



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εξαγωγή Χρόνου Αντήχησης Απο Μουσικό Σήμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΜΑΚΡΗ

Επιβλέπων: Γεώργιος Καμπουράκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εξαγωγή Χρόνου Αντήχησης Απο Μουσικό Σήμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΜΑΚΡΗ

Επιβλέπων: Γεώργιος Καμπουράκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε απο την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11η Σεπτεμβρίου 2014

.....
Γεώργιος Καμπουράκης

.....
Ελευθέριος Καγιάφας

.....
Βασίλειος Λούμος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....

Ευάγγελος Μακρής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μακρής Ευάγγελος, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια απο τις πιο σημαντικές και πιο παλιές παραμέτρους της ακουστικής είναι ο χρόνος αντήχησης. Ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται ο ήχος για να περιοριστεί κατα 60dB. Εξαρτάται άμεσα απο την ηχητική απορρόφηση του χώρου και υπολογίζεται για κάθε ζώνη συχνοτήτων. Ο υπολογισμός του και κατ'επέκταση η παραμετροποίησή του στα επιθυμητά επίπεδα, αποτελεί από τα βασικότερα θέματα που έχει να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός. Σε αυτή την μελέτη θα περιγράψουμε μια μέθοδο για την μέτρηση του χρόνου αντήχησης, χωρίς να γνωρίζουμε στοιχεία για την πηγή του ήχου ούτε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου που θα γίνει η μελέτη. Σε αντίθεση όμως με τις γνωστές μεθόδους υπολογισμού, όπου κρουσικές συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου αυτού, σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τυχαία μουσικά σήματα. Ύστερα θα επεξεργαστούμε τα σήματα αυτά με την πλατφόρμα Matlab για την δημιουργία ενός κώδικα υπολογισμού του χρόνου αντήχησης.

Ο χρόνος αυτός θα υπολογιστεί απο την περιβάλλουσα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του εξεταζόμενου αυτού μουσικού σήματος. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης σχετίζεται άμεσα με το μήκος συσχέτισης ενός σήματος. Έχει αποδειχθεί ότι ο χρόνος αντήχησης μπορεί να υπολογιστεί απο το μήκος συσχέτισης μίας συνάρτησης κρουστικής απόκρισης. Ένα δωμάτιο με μεγάλο χρόνο αντήχησης θα έχει μεγαλύτερο μήκος συσχέτισης απο ένα δωμάτιο με μικρότερο χρόνο αντήχησης. Αυτή την ιδιότητα θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του χρόνου αυτού.

Τέλος θα εξετάσουμε αν τα αποτελέσματα της εφαρμογής συμφωνούν με τα αποτελέσματα απο τις μετρήσεις που κάναμε με το ηχώμετρο στο επικείμενο δωμάτιο.

Λέξεις κλειδιά : χρόνος αντήχησης, Matlab, περιβάλλουσα, αυτοσυσχέτιση, σήματα, μουσική

ABSTRACT

Reverberation time, a fundamental quantity in architectural acoustics, is defined as the time it takes for sound energy in an enclosed or not space to decay by a factor of one million or 60 dB.

Reverberation time is dependent on the volume and amount of acoustical absorption in the space and is typically measured and reported in octave bands. It's calculation and parameterization on the desired levels is of the key issues to be faced by an engineer. In this study we describe a method to measure the reverberation time without being aware of the source of sound or geometric characteristics of the area which the study takes place. However, in contrast to the known methods of calculation, where percussive functions are used to calculate this time, in this paper we will use random musical signals. Then we will process these signals with Matlab for the creation of a code of calculating the reverberation time.

The method proposed in this work is based on the autocorrelation function of a reverberated musical signal. The auto correlation function is highly related to the correlation length of a signal. It is shown that the reverberation time may be defined as the correlation length of the impulse response function. A room with a long reverberation time will force the reverberated signal to have a much longer correlation length than a room with a smaller reverberation time. This effect can be used to determine the reverberation time from real music played in the hall.

Lastly a comparison between the results of the autocorrelation method and the results of the sound meter will be made, so we can judge if the the method is accurate.

Keywords: reverberation time, matlab, autocorrelation, signals, music

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω,

τον υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, Κωσταντίνο Μπακογιάννη, για την καθοδήγηση, το ενδιαφέρον και την ανεκτίμητη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας,

τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Γεώργιο Καμπουράκη, για την παροχή βιβλιογραφίας, για τις ιδέες και για την δυνατότητα προσαρμογής της επιστημής του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού στα πλαίσια της μουσικής και της εξέλιξής της.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	9
1.1 Βασικά ακουστικά μεγέθη	9
1.2 Σήματα & συστήματα	11
1.3 Χρόνος αντήχησης	15
1.3.1 Χρόνος αντήχησης και εκτίμηση της μουσικής	15
1.3.2 Χρόνος αντήχησης και συχνοτικό περιεχόμενο	17
1.3.3 Μέθοδοι υπολογισμού του χρόνου αντήχησης	18
2 Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΝΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	19
2.1 Μοντελοποίηση της κρουστικής απόκρισης ενός δωματίου	19
2.2 Ο παράγωντας B και η επίδραση του	22
3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ	23
3.1 Ο αλγόριθμος	23
3.2 Συχνοτικό περιεχόμενο ενός μουσικού σήματος	25
3.3 Χρόνος εξασθένησης της μουσικής	27
3.4 Παραθύρωση ενός σήματος	28
3.5 Εύρεση ιδανικών μουσικών τμημάτων	30
3.6 Οκταβικά και 1/3 οκταβικά φίλτρα	31
3.7 Μετασχηματισμός Fourier	33
3.8 Ολοκλήρωση κατά Schroeder	36
4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	37
4.1 Εξοπλισμός ηχογράφησης	37
4.2 Ηχογράφηση των κρουστικών συναρτήσεων	40
4.3 Μουσικά σήματα που χρησιμοποιήθηκαν	41
4.4 Ηχογράφηση των μουσικών σημάτων	42
5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΑΜΕ	43
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΜΕ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ	52
7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΜΕ ΜΟΥΣΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ	54
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της θεωρίας που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής. Εμπεριέχοντας βασική θεωρία για, τα σήματα και συστήματα, κάποια βασικά μεγέθη, τον χρόνο αντήχησης αλλά και ένα ιστορικό υπόβαθρο για τις μεθόδους μέτρησης και υπολογισμού του χρόνου αυτού.

1.1 Βασικά ακουστικά μεγέθη

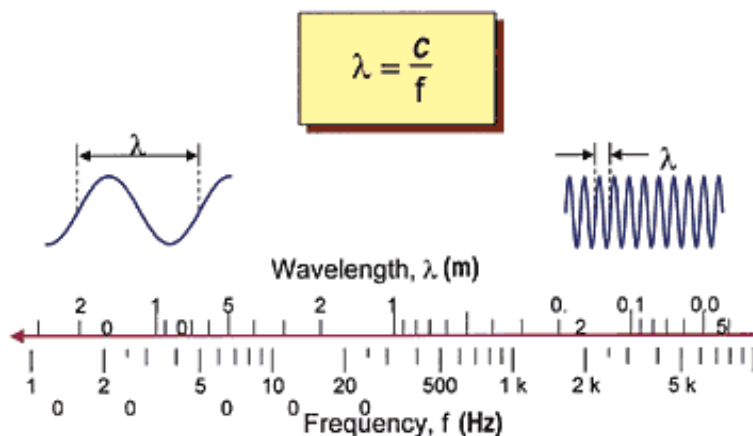
Ήχος ορίζεται ως κάθε αλλαγή στην πίεση του μέσου διάδοσης (αέρας, νερό κλπ) την οποία μπορεί να ανιχνεύσει ο άνθρωπος.

Ο αριθμός των αλλαγών των πιέσεων που υφίστανται σε ένα δευτερόλεπτο, ονομάζεται συχνότητα (frequency) και μετριέται σε Hz (Hertz). Η συχνότητα είναι το μέγεθος το οποίο προσδιορίζει τον τόνο του κάθε ήχου, δηλαδή πόσο μπάσος (χαμηλές συχνότητες) ή πόσο ψηλός είναι (υψηλές συχνότητες). Ο άνθρωπος μπορεί να διακρίνει ένα εύρος από συχνότητες, περίπου μεταξύ 20Hz και 20kHz.

Σε κάθε μέσο διάδοσης τα ηχητικά κύματα έχουν σταθερή ταχύτητα. Στον αέρα η ταχύτητα αυτή είναι περίπου 340m/sec. Από την κυματική θεωρία γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα ενός κύματος είναι το γινόμενο της συχνότητας επί το μήκος κύματος. Επομένως,

μήκος κύματος = ταχύτητα του ήχου / συχνότητα

Οι ήχοι οι οποίοι αποτελούνται από μία μόνο συχνότητα ονομάζονται μονοσυχνωτικοί (pure tone). Στην πραγματικότητα, στην φύση σπάνια συναντιούνται τέτοιοι ήχοι και οι περισσότεροι αποτελούνται από τη σύνθεση πολλών κυμάτων με διαφορετική συχνότητα, παράγοντας ένα παραμορφωμένο ημιτονικό σήμα.

