

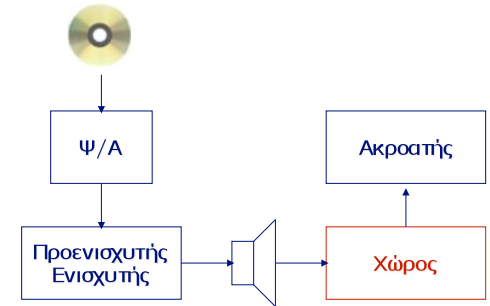
Ακουστική και Ψυχοακουστική

Διάλεξη 13: “Αρχές Ακουστικής Κλειστών Χώρων”

Φλώρος Ανδρέας
Επίκουρος Καθηγητής

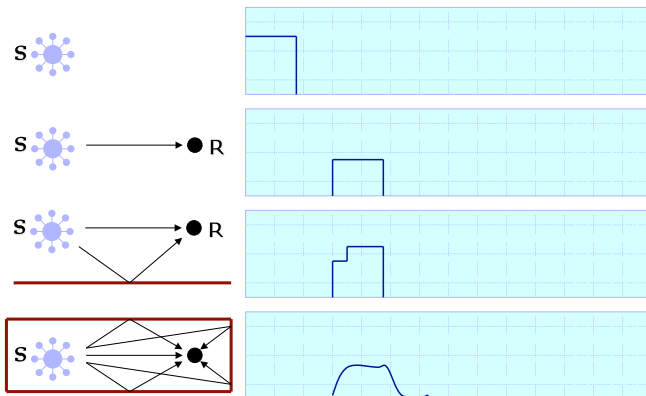
Αλυσίδα ηχητικής αναπαραγωγής

- Ο χώρος είναι σημαντικό κομμάτι της αλυσίδας ηχητικής αναπαραγωγής
- Room fidelity: η ποιότητα της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου

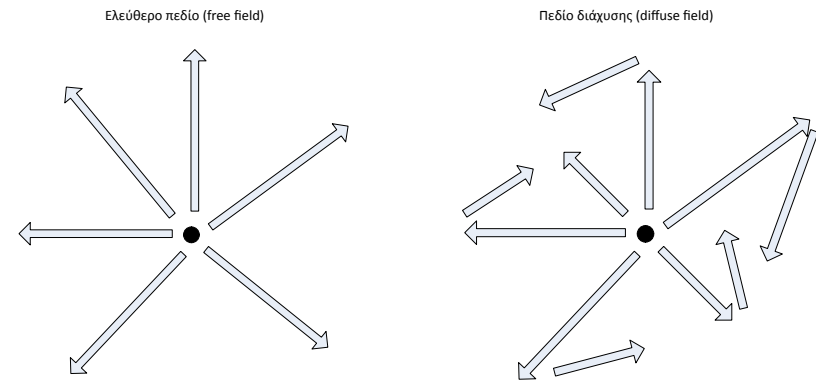


Από προηγούμενο μάθημα...

- Η ακουστική ιδιαιτερότητα των κλειστών χώρων



Από προηγούμενο μάθημα...



Βασικοί στόχοι ακουστικής χώρων

- Μοντελοποίηση της ακουστικής συμπεριφοράς χώρων
- Βελτιστοποίηση
 - Για χώρους που έχουν κατασκευαστεί (με παρεμβάσεις)
 - Για χώρους υπό κατασκευή
- Αναπαράσταση εικονικής πραγματικότητας
 - Χώρων που δεν υπάρχουν πλέον
 - Φανταστικών χώρων
- Βασικό εργαλείο μηχανικού ήχου
 - Τοποθέτηση ηλεκτροακουστικών συστημάτων

Σύντομο ιστορικό

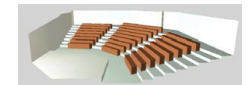
- Οι πρώτες γνώσεις διάδοσης του ήχου σε κλειστούς χώρους προέρχονται από την αρχαιότητα
 - Αρχαία θέατρα
 - Συναυλιακοί χώροι της δύσης
- Οι επιστημονικές βάσεις τέθηκαν από το 1900 έως το 1960
 - Η επιστήμη της φυσικής
- Στόχος η βέλτιστη ακουστικά σχεδίαση χώρων
 - Αναλυτική προσέγγιση
 - ▶ Χρήσιμη ειδικά για απλούς γεωμετρικά χώρους

Σύντομο ιστορικό (2)

- Σύγχρονες τεχνικές εκτίμησης και ανάλυσης ακουστικής συμπεριφοράς
 - Τεχνικές προσομοίωσης σε υπολογιστή
- Μελέτη απόδοσης ηλεκτροακουστικών εγκαταστάσεων
- Αμφυωτική ακουστική - DSP
- Η αφαίρεση των παραμορφώσεων που εισάγει ο χώρος παραμένει πρόβλημα άλυτο

Αναλυτικές μέθοδοι ακουστικής κλειστών χώρων

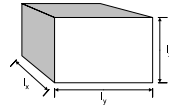
- Παραδοσιακή
 - Κυματική θεωρία
 - Επίλυση στο πεδίο της συχνότητας
 - Αδύνατη η εφαρμογή της σε σύνθετους γεωμετρικά χώρους
- Γεωμετρική θεωρία διάδοσης του ήχου
 - Επίλυση στο πεδίο του χρόνου
 - Κατάλληλη για υλοποίηση σε υπολογιστικά συστήματα
 - Μέθοδοι ανάλυσης και θεωρία σημάτων



