

Μάθημα: «Ηλεκτροακουστική & Ακουστική Χώρων»

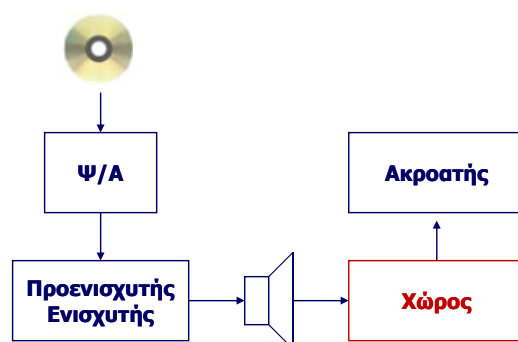
Διάλεξη 7^η: «Ακουστική Χώρων»

Φλώρος Ανδρέας
Επικ. Καθηγητής

Electro
Acoustics



Αλυσίδα ηχητικής αναπαραγωγής



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

Electro
Acoustics



Το πεδίο διάχυσης

Η ακουστική ιδιαιτερότητα των κλειστών χώρων

The diagram illustrates four scenarios of sound propagation in a room:

- Scenario 1:** A sound source **S** is shown without a receiver. The graph shows a single sharp peak.
- Scenario 2:** A sound source **S** and a receiver **R** are in a direct line. The graph shows a sharp peak followed by a single reflection peak.
- Scenario 3:** A sound source **S** and a receiver **R** are positioned such that sound reflects off a surface. The graph shows a sharp peak followed by two reflection peaks.
- Scenario 4:** A sound source **S** and a receiver **R** are in a room with multiple reflections. The graph shows a sharp peak followed by a complex, multi-peaked decay curve.

Electro Acoustics

Το πεδίο διάχυσης (συν.)

Ελεύθερο πεδίο (free field) Πεδίο διάχυσης (diffuse field)

The diagram compares two acoustic environments:

- Ελεύθερο πεδίο (free field):** Shows a central point source with arrows radiating outwards in all directions, representing sound waves traveling without reflections.
- Πεδίο διάχυσης (diffuse field):** Shows a central point source with arrows radiating in all directions, but also includes arrows representing multiple reflections off surfaces, creating a complex, multi-directional sound field.

Electro Acoustics

Βασικοί στόχοι της 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

*Electro
Acoustics*



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

*Electro
Acoustics*



Σύντομο ιστορικό (συν.)

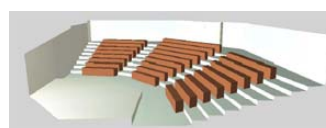
- Σύγχρονες τεχνικές εκτίμησης και ανάλυσης ακουστικής συμπεριφοράς
 - Τεχνικές προσομοίωσης σε υπολογιστή
 - Μελέτη απόδοσης ηλεκτροακουστικών εγκαταστάσεων
 - Αμφωπτική ακουστική - DSP
- Η αφαίρεση των παραμορφώσεων που εισάγει ο χώρος παραμένει πρόβλημα άλυτο

Electro
Acoustics



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



Electro
Acoustics



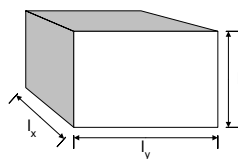
Βασική κυματική θεωρία

- 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

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

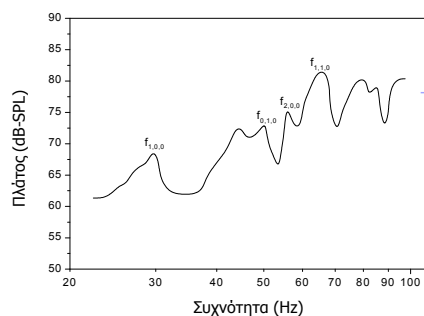


Electro
Acoustics



Βασική κυματική θεωρία (συν.)

- 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



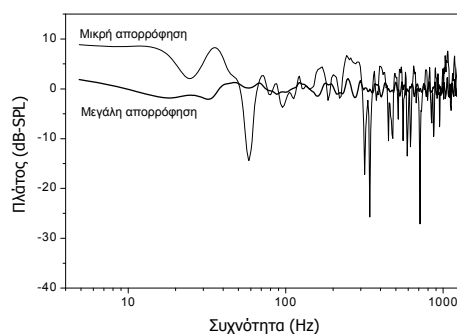
Απόκριση χωρίς
απορρόφηση
λόγω υλικών

Electro
Acoustics



Βασική κυματική θεωρία (συν.)

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



Electro
Acoustics



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)

Electro
Acoustics



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (συν.)

- Μοντέλα υπό κλίμακα



Electro
Acoustics



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (συν.)

- Μοντέλα υπό κλίμακα



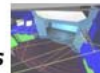
Electro
Acoustics



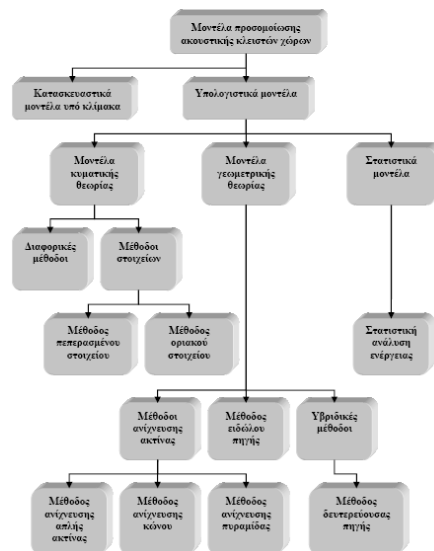
Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (συν.)



