

Ακουστική και Ψυχοακουστική

Διάλεξη 6: “Υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου και εφαρμογές”

Φλώρος Ανδρέας
Επίκουρος Καθηγητής

Από το προηγούμενο μάθημα...

- Γενικευμένη θεώρηση ακουστικών συστημάτων
 - Μοντελοποίηση επίδρασης παραμορφώσεων
 - ▶ Προσθετικού θορύβου
 - Γραμμικών και μη γραμμικών παραμορφώσεων
- Υποκειμενική αντίληψη του ήχου
 - Η φυσιολογία της ανθρώπινης ακοής
 - Η απόκριση του συστήματος της ανθρώπινης ακοής

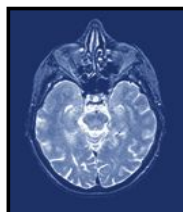
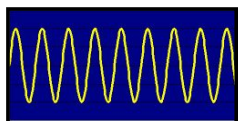


Από το προηγούμενο μάθημα...

Φυσική

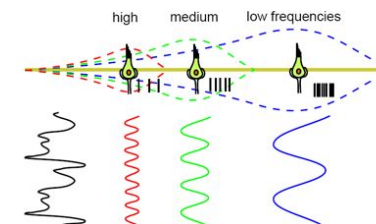
Φυσιολογία

Αντίληψη



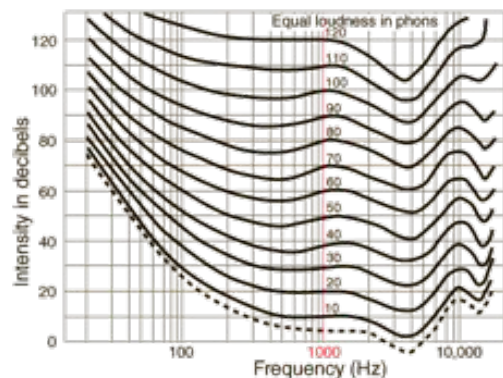
Από το προηγούμενο μάθημα...

- Εξωτερικό αυτί (outer ear)
 - Συλλογή ήχου
- Μέσο αυτί (Middle ear)
 - Μηχανικός μετατροπέας
- Έσω αυτί
 - Μετατροπή συχνότητας σε θέση
 - Ανάλυση Fourier
- Ακουστικό νεύρο / εγκέφαλος
 - Αντίληψη συχνότητας (ύψους) και χροιάς
 - Χωρική σύνθεση (Δεξί – Αριστερό)
 - Αναγνώριση ήχου (μουσική, κίνδυνος, ομιλία)

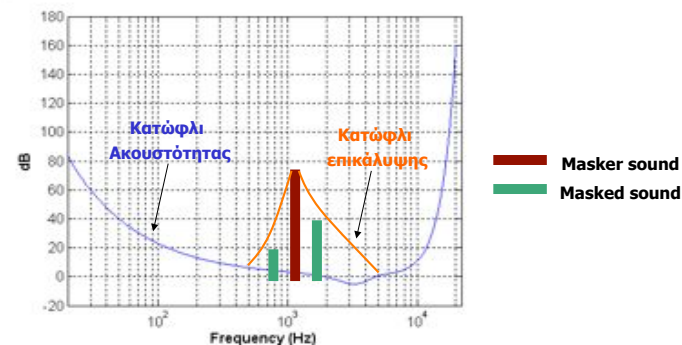


Από το προηγούμενο μάθημα...

- Ακουστότητα



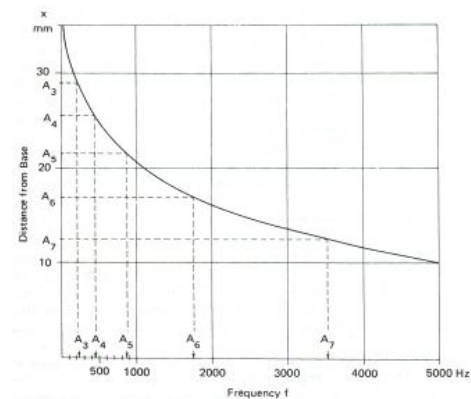
Το φαινόμενο της ακουστικής επικάλυψης



Critical band – βασική περιγραφή

- Το εύρος των συχνοτήτων όπου δύο τόνοι ακούγονται σαν ένας
 - Ψυχοακουστική
- Η περιοχή της βασικής μεμβράνης που ταλαντώνεται υπό την παρουσία ενός τόνου (μέσο μήκος ~1mm)
 - Φυσιολογία
- Οι CBs «υλοποιούνται» σαν ζωνοδιαβατά φίλτρα που χωρίζουν τις συχνότητες του ήχου σε «μονάδες αντίληψης»
 - units of perception

