

# ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

## 2. Αναδρομή και αρχές λειτουργίας ΗΑ συστημάτων

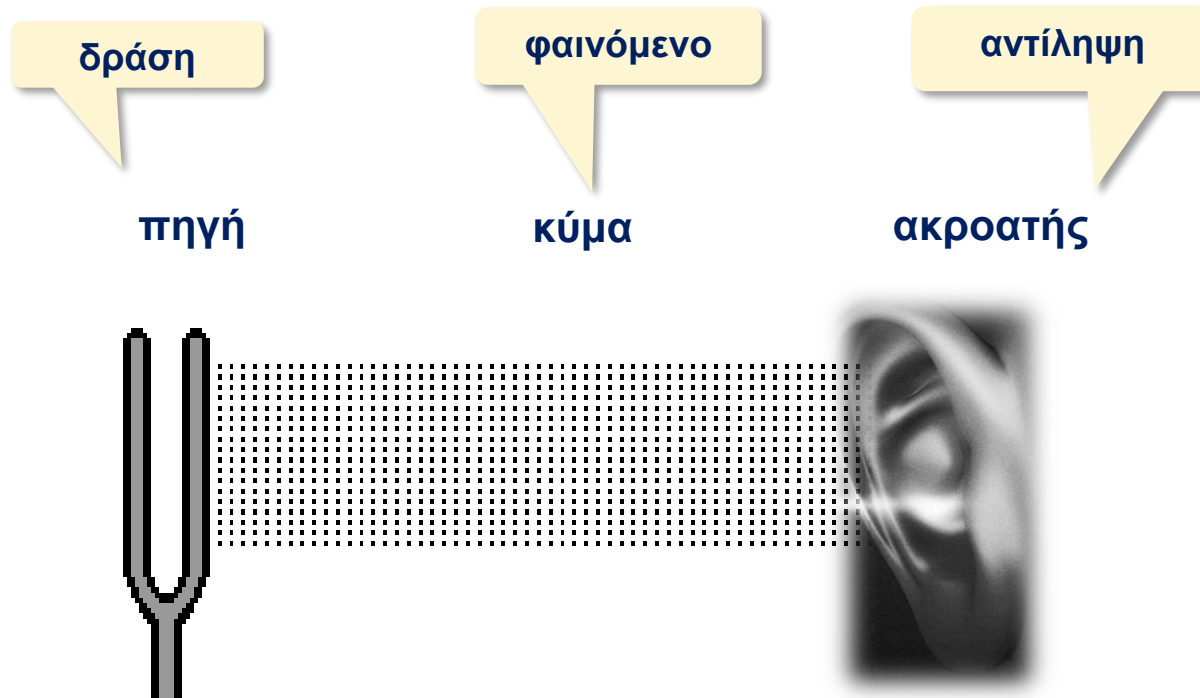
Γιάννης Μουρτζόπουλος



ΟΜΑΔΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

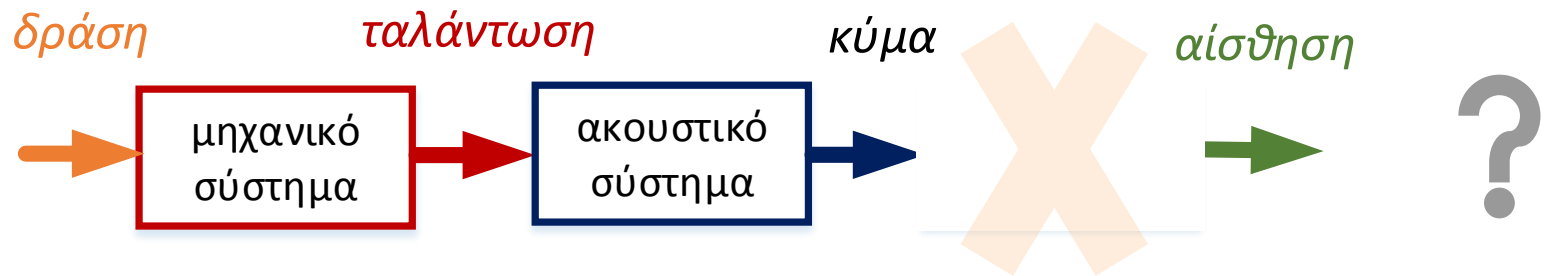
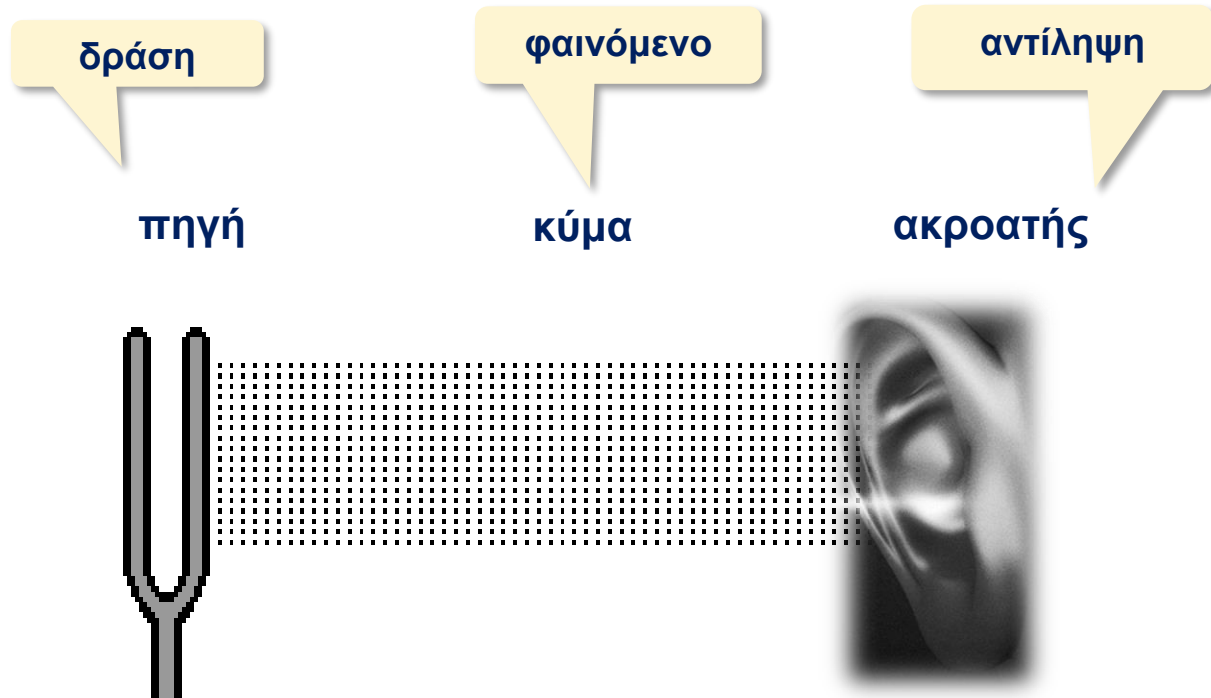
[www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/](http://www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/)

# ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΗΧΟΣ;

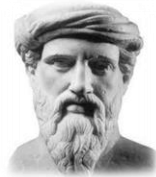


- **ταλάντωση** από την πηγή δημιουργεί ένα **κύμα**
- το κύμα **διαδίδεται** προς τον **δέκτη** (ακροατής, μικρόφωνο)
- παράγει **ακουστικό ερέθισμα**

# ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΗΧΟΣ;



# η επιστήμη της ακουστικής

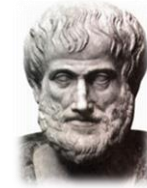


*Πυθαγόρας 500 π.Χ.*

*ακούειν*



**α κ ο υ σ τ ι κ ή**



*Αριστοτέλης 350 π.Χ.*



**Φυσική του ήχου**

**Αντίληψη του ήχου**



*Lord Rayleigh 1877*



*von Helmholtz 1870*

# η επιστήμη της ακουστικής



αρχική πηγή: Χ.  
Σπυρίδης, Τμήμα  
Μουσικών Σπουδών,  
ΕΚΠΑ

# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

**1800**

1857 *Scott de Martinville*

1876 *Graham Bell*

**1877** **Thomas Edison**

1881 *Clement Adler*

1887 *David Hughes*

1893 *P. Berliner*

**1898** **Oliver Lodge**

1898 *Vladimir Poulsen*

**1900**

1901 *Marconi*

1902 *Greenleaf Pickard*

1906 *Cornelius Ehret*

**1907** **DeForest**

1922 *Western Electric*

φωνο-αυτογράφος

τηλέφωνο

**φωνόγραφος (κυλίνδρου)**

θεατρόφωνο (Διεθνής Έκθεση, Παρίσι)

μικρόφωνο (στοιχείο άνθρακος)

φωνόγραφος (δίσκου)

**μεγάφωνο**

μαγνητική ηχογράφηση

ασύρματος / ραδιόφωνο (κώδικας Morse)

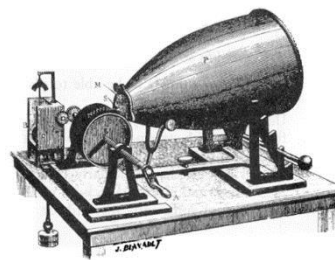
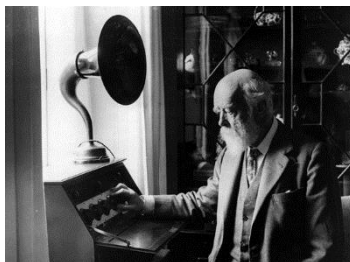
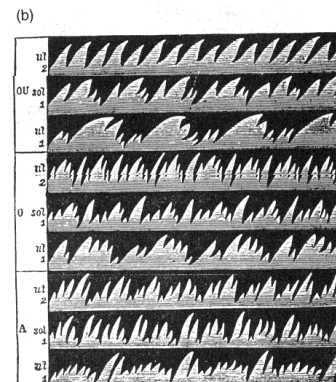
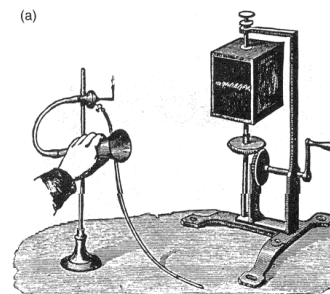
ραδιόφωνο (ηχητικό σήμα)

ενισχυτής (ηλεκτρομαγνητικός)

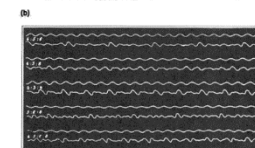
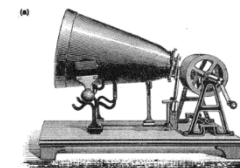
**ενισχυτής λυχνίας**

ενισχυτής λυχνίας (παραγωγή)

