

• Η Ακουστική είναι:

•

- **Ασαφής** εκ φύσεως...
- **Σημαντική** επειδή την συναντούμε:
  - Στο χώρο της ζωντανής παράστασης
  - Στο χώρο του studio παραγωγής
  - Στο χώρο ακρόασης
- **Επικινδυνή** επειδή:
  - Δεν μπορούμε εύκολα να διαχωρίσουμε την επίδρασή της
  - Κρίνουμε, συνήθως, την ακουσική και όχι τις υπόλοιπες παραμέτρους ενός συστήματος

Ευτυχώς όμως:

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει εξελιχθεί ώστε να την χρησιμοποιεί ως πλεονέκτημά του.

## Τι είναι ένας μικρός χώρος;

Το φάσμα που μας ενδιαφέρει: **16Hz-20kHz**

Τα μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν: **21m (16Hz)-17mm (20kHz)**

Εμπειρική παρατήρηση:

Η συμπεριφορά του χώρου αλλάζει όταν:

$$d < \lambda$$

**Θεωρούμε:**

**“Μικρό” κάθε χώρο με μεγάλη διάσταση μικρότερη των 21m**

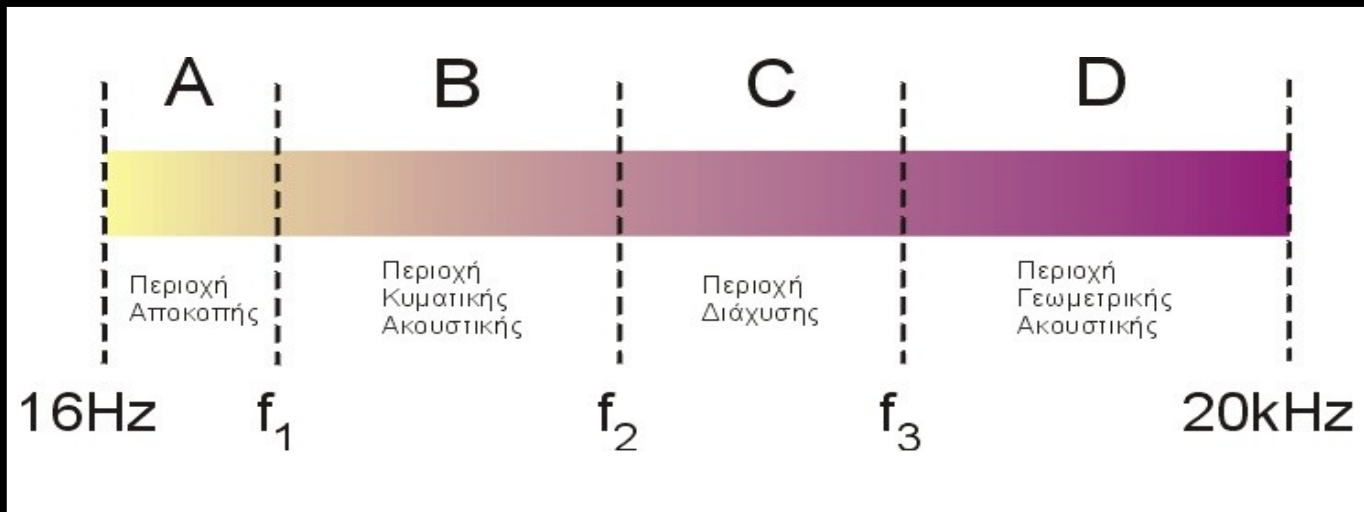
Στους μεγάλους χώρους ισχύει επακριβώς η εξίσωση Sabine  
(Wallace Clement Sabine)

Τους μεγάλους χώρους τους ονομάζουμε **“Χώρους Sabine”**

## Αυτός ο διαχωρισμός δεν είναι αρκετός!

Τα μοντέλα μας δεν επαρκούν να περιγράψουν την διάδοση του ήχου σε έναν χώρο για όλες τις συχνότητες.

Αυθαιρέτως διαχωρίζουμε το φάσμα σε τέσσερις περιοχές:

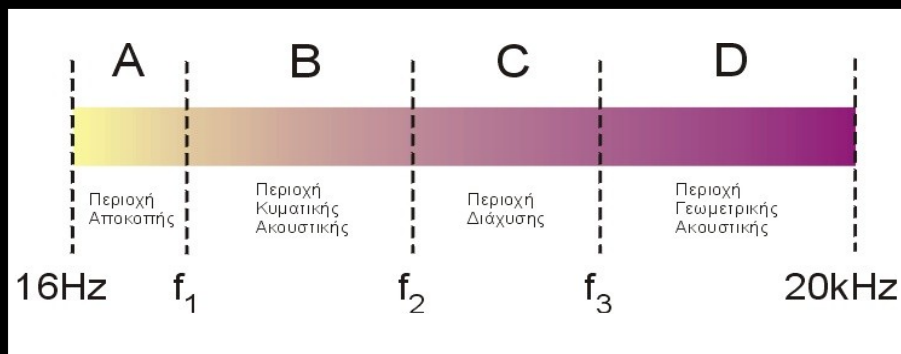


Πώς καθορίζονται οι συχνότητες  $f_1$ - $f_3$ ;

$$f_1 = \frac{c}{2L}$$

$$f_2 = 2.102 \cdot \sqrt{\frac{RT60}{V}}$$

$$f_3 = 4 \times f_2$$



Μπορείτε να δείτε **τον ρόλο που παίζουν** οι διαστάσεις του χώρου στον τρόπο που κατανέμονται οι τέσσερις περιοχές;

Έχει ο χώρος απόκριση συχνότητας;

**A**

Περιοχή αποκοπής  
ο χώρος δεν συμμετέχει στην διαμόρφωση του ήχου

**B**

Περιοχή κυματικής ακουστικής  
Ο ήχος συμπεριφέρεται ως κύμα

**C**

Περιοχή διάβασης (crossover)  
ο χώρος συμπεριφέρεται μεικτά

**D**

Περιοχή γεωμετρικής ακουστικής  
Ο ήχος συμπεριφέρεται ως ακτίνα

**Στην πράξη:**

Αγνοούμε τις περιοχές A και C και επικεντρωνόμαστε στις B και D!

## Τι είναι η Αντήχηση;

είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένας ήχος συνεχίζει να είναι ακουστός ακόμη και όταν ο μηχανισμός που τον δημιουργεί πάψει να υφίσταται.

Η αντήχηση και η αντίληψή της μας βοηθά να εκτιμήσουμε το μέγεθος του χώρου μέσα στον οποίο βρισκόμαστε.

