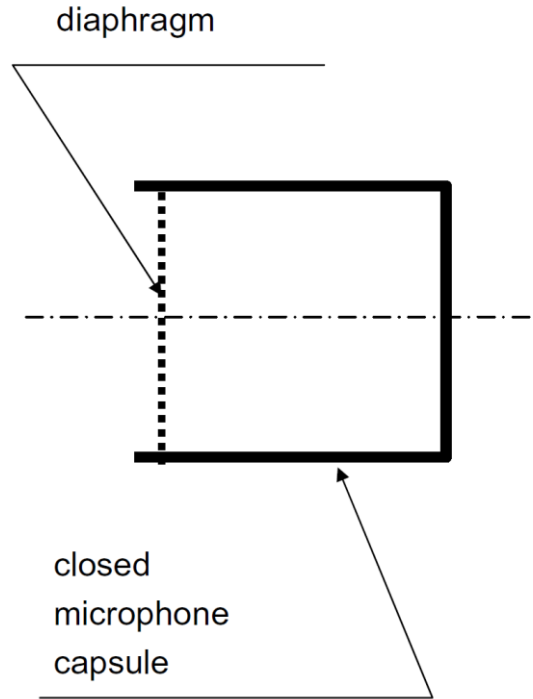
Microfoni MEMS



Microfono a pressione o omnidirezionali

- Il diaframma non rileva direttamente la pressione dell'aria ma la differenza di pressione tra i due lati. Questa differenza fa piegare il diaframma e il movimento viene trasformato in una tensione.
- Per misurare i cambiamenti di pressione, un lato deve avere una pressione costante.
- Una capsula cilindrica chiusa con il diaframma da un lato realizza il classico *microfono a pressione*.
- Siccome il diaframma è più piccolo della più piccola lunghezza d'onda, possiamo dire che il microfono campiona la pressione dell'aria in un punto.
- Il microfono non è sensibile alla direzione di arrivo, è *omnidirezionale*.
- Dimensione tipica del diaframma di un microfono a elettretico: 5-9 mm.

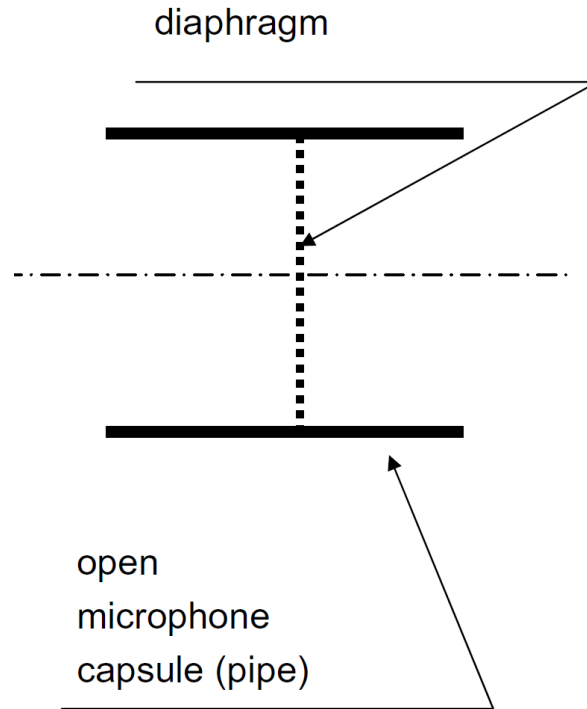
Microfoni a pressione o omnidirezionale



Microfono a gradiente di pressione

- Se il diaframma è posizionato al centro di un piccolo tubo aperto su entrambi i lati, il microfono misurerà la differenza di pressione dell'aria ai due punti di ingresso del tubo.
- E' chiamato microfono a gradiente di pressione perché misura il gradiente della pressione lungo l'asse del microfono.
- Il microfono è sensibile alla direzione di spostamento dell'onda sonora.
- Per un onda che viaggia nella direzione dell'asse, misurerà la derivata prima della pressione dell'aria.
- Per un onda che viaggia in direzione ortogonale all'asse, non ci sarà segnale d'uscita.

Microfono a gradiente di pressione

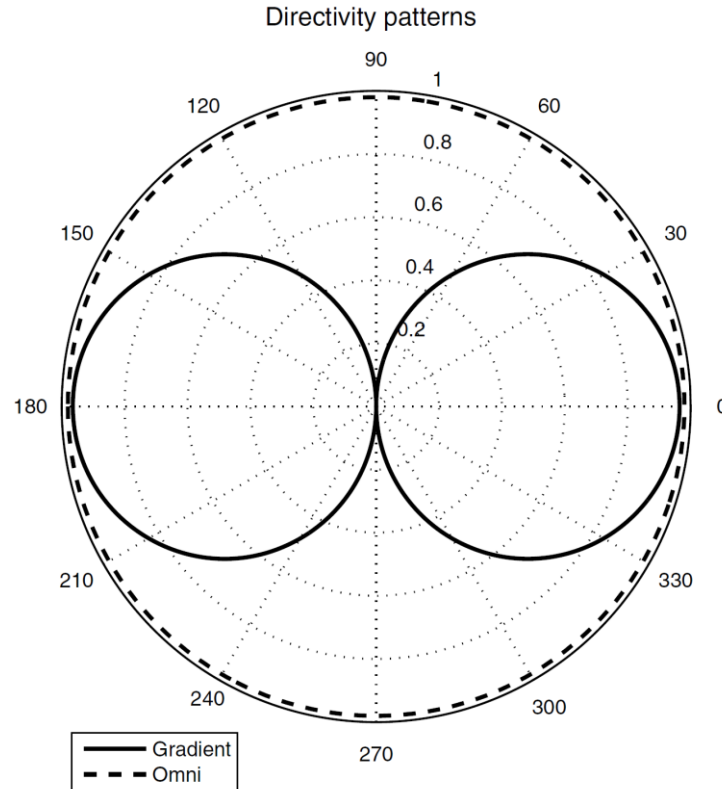


Microfono a gradiente di pressione

- Il microfono a gradiente ha un diagramma di direttività con una figura a 8, ed è sensibile ai suoni che arrivano da davanti e dietro ma non dai lati.
- Il suono che arriva dal retro avrà fase opposta a quello da davanti.
- Mentre i microfoni a pressione sono dei *mono-poli acustici*, i microfoni a gradiente sono dei *bipoli*.
- La risposta in frequenza nel campo lontano è determinata dal fatto che il microfono cattura la differenza tra il segnale da un lato e lo stesso segnale ritardato a causa della lunghezza l del microfono per il coseno dell'angolo della direzione d'arrivo:

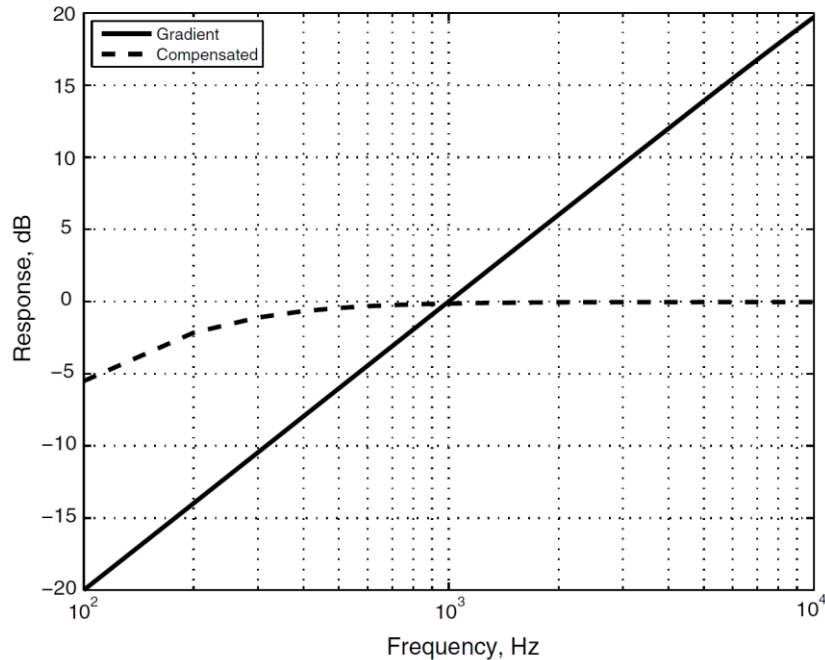
$$U(f, \theta) = 1 - \exp\left(-j2\pi f \frac{l \cos \theta}{c}\right)$$