**ραδιόφωνο (A.M.)**

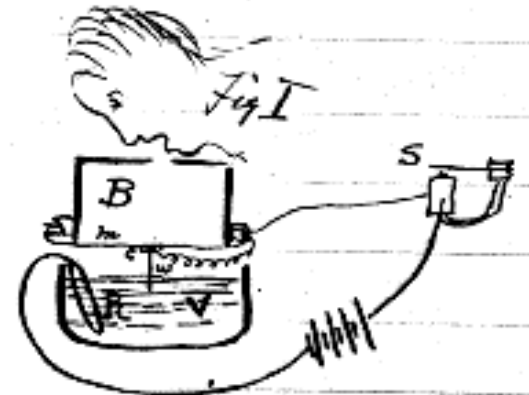
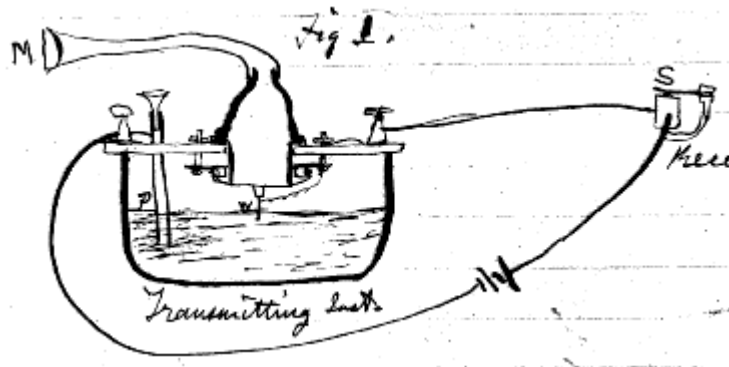
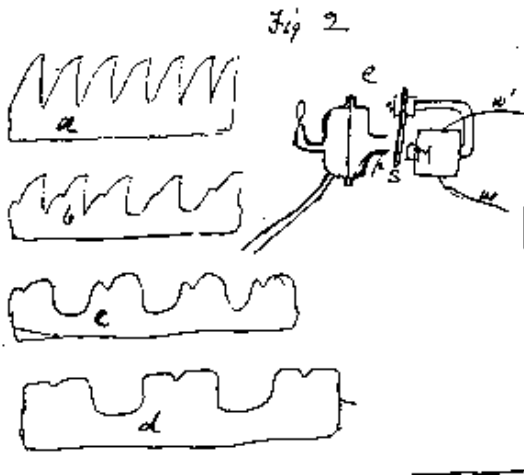


SCOTT'S PHONAUTOGRAPH



# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

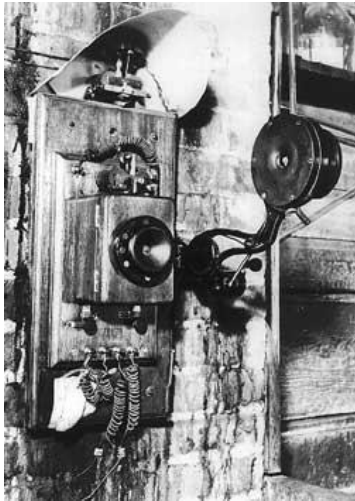
## Alexander Graham Bell



από τις σημειώσεις του Bell, Φεβρουάριος - Μάρτιος 1876

# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

τα πρώτα Η/Α συστήματα



πρώτα τηλέφωνα



Από τις πρώτες ηχογραφήσεις (Albert Spalding)



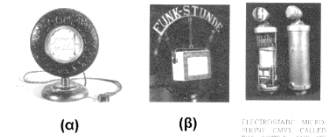
# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

Thomas Edison



# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

1925	Alfred Cortot	ηλεκτρική ηχογράφιση <b>δίσκος 78 r.p.m. (S.P.)</b>
<b>1925</b>	<b>Rice και Kellog</b>	<b>μεγάφωνο</b>
1925	Geneva Radio	ραδιόφωνο (εκπομπή προγράμματος)
1926	Φιλαρμονική Ορχήστρα N.Y.	μουσική επένδυση κινηματογραφικού φιλμ
<b>1927</b>	<b>Harry Olson</b>	<b>μικρόφωνο (δυναμικό)</b>
1927	Edward Wente	ηλεκτροστατικοί Η/Α μετατροπείς
1927	Deutsche Grammophone	ηλεκτρο-οπτική κεφαλή ανάγνωσης
1927	H. Hurley	όρος «Hi-Fi»
1928	Georg Neumann	μικρόφωνο (πυκνωτικό)
1930	A.E.G. Telefunken	μαγνητόφωνο
<b>1930</b>	<b>Alen Blumlein (EMI Labs)</b>	<b>στερεοφωνία</b>
<b>1933</b>	<b>Harvey Fletcher (Bell Labs)</b>	<b>στερεοφωνία (3 κανάλια ήχου)</b>
1933	Alen Blumlein	πατέντα στερεοφωνικής κωδικοποίησης
1940	Leopold Stokowski	στερεοφωνική ηχητική μπάντα για την ταινία «Φαντασία» (Disney Studios)
1946	Bell Labs	τρανζίστορ (F.E.T.)
1947	Les Paul	τεχνική πολλαπλών εγγραφών (overdubbing)
1948	διάφοροι	συνθέσεις ηλεκτρο-ακουστικής μουσικής
<b>1948</b>	<b>CBS</b>	<b>δίσκος 33 ½ r.p.m. (L.P.)</b>
1949	RCA Victor	δίσκος 45 r.p.m. (E.P.)



REBORN MICROPHONE - 1971 (1970) (L) (R)  
REBORN AND REBORN (1971) MICROPHONE - 1971 (1970) (L) (R)



# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή



- 1950 G.E.C., Pickering
- 1952 Nagra (Kudelski)
  
- 1952 Sinclair και Peterson
- 1955 Aronson
- 1956 διάφορες εταιρίες**
- 1958 διάφορες εταιρίες
- 1961 C.Eilers (F.C.C)**  
**Manfred Schroeder (Bell Labs)**
- 1963 Philips**
- 1964 διάφορες εταιρίες
- 1965 διάφορες εταιρίες
- 1966 Philips

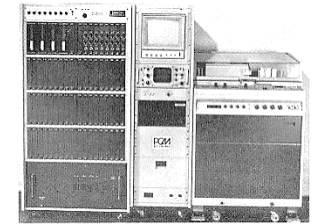
κεφαλή ανάγνωσης δίσκων  
φορητό μαγνητόφωνο  
κινηματογραφικό σύστημα Σινέραμα  
ενισχυτής χωρίς μετασχηματιστή (O.T.L.)  
ενισχυτής τρανζίστορ  
**στερεοφωνικοί δίσκοι L.P.**  
στερεοφωνικά πικ – απ  
**ραδιόφωνο F.M.**  
**ψηφιακή επεξεργασία ήχου**  
**κασετόφωνο**  
ενισχυτές τρανζίστορ (παραγωγή)  
συστήματα ταινίας 8 και 4 καναλιών (track)  
κασετόφωνο (παραγωγή)



# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

1967 **N.H.K.**  
1967 *Ray Dolby (Dolby Labs)*  
1971 **Blessner και Lee**  
1972 *Myers και Feinberg*  
1972 **T. Stockham**  
1973 *CBS*  
1975 *Philips*  
1975 *BBC*  
1977 *Sony / Philips*  
1980 **35 κατασκευαστές**  
1981 *Sony*  
1983 *διάφορες εταιρίες*  
1986 **Johnston και Branderburg**  
1986 **Dolby Labs**  
1987 *διάφορες εταιρίες*  
1989 *πρόγραμμα Eureka 147*  
1992 **ISO/MPEG**  
1992 *Sony και Philips*  
1995 **ISO/MPEG**  
1996 **DVD Forum**  
1997-.. *mp3.com*

*ψηφιακό σύστημα ηχογράφησης*  
*σύστημα αποθρομβοποίησης ταινίας*  
*ψηφιακός επεξεργαστής ήχου*  
*ψηφιακό μαγνητόφωνο*  
**ψηφιακό σύστημα ήχου σε H/Y**  
*σύστημα τετραφωνικού ήχου*  
*σύστημα δίσκων Laservision*  
*ψηφιακή ραδιοφωνία (πειράματα)*  
*ψηφιακός δίσκος ήχου (Digital Audio Disc)*  
**ψηφιακός δίσκος CD (τυποποίηση)**  
*ψηφιακό μαγνητόφωνο DAT*  
*ψηφιακοί δίσκοι CD*  
**ψυχοακουστική μέθοδος συμπίεσης ήχου**  
**σύστημα αναπαραγωγής Dolby Surround**  
*ψηφιακά μαγνητόφωνα DAT (παραγωγή)*  
*ψηφιακή ραδιοφωνία (D.A.B.)*  
*τυποποίηση κωδικοποίησης MPEG-1*  
*συστήματα ψηφιακής ηχογράφησης (MiniDisc & DCC)*  
*τυποποίηση πολυκαναλικής κωδικοποίησης MPEG-2*  
*ψηφιακός δίσκος DVD-Video (τυποποίηση)*  
*ψηφιακός ήχος στο διαδίκτυο ....*