Ορίζουμε:

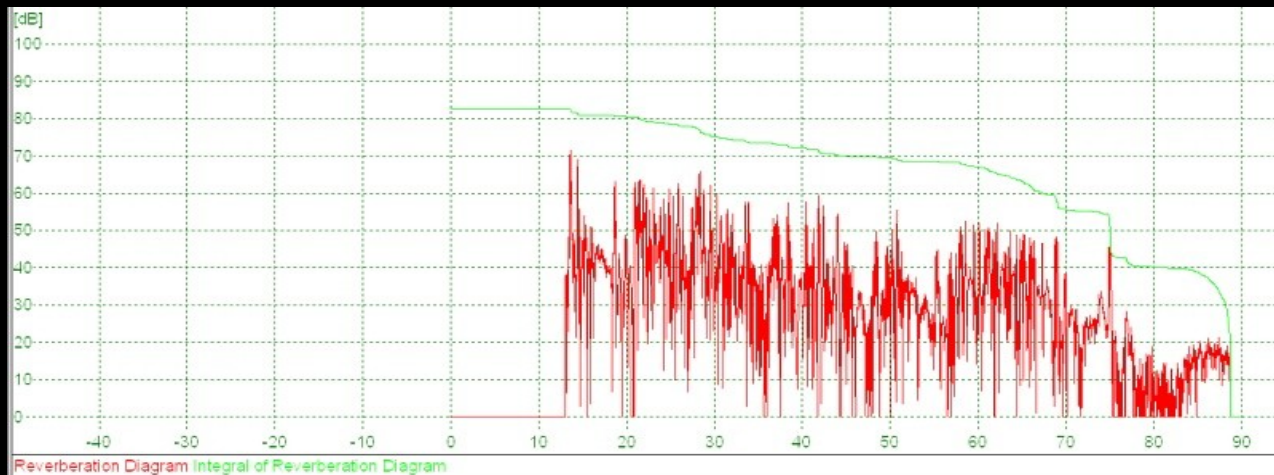
Ως **χρόνο αντήχησης** (RT60) τον χρόνο που απαιτείται για να μειωθεί η στάθμη του ήχου κατά 60dB από την στιγμή που η λειτουργία της ηχητικής πηγής πάψει.

Ο χρόνος αντήχησης είναι ένα μέτρο της αντήχησης και εξαρτάται:

Από τις **διαστάσεις** του χώρου

Από τις **ιδιότητες ηχοαπορρόφησης** του χώρου.

Το διάγραμμα RT60 ενός χώρου είναι κάπως έτσι:





Ο Wallace Clement Sabine έγινε γνωστός από **την εξίσωση** του:

$$RT60 = 0.161 \times \left[ \frac{V}{(S \times \alpha)} \right]$$

**α:** ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης  
**Sα:** [Sb]

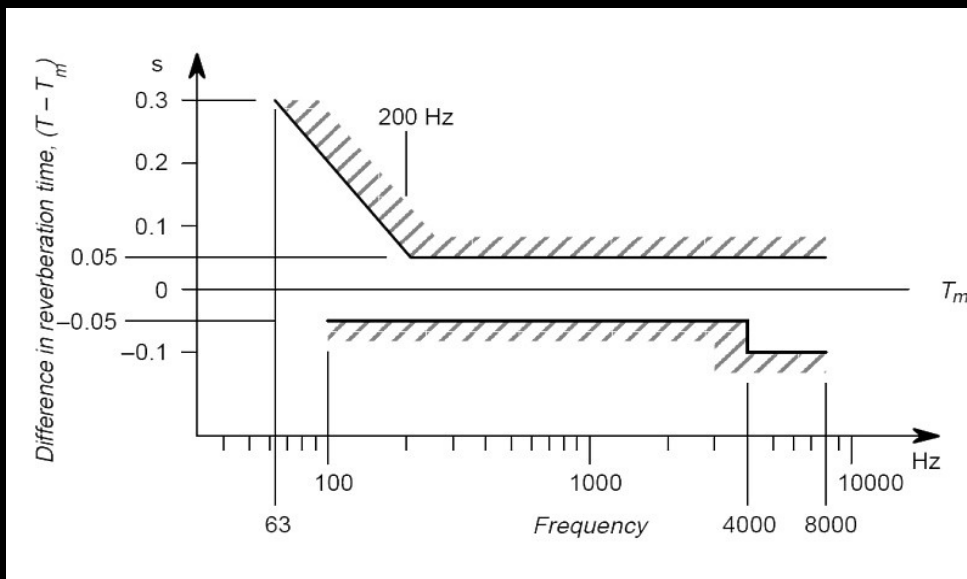
Αλλά, ένας χώρος έχει πολλές επιφάνειες και πολλά υλικά, οπότε:

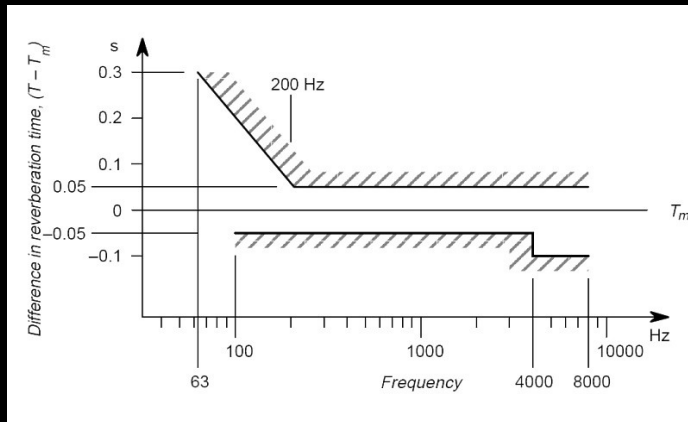
$$S \times \alpha = (S_1 \times \alpha_1) + (S_2 \times \alpha_2) + \dots + (S_n \times \alpha_n)$$

Οι συντελεστές α, βρίσκονται από πίνακες της βιβλιογραφίας και στο διαδίκτυο.