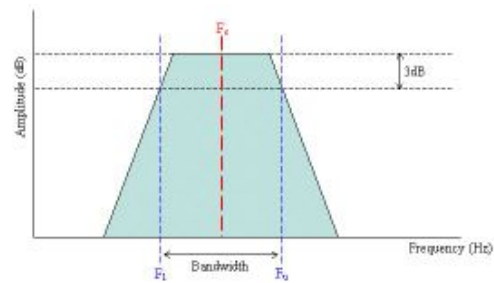
Critical band – βασική περιγραφή (2)



From: Juan G. Roederer, The Physics and Psychophysics of Music

Ακουστικά (auditory) φίλτρα

- Το ακουστικό σύστημα (auditory system) αποτελείται από μία τράπεζα επικαλυπτόμενων ζωνοδιαβατών φίλτρων

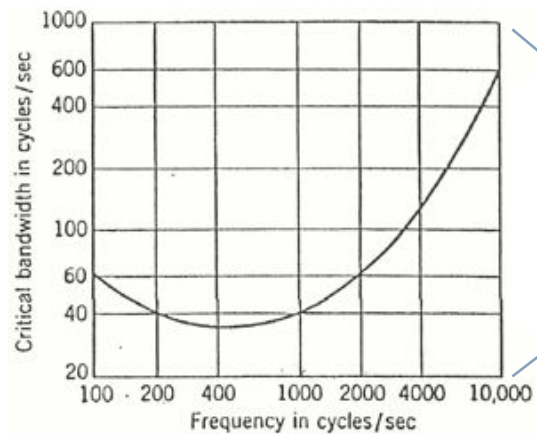


Ακουστικά (auditory) φίλτρα (2)

- Υλοποίηση πάνω στη βασική μεμβράνη το κοχλία
 - Αυξάνουν τη συχνотική του ευαισθησία / ακρίβεια
 - ... και την διακριτική ικανότητα του ανθρώπου στη συχνότητα
- Το εύρος ζώνης τους (critical bandwidth) αυξάνει κινούμενοι από την κορυφή (apex) προς τη βάση (base) της βασικής μεμβράνης



Ακουστικά (auditory) φίλτρα (3)



Εύρος των critical bands ως συνάρτηση της συχνότητας

Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής - Ύψος

- Ύψος (pitch)
 - Η «υποκειμενική» απόκριση του αυτιού στη συχνότητα
 - Μας επιτρέπει να κατατάξουμε τους ήχους σε οξείς, μέσους, βαρείς
- Με «αντικειμενικά» κριτήρια, αλλαγή του ύψους μπορεί να συμβεί:
 - Με αλλαγή της συχνότητας ταλάντωσης της πηγής
 - Με μεταβολή του μήκους του υλικού που ταλαντώνεται (π.χ. χορδή)
 - Με μεταβολή του πάχους του υλικού

Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής - Ύψος (2)

- Το ύψος μεταβάλλεται μη γραμμικά με τη συχνότητα
 - Ίσες μεταβολές στη συχνότητα δεν προκαλούν ίδιες μεταβολές στην «αίσθηση» του ύψους
- Καθοριστικό ρόλο παίζει και η στάθμη του ήχου
 - Αν η στάθμη ενός τόνου 180Hz αυξηθεί χωρίς αλλαγή της συχνότητας, η αίσθηση του ύψους χαμηλώνει
 - ▶ Φαινόμενο ιδιαίτερα ισχυρό για συχνότητες μικρότερες των 300Hz
 - Από 500 έως 3000Hz η στάθμη δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το ύψος
 - Πάνω από 4000Hz η αίσθηση του ύψους για την ίδια συχνότητα αυξάνει με τη στάθμη



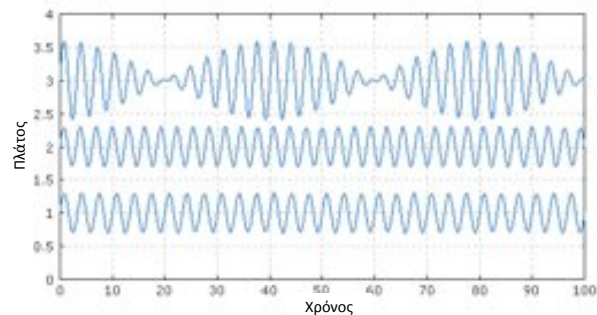
Lecture06_1.m



Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής - Ύψος (3)