# ηλεκτροακουστική - ιστορική αναδρομή

1877



φωνόγραφος  
κυλίνδρου

1925



δίσκος LP  
78 & 33,5 rpm

1981



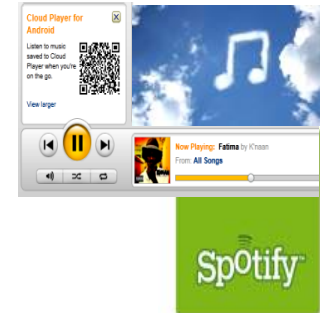
audio CD

1991



mp3 και web  
download

2011



streaming και  
audio cloud

# στόχος της τεχνολογία ήχου

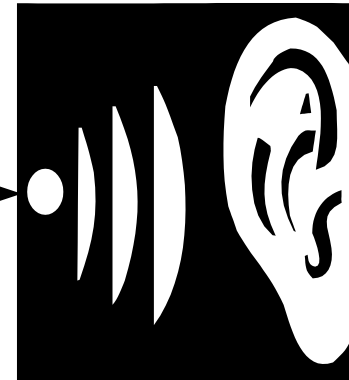
ήχος



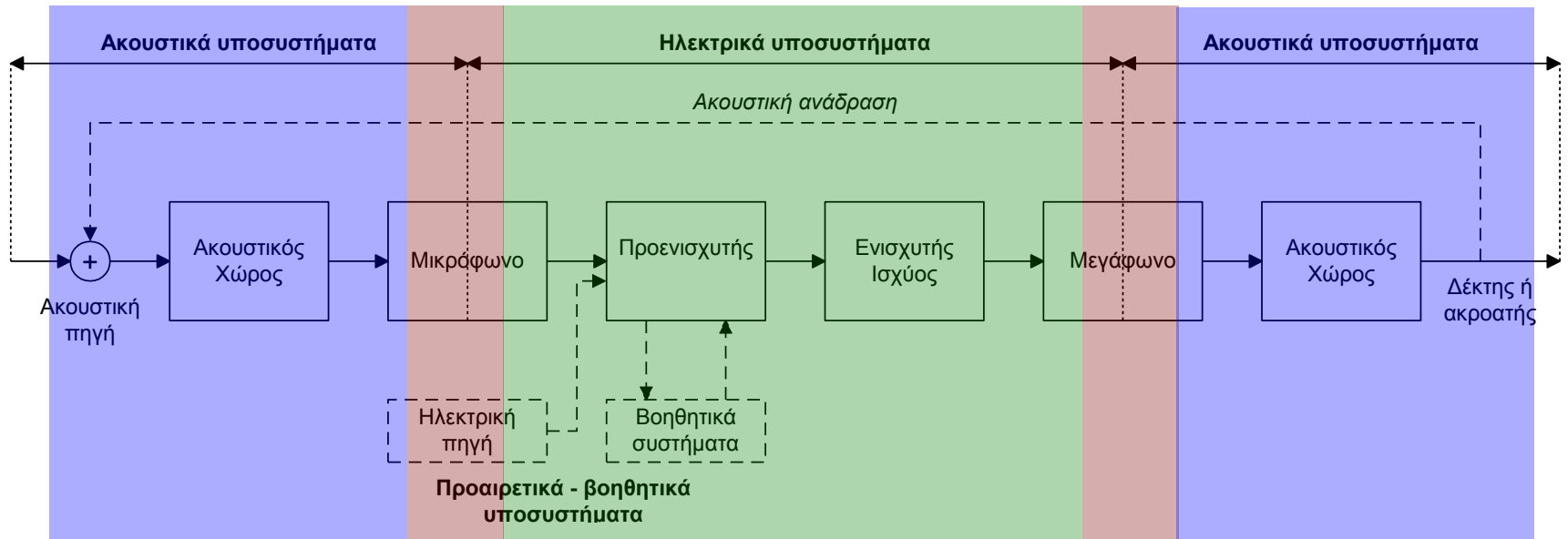
ηλεκτρο-  
ακουστική  
διάταξη



ακροατής

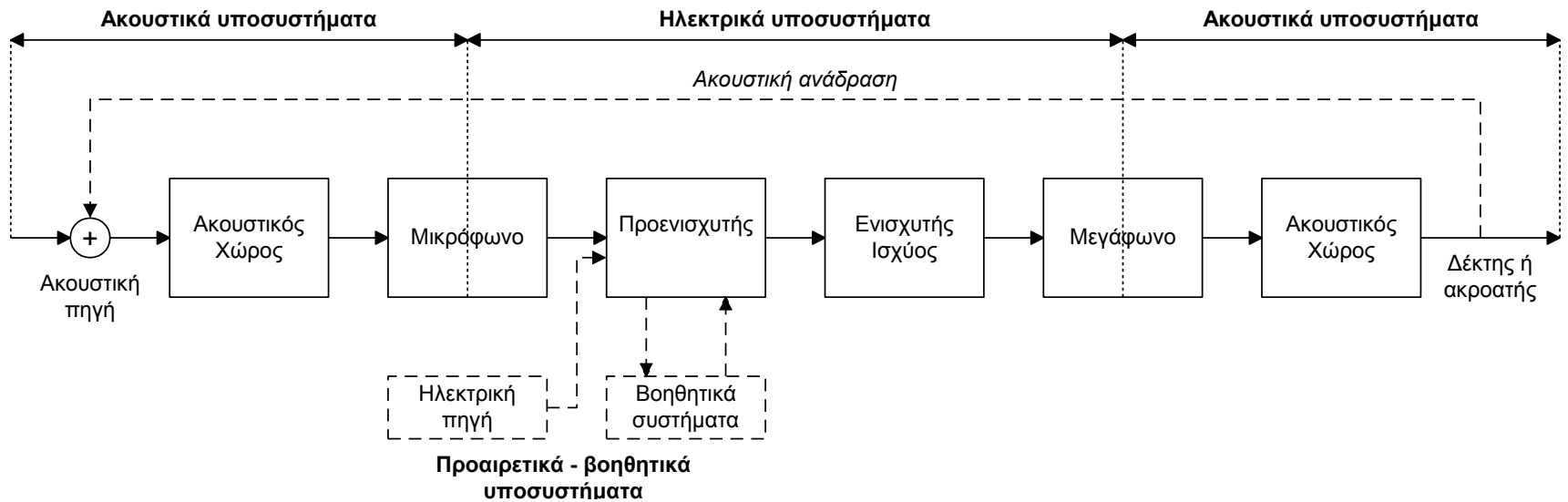


# δομή ηχητικού συστήματος



γενικό διάγραμμα ενός πλήρους ηχητικού συστήματος

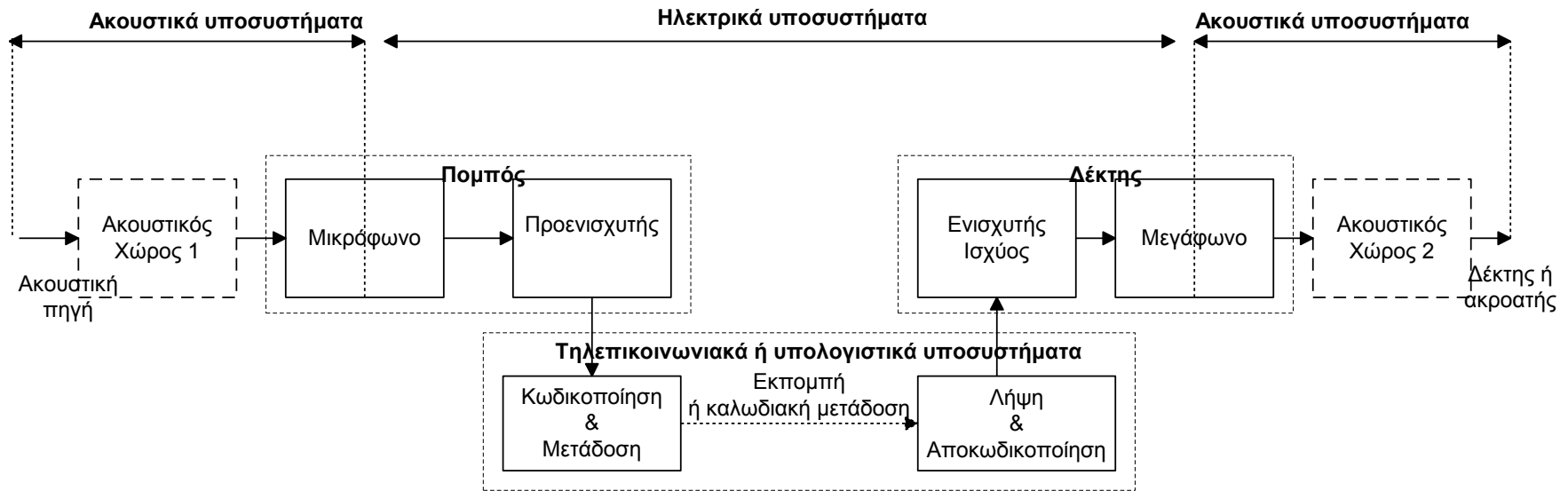
# δομή ηχητικού συστήματος



γενικό διάγραμμα ενός πλήρους ηχητικού συστήματος

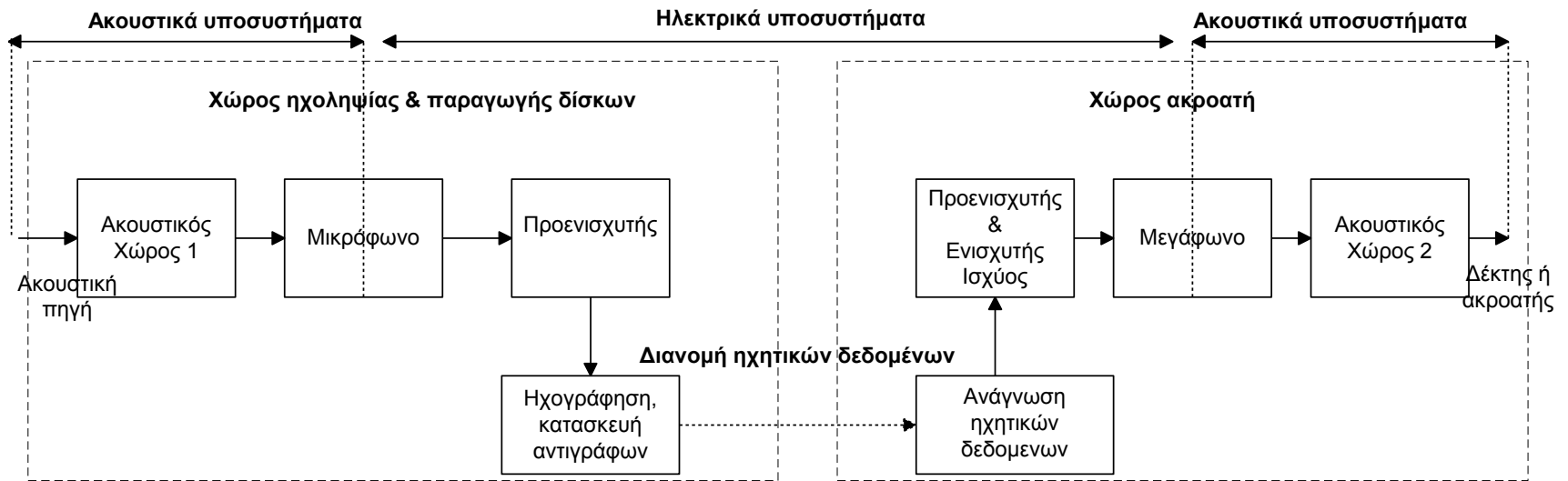


# δομή ηχητικού συστήματος



ηχητικό σύστημα για εφαρμογές τηλεπικοινωνίας

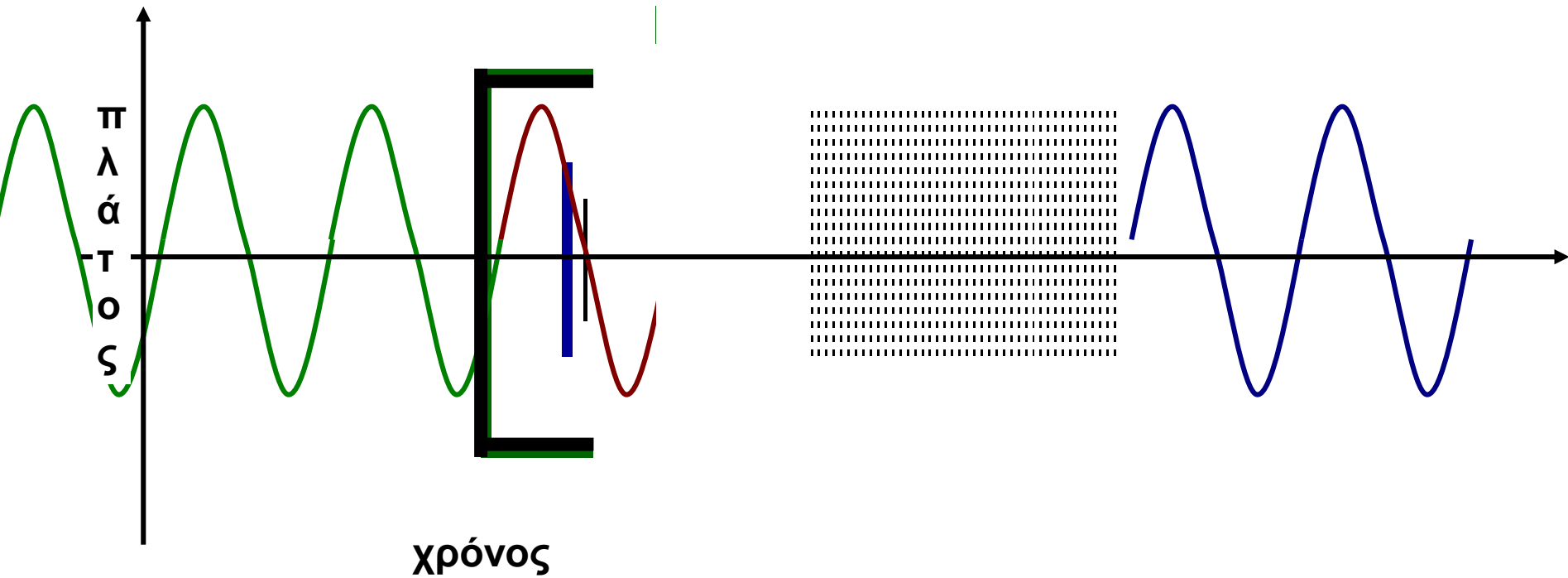
# δομή ηχητικού συστήματος



σύστημα για ηχογράφηση και αναπαραγωγή μουσικής

