


**Μάθημα: «Ηλεκτροακουστική & Ακουστική Χώρων»**

**Διάλεξη 3<sup>η</sup>: «Ηλεκτροακουστικοί Μετατροπείς - Μικρόφωνα»**

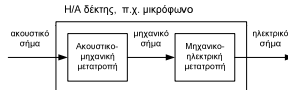
Φλώρος Ανδρέας  
Επικ. Καθηγητής



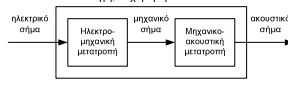
**Ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς**

- Μετατρέπουν ακουστική/ηλεκτρική/μηχανική ενέργεια που παράγεται σε κάποιο υποσύστημα σε κάποια άλλη μορφή
  - Συνδιάζουν πολλαπλά στάδια ενεργειακής μετατροπής

Η/Α δέκτης, π.χ. μικρόφωνο




Η/Α πηγή, π.χ. μεγάφωνο



Χρήση ηλεκτρομαγνητικού ή πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για μηχανο/ηλεκτρική μετατροπή

Χρήση μεμβράνης ή διαφράγματος, για μηχανο/ακουστική μετατροπή




**Ευσαιθησία μετατροπέων**

- Ορίζεται ως «ο λόγος του παραγόμενου έργου προς την εισερχόμενη ενέργεια»
- Αποτελεί μέτρο της απόδοσης του μετατροπέα
- Καθορίζει την απόκρισή του
- Π.χ. για μικρόφωνα
  - $S = (V/P)_{f=0}$
- Συνήθως εκφράζεται σε dB

$$SL = 20 \log \frac{S}{S_{ref}}$$

-  $S_{ref} = 1V/Pa$




**Ευσαιθησία μικροφώνων**

- Ορισμός ευαισθησίας μικροφώνων



$$S = \left( \frac{V}{P} \right)_{f=0}$$

- Ορισμός στάθμης ευαισθησίας μικροφώνων

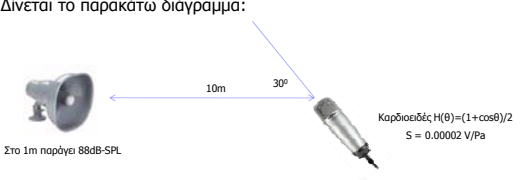
$$S.L. = 20 \log_{10} \frac{S}{S_{ref}} \quad \text{ref} = 1V/1Pa$$



### Κατευθυντικότητα μικροφώνων

- Γενικά, για ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς, η ευαισθησία εξαρτάται από
  - τη διεύθυνση ως προς τον άξονά τους
  - τη συχνότητα
- Η μεταβολή της ευαισθησίας εκφράζεται ως κατευθυντικότητα του μετατροπέα
  - Συνάρτηση  $H(\theta, \phi)$  ή  $S(\theta, \phi)$
- Παράδειγμα:
  - Για ένα μεγάφωνο ισχύει:  $P(r, \theta, \phi) = P(r) \cdot H(\theta, \phi)$

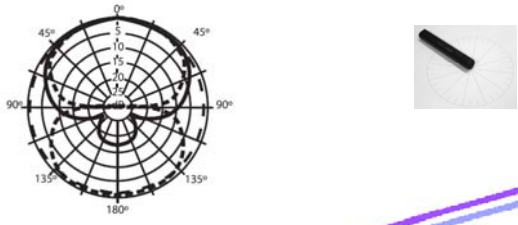




### Παράδειγμα #1

- Δίνεται το παρακάτω διάγραμμα:
 
- Ποιά η τάση στην έξοδο του μικροφώνου;




### Παράδειγμα #2

- Χρήση διαγράμματος κατευθυντικότητας
 



### Στάθμες ηχητικών σημάτων

- dBV
  - Αντιστοιχεί σε τάση 1V (rms) η οποία απαιτείται για την παραγωγή ισχύος 1mW σε φορτίο  $k\Omega$
  - Π.χ. -10dBV αντιστοιχούν σε 0.316Volt
- dBu (unloaded)
  - Αντιστοιχεί σε τάση 0.7746V (rms) που απαιτείται για την παραγωγή ισχύος 1mW σε φορτίο 600Ω



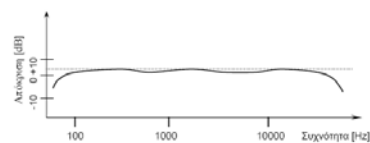
### Στάθμες ηχητικών σημάτων (συν.)