- Μονάδα μέτρησης το Mel (Melody)
 - Ήχος συχνότητας 1kHz και στάθμης 60dB έχει ύψος 1000Mel
 - 2000Mel: ο ήχος που (υποκειμενικά) έχει διπλάσιο ύψος από τον προηγούμενο ανεξαρτήτως συχνότητας
- Ο άνθρωπος έχει περιορισμένη διακριτική ικανότητα συχνοτήτων
 - Εάν οι κεντρικές συχνότητες f_1 και f_2 δύο ήχων είναι πολύ κοντινές, ο διαχωρισμός τους είναι δύσκολος έως αδύνατος
 - ▶ Οι περιοχές της βασικής μεμβράνης που διεγείρονται είναι πολύ κοντά
 - Διακρότημα: $\Delta f < 16\text{Hz}$
 - Ο εγκέφαλος «αναγνωρίζει» ήχο με συχνότητα $(f_1+f_2)/2$ και πλάτους που μεταβάλλεται με συχνότητα $(f_1-f_2)/2$
 - ▶ $f_1 > f_2$

Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής - Ύψος (4)

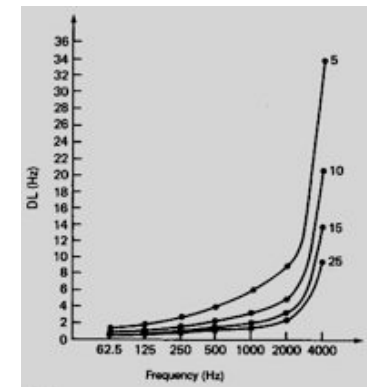


Lecture06_2.m



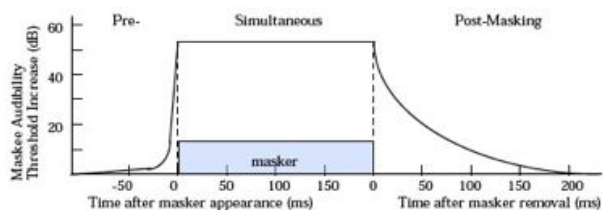
Just Noticeable Differences (JND)

- Μόλις ακουστή διαφορά του ύψους
- Συνάρτηση της
 - συχνότητας
 - της έντασης της ακουστότητας
- Για το μεγαλύτερο εύρος της ακουστικής περιοχής συχνοτήτων, η διακριτική ικανότητα του ανθρώπου είναι τα 3Hz
- Μεγάλη εξάρτηση από άνθρωπο σε άνθρωπο
 - Μουσική εκπαίδευση



Temporal masking

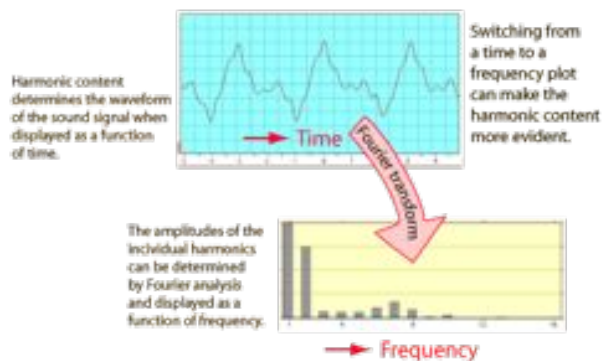
- Κάποιος ήχος «καλύπτει» ήχους που προηγούνται ή έπονται χρονικά
 - Backward masking ή pre-masking
 - Forward masking ή post-masking
- Εφαρμογή: Audio watermarking



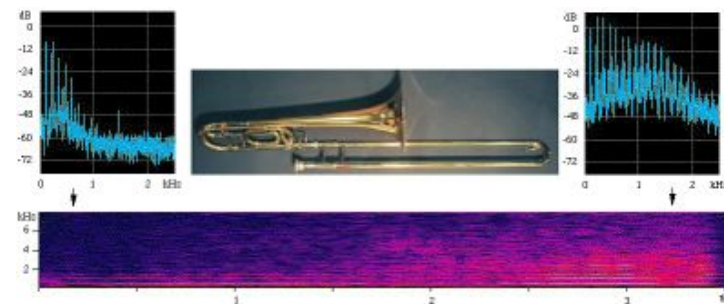
Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής – Χροιά