## Και ποιός είναι ο “σωστός” RT60;

Η EBU δίνει μια απάντηση στην σύσταση **EBU Tech. 3276** η οποία αφορά “μικρούς” χώρους και πραγματικά ηχεία σε πραγματικές θέσεις:





Το διάγραμμα αυτό:

Αφορά τον τρόπο με τον οποίο το RT60 **κυμαίνεται** σε σχέση με την συχνότητα

Επιθυμητοί χρόνοι αντήχησης:

“Μεγάλοι” χώροι: **1.5-5s**

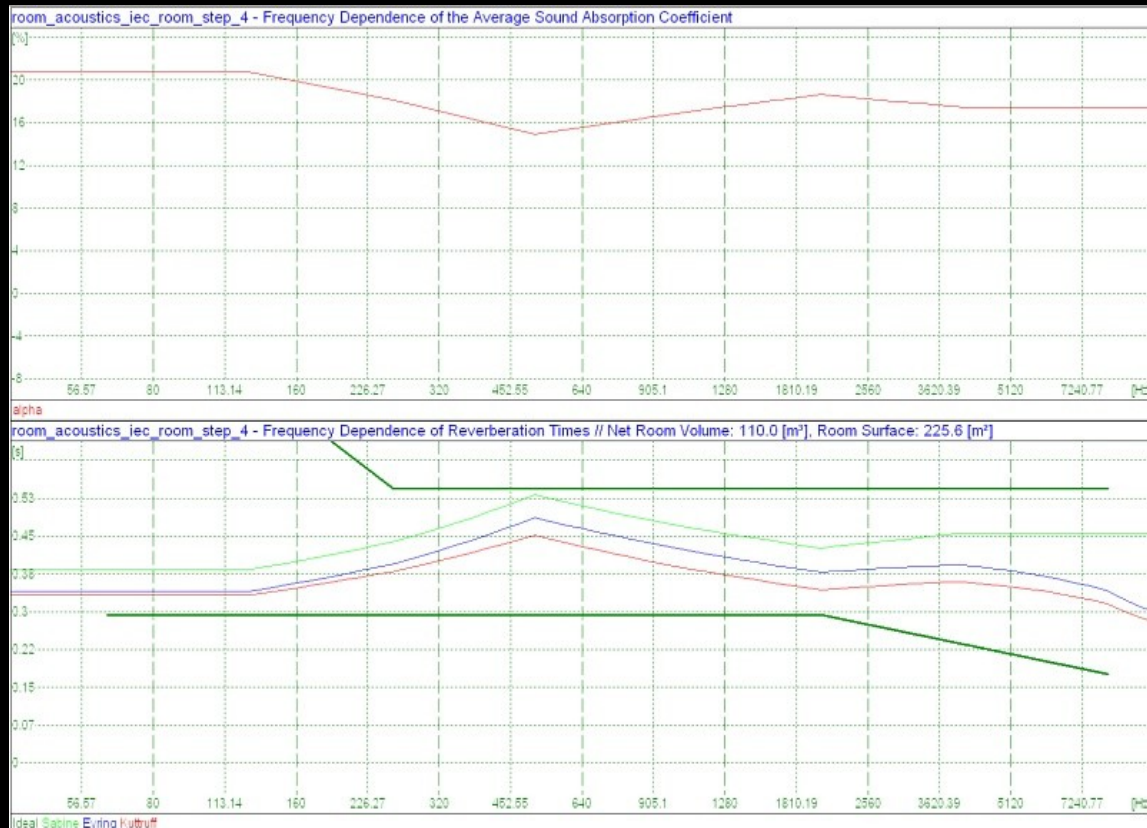
“Μικροί” χώροι (EBU): **200-400ms** (+/-0.05s @100Hz-4kHz)

“Μικροί χώροι (στην πράξη): **300-600ms**

## Ένας κακός χώρος στην πράξη:



## Ένας καλός χώρος στην πράξη:



Η αντήχηση στην πράξη

**Ανηχοϊκές συνθήκες:**

Δυσάρεστη αίσθηση - κλειστοφοβικός

**Μικρή αντήχηση:**

Χώρος μικρός και ξερός

**Μέτρια αντήχηση:**

Αίσθηση άνεσης και αέρα

**Μεγάλη αντήχηση:**

Χώρος μεγάλος και σπηλαιώδης

**Πολύ μεγάλη αντήχηση:**

Προβλήματα καταλήπτοτητας

Τί είναι ο ιδιορυθμός (eigenmode, normal mode, συντονισμός);

είναι η αρμονική (ημιτονοειδής) ταλάντωση ενός μηχανικού συστήματος του οποίου τα μέρη είναι συνδεδεμένα ελαστικά και υπόκειται σε μια συγκεκριμένη διέγερση.

Το ηχητικό κύμα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα τέτοιο σύστημα, επομένως μπορούμε να ορίσουμε ιδιορυθμούς.

Αλλά...

τί είναι πραγματικά ένας ιδιορυθμός; με τί μοιάζει;

Ας δούμε αυτό...

<http://www.falstad.com/membrane/>

Τους ιδιορυθμούς, στην ακουστική τους ονομάζουμε...

# Στάσιμα Κύματα



**Τα στάσιμα κύματα:**

διεγείρονται από την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων στα όρια του χώρου,

επομένως:

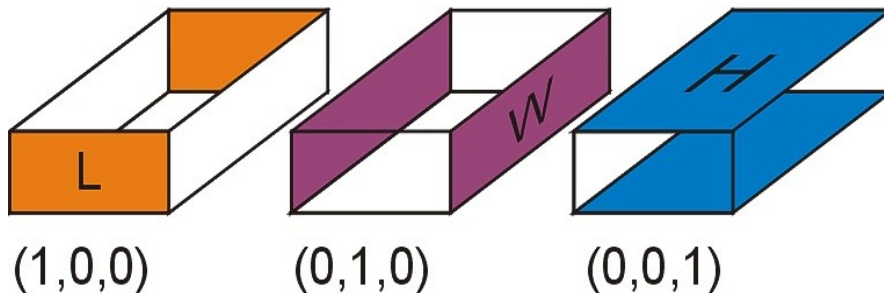
**Κάθε ζεύγος τοίχων, δημιουργεί στάσιμα κύματα**

και,

**Σε έναν κλειστό χώρο,  
έχουμε πάντα (μα πάντα!) στάσιμα κύματα**

Στην μελέτη της ακουστικής ενός χώρου, το στάσιμο κύμα ονομάζεται και **ρυθμός**.

Πρώτοι Αξονικοί Ρυθμοί σε παραλληλεπίπεδο δωμάτιο



Είδη ρυθμών:

**Αξονικοί**, διεγείρονται από διαδοχικές ανακλάσεις σε ζεύγη ορίων

**Πλάγιοι**, διεγείρονται από διαδοχικές ανακλάσεις σε όλα τα πλευρικά όρια

**Εφαπτομενικοί**, διεγείρονται από διαδοχικές ανακλάσεις σε όλα τα όρια.

**Μας ενδιαφέρουν:**

Οι πρώτοι αξονικοί ρυθμοί (επειδή είναι, μακράν οι ισχυρότεροι)

**Ευτυχώς**, οι ρυθμοί υπολογίζονται και θεωρητικά, αρκεί να γνωρίζουμε τις διαστάσεις του χώρου (μόνο!)

$$f = \left(\frac{c}{2}\right) \times \sqrt{\left(\frac{p^2}{L^2}\right) + \left(\frac{q^2}{W^2}\right) + \left(\frac{r^2}{H^2}\right)}$$

Αντικαθιστούμε τα p, q, r με αριθμούς, 0, 1, 2, ..., v, ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχοι ρυθμοί ως εξής:

**1,0,0** πρώτος αξονικός ρυθμός (μήκους)

**0,1,0** πρώτος αξονικός ρυθμός (πλάτους)

...