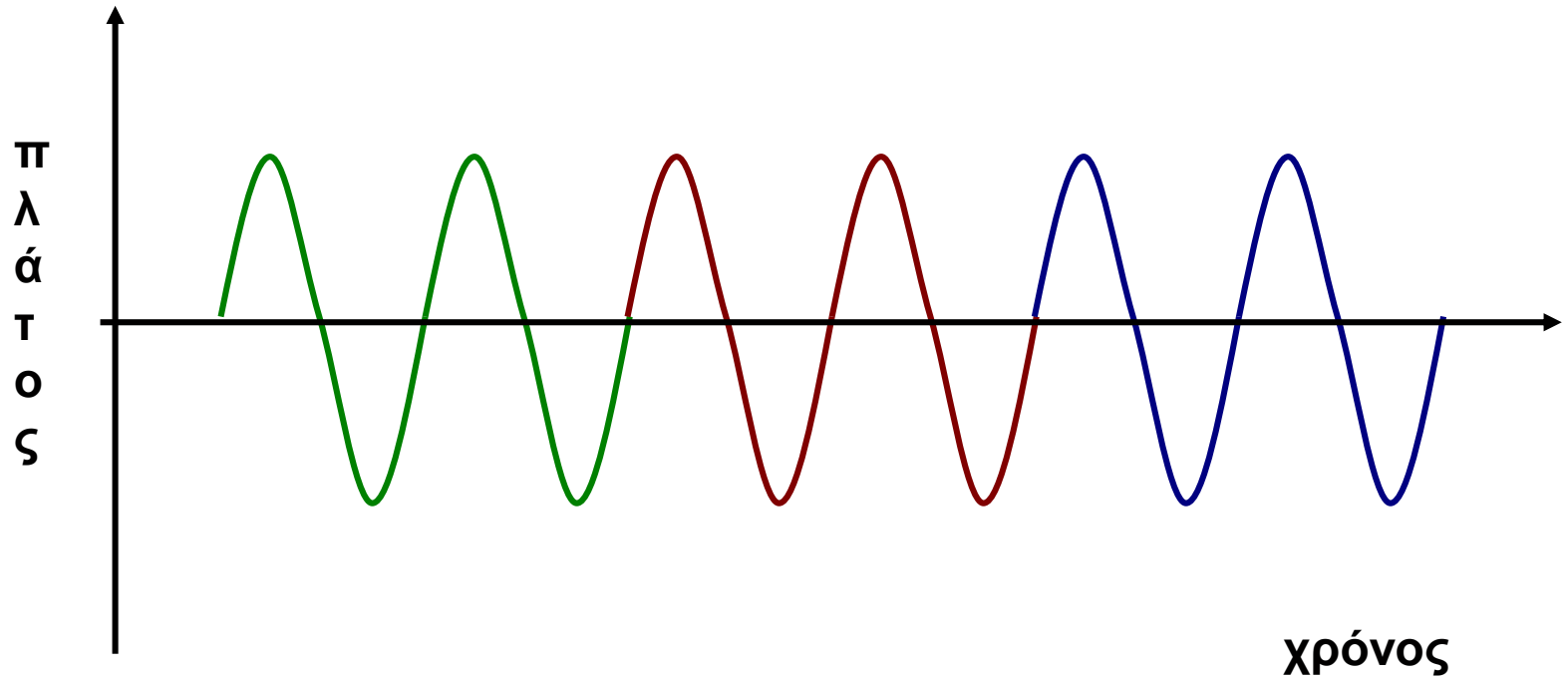
# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

ηλεκτρο – μηχανική – ακουστική μετατροπή



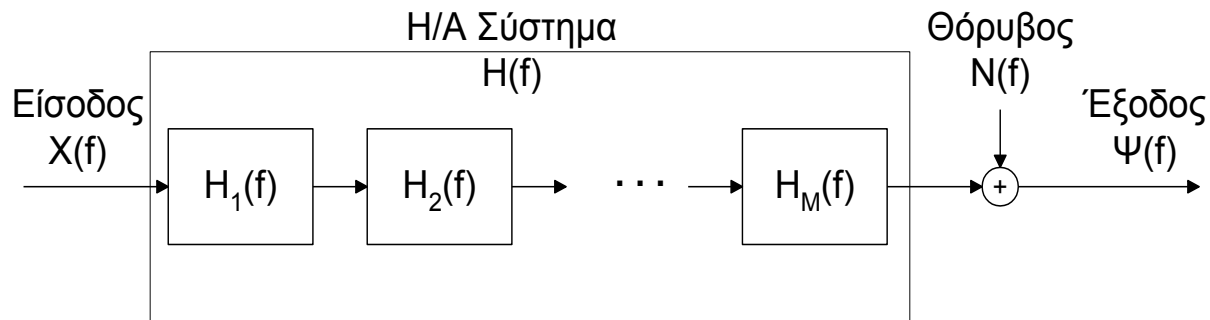
# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

ηλεκτρο – μηχανική – ακουστική μετατροπή



# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## Γ.Χ.Α. ηλεκτροακουστική αλυσίδα

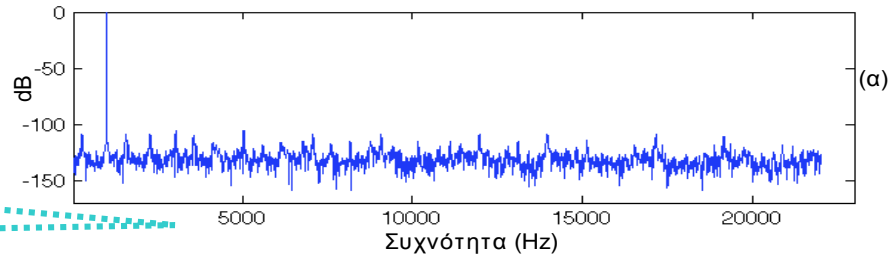


$$\Psi(f) = H(f) \cdot X(f) + N(f) = [H_1(f) \cdot H_2(f) \dots H_M(f)] + N(f)$$

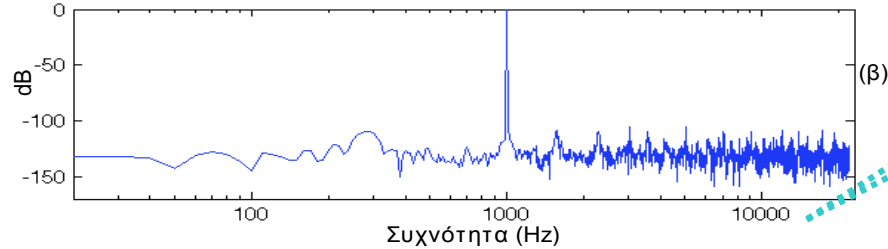
$$\psi(t) = h(t) * x(t) + n(t)$$

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

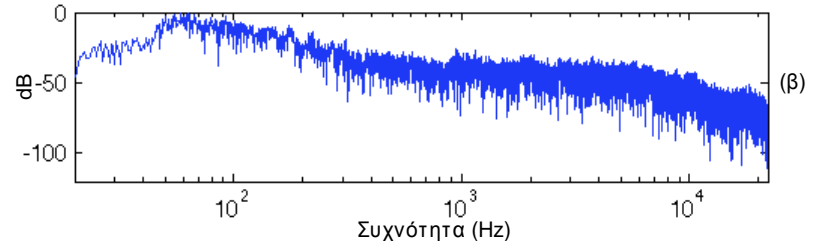
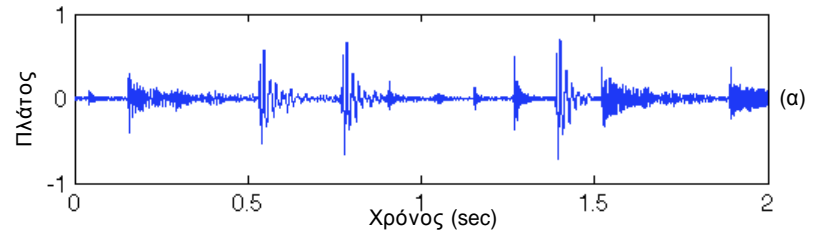
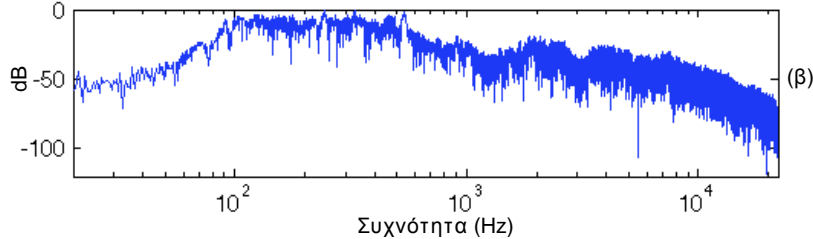
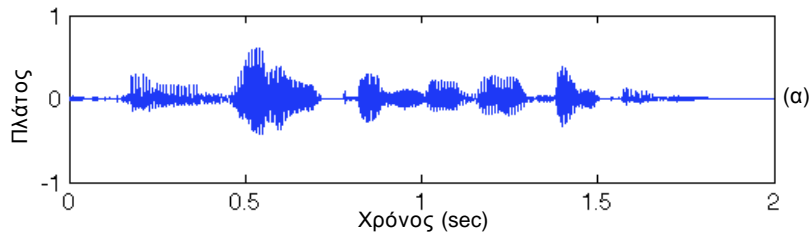
## απεικόνιση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα



Γραμμική κλίμακα συχνοτήτων



Λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων



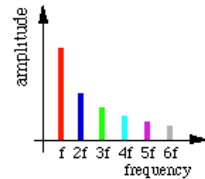
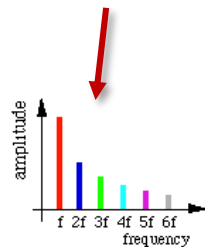
# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

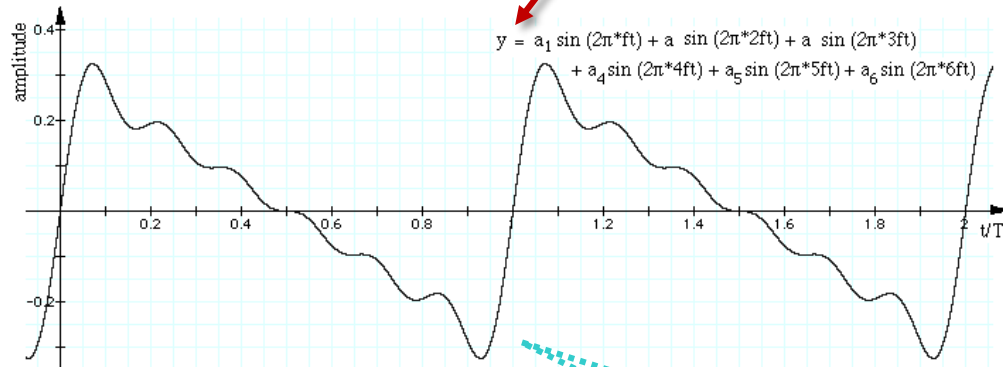
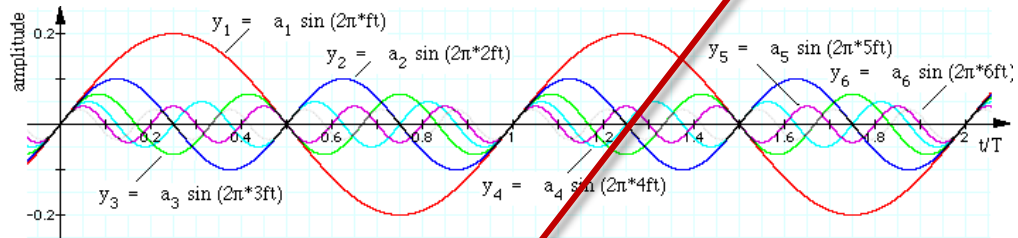
Οποιοδήποτε περιοδικό σήμα εκφράζεται σαν σειρά Fourier (άθροισμα αρμονικών συχνοτήτων)

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t) + b_k \sin(k \cdot \omega_0 \cdot t)) \quad \omega = 2\pi f$$

συχνότητα



χρόνος



τελικό  
περιοδικό  
ηχητικό σήμα  
 $y[n]$



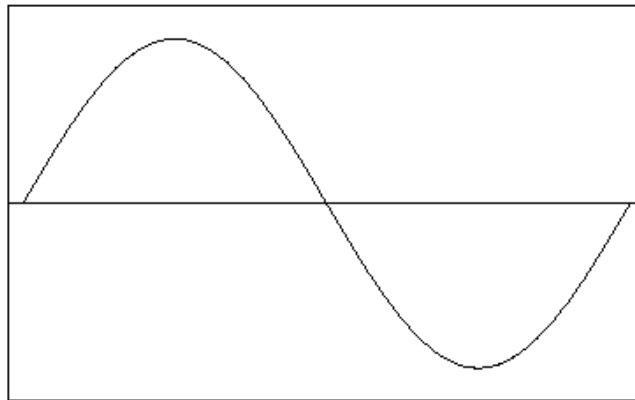
# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

Οποιοδήποτε περιοδικό σήμα εκφράζεται σαν **σειρά Fourier** (άθροισμα αρμονικών συχνοτήτων)

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t) + b_k \sin(k \cdot \omega_0 \cdot t)) \quad \omega = 2\pi f$$

χρόνος



συχνότητα





# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

οποιοδήποτε μη περιοδικό σήμα (πεπερασμένης διάρκειας) εκφράζεται σαν **ολοκλήρωμα Fourier** (ολοκλήρωμα μη αρμονικών συχνοτήτων)

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

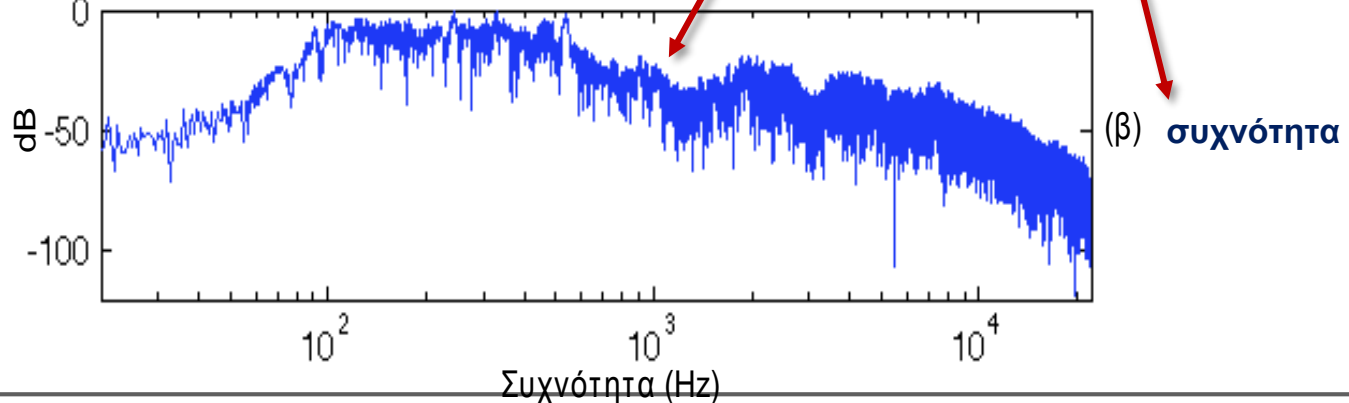
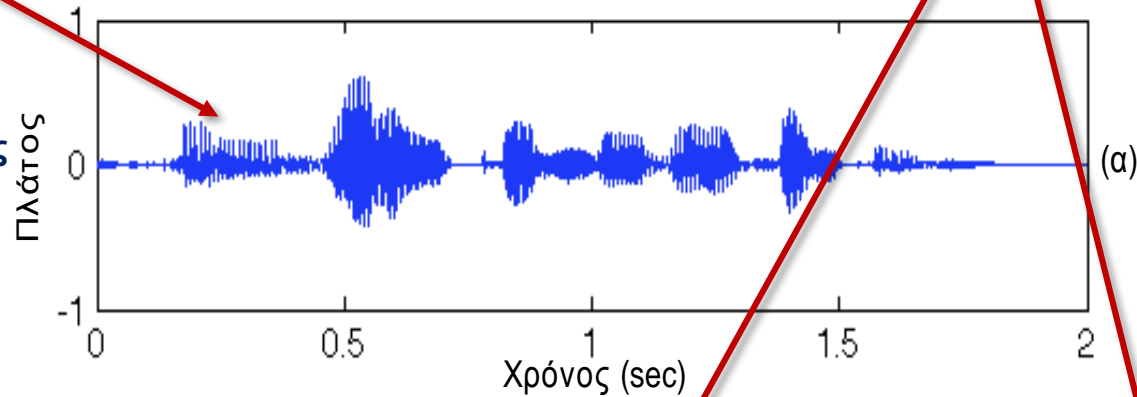
όπου  $X(\omega)$  είναι  
το φάσμα του  $x(t)$

$$\omega = 2\pi f$$

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$



χρόνος



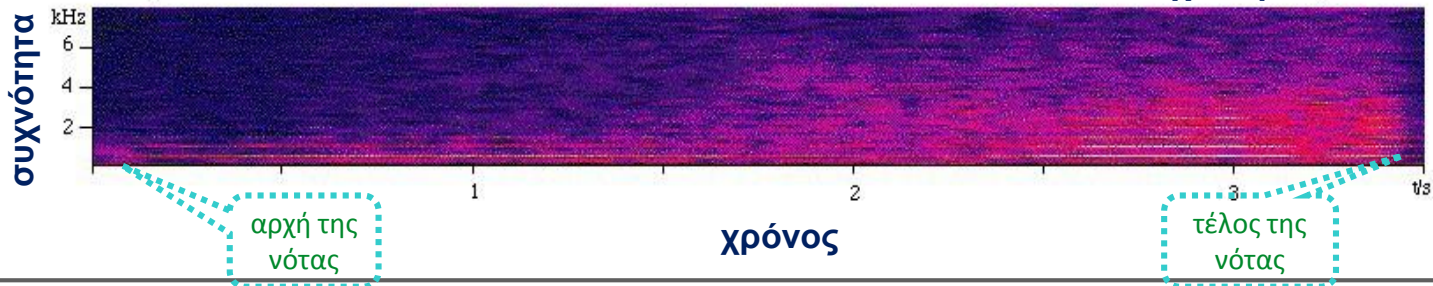
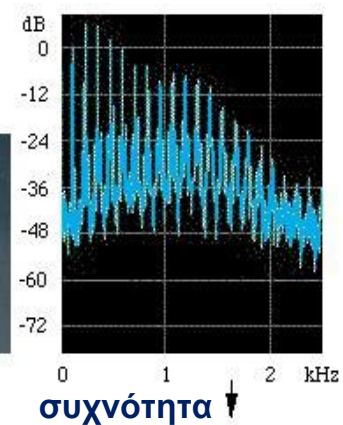
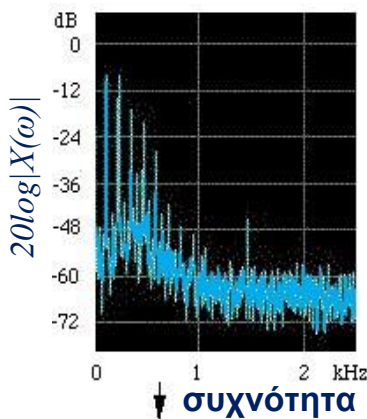
# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