- Χροιά (timbre): «Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που κάνουν δυνατό το διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας»
 - Χρησιμοποιείται κυρίως για τον χαρακτηρισμό ήχων μουσικών οργάνων και ανθρώπινης φωνής
 - ▶ Π.χ. Φλάουτο και όμποε ακούγονται διαφορετικά αν και παίζουν την ίδια νότα
- Η διαφοροποίηση της χροιάς οφείλεται κυρίως στη διαφορά του πλήθους και της σχετικής στάθμης των αρμονικών ως προς τη στάθμη της θεμελιώδους συχνότητας
- Ο αντίστοιχος φυσικός όρος είναι το φάσμα...

Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής – Χροιά (2)

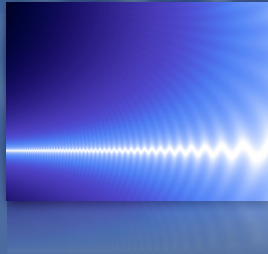


Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ακοής – Χροιά (3)

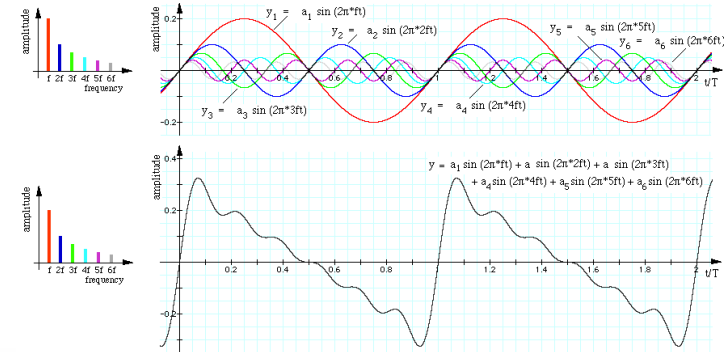


Demo: Trombone crescendo

Αρμονική σύνθεση

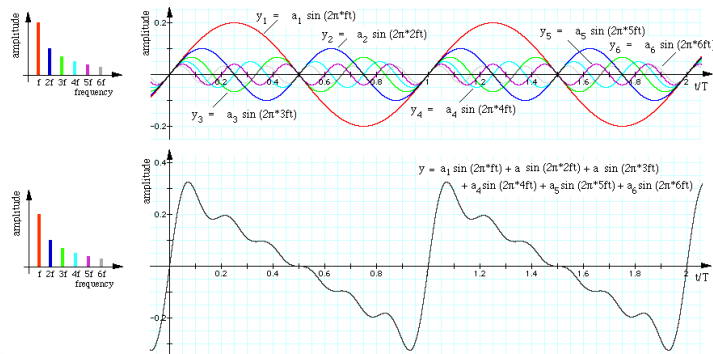


Σύνθεση ήχων από αρμονικές



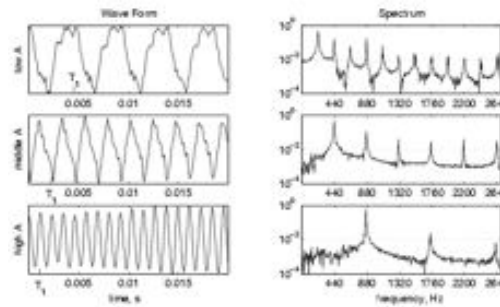
Οι αρμονικές

Σύνθεση ήχων από αρμονικές



Η μελωδία

Παράδειγμα: νότες πιάνου



A3 (low A)

A4 (middle A)

A5 (high A)

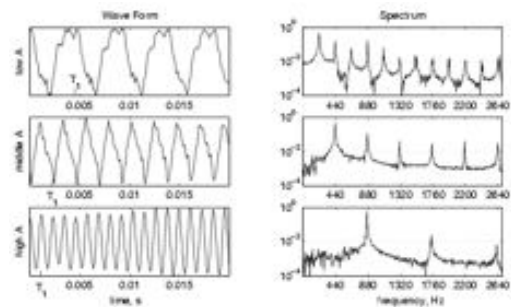


Demo

Lecture06_3.m



Παράδειγμα: νότες πιάνου



A3 (low A)

A4 (middle A)

A5 (high A)