- Στάθμη μικροφώνου
  - Πολύ χαμηλής ισχύος σήματα
  - Η ηλεκτρική τάση που παράγεται από ένα μικρόφωνο
  - Της τάξης των mV (έως και -20dBu)
- Στάθμη γραμμής
  - Τάση της τάξης των Volt (από -20dBu έως +30dBu)
  - Τυπικές στάθμες -10dBu (245mV), +4dBu (1.23V), +8dBu (1.95V)
- Στάθμη ισχύος (σήματα μεγαφώνων)
  - Μεγέθη πέραν των +30dBu (24.5V)

Electro  
Acoustics

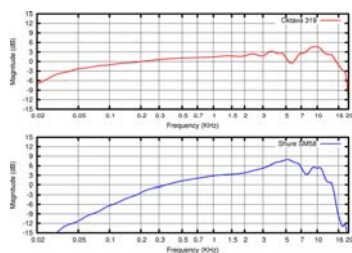
### Απόκριση συχνότητας μικροφώνων

- Μέτρηση της τάσης εξόδου συναρτήσει της συχνότητας
  - Παραγωγή τόνων μεταβλητής συχνότητας πολύ κοντά στο διάφραγμα
  - Σταθερή ηχητική πίεση ανά τόνο (π.χ. 104dB-SPL)
  - Μέτρηση της τάσης εξόδου



Electro  
Acoustics

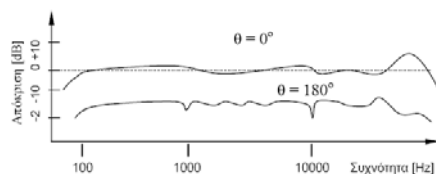
### Απόκριση συχνότητας μικροφώνων (συν.)



Electro  
Acoustics

### Απόκριση συχνότητας μικροφώνων (συν.)

- Λόγω κατευθυντικότητας, η απόκριση μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης
  - Π.χ. για καρδιοειδές μικρόφωνο:



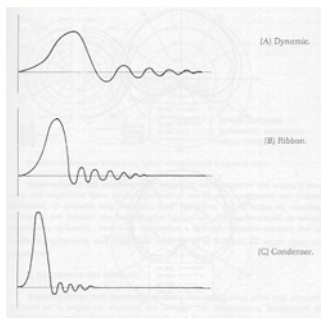
Electro  
Acoustics

### Απόκριση σε απότομες μεταβολές

- Transient response
  - Πόσο ευαίσθητο είναι ένα μικρόφωνο σε απότομες μεταβολές της πίεσης
- Αποκλειστική εξάρτηση από
  - Μάζα διαφράγματος
    - Π.χ. 1.5mg στα πυκνωτικά
    - 75mg για τα δυναμικά
  - Συντελεστή απόσβεσης του μετατροπέα
- Η μορφή της απόκρισης αυτής καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τελική ποιότητα του ήχου
  - Γρήγορες μουσικές «ατάκες»
  - Αιχμές πλάτους σήματος
  - Σε εφαρμογές ομιλίας δεν επηρεάζει την τελική απόδοση

Electro  
Acoustics

### Απόκριση σε απότομες μεταβολές (συν.)



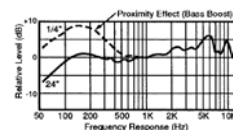
Electro  
Acoustics

### Φαινόμενο εγγύτητας

- Proximity effect
- Ενίσχυση των χαμηλών συχνοτήτων όταν η απόσταση μικροφώνου - πηγής είναι μικρή
  - Αποστάσεις μικρότερες από 50 εκατοστά
  - Μόνο για κατευθυντικά μικρόφωνα
  - Αύξηση μέχρι και 16dB σε χαμηλές συχνότητες
    - Μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτωση
  - Οι υψηλότερες συχνότητες ακυρώνονται σε μικρές αποστάσεις, οι χαμηλές όχι