Βασική κυματική θεωρία

- Ό ήχος ως κύμα
- Μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών (σε απόσταση l) δημιουργείται ένα στάσιμο κύμα για συχνότητες πηγής

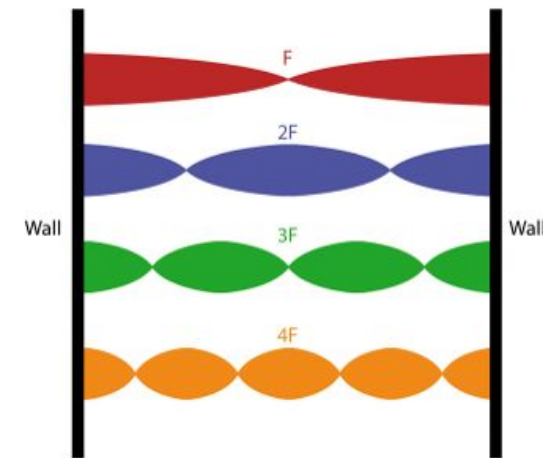
$$f_n = \frac{nc}{2l}$$



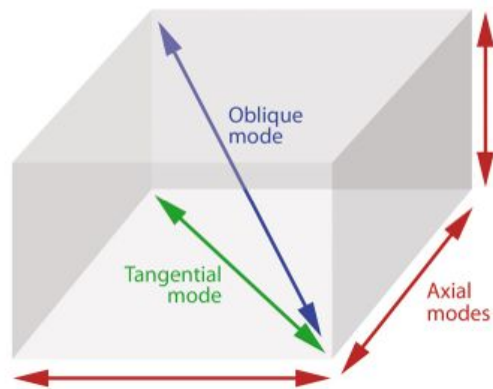
- Στο τρισδιάστατο πεδίο του χώρου έχουμε

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

Βασική κυματική θεωρία (2)

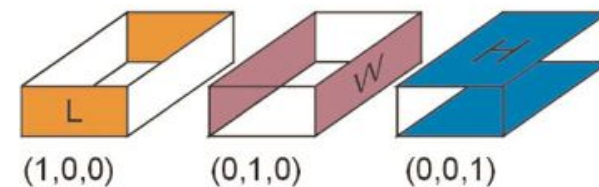


Βασική κυματική θεωρία (3)



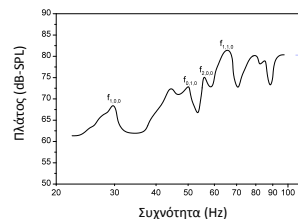
Βασική κυματική θεωρία (4)

- Παράδειγμα: Αξονικοί ρυθμοί (axial modes)



Βασική κυματική θεωρία (5)

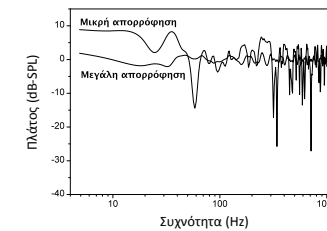
- Η απόκριση του χώρου σε σήμα διέγερσης ευρέως φάσματος
 - Π.χ. Λευκός θόρυβος
- Άθροισμα των αποκρίσεων για όλες τις τιμές των n
- Παράδειγμα: δωμάτιο διαστάσεων 2.5x3x7m



Απόκριση χωρίς απορρόφηση λόγω υλικών

Βασική κυματική θεωρία (6)

- Στην πράξη, η απόκριση εξαρτάται από
 - Τη θέση πηγής – δέκτη
 - Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης των υλικών του χώρου



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων

- Κατασκευή μοντέλων υπό κλίμακα
 - Χρονοβόρος και δαπανηρή διαδικασία
 - Περιορισμένες δυνατότητες επέμβασης στη γεωμετρία του μοντέλου
 - Σχεδόν απαγορευτική η αλλαγή των υλικών του
- Μοντέλα προσομοίωσης σε υπολογιστή
- Μοντέλα κυματικής θεωρίας
 - Μέθοδος πεπερασμένου στοιχείου - Finite Element Method (FEM)
 - Μέθοδος οριακού στοιχείου - Boundary Element Method (BEM)
- Μοντέλα γεωμετρικής θεωρίας
 - Μέθοδοι ανίχνευσης ακτίνας - Ray Tracing
 - Μέθοδοι ανίχνευσης κώνου/πυραμίδας
 - Μέθοδος των ειδώλων - Image model
- Υβριδικές μέθοδοι - Secondary Source Model
 - Στατιστικά μοντέλα
 - Μέθοδος στατιστικής ανάλυσης ενέργειας
 - ▶ Statistical Energy Analysis (SEA)

Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (2)

- Μοντέλα υπό κλίμακα



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (3)

- Μοντέλα υπό κλίμακα



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (4)



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (5)

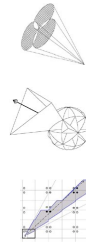


Μοντέλα κυματικής θεωρίας

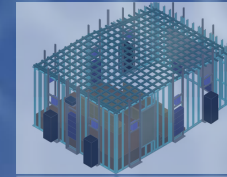
- Επίλυση κυματικής εξίσωσης
- Υπολογισμός της κρουστικής απόκρισης του χώρου
- Δεν υπάρχει πάντοτε αναλυτική λύση
 - Μόνο για απλούς χώρους (π.χ. Ορθογώνιους)
- Εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα
- Δύσκολος ορισμός οριακών συνθηκών
- Για υψηλές συχνότητες, το υπολογιστικό φορτίο είναι πολύ μεγάλο
- Στην πράξη, δεν χρησιμοποιούνται...