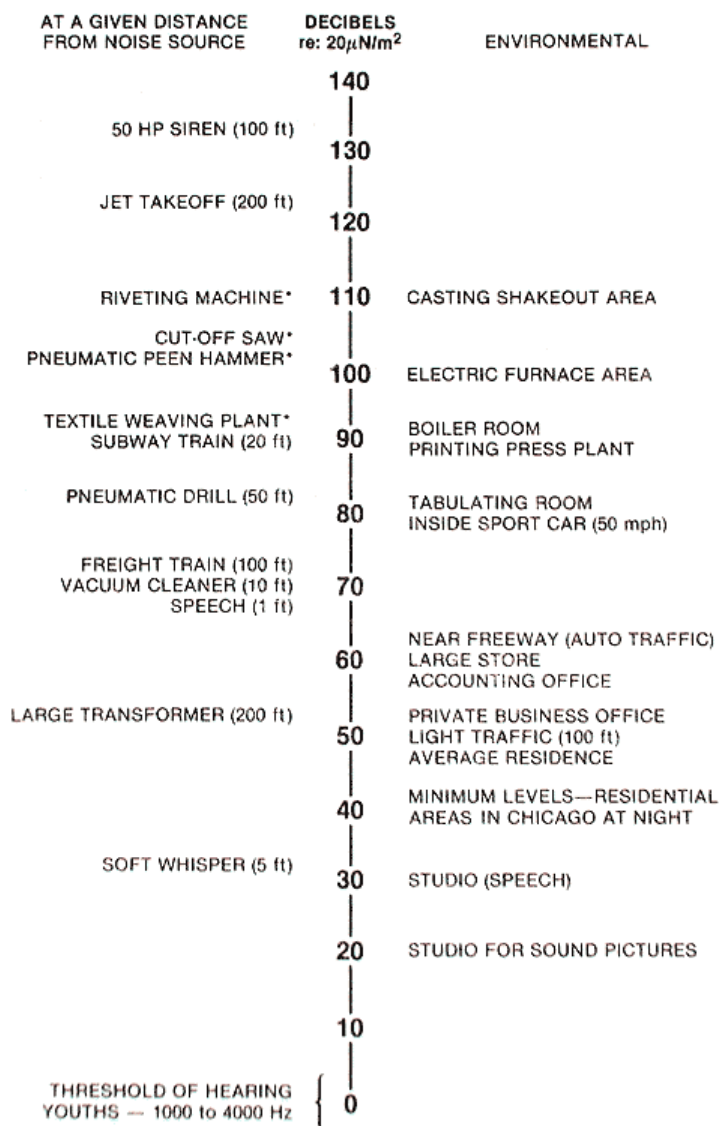


(Courtesy of Jack Heeg, 1999)

Σχήμα 1. Μήκος κύματος.

Ο βαθμός της αλλαγής της ακουστικής πίεσης, ο οποίος φαίνεται από το πλάτος του κύματος, προσδιορίζει τη στάθμη ακουστικής πίεσης (SPL → sound pressure level, συμβολίζει και ως L_p). Η ανθρώπινη αντίληψη της έντασης του ήχου με την ακουστική πίεση δεν είναι γραμμική, δηλαδή διπλασιασμός της ακουστικής πίεσης δε συνεπάγεται ότι ο άνθρωπος θα ακούσει ήχο διπλάσιας έντασης. Επομένως, αν μετρούσαμε την ένταση σε Pascal δε θα είχαμε εικόνα για την ένταση του ήχου που αντιλαμβανόμαστε. Γι αυτό το λόγο επιλέχθηκε μια λογαριθμική κλίμακα, η οποία εκφράζει τον ήχο σε decibel (dB). Τα dB είναι καθαρός αριθμός. Ορίζουμε ως πίεση αναφοράς το κατώφλι πίεσης κάτω από το οποίο δεν ακούει ο άνθρωπος ($P_{ref}=20\mu Pa$). Η ένταση του ήχου σε dB που αντιστοιχεί σε ακουστική πίεση P προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$L_p(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$



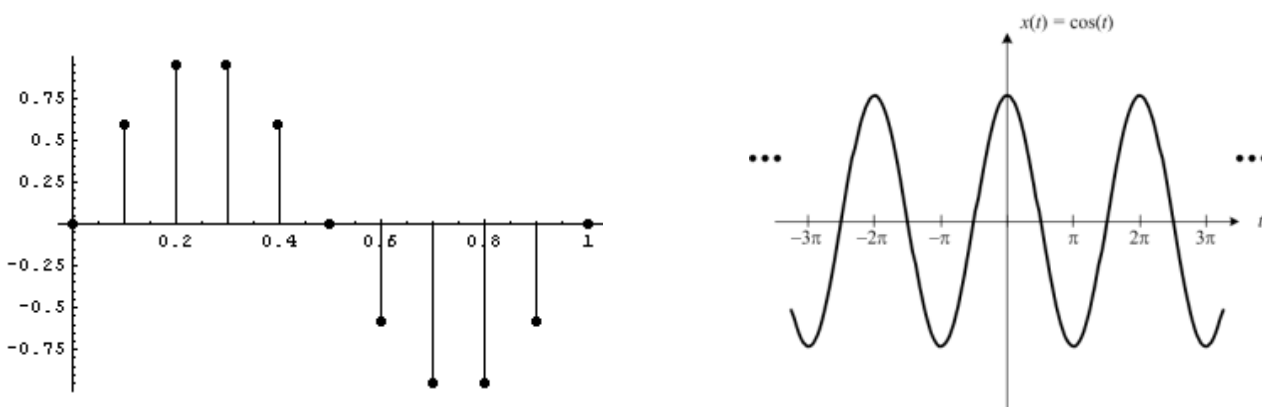
Σχήμα 2. Εντάσεις διαφόρων ενεργειών.

1.2 Σήματα & Συστήματα

Ως σήμα ορίζουμε το σύνολο των τιμών που λαμβάνει μια φυσική ποσότητα όταν αυτή μεταβάλλεται. Απο άποψη μαθηματικού φορμαλισμού, ένα σήμα παριστάνεται ως συνάρτηση ή ακολουθία μιας ή περισσότερων ελεύθερων μεταβλητών.

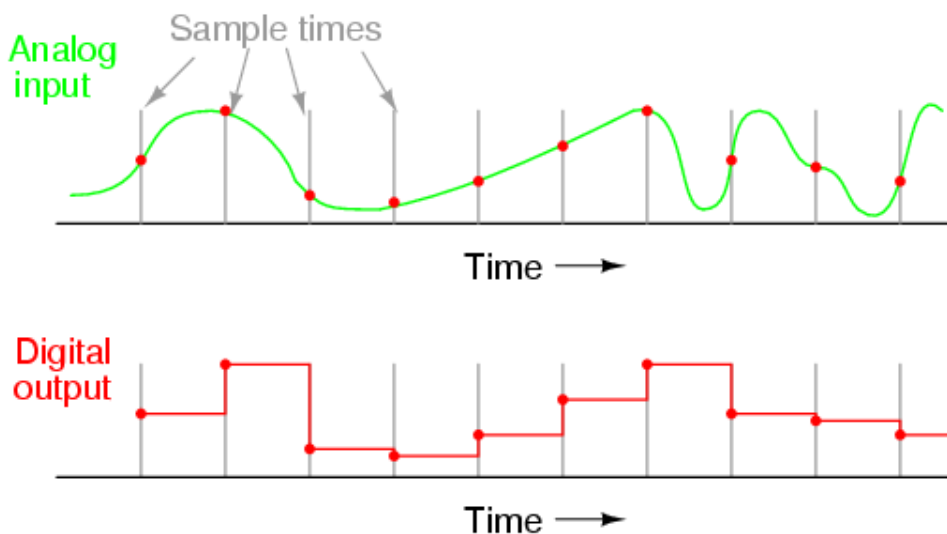
Σήματα που συναντάμε στον κόσμο, όπως η ακουστική πίεση σε ένα σημείο, παρουσιάζουν συνέχεια στον χρόνο και μπορούν να έχουν οποιαδήποτε τιμή πλάτους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Αυτού του είδους σήματα ονομάζονται αναλογικά σήματα και θα έχουν την μορφή $x(t)$, όπου το t αντιπροσωπεύει συνεχές χρόνο.

Τα ψηφιακά σήματα ορίζονται μόνο για διακριτές τιμές χρόνου και έχουν διακριτές τιμές πλάτους. Ορίζονται με $x(n)$ όπου το n είναι δείκτης διακριτού χρόνου. Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με ψηφιακά σήματα τα οποία έχουν δημιουργηθεί από δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος.