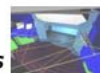
Electro
Acoustics



Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων (συν.)



Electro
Acoustics



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...

Electro
Acoustics



Μοντέλα γεωμετρικής θεωρίας

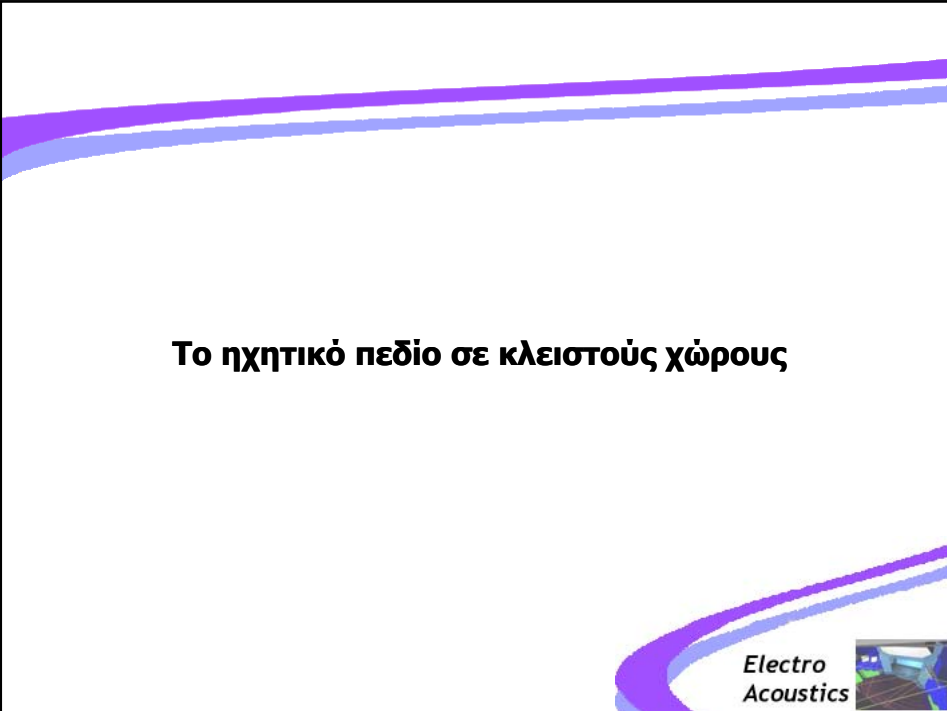
- Βασίζονται σε φυσικά μοντέλα μετάδοσης του ήχου
 - Π.χ. Ήχος σαν ακτίνα φωτός
- Φαινόμενα διάχυσης και εξάρτησης από τη συχνότητα αγνοούνται
- Κατάλληλα για την περιγραφή διάδοσης του ήχου σε υψηλές συχνότητες μόνο ($>2000\text{Hz}$)
 - Το μήκος κύματος του ήχου πρέπει να είναι μικρό ως προς το μέγεθος 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



Electro
Acoustics



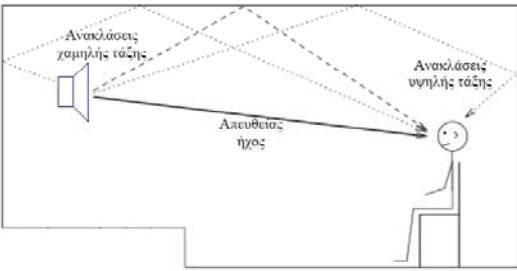
Το ηχητικό πεδίο σε κλειστούς χώρους




*Electro
Acoustics* 

Ηχητικό πεδίο κλειστών χώρων

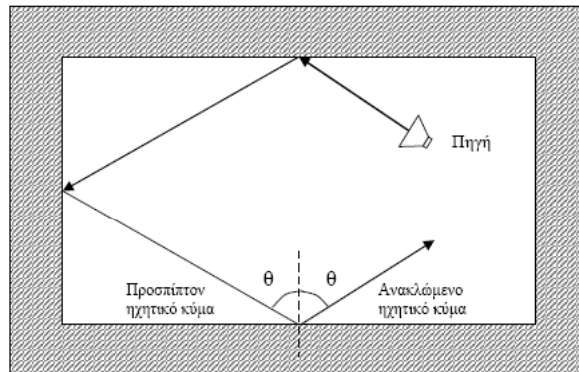
- Η ακουστική πίεση σε κάποιο σημείο εξαρτάται
 - Από το απευθείας σήμα
 - Από το ανακλώμενο σήμα
 - Ανακλάσεις χαμηλής και υψηλής τάξης
 - Από την απορρόφηση που έχει ο χώρος



*Electro
Acoustics* 

Ηχητικό πεδίο κλειστών χώρων (συν.)