Μοντέλα γεωμετρικής θεωρίας

- Βασίζονται σε φυσικά μοντέλα μετάδοσης του ήχου
 - Π.χ. Ήχος σαν ακτίνα φως
- Φαινόμενα διάχυσης και εξάρτησης από τη συχνότητα αγνοούνται
- Κατάλληλα για την περιγραφή διάδοσης του ήχου σε υψηλές συχνότητες μόνο (>2000Hz)
 - Το μήκος κύματος του ήχου πρέπει να είναι μικρό ως προς το μέγεθος των επιφανειών του χώρου
- Περιορισμός της τάξης των ανακλάσεων
- Τείνουν να δημιουργούν ανακλάσεις περισσότερο «ακριβείς» από ότι θα συνέβαινε με ένα πραγματικό ηχητικό κύμα
- Μέθοδοι ανίχνευσης ακτίνας
- Μέθοδος των ειδώλων
- Υβριδικές μέθοδοι

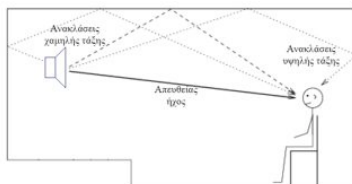


Το ηχητικό πεδίο σε κλειστούς χώρους



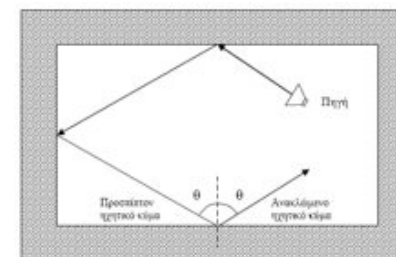
Ηχητικό πεδίο κλειστών χώρων

- Η ακουστική πίεση σε κάποιο σημείο εξαρτάται
 - Από το απευθείας σήμα
 - Από το ανακλώμενο σήμα
 - ▶ Ανακλάσεις χαμηλής και υψηλής τάξης
 - Από την απορρόφηση που έχει ο χώρος

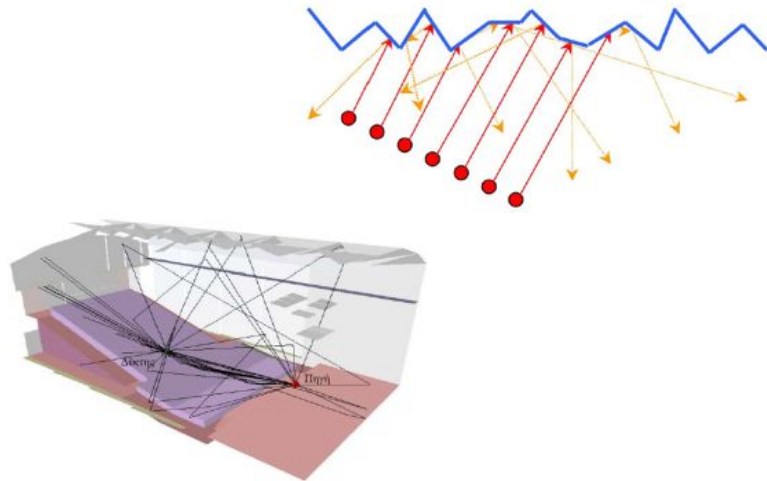


Ηχητικό πεδίο κλειστών χώρων (2)

- Τί είναι ανάκλαση;

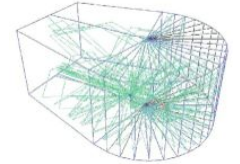


Ηχητικό πεδίο κλειστών χώρων (3)

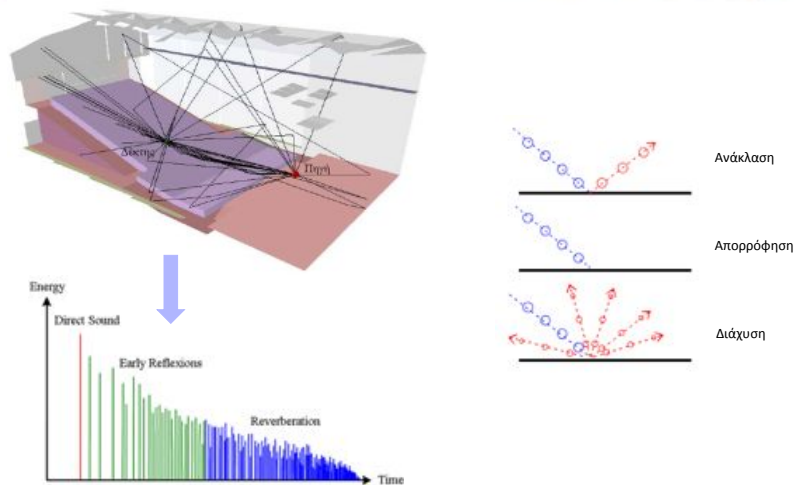


Χαρακτηριστικά ανακλάσεων

- Πρώτες ανακλάσεις
 - Ισχυρές - διακριτές
 - Εμπεριέχουν τη «χωρική» πληροφορία του ήχου
 - ▶ Πρέπει να μοντελοποιηθούν σωστά
- Καθυστερημένες ανακλάσεις
 - Χαμηλή στάθμη
 - Παρέχουν ένδειξη της «πυκνότητας» των ανακλάσεων
 - Δεν εξαρτώνται από τη θέση της ηχητικής πηγής
 - Συνήθως μοντελοποιούνται με στατιστικό τρόπο