οποιοδήποτε μη περιοδικό σήμα (πεπερασμένης διάρκειας) εκφράζεται σαν **ολοκλήρωμα Fourier** (ολοκλήρωμα μη αρμονικών συχνοτήτων)

$$X(\omega) \text{ είναι το φάσμα του } x(t) \quad \omega = 2\pi f$$

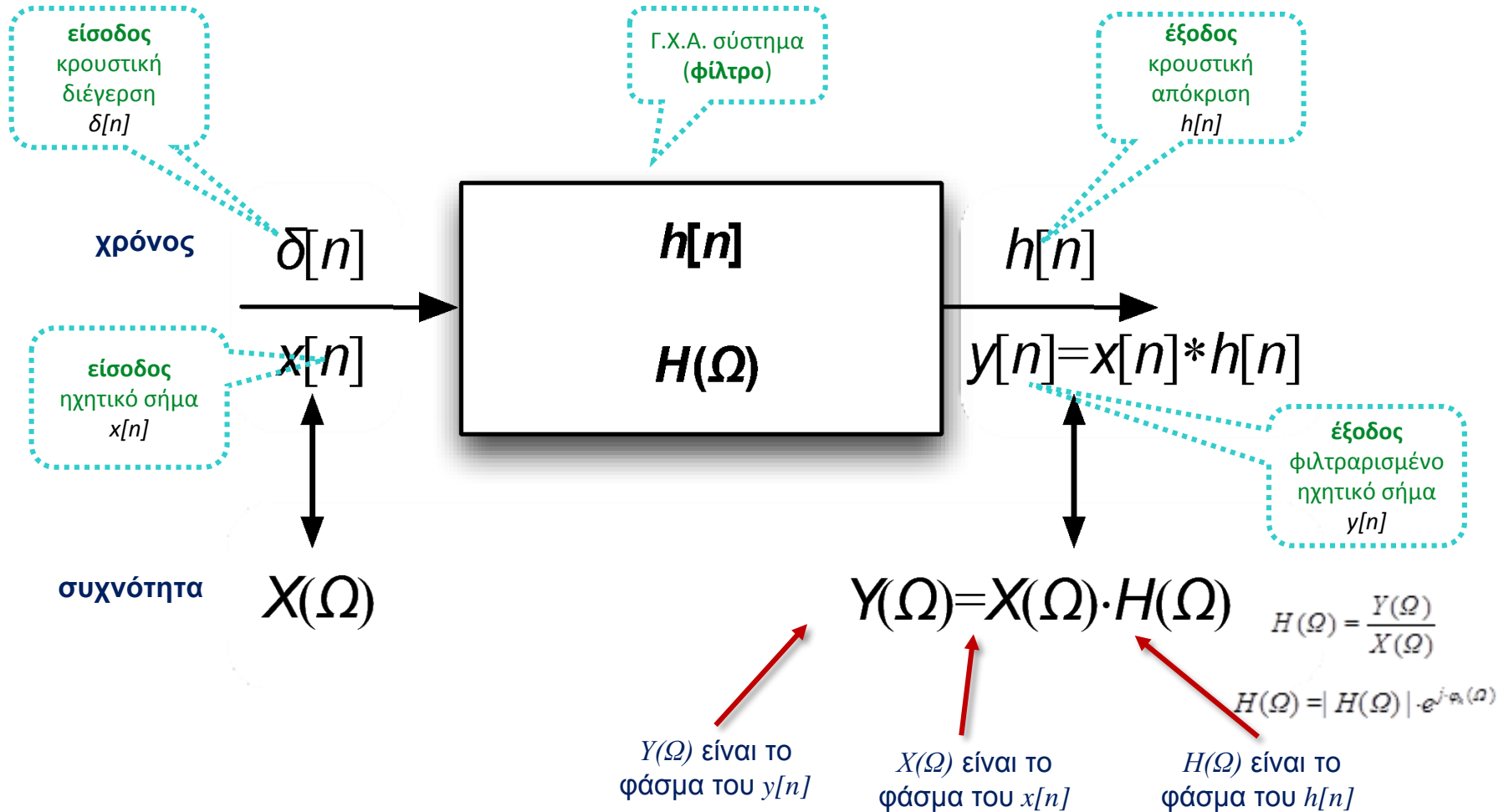
- το φάσμα του  $x(t)$  είναι η μιγαδική συνάρτηση  $X(\omega)$
- συνήθως μετράμε το μέτρο του φάσματος  $|X(\omega)|$ . Πρακτικά μέσω FFT.
- όταν μεταβάλεται το φάσμα στο χρόνο, κάνουμε ανάλυση σε μικρά διαδοχικά χρονικά παράθυρα



# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

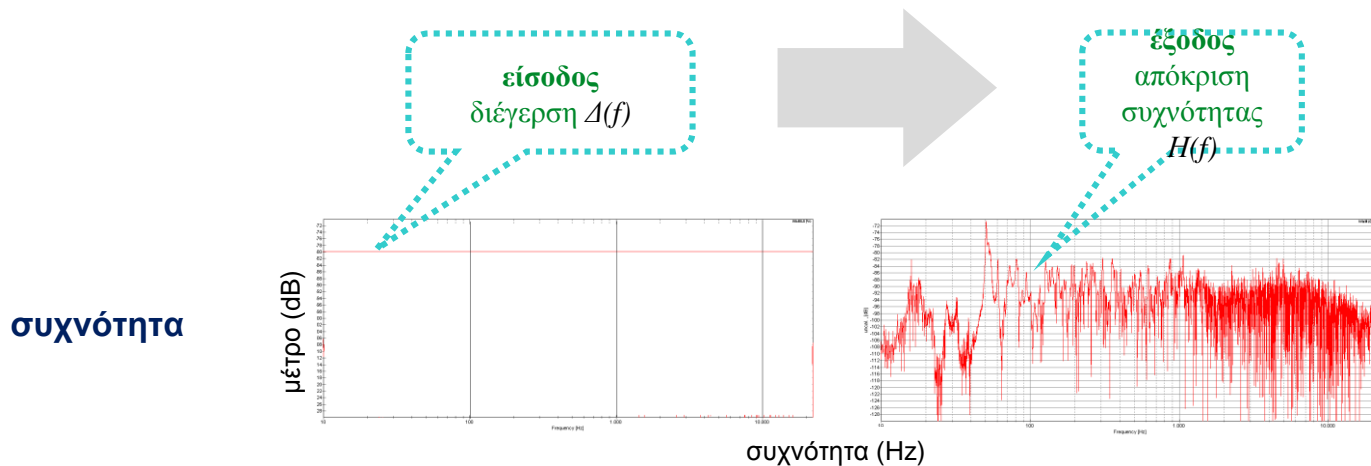
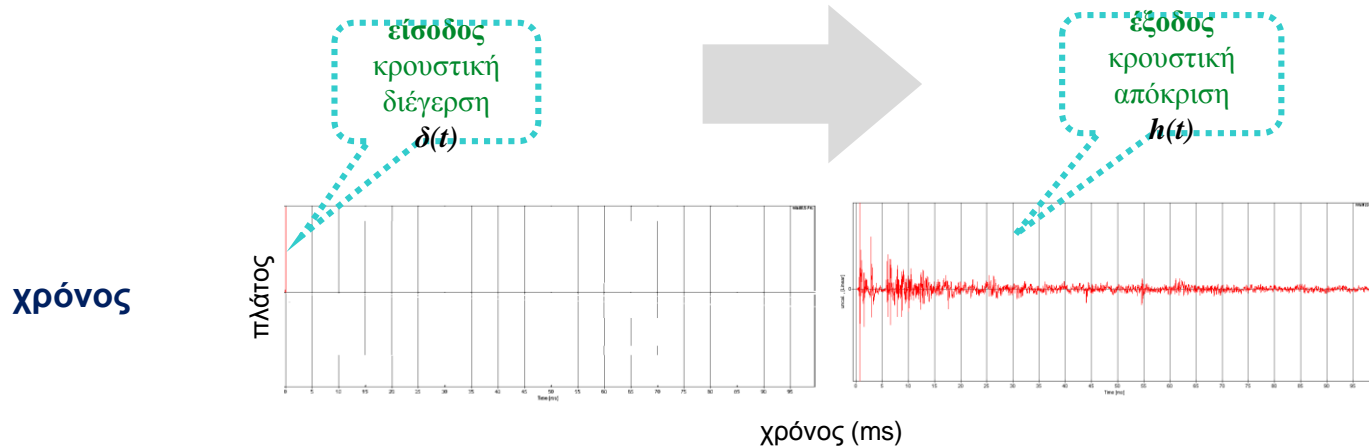
οποιοδήποτε Γραμμικό Χρονικά Αμετάβλητο (Γ.Χ.Α.) σύστημα εκφράζεται από την κρουστική απόκριση ή την ισοδύναμη απόκριση συχνότητας (φάσμα της κρουστικής)



# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

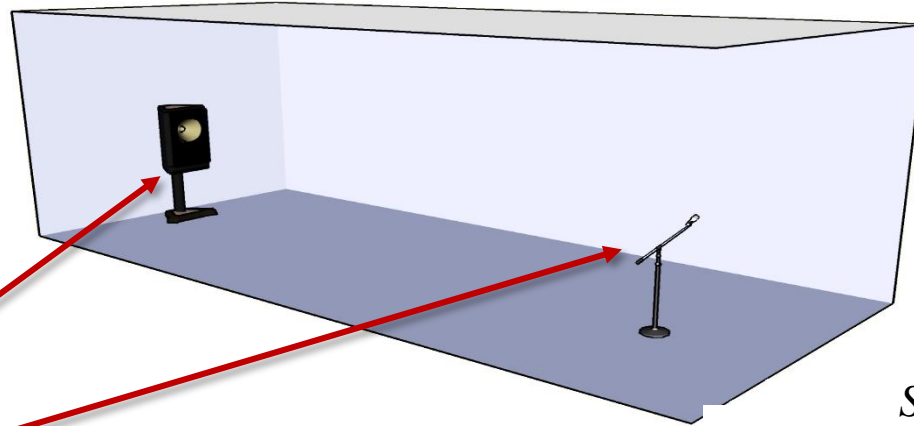
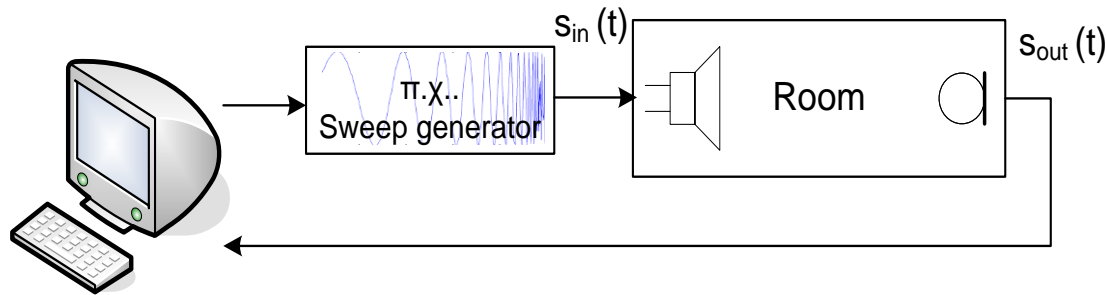
η κρουστική απόκριση ή η ισοδύναμη απόκριση συχνότητας (φάσμα της κρουστικής) είναι η χαρακτηριστική συμπεριφορά ενός Γ.Χ.Α. συστήματος



# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## ανάλυση σημάτων σε χρόνο - συχνότητα

η κρουστική απόκριση ή η ισοδύναμη απόκριση συχνότητας (φάσμα της κρουστικής) ενός Γ.Χ.Α. συστήματος μετρείται μέσω κατάλληλης διέγερσης (π.χ. σήμα sweep sine)

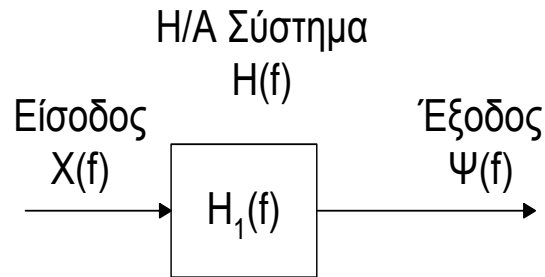


$$S_{in}(f) = F\{s_{in}(t)\}$$
$$S_{out}(f) = F\{s_{out}(t)\}$$

$$\frac{S_{out}(f)}{S_{in}(f)} = H(f)$$

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## γραμμικότητα



$$\psi(t) = h(t) * x(t)$$

$$\Psi(f) = H(f) \cdot X(f)$$

$$x(t) \rightarrow \psi(t)$$

$$ax(t) \rightarrow a\psi(t)$$

$$x_1(t) \rightarrow \psi_1(t)$$

$$x_2(t) \rightarrow \psi_2(t)$$

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow \psi_1(t) + \psi_2(t)$$

$$ax_1(t) + bx_2(t) \rightarrow a\psi_1(t) + b\psi_2(t)$$

ομοιογένεια

υπέρθεση

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## γραμμικότητα

$$H(f) = \Psi(f) / X(f)$$

$$H(f) = |H(f)| e^{j \cdot \arg[H(f)]} = \frac{|\Psi(f)|}{|X(f)|} e^{j \cdot \{\arg[\Psi(f)] - \arg[X(f)]\}}$$

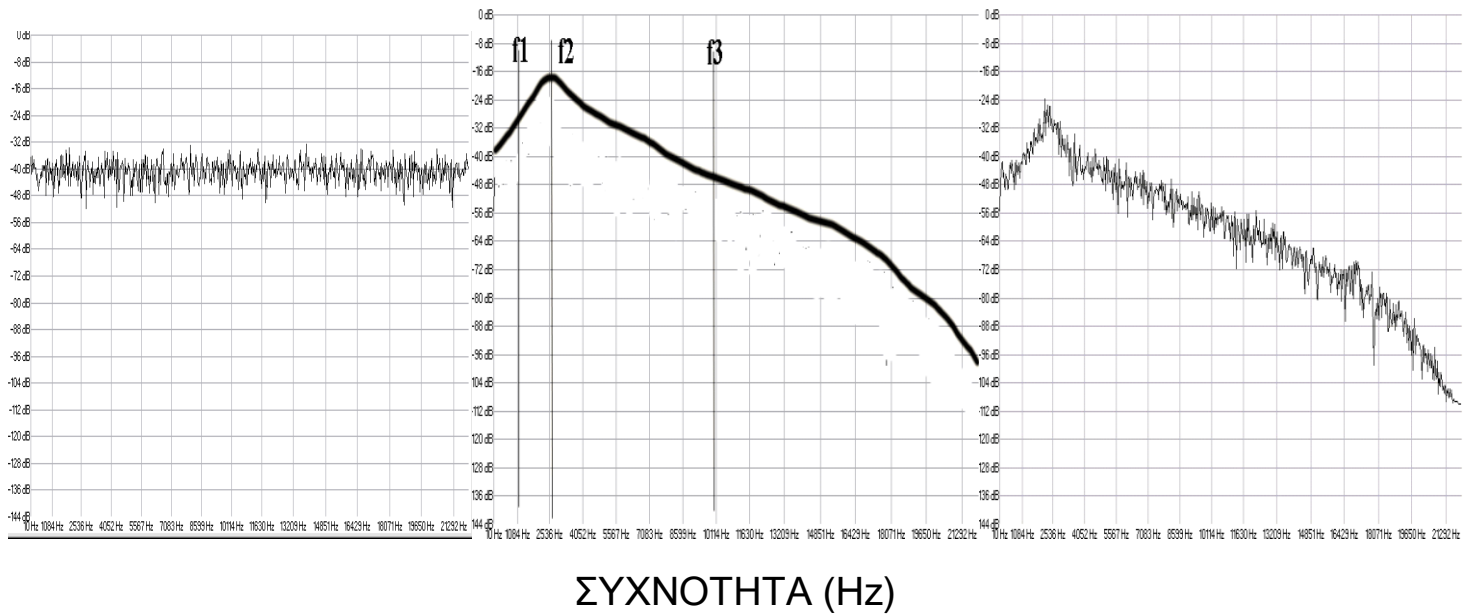
Για ένα ιδανικό σύστημα  $H(f) = 1$

---

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## γραμμικότητα

$$\text{ΕΙΣΟΔΟΣ } |X(f)| \times \text{ΣΥΣΤΗΜΑ } |H(f)| = \text{ΕΞΟΔΟΣ } |Y(f)|$$

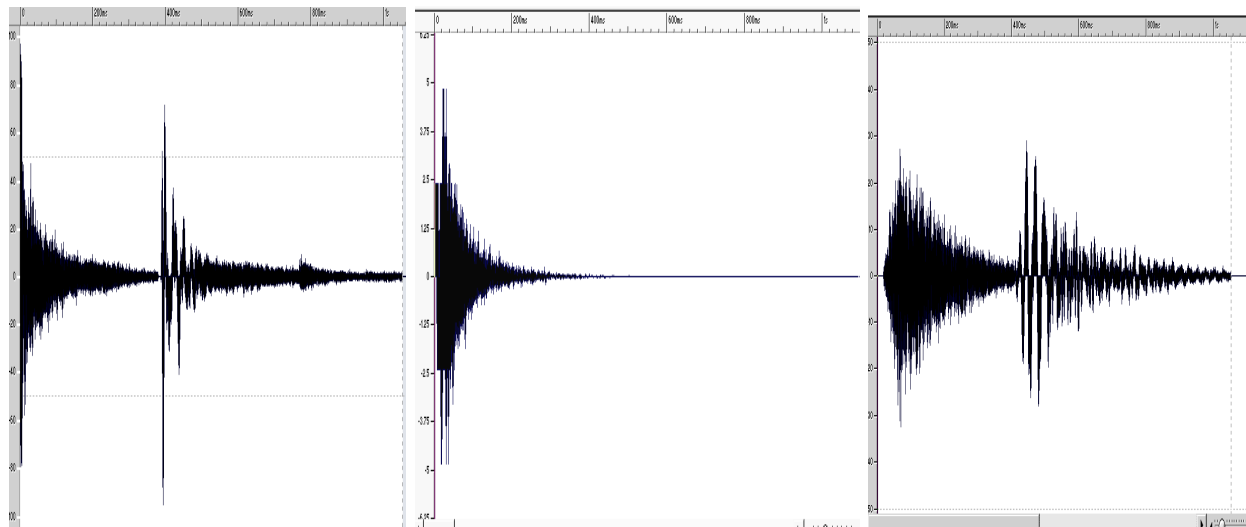




# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## γραμμικότητα

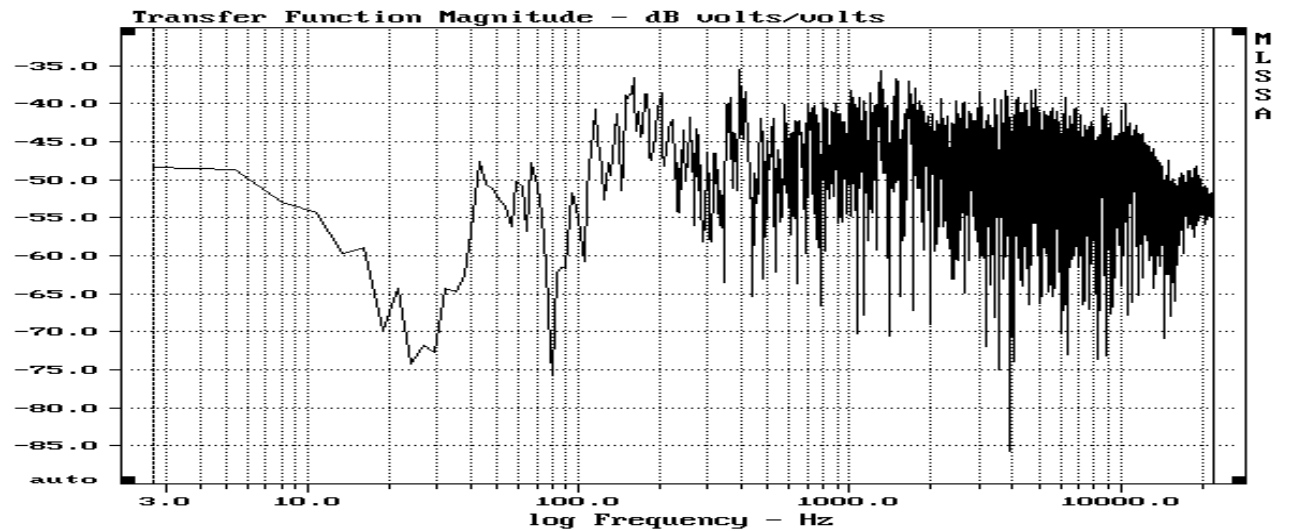
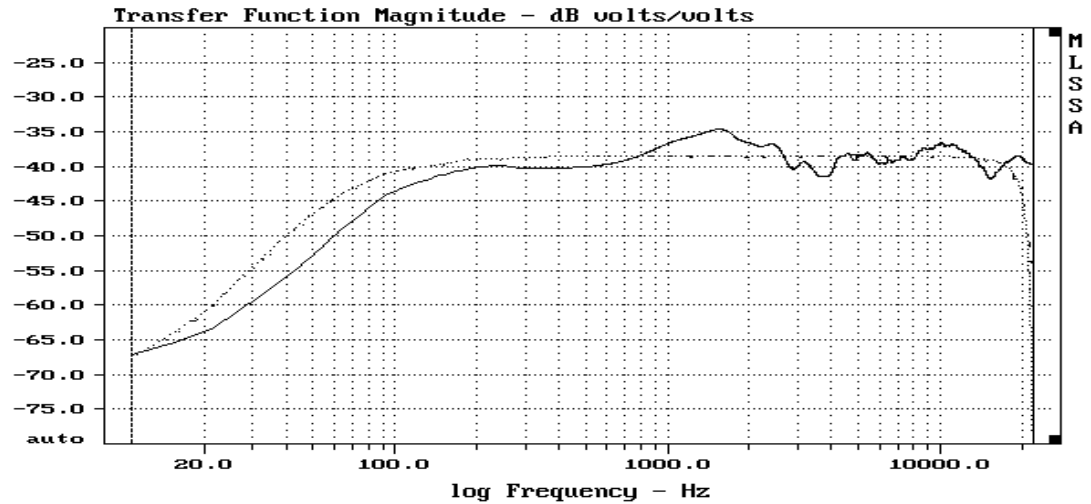
$$\text{ΕΙΣΟΔΟΣ } x(t) * \text{ΣΥΣΤΗΜΑ } h(t) = \text{ΕΞΟΔΟΣ } y(t)$$