**1,1,0** πρώτος πλάγιος ρυθμός (μήκους πλάτους)

...

**2,0,0** δεύτερος αξονικός ρυθμός (μήκους)

...

**v,v,v** νιοστός εφαπτομενικός ρυθμός

Δηλαδή, οι ρυθμοί είναι **άπειροι!**

**Παράδειγμα:**

Ένας χώρος συμβατός με το πρότυπο IEC έχει διαστάσεις: 7.0x5.3x2.7m

η ταχύτητα του ήχου είναι: 340.29m/s

με βάση την εξίσωση:

$$f = \left(\frac{c}{2}\right) \times \sqrt{\left(\frac{p^2}{L^2}\right) + \left(\frac{q^2}{W^2}\right) + \left(\frac{r^2}{H^2}\right)}$$

**1,0,0:** 24.3Hz

**0,1,0:** 32.1Hz

**0,0,1:** 63.0Hz

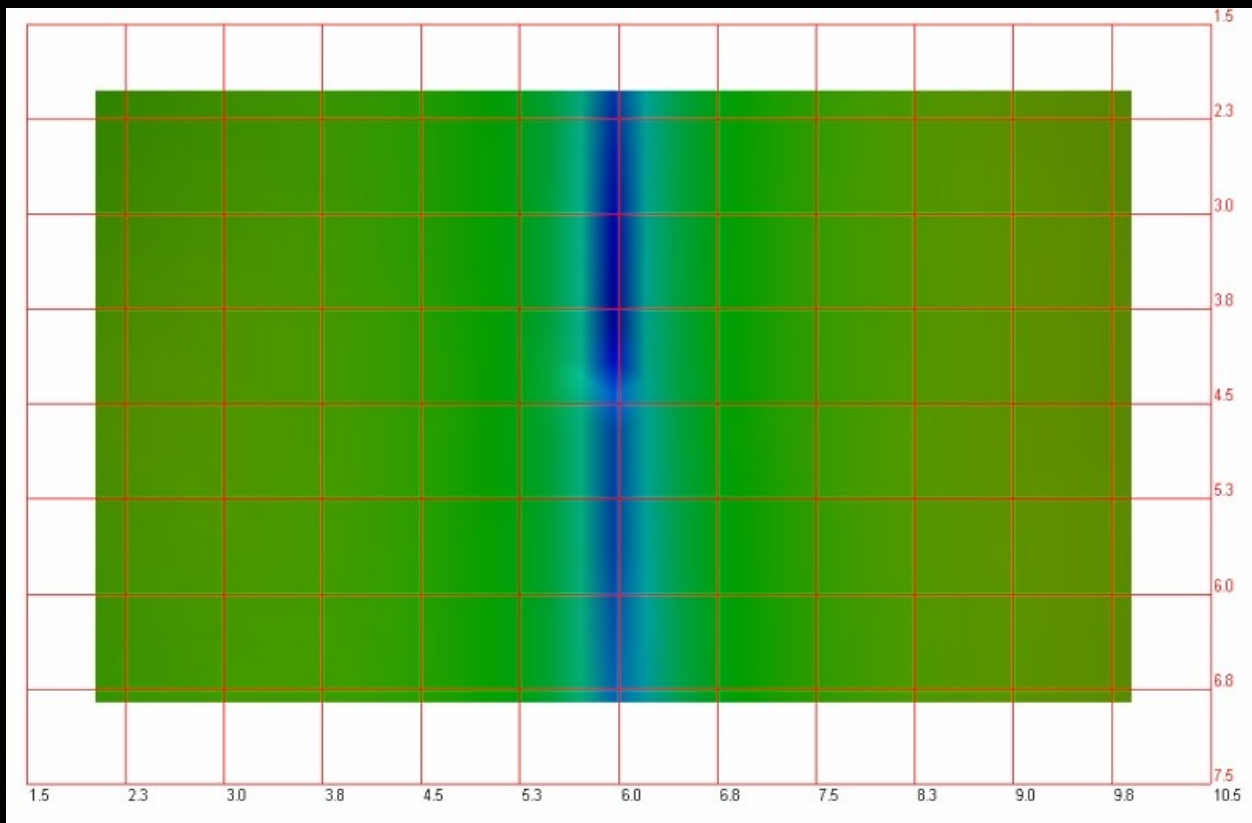
**Τι θα γίνει αν το L=W=7m;**

Θα έχουμε: 1,0,0=0,1,0=24.3Hz!