Microfono a gradiente di pressione



Microfono di 5mm a 1kHz

Microfono a gradiente di pressione



First order low-pass filter compensation:

$$U(f, \theta) = \frac{Z_C}{Z_C + R} \left(1 - \exp\left(-j2\pi f \frac{l \cos \theta}{c}\right) \right),$$

$$Z_C = -j/2\pi f C$$

$$\tau = RC \quad (1 \text{ ms})$$

Figure 3.9 Frequency response of pressure-gradient microphone towards MRA: non-compensated and compensated

Sensibilità del microfono

- La sensibilità è data dal rapporto tra i cambiamenti di pressione dell'aria e la relativa variazione di tensione elettrica.
- E' misurata in V/Pa e consente di calcolare la tensione di uscita data l'intensità del campo acustico.
- Lavorando in dB, 1 V/Pa è usato come riferimento e corrisponde a 0 dB.
- Es: una normale conversazione ha 65 dB SPL. Il livello di riferimento è di 20 μPa . Quindi il livello efficace dell'onda è di 35.5 mPa. Se la sensibilità del microfono è di -40 dB, il valore efficace della tensione d'uscita è di 0.355 mV.

Rumore del microfono e rapporto SNR d'uscita

- Qualunque sia il principio usato per convertire il suono in un segnale elettrico, questo sarà accompagnato dall'introduzione di un rumore elettrico.
- Il suo spettro è in genere piatto (rumore bianco), ad eccezione dei microfoni a gradiente equalizzati in frequenza, che avranno un rumore inversamente proporzionale alla frequenza (pink noise).
- I produttori di microfoni definiscono il *self-noise* (rumore autogenerato) mediante il rapporto segnale rumore a un certo livello del segnale sonoro.
- Tipico valore di un buon microfono a elettretico è *output SNR* di 60 dB con un suono di 96 dB SPL. Una normale voce a 1 m genera suoni a 65 dB SPL. Quindi in completa assenza di rumore ambientale *output SNR* è di 29 dB.
- Anche se sembra un valore basso, il rumore ambientale verrà a dominare. In un normale ufficio il rumore è di 50 dB SPL. Il SNR del segnale acustico di ingresso è di 15 dB e il self noise è mascherato dal rumore ambientale.

Rumore del microfono e rapporto SNR d'uscita

- Un altro modo di misurare il self-noise è quello di confrontarlo con un rumore acustico che genera lo stesso livello d'uscita.
- Nell'esempio precedente, il self-noise è equivalente a un rumore esterno di 36 dB SPL.
- Nei buoni microfoni il self noise è molto basso e può essere ignorato nella maggior parte delle condizioni.

Diagramma di direttività – directivity pattern

- Il diagramma di direttività esprime la sensibilità del microfono in funzione dell'angolo di incidenza.
- E' in genere sensibile alla frequenza che viene dichiarata come un ulteriore parametro.
- L'angolo di incidenza è l'angolo tra l'asse di massima risposta del microfono e la direzione di arrivo del suono.
- Il directivity pattern è in genere una funzione complessa (direzioni di arrivo diverse hanno sensibilità con fasi diverse).
- In genere viene normalizzato rispetto alla massima risposta a 1 kHz.
- Il directivity pattern è in generale una funzione di 4 parametri: f , ϑ , ϕ , ρ ma lavorando nel campo lontano possiamo ignorare la distanza e per ogni frequenza possiamo rappresentarlo con un diagramma tridimensionale.

Diagramma di direttività – directivity pattern

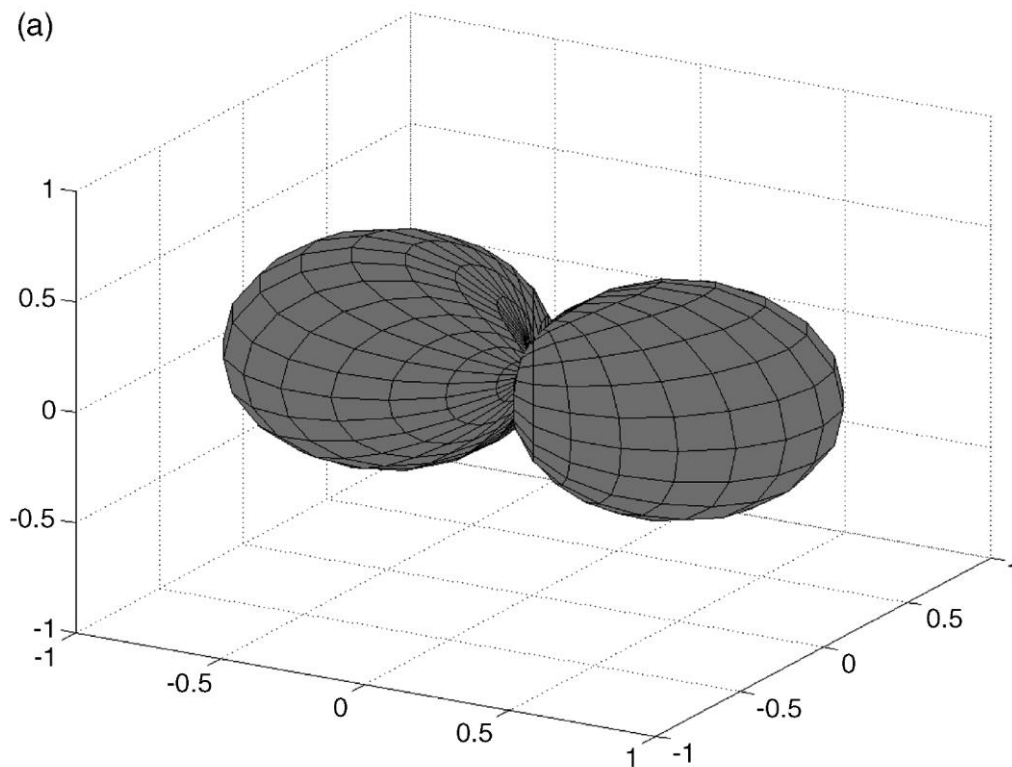
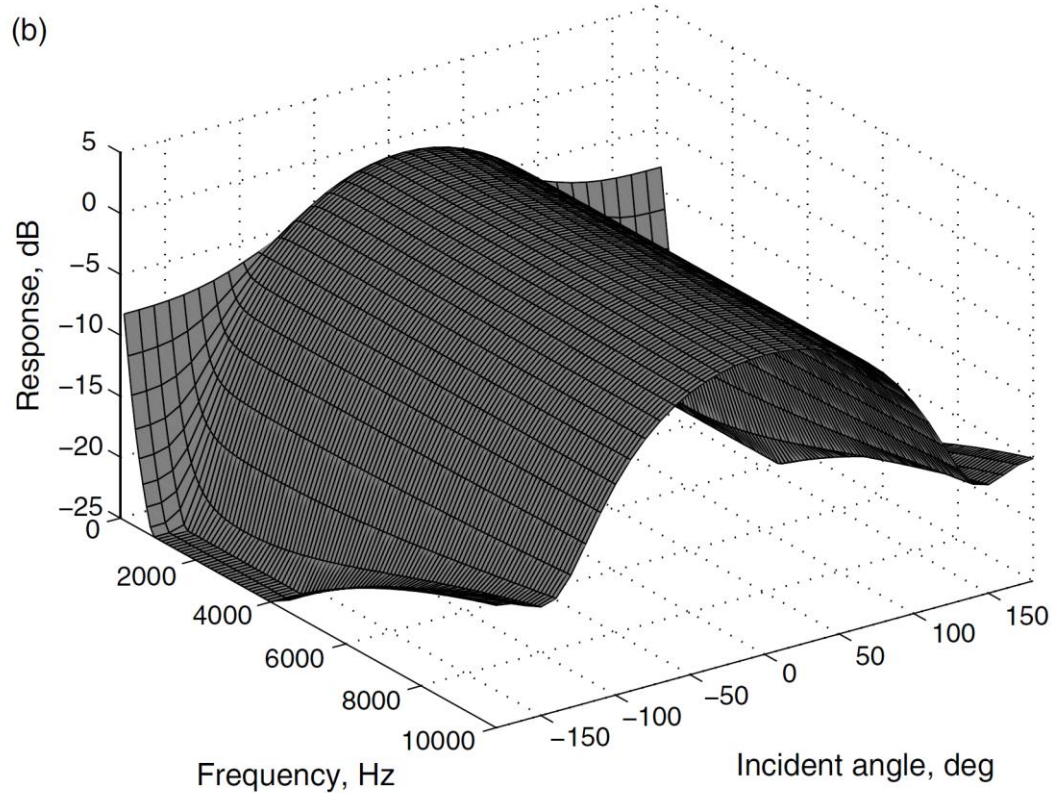