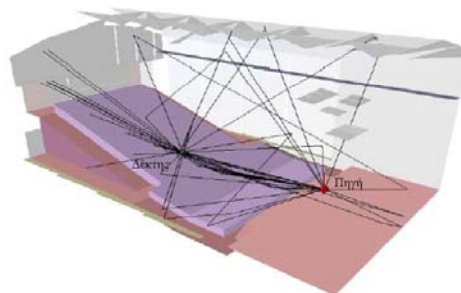
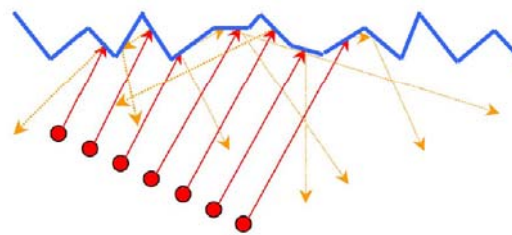
- Τι είναι ανάκλαση;



Electro
Acoustics



Ηχητικό πεδίο κλειστών χώρων (συν.)

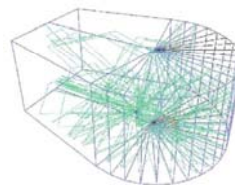


Electro
Acoustics



Χαρακτηριστικά ανακλάσεων

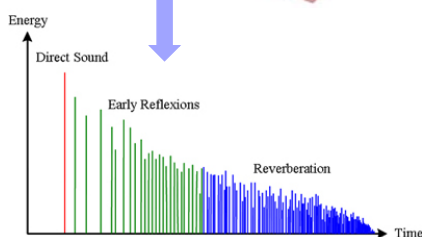
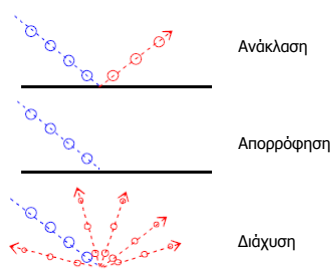
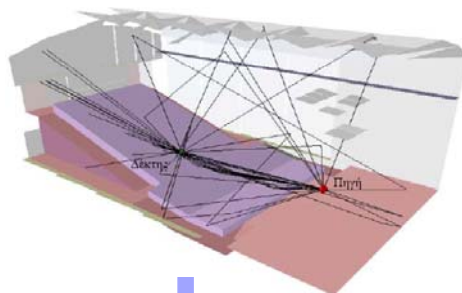
- Πρώτες ανακλάσεις
 - Ισχυρές
 - Διάκριτες
 - Εμπεριέχουν τη «χωρική» πληροφορία του ήχου
 - Πρέπει να μοντελοποιηθούν σωστά
- Καθυστερημένες ανακλάσεις
 - Χαμηλή ένταση
 - Παρέχουν ένδειξη της «πυκνότητας» των ανακλάσεων
 - Δεν εξαρτώνται από τη θέση της ηχητικής πηγής
 - Συνήθως μοντελοποιούνται με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



Electro
Acoustics



Χαρακτηριστικά ανακλάσεων (συν.)

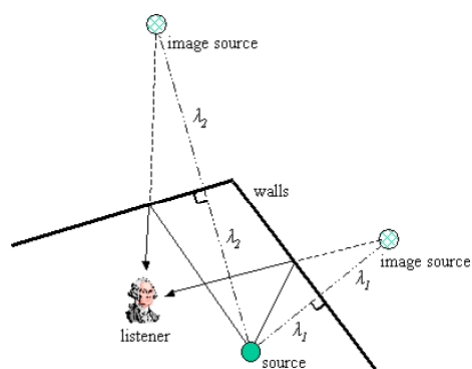


Electro
Acoustics



Υπολογισμός πρώτων ανακλάσεων

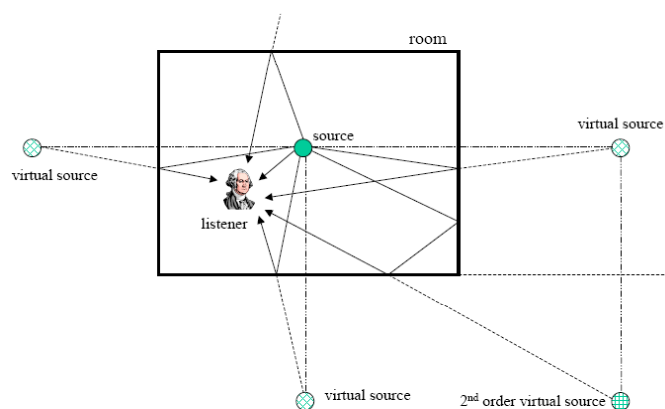
- Η μέθοδος των ειδώλων



Electro
Acoustics



Η μέθοδος των ειδώλων



Electro
Acoustics



Η έννοια της απορρόφησης

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

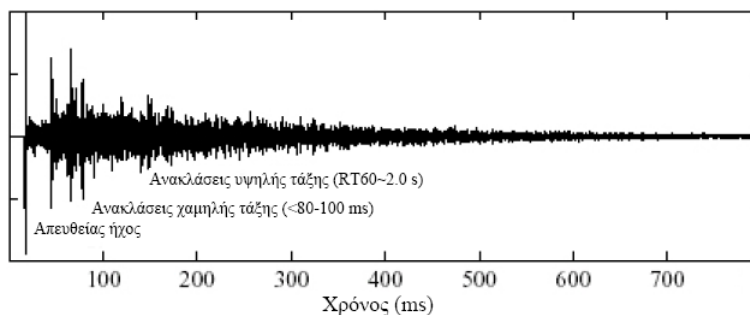
Υλικό	Συχνότητες					
	125	250	500	1000	2000	4000
Αέρας	0	0	0	0,003	0,007	0,02
Επίπεδος τοίχος	0,15	0,3	0,75	0,85	0,75	0,4
Τοίχος - Τούβλο	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - Μπετόν	0,02	0,02	0,2	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - ξύλο	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Πάτωμα - χαλί	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3	0,3
Κουρτίνες	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