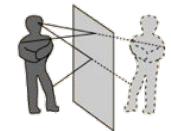
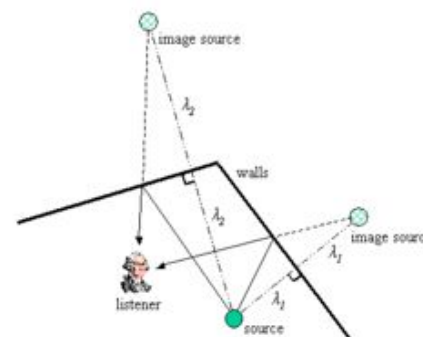


Χαρακτηριστικά ανακλάσεων (2)

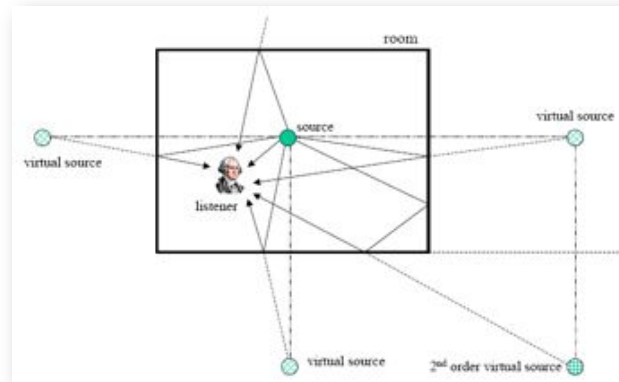


Υπολογισμός πρώτων ανακλάσεων

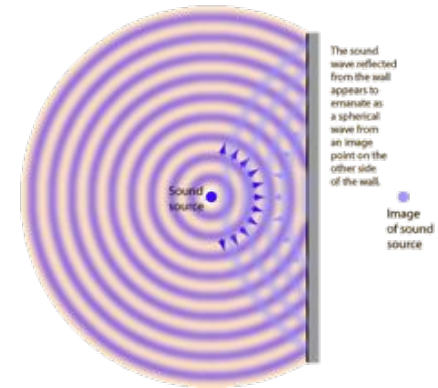
- Η μέθοδος των ειδώλων



Η μέθοδος των ειδώλων



Η μέθοδος των ειδώλων (2)



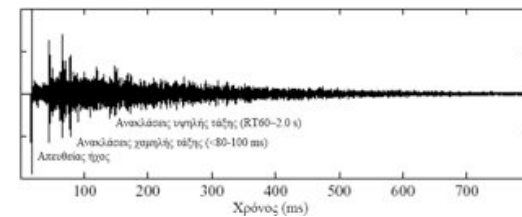
Η έννοια της απορρόφησης

- Τι είναι απορρόφηση;
 - Ο λόγος της ανακλώμενης προς προσπίπτουσας ενέργειας
- Συντελεστές απορρόφησης υλικών

Υλικό	Συχνότητες					
	125	250	500	1000	2000	4000
Αέρας	0	0	0	0,003	0,007	0,02
Επίπεδος τοίχος	0,15	0,3	0,75	0,85	0,75	0,4
Τοίχος - Τούβλο	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - Λιπέτον	0,02	0,02	0,2	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - Ξύλο	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Πάτωμα - χαλί	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3	0,3
Κουρτίνες	0,05	0,12	0,15	0,27	0,37	0,50
Καθιστός άνθρωπος	0,18	0,4	0,46	0,46	0,51	0,46

Μοντελοποίηση ανακλάσεων και πεδίου διάχυσης

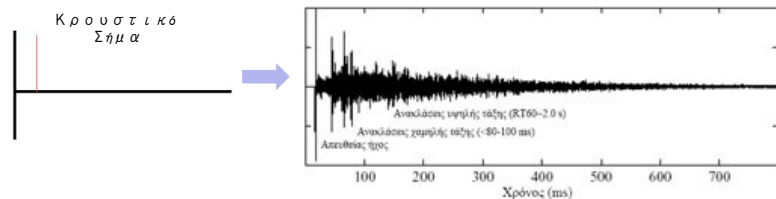
- Τυπική μορφή κρουστικής απόκρισης ζεύγους πηγής - δέκτη