Diagramma di direttività – directivity pattern

(b)



Risposta in frequenza

- E' un diagramma bidimensionale che ci dà l'ampiezza e la fase al variare della frequenza per un dato angolo di incidenza.
- Nella maggior parte dei casi, si considera l'angolo 0.

Indice di direttività (DI)

- Il DI per una data direzione è definito come il rapporto tra la potenza ricevuta da questa direzione e la potenza media ricevuta da tutte le direzioni:

$$DI(f) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P(f, \varphi_T, \theta_T)}{\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot P(f, \varphi, \theta)} \right)$$

$$P(f, \varphi, \theta) = |U(f, d)|^2 \quad \rho = \rho_0 = \text{constant.}$$

- Il DI totale si ottiene integrando rispetto l'asse delle frequenze:

$$DI_{\text{tot}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\int_0^{f_{\text{max}}} \frac{P(f, \varphi_T, \theta_T)}{\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot P(f, \varphi, \theta)} df \right).$$

Soppressione del rumore ambientale

- Per misurare la soppressione del rumore ambientale operata da un microfono si introduce il *Noise Gain*, che è il $DI(f)$ pesato con lo spettro del rumore prima di integrare rispetto alla frequenza.
- Il valore è normalizzato rispetto all'energia di rumore totale, ovvero l'energia che sarebbe captata da un microfono ideale omnidirezionale.

$$G_N = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{f_{max}} |N_A(f)|^2 DI(f)^2 df}{\int_0^{f_{max}} |N_A(f)|^2 df} \right)$$

- Il noise gain rappresenta il rapporto tra l'energia del rumore catturata dal microfono direzionale rispetto a quella che verrebbe catturata da un microfono omnidirezionale.
- Il noise spectrum può essere ulteriormente pesato con la legge di pesatura A.

Bias Voltage

- Parametro importante per i microfoni a condensatore o elettrete.
- E' la tensione usata per fornire la potenza al FET integrato.
- Per i microfoni a condensatore ha il valore tipico di 48 V, per quelli a elettrete varia da 1 a 5 V.

Impedenza d'uscita

- Interviene nel progetto del circuito.
- Se l'impedenza d'uscita è alta, il preamplificatore microfonico dovrebbe pure avere una elevata impedenza d'ingresso.
- I microfoni elettrodinamici hanno in genere impedenza d'uscita di decine o centinaia di Ohm.
- I microfoni piezoelettrici hanno impedenza di centinaia di $k\Omega$, o anche $M\Omega$.
- I microfoni a condensatore o a elettrete hanno impedenza nel range di decine di $k\Omega$.

Maximum sound pressure level

- Definisce la massima ampiezza del suono che il microfono può catturare prima di raggiungere un certo livello di distorsione nonlineare.
- Per la maggior parte dei microfoni è dell'ordine dei 96 dB SPL.

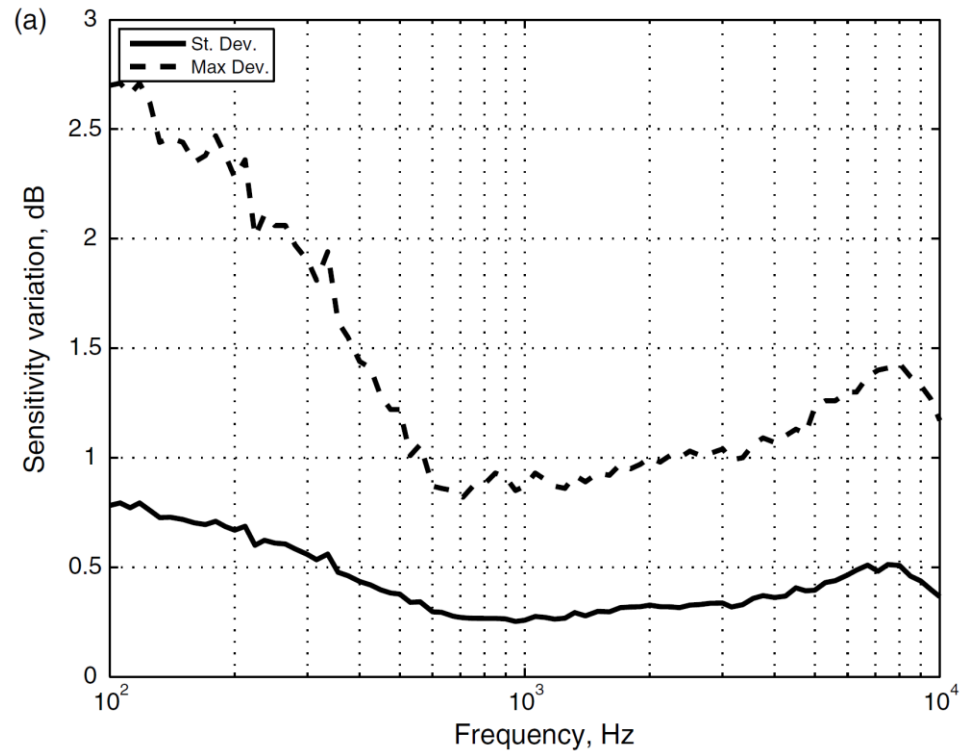
Total harmonic distortion

- Specifica la nonlinearità di un microfono.
- E' il rapporto tra la potenza di tutte le armoniche e la potenza della fondamentale.
- I moderni microfoni sono molto buoni rispetto a questo parametro e la distorsione è inferiore allo 0.1 % ai normali livelli della voce.