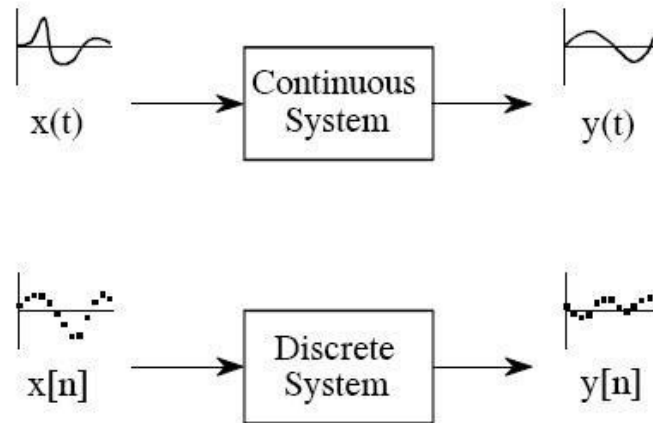
(παράδειγμα ψηφιακού/διακριτού)

(παράδειγμα συνεχούς σήματος)



Σχήμα 3. Παραδείγματα διακριτού, ψηφιακού και δειγματοληψίας.

Ως σύστημα ορίζουμε την οντότητα εκείνη που μετατρέπει ένα σήμα σ' ένα άλλο. Απο μαθηματική άποψη ένα σύστημα είναι ένας μετασχηματισμός F που μετασχηματίζει ένα σήμα $x(t)$ ή $x(n)$, σ' ένα άλλο σήμα $y(t)$ ή $y(n)$. Το σήμα $x(t)$ ορίζεται ως σήμα εισόδου και το $y(t)$ ως σήμα εξόδου. Αυτή η διαδικασία μετασχηματισμού, που επιβάλλει το σύστημα, περιγράφεται σχηματικά απο τα παρακάτω σχήματα,



Σχήμα 4. Παράδειγμα συστήματος συνεχούς & διακριτού χρόνου.

Κρουστική συνάρτηση ή συνάρτηση Dirac

Ορίζουμε τη $\delta(t)$ να έχει την εξής ιδιότητα:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \delta(t) dt = \varphi(0) \quad (1.1)$$

όπου $\varphi(t)$ οποιαδήποτε συνάρτηση συνεχής στο $t = 0$. Εάν $\varphi(t) = 1$ για κάθε t , τότε η (1.1) γίνεται,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.2)$$

Η $\delta(t)$ δεν είναι συνάρτηση με τη συνήθη έννοια. Ορίζεται μέσα απο την ιδιότητα της και είναι γνωστή ως συνάρτηση δέλτα ή συνάρτηση Dirac ή κρουστική συνάρτηση.

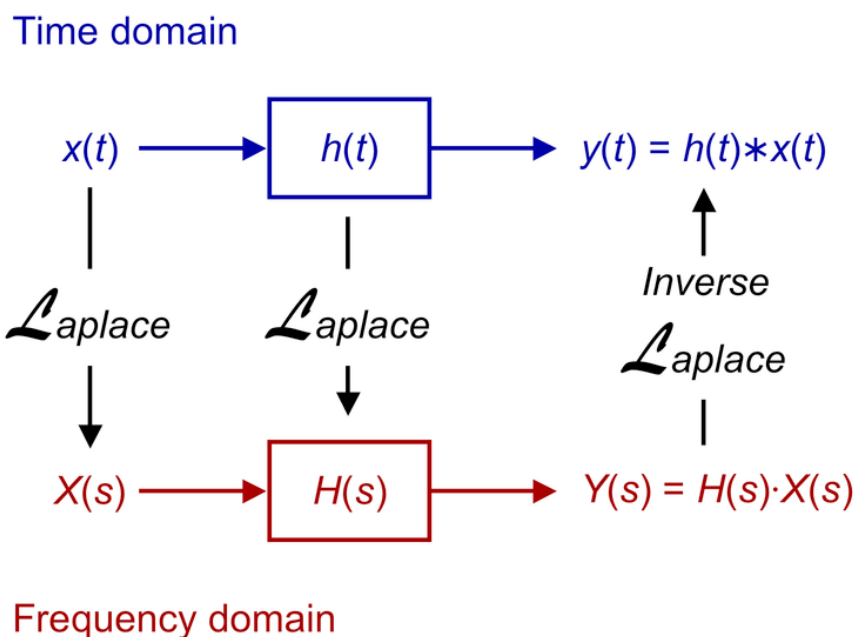
Η κρουστική απόκριση ενός γραμμικού συστήματος είναι η κυματομορφή που παρουσιάζεται στην έξοδο ενός συστήματος όταν στην είσοδο αυτού του συστήματος έχουμε σαν είσοδο την κρουστική συνάρτηση (Dirac). Η έξοδος $y(x)$, για μια αυθαίρετη είσοδο $x(t)$, είναι ίση με την συνέλιξη της εισόδου και της κρουστικής απόκρισης του συστήματος $h(t)$.

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)x(t - \tau) d\tau$$

Όσον αφορά τα συστήματα διακριτού χρόνου το ολοκλήρωμα της συνέλιξης αλλάζει σε,

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n - k)$$

όπου n είναι ο δείκτης διακριτού χρόνου. Η έξοδος $y(n)$ είναι επομένως γραμμικά συνδεμένη με την είσοδο $x(n)$ με παρελθοντικές και μελλοντικές τιμές.



Σχήμα 5. Γραμμικό σύστημα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

Οι έννοιες της Συσχέτισης και της Αυτοσυσχέτισης

Είναι πολύ χρήσιμο να υπάρχει ένα ποσοτικό μέτρο ομοιότητας μεταξύ δύο σημάτων $x(n)$ και $y(n)$. Αν θεωρήσουμε τα σήματα ως δύο διανύσματα, ένας αριθμός που μετράει την ομοιότητα τους είναι το εσωτερικό τους γινόμενο. Τούτο γίνεται μέγιστο για διανύσματα (σήματα) που συμπίπτουν ενώ μηδενίζεται για διανύσματα που είναι κάθετα.

Ωστόσο, σε ότι αφορά τα σήματα, πολλές φορές βρίσκονται απλά μετατοπισμένα το ένα σε σχέση με το άλλο χωρίς να είναι διαφορετικά. Έτσι, ένας μόνο αριθμός (εσωτερικό γινόμενο) δεν είναι αρκετός για να αντιμετωπίσει όλες τις πιθανές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των δύο σημάτων. Χρειάζεται λοιπόν να οριστεί ένα νέο σήμα (ακολουθία αριθμών) του οποίου η ανεξάρτητη μεταβλητή θα εκφράσει την μετατόπιση μεταξύ δύο σημάτων. Ορίζουμε λοιπόν ως συχέτιση ή ετεροσυχέτιση (correlation ή crosscorrelation) των σημάτων $x(n)$ και $y(n)$ το εξής εσωτερικό γινόμενο,

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l) \quad -\infty < l < \infty$$

Την ανεξάρτητη μεταβλητή 'l' θα την ονομάσουμε καθυστέρηση (lag). Η συχέτιση εξαρτάται από το πλάτος των δύο σημάτων. Αν θέλουμε ένα μέγεθος ανεξάρτητο από το πλάτος θα πρέπει να θεωρήσουμε την γωνία μεταξύ των δύο διανυσμάτων $x(n)$ και $y(n-l)$.

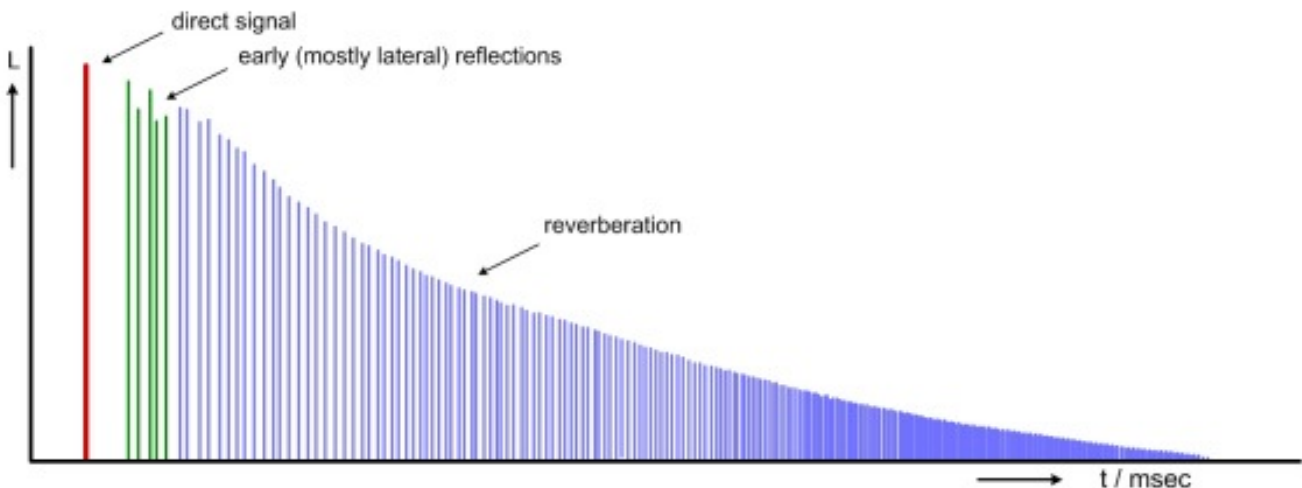
Ένα άλλο χρήσιμο μέγεθος είναι η αυτοσυχέτιση (autocorrelation). Μεταθέτοντας ένα σήμα ως προς τον εαυτό του ο βαθμός συχέτισης μεταβάλλεται. Η γνώση αυτής της μεταβολής είναι πολύ σημαντική γιατί επιτρέπει τον υπολογισμό του φάσματος ενός σήματος. Με την υπόθεση ότι το σήμα είναι $x(n)$ είναι σήμα ενέργειας η ακολουθία αυτοσυχέτισης ορίζεται:

$$r_{xx}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n-l) \quad -\infty < l < \infty$$

Το μέγεθος της αυτοσυχέτισης θα είναι το βασικό μας εργαλείο για την εύρεση του χρόνου αντήχησης.