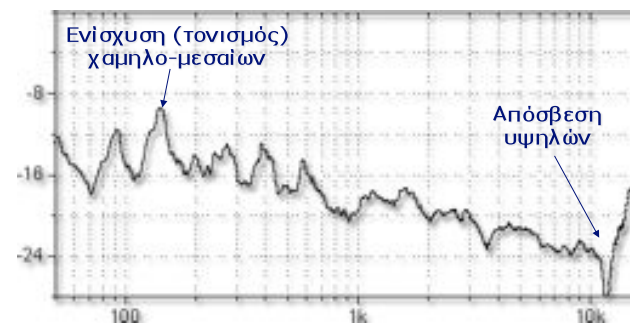
- Υπολογισμός ακουστικών παραμέτρων
 - Με βάση την κρουστική απόκριση

Η έννοια της κρουστικής απόκρισης χώρου

- Η έξοδος του χώρου όταν αυτός διεγερθεί από ένα κρουστικό σήμα

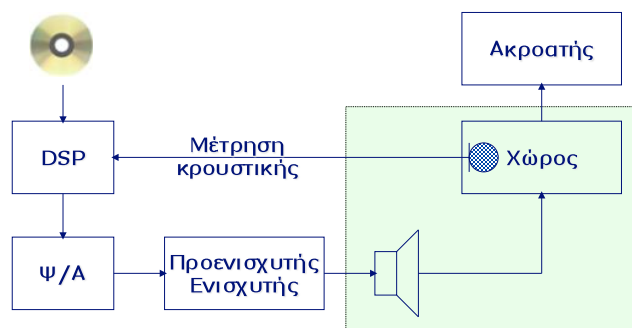


Απεικόνιση κρουστικής απόκρισης στη συχνότητα

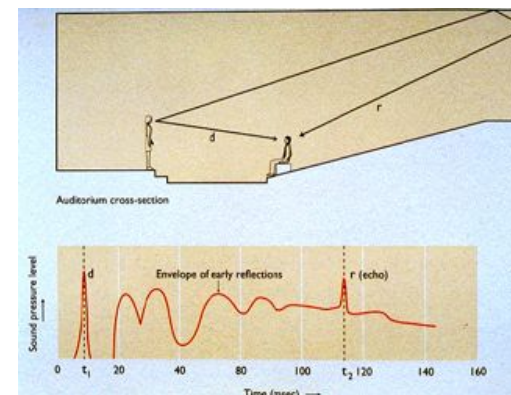


Πως μπορεί να «αντισταθμιστεί» η επίδραση ενός χώρου;

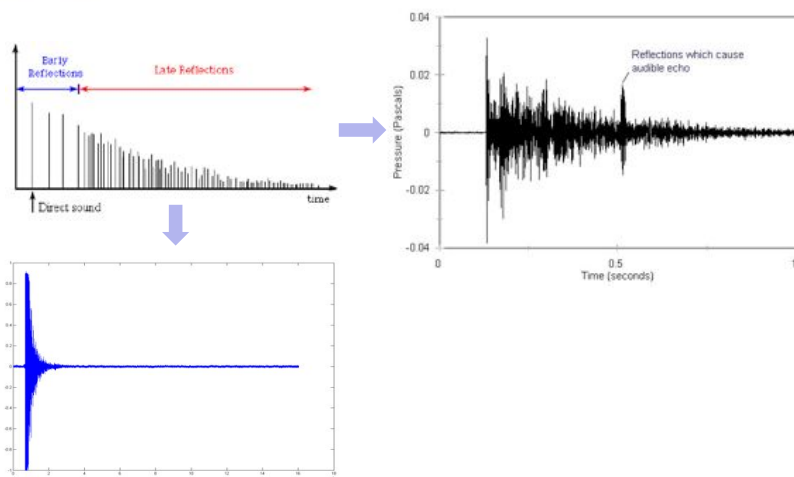
Ψηφιακή ισοστάθμιση χώρου



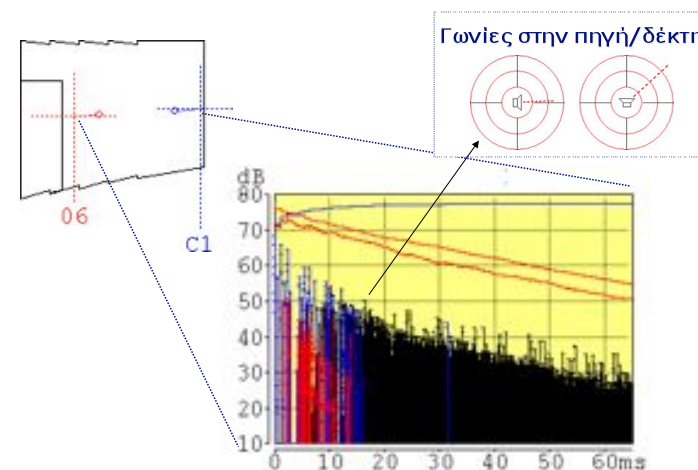
Η έννοια της ηχούς (echo)



Παραδείγματα κρουστικών αποκρίσεων



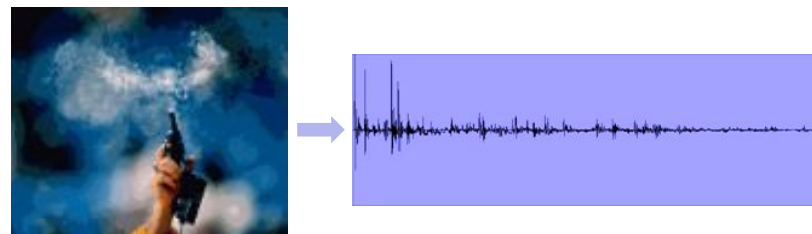
Παραδείγματα κρουστικών αποκρίσεων (2)