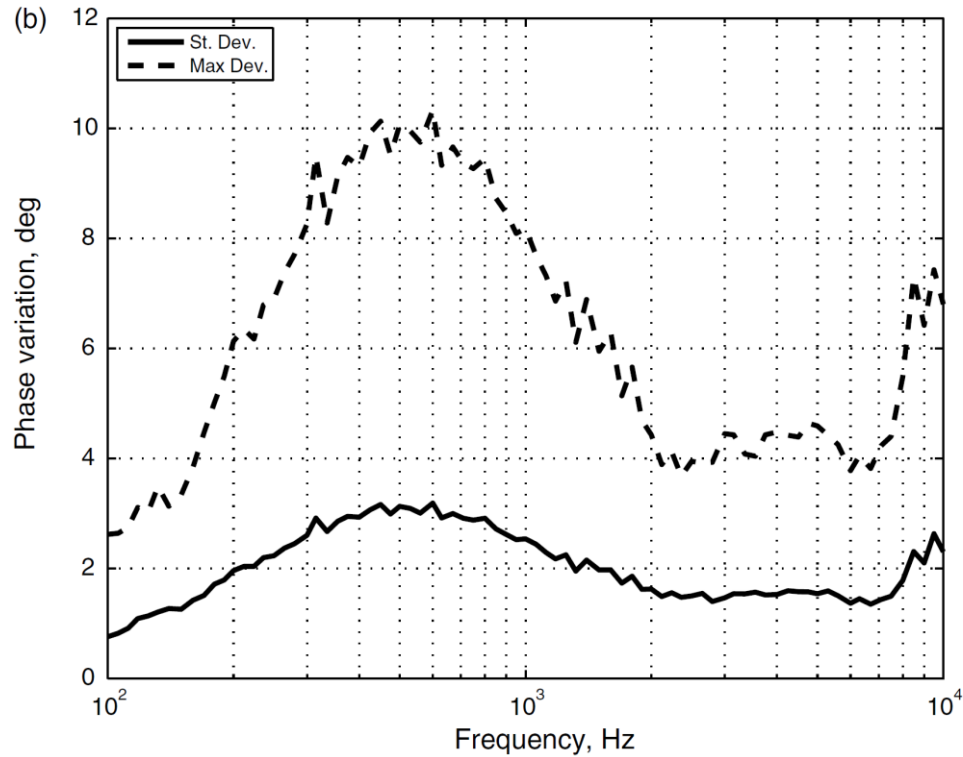
Tolleranze di produzione

- I parametri visti variano da microfono a microfono a causa delle tolleranze di produzione ovvero delle differenze in tutti i componenti del microfono.
- I produttori generalmente specificano le tolleranze della sensibilità lungo l'asse di massima risposta: ad. esempio -47 ± 4 dB
- Per gli array microfonici, viene considerata una distribuzione gaussiana delle tolleranze e viene fornita la deviazione standard della sensibilità lungo l'asse di massima risposta in funzione della frequenza, e la deviazione standard della risposta di fase sempre lungo l'asse di massima risposta in funzione della frequenza.
- Queste tolleranze si assumono essere le stesse per qualunque angolo di incidenza.

Tolleranze di produzione



Tolleranze di produzione



Microfoni direzionali del primo ordine

- Un diagramma di direttività del primo ordine ha:

$$U(f, \theta)_{\text{Norm}} \approx \alpha + (1 - \alpha)\cos \theta$$

- Un tale diagramma può essere ottenuto con vari accorgimenti:
 - Con la combinazione lineare (con parametro α) di un microfono omnidirezionale e uno a gradiente posizionati nello stesso punto.
 - Con la combinazione lineare di due microfoni omnidirezionali vicini.
 - Sottraendo al segnale di un microfono omnidirezionale, il segnale ritardato di un secondo microfono a distanza l

$$U(f, \theta) = 1 - \exp\left(-j2\pi f \left(\tau + \frac{l \cos \theta}{v}\right)\right)$$

Microfoni direzionali del primo ordine

- Un diagramma di direttività del primo ordine ha:

$$U(f, \theta)_{\text{Norm}} \approx \alpha + (1 - \alpha)\cos \theta$$

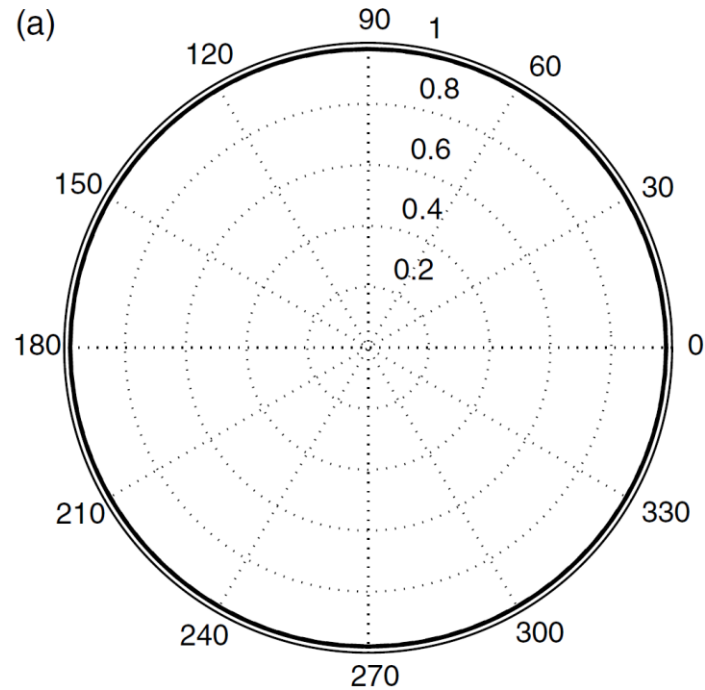
- Un tale diagramma può essere ottenuto con vari accorgimenti:
 - Costruendo un microfono che abbia un lato totalmente aperto e l'altro solo parzialmente con il diaframma centrale (α dipende dalla apertura).
 - Costruendo un microfono aperto su entrambi i lati con il diaframma spostato rispetto alla posizione centrale.

Microfoni direzionali del primo ordine

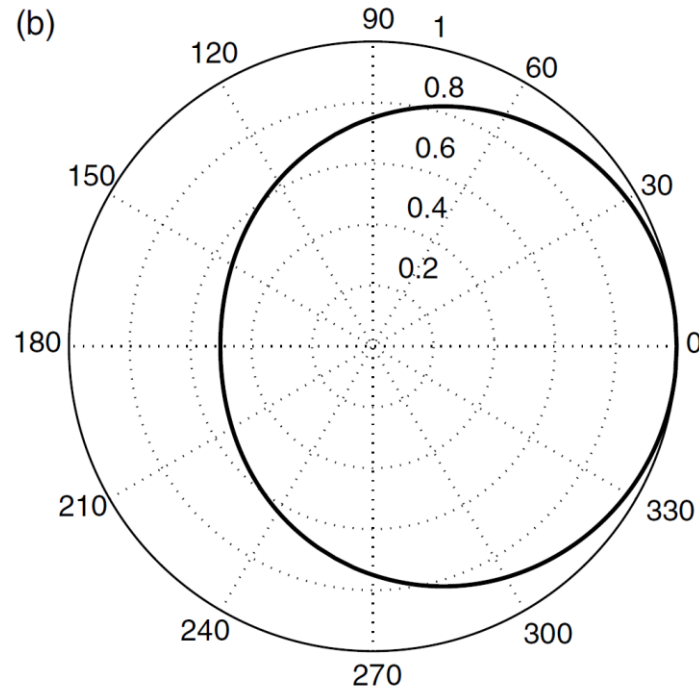
Table 3.2 First-order directivity microphones

