

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

8. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

Γιάννης Μουρτζόπουλος

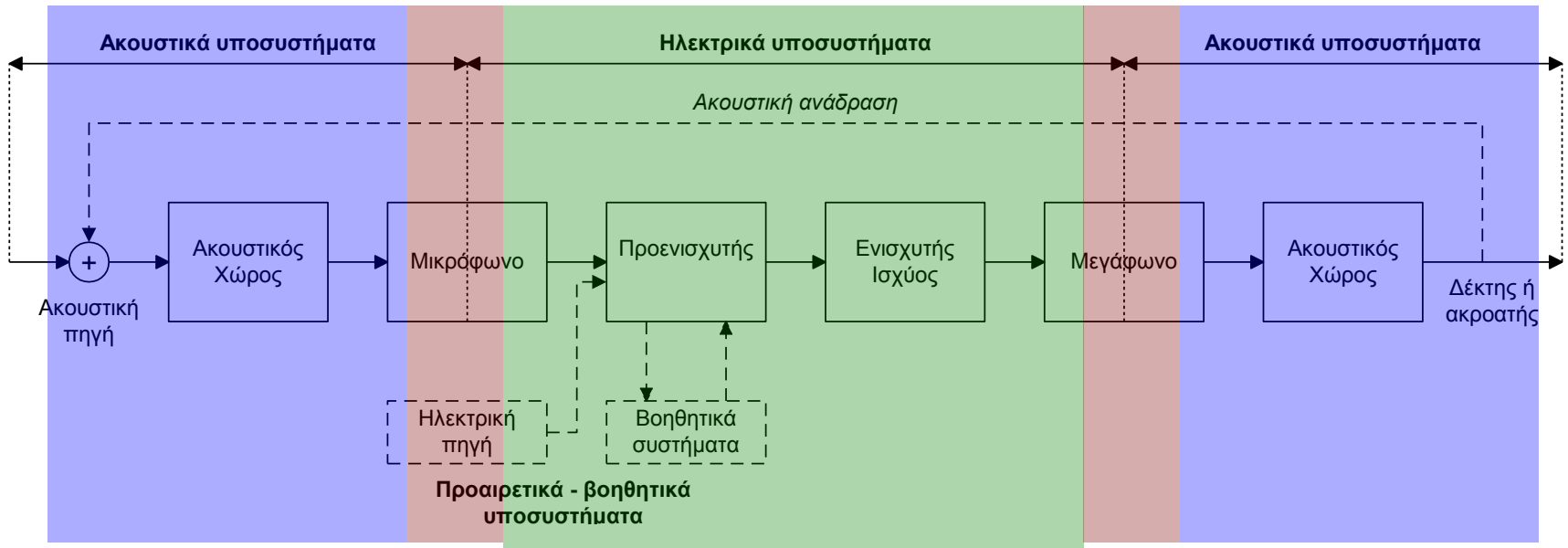


ΟΜΑΔΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/

1. εισαγωγή

ένα ηχητικό σύστημα



σημασία της σωστής ακουστικής ενός χώρου

- επιτρέπει τη **βέλτιστη επικοινωνία** ενός ακουστικού σήματος
- **καταληπτικότητα** ομιλίας, **ανάδειξη** ήχου μουσικών οργάνων
- **σωστή απόκριση** και απόδοση ηλεκτροακουστικών συστημάτων
- τα ακουστικά χαρακτηριστικά πρέπει να **συμβαδίζουν με τη χρήση**
- η σωστή ακουστική επίδραση είναι **θέμα αναλογίας**
- σε ειδικές περιπτώσεις έχει **τελετουργικό** χαρακτήρα



αρχαία ελληνικά
θέατρα(Επίδαυρος)



κλειστοί συναυλιακοί
χώροι (Musicverein)



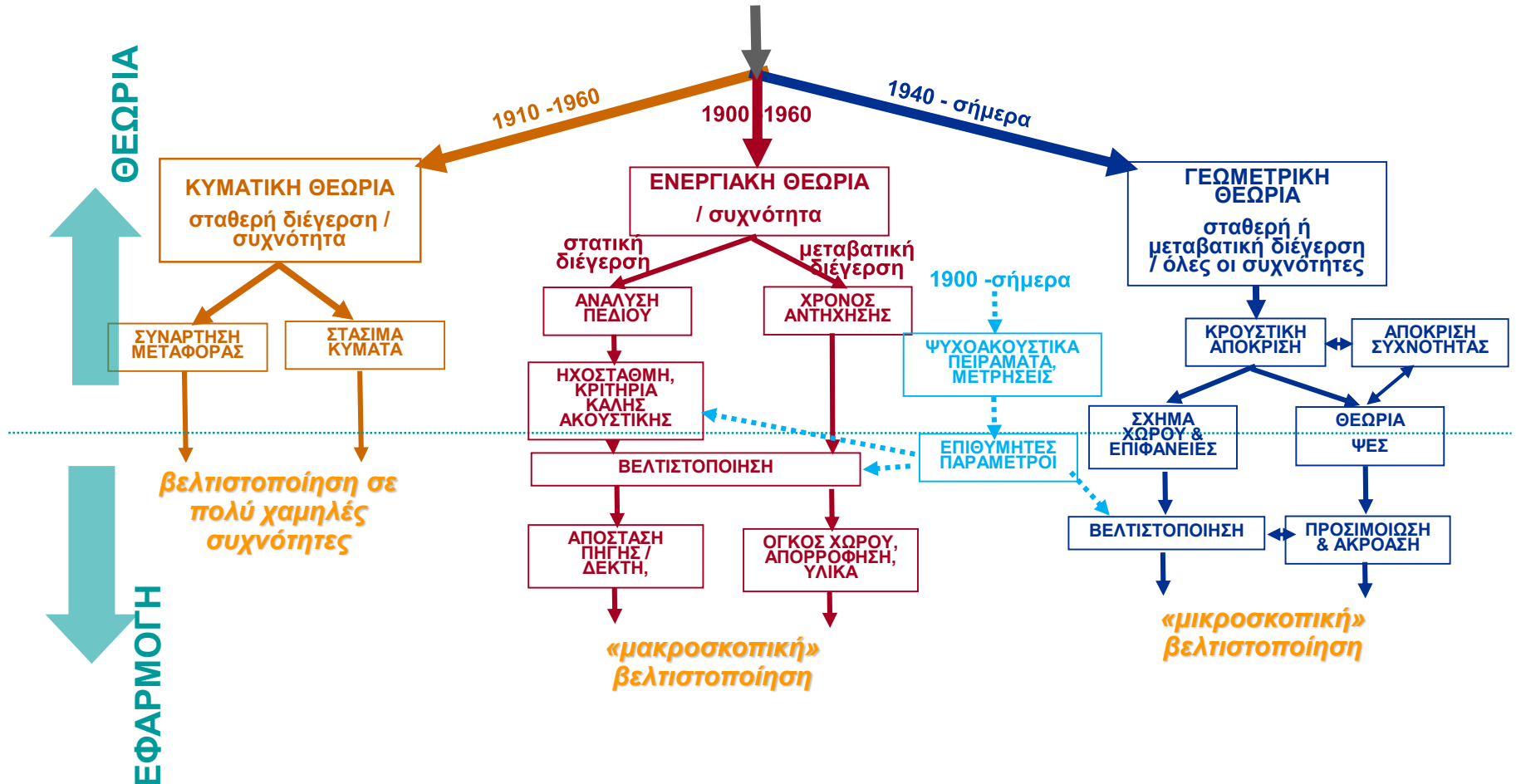
Wallace
Sabine,
κτιριακή
ακουστική



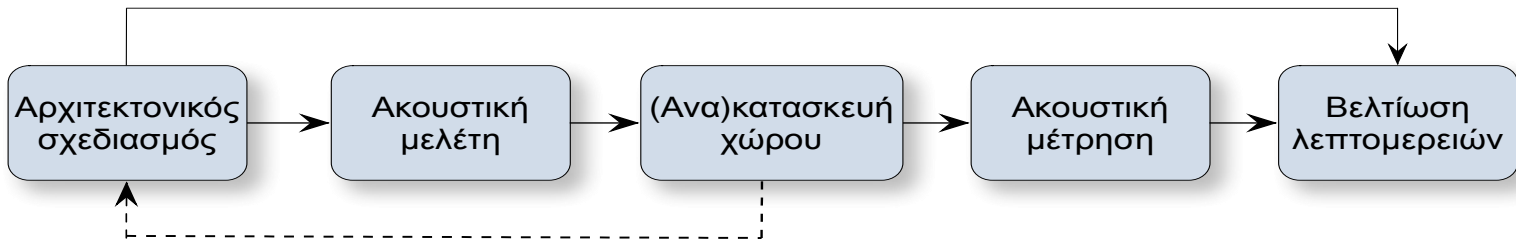
Manfred
Schroeder,
χρήση
υπολογιστών

ιστορική αναδρομή - επισκόπηση

ακουστική κλειστών χώρων (κτιριακή ακουστική)



διαδικασία ακουστικού σχεδιασμού χώρου



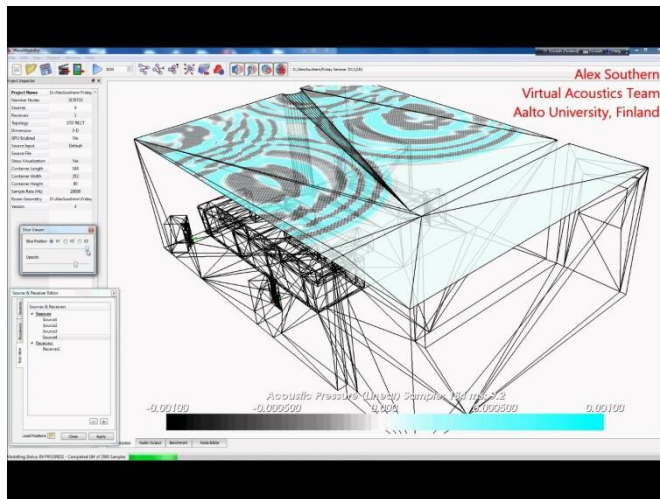
ή Διαμόρφωση
χώρου

- **θεωρητικό πλαίσιο:** γεωμετρική ακουστική
- **εργαλεία:** θεωρία και μέθοδοι σημάτων - συστημάτων
χαρακτηριστικά υλικών ηχοαπορρόφησης

Ιστορική αναδρομή - επισκόπηση

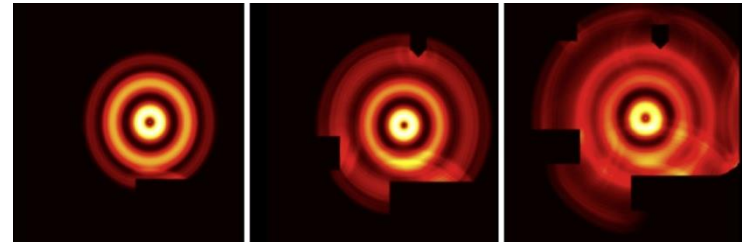
για FDTD: Efficient Numerical Simulation of Sound Propagation

Aalto



<https://youtu.be/e0Ux352gzho>

CUDA - GPUs

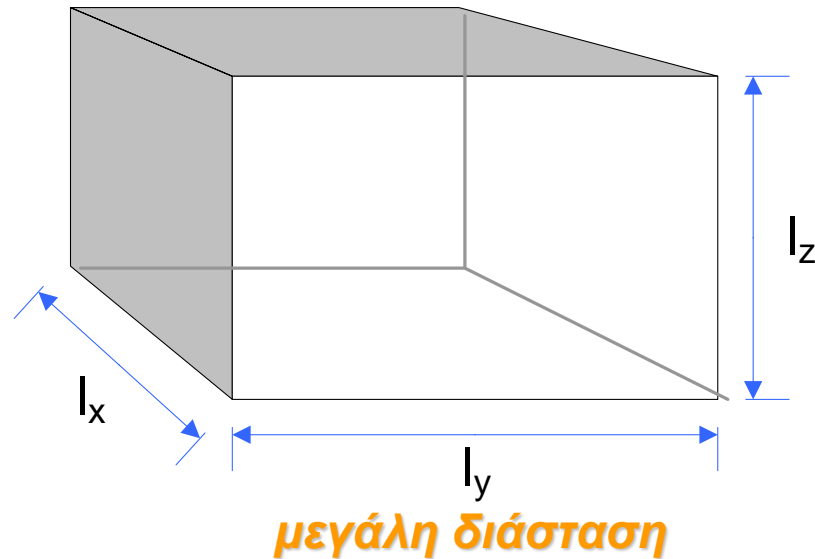


<https://youtu.be/JJeryJwX5lw?t=27>

- αρχικά η διάδοση του ήχου μελετήθηκε σε συνθήκες «ελεύθερου πεδίου»
- στο ελεύθερο πεδίο, η Στάθμη Ηχητικής Πίεσης (SPL), μειώνεται κατά **6 dB για κάθε διπλασιασμό** της απόστασης πηγής – δέκτη
- όταν η πηγή βρεθεί σε κλειστό χώρο, εμφανίζονται **ανακλάσεις** του ήχου από τις επιφάνειες
- σε κλειστούς χώρους η ηχοστάθμη δεν μειώνεται σημαντικά αυξάνοντας την απόσταση από την πηγή
- πολλαπλές ανακλάσεις οδηγούν στο φαινόμενο της **ακουστικής αντήχησης** (περίπου για $f > 200$ Hz)
- ειδικές συνθήκες διέγερσης ιδιορυθμών του χώρου, οδηγούν στο φαινόμενο των συντονισμών σε μορφή **στάσιμων κυμάτων** (περίπου για $f < 200$ Hz)

βασικές έννοιες (παράμετροι του χώρου)

- οι **διαστάσεις** του χώρου (και ο προκύπτων όγκος V (m^3))



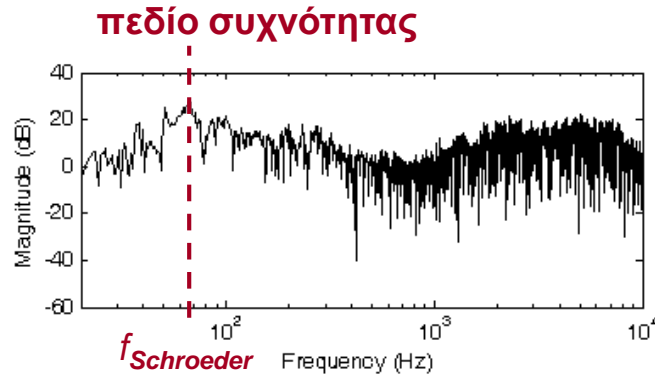
- το **σχήμα** του χώρου
- η **απορρόφηση** και **διάχυση** του ήχου στις επιφάνειες

βασικές έννοιες (ακουστική συμπεριφορά χώρων)

- οι **ακουστικά «μικροί» χώροι**, με απόκριση κυρίως:
από πρώιμες ανακλάσεις
διακριτά στάσιμα κύματα
- οι **ακουστικά «μεγάλοι» χώροι**, με απόκριση κυρίως:
από πολλαπλές ανακλάσεις (αντήχηση)
πολλαπλά στάσιμα κύματα
(στατιστική ακουστική, χώροι Sabine,...)
- για ηχητικά κύματα $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ KHz}$, άρα $17 \text{ mm} < \lambda < 21 \text{ m}$
- **ακουστικά μικροί** : $l_y < 21 \text{ m}$
ακουστικά μεγάλοι : $l_y > 21 \text{ m}$

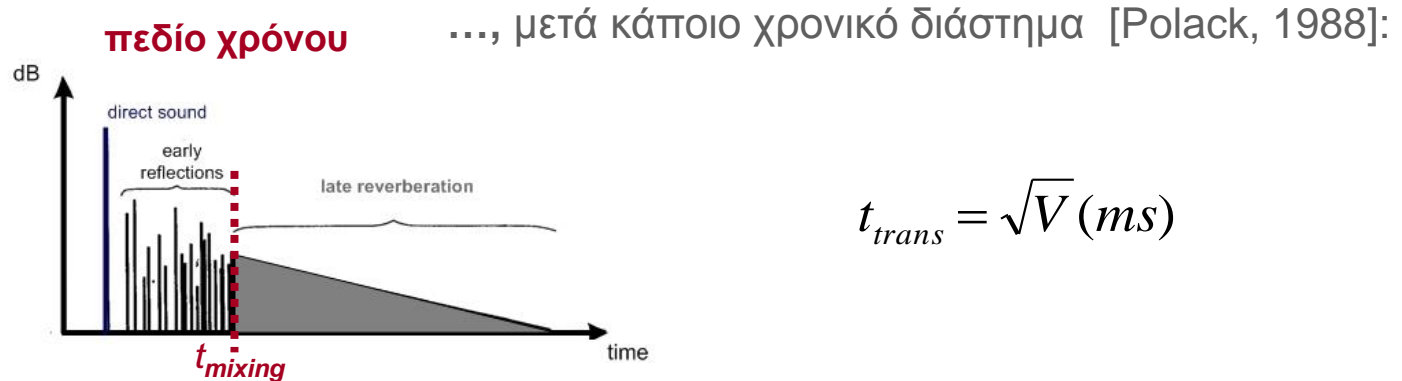
ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ (ακουστική συμπεριφορά χώρων)

..., ισχύει πάνω από τη συχνότητα Schroeder [Schroeder, 1954]:



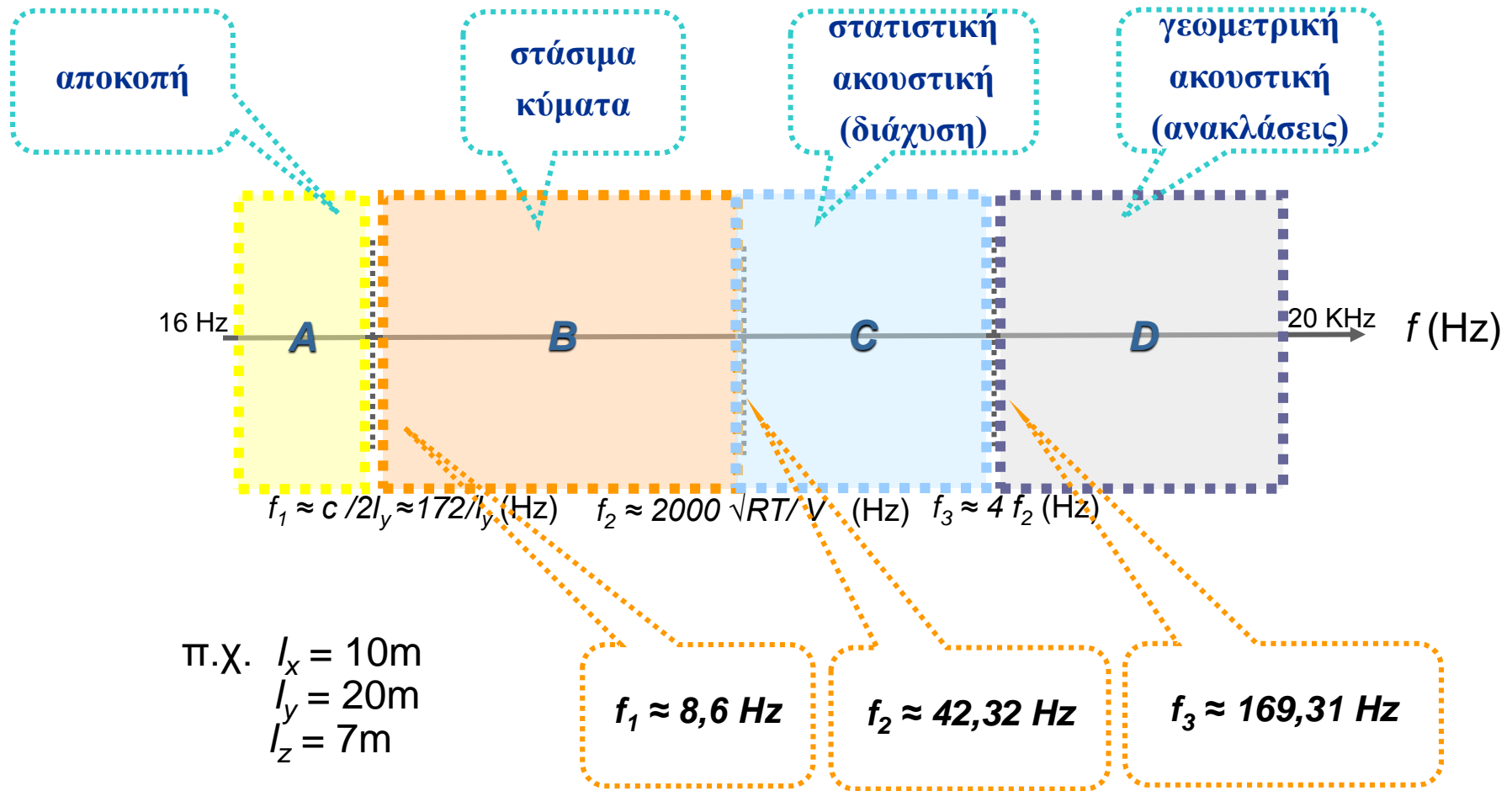
$$f_{Schroeder} = 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}}$$

- το πραγματικό και φανταστικό μέρος της συνάρτησης μεταφοράς πίεσης είναι ανεξάρτητες γκαουσιανές διεργασίες
- η διασπορά τιμών της συνάρτησης είναι 5.57 dB



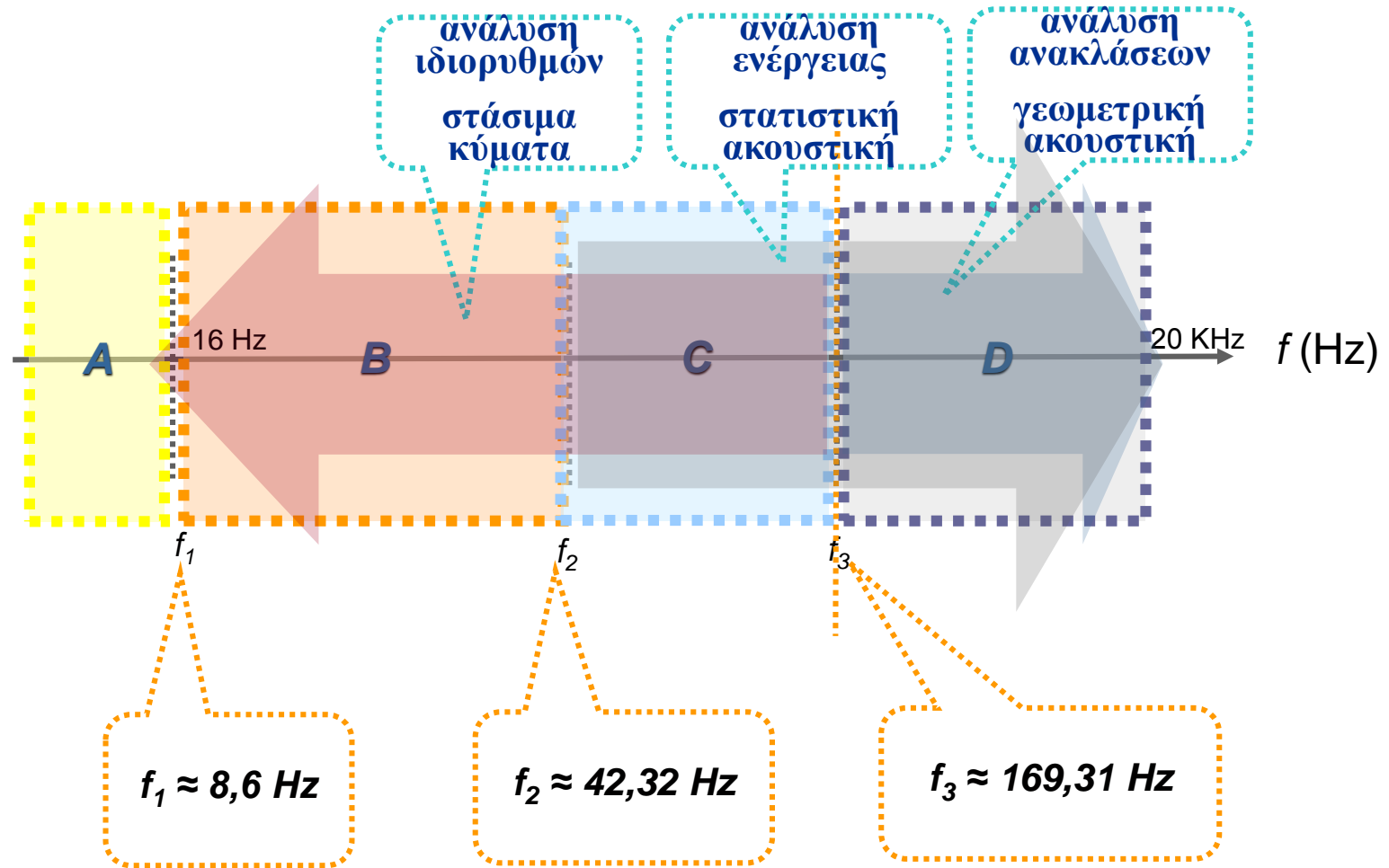
$$t_{trans} = \sqrt{V} (ms)$$

Βασικές έννοιες (ακουστική συμπεριφορά χώρων)

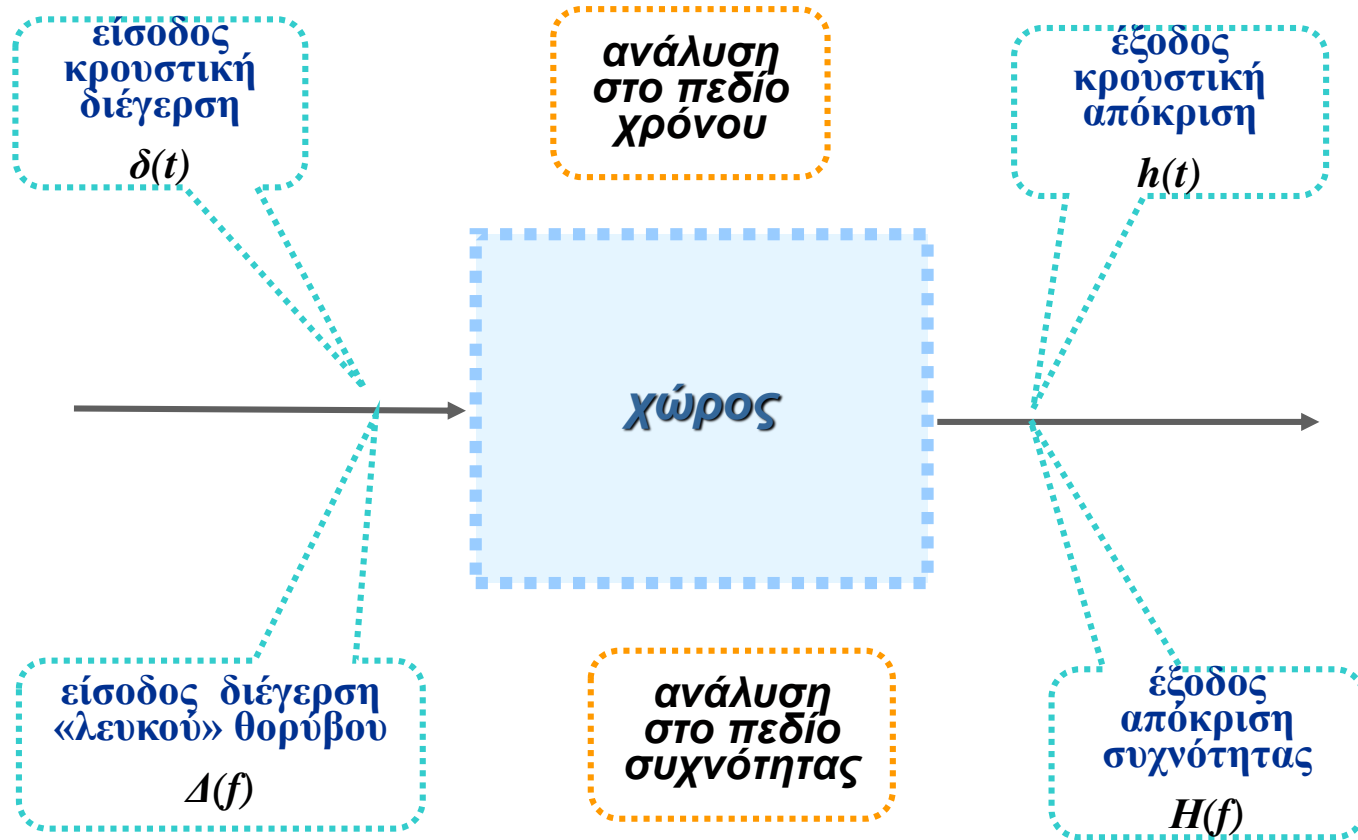


$$V = 10 \times 20 \times 7 = 1400 \text{ m}^3$$

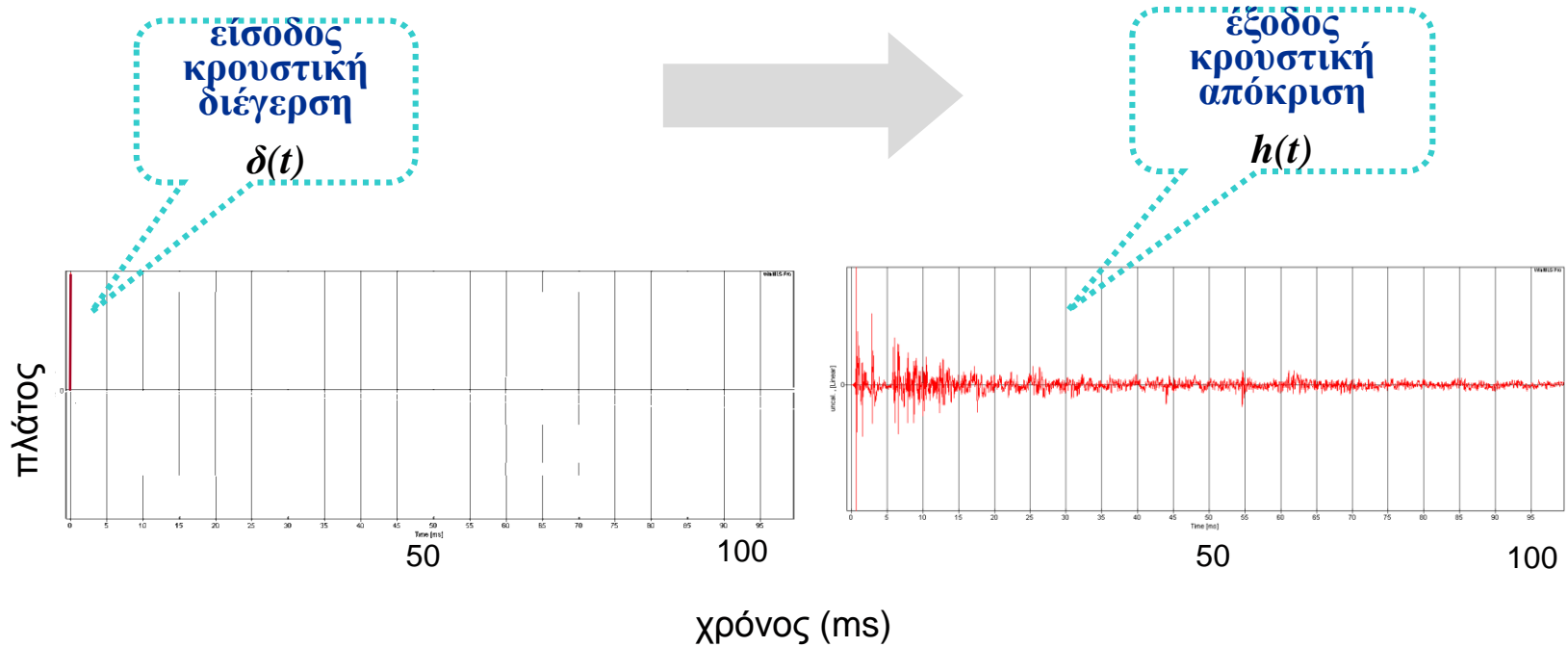
βασικές έννοιες (ακουστική συμπεριφορά χώρων)



Βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)



Βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)

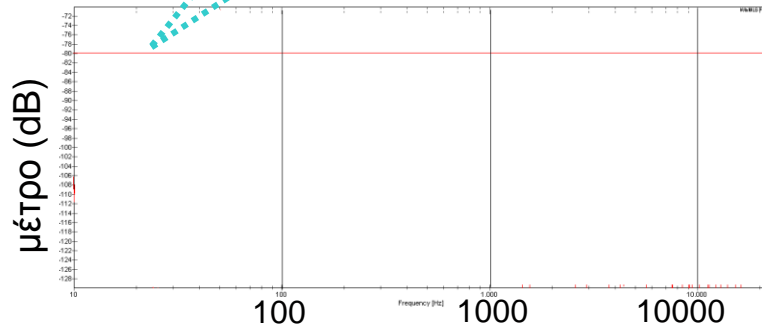


ανάλυση
στο πεδίο
χρόνου

βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)

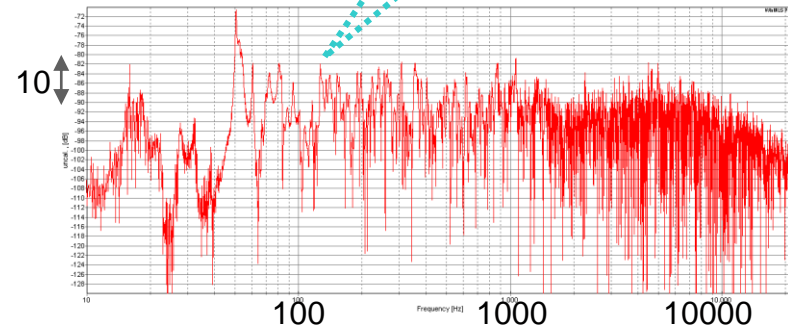
είσοδος διέγερση
«λευκού» θορύβου

$$\Delta(f)$$



έξοδος
απόκριση
συχνότητας

$$H(f)$$



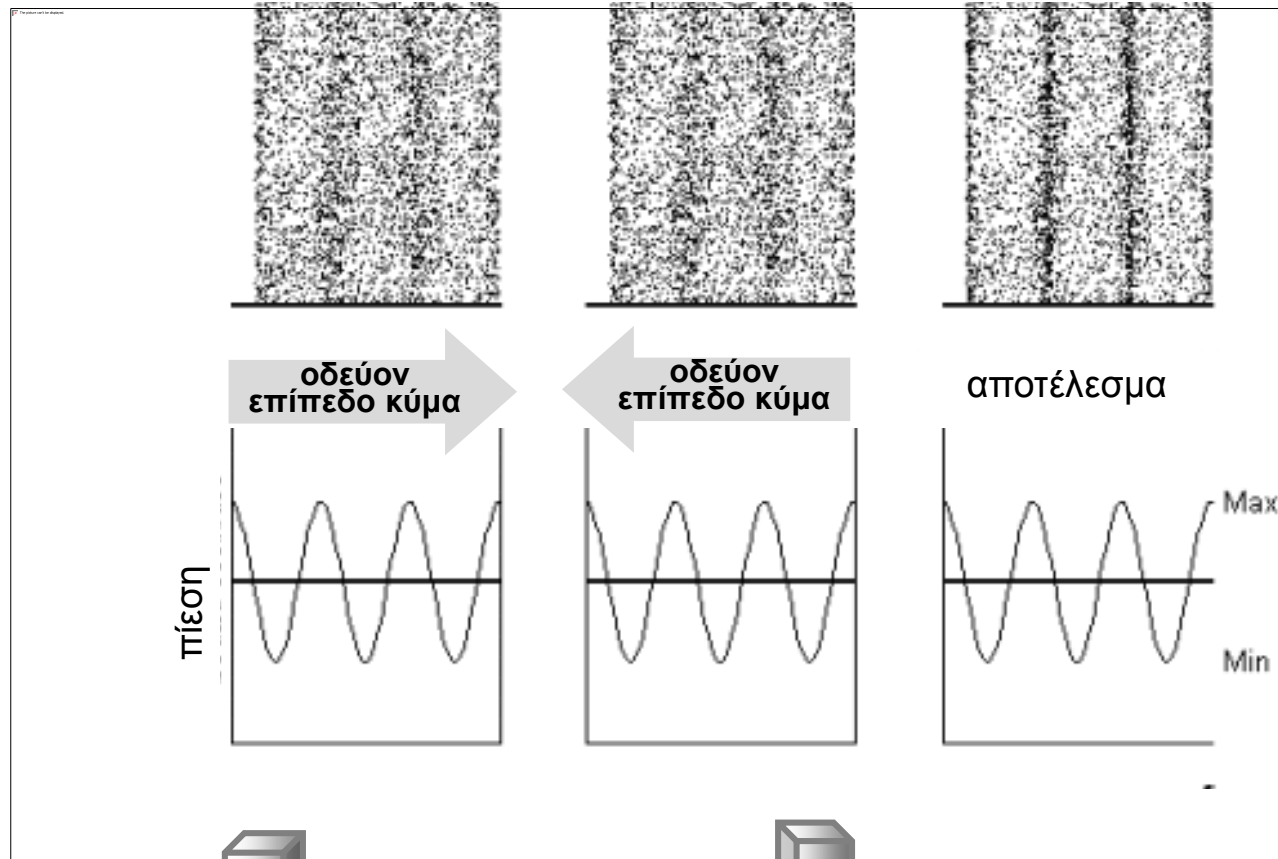
συχνότητα (Hz)

ανάλυση
στο πεδίο
συχνότητας

2. κυματικά φαινόμενα

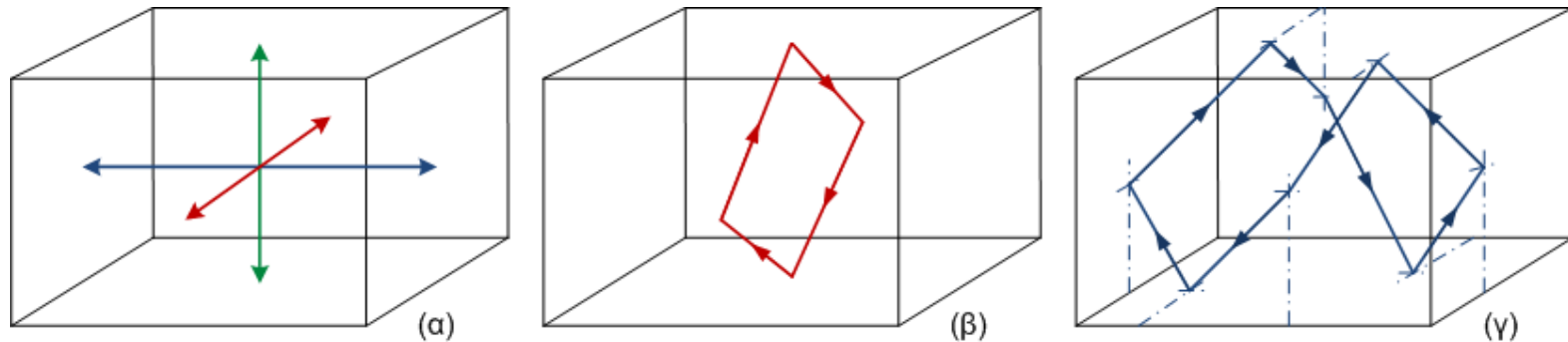
στάσιμα κύματα (μονοδιάστατα)

άξονας απόστασης



$$f_0 = \frac{c}{2l_y} = \frac{c}{\lambda}$$

σε παραλληλεπίπεδους χώρους

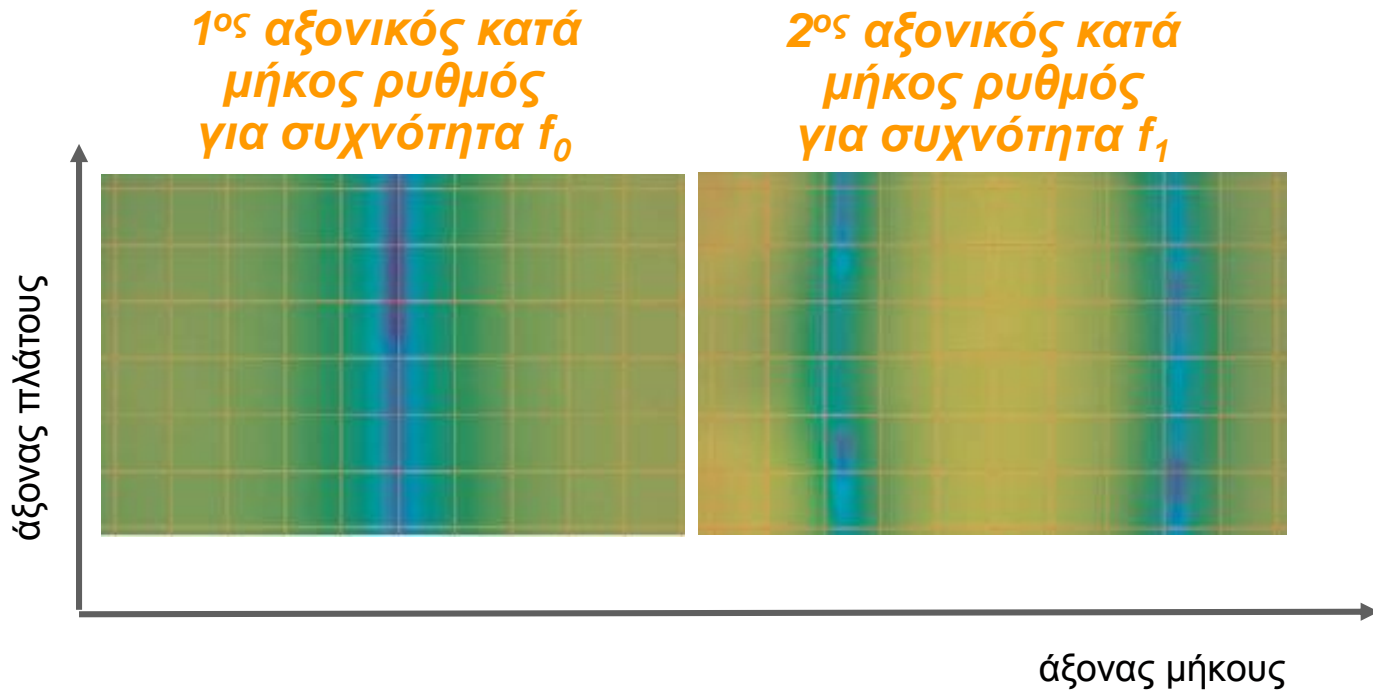


κατηγορίες συντονισμών σε ορθογώνιους παραλληλεπίπεδους χώρους

- | | | |
|-----|-------------------------|--------------------|
| (α) | αξονικοί συντονισμοί | (axial modes) |
| (β) | εφαπτόμενοι συντονισμοί | (tangential modes) |
| (γ) | πλάγιοι συντονισμοί | (oblique modes) |

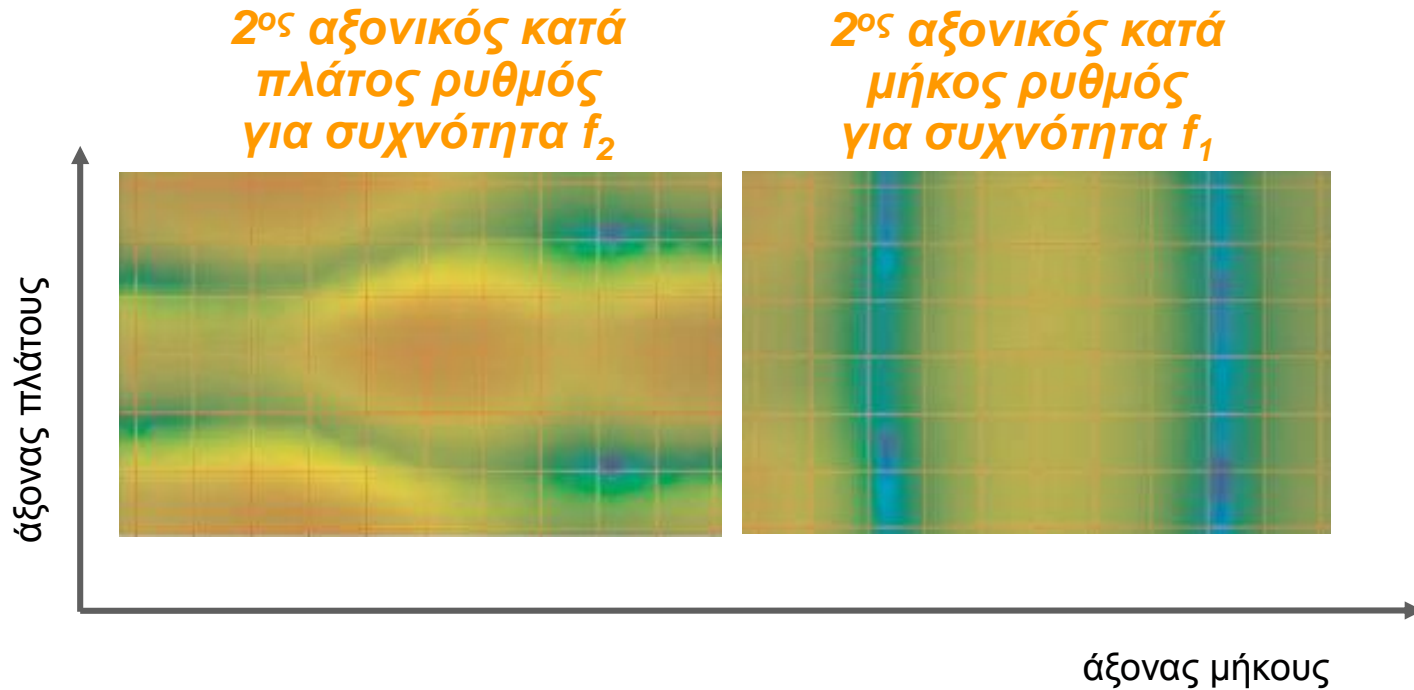
στάσιμα κύματα (πολλαπλοί αξονικοί ρυθμοί)

σε παραλληλεπίπεδους χώρους



στάσιμα κύματα (πολλαπλοί αξονικοί ρυθμοί)

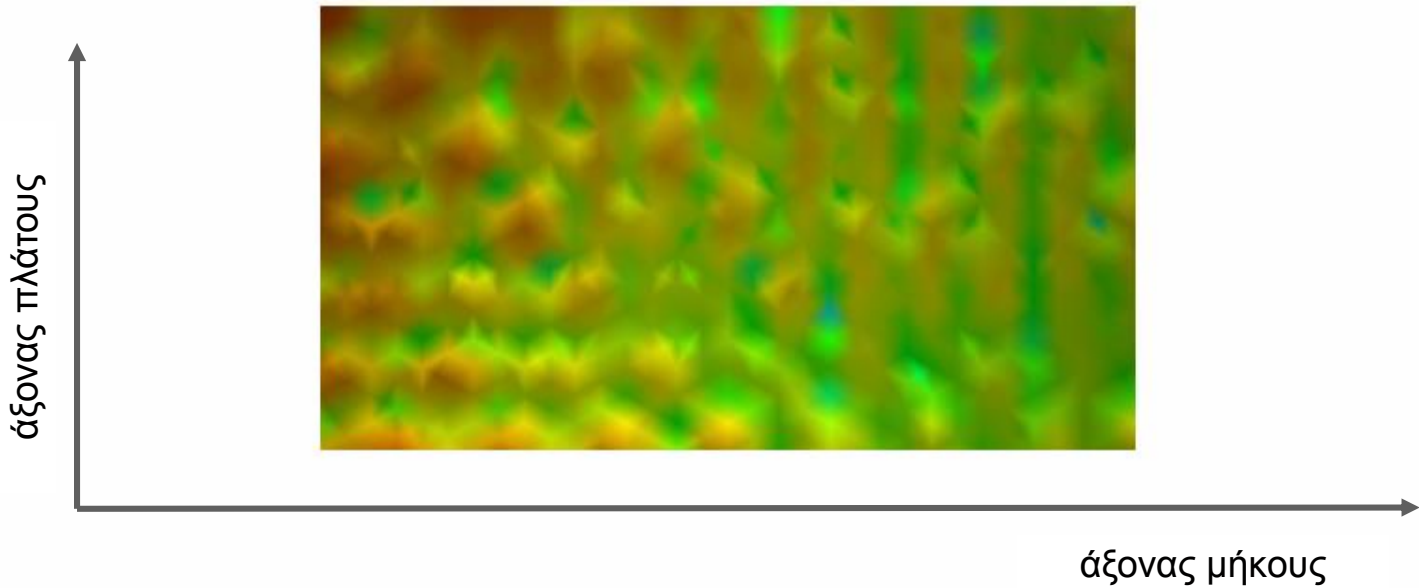
σε παραλληλεπίπεδους χώρους



στάσιμα κύματα (πολλαπλοί αξονικοί ρυθμοί)

σε παραλληλεπίπεδους χώρους

*σύνθετοι αξονικοί κατά πλάτος και μήκος
ρυθμοί για συχνότητα f_N*



στάσιμα κύματα (πολλαπλοί αξονικοί ρυθμοί)

σε παραλληλεπίπεδους χώρους

- οι ιδιορυθμοί (τρόπο) ορίζονται από αρίθμηση n_x, n_y, n_z :

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

- υπολογίζονται μόνο συχνότητες, όχι πλάτος του τρόπου

στάσιμα κύματα (παράδειγμα)

συχνότητες συντονισμών για αίθουσα 7,42 x 5,7 x 3,37 m

A/A	n_x	n_y	n_z	f_n (Hz)	Αξονικός	Εφαπτόμενος	Πλάγιος
1	1	0	0	23.1	■		
2	0	1	0	30.1	■		
3	1	1	0	37.9		■	
4	2	0	0	46.2	■		
5	0	0	1	50.9		■	
6	2	1	0	55.2		■	
7	1	0	1	55.9		■	
8	0	1	1	59.1		■	
9	0	2	0	60.2	■		
10	1	1	1	63.5			■
11	2	0	1	68.8		■	
12	3	0	0	69.3	■		
13	3	1	0	75.6		■	
14	2	2	0	75.9		■	
15	0	2	1	78.8		■	
16	3	0	1	86		■	
17	0	3	0	90.3	■		
18	3	1	1	91.1			■
19	2	2	1	91.4			■
20	3	2	0	91.8		■	
21	4	0	0	92.5	■		
22	1	3	0	93.2		■	
23	2	3	0	101.4		■	
24	0	0	2	101.8	■		
25	0	3	1	103.6		■	

σε παραλληλεπίπεδους χώρους

-

πλήθος συντονισμών

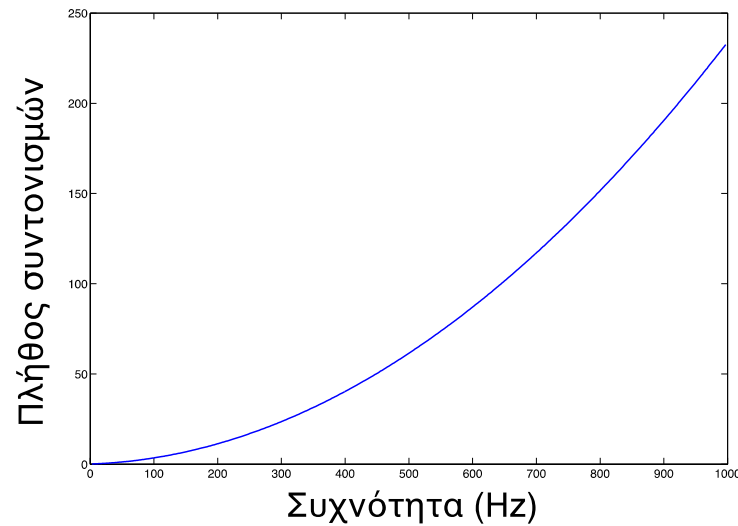
$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{fL}{8c}$$

$$V = l_x l_y l_z \quad (\text{m}^3)$$

$$S = 2(l_x l_y + l_y l_z + l_x l_z) \quad (\text{m}^2)$$

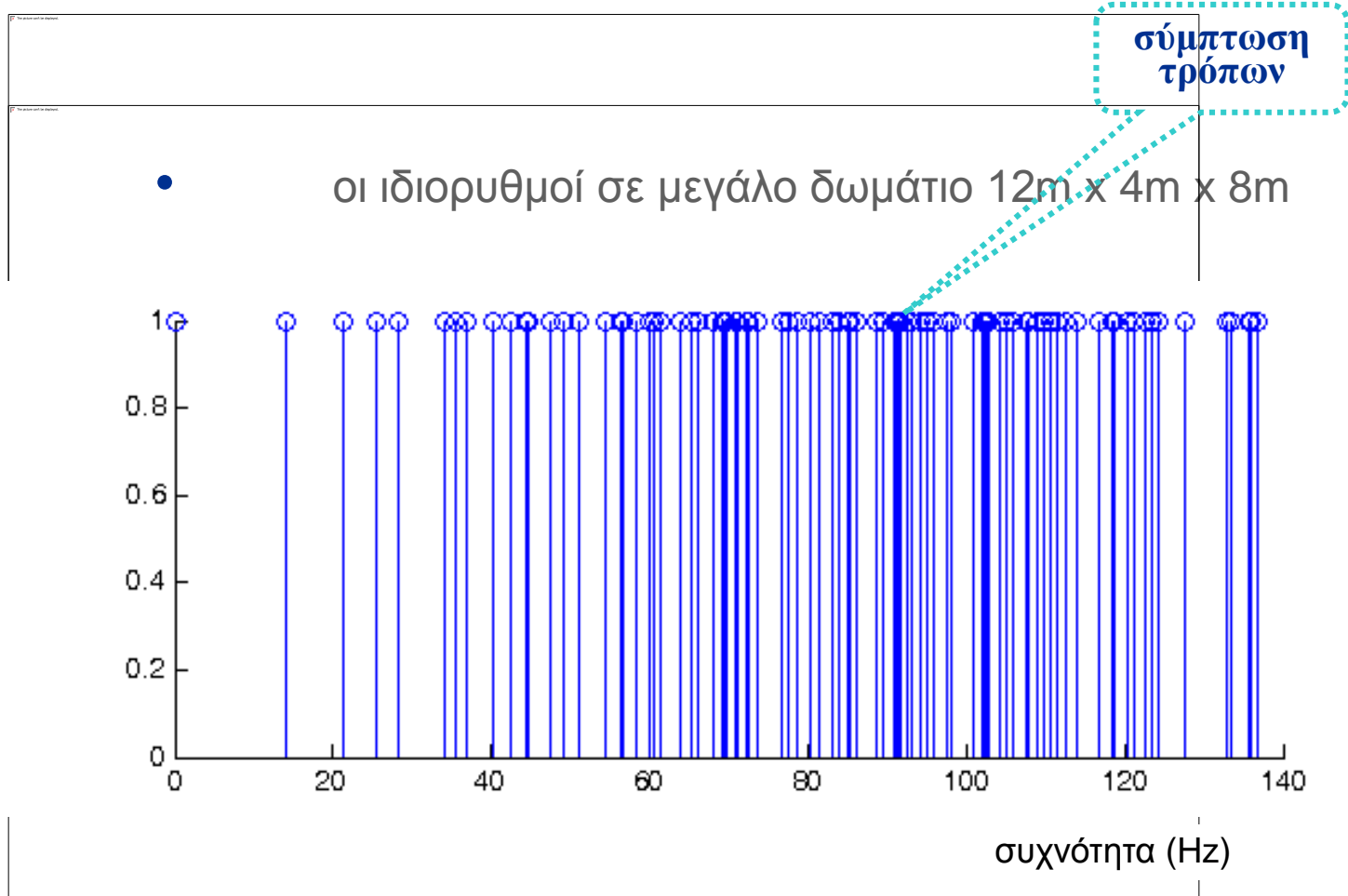
$$L = 4(l_x + l_y + l_z) \quad (\text{m})$$

πλήθος συντονισμών για αίθουσα 7,42 x 5,7 x 3,37 m (σε ζώνη 5 Hz)



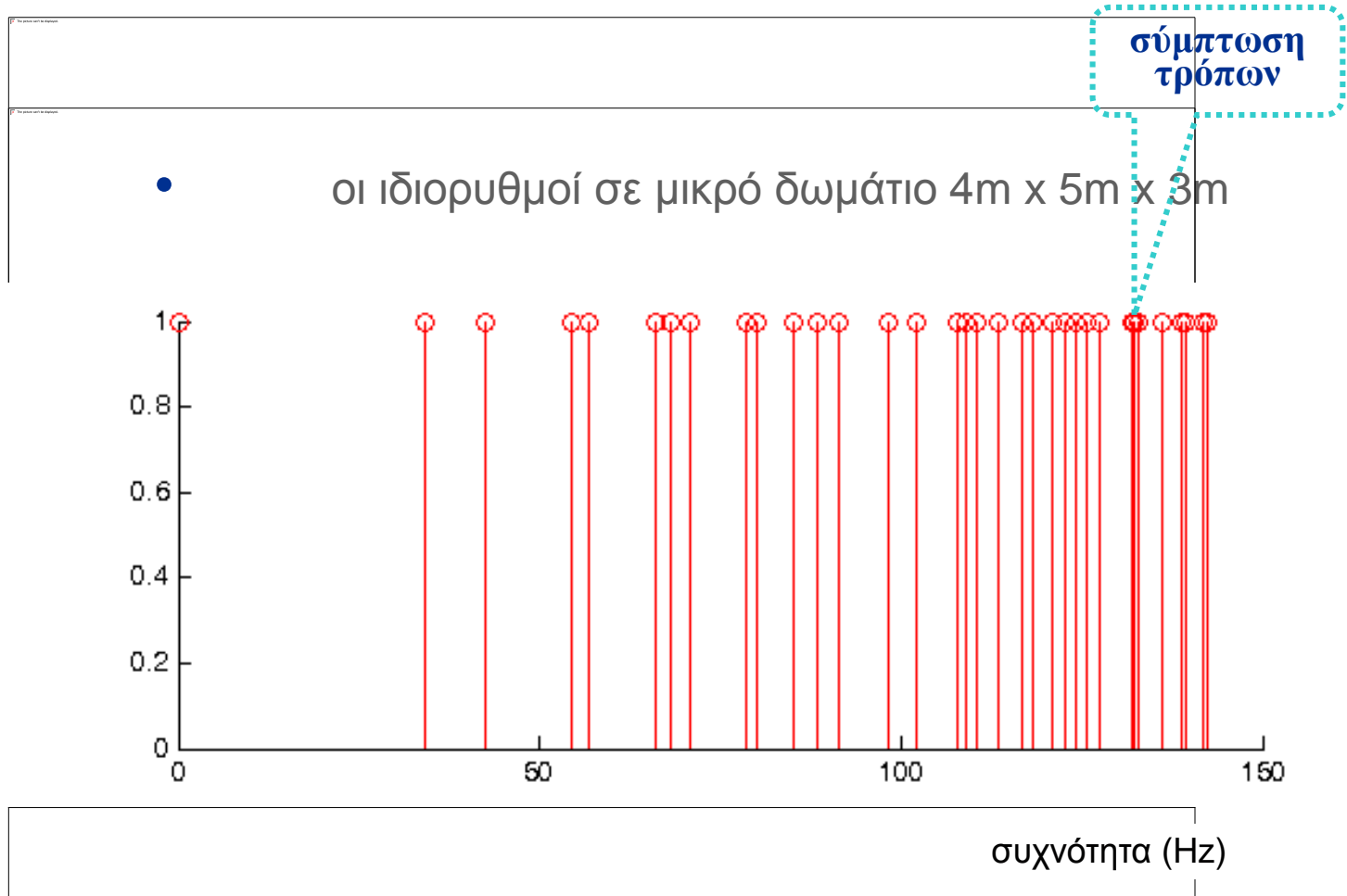
στάσιμα κύματα (πολλαπλοί αξονικοί ρυθμοί)