Electro
Acoustics



Μοντελοποίηση ανακλάσεων και πεδίου διάχυσης

- Τυπική μορφή κρουστικής απόκρισης ζεύγους πηγής - δέκτη



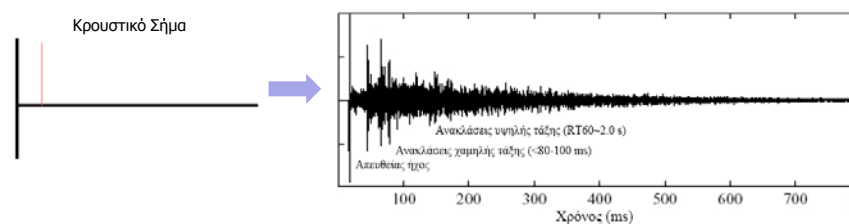
- Υπολογισμός ακουστικών παραμέτρων
 - Με βάση την κρουστική απόκριση

Electro
Acoustics



Η έννοια της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου

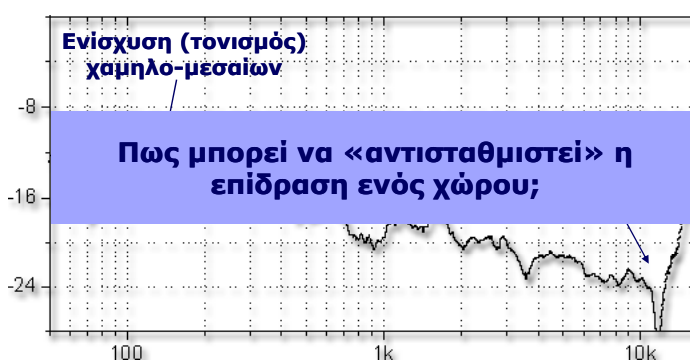
- Η έξοδος του χώρου όταν αυτός διεγερθεί από ένα κρουστικό σήμα



Electro
Acoustics



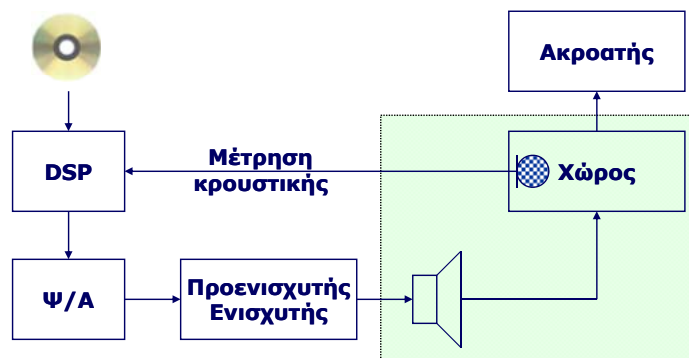
Απεικόνιση κρουστικής απόκρισης στη συχνότητα



Electro
Acoustics



Ψηφιακή ισοστάθμιση χώρων

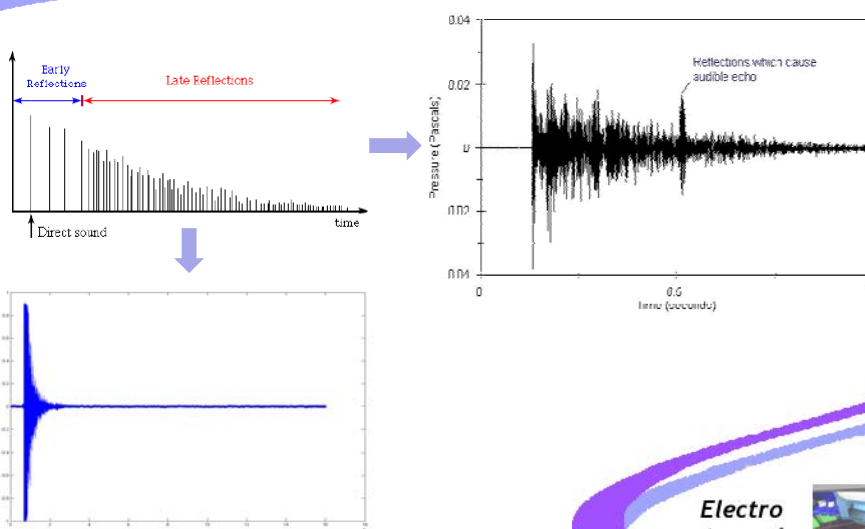


- Ψηφιακή ισοστάθμιση χώρου (όχι αναλογική!)
- Ισοστάθμιση μόνο συγκεκριμένου σημείου (θέση μικροφώνου)
- Υψηλή πολυπλοκότητα φίλτρου