Type	α	DI	Note
Omnidirectional	1.00	0.00	No directivity, acoustic monopole
Subcardioid	0.75	2.40	
Cardioid	0.50	4.80	Zero at 180°
Supercardioid	~ 0.35	5.70	Highest front-to-back ratio, zeros at $\pm 125^\circ$
Hypercardioid	0.25	6.00	Highest DI, zeros at $\pm 109^\circ$
Figure-8	0.00	4.80	Zeros at $\pm 90^\circ$, acoustic dipole

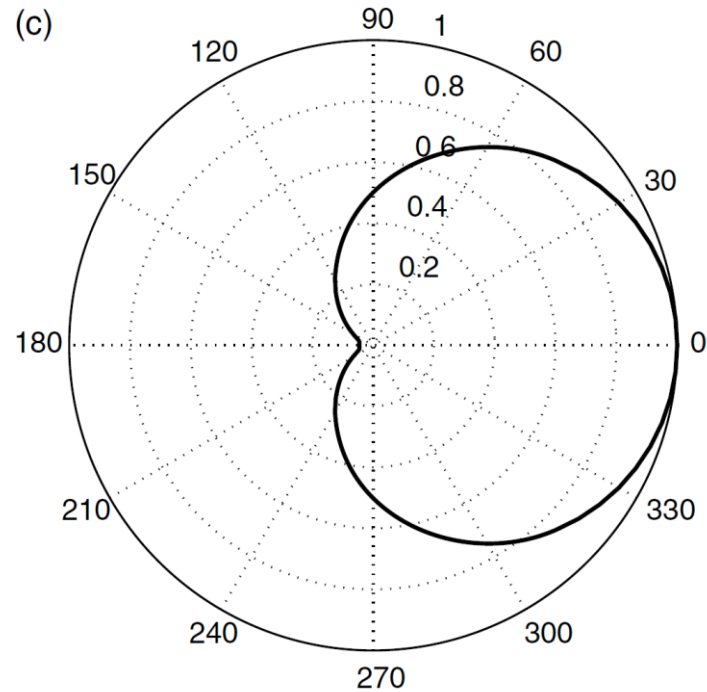
Microfoni direzionali del primo ordine $\alpha = 1$



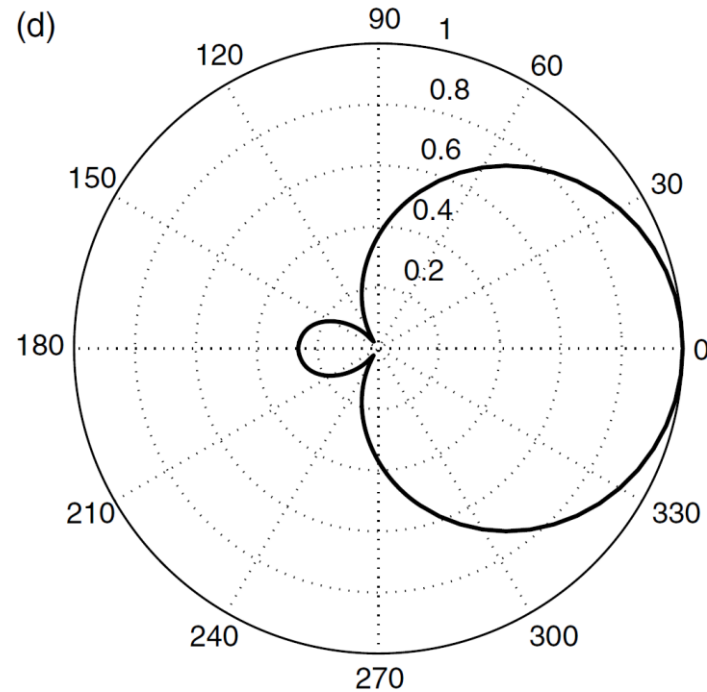
Microfoni direzionali del primo ordine $\alpha = 0.75$



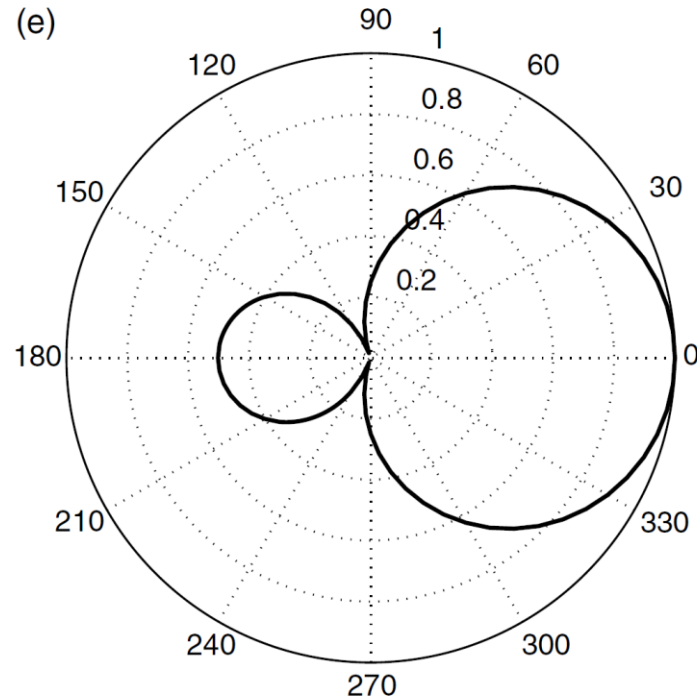
Microfoni direzionali del primo ordine $\alpha = 0.5$



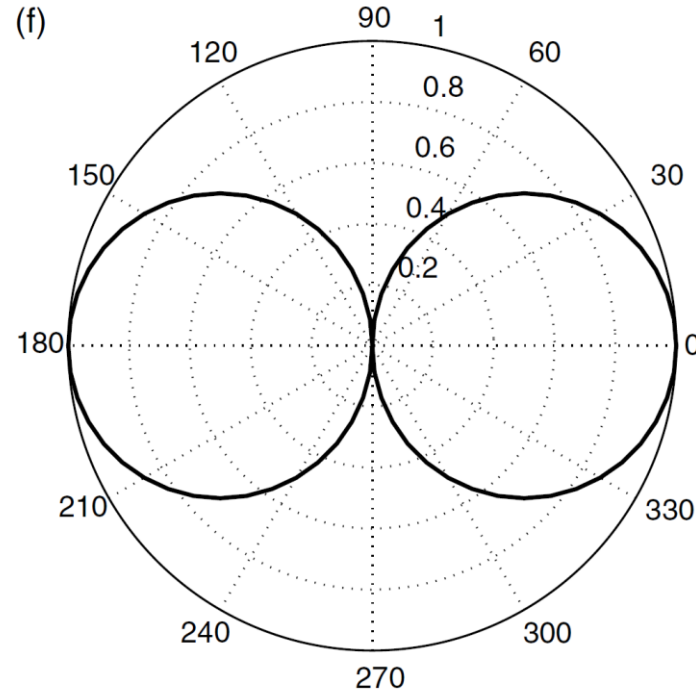
Microfoni direzionali del primo ordine $\alpha = 0.35$