σε παραλληλεπίπεδους χώρους



στάσιμα κύματα (πολλαπλοί αξονικοί ρυθμοί)

σε παραλληλεπίπεδους χώρους

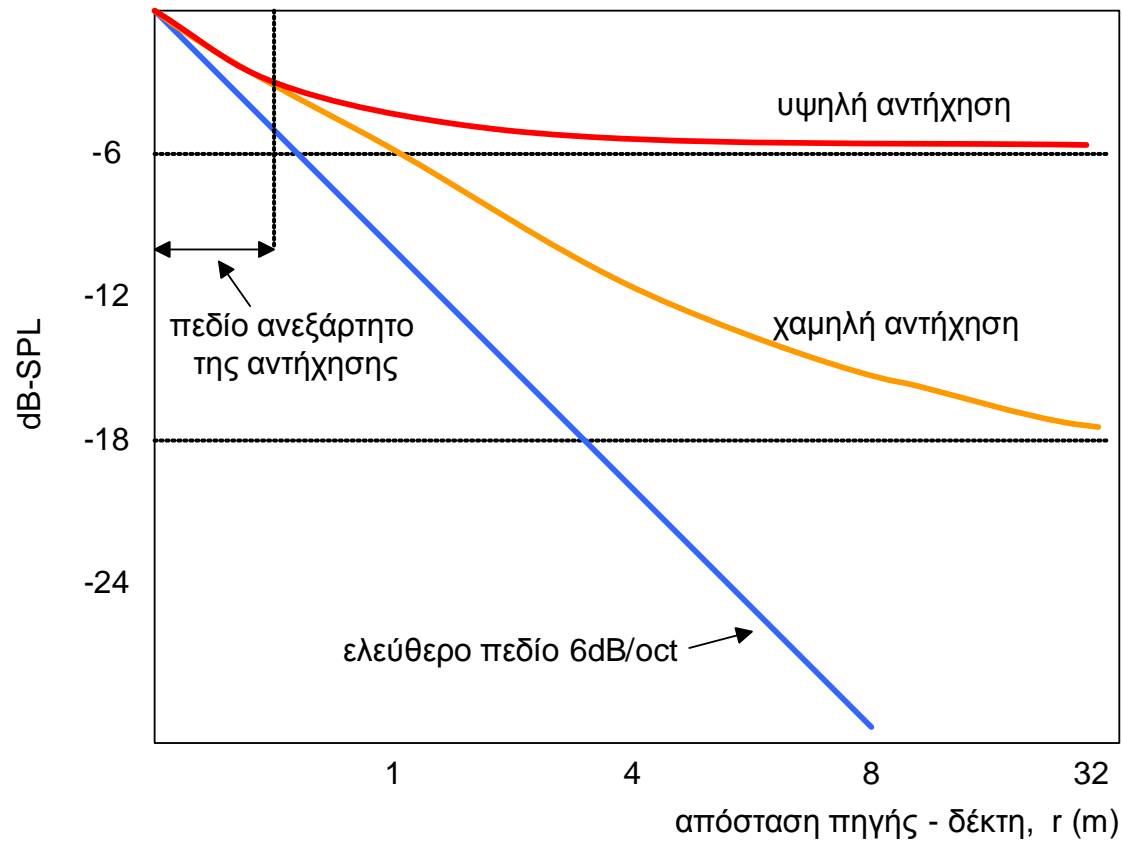


πρακτική αντιμετώπιση στάσιμων κυμάτων

- οι κλειστοί χώροι πάντα δημιουργούν στάσιμα
 - εν μέρει ελέγχονται με αποφυγή πλήρους παραλληλίας στις επιφάνειες
 - η επιλογή διαστάσεων καθορίζει τις συχνότητες των πρώτων τρόπων
 - σύμπτωση 2 ή περισσότερων αξονικών τρόπων πρέπει να αποφεύγεται
 - συχνотική απόσταση τρόπων $< 20\text{Hz}$, βελτιώνει την ακουστική
-

3. ενεργειακά - στατιστικά φαινόμενα

ενεργειακή - στατιστική ανάλυση



- η ηχοστάθμη δεν μειώνεται λόγω των ανακλάσεων
- το ποσοστό της ενέργειας που ανακλάται, εξαρτάται από την απορρόφηση στις επιφάνειες

- η απορρόφηση του στην κάθε επιφάνεια, δίνεται από το συντελεστή α

$$a = \frac{W_{\text{ανακλ}}}{W_{\text{αρχ}}}$$

- η συνολική απορρόφηση A του χώρου εξαρτάται από το άθροισμα της απορρόφησης που συνεισφέρουν όλες οι επιφάνειες

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n \quad (m^2 - \text{Sabines})$$

$$\bar{a} = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n}{S} = \frac{A}{S}$$

- η σταθερά δωματίου δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{A}{1 - \bar{a}}$$

απορρόφηση του ήχου

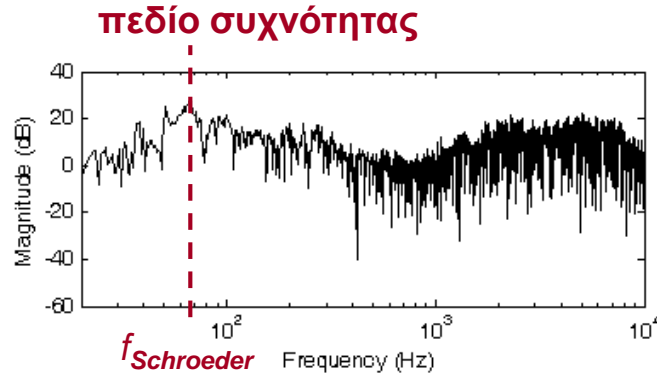
Υλικό	Συχνότητα (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	M.O.
Αέρας	0	0	0	0,003	0,007	0,02	0,005
Νερό	0,08	0,08	0,013	0,015	0,02	0,025	0,038
Τοίχος βαμμένος	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,075
Πάτωμα - ξύλο	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,093
Πάτωμα - χαλί	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,65	0,3
Γυαλί (παράθυρο)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,17
Κουρτίνες	0,03	0,4	0,11	0,17	0,24	0,35	0,21
Ξύλινη πόρτα	0,1	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,056
Ακροατής (ανά άτομο)	0,15	0,1	0,4	0,45	0,5	0,45	0,34

στατιστική ανάλυση ενεργειακής κατάστασης

- η στατιστική ανάλυση ισχύει για «μεγάλους» ακουστικά χώρους
- σε περιπτώσεις που το αντηχητικό πεδίο έχει μεγάλη συνεισφορά και η μέση τιμή της ηχοστάθμης είναι παντού σταθερή
- θεωρούμε ότι η ροή της ηχητικής ενέργειας εμφανίζεται με ίσες πιθανότητες σε όλες τις θέσεις και διευθύνσεις
- πρακτικά, η ανάλυση ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά όχι σε «μικρούς» ακουστικά χώρους, όπου το πεδίο καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από ιδιορυθμούς

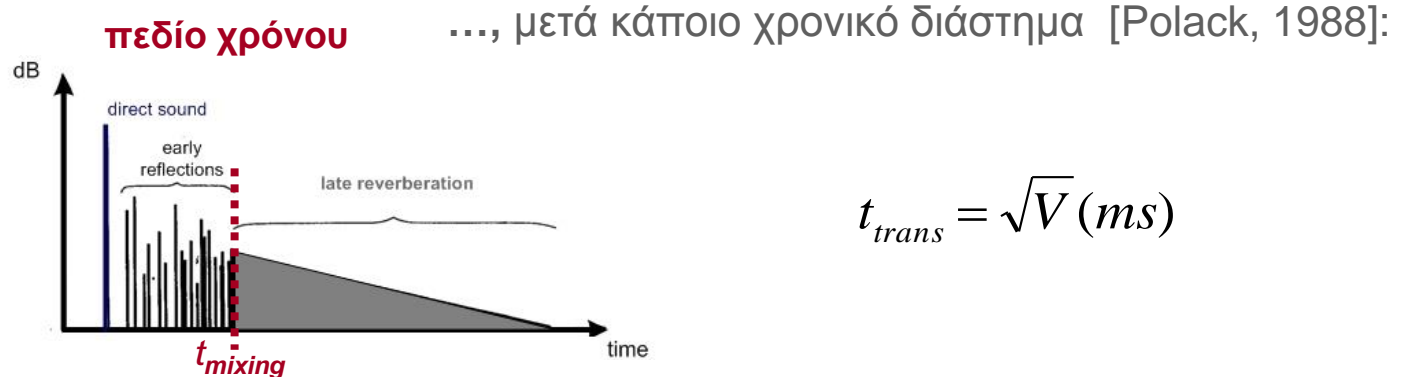
στατιστική ανάλυση ενεργειακής κατάστασης

..., ισχύει πάνω από τη συχνότητα Schroeder [Schroeder, 1954]:



$$f_{Schroeder} = 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}}$$

- το πραγματικό και φανταστικό μέρος της συνάρτησης μεταφοράς πίεσης είναι ανεξάρτητες γκαουσιανές διεργασίες
- η διασπορά τιμών της συνάρτησης είναι 5.57 dB



$$t_{trans} = \sqrt{V} (ms)$$

στατιστική ανάλυση ενεργειακής κατάστασης

υποτίθεται ότι το πεδίο είναι ομοιόμορφο και κάθε ανάκλαση στα τοιχώματα χάνει ενέργεια που εξαρτάται από τον συντελεστή $\bar{\alpha}$ (μέση τιμή απορρόφησης)

ο μέσος όρος των ανακλάσεων / δευτ. είναι: $n = \frac{Sc}{4V}$

όπου c (m/s) η ταχύτητα του ήχου (340m/s)

σε χρόνο t , μετά nt ανακλάσεις, η ενέργεια θα είναι:

$$E(t) = E_0 (1 - \bar{\alpha})^{nt}$$

$$E(t) = E_0 (1 - \bar{\alpha})^{\frac{Sc}{4V}t}$$

$$E(t) = E_0 e^{\ln[(1-\bar{\alpha})^{\frac{Sc}{4V}t}]}$$

$$E(t) = E_0 e^{\frac{Sc}{4V}t \ln(1-\bar{\alpha})}$$

στατιστική ανάλυση ενεργειακής κατάστασης

Χρόνος Αντήρησης RT ορίζεται σαν τη διάρκεια που απαιτείται για την μείωση της ηχοστάθμης κατά 60 dB:

$$\frac{E(RT)}{E_0} = 10^{-6} = e^{\frac{Sc}{4V} \ln(1-\bar{\alpha}) RT}$$

επιλύνοντας προς RT :

$$RT = \frac{4V \ln(10^{-6})}{Sc \ln(1-\bar{\alpha})}$$

$$RT = -0.163 \frac{V}{S \ln(1-\bar{\alpha})}$$

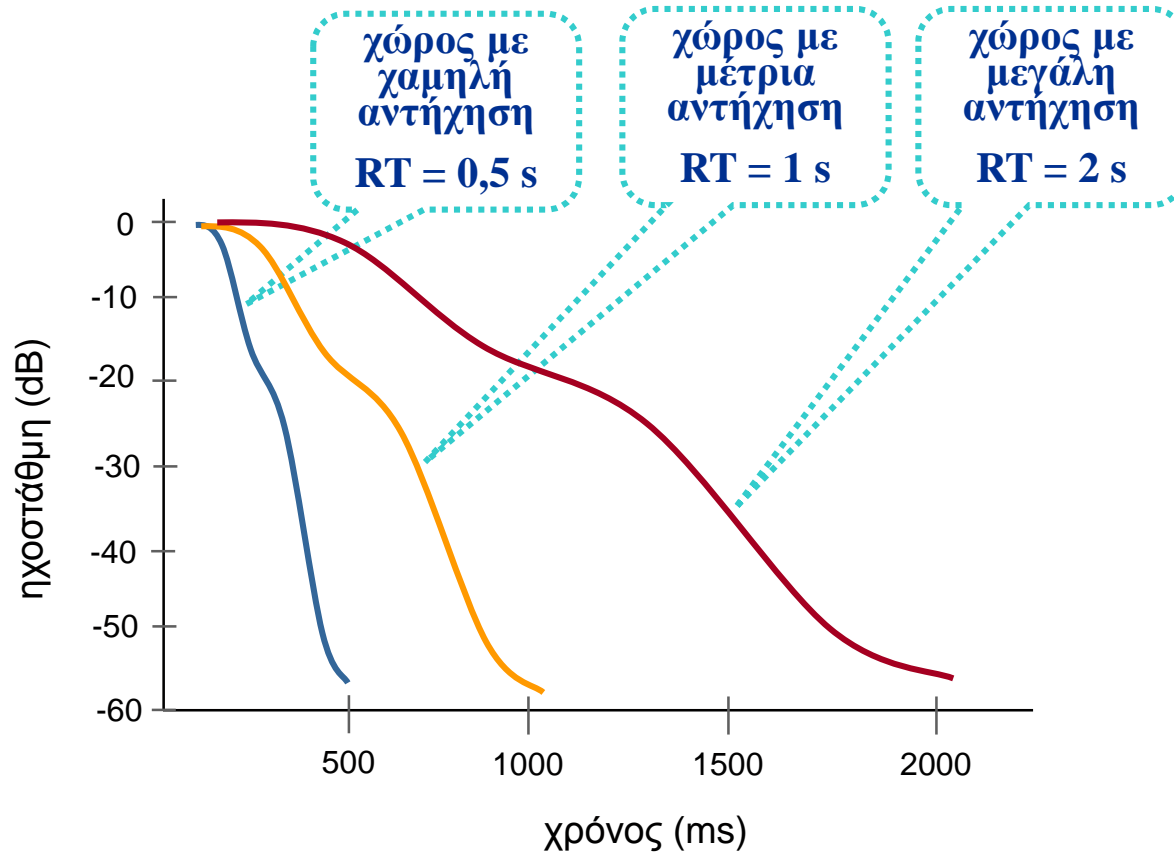
τύπος Eyring

για μικρά α , $\ln(1-a) \sim -a$ και άρα:

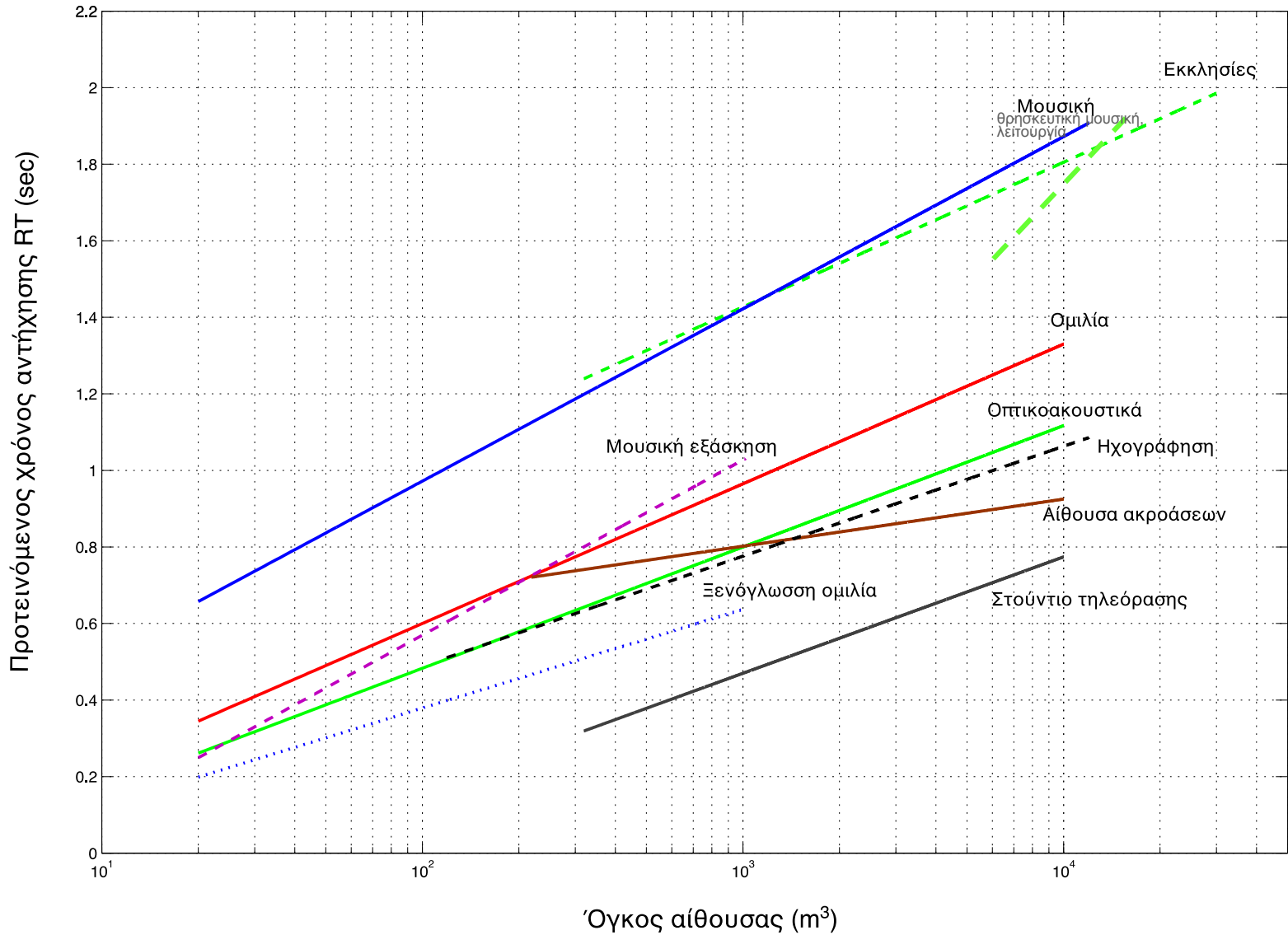
$$RT = 0.161 \frac{V}{S \bar{\alpha}} = 0.161 \frac{V}{A}$$

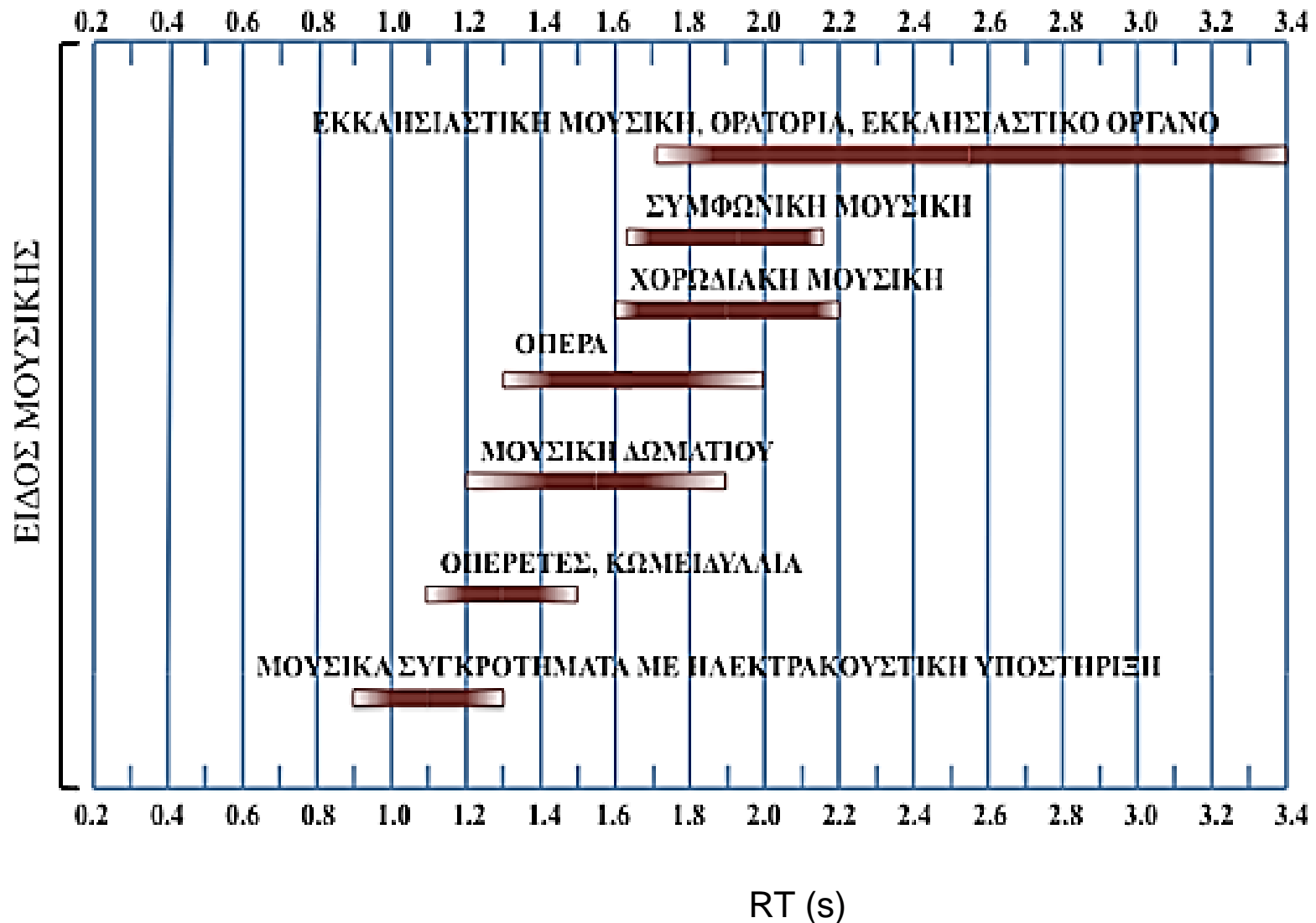
τύπος Sabine

χρόνος αντήχησης



- ο Χρόνος Αντήχησης πρέπει να συμβαδίζει με τη χρήση του χώρου
- για δεδομένο χώρο (V) ελέγχεται με τα υλικά στις επιφάνειες (A)





- ο Χρόνος Αντήχησης RT πρέπει να συμβαδίζει με τη χρήση του χώρου
- για δεδομένο χώρο (V) ελέγχεται με τα υλικά στις επιφάνειες (A)

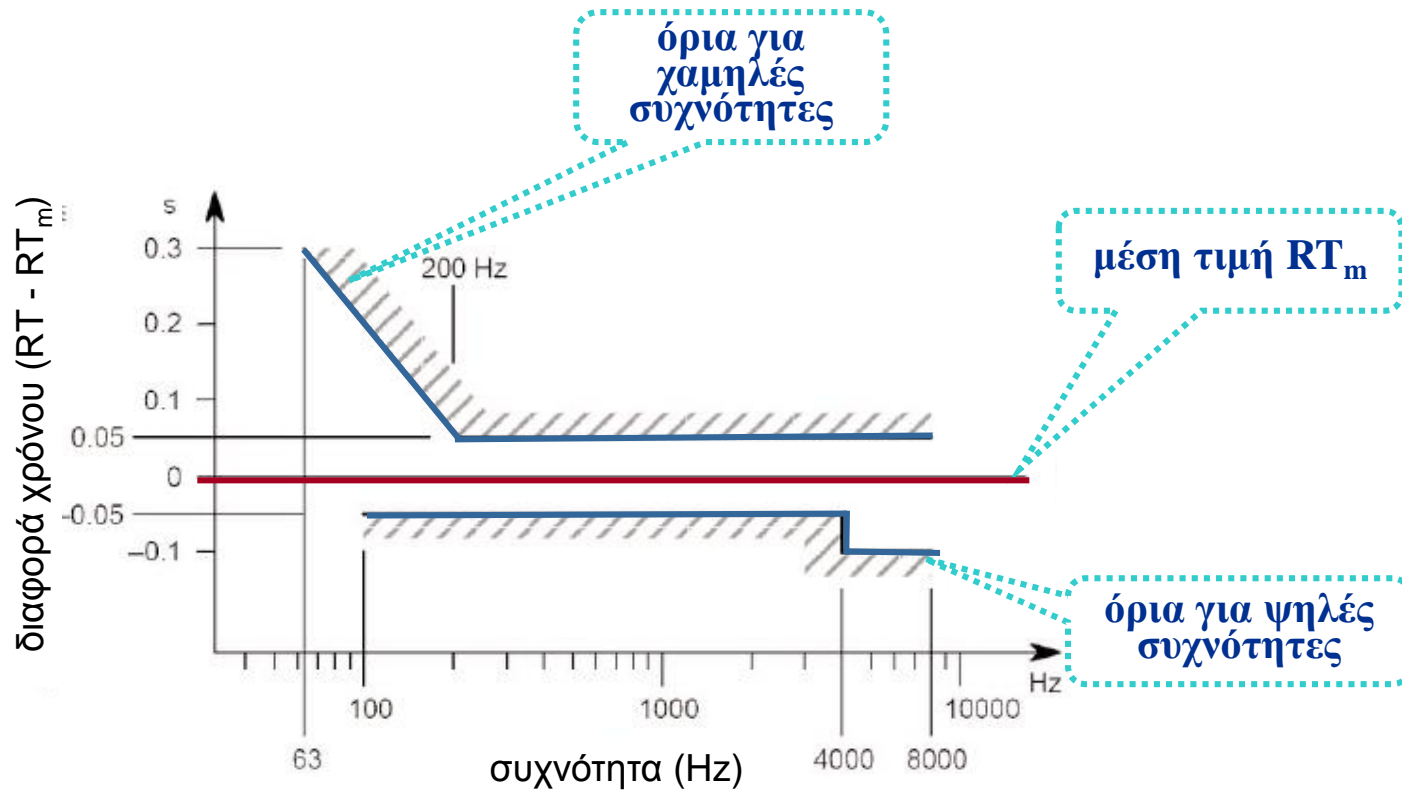
Πρότυπο	k	Δ
DIN 18041 (2004) – Μουσική	0,45	0,072
DIN 18041 (2004) – Ομιλία	0,365	-0,13
DIN 18041 (2004) – Οπτικοακουστική παρουσίαση	0,317	-0,151
ÖNORM B 8115-3 (2005) – Μουσική εξάσκηση	0,4578	-0,3461
ÖNORM B 8115-3 (2005) – Ξενόγλωσση ομιλία	0,258	-0,137
Everest (2009, σ. 172) – Αίθουσες ακροάσεων	0,123	0,433
Everest (2009, σ. 172) – Στούντιο τηλεόρασης	0,304	-0,442
Everest (2009, σ. 172) – Στούντιο ηχογράφησης	0,287	-0,085
Everest (2009, σ. 171) – Εκκλησίες	0,378	0,293

Προτιμώμενος RT

$$RT_{\text{προστ/νοσ}} = k \log(V) + \Delta$$

τύπος Sabine

$$RT = 0.161 \frac{V}{S\alpha} = 0.161 \frac{V}{A}$$



- ο Χρόνος Αντήχησης μην υπερβαίνει κάποια όρια στις χαμηλές-μέσες συχνότητες
- για δεδομένο χώρο (V) ελέγχεται με τα υλικά στις επιφάνειες (A)

απευθείας σήμα :

$$p_{rms,d}^2 = \frac{WQ}{4\pi r^2} \rho c$$

Κατευθυντικότητα πηγής
 $Q = 1$ για παντοκατευθυντική

όπου : $Q = \frac{I_d}{I_0}$

σήμα από αντήχηση (πολλαπλές ανακλάσεις):

$$p_{rms,r}^2 = \frac{4W}{R} \rho c$$

όπου: $R = \frac{A}{1-a}$

λόγος στάθμης απευθείας / αντήχηση:

$$D / R = 10 \log\left(\frac{QR}{16\pi r^2}\right) \text{dB}$$

ενεργειακή ανάλυση πεδίου

συνολική πίεση σε απόσταση r και για κατευθυντική πηγή :

$$p_{rms,d}^2 + p_{rms,r}^2 = W\rho c \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \text{Pa} \quad \text{όπου : } Q = \frac{I_d}{I_0}$$

συνολική ηχοστάθμη σε απόσταση r και για κατευθυντική πηγή :

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \text{dB} \quad \text{όπου : } L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log W + 120 \text{dB}$$

στο απευθείας πεδίο, η ηχοστάθμη εξαρτάται από την απόσταση και το Q :

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} \right]$$

στο αντηχητικό πεδίο, η ηχοστάθμη εξαρτάται από την απορρόφηση :

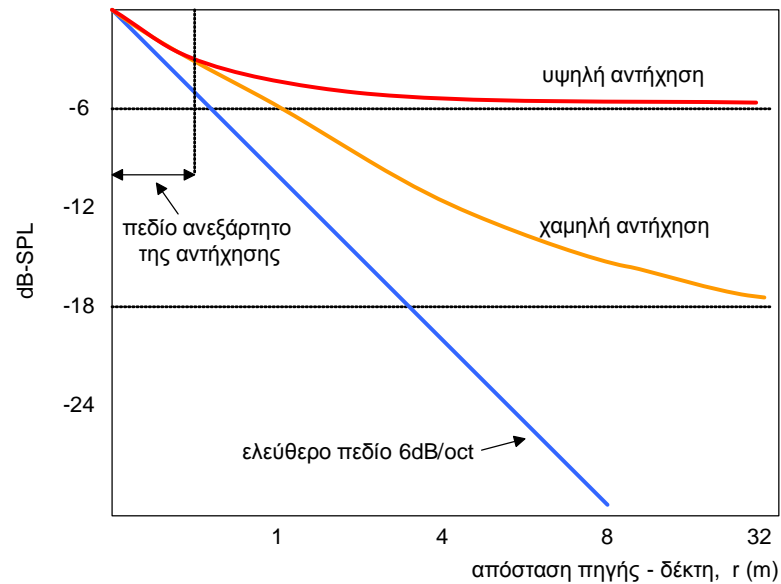
$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{4}{R} \right]$$