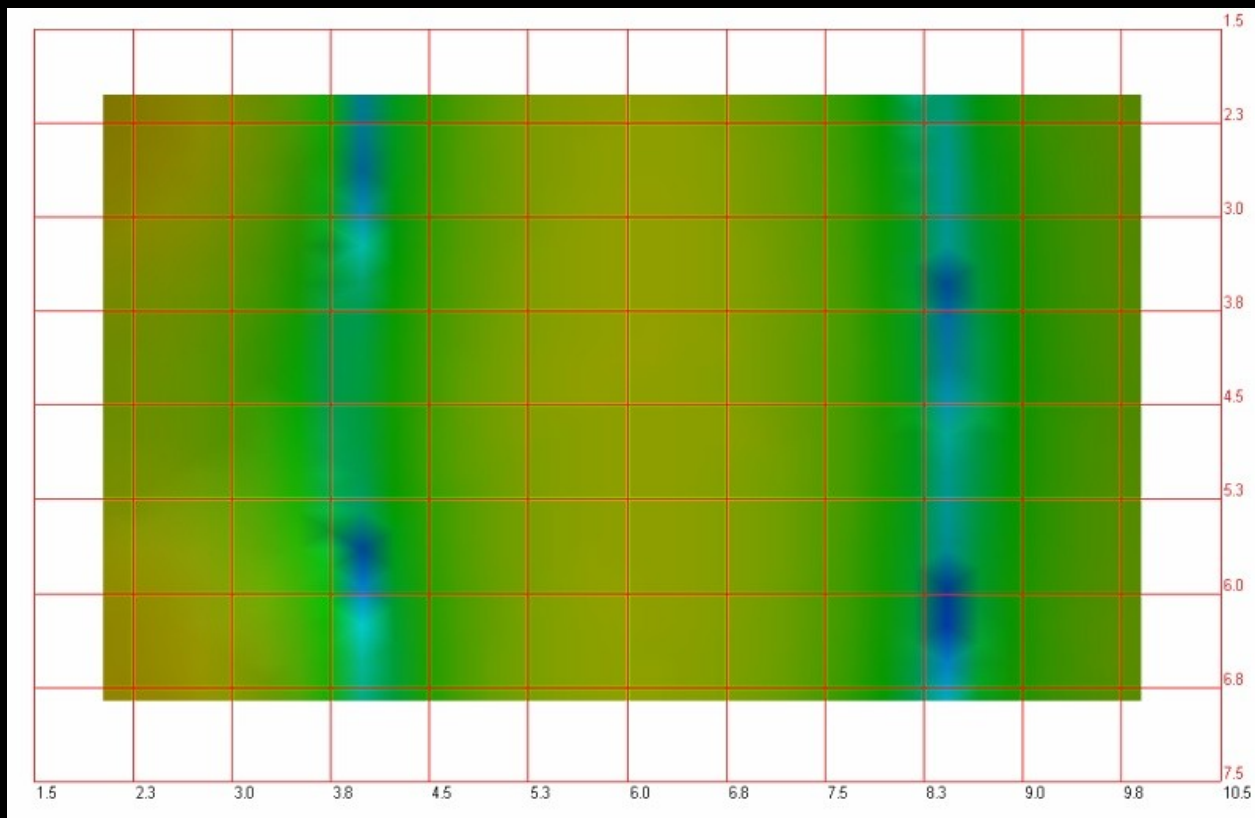
Η σύμπτωση των ρυθμών

**απαγορεύεται!**

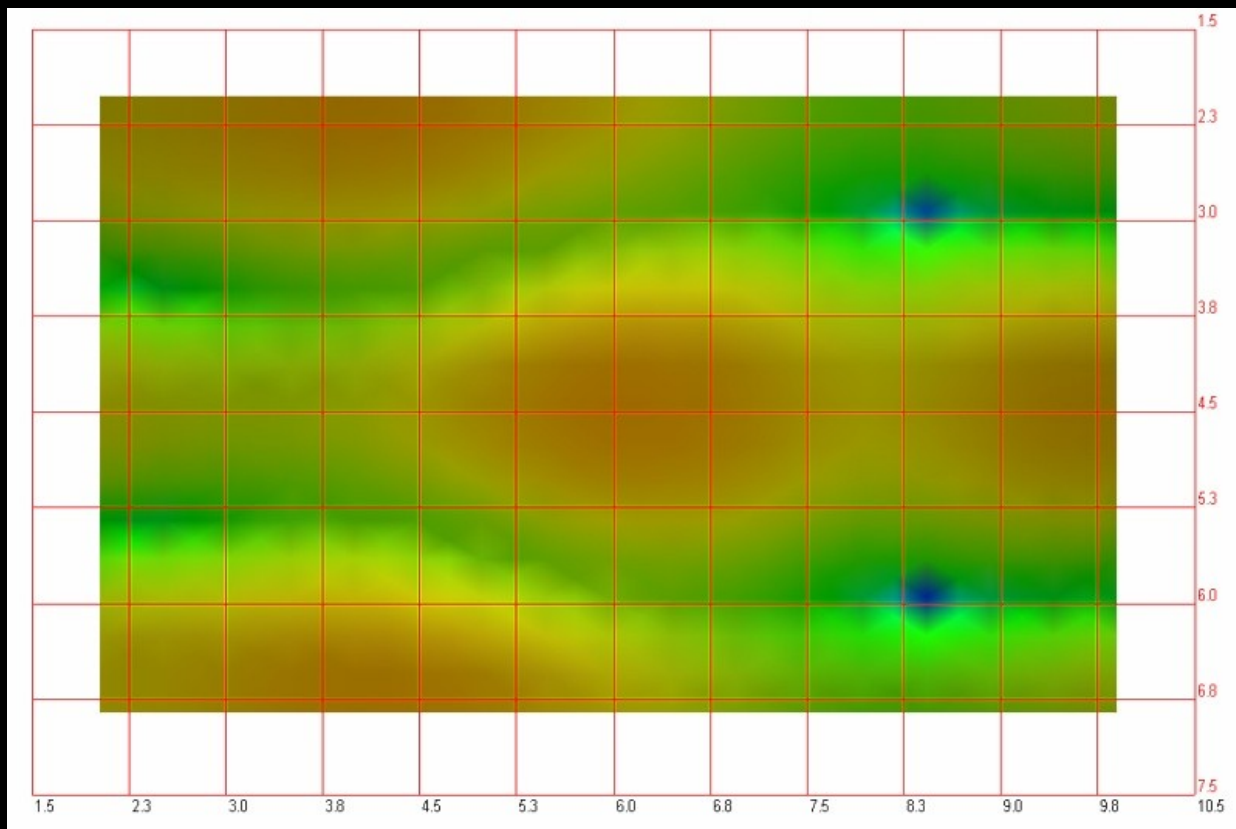
1,0,0

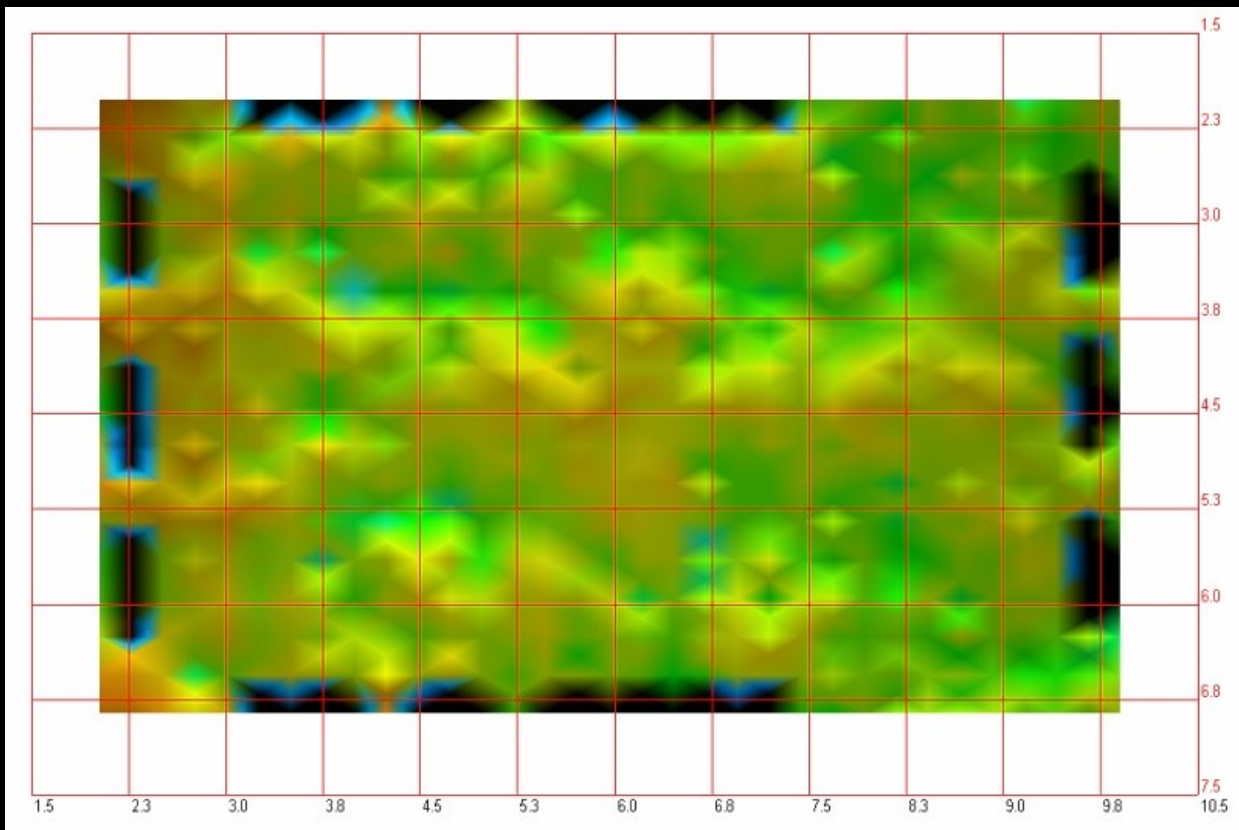


2,0,0



0,2,0



**Δωμάτιο IEC, με προσθήκες**



**Κριτήρια επιλογής** χώρων με βάση τους αξονικούς ρυθμούς:

**Απαγορεύεται η σύμπτωση των αξονικών ρυθμών!**

Απαγορεύεται η σύμπτωση των αξονικών ρυθμών!

Δηλαδή:

Να αποφεύγονται χώροι με διαστάσεις που έχουν σχέση ισότητας ή ακέραιου πολλαπλάσιου.

**Απαγορεύεται η μερική σύμπτωση των αξονικών ρυθμών**

Δηλαδή:

οι ρυθμοί δεν πρέπει να είναι πολύ κοντά γιατί διεγείρουν συντονισμούς με ευρύ Q

Κριτήριο Gilford:  $f_2 - f_1 > 20\text{Hz}$

**Απαγορεύεται η μεγάλη απόσταση μεταξύ των αξονικών ρυθμών**

Δηλαδή:

οι ρυθμοί δεν πρέπει να διαχωρίζονται στο φάσμα πολύ ώστε να κινδυνεύουν να εκληφθούν ως ξεχωριστοί χρωματισμοί.

Κριτήριο Bonello:  $|f_1 - f_2| < 5\%$

Κριτήριο καταλληλότητας με βάση τις αναλογίες:

Κατά τον:	H [m]	W [m]	L[m]
<b>Sepmeyer (i)</b>	1.00	1.14	1.39
<b>Sepmeyer (ii)</b>	1.00	1.28	1.54
<b>Sepmeyer (iii)</b>	1.00	1.60	2.33
<b>Louden (i)</b>	1.00	1.40	1.90
<b>Louden (ii)</b>	1.00	1.30	1.90
<b>Louden (iii)</b>	1.00	1.50	2.50
<b>Volkmannn</b>	1.00	1.50	2.50
<b>Bonner</b>	1.00	1.60	1.59

Τυποποιημένα δωμάτια:

<b>IEC 60268 -13</b>	2.70	5.30	7.00
<b>IEC 60268 -13</b>	2.80	4.20	6.70