Microfoni direzionali del primo ordine $\alpha = 0.25$



Microfoni direzionali del primo ordine $\alpha = 0$



Microfoni direzionali del primo ordine

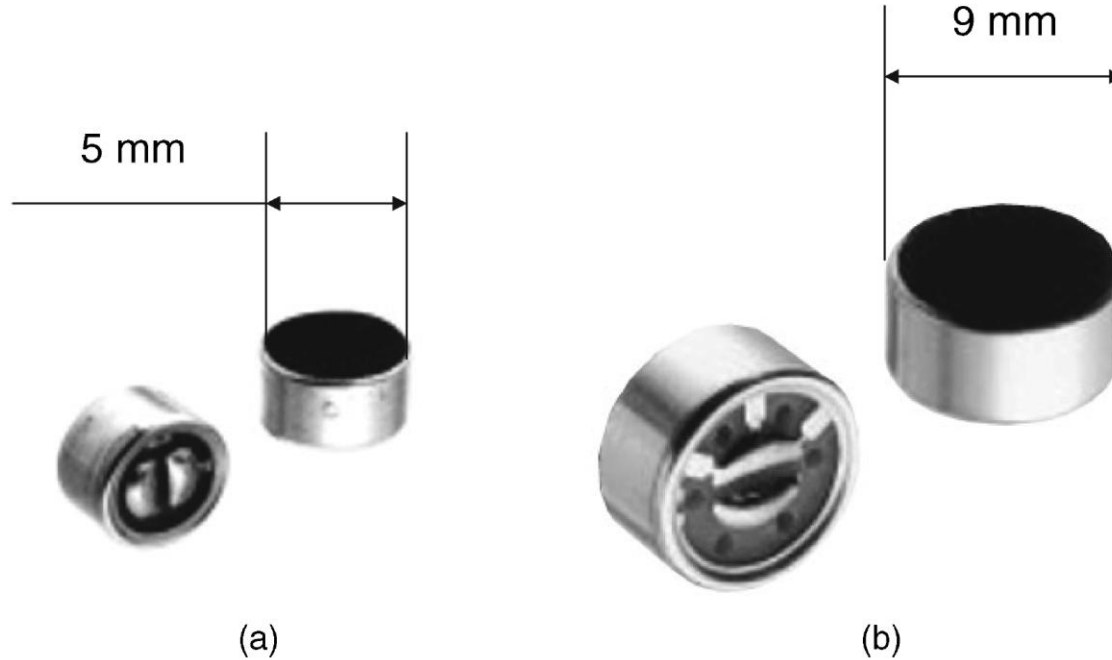


Figure 3.13 Omnidirectional and unidirectional electret microphone capsules

Noise canceling microphones e Proximity effect

- Fino ad ora abbiamo considerato che i microfoni lavorassero nel campo lontano con fronti d'onda piatti.
- Sebbene il modello sia valido per la maggior parte delle applicazioni, dove il microfono è almeno a 1 m dalla sorgente sonora, il modello non è sicuramente corretto con gli headset dove la sorgente sonora è a 2 -15 cm.
- I microfoni in campo vicino hanno diverse caratteristiche.
- Il rumore rimane nel campo lontano e questo consente di beneficiare di questa differenza.
- Consideriamo un ancora il microfono a gradiente di pressione.

Noise canceling microphones e Proximity effect

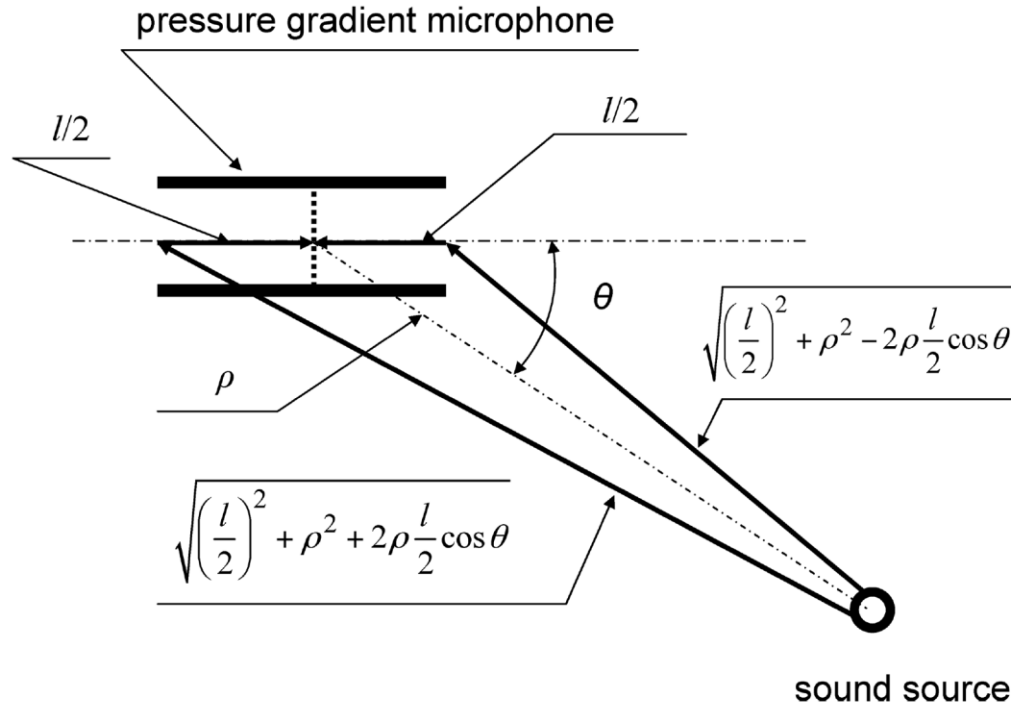


Figure 3.14 Another look at the pressure gradient microphone for close sound sources

Noise canceling microphones e Proximity effect

- Il pattern di direttività del microfono è dato da

$$U(f, \theta, \rho) = \frac{1}{\rho_f(\theta, \rho)} \exp\left(-j2\pi f \frac{\rho_f(\theta, \rho)}{c}\right) - \frac{1}{\rho_b(\theta, \rho)} \exp\left(-j2\pi f \frac{\rho_b(\theta, \rho)}{c}\right).$$

$$\rho_f(\theta, \rho) = \frac{l}{2} + \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \rho^2 - 2\rho \frac{l}{2} \cos \theta}$$

$$\rho_b(\theta, \rho) = \frac{l}{2} + \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \rho^2 + 2\rho \frac{l}{2} \cos \theta}$$

Noise canceling microphones e Proximity effect

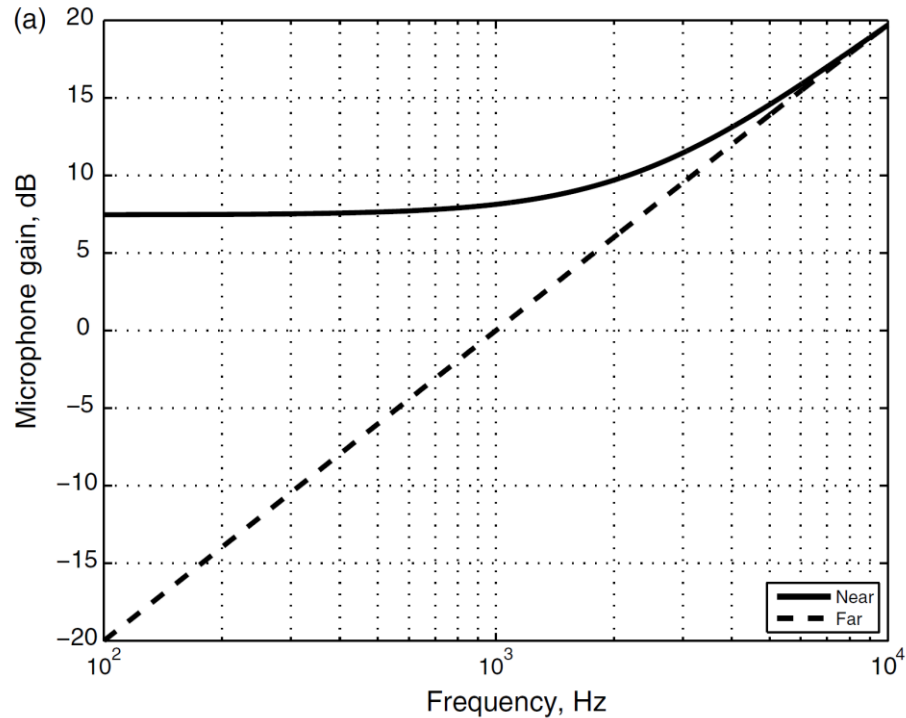


Figure 3.15 Frequency response of pressure-gradient microphone towards MRA for near (2 cm) and far (2 m) sound sources: (a) non-compensated; (b) compensated for far-field sources; (c) compensated for near-field sources