ενεργειακή ανάλυση πεδίου

συνδυάζοντας τα 2 πεδία, η ηχοστάθμη σε απόσταση r από κατευθυντική πηγή σε κλειστό χώρο :

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right]$$

εξίσωση Hopkins-Stryker



ενεργειακή ανάλυση πεδίου

η απόσταση που τα 2 πεδία, έχουν ίση ηχοστάθμη, ορίζει την **κρίσιμη απόσταση** r_c του χώρου :

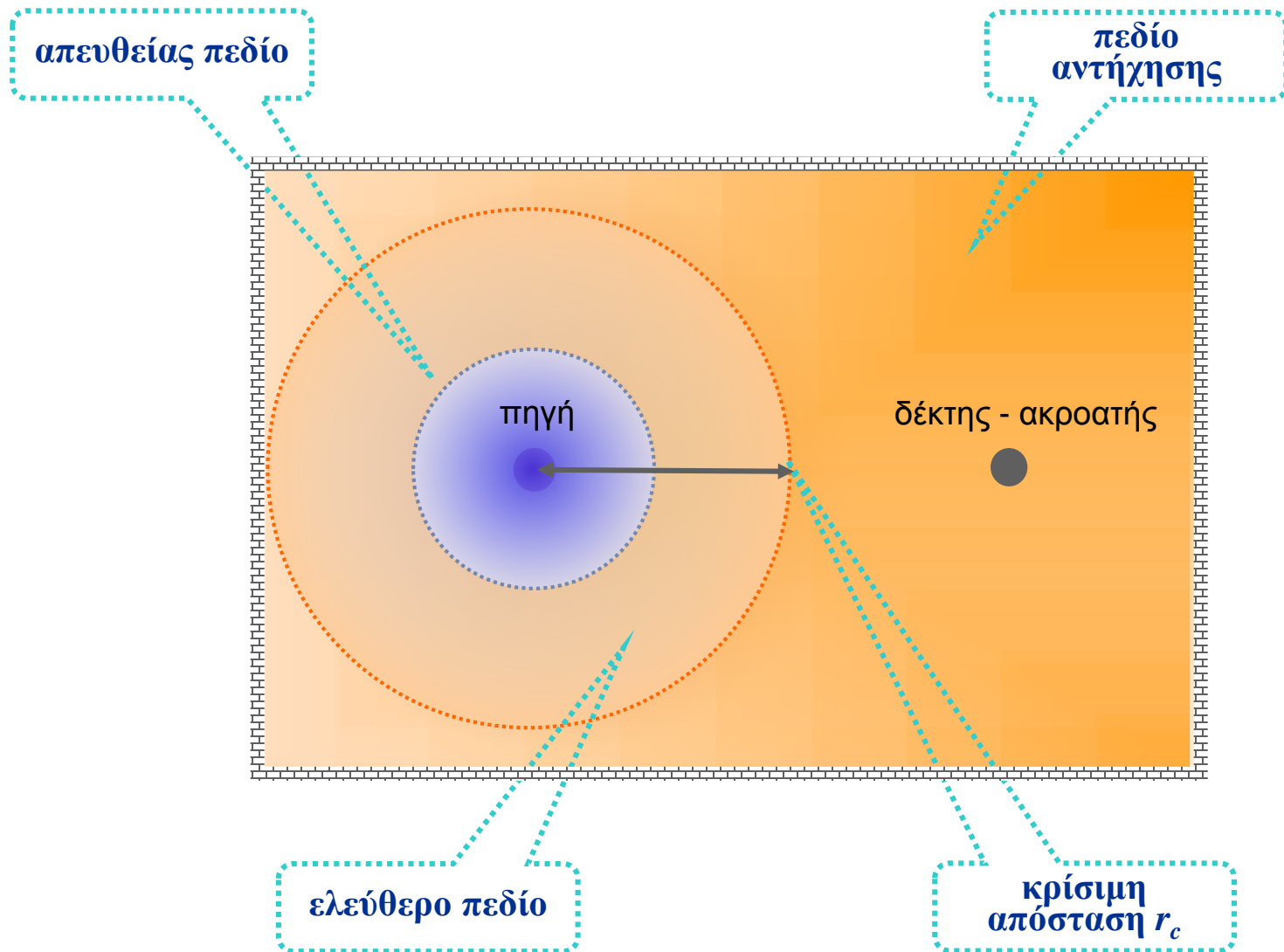
$$\frac{Q}{4\pi r_c^2} = \frac{4}{R} \quad \text{όπου :} \quad r_c = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}}$$

- σε αποστάσεις του δέκτη πέρα από την κρίσιμη, η καταληπτότητα της ομιλίας μειώνεται
- γενικά, ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο πρέπει να τοποθετείται σε $r < 0.3 r_c$, ενώ ένα κατευθυντικό σε $r < 0.5 r_c$
- σημαντική παράμετρος είναι **η στάθμη του λόγου απ' ευθείας προς ανακλώμενου σήματος**

$$L_p(D/R) = 10 \log\left(\frac{QR}{16\pi r^2}\right)$$

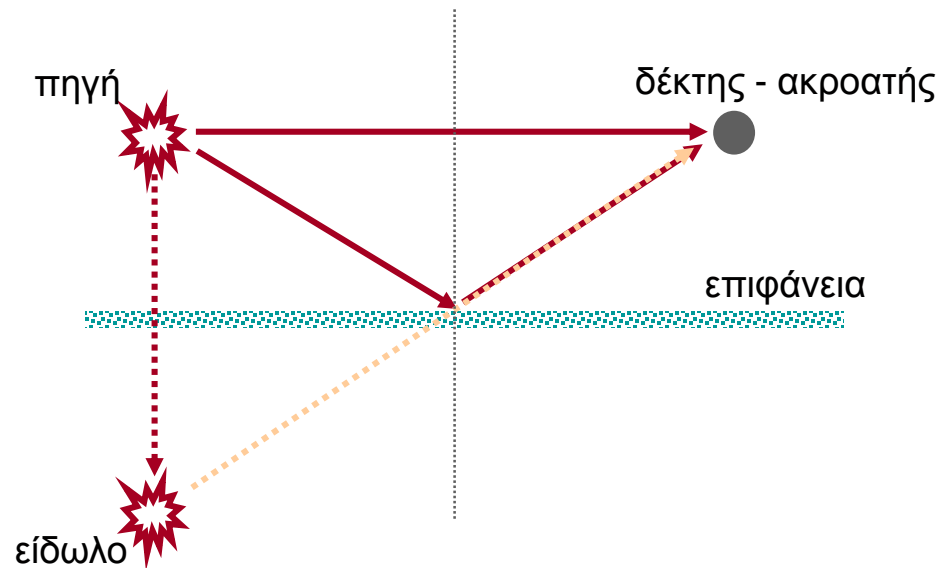
όπου R είναι **η σταθερά δωματίου**

ενεργειακή ανάλυση πεδίου

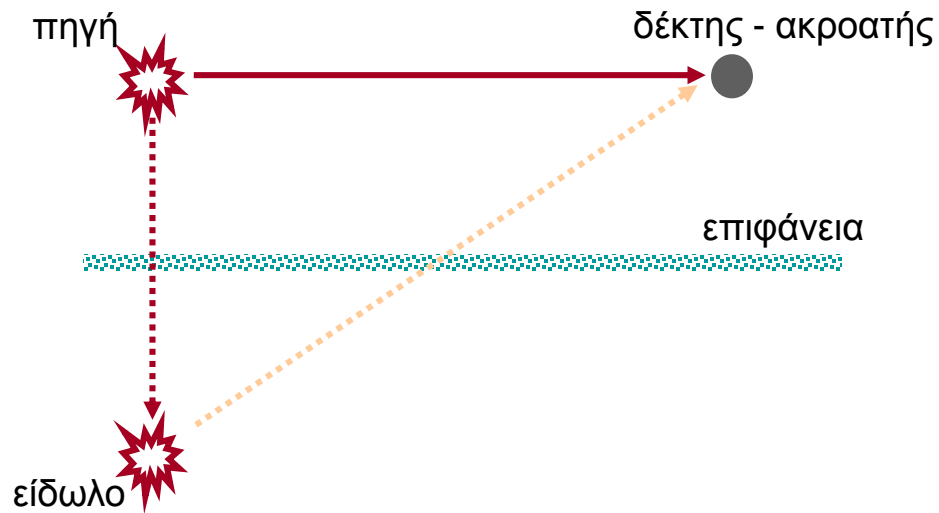
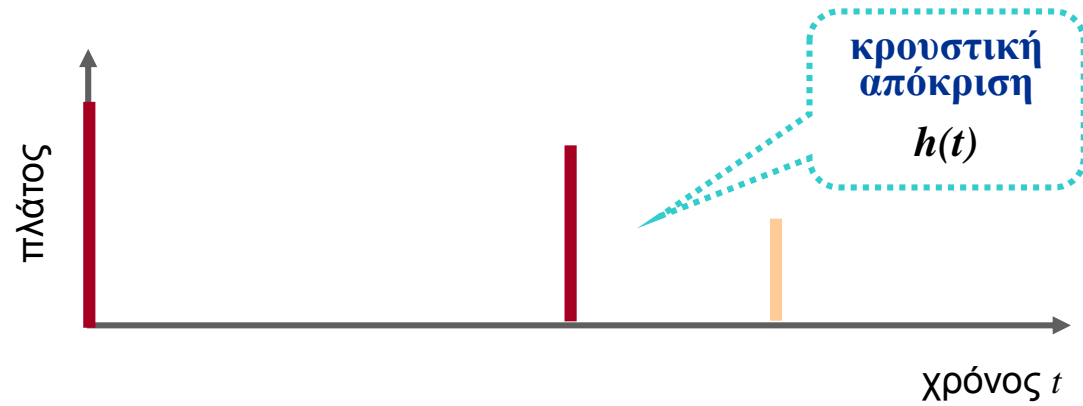


4. ανακλάσεις

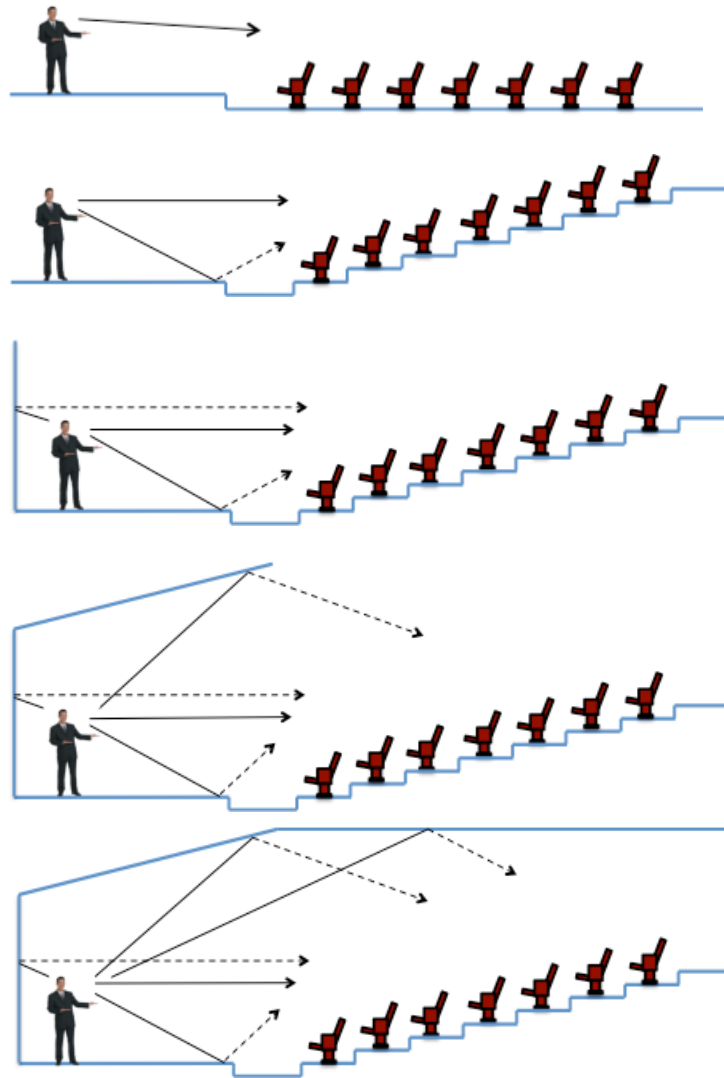
- σε σχετικά ψηλές συχνότητες, ο ήχος προσεγγίζεται σαν ακτίνα φωτός
- κάθε επιφάνεια συνεισφέρει μία πρώτη ανάκλαση
- η ανάλυση ισχύει κυρίως για την περιοχή D



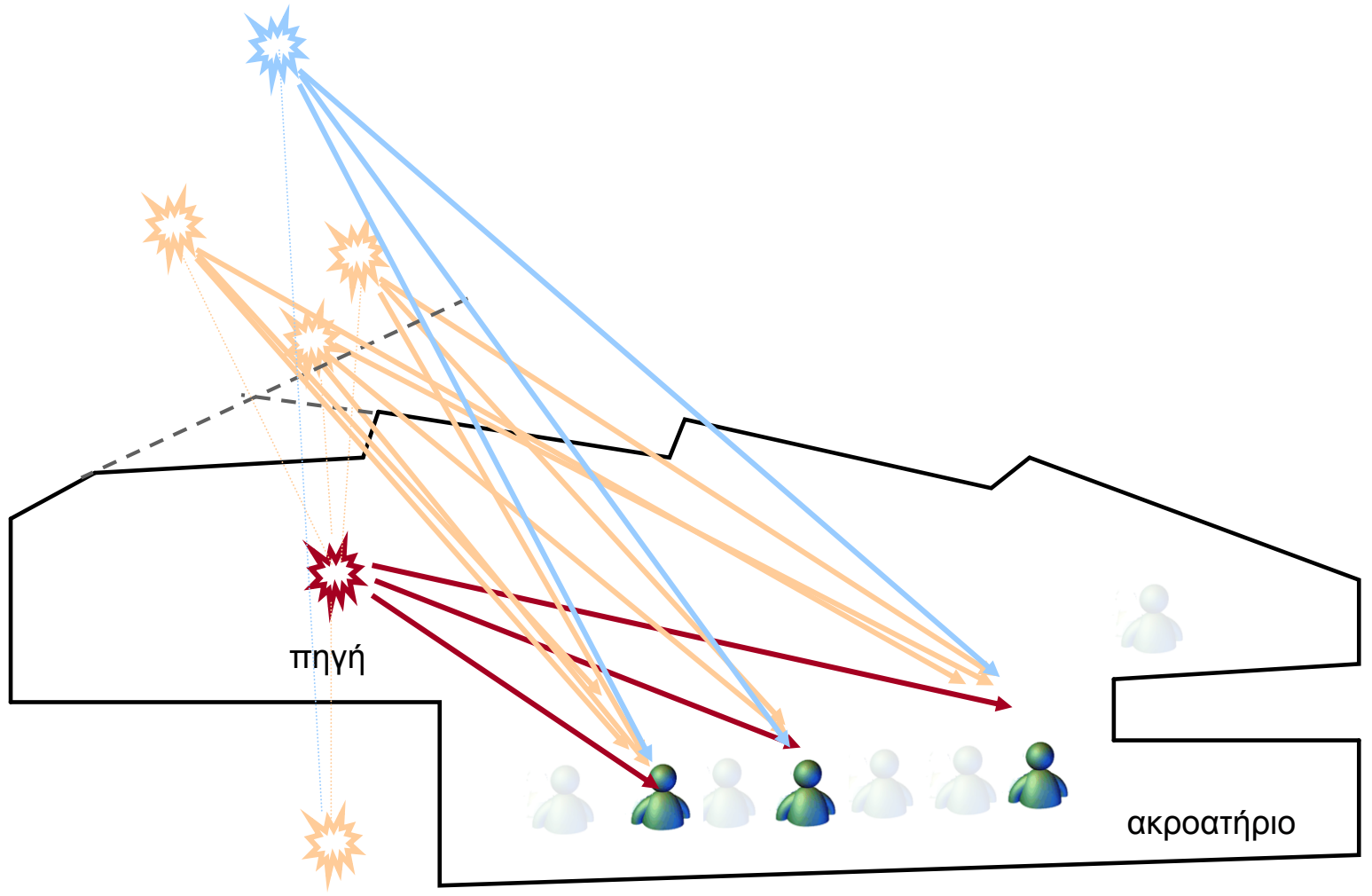
γεωμετρική ακουστική



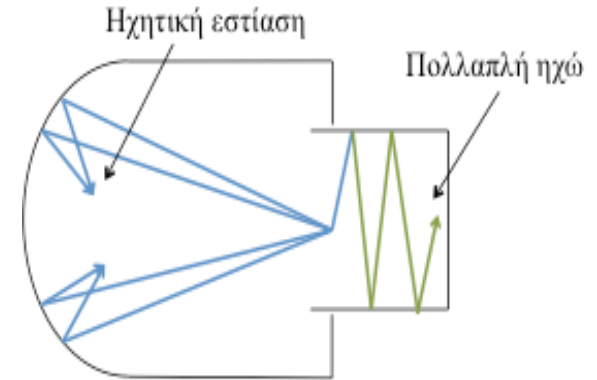
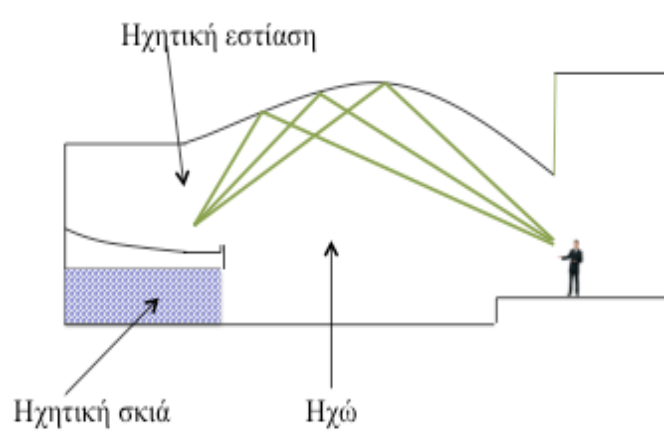
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ



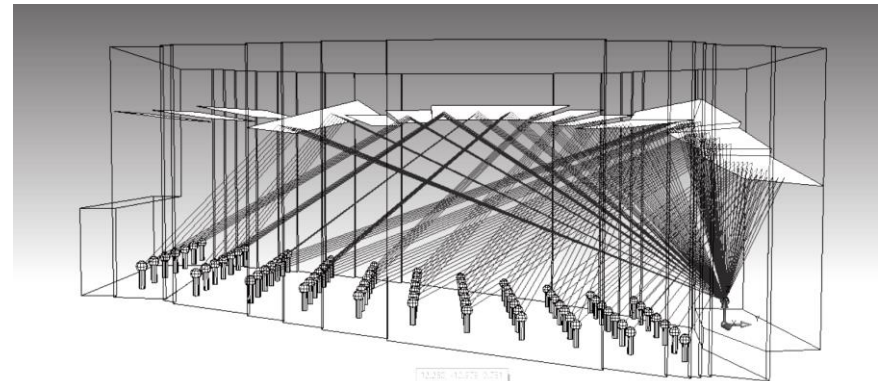
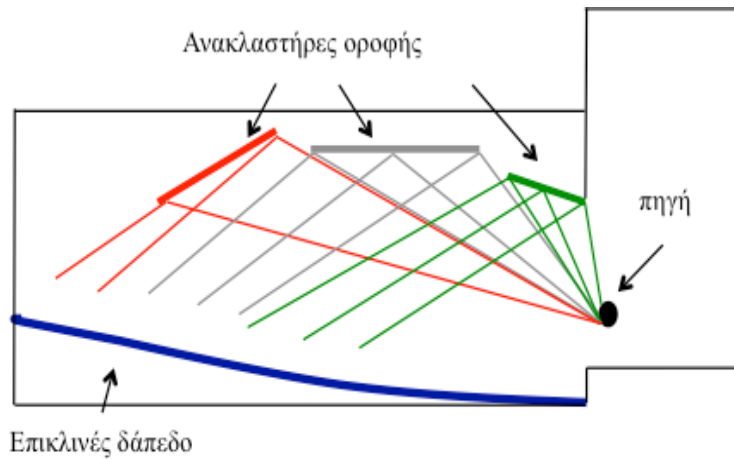
γεωμετρική ακουστική



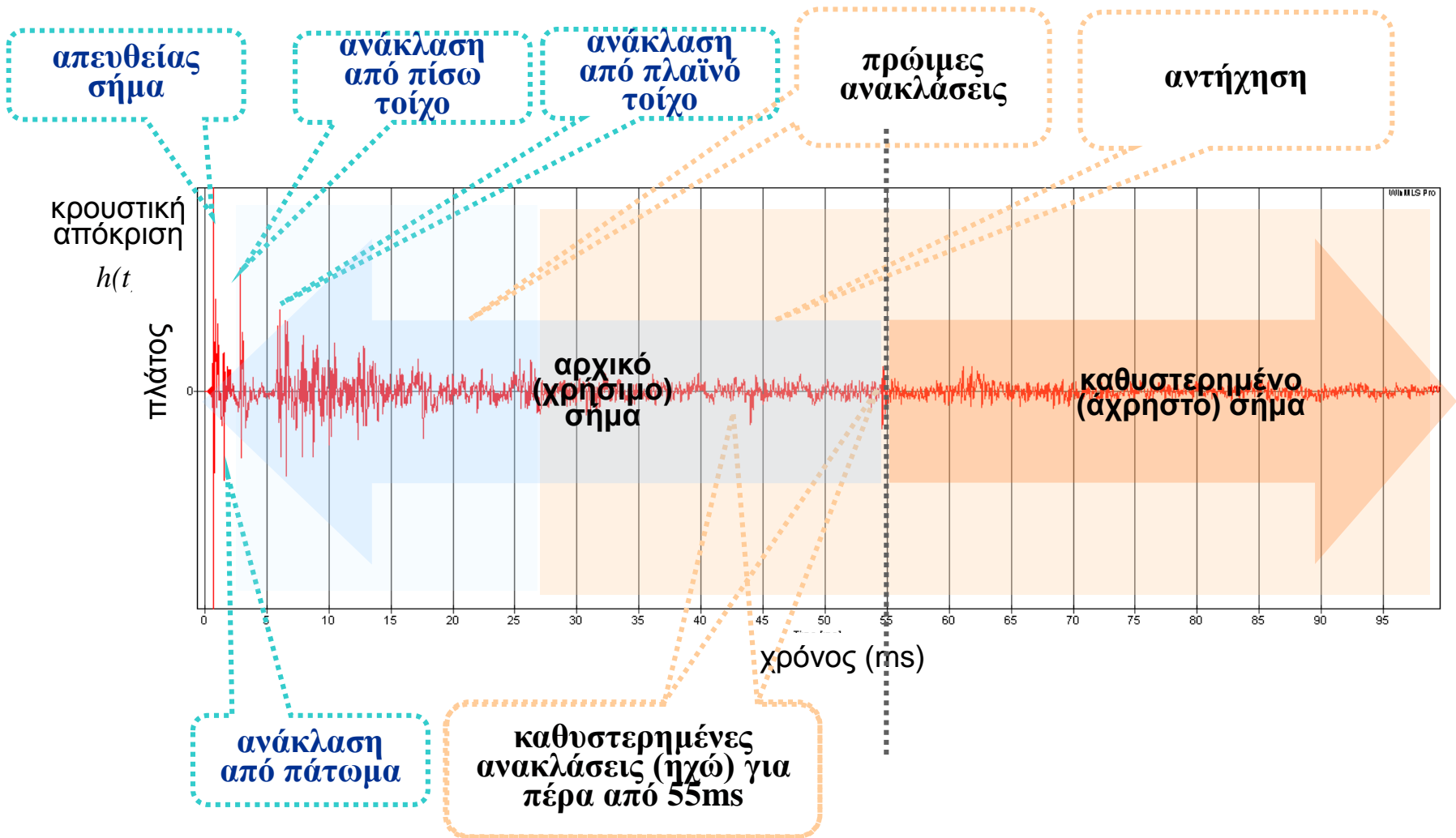
προβλήματα από ανακλάσεις



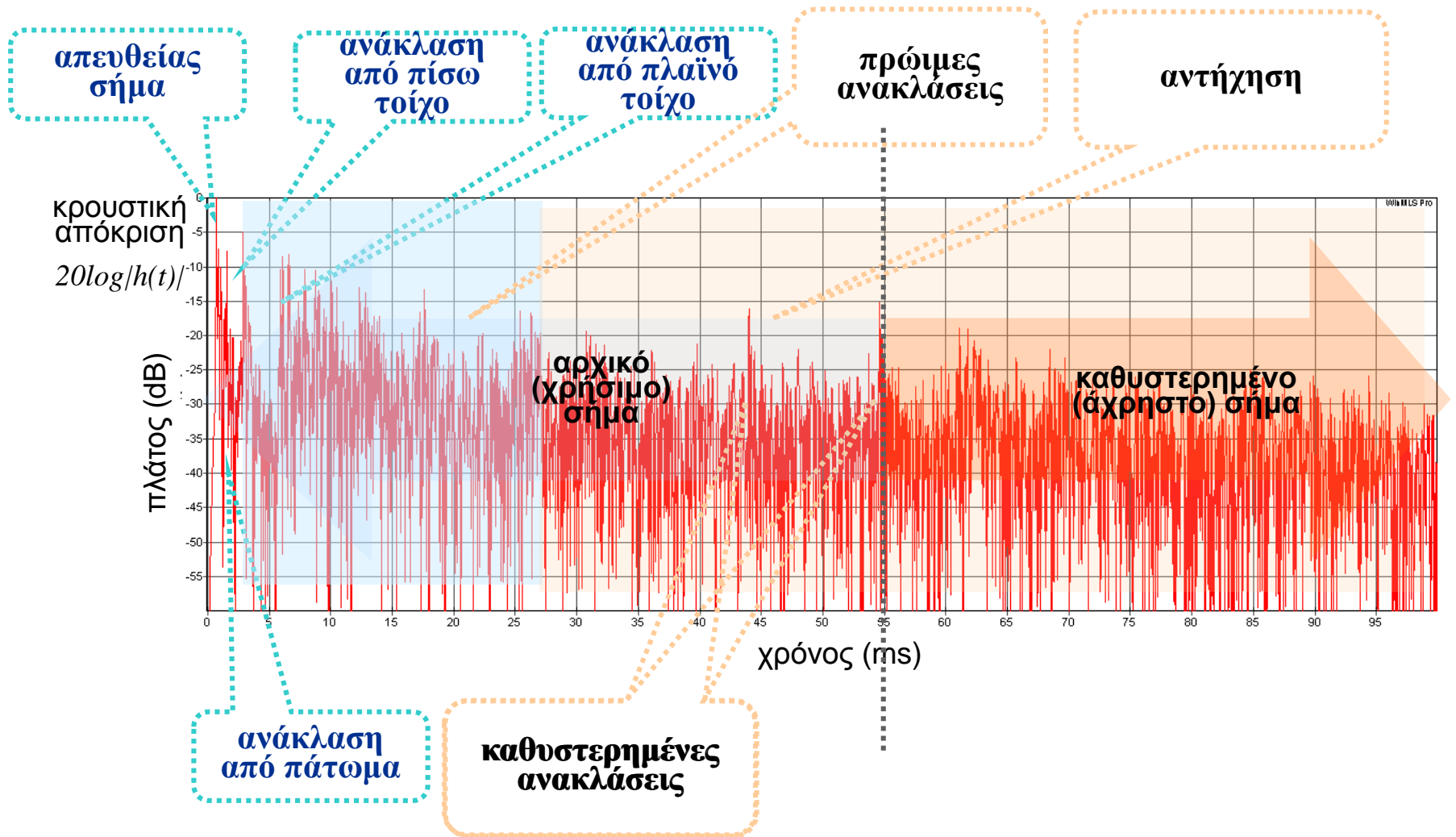
αξιοποίηση ανακλάσεων



γεωμετρική ακουστική



γεωμετρική ακουστική



ο λόγος της ενέργειας μεταξύ χρήσιμου και μη χρήσιμου σήματος είναι :

$$10 \log \left[\frac{\int_0^{t_0} h^2(t) dt}{\int_{t_0}^{\infty} h^2(t) dt} \right]$$

για t_0 μόνο για το τέλος του απευθείας

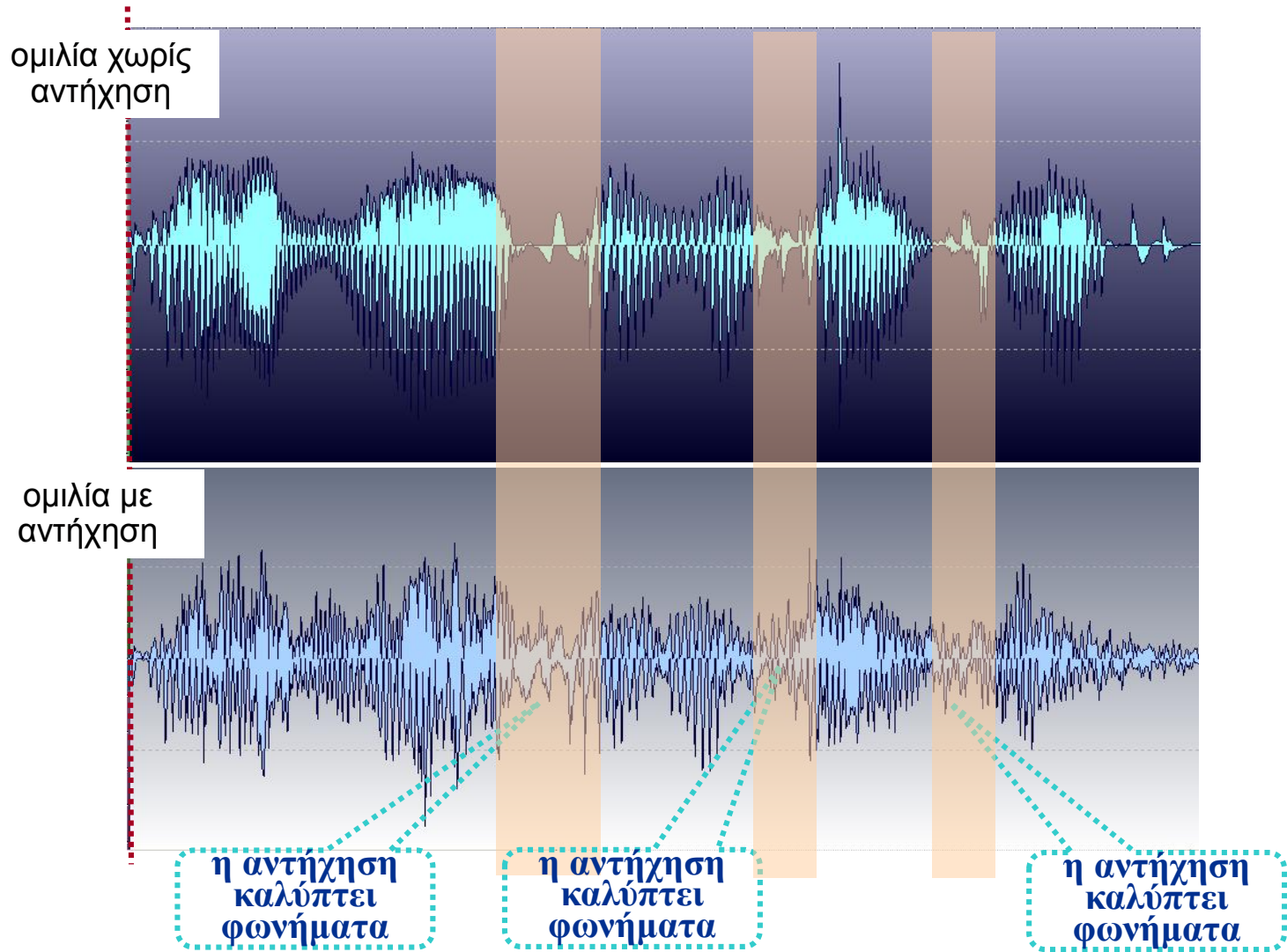
ορίζεται ο λόγος **απευθείας προς ανακλώμενο** D/R του χώρου και ιδανικά $D/R > 5 \text{ dB}$
για $t_0 = 80 \text{ ms}$,

ορίζεται ο λόγος **ευκρίνειας** $C80$ του χώρου και ιδανικά $-2 \text{ dB} > C80 > 2 \text{ dB}$

υπάρχουν λόγοι ενέργειας για ποσοστό ενέργειας πλευρικών ανακλάσεων LEF_1 , κοκ...