1.3 Χρόνος αντήχησης

Σε ένα δωμάτιο ή σε έναν χώρο που κλείνει σε κάποιες διαστάσεις (πχ αρχαίο θέατρο) όταν μια πηγή παράγει έναν ήχο, ο ήχος αυτός ταξιδεύει στον χώρο. Όταν προσκρούσει σε κάποια επιφάνεια ένα μέρος του ήχου ανακλάται, ένα άλλο απορροφάται και ένα άλλο διαχέεται. Λόγω του όγκου του χώρου, ο ήχος έχει χώρο να ταξιδέψει και λόγω της ανάκλασης συνεχίζει να υπάρχει στον κλειστό αυτό χώρο. Όμως, επειδή μέρος του απορροφάται σταδιακά ο ήχος σβήνει. Η παρουσία του ήχου για ένα χρονικό διάστημα σε έναν χώρο, μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου ήχου από την πηγή, ονομάζεται αντήχηση. Ο χρόνος που κάνει ο ήχος να περιοριστεί κατά 60dB ονομάζεται χρόνος αντήχησης (RT ή RT60). Όταν ο χρόνος αντήχησης είναι μεγάλος, ο χώρος χαρακτηρίζεται ακουστικά ζεστός και ζωντανός, αντίθετα, όταν είναι μικρός, ξερός και νεκρός. Μεγάλο χρόνο αντήχησης χρειαζόμαστε σε χώρους που παίζεται μουσική (μουσικές σκηνές, όπερες, κλπ) ενώ μικρό σε χώρους που είναι σχεδιασμένοι για ομιλία (πχ σχολικές αίθουσες).



Σχήμα 6. Διάγραμμα χρόνου αντήχησης για ένα είδος παλμού, πχ. πιστολιά, σκάσιμο μπαλονιού.

1.3.1 Χρόνος αντήχησης και εκτίμηση της μουσικής

Ο χρόνος αντήχησης υπήρξε από τα πρώτα και πιο σημαντικά ακουστικά κριτήρια που επηρεάζει την αντήληψη της μουσικής και γενικότερα την εμπειρία της ακρόασης. Ο Sabine ήταν ο πρώτος που έκανε γνωστά την έννοια, μεθόδους μέτρησης και πρόβλεψης του χρόνου αντήχησης.

Από την καθημερινότητα μας, γνωρίζουμε ότι όταν βρισκόμαστε σε κάποιο χώρο με χαρακτηριστικά αντήχησης, όπως σε ένα υπόγειο γκαράζ, μπορούμε να είμαστε πιο εύκολα στον σωστό τόνο, παρά όταν είμαστε σε ένα ανοιχτό χώρο.

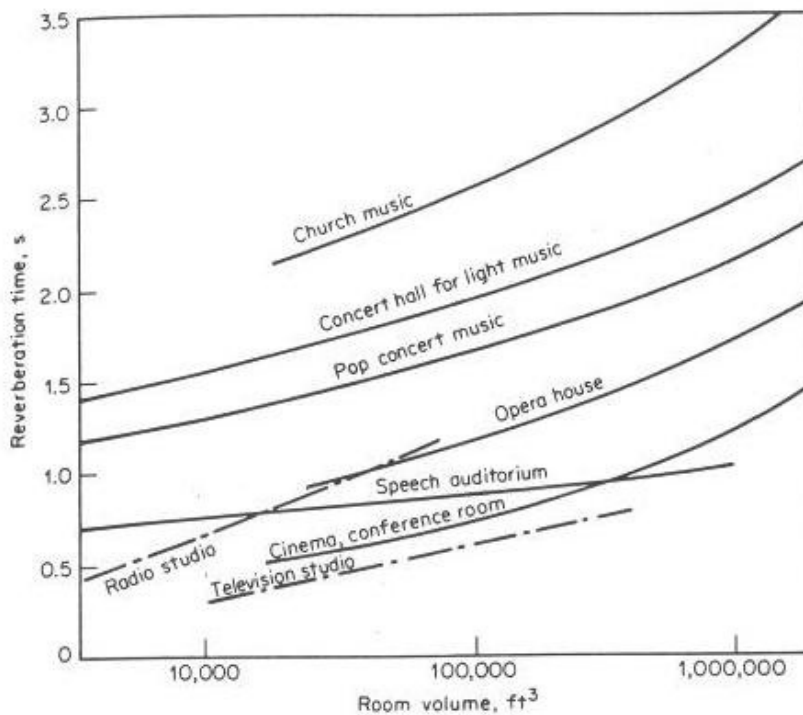
Παραθέτοντας τον Isaac Stern,

“Reverberation is of great help to a violinist. As he goes from one note to another the previous note perseveres and he has the feeling that each note is surrounded by strength, When this happens, the violinist does not feel that his playing is bare or naked – there is a friendly aura surrounding each note”

Σύγχρονες αίθουσες μουσικής, συνήθως δεν περιορίζονται σε ένα είδος μουσικής, έτσι χρειάζονται στοιχεία για να μπορούν να έχουν τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης, όπως είναι οι κουρτίνες και οι θάλαμοι αντήχησης. Στο παρακάτω πίνακα και σχήμα που έχουμε προσθέσει, μπορούμε να δούμε αντίστοιχα, τους χρόνους αντήχησης που προτείνονται για κάποια είδη μουσικής και περισσότερες πληροφορίες που έχουν προτείνει οι Bruel & Kjare (Wilson, 1989).

Organ music	> 2.5
Romantic Classical music	1.8 - 2.2
Early Classical music	1.6 - 1.8
Opera	1.3 - 1.8
Chamber music	1.4 - 1.7
Drama theatre	0.7 - 1.0

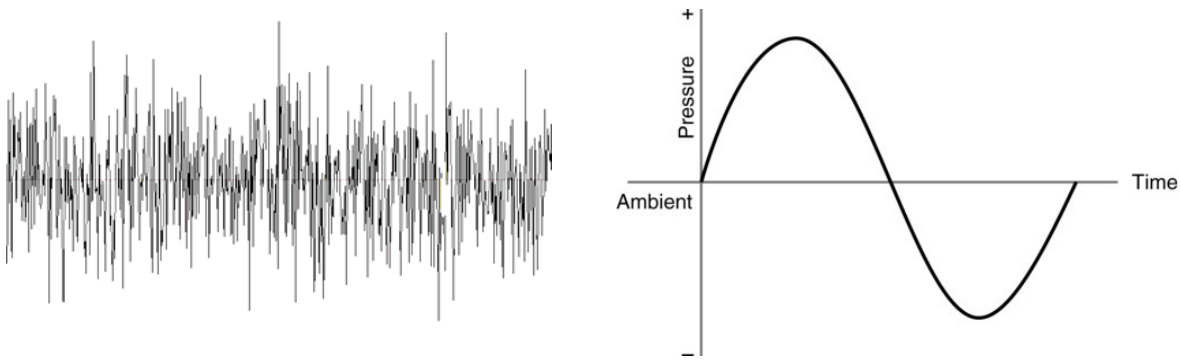
(Προτεινόμενες τιμές χρόνου αντήχησης σε sec)



Σχήμα 7. Τιμές χρόνου αντήχησης για διάφορες εφαρμογές.