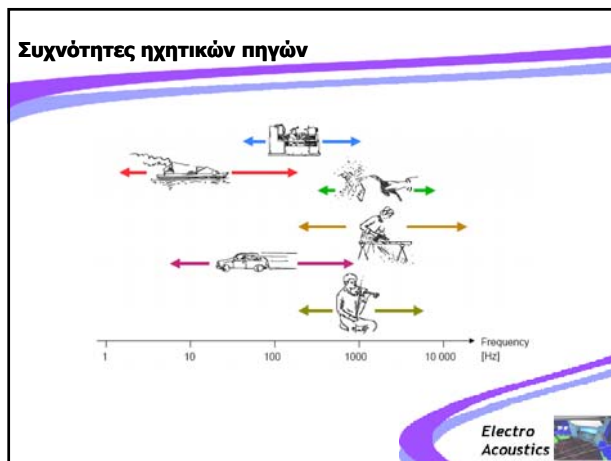
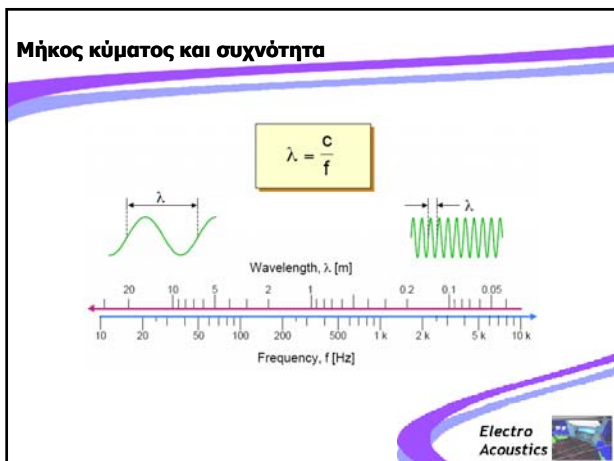
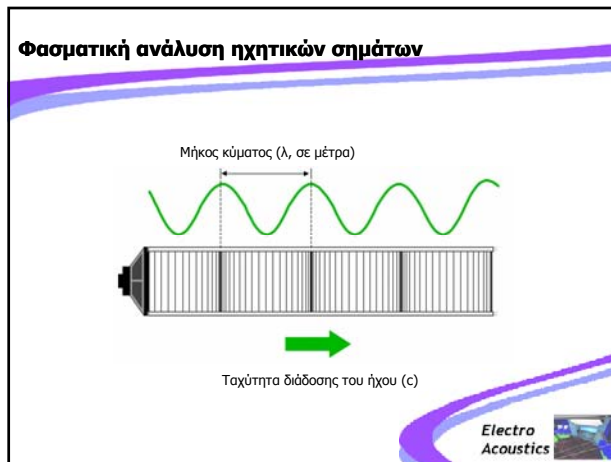
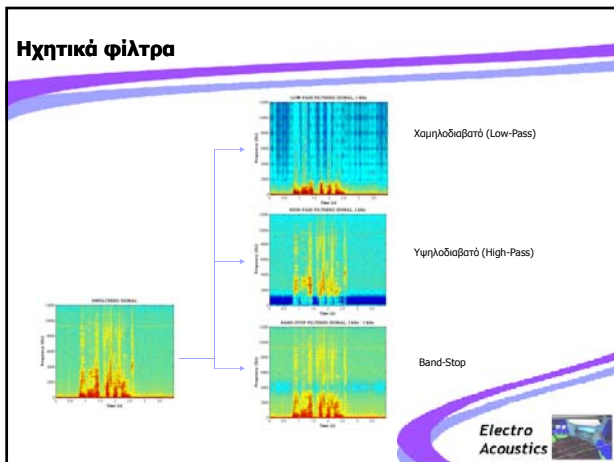
Electro  
Acoustics

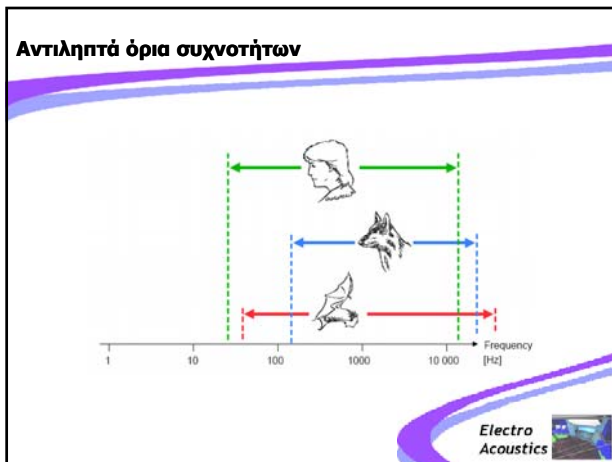
### Φαινόμενο εγγύτητας (συν.)