Electro
Acoustics

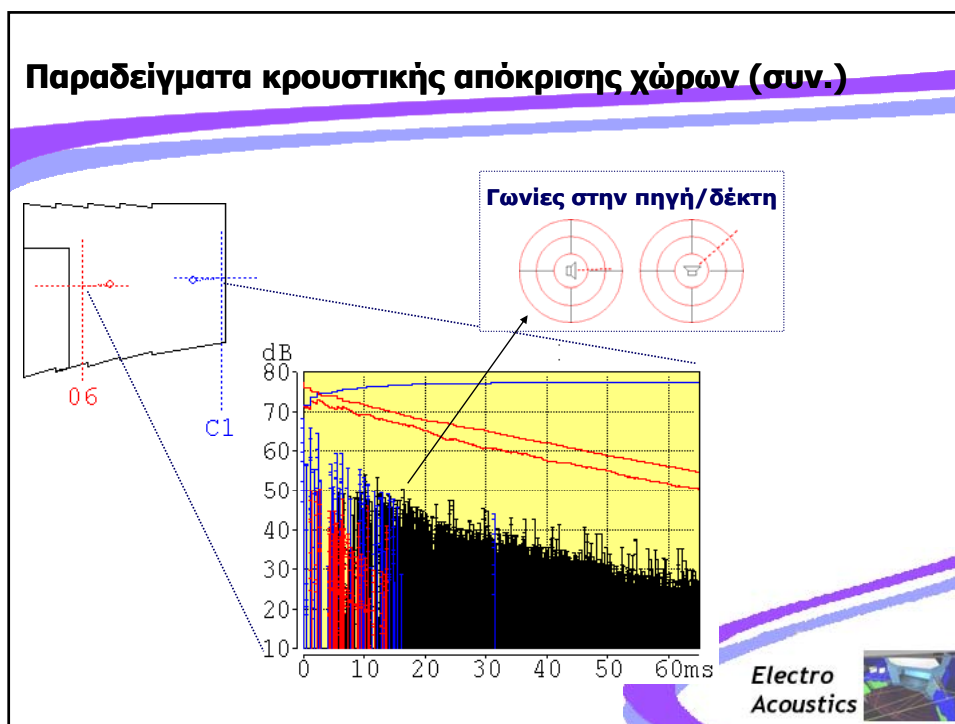


Παραδείγματα κρουστικής απόκρισης χώρων



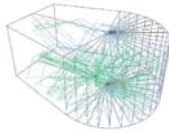
Electro
Acoustics





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



Electro Acoustics

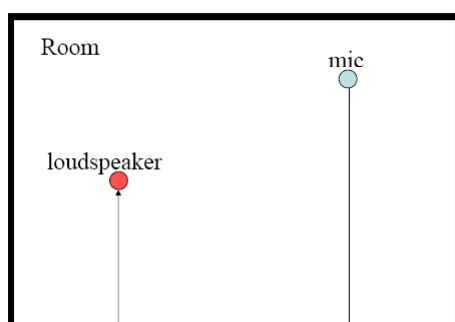
Μέτρηση κρουστικής απόκρισης χώρου



Electro
Acoustics



Μέτρηση κρουστικής απόκρισης χώρου (συν.)



MLS signal

Received signal

Cross-correlation

Impulse response

Electro
Acoustics



Μέτρηση κρουστικής απόκρισης χώρου (συν.)



Electro
Acoustics



Βασικές ακουστικές παράμετροι

Electro
Acoustics



Οι βασικές ποσοτικές παράμετροι της ακουστικής

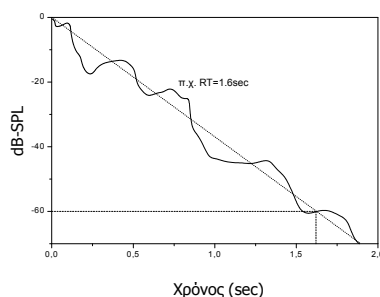
- Υπολογίζονται από την κρουστική απόκριση
- Ποσοτικά κριτήρια ποιότητας ακουστικής συμπεριφοράς
- Η ερμηνεία τους είναι εύκολη, με χρήση απλών κανόνων
- Η «συνδιασμένη» ερμηνεία τους είναι σύνθετη διαδικασία
 - Απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία
 - Χρήσιμη η εφαρμογή αμφωτικής ακρόασης

Electro
Acoustics



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)

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

Electro
Acoustics



Ο Χρόνος Αντήχησης (συν.)

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

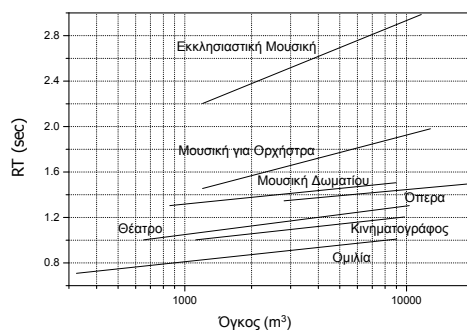
$$R(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt = \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt$$

Electro
Acoustics



Ο Χρόνος Αντήχησης (συν.)

- Ιδανικές τιμές χρόνου αντήχησης



Electro
Acoustics



Ο Χρόνος Αντήρησης (συν.)