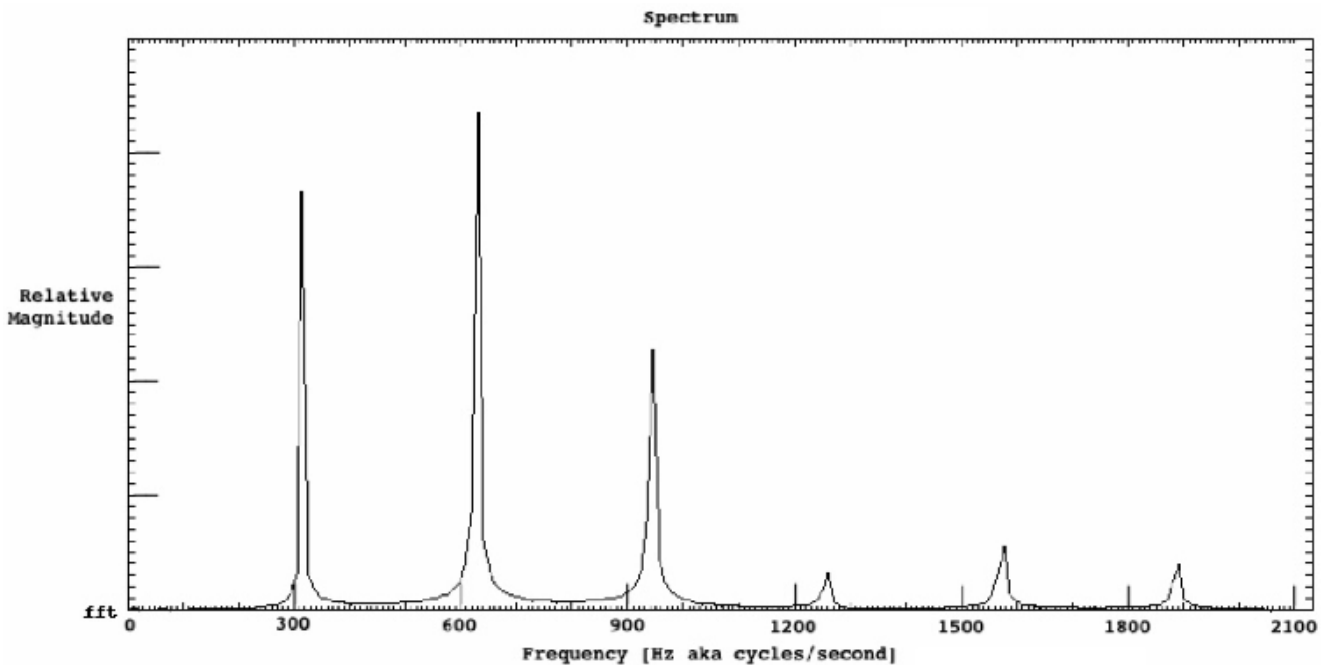
1.3.2 Χρόνος αντήχησης και συχνοτικό περιεχόμενο

Οι ήχοι που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των κυματομορφών τους, θόρυβος, ένας τόνος και μουσική. Ο θόρυβος δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο, είναι τυχαία κυματομορφή, ο τόνος είναι μια συγκεκριμένη ημιτονοειδής κυματομορφή σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα και τέλος η μουσική αποτελείται από έναν τόνο(νότα) και τις αρμονικές της (πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας της νότας).



Σχήμα 8. Παραδείγματα θορύβου και ενός τόνου.

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει το συχνοτικό περιεχόμενο μιας μουσικής νότας. Η χαμηλότερη συχνότητα σε μια νότα είναι η πρώτη αρμονική από την οποία αντιλαμβανόμαστε τον ήχο που κάνει η συγκεκριμένη νότα. Οι υπόλοιπες αρμονικές καθορίζουν την ποιότητα του τόνου της νότας.



Σχήμα 9. Παράδειγμα του φάσματος μίας νότας από κιθάρα.

Λόγω την συχνοτικής εξάρτησης των ακουστικών παραμέτρων, δουλεύουμε σε οκτάβική μορφή. Σε αυτή την εργασία θα δουλέψουμε πάνω στις κεντρικές συχνότητες ενός 1/3 οκταβικού φίλτρου (25.11Hz, 31.62Hz, 39.81Hz, 50.11Hz, 63.09Hz, 79.43Hz, 100Hz, 125.89Hz, 158.48Hz, 199.52Hz, 251.18Hz, 316.22Hz, 398.10Hz, 501.18Hz, 630.95Hz, 794.32Hz, 1000Hz, 1258.92Hz, 1584.89Hz, 1995.26Hz, 2511.88Hz, 3162.27Hz, 3981.07Hz, 5011.87Hz, 6309.57Hz, 7943.28Hz, 10000 Hz, 12589.25Hz, 15848.93Hz, 19952.62Hz). Με αυτό τον τρόπο, θα καλύψουμε όλο το συχνοτικό περιεχόμενο της ακοής του ανθρώπου, που είναι 20-20KHz.

1.3.3 Μεθόδοι υπολογισμού του χρόνου αντήχησης

Απο τους πρώτους που μελέτησαν τον χρόνο αντήχησης και τις ιδιότητες του ήταν ο Wallace Clement Sabine στα τέλη του 19ου αιώνα. Έχοντας στην διάθεση του, φουσητήρες, σωλήνες απο εκκλησιαστικά όργανα, ένα χρονόμετρο και την ακοή του, μέτρησε τον χρόνο που χρειάζεται η πηγή, μέχρι να φτάσει σε επίπεδα που δεν ακούγεται καθόλου, μια χοντρική τιμή των 60dB. Το 1890 η εξίσωση του Sabine έκανε την πρώτη της εμφάνιση. Κατάφερε να συνδέσει τον χρόνο αντήχησης, το όγκο και την ηχητική απορρόφηση ενός δωματίου με την παρακάτω εξίσωση,

$$RT_{60} = \frac{24 \ln 10^1}{c_{20}} \frac{V}{Sa} \approx 0.1611 m^{-1} \frac{V}{Sa}$$

Όπου C_{20} είναι η ταχύτητα του ήχου μέσα στο δωμάτιο, V είναι ο όγκος σε κυβικά μέτρα, S είναι η συνολική επιφάνεια σε τετραγωνικά μέτρα και α είναι ο μέσος όρος της απορρόφησης των επιφανειών.

Το 1964 ο Manfred R. Schroeder δημοσίευσε το "A new method of Measuring Reverberation Time", όπου μέτρησε την ενέργεια του ήχου και ολοκληρώνοντας την κατάφερε να δείξει τις διακυμάνσεις που μπορούν να υπάρξουν στα διαγράμματα απόσβεσης (decay rate).

Τη σήμερον ημέρα οι αλγόριθμοι που υπάρχουν για την εξαγωγή του χρόνου αντήχησης χωρίζονται στους "τυφλούς" (blind), και "μερικώς τυφλούς"(partially blind) αλγόριθμους. Οι πρώτοι είναι αλγόριθμοι που για την εξαγωγή του χρόνου αντήχησης δεν γνωρίζουμε καμία πληροφορία για το δωμάτιο και την ηχητική πηγή. Οι δεύτεροι, όπου και κατατάσσεται και ο αλγόριθμος της εργασίας, είναι αλγόριθμοι που έχουν δεδομένα είτε κάποια στοιχεία του δωματιού είτε κάποια στοιχεία της ηχητικής πηγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

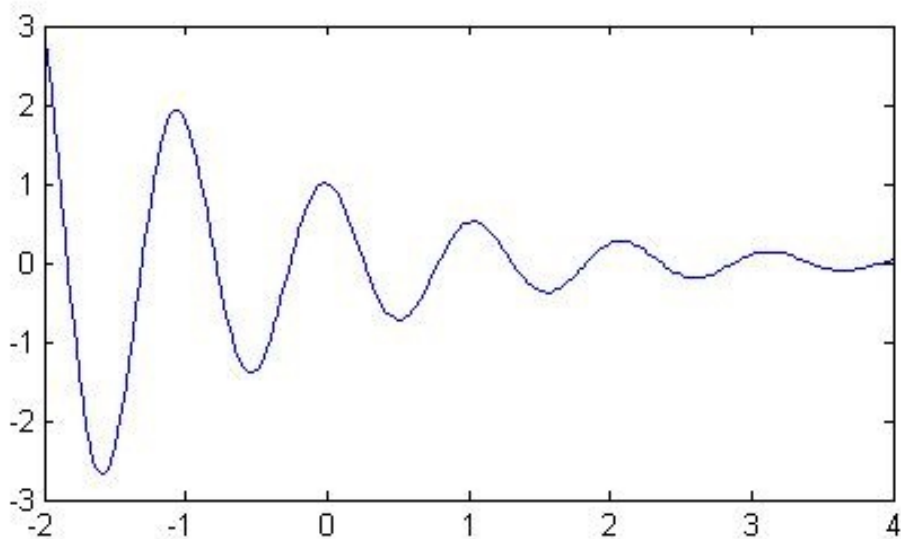
Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΝΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ

2.1 Μοντελοποίηση της κρουστικής απόκρισης ενός δωματίου

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός δωματίου αποτελείται από την υπέρθεση πολλών ιδιοσυχνοτήτων. Οι ιδιοσυχνότητες είναι οι συχνότητες κατά τις οποίες το συγκεκριμένο δωμάτιο όταν εκτεθεί σε κάποια συχνότητα παρουσιάζει την ελάχιστη απόσβεση. Η κρουστική απόκριση μπορεί να παρομοιαστεί με την υπέρθεση αρκετών συναρτήσεων ταλάντωσης με απόσβεση, δίνεται παράδειγμα παρακάτω. Αν το δωμάτιο δεν αποκλίνει από ένα συνηθισμένο σχήμα δωματίου και τα ηχο-απορροφητικά υλικά δεν είναι άνισα κατανομημένα, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η κάθε ταλάντωση εξασθενεί εκθετικά στο χρόνο. Μια συνάρτηση δόνησης θα έχει την παρακάτω μορφή

$$g(t) = A_0 \cdot e^{(2\pi if_0 + m_0)t} \cdot \text{step}(t)$$

όπου A_0 είναι το μιγαδικό πλάτος (σταθερά) και m_0 είναι η σταθερά εξασθένησης.