- Σε πολλές περιπτώσεις το φαινόμενο χρησιμοποιείται από τους ομιλητές για τη δημιουργία «γεμάτου» ήχου
- Απαιτείται χρήση υψηλοδιαβατού φίλτρου για την αντιμετώπισή του

Electro  
Acoustics

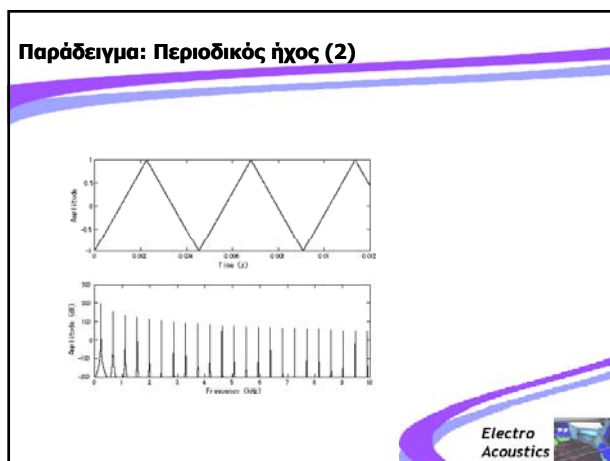
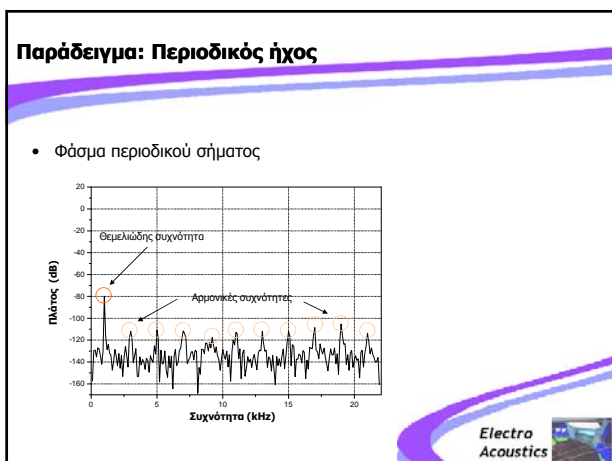


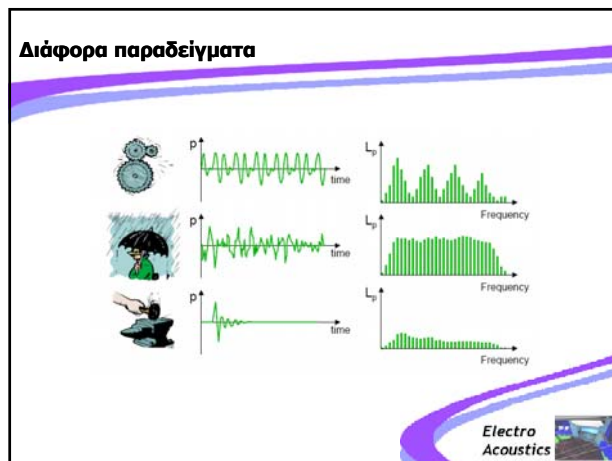
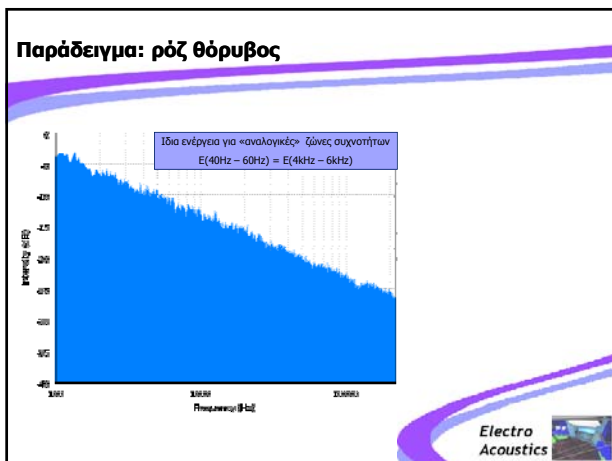
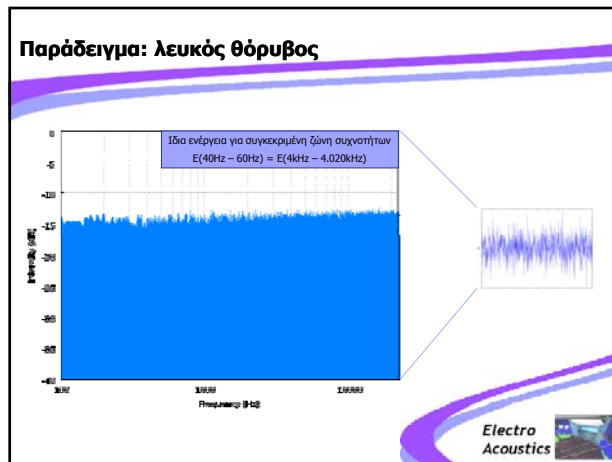
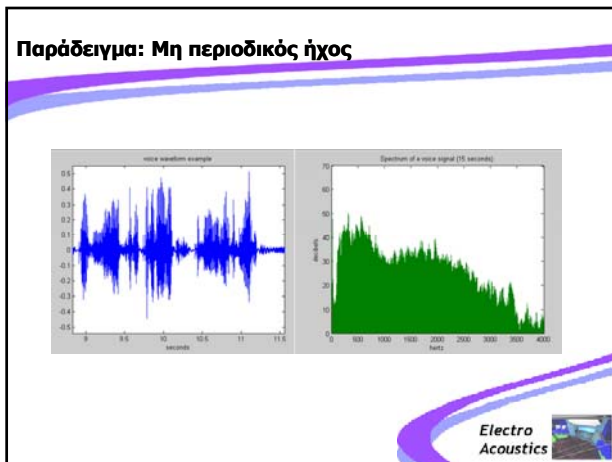