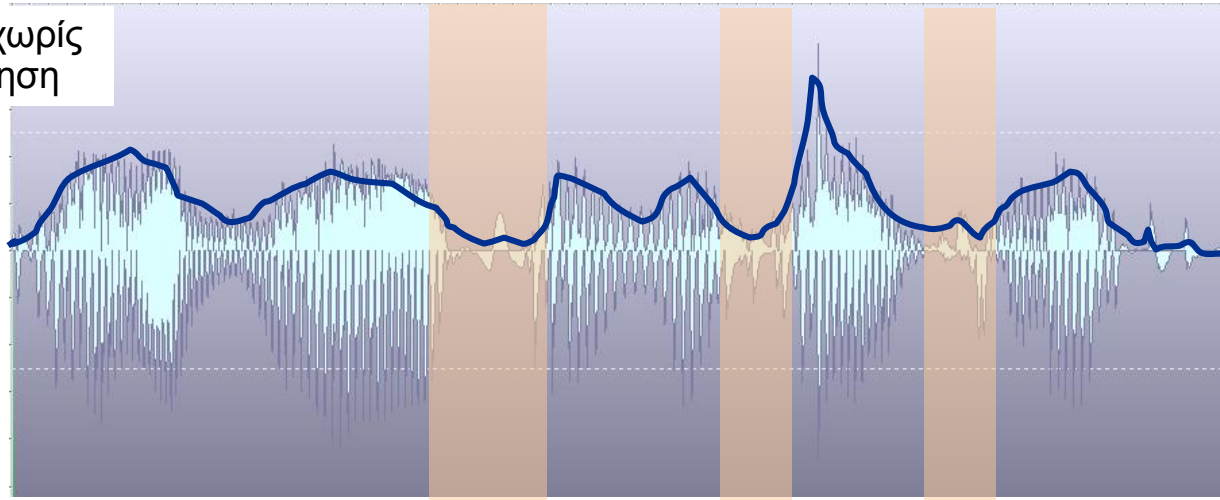
5. καταληπτότητα ομιλίας

ακουστική και σήματα ομιλίας

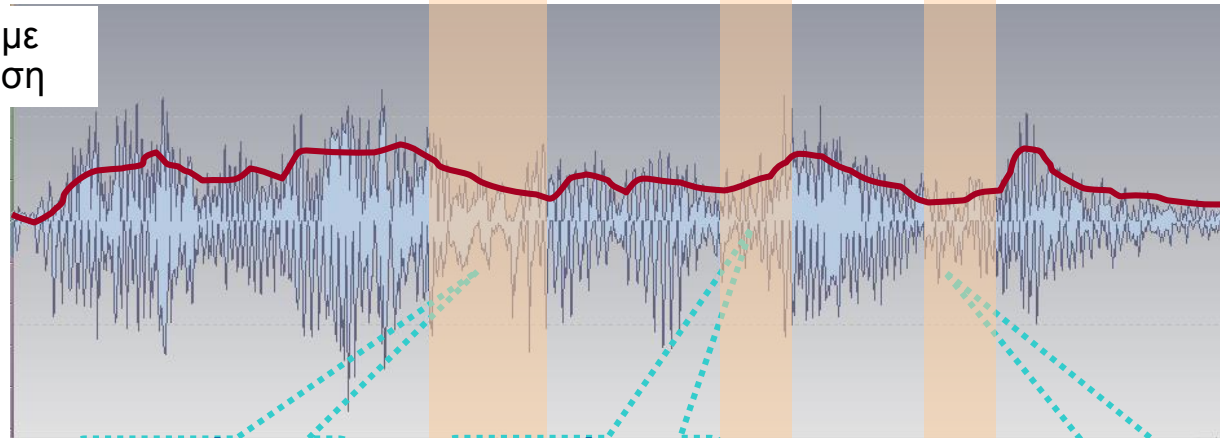


ακουστική και σήματα ομιλίας

ομιλία χωρίς
αντήχηση



ομιλία με
αντήχηση

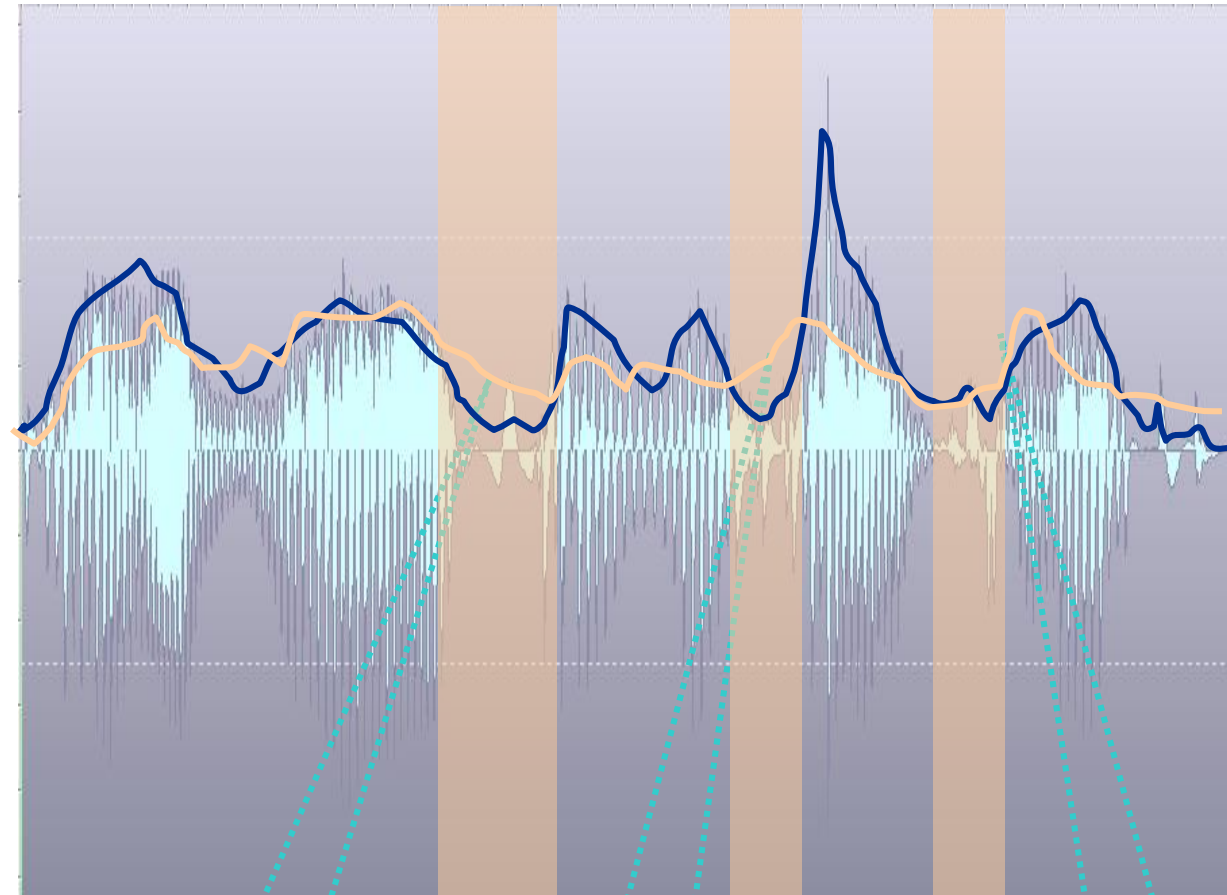


η αντήχηση
καλύπτει
φωνήματα

η αντήχηση
καλύπτει
φωνήματα

η αντήχηση
καλύπτει
φωνήματα

ακουστική και σήματα ομιλίας



η αντήρηση
καλύπτει
φωνήματα

η αντήρηση
καλύπτει
φωνήματα

η αντήρηση
καλύπτει
φωνήματα

ακουστική και σήματα ομιλίας

η καταληπτότητα της ομιλίας υπολογίζεται από τον *ALCONS* :

$$\%ALCONS = \frac{200r^2 RT^2 (n+1)}{QV}$$

όπου n είναι ο αριθμός των ηχείων (αν υπάρχουν)

Articulation *Loss* in *CON*Sonants είναι η *απώλεια καταληπτότητας σε σύμφωνα*

ιδανικά *ALCONS* < 15 %

το κριτήριο *RASTI* περιγράφει επίσης καταληπτότητα και εξάγεται και από την κρουστική,

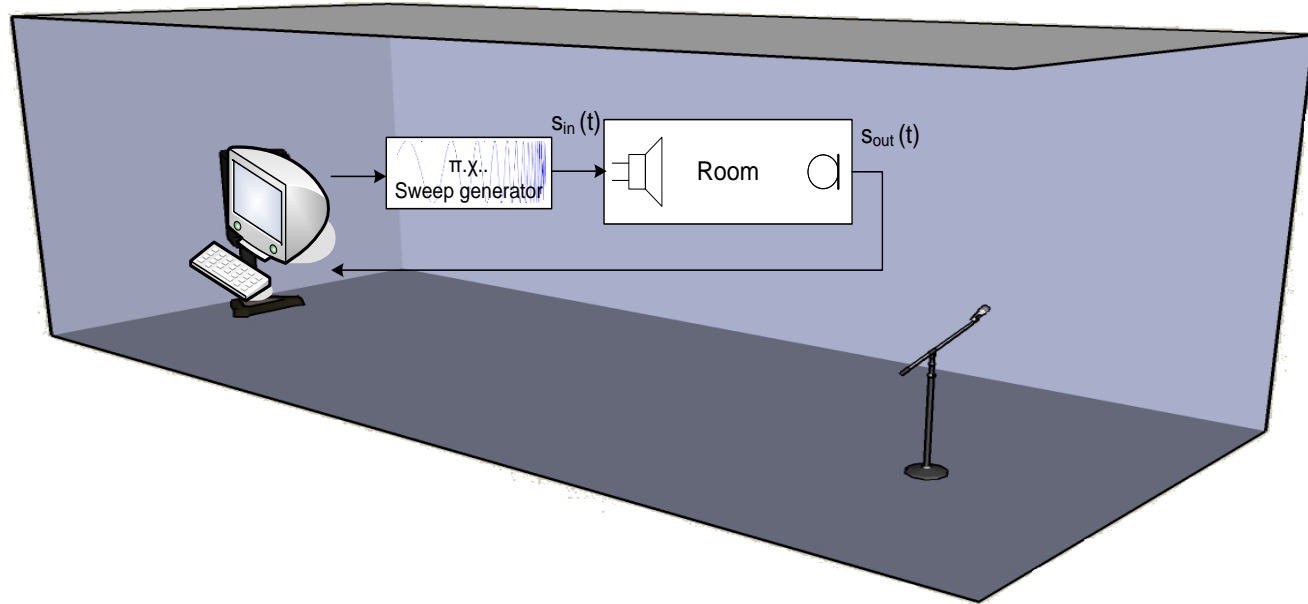
ιδανικά *RASTI* >0,5

$$RASTI \approx 0,9482 - 0,1845 \ln(ALCONS)$$

<i>RASTI</i>	<i>ALCONS</i> (%)	καταληπτότητα
0 – 0,3	> 15	κακή
0,3 – 0,45	15 -12	ικανοποιητική
0,45 – 0,6	12 – 8	καλή
0,6 – 0,76	8 - 4	πολύ καλή
0,75 – 1	< 4	τέλεια

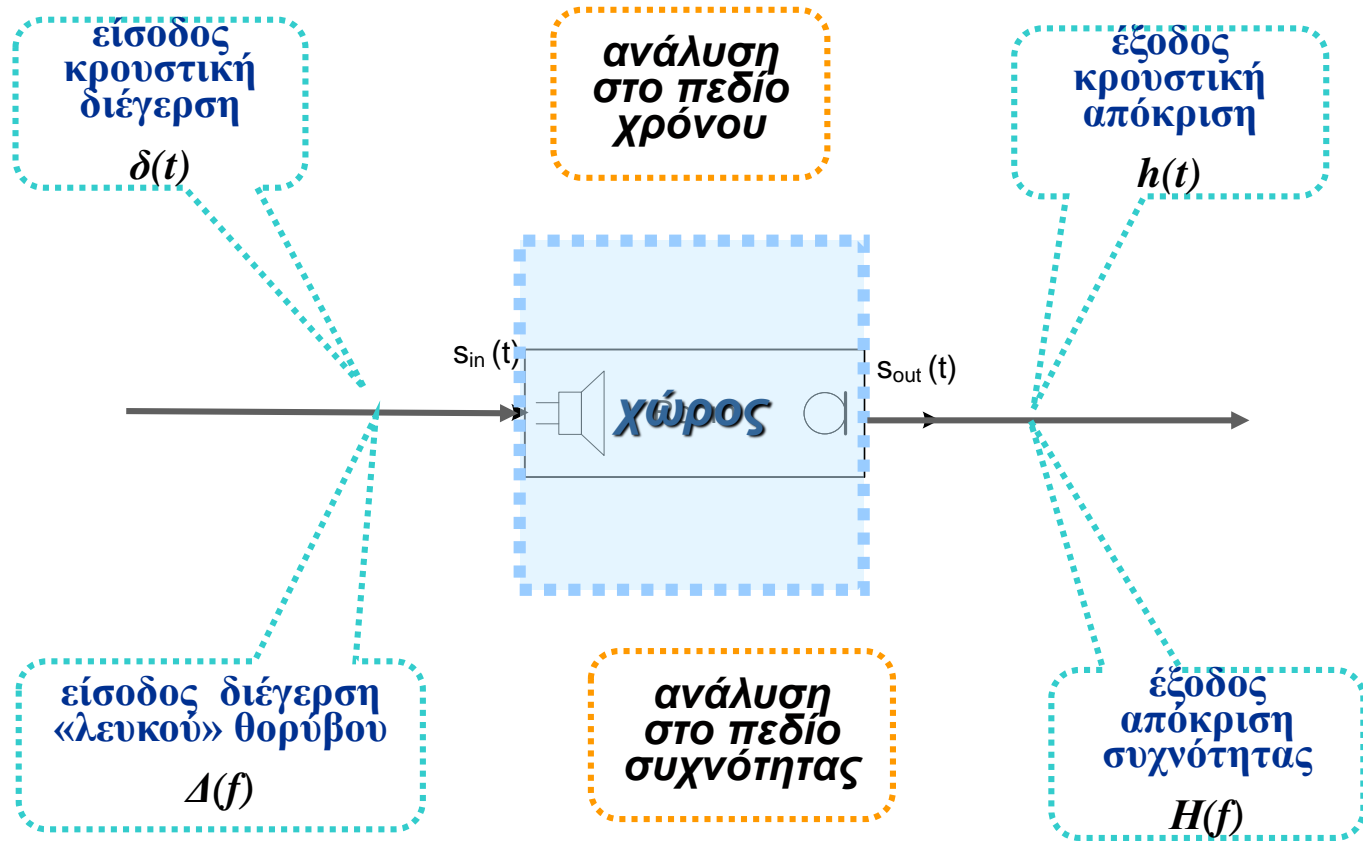
6. ακουστική χώρων & θεωρία σημάτων

Βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)



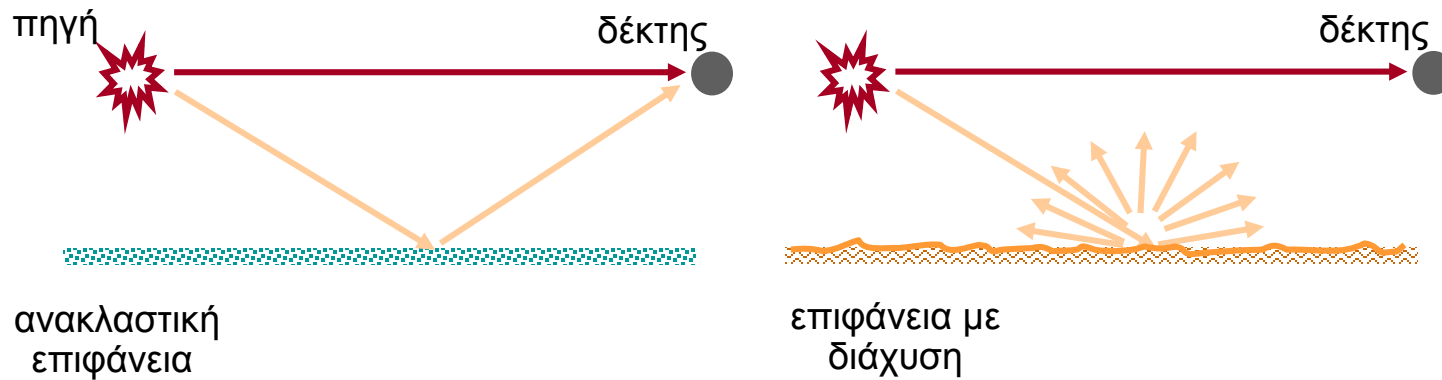
$$\begin{aligned} S_{in}(f) &= F\{s_{in}(t)\} \\ S_{out}(f) &= F\{s_{out}(t)\} \Rightarrow RTF = \frac{S_{out}(f)}{S_{in}(f)} = H(f) \end{aligned}$$

Βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)



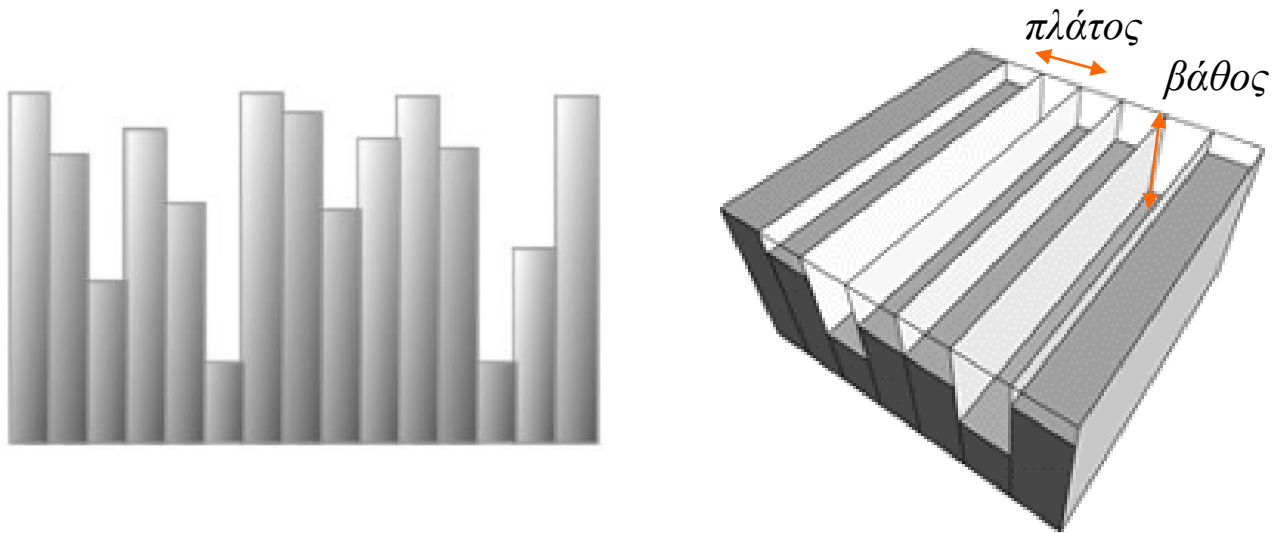
7. διάχυση και απορρόφηση

- βοηθούν στη μείωση ισχυρών ανακλάσεων
- είναι καλύτερα η ενέργεια να διαχυθεί προς όλες τις διευθύνσεις



- τυχαίο προφίλ επιφάνειας δεν εγγυάται σωστή διάχυση
- συνήθως το προφίλ έχει ελεγχόμενες διακυμάνσεις

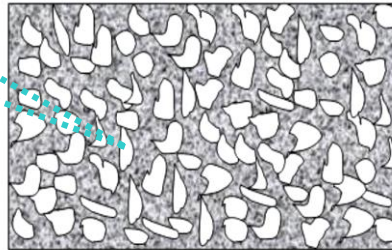
- ο Schroeder πρότεινε προφίλ με βάση συναρτήσεις MLS ή «τετραγωνικού υπολοίπου»



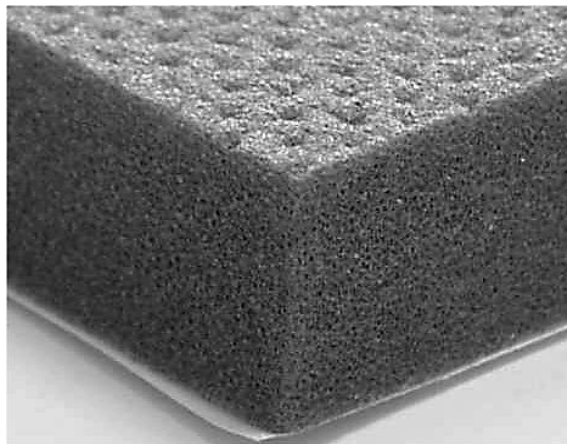
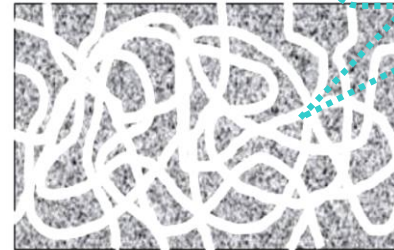
- το εύρος των συχνοτήτων που διαχέονται καθορίζεται από το βάθος και πλάτος των εγκοπών

- η απορρόφηση του ήχου γίνεται με μετατροπή της ενέργειας του κύματος σε θερμότητα, συνήθως μέσω τριβής
- το κύμα διαπερνά πορώδη υλικά σε ψηλές συχνότητες και χάνει ενέργεια μέσω τριβής και άλλων μηχανισμών
- για μέγιστη απορρόφηση στις ψηλές συχνότητες το πορώδες υλικό πρέπει να τοποθετείται εκεί που η ταχύτητα των στοιχειωδών σωματιδίων είναι μέγιστη
- σε χαμηλές συχνότητες, η ενέργεια του κύματος μεταφέρεται σε σταθερές μεγάλες επιφάνειες που απορροφούν τον ήχο μέσω ταλάντωσης

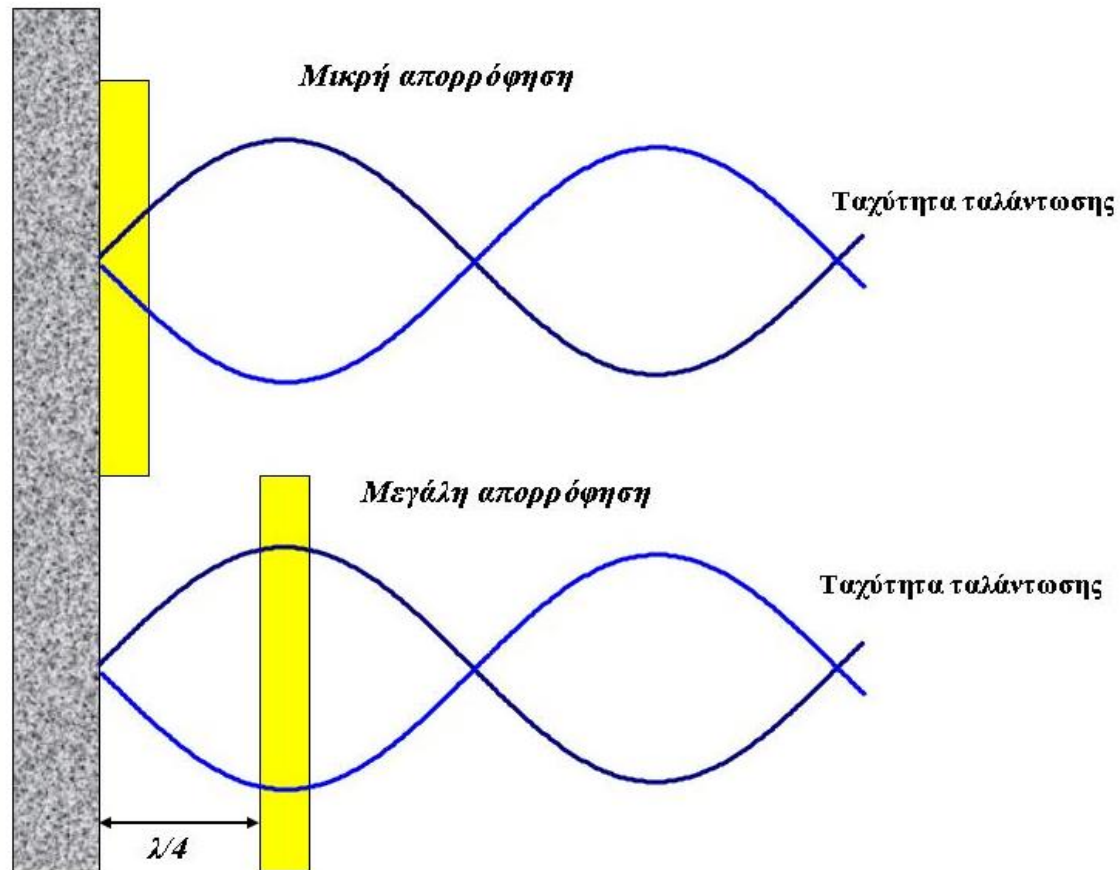
υλικό με κλειστούς
πόρους



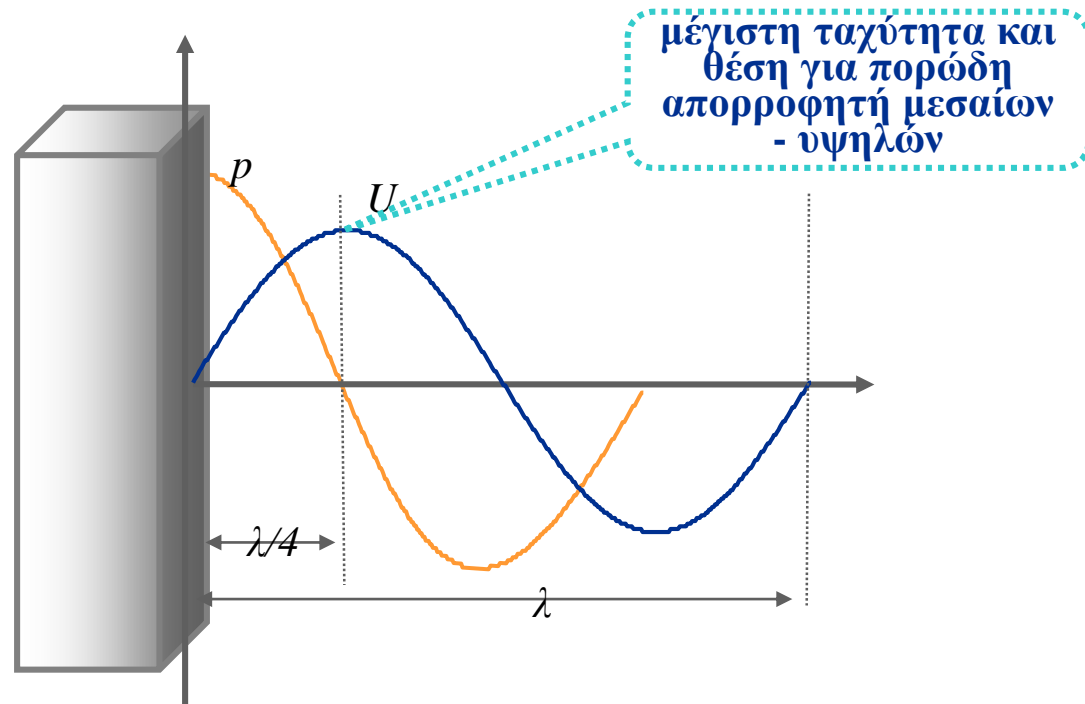
υλικό με ανοιχτούς
πόρους



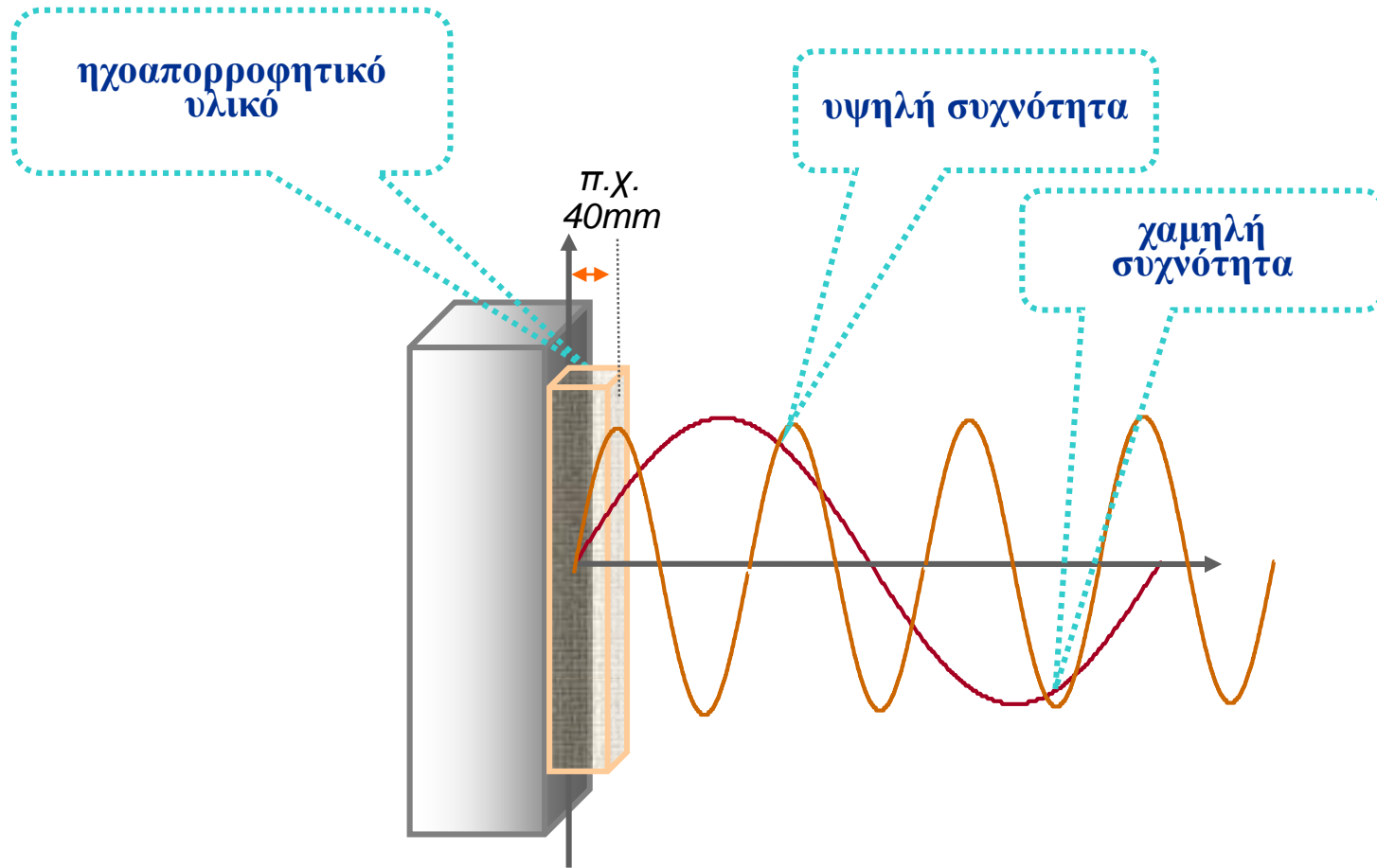
- μείωση κινητικής ενέργειας ανάλογη σωματιδιακής ταχύτητας