Σχήμα 10. Παράδειγμα συνάρτηση δόνησης.

Ο μετασχηματισμός Fourier του $g(t)$ είναι

$$G(f) = \frac{A_0}{2\pi i(f - f_0) - m_0}$$

Θέτουμε το $h(t)$ να είναι η υπέρθεση πολλών συναρτήσεων δόνησης $g_k(t)$, μέσα σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Τότε η συνάρτηση κρουστικής απόκρισης μέσα σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων $f_{\min} < f_k < f_{\max}$, μπορεί να γραφτεί σαν

$$\begin{aligned} h(t) &= \sum_{k=1}^N g_k(t) \\ &= \left(\sum_{k=1}^N A_k e^{2\pi i f_k t} e^{m_k t} \right) \cdot \text{step}(t) \end{aligned}$$

Σε αυτό το άθροισμα, το N είναι πολύ μεγάλο όπως επίσης οι συχνότητες f_k δεν είναι ίσα κατανεμημένες μέσα στη ζώνη συχνοτήτων αλλά είναι σύμφωνες με τις ιδιότητες του δωματίου. Η ζώνη συχνοτήτων θα είναι είτε μια οκτάβα είτε 1/3 της οκτάβας και η σταθερά εξασθένησης θα είναι επικεντρωμένη στην τιμή του χρόνου αντήχησης σε αυτή την ζώνη συχνοτήτων.

Παρακάτω παραθέτουμε τον ορισμό της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης.

Για σήματα με πεπερασμένη ενέργεια ($x(\tau) \rightarrow 0$, για $\tau \rightarrow \pm\infty$), η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\varphi_x(t)$ ορίζεται απο

$$\varphi_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot x^*(\tau + t) d\tau$$

Με αυτό τον ορισμό, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της $h(t)$ είναι,

$$\varphi_h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(\sum_{k=1}^N A_k e^{2\pi i f_k \tau} e^{m_k \tau} \right) \cdot \text{step}(\tau) \cdot \left(\sum_{l=1}^N A_l^* e^{(-2\pi i f_l + m_l)(\tau+t)} \cdot \text{step}(\tau + t) \right) \right] d\tau$$

Λόγω της συμμετρίας που έχει η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης,

$$\varphi_x(-t) = (\varphi_x(t))^*$$

θα υπολογίσουμε μόνο το τις περιπτώσεις όπου $t > 0$.

$$\varphi_h(t)|_{t>0} = \int_0^{\infty} [(\sum_{k=1}^N A_k e^{2\pi i f_k \tau} e^{m_k \tau}) \cdot (\sum_{l=1}^N A_l^* e^{(-2\pi i f_l + m_l)(\tau+t)})] d\tau$$

οπότε θα έχουμε

$$\varphi_h(t)|_{t>0} = \sum_{l=1}^N A_l^* \cdot e^{-2\pi i f_l t} e^{m_l t} \cdot B(f_l, m_l)$$

όπου
$$B(f_l, m_l) = \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{2\pi i (f_l - f_k) - (m_k + m_l)}$$

Συγκρίνοντας την συνάρτηση κρουστικής απόκρισης με την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της κρουστικής απόκρισης καταλήγουμε στις εξής ιδιότητες.

1. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης αποτελείται από τον ίδιο αριθμό όρων με την κρουστική απόκριση.
2. Για $t > 0$, οι εγγενείς εκθετικές συναρτήσεις είναι οι ίδιες, εκτός από τις μιγαδικές συζεύξεις. Ειδικότερα, έχουν τις ίδιες σταθερές εξασθένησης.
3. Κάθε συνάρτηση εξασθένησης έχει η κάθε μια ένα ανεξάρτητο παράγοντα $B(f_l, m_l)$

Οι δύο πρώτες ιδιότητες έχουν μεγάλη σημασία για το αν είναι δυνατό να υπολογισθεί ο χρόνος αντήχησης από την αυτοσυσχέτιση της κρουστικής απόκρισης. Η πληροφορία του χρόνου αντήχησης βρίσκεται στις σταθερές εξασθένησης σε αυτή την εργασία. Κάποιος θα περίμενε ότι δεν είναι δυνατό να υπολογισθεί ο χρόνος αντήχησης από τις σταθερές αυτές, σε μια αντίστοιχη εργασία, αν η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης έπαιρνε άλλη μορφή.

Με άλλα λόγια, αν η εξάρτηση του όρου B είναι πολύ μεγάλη από την συχνότητα, τότε δεν θα είναι δυνατό να υπολογίσουμε τον χρόνο αντήχησης, διότι θα χαθεί πολύ πληροφορία από τον μη-γραμμικό υπολογισμό του απολύτου τετραγώνου της συνάρτησης μεταφοράς.

Ο παράγοντας B αλλάζει το πλάτος και την φάση της κάθε δόνησης που παίρνει μέρος στο άθροισμα. Στο έπομενο υποκεφάλαιο θα εξεταστεί ο όρος B.

2.2 Ο παράγοντας B και η επίδραση του

Αρχικά, βλέπουμε ότι το B είναι ανεξάρτητο του χρόνου. Αν ήταν ανεξάρτητο και από τα f και m, τότε η εύρεση του χρόνου αντήχησης από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης δεν θα είχε διαφορά από την εύρεση του χρόνου από την κρουστική απόκριση. Το ίδιο θα ίσχυε αν στο B, η συχνότητα άλλαζε το πλάτος και την φάση σε ελάχιστες τιμές. Με αυτό τον τρόπο η εκθετική συμπεριφορά του αθροίσματος διατηρείται, οπότε και η σταθερά εξασθένησης.

Μέσα σε μια τυπική οκτάβα ή στο 1/3 της οκτάβας οι σταθερές εξασθένησης m_k ποικίλλουν πολύ λίγο γύρω από μια μέση τιμή. Για δωμάτια με χρόνο αντήχησης 1-2 δευτερόλεπτα, το πλάτος θα είναι $3.5 < m_k < 7$. Οι συχνότητες f_k είναι 2 ή 3 τάξεις μεγαλύτερες από το πλάτος και καλύπτουν μια οκτάβα ή το 1/3 της οκτάβας. Από τους παρανομαστές του κάθε όρου του αθροίσματος του $B(f_l, m_l)$ παρατηρούμε ότι μόνο οι όροι με συχνότητες f_k οι οποίες είναι πολύ κοντά με τις f_l έχουν επίδραση στο άθροισμα.

Το παραπάνω μας φέρνει στο συμπέρασμα ότι το B δεν μπορεί να ποικίλλει πάρα πολύ λόγω της συχνότητας, διότι αυτό που το επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό είναι το πλάτος A_k . Επίσης σε τυχόν φιλτράρισμα, με κάποια συνάρτηση βάρους το οποίο θα διαμόρφωνε την κρουστική απόκριση, η συνάρτηση B θα κρατήσει τα χαρακτηριστικά της, διότι εξαρτάται από τα γειτονικά της πλάτη.

Οπότε ο χρόνος αντήχησης μπορεί να υπολογισθεί από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της κρουστικής απόκρισης με μια μικρή απόκλιση, αφού οι σταθερές εξασθένησης του κάθε όρου μένουν ίδιες και το μόνο που αλλάζει σε μικρό βαθμό είναι οι φάσεις και τα συνολικά πλάτη της κάθε ημιτονοειδούς εξασθένησης.

Παρακάτω γίνεται επεξήγηση του αλγορίθμου της αυτοσυσχέτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