## Τι είναι η ανάκλαση;

ανάκλαση είναι η αλλαγή της πορείας του ήχου όταν αυτή συναντήσει ένα εμπόδιο στον χώρο. Θεωρούμε ότι η διάδοση γίνεται ευθύγραμμα και ότι ισχύει ο νόμος της οπτικής περί γωνιών πρόσπτωσης και ανάκλασης.

Μία ανάκλαση:

**Έπεται** πάντοτε της άφιξης του αρχικού ηχητικού μετώπου.

Διαθέτει ένα **φάσμα** που μπορεί να είναι το ίδιο ή διαφορετικό με αυτό του προσπίπτοντος ήχου.

Στην περιοχή “D” στην οποία δεχόμαστε ότι ισχύει η γεωμετρική ακουστική, οι ανακλάσεις είναι υπεύθυνες για την **αντήχηση**.

## Διάγραμμα κρουστικής απόκρισης/αντήχησης



Οι ανακλάσεις:

αν είναι πρώιμες **επιδρούν στο sound stage** (διεύρυνση)

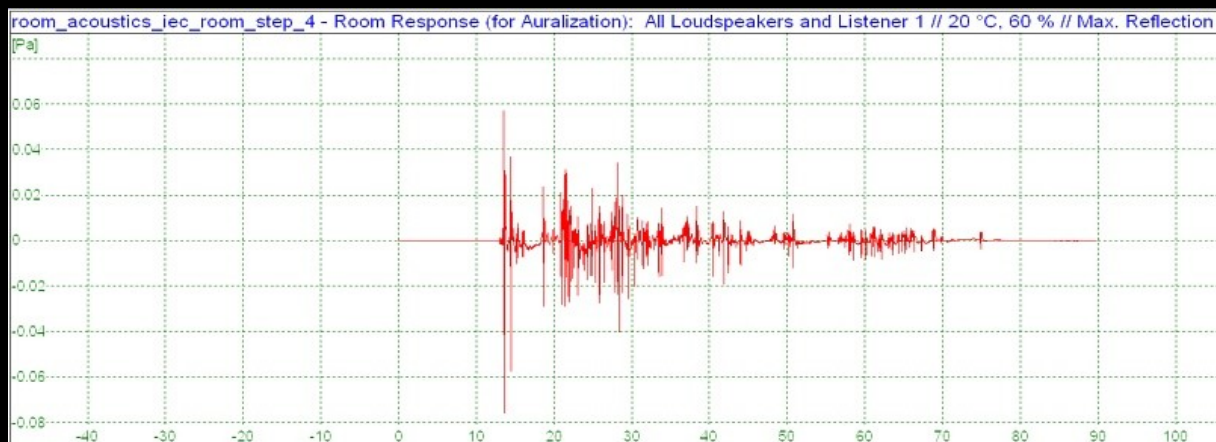
δημιουργούν **αίσθηση του χώρου** σε συνδυασμό με την αντήχηση (ίδια αντήχηση/διαφορετικό είδος ανακλάσεων=διαφορετική αίσθηση!)

βελτιώνουν την **αντίληψη μικρολεπτομερειών** λόγω επανάληψης (ειδικά συντονισμούς χαμηλού Q)

δημιουργούν **προβλήματα συμβολής** (combining) ειδικά αν προέρχονται από κατεύθυνση που πλησιάζει αυτήν της άμεσης ακτινοβολίας

δεν επηρεάζουν την **αντίληψη της κατεύθυνσης** λόγω του φαινομένου Haas (Precedence effect, 50ms)

**Η κρουστική απόκριση είναι χαρακτηριστική των ανακλάσεων!**



Από τις ανακλάσεις στα ηχητικά πεδία:

Άλλο η σταθερή κατάσταση (steady state), άλλο η μουσική!