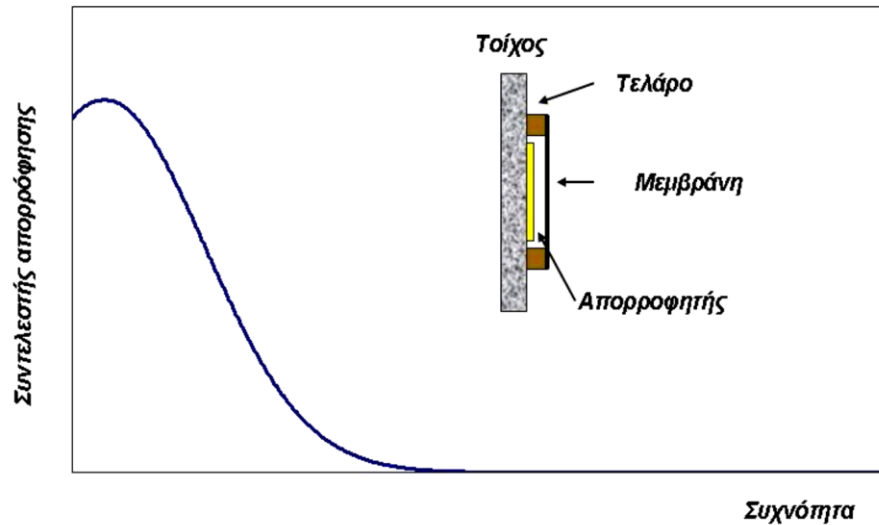
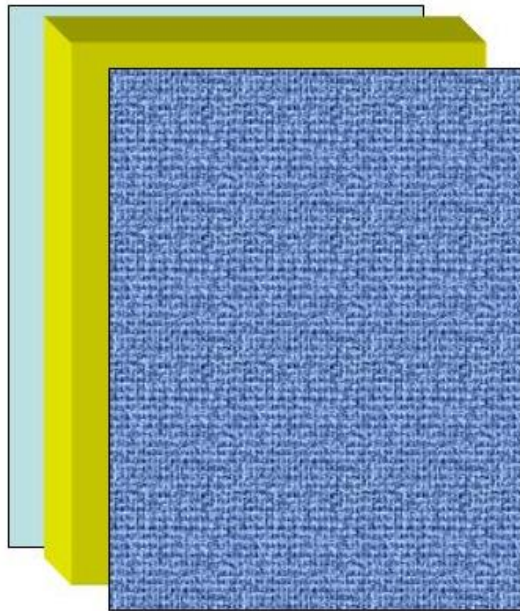
απορρόφηση ήχου



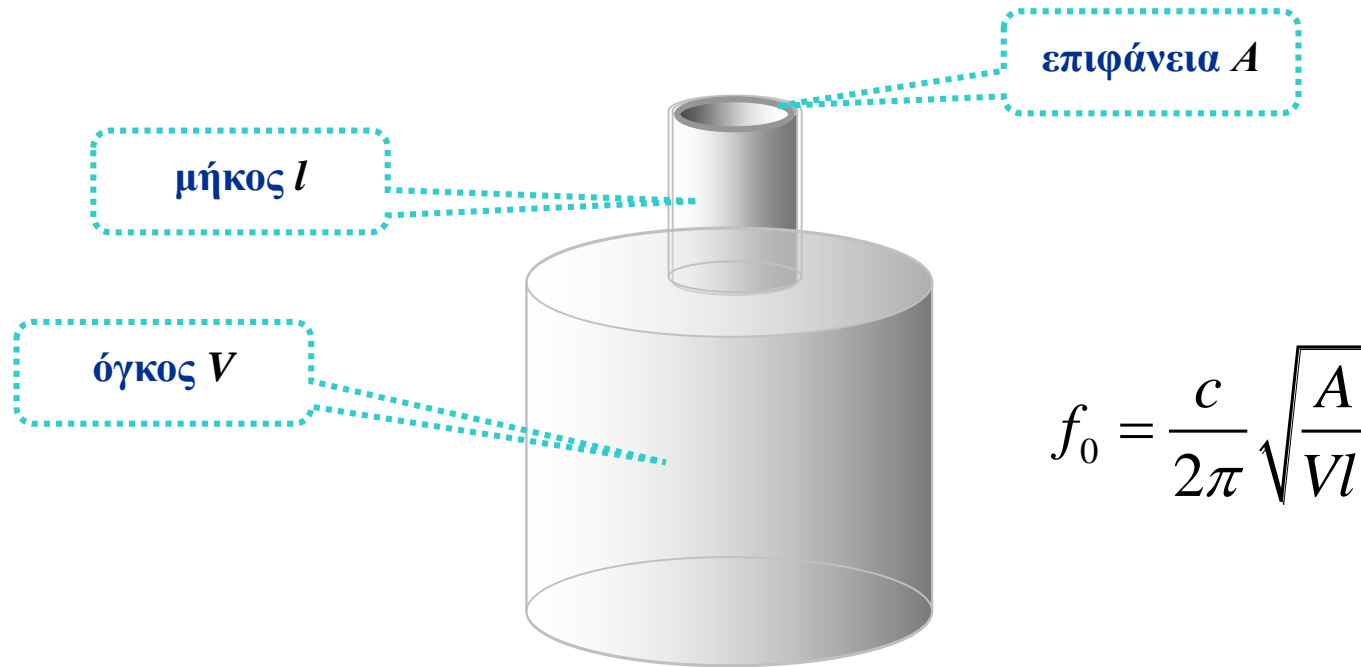
απορρόφηση ήχου



απορρόφηση ήχου

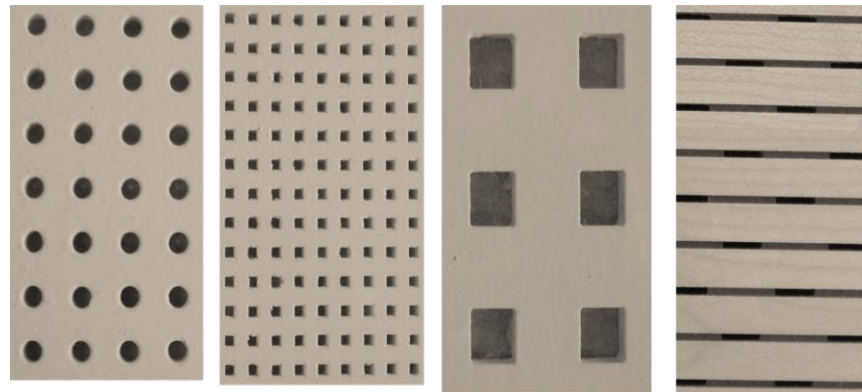
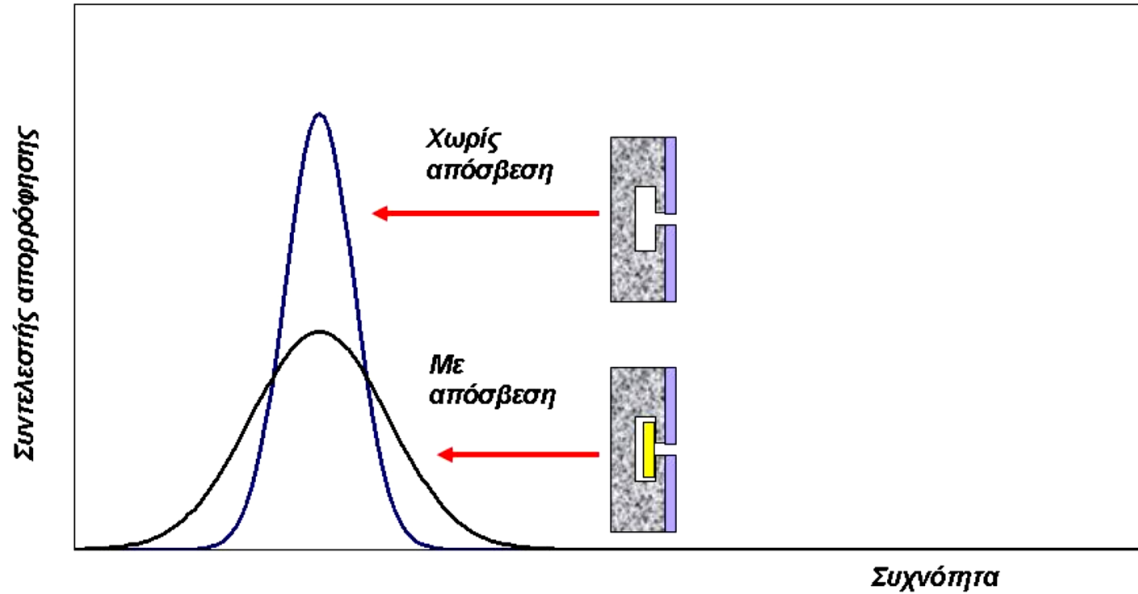


συντονιστής Helmholtz

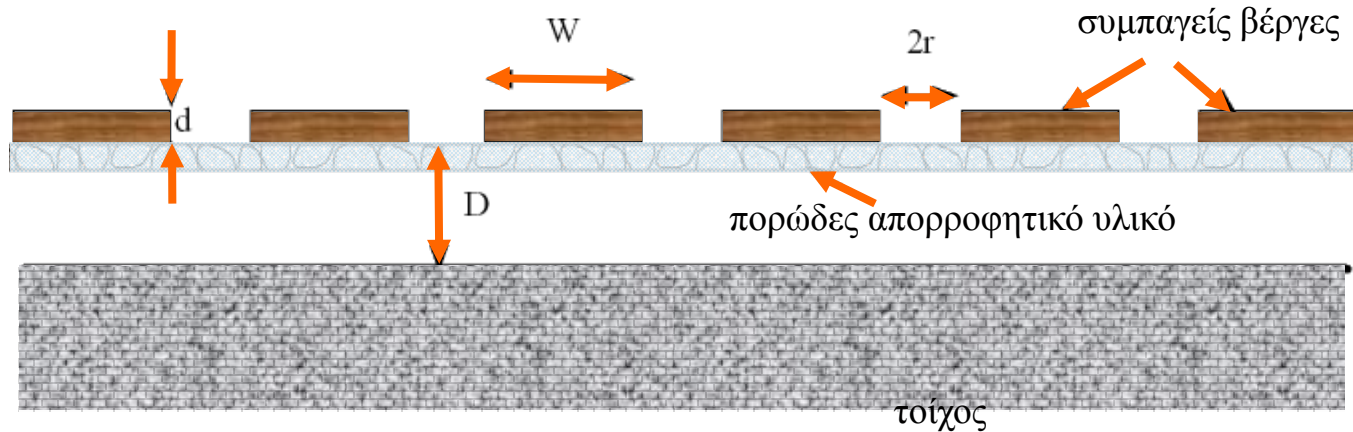


- ο κύριος όγκος V του αέρα λειτουργεί σαν ελατήριο
- ο αέρας στο λαιμό λειτουργεί σαν μάζα

συντονιστής Helmholtz διάτρητες πλάκες



απορροφητής παράλληλων διατρήσεων



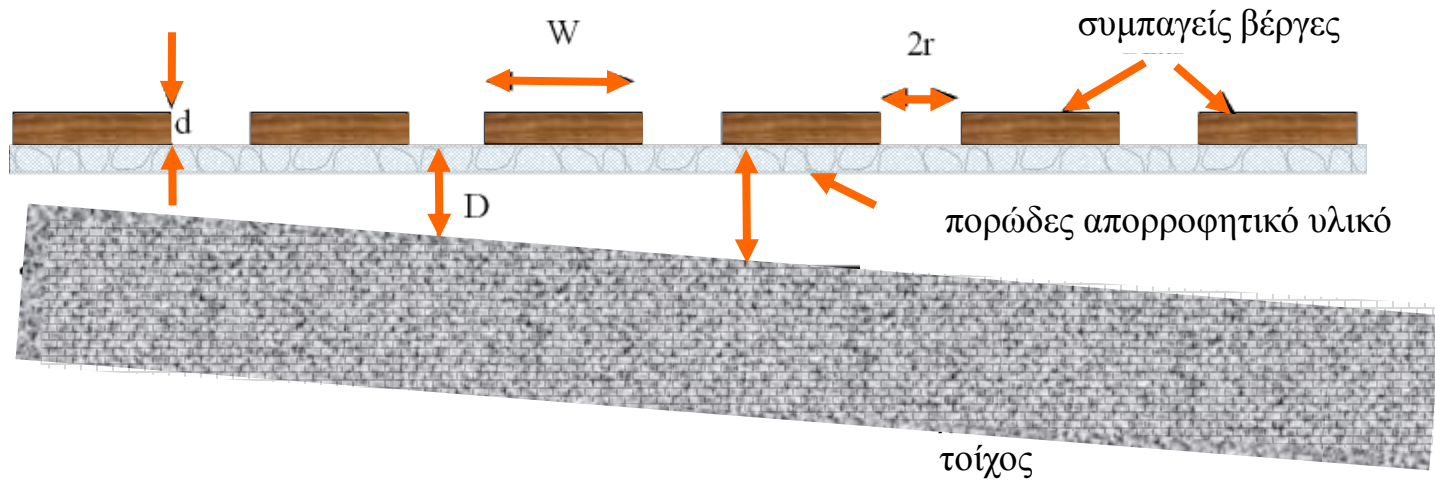
Λειτουργεί σαν συντονιστής Helmholtz

εκτεθειμένη επιφάνεια απορρόφησης e : $e = \frac{A_{open}}{A_{tot}} = \frac{2r}{w + 2r}$
 και αφού $V = A_{tot} D$ και $\frac{A_{open}}{V} = \frac{e}{D}$

ο τύπος του Helmholtz δίνει:

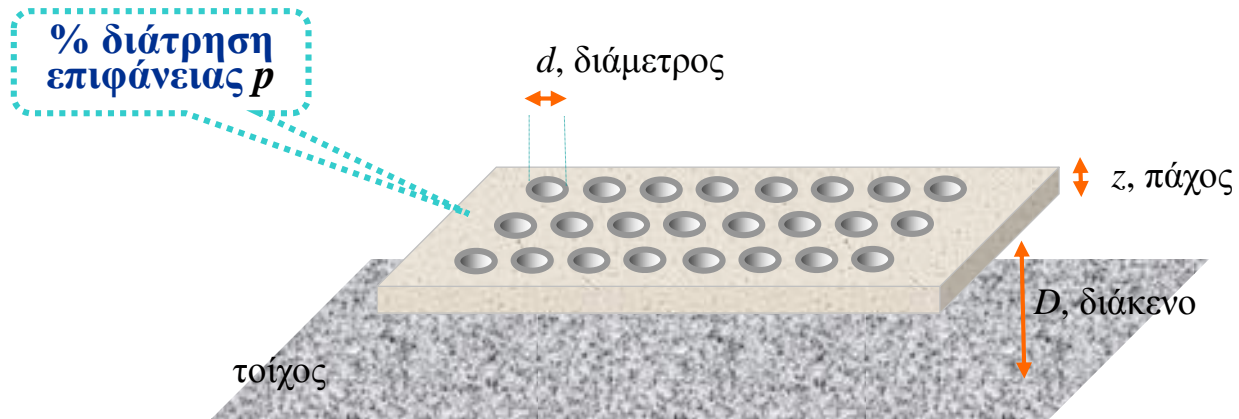
$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_{open}}{Vd}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{e}{dD}} \quad f_0 = 54.8 \sqrt{\frac{2r}{dD(w + 2r)}}$$

απορροφητής παράλληλων διατρήσεων



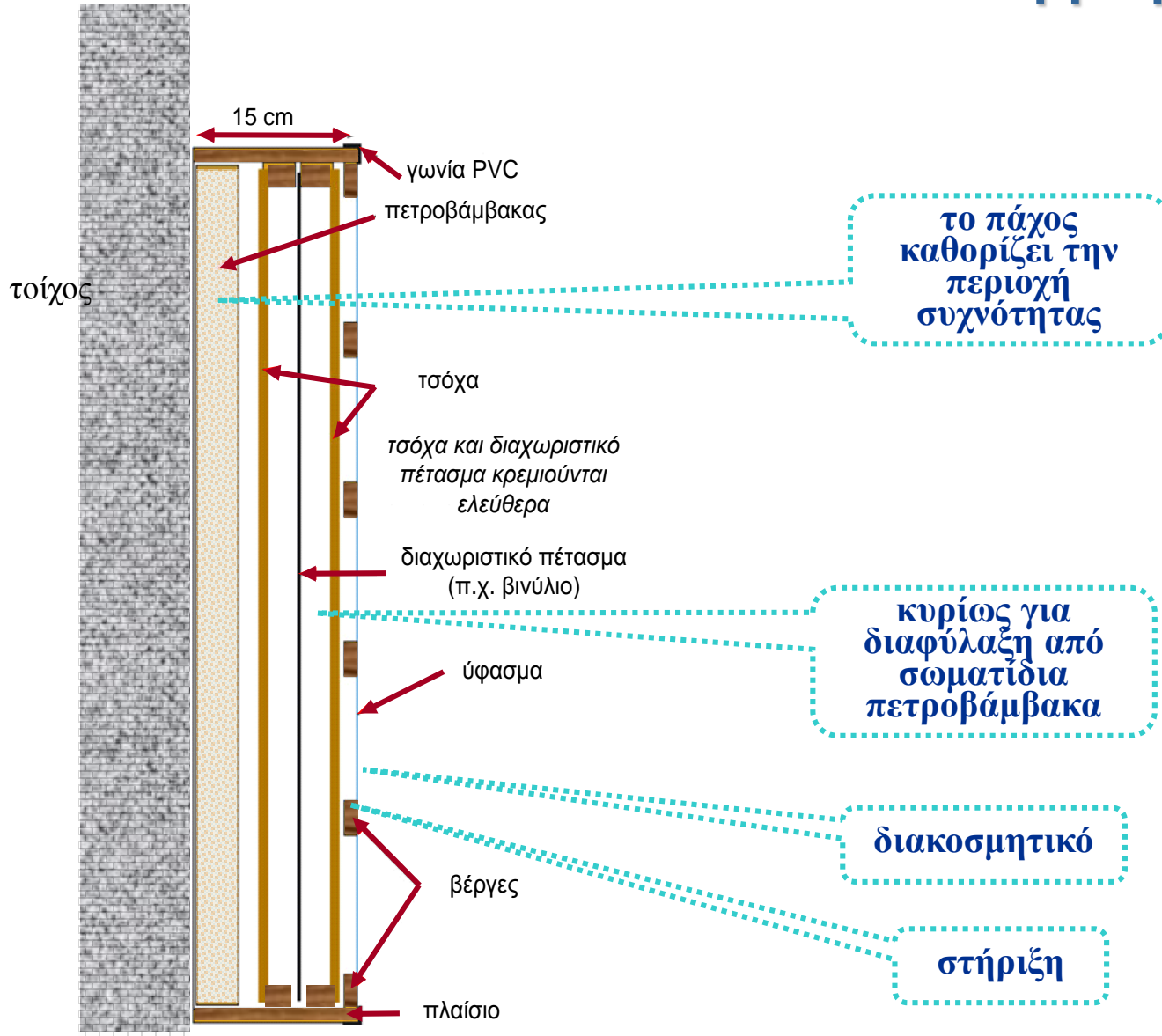
- ελέγχει αντήχηση σε χαμηλές – μεσαίες και στάσιμα
- δεν επιδρά σε ψηλές συχνότητες
- ρύθμιση της τοποθέτησης του πορώδους για έλεγχο της συχνότητας απορρόφησης

απορροφητής διάτρητης επιφάνειας

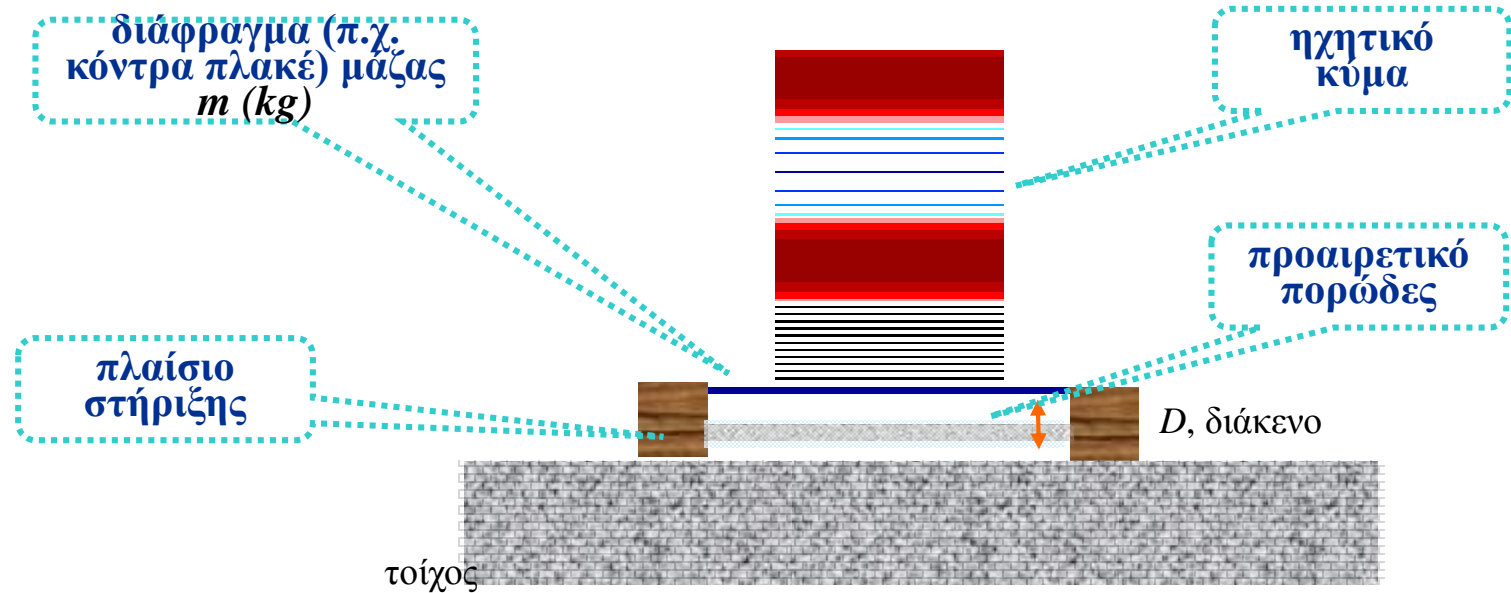


$$f_0 = 5.4 \sqrt{\frac{p}{D(z + 0,8d)}}$$

απορρόφηση ήχου

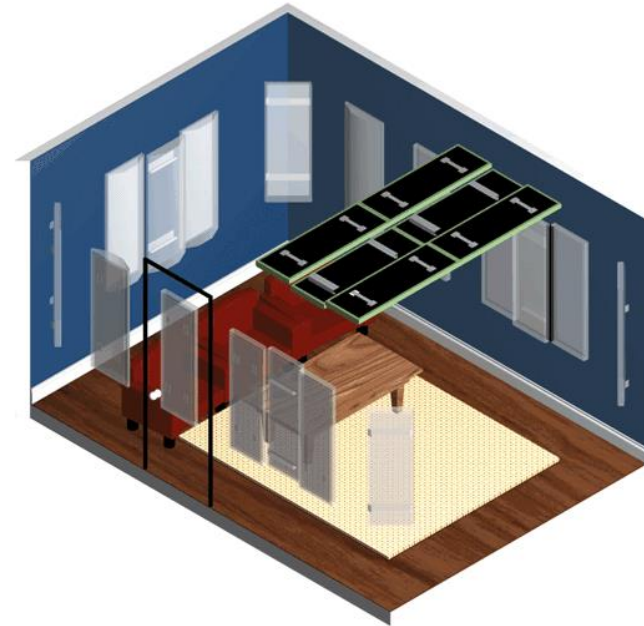
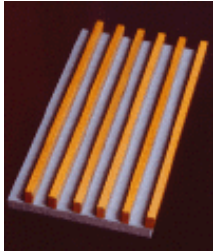
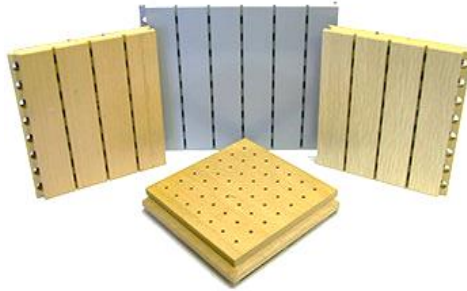


απορροφητής διαφραγματικού συντονισμού



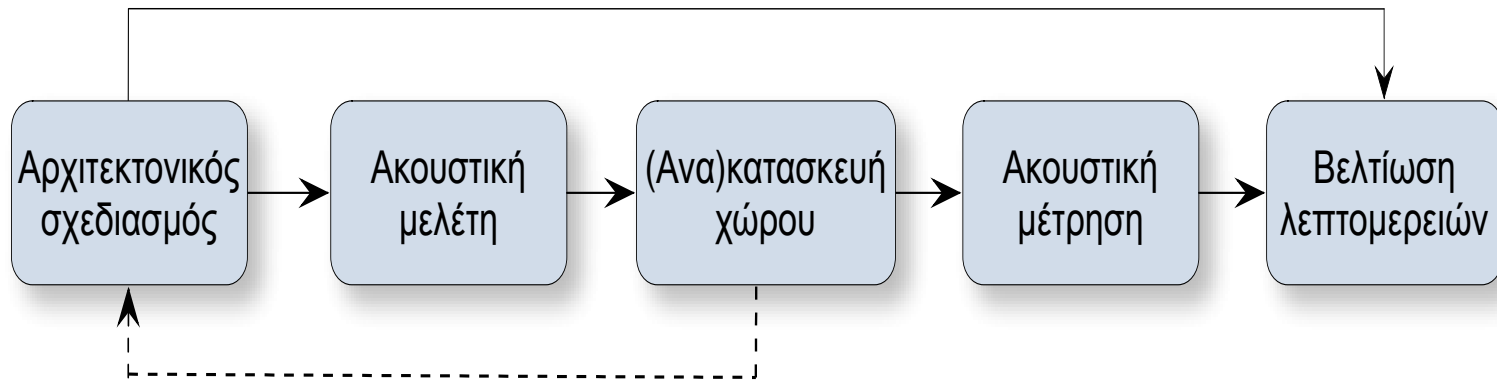
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{mD}}$$