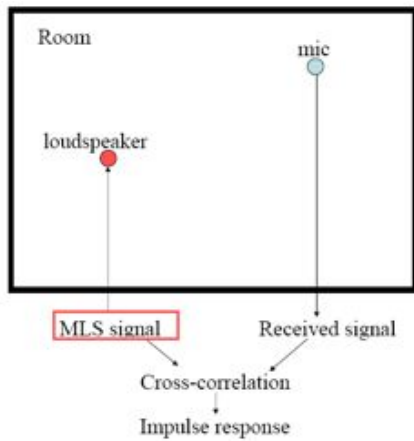
Χαρακτηριστικά κρουστικής απόκρισης χώρων

- Είναι μοναδική για το υπό εξέταση ζεύγος πηγής/δέκτη
- Περιγράφει αναλυτικά
 - Τις ανακλάσεις και τα συστήματα ανακλάσεων (εάν υπάρχουν)
 - Φαινόμενα αντήχησης (echoes)
 - Φασματικά χαρακτηριστικά της ακουστικής συμπεριφοράς για το συγκεκριμένο ζεύγος πηγής/δέκτη
- Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό όλων των ακουστικών παραμέτρων
 - εκτός του θορύβου

Μέτρηση κρουστικής απόκρισης χώρων



Μέτρηση κρουστικής απόκρισης χώρων (2)



Μέτρηση κρουστικής απόκρισης χώρων (3)



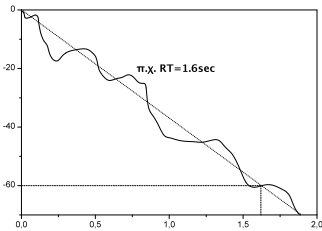
Βασικές ακουστικές παράμετροι

Οι βασικές ποσοτικές παράμετροι της ακουστικής

- Υπολογίζονται από την κρουστική απόκριση
- Ποσοτικά κριτήρια ποιότητας ακουστικής συμπεριφοράς
- Η ερμηνεία τους είναι εύκολη, με χρήση απλών κανόνων
- Η «συνδιασμένη» ερμηνεία τους είναι σύνθετη διαδικασία
 - Απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία
- Χρήσιμη η εφαρμογή αμφιωτικής ακρόασης

Ο Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time, RT)

- Πειραματικός υπολογισμός χρόνου αντήχησης
 - Εξαγωγή από την Decay Curve
- Εξάρτηση από θέση πηγής/δέκτη και τη συχνότητα



Θεωρητικός υπολογισμός (Sabine)

$$RT = \frac{0,161 \cdot V}{A}, \quad A = S_1 \alpha_1 + \dots + S_n \alpha_n$$

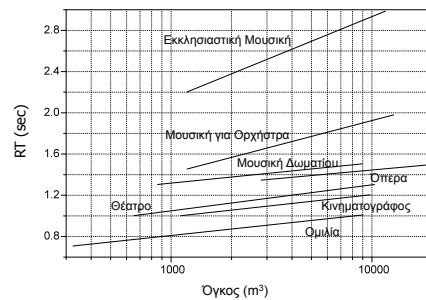
Ο Χρόνος Αντήχησης (2)

- Υπολογισμός decay curve $R(t)$ από κρουστική απόκριση $h(t)$

$$R(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt = \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt$$

Ο Χρόνος Αντήχησης (3)

- Ιδανικές τιμές χρόνου αντήχησης



Ο Χρόνος Αντήχησης (4)

- Εναλλακτικές εκφράσεις χρόνου αντήχησης
 - T-15, T-30
 - ▶ Πτώση ηχοστάθμης από -5 έως -20 και -5 έως -35dB αντίστοιχα
 - ▶ Γραμμική προσέγγιση (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων)
- Early Decay Time (EDT)
 - Πτώση της ηχοστάθμης από 0 σε -10dB
 - Πολλαπλασιασμός επί 6
- EyrT
 - Θεωρητικός υπολογισμός

Ο Χρόνος Αντήρησης – Θεωρητικός υπολογισμός

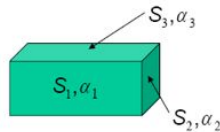
- Υπολογισμός κατά Sabine:

$$RT = \frac{0,161 \cdot V}{A}$$

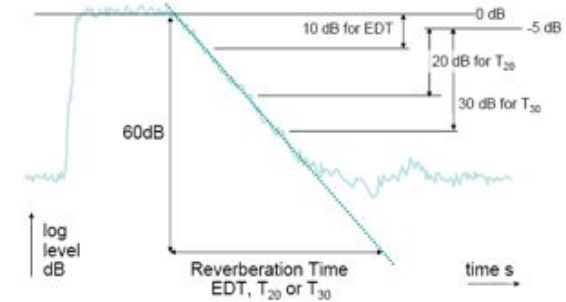
- όπου

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i$$

$$A = S \bar{\alpha}$$



Ο Χρόνος Αντήρησης (5)



Λοιπές ακουστικές παράμετροι

- Διαύγεια (Clarity)

- Δύο μορφές (C-50 και C-80)

$$10 \log \left(\frac{\int_{t=0}^{t=\tau_c} h^2(t) dt}{\int_{t=\tau_c+1}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \text{ (dB)}$$

- Το C-50 συνήθως χρησιμοποιείται για ομιλία
- Το C-80 για μουσική...