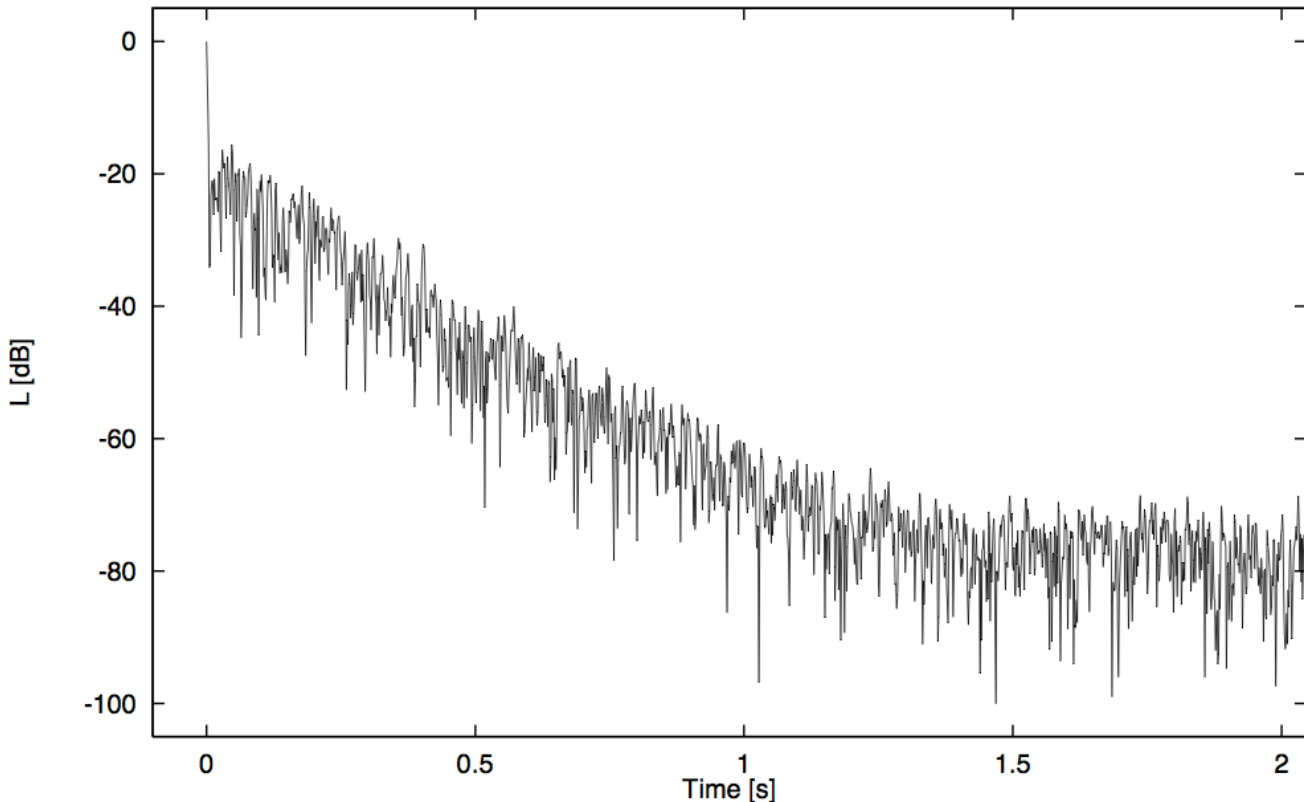
Προσδιορισμός του χρόνου αντήχησης με την μέθοδο της αυτοσυσχέτισης

3.1 Ο αλγόριθμος

Η εξαγωγή του χρόνου αντήχησης με την μέθοδο της αυτοσυσχέτισης απο την κρουστική συνάρτηση ή με μουσικό σήμα, έχει τον παρακάτω αλγόριθμο. Αρχικά θα καταγράψουμε τα βήματα του αλγόριθμου και ύστερα θα εξήγησουμε το κάθε βήμα στις υποενότητες.

- Χωρισμός του σήματος σε μικρότερα τμήματα με 3/4 επικάλυψη με μήκος ίσο με το διπλάσιο απο τον αναμενόμενο χρόνο αντήχησης.
- Εφαρμογή σε κάθε τμήμα τον κανόνα RMS για το αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση και ύστερα αποθήκευση του σαν ένα καινούργιο σήμα.
- Ανάλυση του εξεταζόμενου τμήματος απο τρίτο-οκταβικό φίλτρο για να εξάγουμε πληροφορία για κάθε ζώνη συχνοτήτων.
- Γέμισμα του τμήματος με μηδενικά ίσο με το διπλάσιο του τμήματος.
- Μετασχηματισμό Fourier.
- Κρατάμε απο τον μετασχηματισμό μόνο τις θετικές συχότητες.
- Γέμισμα του τμήματος με μηδενικά στις αρνητικές συχότητες ίσο με το διπλάσιο του τμήματος.
- Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier.
- Υπολογισμός του απόλυτου τετραγώνου (η περιβάλλουσα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του τμήματος).
- Κόψιμο του τμήματος στο μισό. (συμμετρία στο $t = 0$).
- Προς τα πίσω ολοκλήρωση (Schroeder, 1965).
- Υπολογισμός του χρόνου αντήχησης απο την κλίση της λογαριθμικής συνάρτησης.

Όπως έχουμε δείξει σε προηγούμενη παράγραφο, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας κρουστικής απόκρισης πρέπει να μας δώσει τα ίδια αποτελέσματα χρόνου αντήχησης, αν χρησιμοποιούσαμε απευθείας την κρουστική απόκριση. Για παράδειγμα μια περιβάλλουσα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης μιας κρουστικής απόκρισης, για μια ζώνη συχνοτήτων από τα 820Hz μέχρι τα 1220Hz, παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 11. Παράδειγμα συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κρουστικής απόκρισης.

Λόγω της φύσης της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, πρέπει να γίνουν κάποιες εκτιμήσεις αν θέλουμε να ολοκληρώσουμε κατά Schroeder. Αρχικά για $t = 0$, βλέπουμε ότι υπάρχει ένα μέγιστο, ύστερα μέχρι τα 1.2sec παρατηρούμε ότι η συνάρτηση εξασθενεί εκθετικά. Για χρόνο μετά τα 1.2sec η συνάρτηση έχει ένα σταθερό χαρακτήρα.

Οι τρεις αυτές εκτιμήσεις μπορούν να εξηγηθούν. Αρχικά το μέγιστο που παρουσιάζεται στο $t = 0$, οφείλεται στην συμφασική άθροιση πολλών ημιτονειδών. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη μας ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι ουσιαστικά ο αντίστροφος μετασχηματισμός του ενεργειακού φάσματος του σήματος μας. Το ενεργειακό αυτό φάσμα, προκαλείται από το απόλυτο τετραγωνισμό του μετασχηματισμού Fourier και είναι μια παραγματική συνάρτηση, που αντιστοιχεί στον μετασχηματισμό όλων των συντελεστών στο πεδίο του χρόνου.

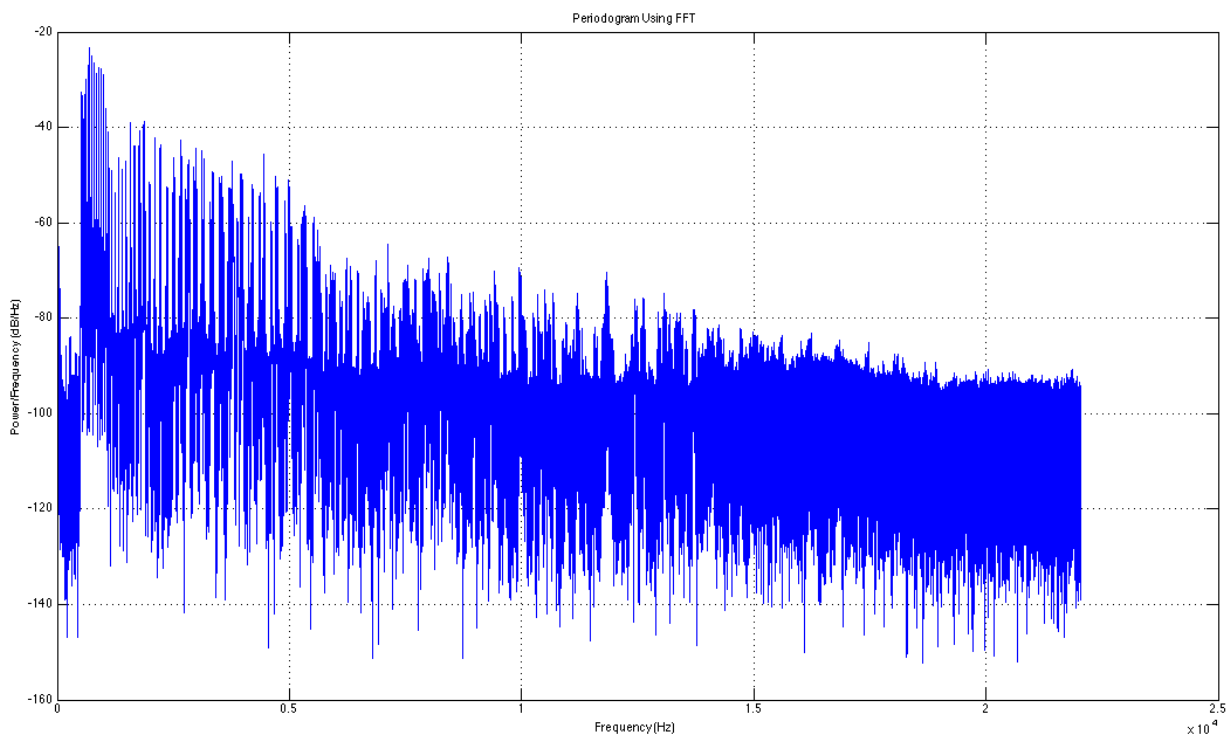
Η δεύτερη εκτίμηση που κάναμε, η εκθετική εξασθένιση της καμπύλης, οφείλεται στην συνάρτηση μεταφοράς του δωματίου. Οι συγκεκριμένες συναρτήσεις ταλάντωσης που προκαλούν αυτή την συνάρτηση μεταφοράς, μετά τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier, ισούνται με την υπέρθεση πολλών τέτοιων συναρτήσεων εκθετικής εξασθένισης στο χρόνο.