### Η έννοια του φάσματος ενός ηχητικού σήματος

- Φάσμα ενός ηχητικού σήματος
  - Αναπαράσταση του ηχητικού κύματος στο πεδίο της συχνότητας
    - Η ενέργεια του ήχου ανά συχνότητα
  - ... ή αλλιώς η απεικόνισή του στο πεδίο της συχνότητας
- Συνιστώσες φασματικής απεικόνισης
  - Για περιοδικούς ήχους
    - Θεμελιώδης συχνότητα
    - Ακέραια πολλαπλάσια θεμελιώδους συχνότητας
  - Για μη περιοδικούς ήχους
    - Το φάσμα μια συνεχόμενη γραμμή

Electro Acoustics





### Υπολογισμός φάσματος - Ανάλυση Fourier

- Ένα **περιοδικό** σήμα  $f(t)$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + b_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right]$$

- όπου

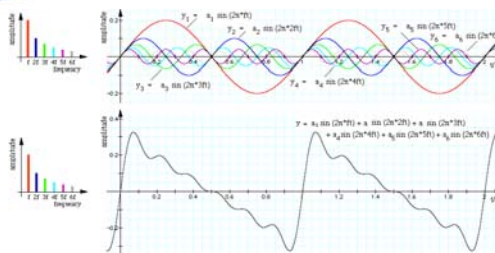
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \frac{2n\pi t}{T} dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \frac{2n\pi t}{T} dt$$

- και

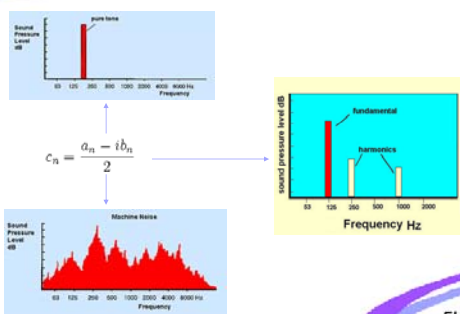
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$



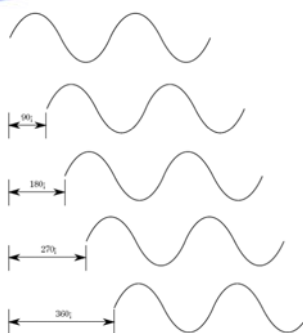
### Υπολογισμός φάσματος - Ανάλυση Fourier (συν.)