απορρόφηση και διάχυση του ήχου



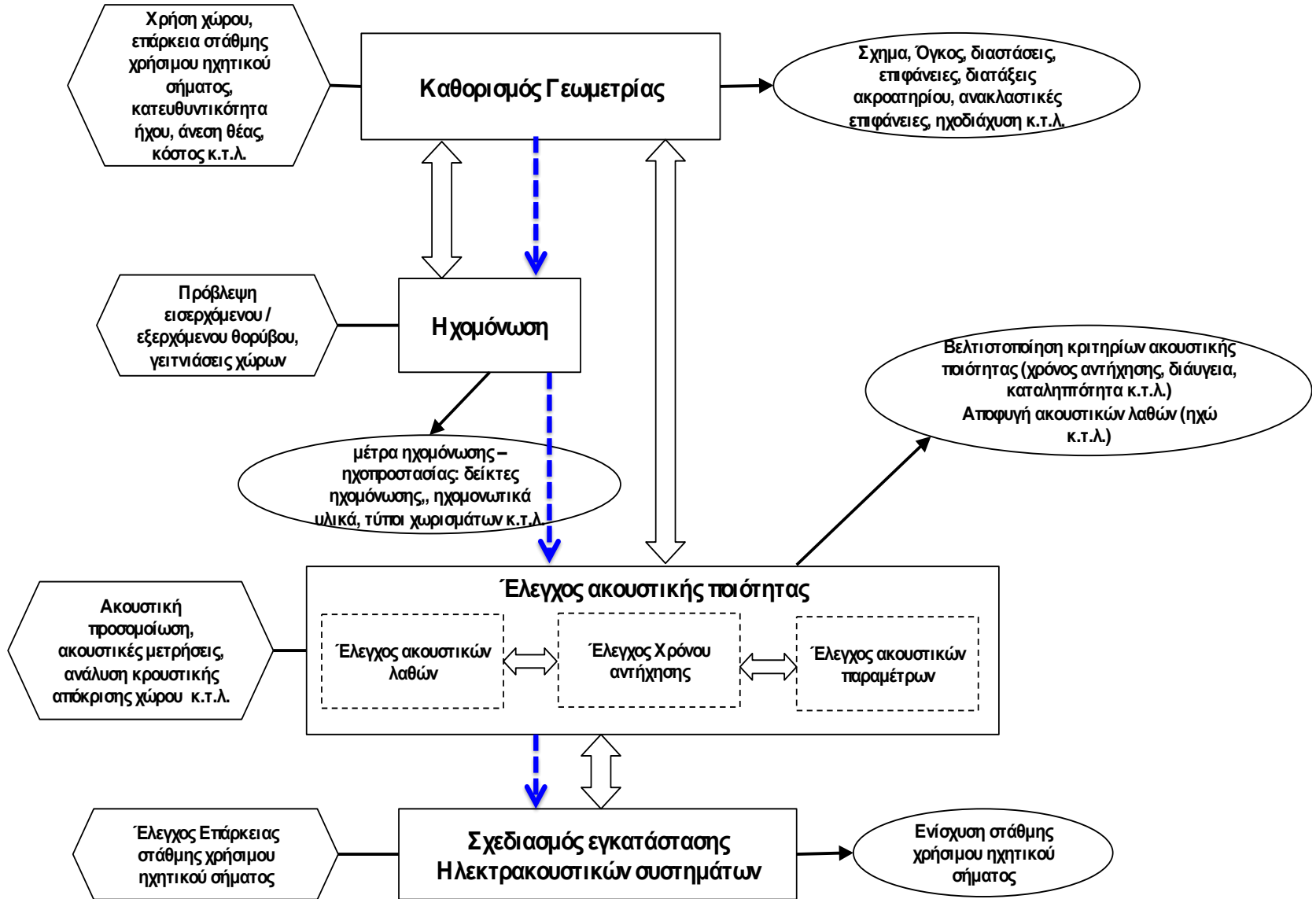
8. ακουστικός σχεδιασμός

διαδικασία ακουστικού σχεδιασμού



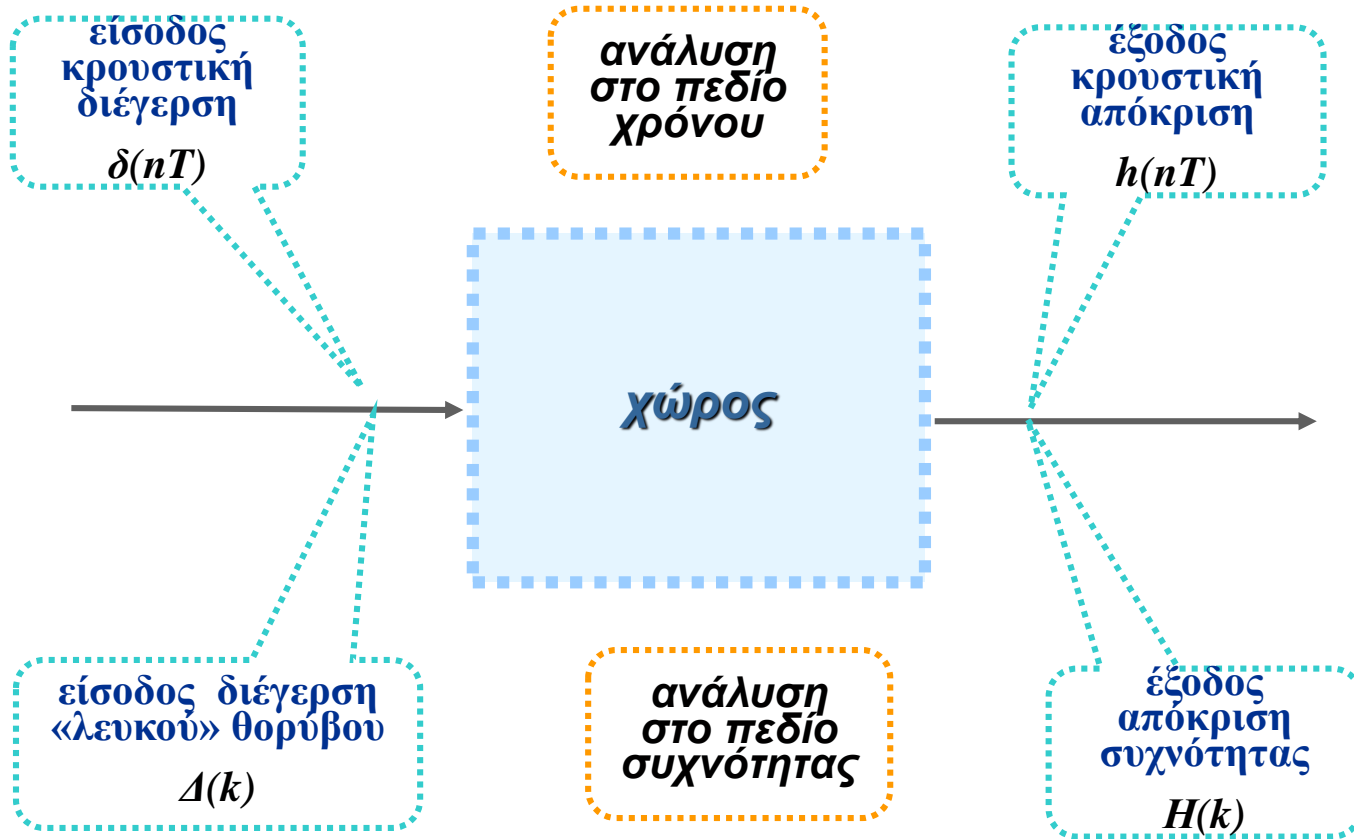
Είδος χώρου ακρόασης	Όγκος / άτομο
Συναυλιακοί χώροι (Concert Halls)	6 – 9 m ³ / άτομο
Χώροι για ομιλία	3 – 5 m ³ / άτομο
Χώροι πολλαπλής Χρήσης	5 - 7 m ³ / άτομο
Κινηματογράφοι - θέατρα (με θεωρεία)	3 m ³ / άτομο
Κινηματογράφοι - θέατρα (χωρίς θεωρεία)	4 m ³ / άτομο

διαδικασία ακουστικού σχεδιασμού

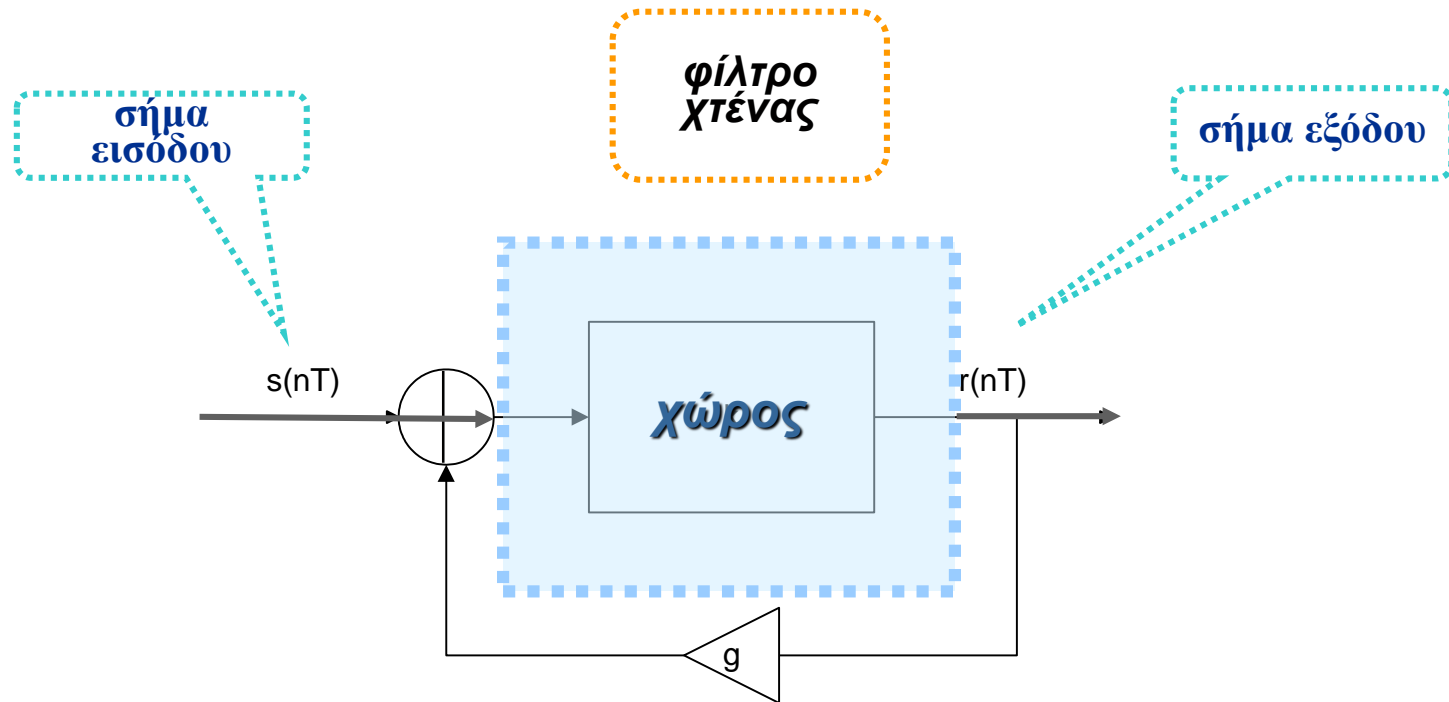


9. συστήματα εξομοίωσης

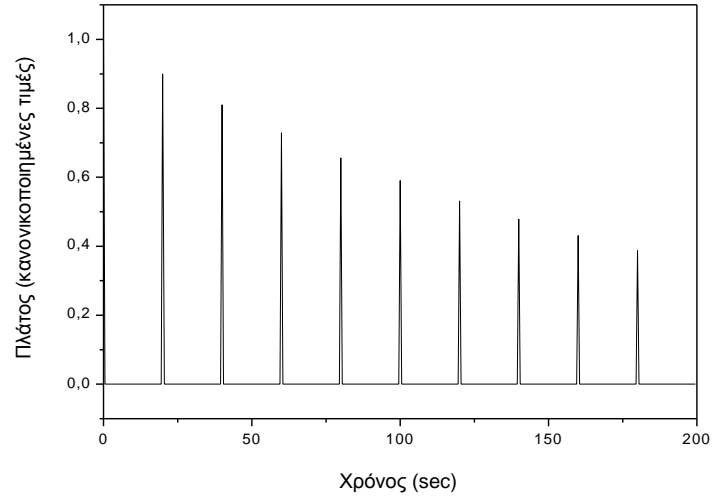
Βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)



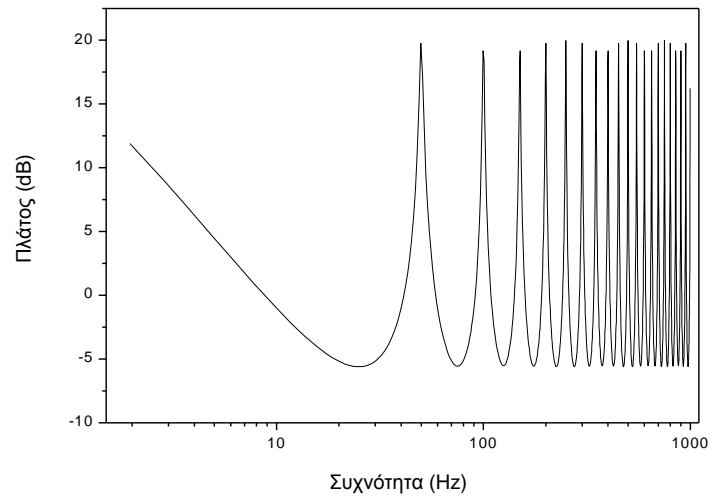
ψηφιακά φίλτρα εξομοίωσης



ψηφιακά φίλτρα εξομοίωσης

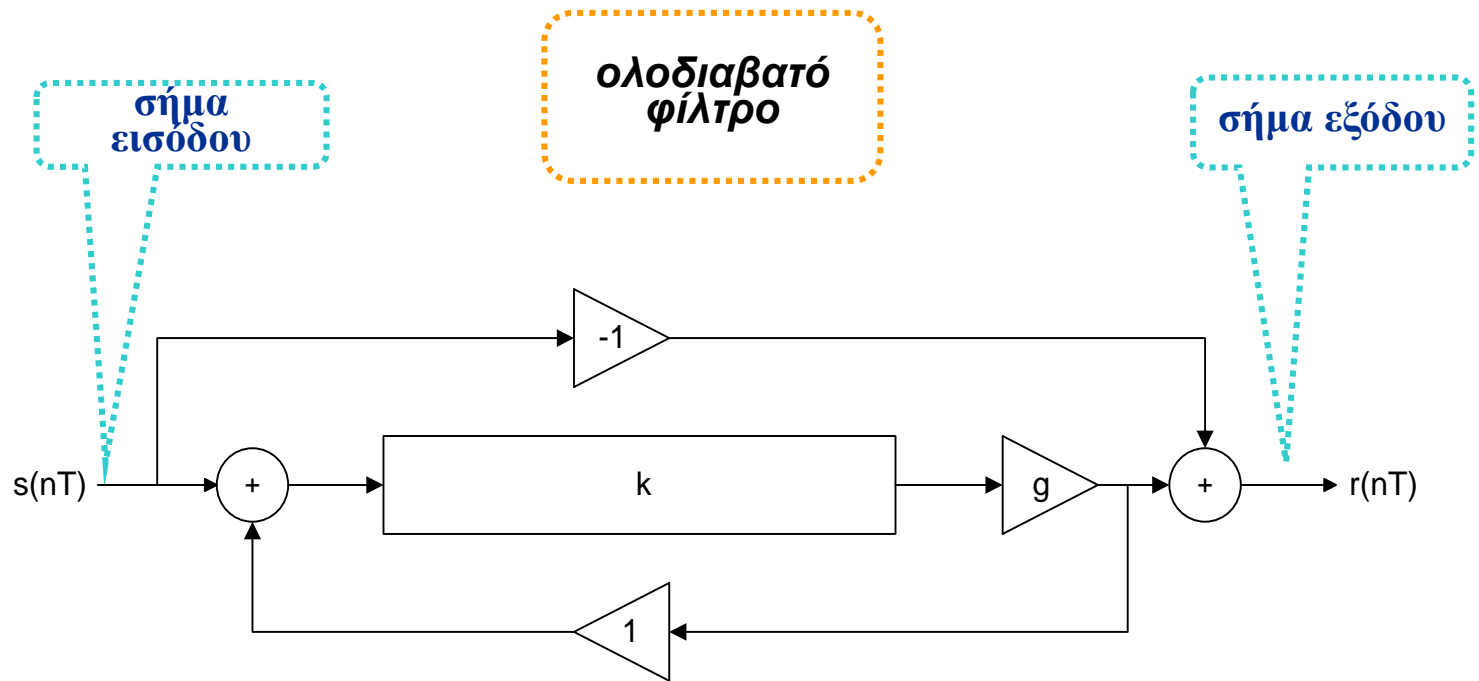


(α)

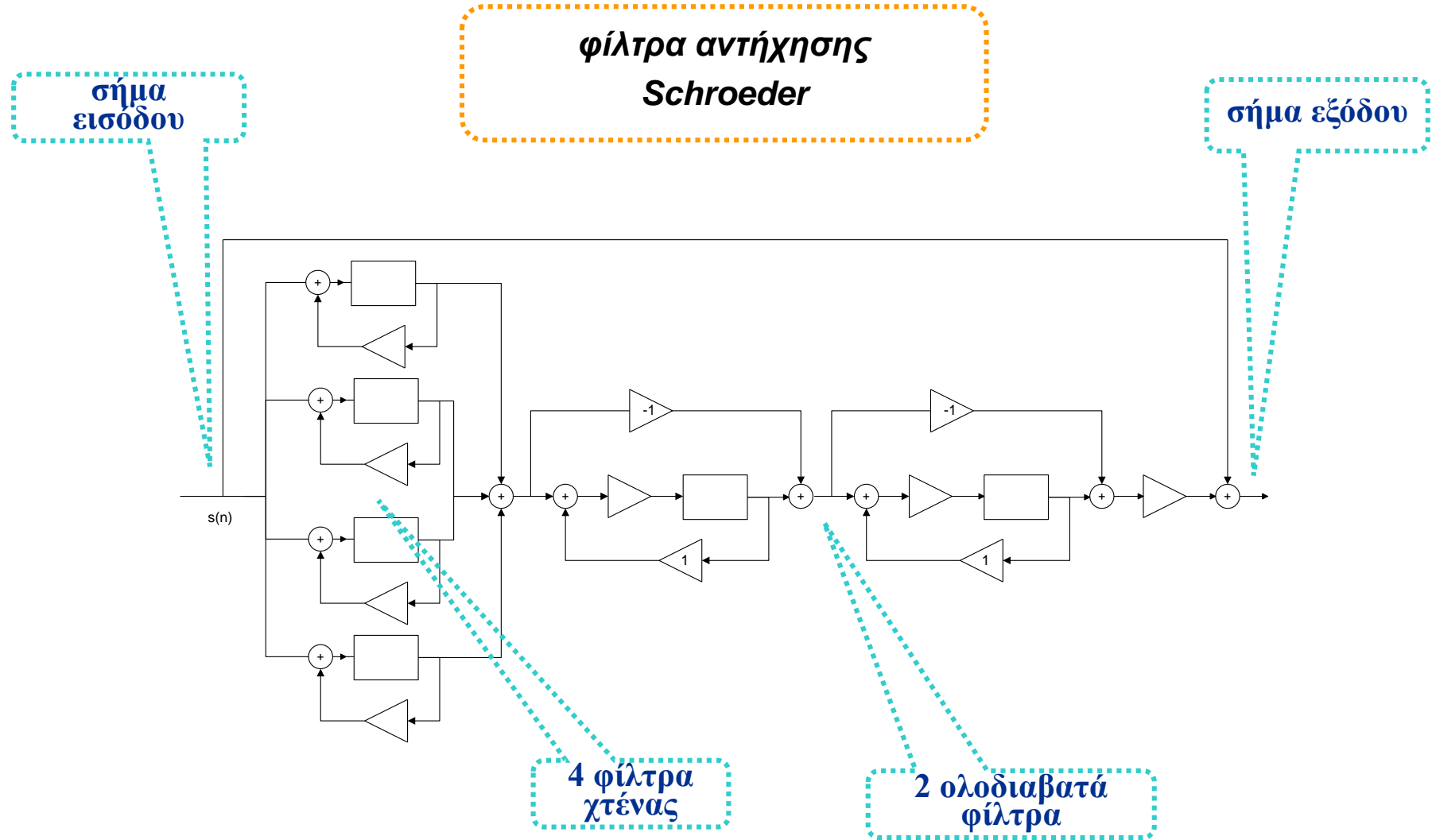


(β)

ψηφιακά φίλτρα εξομοίωσης



ψηφιακά φίλτρα εξομοίωσης



ιστορική επισκόπηση: προσομοιώσεις & σχεδιασμός

γεωμετρική ακουστική

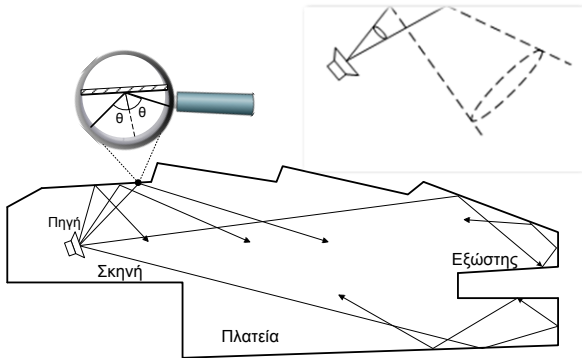
ακουστικά μοντέλα κλίμακας



ιστορική επισκόπηση: προσομοιώσεις & σχεδιασμός

ακουστικά μοντέλα λογισμικού

μέθοδος υπολογισμού
πορείας ακτίνων
(Ray Tracing method)

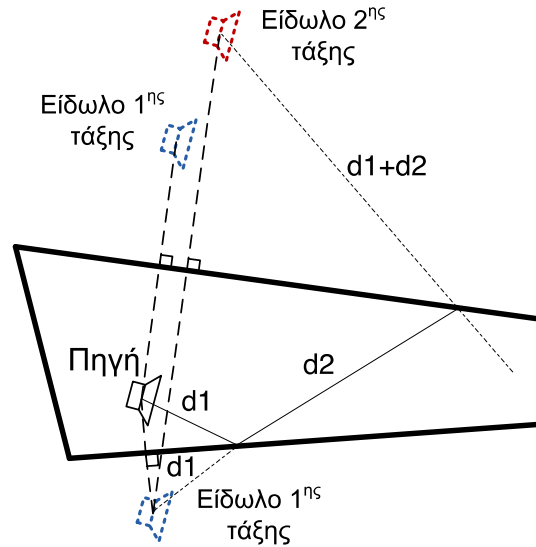


μέθοδος
ανίχνευσης κώνου
(cone tracing)

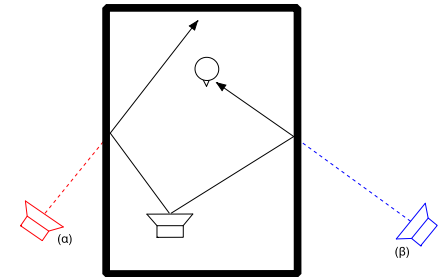
μέθοδος
ανίχνευσης
πυραμίδας

μέθοδος
ανίχνευσης
σωματιδίων

μέθοδος υπολογισμού
ακουστικών ειδώλων
(Image Source Method)



υβριδικές μέθοδοι
(Hybrid methods)

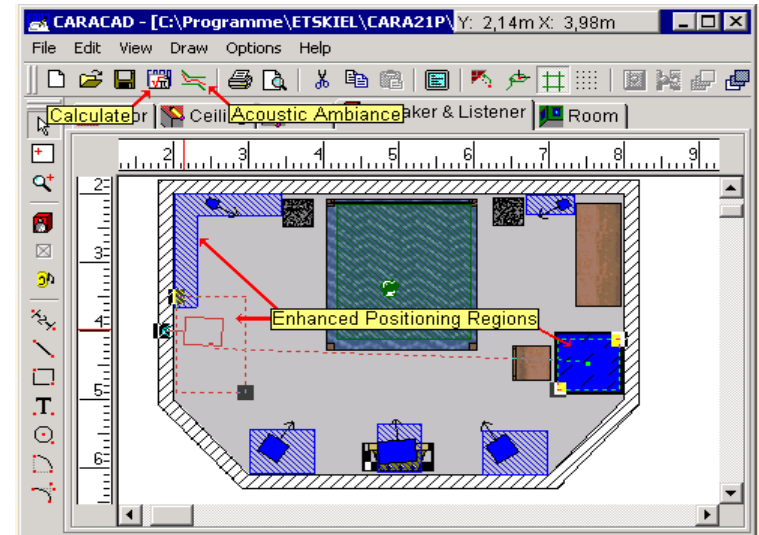
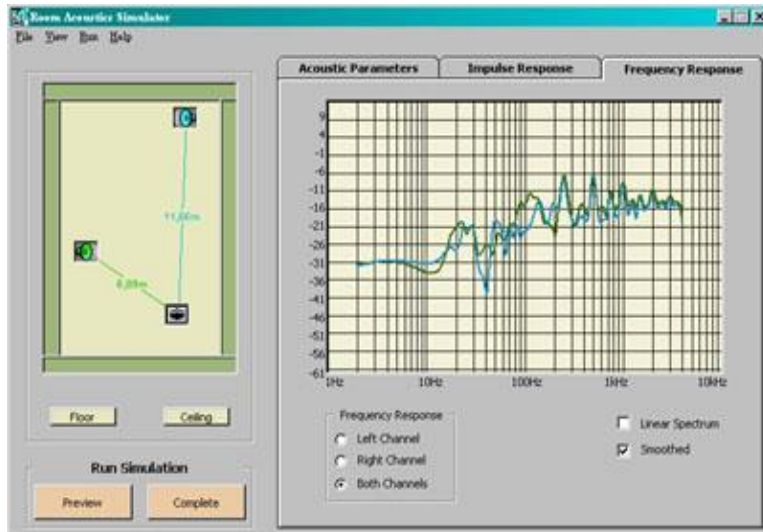


έλεγχος
ορατότητας
ειδώλου σε
υβριδική μέθοδο

λογισμικό για προσομοιώσεις & σχεδιασμό

ακουστικά μοντέλα λογισμικού

μέθοδος υπολογισμού
ακουστικών ειδώλων
(Image Source Method)



<http://www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/tools/roomsim.html>

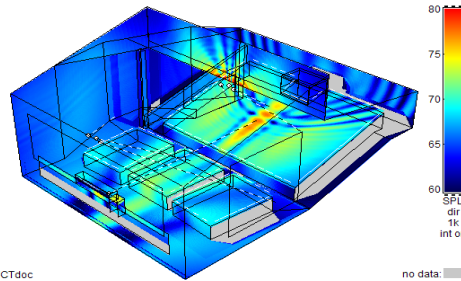
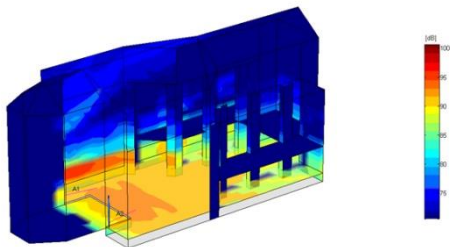
<http://www.rhintek.com/filebase/>

λογισμικό για προσομοιώσεις & σχεδιασμό

ακουστικά μοντέλα λογισμικού

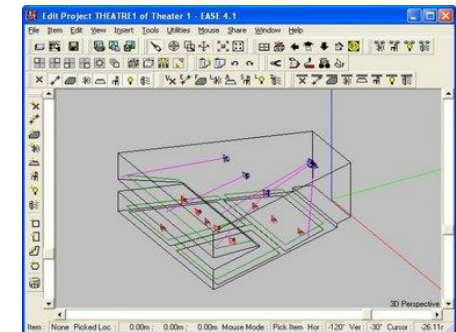
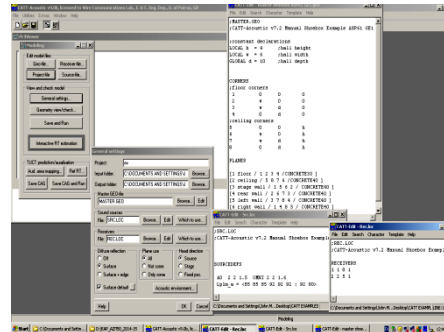
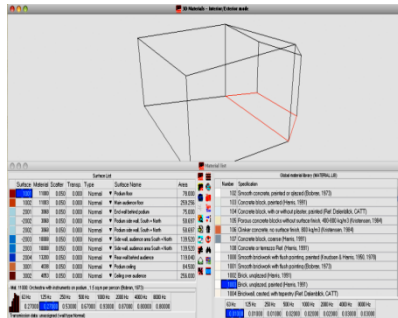
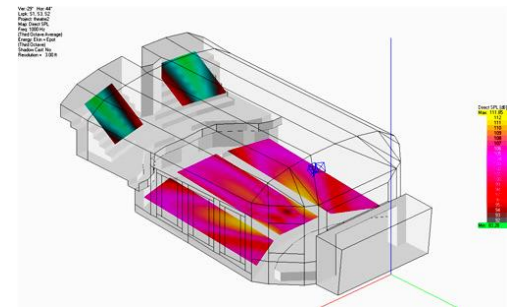