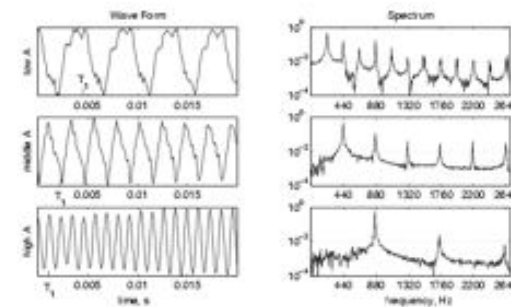


Demo

Lecture06_3.m



Παράδειγμα: νότες πιάνου



A3 (low A)

A4 (middle A)

A5 (high A)

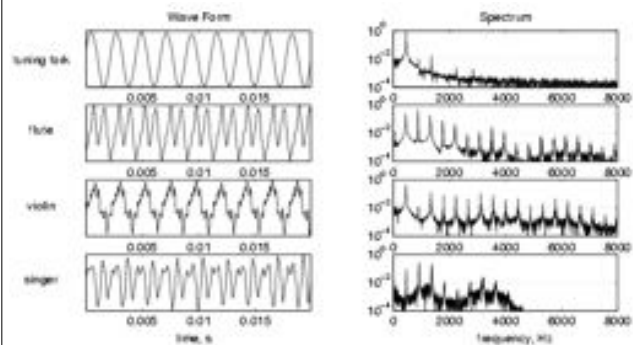


Demo

Lecture06_3.m



Παράδειγμα: η νότα A4



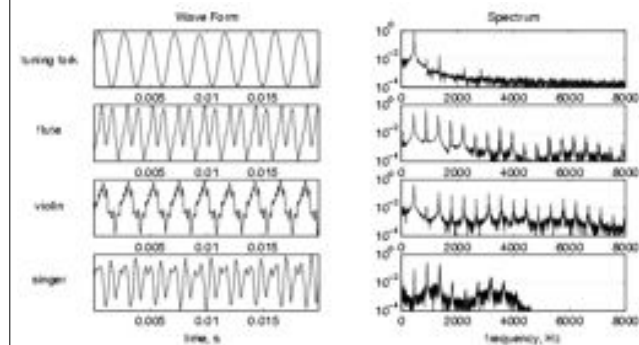
Διαπασών

Φλάουτο

Βιολί

Τραγουδιστής

Παράδειγμα: η νότα A4



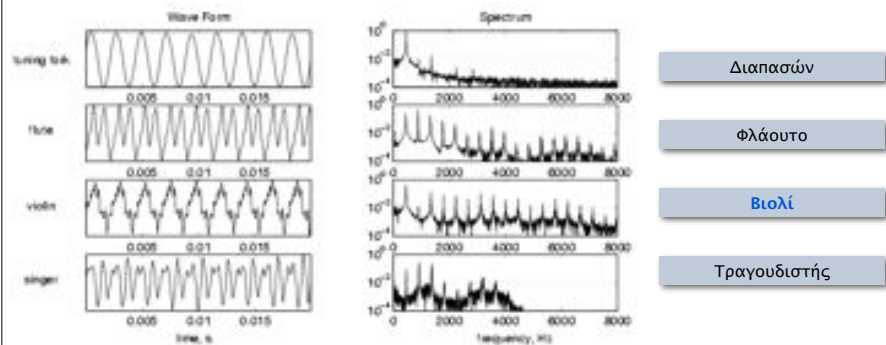
Διαπασών

Φλάουτο

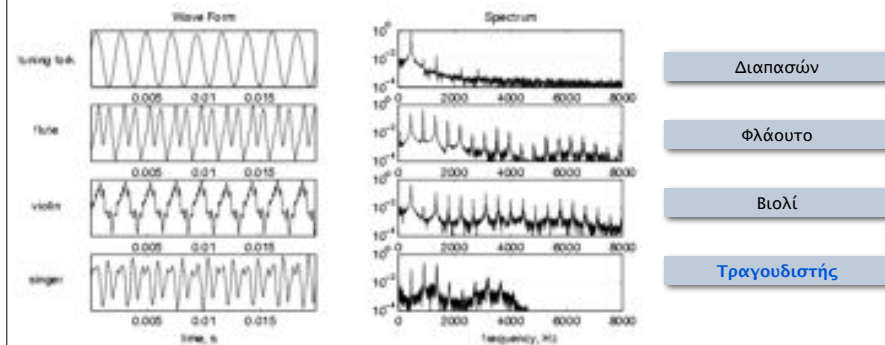
Βιολί

Τραγουδιστής

Παράδειγμα: η νότα Α4



Παράδειγμα: η νότα Α4



Σύνθεση ήχου - μερικά παραδείγματα

Τρομπέτα

Frequency	Amplitude
252.5	1.1538
x2	5.1282
x3	9.6795
x4	19.423
x5	2.948
x6	3.9744
x7	1.5385