### Υπολογισμός φάσματος - Ανάλυση Fourier (συν.)

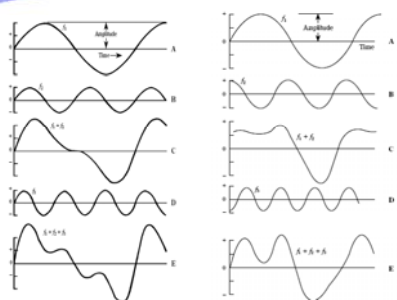


### Η έννοια της φάσης





### Η έννοια της φάσης (συν.)



Electro  
Acoustics

### Παράδειγμα #3

- Ποιό το φάσμα ενός κρουστού;
- Ποιό το φάσμα της ανδρικής ομιλίας;
- Ποιό το φάσμα της γυναικίας ομιλίας;

Example03.m

Electro  
Acoustics

### Παράδειγμα #4

- Έστω (αναλογικό) σύστημα προενίσχυσης με δυναμική περιοχή από -1 έως 1
- Έστω ότι το κέρδος της προενίσχυσης είναι ίσο με G
- Έστω ότι εφαρμόζουμε ως είσοδο μία ημιτονική κυματομορφή με πλάτος 0.99 και συχνότητας 1kHz
- Ποιά η μορφή του φάσματος στην έξοδο της βαθμίδας προενίσχυσης;
- Πόση είναι η μετρούμενη αρμονική παραμόρφωση (THD+Noise)
  - $THD+Noise = \text{Harmonics Power} / \text{Total Power}$
- Να υπολογιστεί η THD+Noise ως συνάρτηση της συχνότητας εισόδου

Example04m, CalculateTHDN.m



Electro  
Acoustics

### Κατηγορίες μικροφώνων

Electro  
Acoustics

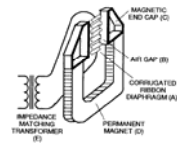

### Δυναμικά μικρόφωνα

- Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος μικροφώνου
  - Φθηνά
  - Αξίιστα
  - Χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο
- Πρώτες κατασκευές το 1920
- Εμπορική διάθεση το 1930
- Βασική αρχή λειτουργίας:
  - Μια μεταλλική επιφάνεια ή σύρμα βρίσκεται εντός μόνιμου μαγνητικού πεδίου
  - Όταν στην επιφάνεια εφαρμοσθεί ηχητική πίεση αυτή ταλαντώνεται
  - Η κίνηση δημιουργεί ρεύμα, ανάλογο του πλάτους ταλάντωσης

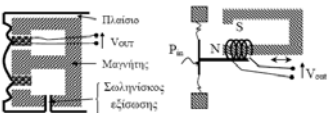


### Δυναμικά μικρόφωνα ταινίας (ribbon)

- Η πλέον απλή και φθηνή υλοποίηση
- Το διάφραγμα και η μεταλλική επιφάνεια ταυτίζονται
- Απαραίτητη η χρήση μετασχηματιστή
  - Αύξηση της ωμικής αντίστασης που «βλέπει» ο προενισχυτής
  - Αύξηση της τάσης εξόδου προς τον προενισχυτή μικροφώνου

### Δυναμικά μικρόφωνα κινούμενου πηνίου (moving coil)

- Αντικατάσταση του μεταλλικού διαφράγματος με πηνίο χαλκού
- Παραγωγή πολύ μεγαλύτερης ποσότητας ρεύματος

### Δυναμικά μικρόφωνα κινούμενου πηνίου (moving coil)



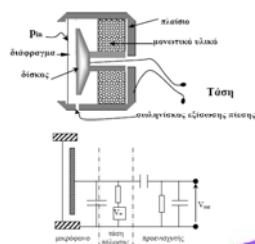


## Πυκνωτικά (condenser) μικρόφωνα

- Εμπορική χρήση το 1920
- Χαρακτηριστικά απόδοσης
  - πολύ υψηλή πιστότητα
  - επίπεδη απόκριση
  - μικρό θόρυβο
  - ικανοποιητική ευαισθησία
- Η ευαισθησία δίνεται από τη σχέση

$$S \cong \frac{V_o}{V_i} \frac{R^2}{8F_T^2}$$

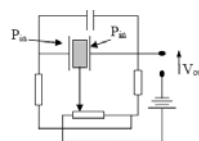
- $F_T$  η μηχανική τάση του διαφράγματος
- $x_o$  η απόσταση διαφράγματος-δίσκου
- $V_o$  η τάση πάλωσης
- $R$  η ακτίνα του διαφράγματος
- Αύξηση της ακτίνας αλλοιώνει την απόκριση στις υψηλές συχνότητες