Noise canceling microphones e Proximity effect

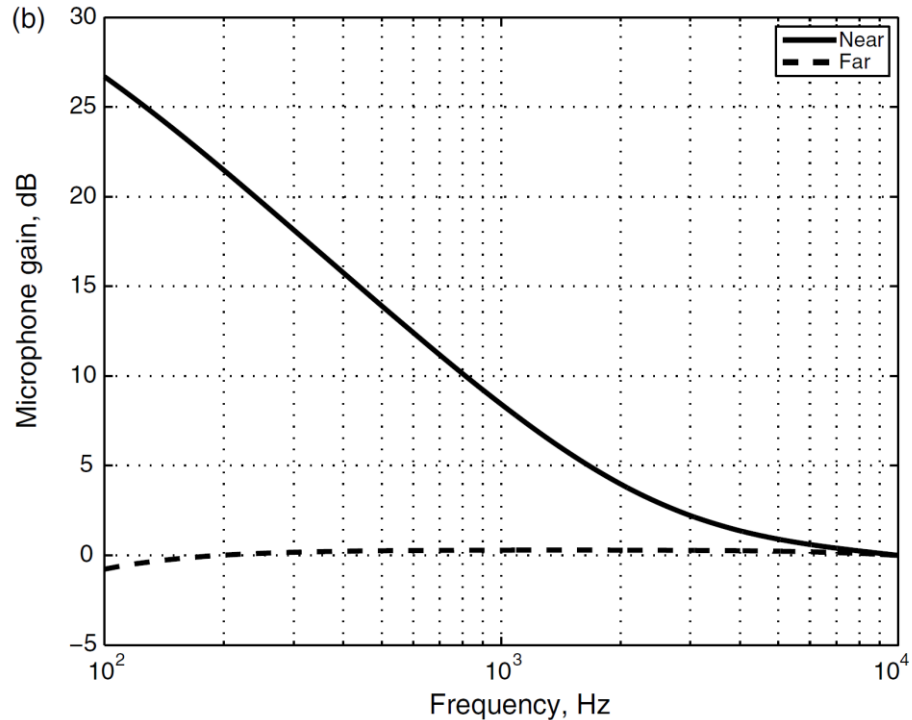


Figure 3.15 Frequency response of pressure-gradient microphone towards MRA for near (2 cm) and far (2 m) sound sources: (a) non-compensated; (b) compensated for far-field sources; (c) compensated for near-field sources

Noise canceling microphones e Proximity effect

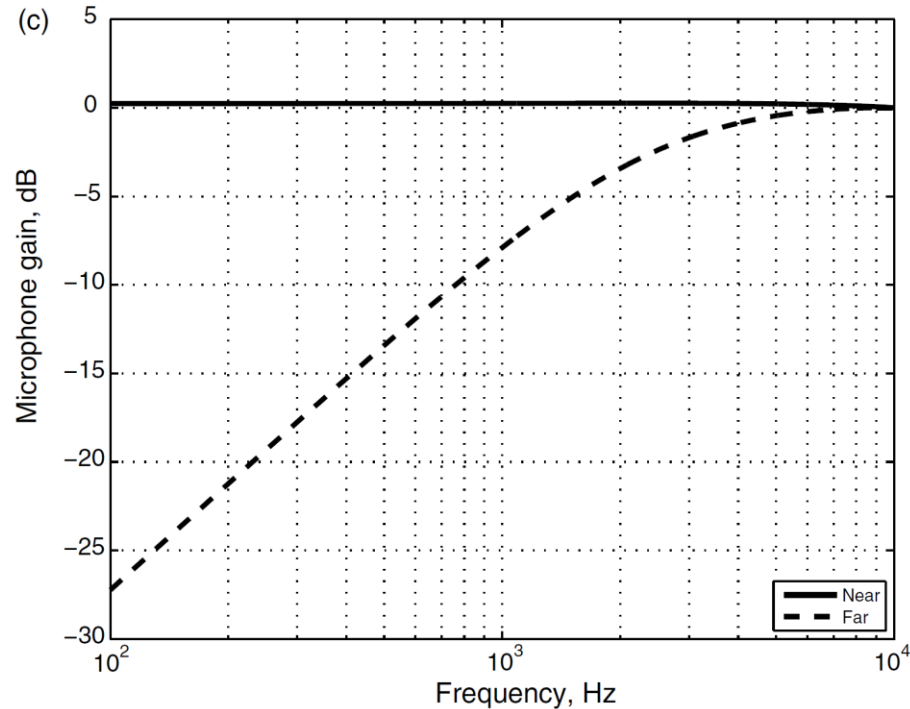


Figure 3.15 Frequency response of pressure-gradient microphone towards MRA for near (2 cm) and far (2 m) sound sources: (a) non-compensated; (b) compensated for far-field sources; (c) compensated for near-field sources

Noise canceling microphones e Proximity effect

- Un *noise canceling microphone* è un microfono compensato per lavorare in prossimità. Il rumore del campo lontano verrà attenuato alle basse frequenze, proprio lì dove in genere è più intenso.
- Se compensiamo il microfono per lavorare con il campo lontano, avvicinando la sorgente al microfono le basse frequenze vengono sovracompenstate ed enfatizzate. Sottolineando i bassi le voci si fanno più profonde e cupe. L'effetto viene detto *effetto di prossimità*.



Misura della sensibilità

- La sensibilità di un microfono può essere misurata
 - Catturando simultaneamente il suono con un microfono di riferimento,
 - Richiede microfoni di riferimento costosi, tipicamente capacitivi omnidirezionali. Misura fatta in camera anecoica con una sorgente puntuale posta nella direzione di massima sensibilità e con il microfono di riferimento vicino.
 - Catturando suoni di ampiezza nota.
 - L'ampiezza del segnale del microfono determina direttamente la sensibilità.
 - Misura va fatta in ambiente silenzioso con microfono ben accoppiato.

Misura della sensibilità



Figure 3.16 Sound source for measurement of a microphone's sensitivity

Misura del diagramma di direttività

- La misura va fatta in un ambiente a basso rumore e basso riverbero.
- Un buon altoparlante può essere usato come sorgente con il microfono posizionato nel campo lontano.
- Un microfono di riferimento viene posizionato vicino a quello da misurare e serve a compensare la risposta in frequenza dell'altoparlante.
- Il microfono sotto misura viene posizionato su una piattaforma girevole con angolo di rotazione ortogonale all'asse di massima risposta.
- Il microfono e l'altoparlante dovrebbero stare alla stessa altezza in modo che per qualche angolo di rotazione l'asse di massima risposta punti all'altoparlante.
- Un tipico angolo di rotazione è di 10° , quindi sono richieste 36 registrazioni.
- Le risposte in frequenza misurate e equalizzate con il microfono di riferimento vengono ulteriormente elaborate (smoothing con filtraggio passabasso e interpolazione) per ottenere il diagramma desiderato.