Group A: Direct SPL (1000 Hz, 10 stands)



TUCTdoc

no data:



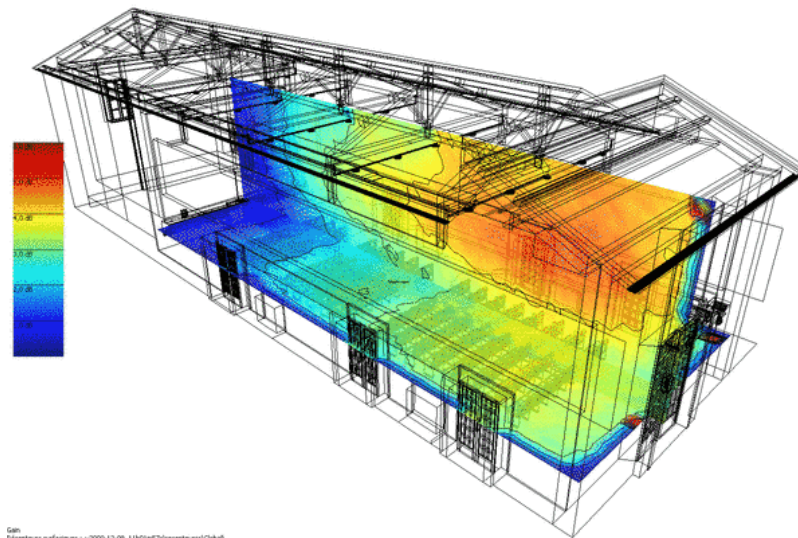
<http://www.odeon.de/>

<http://www.catt.se/>

<http://ease.afmg.eu/>

λογισμικό για προσομοιώσεις & σχεδιασμό

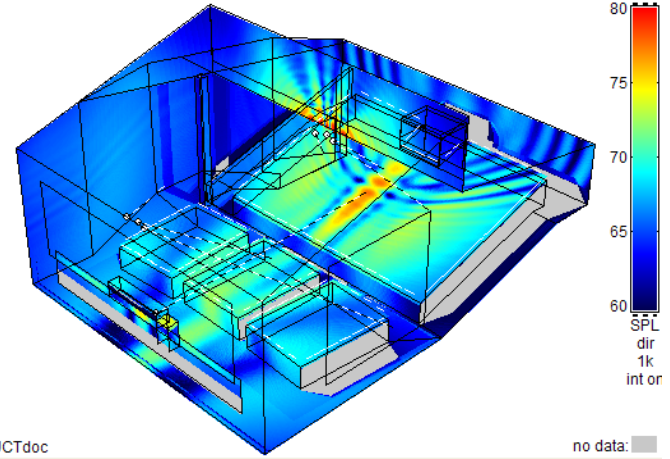
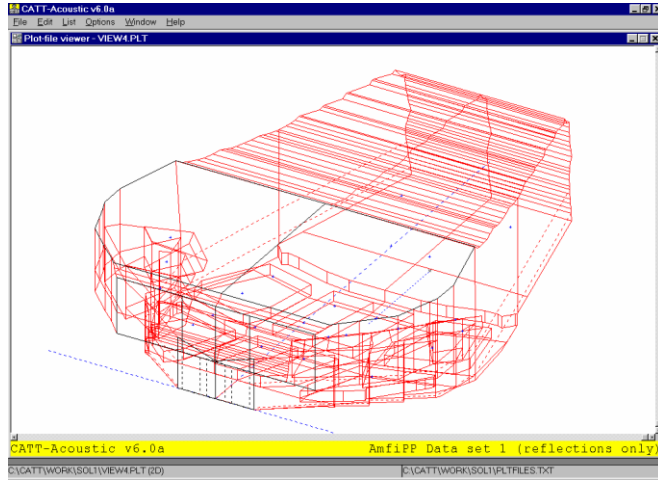
ακουστικά μοντέλα λογισμικού
(open source)



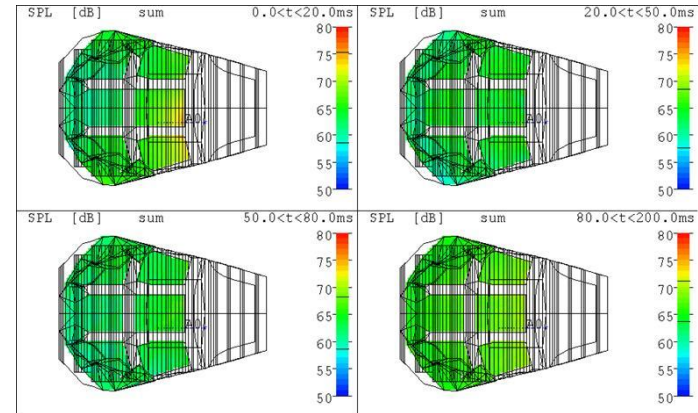
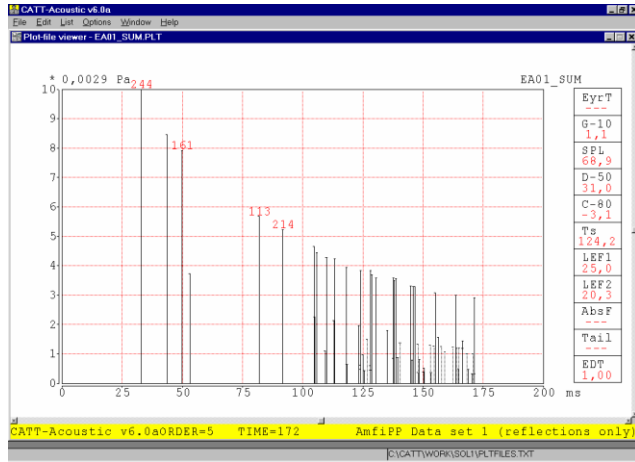
Gain
Fénelon sur les murs : ~2009-12-09_13:02:07 (7) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100) (101) (102) (103) (104) (105) (106) (107) (108) (109) (110) (111) (112) (113) (114) (115) (116) (117) (118) (119) (120) (121) (122) (123) (124) (125) (126) (127) (128) (129) (130) (131) (132) (133) (134) (135) (136) (137) (138) (139) (140) (141) (142) (143) (144) (145) (146) (147) (148) (149) (150) (151) (152) (153) (154) (155) (156) (157) (158) (159) (160) (161) (162) (163) (164) (165) (166) (167) (168) (169) (170) (171) (172) (173) (174) (175) (176) (177) (178) (179) (180) (181) (182) (183) (184) (185) (186) (187) (188) (189) (190) (191) (192) (193) (194) (195) (196) (197) (198) (199) (200) (201) (202) (203) (204) (205) (206) (207) (208) (209) (210) (211) (212) (213) (214) (215) (216) (217) (218) (219) (220) (221) (222) (223) (224) (225) (226) (227) (228) (229) (230) (231) (232) (233) (234) (235) (236) (237) (238) (239) (240) (241) (242) (243) (244) (245) (246) (247) (248) (249) (250) (251) (252) (253) (254) (255) (256) (257) (258) (259) (260) (261) (262) (263) (264) (265) (266) (267) (268) (269) (270) (271) (272) (273) (274) (275) (276) (277) (278) (279) (280) (281) (282) (283) (284) (285) (286) (287) (288) (289) (290) (291) (292) (293) (294) (295) (296) (297) (298) (299) (300) (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309) (310) (311) (312) (313) (314) (315) (316) (317) (318) (319) (320) (321) (322) (323) (324) (325) (326) (327) (328) (329) (330) (331) (332) (333) (334) (335) (336) (337) (338) (339) (340) (341) (342) (343) (344) (345) (346) (347) (348) (349) (350) (351) (352) (353) (354) (355) (356) (357) (358) (359) (360) (361) (362) (363) (364) (365) (366) (367) (368) (369) (370) (371) (372) (373) (374) (375) (376) (377) (378) (379) (380) (381) (382) (383) (384) (385) (386) (387) (388) (389) (390) (391) (392) (393) (394) (395) (396) (397) (398) (399) (400) (401) (402) (403) (404) (405) (406) (407) (408) (409) (410) (411) (412) (413) (414) (415) (416) (417) (418) (419) (420) (421) (422) (423) (424) (425) (426) (427) (428) (429) (430) (431) (432) (433) (434) (435) (436) (437) (438) (439) (440) (441) (442) (443) (444) (445) (446) (447) (448) (449) (450) (451) (452) (453) (454) (455) (456) (457) (458) (459) (460) (461) (462) (463) (464) (465) (466) (467) (468) (469) (470) (471) (472) (473) (474) (475) (476) (477) (478) (479) (480) (481) (482) (483) (484) (485) (486) (487) (488) (489) (490) (491) (492) (493) (494) (495) (496) (497) (498) (499) (500) (501) (502) (503) (504) (505) (506) (507) (508) (509) (510) (511) (512) (513) (514) (515) (516) (517) (518) (519) (520) (521) (522) (523) (524) (525) (526) (527) (528) (529) (530) (531) (532) (533) (534) (535) (536) (537) (538) (539) (540) (541) (542) (543) (544) (545) (546) (547) (548) (549) (550) (551) (552) (553) (554) (555) (556) (557) (558) (559) (560) (561) (562) (563) (564) (565) (566) (567) (568) (569) (570) (571) (572) (573) (574) (575) (576) (577) (578) (579) (580) (581) (582) (583) (584) (585) (586) (587) (588) (589) (590) (591) (592) (593) (594) (595) (596) (597) (598) (599) (600) (601) (602) (603) (604) (605) (606) (607) (608) (609) (610) (611) (612) (613) (614) (615) (616) (617) (618) (619) (620) (621) (622) (623) (624) (625) (626) (627) (628) (629) (630) (631) (632) (633) (634) (635) (636) (637) (638) (639) (640) (641) (642) (643) (644) (645) (646) (647) (648) (649) (650) (651) (652) (653) (654) (655) (656) (657) (658) (659) (660) (661) (662) (663) (664) (665) (666) (667) (668) (669) (670) (671) (672) (673) (674) (675) (676) (677) (678) (679) (680) (681) (682) (683) (684) (685) (686) (687) (688) (689) (690) (691) (692) (693) (694) (695) (696) (697) (698) (699) (700) (701) (702) (703) (704) (705) (706) (707) (708) (709) (710) (711) (712) (713) (714) (715) (716) (717) (718) (719) (720) (721) (722) (723) (724) (725) (726) (727) (728) (729) (730) (731) (732) (733) (734) (735) (736) (737) (738) (739) (740) (741) (742) (743) (744) (745) (746) (747) (748) (749) (750) (751) (752) (753) (754) (755) (756) (757) (758) (759) (760) (761) (762) (763) (764) (765) (766) (767) (768) (769) (770) (771) (772) (773) (774) (775) (776) (777) (778) (779) (780) (781) (782) (783) (784) (785) (786) (787) (788) (789) (790) (791) (792) (793) (794) (795) (796) (797) (798) (799) (800) (801) (802) (803) (804) (805) (806) (807) (808) (809) (810) (811) (812) (813) (814) (815) (816) (817) (818) (819) (820) (821) (822) (823) (824) (825) (826) (827) (828) (829) (830) (831) (832) (833) (834) (835) (836) (837) (838) (839) (840) (841) (842) (843) (844) (845) (846) (847) (848) (849) (850) (851) (852) (853) (854) (855) (856) (857) (858) (859) (860) (861) (862) (863) (864) (865) (866) (867) (868) (869) (870) (871) (872) (873) (874) (875) (876) (877) (878) (879) (880) (881) (882) (883) (884) (885) (886) (887) (888) (889) (890) (891) (892) (893) (894) (895) (896) (897) (898) (899) (900) (901) (902) (903) (904) (905) (906) (907) (908) (909) (910) (911) (912) (913) (914) (915) (916) (917) (918) (919) (920) (921) (922) (923) (924) (925) (926) (927) (928) (929) (930) (931) (932) (933) (934) (935) (936) (937) (938) (939) (940) (941) (942) (943) (944) (945) (946) (947) (948) (949) (950) (951) (952) (953) (954) (955) (956) (957) (958) (959) (960) (961) (962) (963) (964) (965) (966) (967) (968) (969) (970) (971) (972) (973) (974) (975) (976) (977) (978) (979) (980) (981) (982) (983) (984) (985) (986) (987) (988) (989) (990) (991) (992) (993) (994) (995) (996) (997) (998) (999) (1000)

<http://i-simpa.ifsttar.fr>

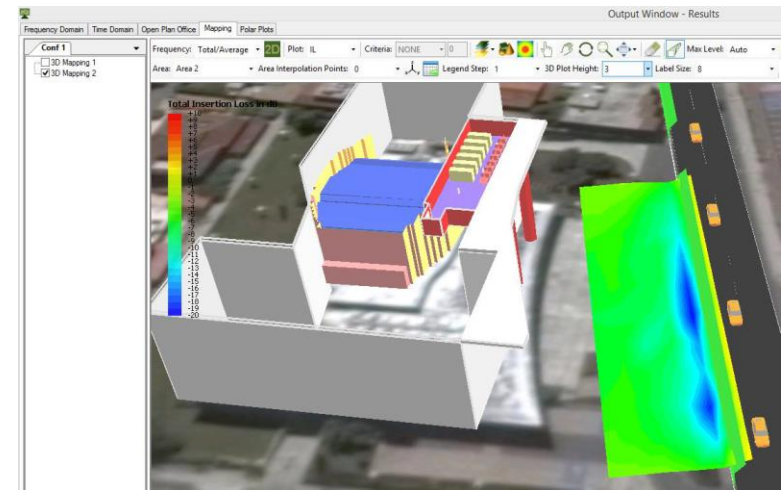
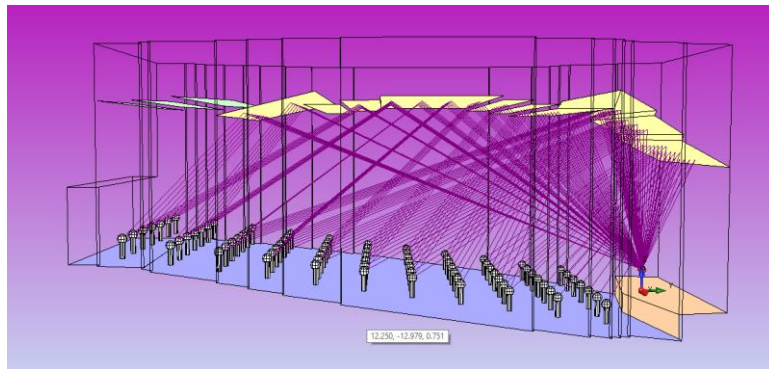
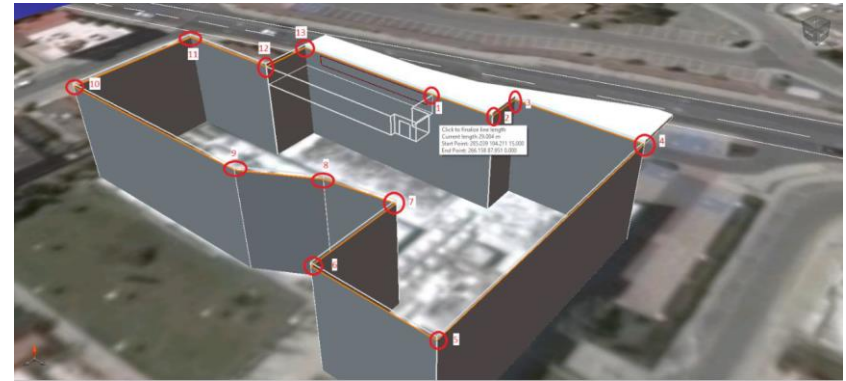
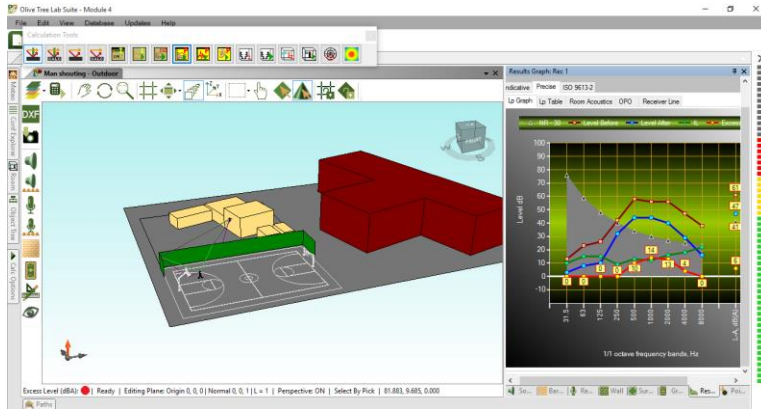
Λογισμικό CATT-Acoustic



TUCTdoc



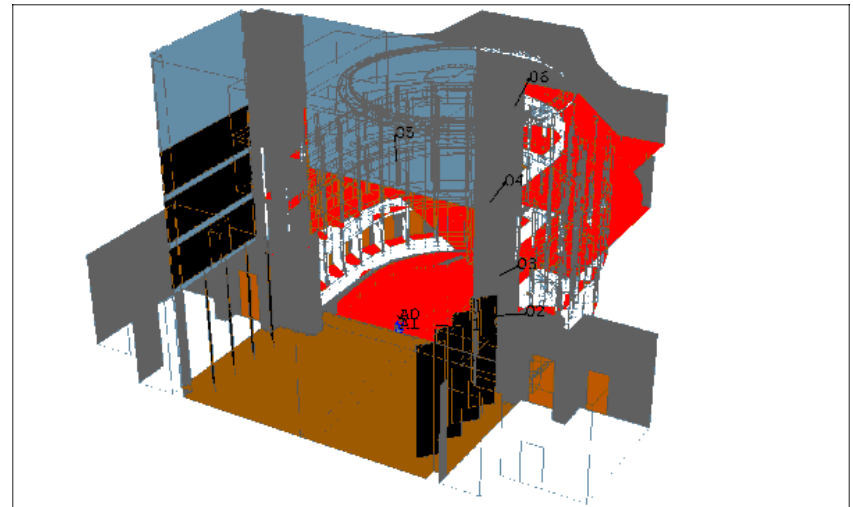
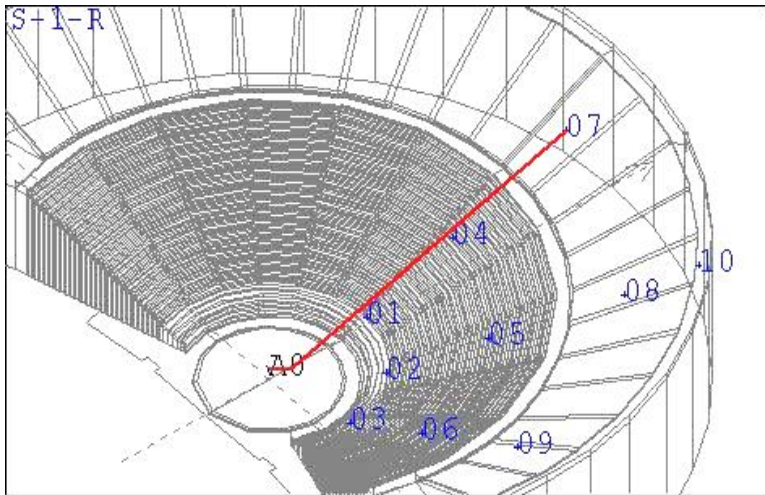
Λογισμικό Olive Tree Lab



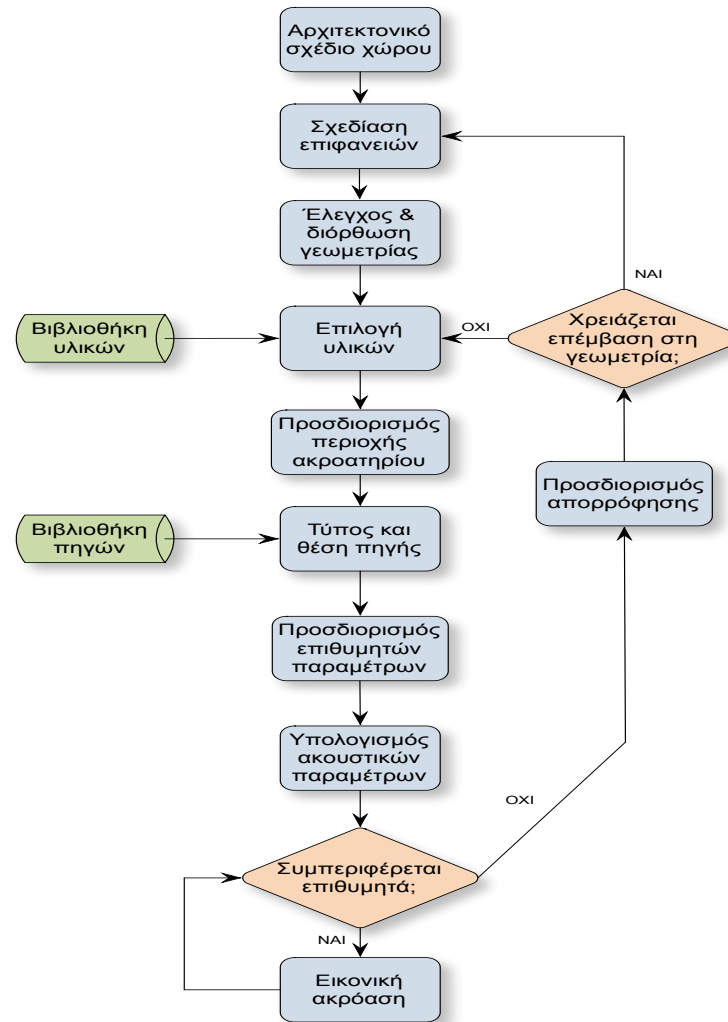
εξομοίωση για σύνθετους χώρους

αρχαίο
θέατρο
Επιδαύρου

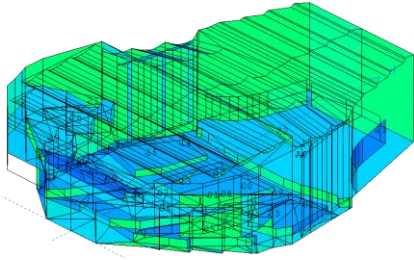
θέατρο
Απόλλων



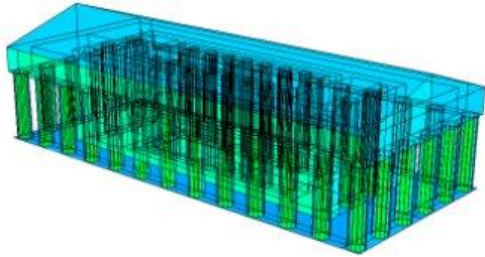
ακουστικές προσομοιώσεις κλειστών χώρων



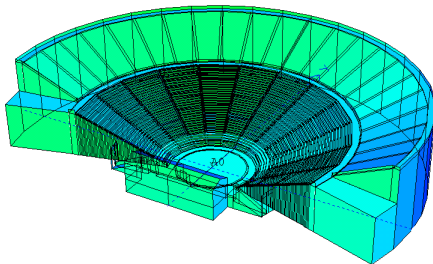
ακουστικές προσομοιώσεις κλειστών χώρων



αίθουσα συναυλιών / συνεδρίων (ΣΠΚ, Παν/μιο Πατρών)

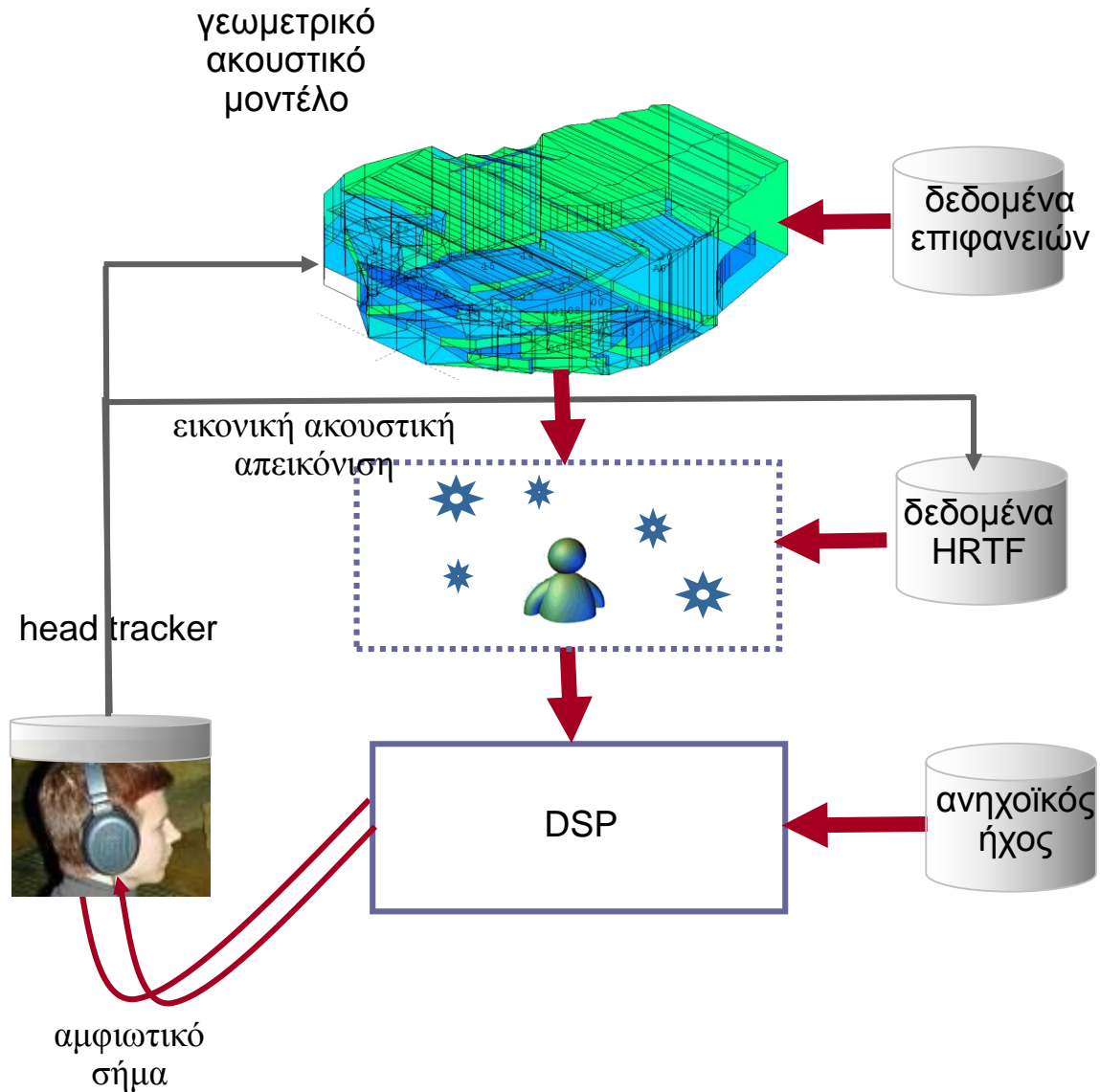


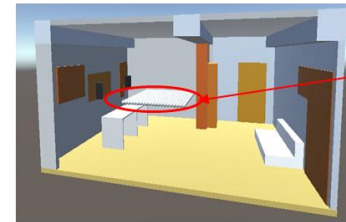
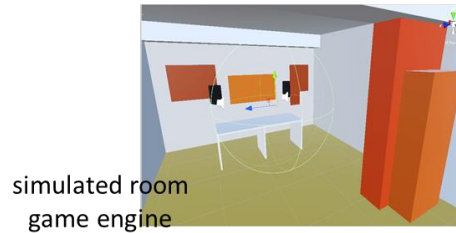
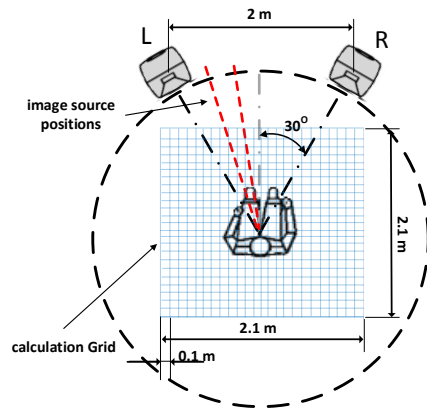
αρχαίος ελληνικός ναός (Ναός του Διός, Ολυμπία)



αρχαίο ελληνικό θέατρο (Θέατρο Επιδαύρου)

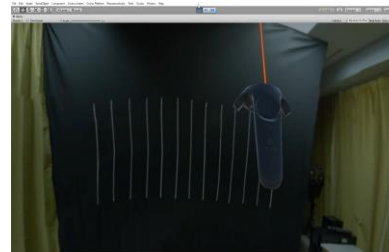
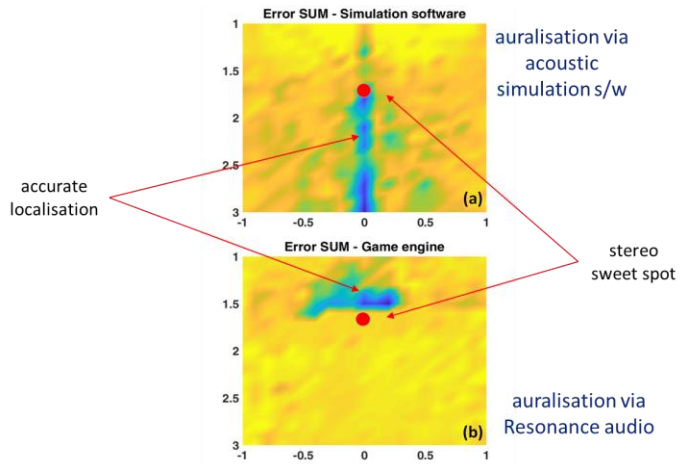
ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ





(Unity – Google Resonance Audio)

simulated room
acoustic s/w
(CATT-Acoustic)



laser pointer for subject estimated source image direction



headphone rendering of stereo image sources via CATT or UNITY audio



ομάδα τεχνολογίας ήχου & ακουστικής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

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