Electro Acoustics

## Πυκνωτικά μικρόφωνα (συν.)

- Γενικά, τα πυκνωτικά μικρόφωνα είναι διακατευθυντικά
  - omnidirectional
- Δικατευθυντικά μικρόφωνα με χρήση διαφραγμάτων σε αντιδιαμετρικές θέσεις
  - Π.χ. μικρόφωνο Neuman



Electro Acoustics

## Πυκνωτικά μικρόφωνα (συν.)

- Τα πυκνωτικά μικρόφωνα θεωρούνται η κορυφαία κατηγορία (με κριτήριο την απόδοση)
  - Μπορούν να αποδώσουν σε συχνότητες <1Hz
  - Όριο φάσματος μέχρι και τα 150kHz
- Χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε όλες τις ακουστικές μετρήσεις



Electro Acoustics

## Phantom Power

- Τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν μεγάλη εσωτερική σύνθετη αντίσταση
  - Απαιτείται ενίσχυση του παραγόμενου σήματος κοντά στο μικρόφωνο
- Επίσης, ο πυκνωτής πρέπει να τροφοδοτηθεί από πηγή σταθερής τάσης
  - Π.χ. μπαταρία
- Πολλές φορές η διαθέσιμη τάση είναι πολύ μικρή
  - Ή δεν επαρκεί ο χρόνος ζωής της μπαταρίας
- Λύση το "Phantom Power"
  - «Αόρατη» ισχύς

Electro Acoustics

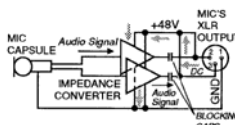
### Phantom Power (συν.)

- Τροφοδοσία του πυκνωτή με συνεχή τάση
- Εξασφαλίζει μέγιστη δυνατή ενίσχυση στον προενισχυτή
- Διά μέσου του ενός και μόνο καλωδίου του μικροφώνου
- Υλοποίηση με συσκευές μείξης που υποστηρίζουν τη λειτουργία
  - 48V dc (συνθέςτερο)
  - 24V dc (σπανιότερο)
- Επιλογή χρήσης μέσω κατάλληλου διακόπτη
  - Τίθεται στο off όταν χρησιμοποιείται μπαταρία

Electro  
Acoustics

### Phantom Power (συν.)

- Υλοποίηση με χρήση 3 αγωγών στο καλώδιο σύνδεσης
- Σύνδεση εξισορροπημένη / συμμετρική
  - Balanced / symmetrical



Electro  
Acoustics

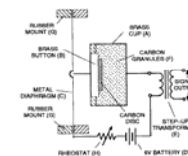
### Μικρόφωνα electret

- Παραλλαγή πυκνωτικών μικροφώνων
- Η σταθερή τάση διαφράγματος δημιουργείται από μόνιμο φορτίο συνεχούς ρεύματος
  - Σχηματίζεται κατά την κατασκευή
- Το φορτίο αυτό παρέχει σταθερή τάση για διάστημα λειτουργίας 10 - 30 χρόνια
- Αποδεκτά λόγω χαμηλού κόστους κατασκευής

Electro  
Acoustics

### Μικρόφωνα άνθρακα

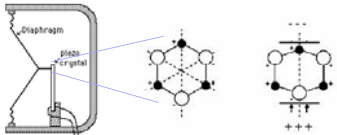

- Από τους παλαιότερους τύπους μικροφώνων
  - Ευρύτατη χρήση στην τηλεφωνία
- Το διάφραγμα συμπιέζει έναν όγκο κόκκων άνθρακα
- Η μεταβολή του όγκου ισοδυναμεί με αλλαγή της αντίστασης
- Υπό σταθερή τάση παράγεται μεταβλητό ρεύμα
- Κατάλληλο για μαζική παραγωγή
  - Χαμηλό κόστος
  - Χαμηλή ποιότητα
    - πολύ υψηλή παραμόρφωση
    - θόρυβος



Electro  
Acoustics

### Πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα


- Αρχή λειτουργίας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο
  - Ορισμένα κρυσταλλικά υλικά παράγουν τάση όταν τους ασκηθεί μηχανική εναλλασσόμενη πίεση
- Χρήση διαφράγματος για δημιουργία μηχανικής πίεσης