ΧΡΟΝΟΣ (sec)

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

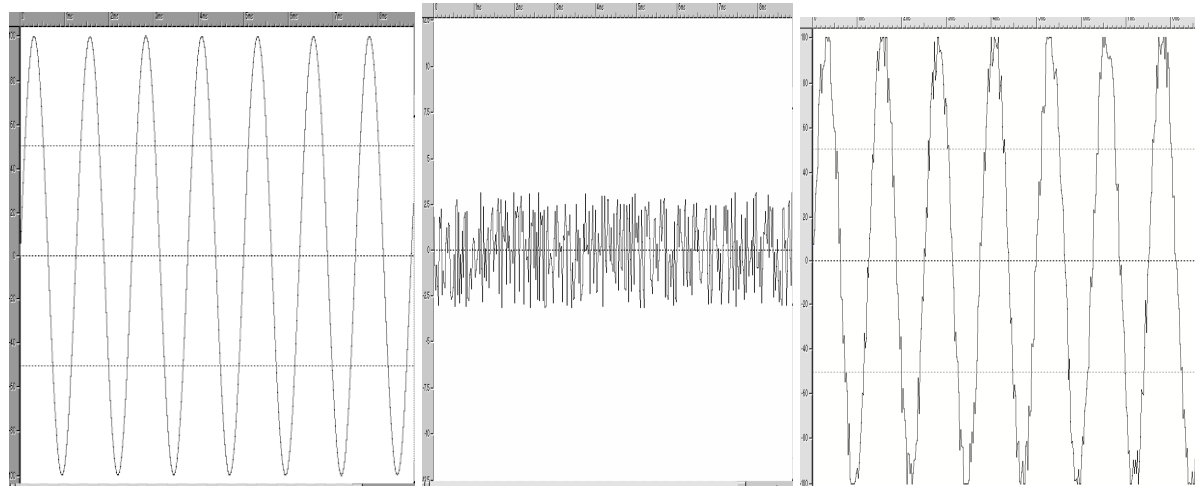
## γραμμικότητα



# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## θόρυβος

ΕΙΣΟΔΟΣ  $x(t)$  + ΘΟΡΥΒΟΣ  $n(t)$  = ΕΞΟΔΟΣ  $y(t)$



ΧΡΟΝΟΣ (sec)

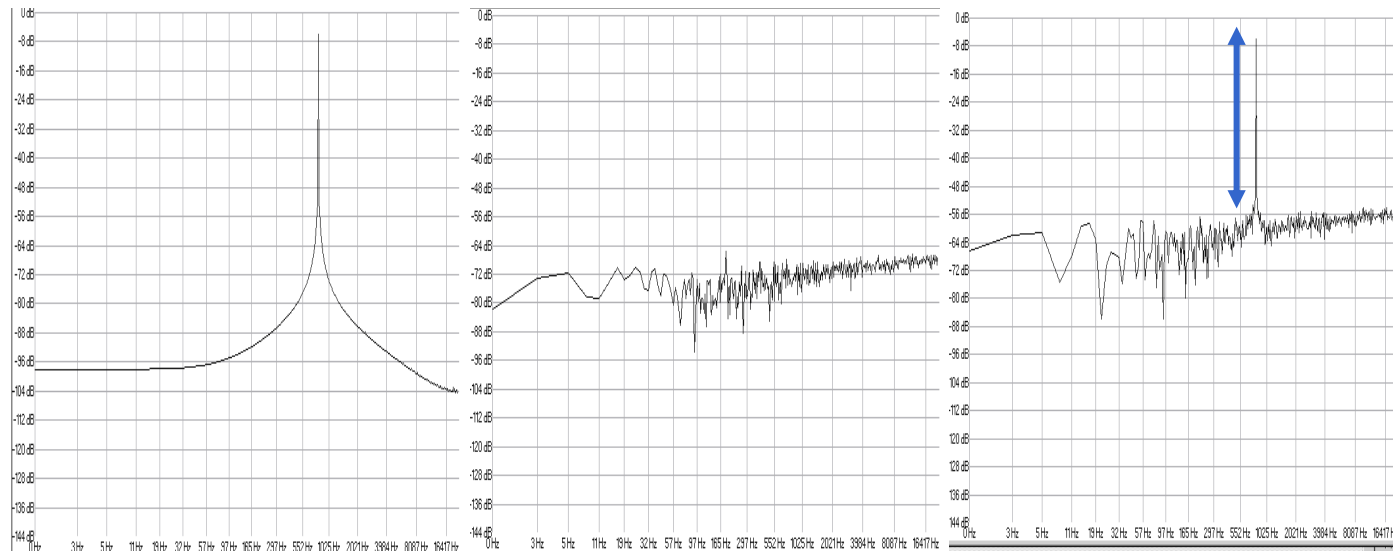
$$SNR = 20 \log \frac{y(t)}{n(t)}$$

Για ιδανικό σύστημα  $SNR > 120 \text{ dB}$

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## θόρυβος

$$\text{ΕΙΣΟΔΟΣ } |X(f)| + \text{ΘΟΡΥΒΟΣ } |N(f)| = \text{ΕΞΟΔΟΣ } |Y(f)|$$



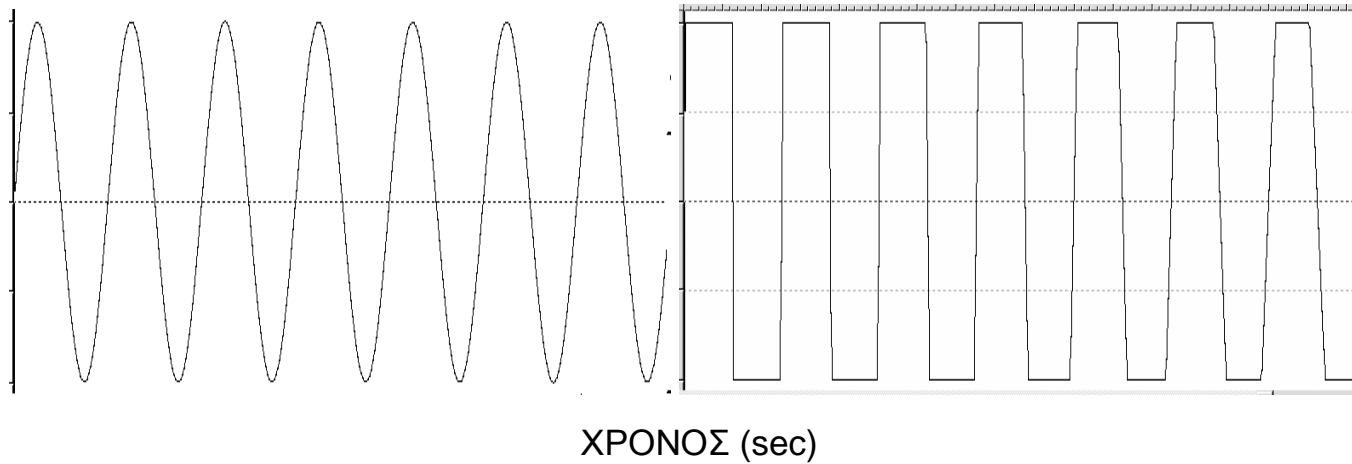
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)

# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## μη-γραμμική απόκριση

ΕΙΣΟΔΟΣ  $x(t)$

ΕΞΟΔΟΣ  $y(t)$

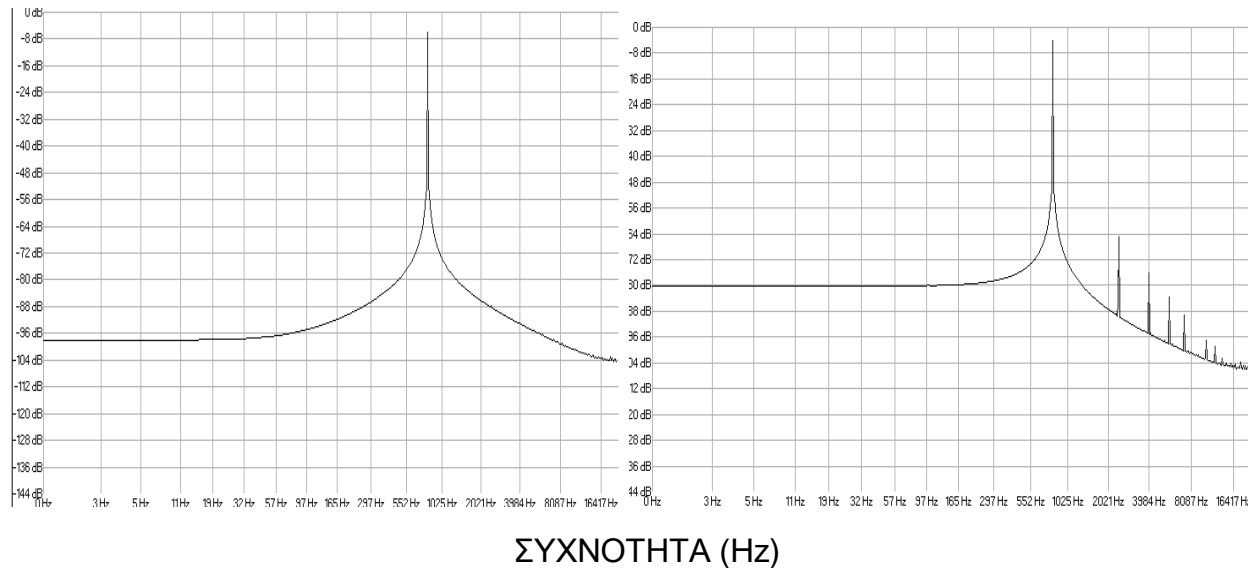


# αρχές λειτουργίας ηχητικού συστήματος

## μη-γραμμική απόκριση

ΕΙΣΟΔΟΣ  $|X(f)|$

ΕΞΟΔΟΣ  $|Y(f)|$



Ολική Αρμονική Παραμόρφωση THD (%)



**ομάδα τεχνολογίας ήχου & ακουστικής**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

*<http://www.wcl.ece.upatras.gr/AudioGroup/>*