Misura del diagramma di direttività



Figure 3.17 Setup in an anechoic chamber for measurement of a microphone's directivity

Misura del diagramma di direttività

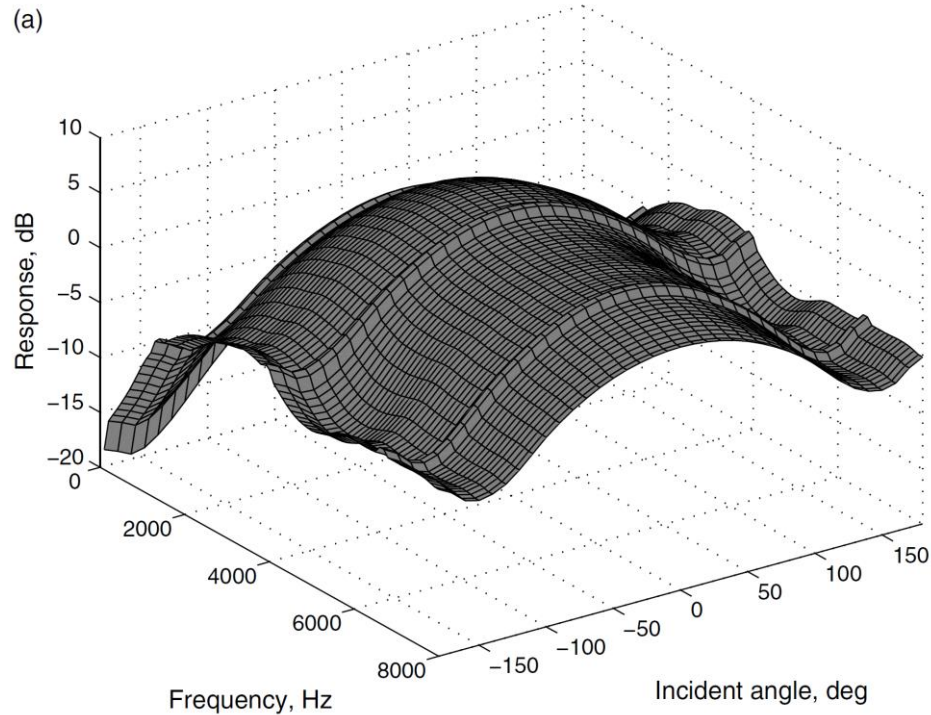


Figure 3.18 Measured directivity pattern of a cardioid microphone: (a) magnitude; (b) phase

Misura del diagramma di direttività

(b)

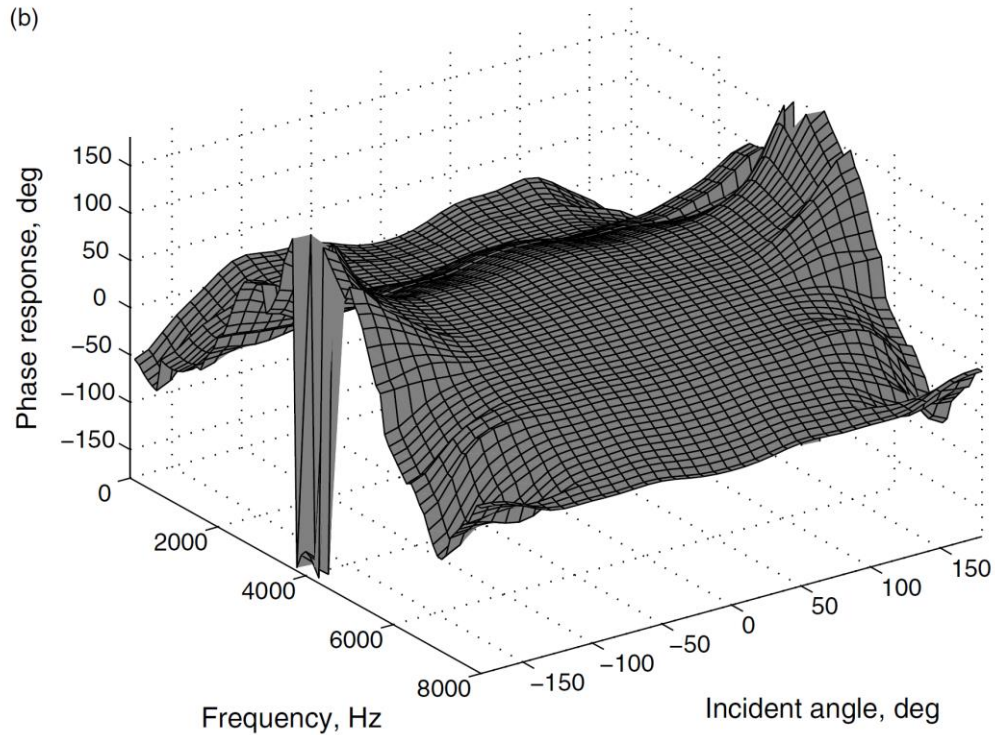


Figure 3.18 Measured directivity pattern of a cardioid microphone: (a) magnitude; (b) phase

Misura del self-noise

- La misura del rumore va fatta in un ambiente a basso rumore e basso riverbero.
- Serve un'ulteriore misura della potenza con un segnale di riferimento noto.
- Dal rapporto tra le due potenze otteniamo il SNR dovuto al self-noise al livello del segnale di riferimento.
- E' utile convertire e salvare anche lo spettro del rumore del microfono.

Misura del self-noise

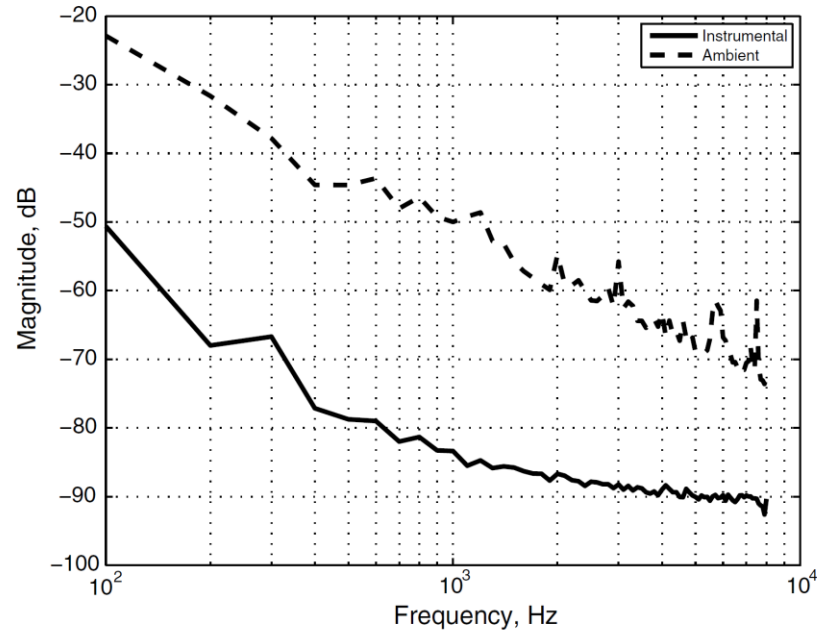


Figure 3.19 Magnitude spectrum of microphone noise compared with the magnitude spectrum of room noise under normal conditions

Vedere:

- Ivan Tashev “Sound Capture and Processing”, John Wiley & Sons, 2009
 - Cap. 3.2-3.9