Στην πράξη δεν αντιμετωπίζουμε ανακλάσεις, αλλά πεδία ανακλάσεων:

### **Το εγγύς πεδίο (near field):**

Σε πολύ μικρή απόσταση από την πηγή, εξαρτάται από αυτήν. Δεν ισχύει η παραδοχή της ομοιότροπης-σφαιρικής διάδοσης και του  $1/r^2$

### **Το άμεσης ακτινοβολίας (free field):**

Εκτείνεται μεταξύ near field και κρίσιμης απόστασης  $r$ :

$$r = 0.1 \times \sqrt{\frac{V}{(\pi \times RT60)}}$$

Σφαιρική διάδοση, 6dB, λόγος άμεσου/ανακλώμενου ήχου μεγάλος.

### **Το πεδίο αντήχησης (reverberant/far field):**

Εκτείνεται μετά την κρίσιμη απόσταση δεν ισχύει το  $1/r^2$ , λόγος άμεσου ανακλώμενου ήχου μικρός, επικρατούν οι ανακλάσεις.

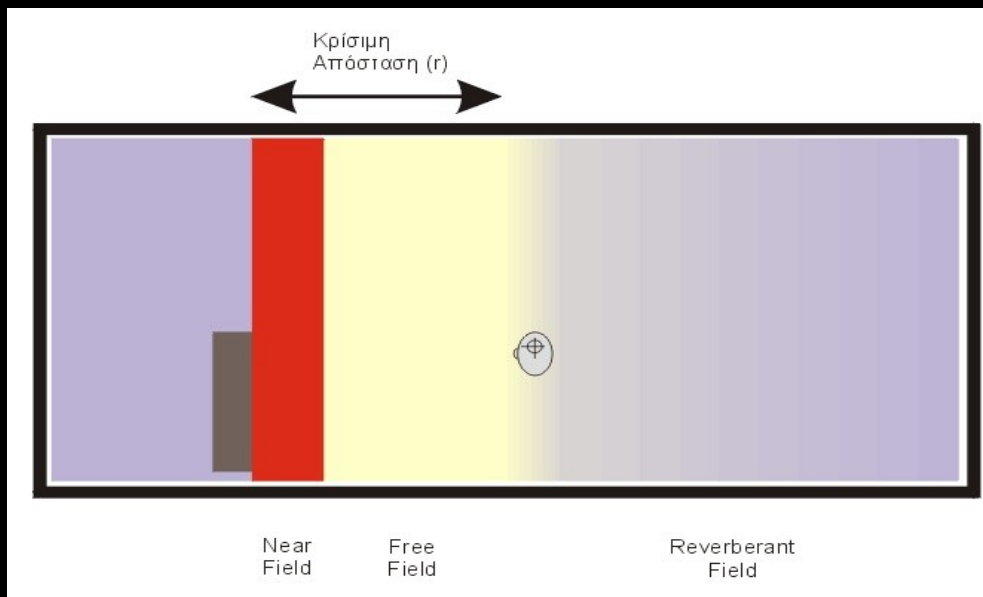
Τα ηχεία "near field" είναι στην πράξη σχεδιασμένα για ακροάσεις free field από μικρή απόσταση!

Δωμάτιο IEC 60268-13/500ms:  $r=0.8\text{m}$

Δωμάτιο IEC 60268-13/200ms:  $r=1,3\text{m}$

Για  $r=2\text{m}$  και  $RT60=500\text{ms}$ :  $12.0 \times 19.0 \times 2.7\text{m}$

**Οι ακροάσεις free field είναι δύσκολη υπόθεση!**





## Έχουν οι ανακλάσεις “απόκριση συχνότητας”;

Ναι!

Η θετική συνεισφορά των ανακλάσεων ισχύει όσο το περιεχόμενό τους **είναι ίδιο** με αυτό του αρχικού ήχου.

Δηλαδή:

Πρέπει να εξασφαλίζουμε ή τέλεια ανάκλαση ή τέλεια απορρόφηση/διάχυση (το φαινόμενο του χαλιού)

Η απόκριση off-axis του ηχείου καθορίζει το πόσο καλή απόδοση θα έχουμε στο far field.

**Κακή απόκριση off axis** – ακρόαση στο free field

**Καλή απόκριση off axis** – ακρόαση στο far field

Επιλογή χώρου:

**Κριτήρια Αντήχησης:**

Ο χώρος πρέπει να έχει την “σωστή” αντήχηση: 300-600ms

Οι παράλληλες επιφάνειες δημιουργούν flutter-echo

**Κριτήρια Κυματικής ακουστικής:**

Αναλογίες διαστάσεων

Φασματική σχέση αξονικών ρυθμών

Οι μη κανονικοί ( shoe box) χώροι είναι καλοί αλλά μη ελεγχόμενοι!

**Κριτήρια Γεωμετρικής ακουστικής:**

Διατήρηση του φάσματος των ανακλάσεων

Προσπάθεια για δημιουργία ενός επαρκούς free field

Όμως...

**Παίζει ρόλο και η θέση των ηχείων!**

Το ηχείο “βλέπει” τον χώρο

Επομένως η θέση του:

παίζει ρόλο στο **πώς αυτό διεγείρει τον χώρο** και τους ρυθμούς του.

Η ιδανική θέση του ηχείου εξαρτάται από το τι είδος πηγής είναι:

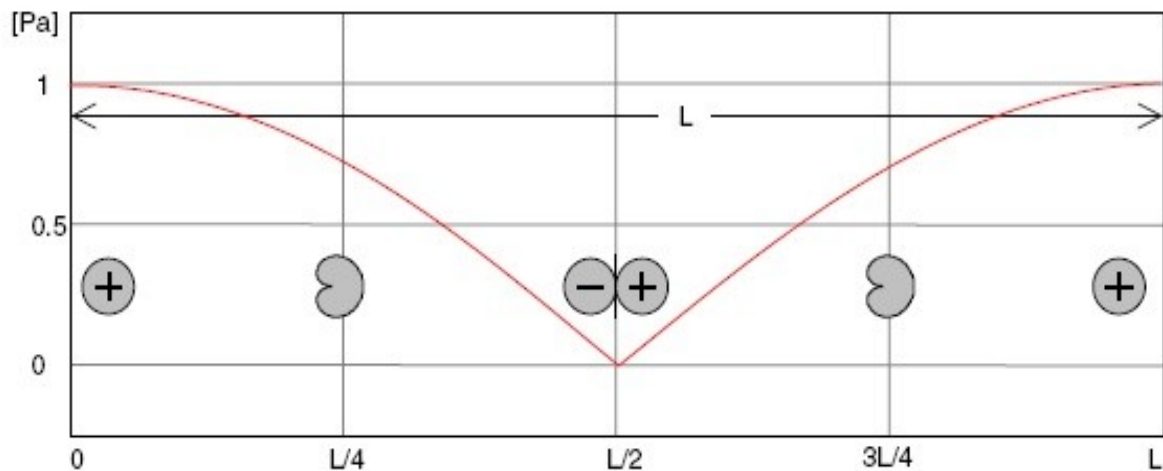
**Πηγή πίεσης** (σήμα-σε-πίεση): κοντά στα όρια του χώρου όπου η πίεση είναι μέγιστη