**Electro Acoustics**

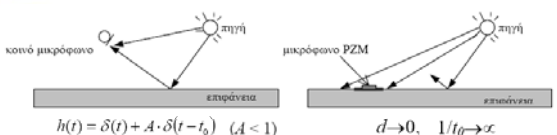
### Μικρόφωνα επιφανείας

- Pressure Zone Microphones (PZM)
- Μικρά "electret" μικρόφωνα τοποθετημένα σε μικρή απόσταση (~1mm) από σκληρό - επίπεδο ανακλαστήρα
- Μονοκατευθυντική λειτουργία
  - με αυστηρά ημισφαιρική κατευθυντικότητα
  - Συλλογή μόνο «ανακλώμενου ήχου»
  - Κατευθυντικό κέρδος της τάξης των 6dB
  - Αντιμετώπιση προβλημάτων καταγραφής εκτός φάσης κατευθειών σημάτων και ανακλάσεων



**Electro Acoustics**

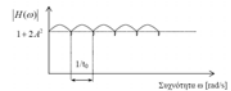
### Μικρόφωνα επιφανείας (συν.)



$h(t) = \delta(t) + A \cdot \delta(t - t_0) \quad (A < 1)$

$d \rightarrow 0, \quad 1/t_0 \rightarrow \infty$

$|H(j\omega)| = \sqrt{1 + 2A^2 + 2A \cos \omega t_0}$



**Electro Acoustics**

### Συστήματα μεταβλητής κατευθυντικότητας

- Επίτευξη επιθυμητής κατευθυντικότητας
  - Συνδυασμό διαφορετικών μετατροπών
  - ...ή ειδικά συστήματα εκλογής διαφορετικών μορφών κατευθυντικότητας



Δισκατευθυντικό + Δισκατευθυντικό = Καρδιοειδές



**Electro Acoustics**

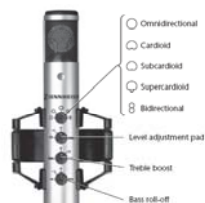
### Συστήματα μεταβλητής κατευθυντικότητας (συν.)

- Χρήση μηχανικών/ακουστικών συστημάτων που εκθέτουν το διάφραγμα σε διαφορετικές κατευθύνσεις ηχητικών κυμάτων
- Π.χ. Μικρόφωνα «σωλήνα»
  - Λήψη σημάτων από ακουστικές πηγές σε μεγάλη απόσταση
  - Ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας τοποθετημένο σε σωλήνα με οπές (ports)
  - Οι θέσεις των οπών καθορίζουν ποιές συχνότητες καταγράφονται εκτός άξονα



Electro  
Acoustics

### Συστήματα μεταβλητής κατευθυντικότητας (συν.)



Electro  
Acoustics

### Συστήματα μεταβλητής κατευθυντικότητας (συν.)



Electro  
Acoustics

### Συστήματα μεταβλητής κατευθυντικότητας (συν.)

- Μικρόφωνα ηχητικού πεδίου
  - Sound field microphones
- 4 ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς μονού διαφράγματος με μονοκατευθυντικά χαρακτηριστικά
- Τοποθέτηση σε τετραεδρικό σύστημα
  - Ηλεκτρονικός έλεγχος της κίνησης
- Παράλληλη χρήση μεθόδου αναπαραγωγής Ambisonics



Electro  
Acoustics

### Συστήματα μεταβλητής κατευθυντικότητας (συν.)

- Μικρόφωνο ηχητικού πεδίου

The diagram shows a microphone on the left connected to a central processing unit. Above the unit are four vertical arrows labeled W, X, Y, and Z, with the text 'SP431 B-format inputs' below them. Below the unit are five vertical arrows labeled L, C, R, LS, and RS, with the text '5.1 surround outputs' above them. A 'SUB BASS' output is also indicated at the bottom right.

**Electro Acoustics**

### Χρήση των μικροφώνων

- Στο επόμενο μάθημα...

The photograph shows a stage with several microphones. Two hanging shotgun microphones are positioned for hosts and guests. A P2M hanging microphone with a reflector is positioned for audience pickup.

Hanging shotgun mics for hosts and guests

P2M hanging mic with reflector for audience pickup

**Electro Acoustics**

### ΤΕΛΟΣ (για σήμερα...)

A collection of various microphone models, including handheld, desk, and shotgun types.

**Electro Acoustics**

[www.ionio.gr/~floros/](http://www.ionio.gr/~floros/)