- Εναλλακτικές εκφράσεις χρόνου αντήρησης
 - 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

Electro
Acoustics



Ο Χρόνος Αντήρησης – Θεωρητικός υπολογισμός

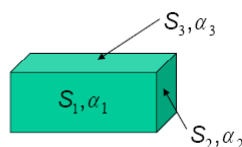
- Υπολογισμός κατά Sabine:

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

- όπου

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

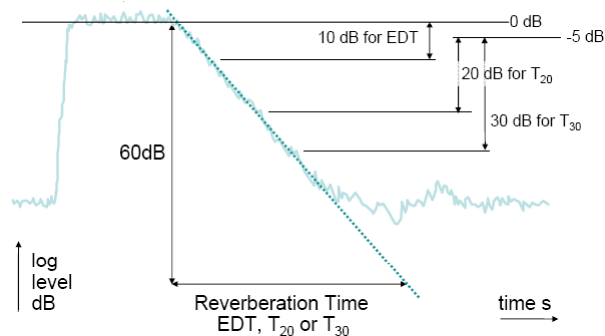
$$A = S \bar{\alpha}$$



Electro
Acoustics



Ο Χρόνος Αντήχησης (συν.)



Electro
Acoustics



Λοιπές ακουστικές παράμετροι

- Διαύγεια (Clarity)
 - Δύο μορφές (C-50 και C-80)

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

- Το C-50 συνήθως χρησιμοποιείται για ομιλία
- Το C-80 για μουσική...
- Εναλλακτικά χρησιμοποιείται και η διαύγεια (Definition-D50)

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Electro
Acoustics



Λοιπές ακουστικές παράμετροι (συν.)

- Ενεργειακό κέντρο κρουστικής απόκρισης T_s

$$10 \log \frac{\int_{t=0}^{t_i} h^2(t) dt}{\int_{t=t_{s+1}}^{t_s} h^2(t) dt} = 0$$

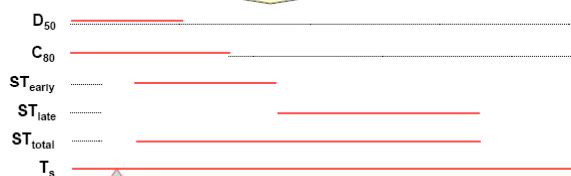
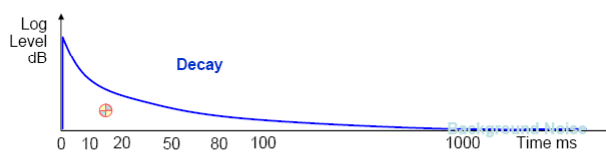
- Strength Factor (G)
 - Αποτελεί μέτρο της ενίσχυσης του ήχου από το χώρο

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

Electro
Acoustics



Λοιπές ακουστικές παράμετροι (συν.)



Electro
Acoustics



Λοιπές ακουστικές παράμετροι (συν.)

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

*Electro
Acoustics*



Μελέτες ακουστικής χώρων

*Electro
Acoustics*



Μελέτη ακουστικής χώρων

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

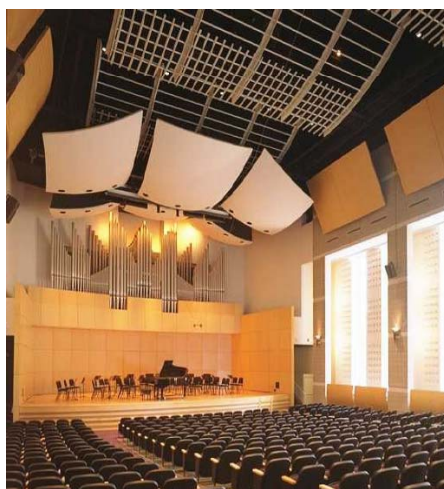
Room
Fidelity

High
Fidelity

Electro
Acoustics



Τυπικοί χώροι



Electro
Acoustics



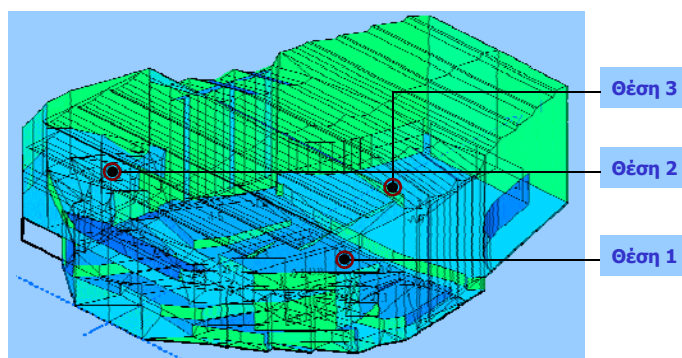
Μεγάλο Αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π.



Electro
Acoustics



Μεγάλο Αμφιθέατρο Σ.Κ.Π.Π. (συν.)