**Πηγή ταχύτητας** (σήμα-σε-ταχύτητα): μακριά από τα όρια του χώρου όπου η ταχύτητα είναι η μέγιστη.

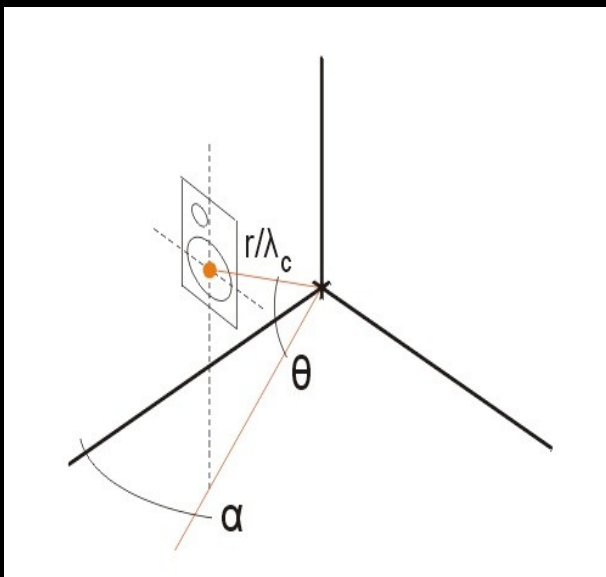
Επομένως αλλού τοποθετούνται τα δίπολα/καρδιοειδή και αλλού τα κλασικά/παντοκατευθυντικά.

Παίζει ρόλο στο πώς ο χώρος “φορτίζει” το ηχείο και σχετίζεται με την **αντίσταση** που εξασκούν στην κίνηση των μονάδων του τα κύματα που επιστρέφουν (αντίσταση ακτινοβολίας). Η θέση των ορίων παίζει ρόλο και επηρεάζει την απόκριση. (ο κλασικός κανόνας των 3dB/τοίχο, ισχύει!)

## Είδος πηγής και θέση στον χώρο σε σχέση με έναν ρυθμό



Q Ηχείου	$\theta$	$\alpha$	$r/\lambda$
1.414	40	25	0.400
1.000	25	30	0.400
0.707	20	30	0.315
0.500	30	15	0.200



Κριτήριο Ballagh:

Ηχείο ακουστικής ανάρτησης  
 $\lambda = cf$ , το μήκος κύματος στην  
 συχνότητα συντονισμού του  
 ηχείου.

$\theta$ , γωνία που καθορίζει το  
 ύψος

$\alpha$ , γωνία που καθορίζει την  
 απόσταση από τον πλάγιο  
 τοίχο

$r$ , η απόσταση από την γωνία.

Έλεγχος της ακουστικής ενός χώρου:

### Παθητικός έλεγχος

Ηχοαπορρόφηση

Διάχυση

**Σημαντικό:** Στον παθητικό έλεγχο, τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού παίζουν ρόλο!

### Ενεργός έλεγχος

Ρύθμιση φάσης και διέγερσης ρυθμών με πολλαπλά υπογούφερς (Floyd Toole/Harman)

Ισοστάθμιση στο πεδίο της συχνότητας (γραφικοί και παραμετρικοί ισοσταθμιστές)

Ισοστάθμιση στο πεδίο του χρόνου (DSP, υπολογισμός κρουστικής απόκρισης, κρουστικής απόκρισης-στόχου, συνέλιξη)

Ακούστε στην έκθεση:

Δωμάτιο: 408 (Σύστημα Lyngdorf)

Δωμάτιο: 426 (Σύστημα Copland)

## Τι μπορεί να κάνει ένας ψηφιακός ισοσταθμιστής; (Copland DRC-205)





**Για περισσότερο διάβασμα:**

01. Εγχειρίδιο Ακουστικής, F. Alton Everest, Εκδόσεις Τζιόλα, 1998
02. Fundamentals of Acoustics, R.Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sanders, Wiley, 1982
03. Effects of Loudspeaker Placement on Listener Preference Ratings, S.E. Olive, P.L.Schuck, S.L. Sally, M.E. Bonneville, JAES Vol.42 No.9
04. The Detection Of Reflections in Typical Rooms, S.E. Olive, F.E. Toole, JAES Vol.37 No.7/8
05. The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms, F.E. Toole, AES 109th Convention preprint
06. Optimum Loudspeaker Placement Near Reflecting Planes, K.O. Ballagh, JAES Vol.31, No.12
07. A New Criterion for the Distribution of Normal Modes, O.J. Bonello, JAES Vol.29, No.9
08. Loudspeakers And Rooms for Sound Reproduction – A Scientific Review, F.E. Toole, JAES, Vol.54, No. 6
09. Listening conditions for the assessment of sound programme material, EBU Tech 3276 -snd Edition, May 1998
10. Oscillating Membrane Simulation Java Applet, Paul Falstad's Home page, <http://www.falstad.com/membrane/> , (τελευταία πρόσβαση: 29/09/2008)
11. The Acoustic Design of Talks Studios and Listening Rooms, C.L. Gilford, JAES Vol.27, No.1/2
12. Sengpiel Audio (Eberhard Sengpiel), Absorption coefficients  $\alpha$  of Building Materials and Finishes, <http://www.sengpielaudio.com/calculator-RT60Coeff.htm>, (τελευταία πρόσβαση: 29/09/2008)
13. The beneficial coupling of cardioid low frequency sources to the acoustic of small rooms, L. Ferekidis, U. Kempe, AES 116th Convention preprint
14. Συζήτηση στο avmentor forum:  
<http://www.avmentor.eu/forum/showthread.php?t=314> (απαιτείται login)

**Επίσης:**

[http://www.avmentor.gr/howto/room\\_acoustics\\_0.htm](http://www.avmentor.gr/howto/room_acoustics_0.htm)

**Για περισσότερα KnowHow Sessions:**

e-mail: [contact@avmentor.gr](mailto:contact@avmentor.gr)

## Ερωτήσεις - Συζήτηση