Όμποε

Frequency	Amplitude
358.6	0.5250
x2	0.5135
x3	0.8048
x4	0.6202
x5	0.5712

Φλάουτο

Frequency	Amplitude
252.5	0.0305
x2	0.0076
x3	0.0030
x4	0.0021
x5	0.0034
x6	0.0289
x7	0.0037



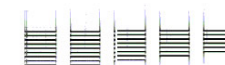
Demo

SynthesizeSound.m



Virtual pitch

- Τί γίνεται όταν λείπει η θεμελιώδης συχνότητα;



Missing fundamental

Εναλλακτικές τεχνικές σύνθεσης ήχων

- Additive synthesis
- Subtractive synthesis
- Frequency Modulation (FM) synthesis
- Physical modeling
 - Αλγοριθμική / αναλυτική μοντελοποίηση μουσικών οργάνων



Ακουστικές “οφθαλμαπάτες”



Shepard tones

- Αναπαραγωγή διαφορετικών τόνων (Shepard tones)
- Κάθε j -τόνος έχει θεμελιώδη συχνότητα που απέχει από τον προηγούμενο απόσταση ημιτονίου ($1/12$ οκτάβας):
$$f_o \cdot 2^{j/12}$$
- Κάθε j -τόνος αποτελείται από το άθροισμα της θεμελιώδους και πεπερασμένου πλήθους αρμονικών με τάξη δυνάμεις του 2:

$$f_o \cdot 2^i$$

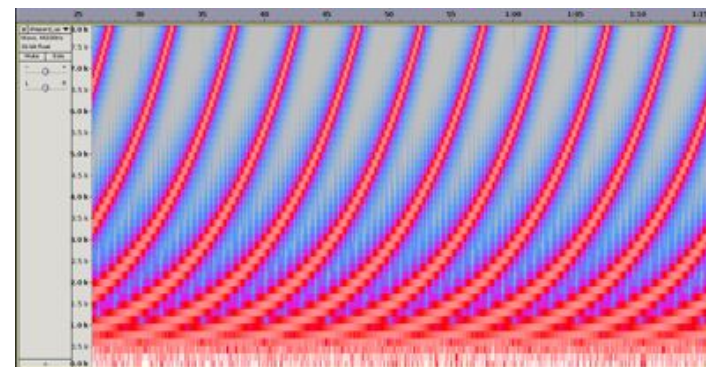
- Άρα, κάθε τόνος είναι:

$$y_j(t) = \sum_i A_{ij} \cos(2\pi(f_o \cdot 2^i \cdot 2^{j/12})t)$$

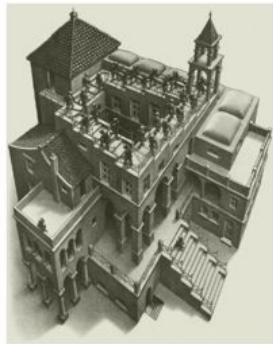
- Το πλάτος A_{ij} ακολουθεί μία Gaussian περιβάλλουσα

$$A_{ij} = \exp\left(-\frac{\log_2(f_{ij}/f_c)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Shepard tones (2)

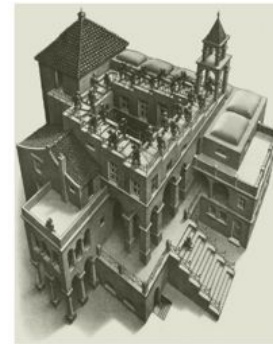


Shepard tones (3)



Audio Illusion (1)

Shepard tones (3)



Audio Illusion (2)

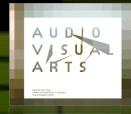
Deutsch's scale illusion

Musical notation for Deutsch's scale illusion. It consists of two staves, labeled 'A.' and 'B.'. Above the staves are three rhythmic patterns: a quarter note, a quarter note, and a quarter note. Staff A is labeled 'SOUND PATTERN' and shows a sequence of notes. Staff B is labeled 'PERCEPTION' and shows a different sequence of notes. A blue arrow points from the right side of the notation to an ear icon.



Τέλος (για σήμερα)....





Ανδρέας Φλώρος

floros@ionio.gr

<http://www.ionio.gr/~floros>