Χρόνος Αντήχησης

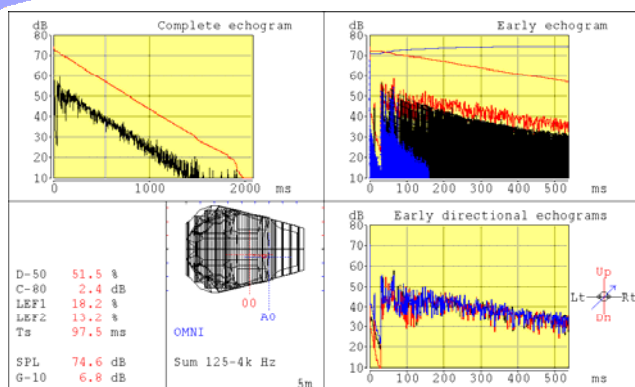
Αντιληπτότητα

Ηχοστάθμη

Electro
Acoustics



Θέση 1 – Ακροατήριο Μπροστά



Ανηχοϊκή Ομιλία

Ανηχοϊκή Τρομπέτα

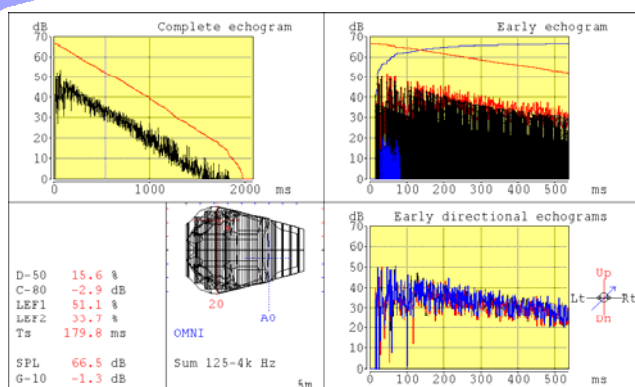
Ομιλία Θέση 1

Τρομπέτα Θέση 1

Electro
Acoustics



Θέση 2 – Πίσω Αριστερά Εξώστης



Ανηχοϊκή Ομιλία

Ανηχοϊκή Τρομπέτα

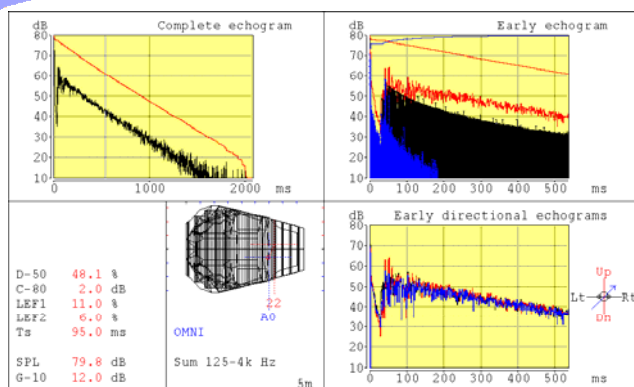
Ομιλία Θέση 2

Τρομπέτα Θέση 2

Electro
Acoustics



Θέση 3 - Σκηνή



Ανηχοϊκή Ομιλία

Ανηχοϊκή Τρομπέτα

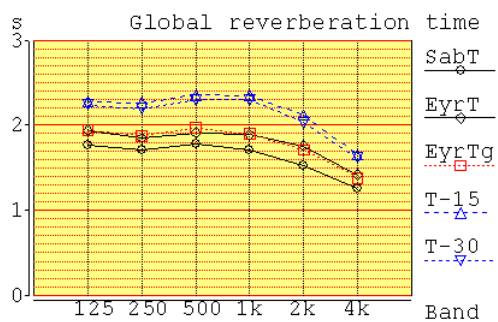
Ομιλία Θέση 3

Τρομπέτα Θέση 3

Electro Acoustics



Εκτίμηση Χρόνου Αντήχησης (RT₆₀)

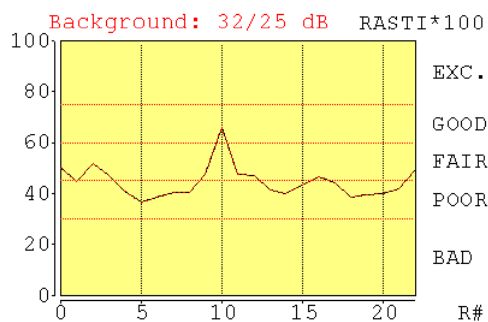


Χρόνος Αντήχησης (sec)					
150Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
1.94	1.85	1.91	1.89	1.76	1.42

Electro Acoustics



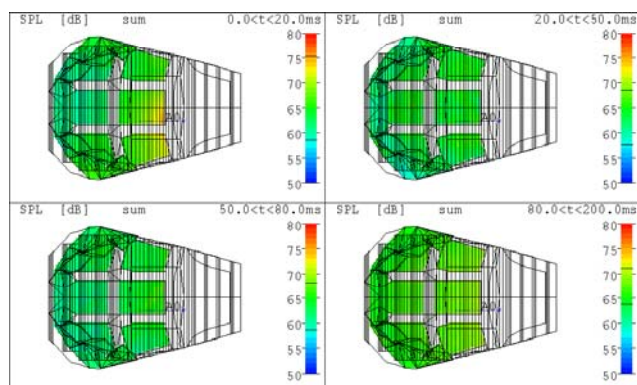
Εκτίμηση Αντιληπτότητας Ομιλίας (%RASTI)



Electro Acoustics



Εκτίμηση Κατανομής Ηχοστάθμης (dB-SPL)

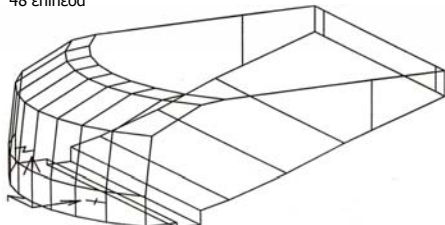


Electro Acoustics

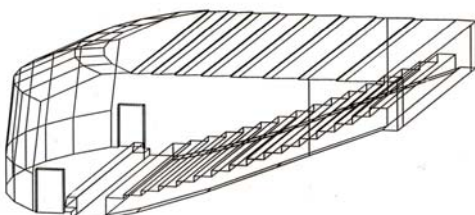
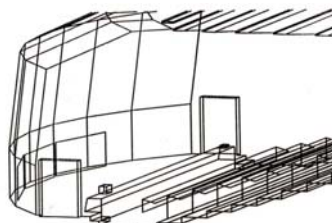