- Εναλλακτικά χρησιμοποιείται και η διαύγεια (Definition-D50)

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Λοιπές ακουστικές παράμετροι (2)

- Ενεργειακό κέντρο κρουστικής απόκρισης T_s

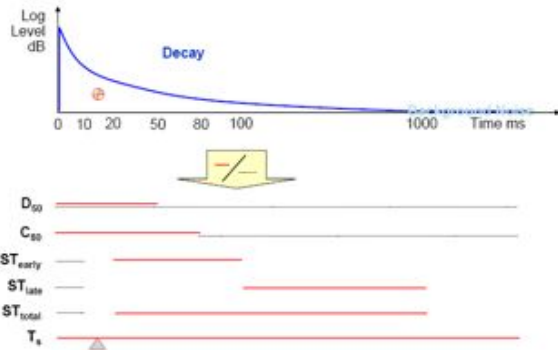
$$10 \log \left(\frac{\int_{t=0}^{t=\tau_s} h^2(t) dt}{\int_{t=\tau_s-1}^{\infty} h^2(t) dt} \right) = 0$$

- Strength Factor (G)

- Αποτελεί μέτρο της ενίσχυσης του ήχου από το χώρο

$$G = 10 \log \frac{\int p^2(t) dt}{\int p_{7,10m}^2(t) dt}$$

Λοιπές ακουστικές παράμετροι (3)



Λοιπές ακουστικές παράμετροι (4)

Recommended values for symphonic music in concert halls

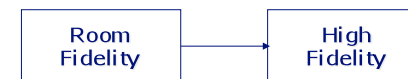
- Reverberation Time T_{30} 1,7 - 2,3 s
- Clarity C_{80} -1 to -3 dB
- Strength G > 3 dB

- Reverberation Time T_{30} 5% ← Just Noticeable Difference
- Early Decay Time EDT 5%
- Definition D_{50} 5%
- Clarity C_{80} 1 dB
- Centre Time T_s 10 ms
- Strength G 1 dB

Μελέτες ακουστικής χώρων

Η μελέτη ακουστικής χώρων

- Βασικά βήματα
 - Μέτρηση/εκτίμηση ακουστικών παραμέτρων
 - Ποιοτική ερμηνεία αποτελεσμάτων
 - Διόρθωση και νέος υπολογισμός
 - Πιστοποίηση αποτελεσμάτων με τη βοήθεια τεχνολογίας εικονικής πραγματικότητας



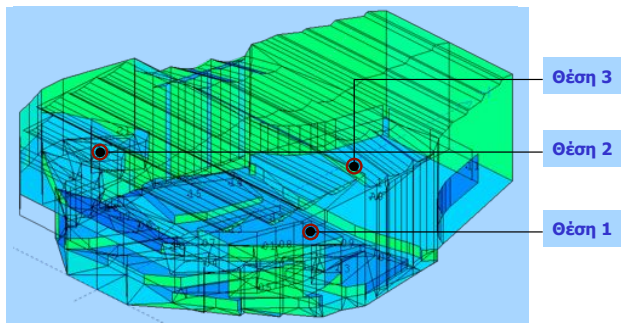
Τυπικοί χώροι



Μεγάλο αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π.



Μεγάλο αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π. (2)

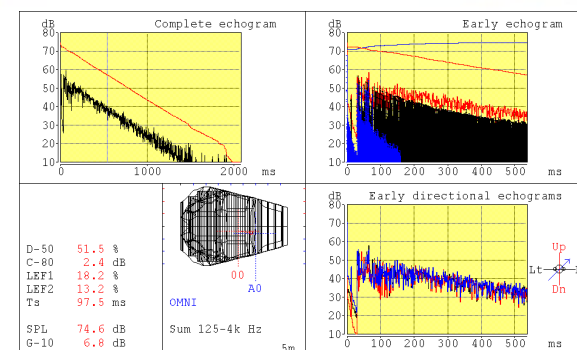


Χρόνος Αντήρησης

Αντιληπτότητα

Ηχοστάθμη

Μεγάλο αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π. (3)



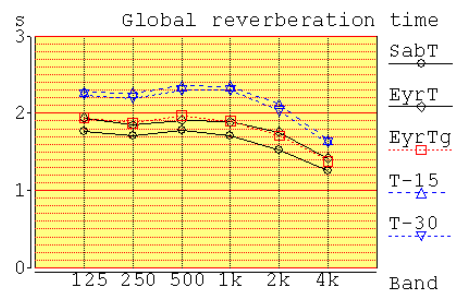
Ανηχοϊκή Ομιλία

Ανηχοϊκή Τρομπέτα

Ομιλία Θέση 1

Τρομπέτα Θέση 1

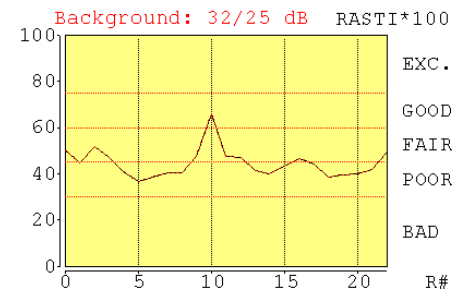
Μεγάλο αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π. (4)