Ακρίβεια ακουστικής προσομοίωσης

48 επίπεδα



238 επίπεδα



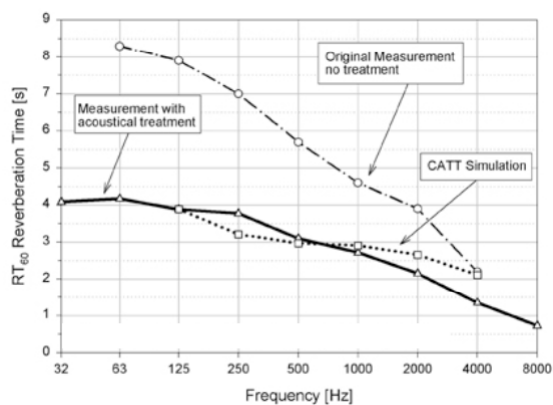
126 επίπεδα – βέλτιστη προσέγγιση

Τυπικός όγκος ~2000κ.μ.

**Electro
Acoustics**



Ακρίβεια ακουστικής προσομοίωσης (συν.)

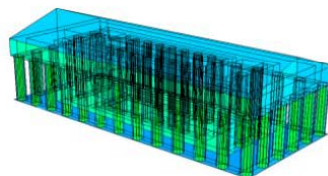


**Electro
Acoustics**

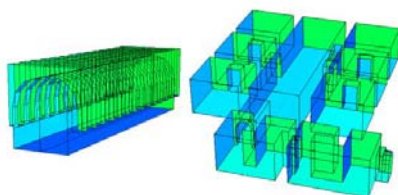


Ακουστική αρχαίων κλειστών χώρων

Ναός του Διός (Ολυμπία)



Νεκρομαντείο Αχέρωντα (Ήπειρος)



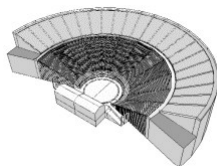
*Electro
Acoustics*



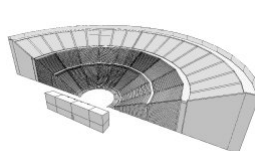
<http://www.wcl.ee.upatras.gr/audiogroup/AncientAcoustics/index.html>

Ακουστική αρχαίων ανοιχτών χώρων

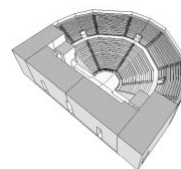
Θέατρο Επιδαύρου



Θέατρο Δωδώνης



Αρχαίο Ωδείο Πάτρας



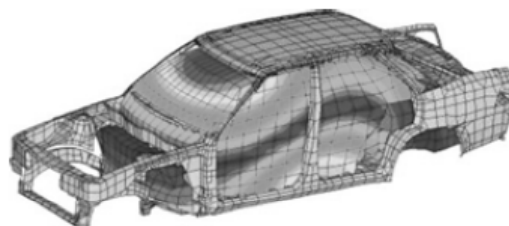
*Electro
Acoustics*



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

Μελέτη ακουστικής καμπίνας αυτοκινήτων

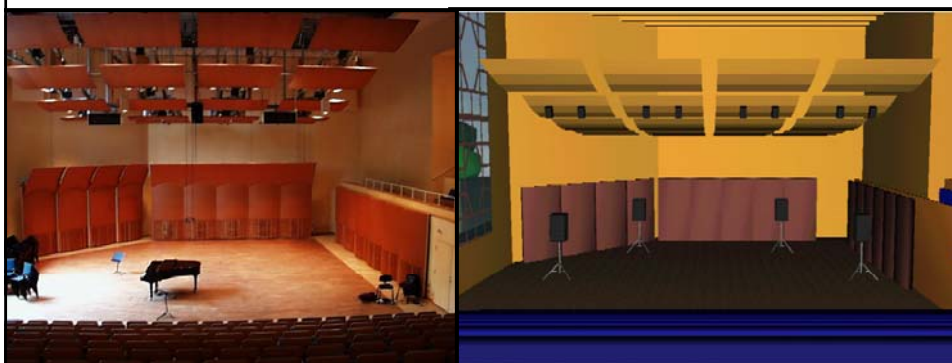
- Ακουστική άνεση επιβατών



Electro
Acoustics

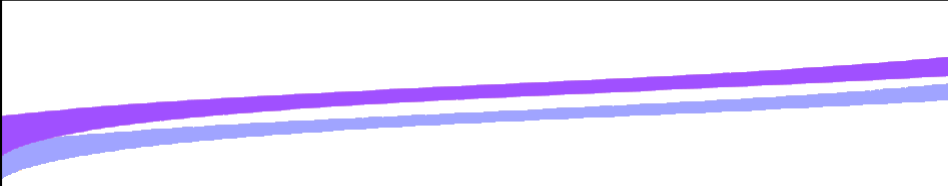


Εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας




Electro
Acoustics






ΤΕΛΟΣ (για σήμερα...)



*Electro
Acoustics*



www.ionio.gr/~floros/