Χρόνος Ανήχησης (sec)					
150Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
1.94	1.85	1.91	1.89	1.76	1.42

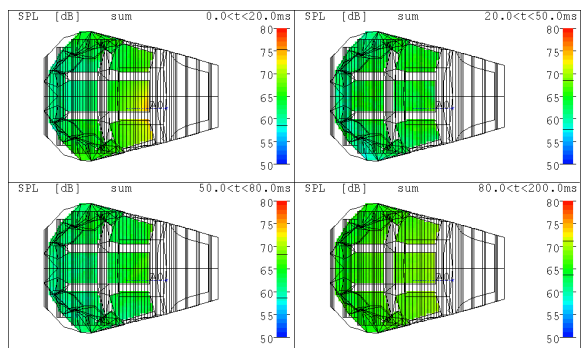
Μεγάλο αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π. (5)

- Αντιληπτότητα ομιλίας (κατά RASTI)



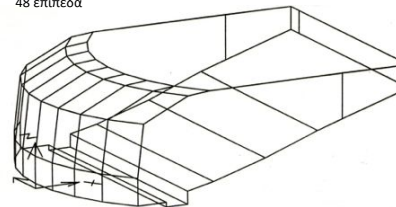
Μεγάλο αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π. (5)

- Κατανομή ηχοστάθμης

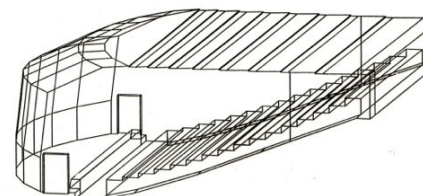
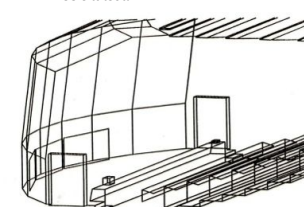


Ακρίβεια ακουστικής προσομοίωσης

48 επίπεδα



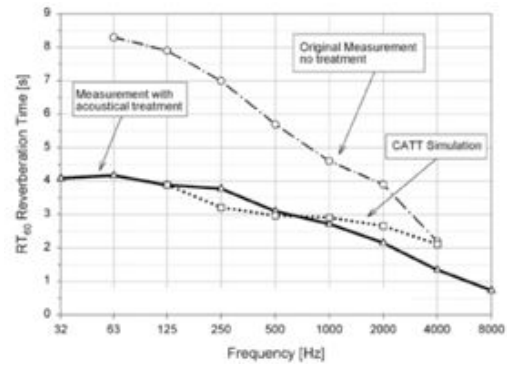
238 επίπεδα



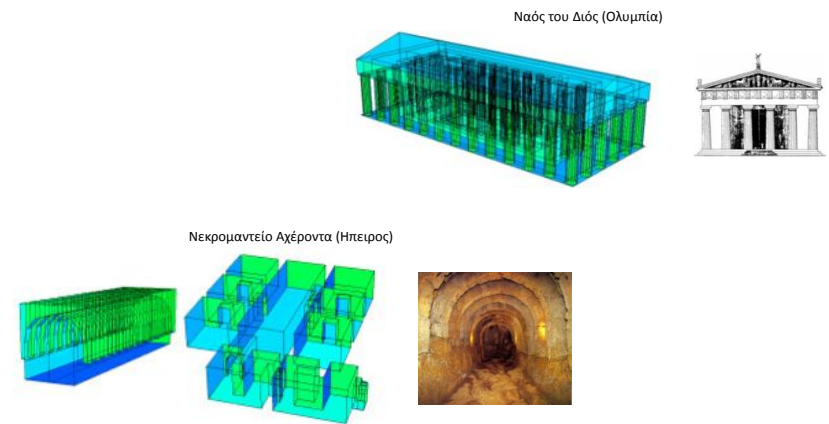
126 επίπεδα – βέλτιστη προσέγγιση

Τυπικός όγκος ~2000κ.μ.

Ακρίβεια ακουστικής προσομοίωσης (2)

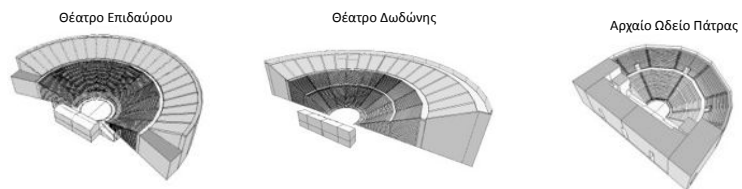


Ακουστική αρχαίων κλειστών χώρων



<http://www.wcl.ee.upatras.gr/audiogroup/AncientAcoustics/index.html>

Ακουστική αρχαίων ανοιχτών χώρων



Μελέτη ακουστικής καμπίνας αυτοκινήτων

- Ακουστική άνεση επιβατών



<http://www.wcl.ee.upatras.gr/audiogroup/AncientAcoustics/index.html>

Εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας



ΑΝΔΡΕΑΣ ΦΛΩΡΟΣ
floros@ionio.gr
<http://www.ionio.gr/~floros>

AUDIO
VISUAL
ARTS