Η τρίτη και τελευταία εκτίμηση που κάναμε, η σταθερή τιμή της καμπύλης, οφείλεται στον θόρυβο που υπάρχει πάντα απο εξωτερικούς παράγοντες, σε συνθήκες ηχογραφησης. Μόνο αν δεν υπήρχε ο θόρυβος, η συνάρτηση θα έπεφτε στο μηδέν.

Όταν κάνουμε χρήση της κρουστικής απόκρισης για να βρούμε τον χρόνο αντήχησης, θα χρησιμοποιήσουμε το κομμάτι της κυματομορφής που περιέχει τα χαρακτηριστικά του δωματίου. Οπότε ο χρόνος $t_1 > 0$ θεωρείται σαν το πρώτο μέγιστο της καμπύλης και η περιβάλλουσα της συνάρτησης υπολογίζεται για χρόνους $t > t_1$.

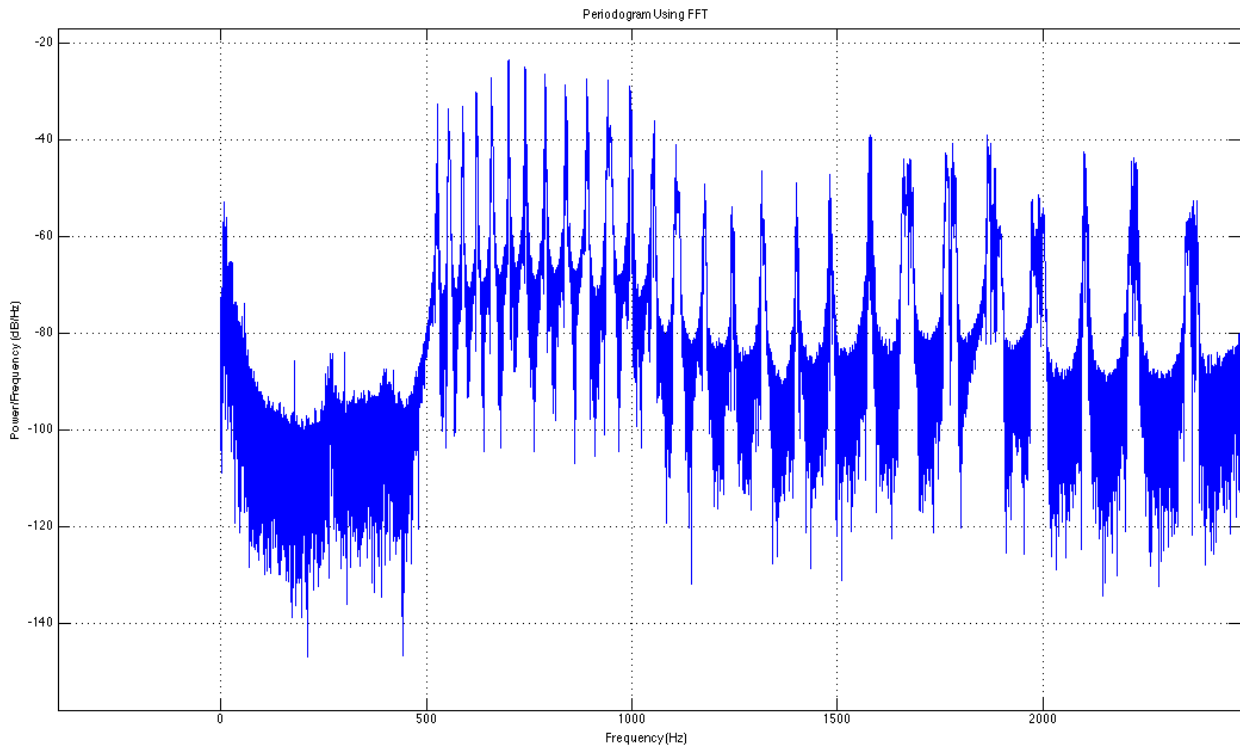
3.2 Συχνотικό περιεχόμενο ενός μουσικού σήματος

Έχει πολύ ενδιαφέρον να εξετάσουμε το συχνотικό περιεχόμενο ενός μουσικού σήματος απαλαγμένο απο αντήχηση, ηχογραφημένο δηλαδή μέσα σε ανηχοικό θάλαμο. Παρακάτω παραθέτουμε το φάσμα του σήματός μας, το οποίο είναι ένα μουσικό δείγμα απο ένα σαξόφωνο. Η ανάλυση έχει γίνει με την πλατφόρμα Matlab.



Σχήμα 12. Μουσικό δείγμα απο σαξόφωνο.

Δεν μπορούμε να συμπεράνουμε πολλά για το σήμα μας, αλλά αν μεγενθύνουμε στις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν θα καταλάβουμε περισσότερα. Απο την μεγένθυση θα έχουμε



Σχήμα 13. Μεγεθυμένο μουσικό δείγμα απο σαζόφωνο.

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργεια έχει διανεμηθεί στις συχνότητες απο 500 Hz μέχρι και τα 6 kHz. Απο τα 6 kHz και μετά βλέπουμε οτι η ενέργεια έχει μειωθεί σημαντικά, αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή την περιοχή του φάσματος παρουσιάζονται μόνο αρμονικές των βασικών συχνοτήτων πολύ μικρότερες σε πλάτος.

Μια άλλη παρατήρηση που πρέπει να κάνουμε είναι οτι στην περιοχή απο τα 500 Hz μέχρι τα 1000 Hz παρουσιάζονται δώδεκα μέγιστα. Αυτά τα μέγιστα αντιστοιχούν στις συχνότητες των δώδεκα ημιτόνιων ανάμεσα στην B5 μέχρι την C5 το οποίο και επαληθεύσαμε ακούγοντας το κομμάτι.

Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης. Όταν κάποιο μουσικό κομμάτι αναπαράγεται μέσα σε ένα δωμάτιο, μόνο ένα μικρό μέρος του δωματίου έχει την ικανότητα να αλληλεπιδράσει με τον ήχο αυτό, διότι οι συχνότητες ενός μουσικού σήματος είναι περιορισμένες. Σε αντίθεση ένας συνεχόμενος θόρυβος ή μια κρουστική συνάρτηση θέτει όλο το δωμάτιο σε αλληλεπίδραση διότι περιλαμβάνονται πολλές συχνότητες.

Ένα μουσικό σήμα δηλαδή προκαλεί όξυνση των τονικών συχνοτήτων. Αυτό το συμπέρασμα είναι μεγάλης σημασίας για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης απο κάποιο μουσικό σήμα γιατί αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο είναι η εξασθένιση αυτών των συχνοτήτων.

3.3 Χρόνος εξασθένησης της μουσικής

Η μέθοδος της αυτοσυσχέτισης για την εύρεση του χρόνου αντήχησης, λειτουργεί υπολογίζοντας το μήκος συσχέτισης του σήματος μας, με άλλα λόγια υπολογίζουμε τον χρόνο που χρειάζεται η περιβάλλουσα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης να φτάσει σε μια συγκεκριμένη τιμή σε σχέση με το μέγιστο για $t = 0$. Αν αυτή η τιμή τεθεί ίση με -60 dB, τότε το μήκος της συσχέτισης θα είναι ίσο με τον χρόνο αντήχησης. Αν σε ένα δωμάτιο με κρουστική απόκριση $h(t)$, αναπαράγουμε ένα σήμα $s(t)$, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\varphi_x(t)$ του σήματος που λαμβάνουμε $x(t) = (s * h)(t)$ είναι

$$\varphi_x(t) = \varphi_s(t) * \varphi_h(t)$$

Ο υπολογισμός της περιβάλλουσας είναι μη γραμμικός. Για να διευκολύνθουμε στον υπολογισμό μπορούμε να θεωρήσουμε δυο ακραίες περιπτώσεις. Αν το σήμα μας $s(t)$ είναι μια κρουστική συνάρτηση, τότε το σήμα που “ακούει” το μικρόφωνο θα έχει το ίδιο μήκος συσχέτισης με την κρουστική αυτή συνάρτηση. Αν το σήμα μας είναι ένα συνεχόμενο περιοδικό σήμα, τότε το μήκος συσχέτισης που λαμβάνει το μικρόφωνο θα είναι τείνει στο άπειρο. Στην πράξη όμως θα περιορίσουμε το σήμα μας με την παραθύρωση.

Αν το σήμα μας $s(t)$ είναι ένα μουσικό σήμα απαλλαγμένο από χρόνο αντήχησης, μπορούμε να κάνουμε την ακόλουθη παραδοχή: Κατά την διάρκεια του σήματος μας, θα υπάρχουν σημεία τα οποία θα έχουν μεγάλο μήκος συσχέτισης, δηλαδή θα υπάρχουν νότες οι οποίες θα εξασθενούν αργά, λόγω του το ότι δεν θα σταματήσουμε την ταλάντωση π.χ. μιας χορδής. Σίγουρα όμως θα υπάρχουν και νότες με μικρό μήκος συσχέτισης, δηλαδή νότες που η ταλάντωση τους σταματάει σύντομα. Αν τώρα το μήκος συσχέτισης ενός τμήματος ενός ανεχοικού μουσικού σήματος είναι μικρότερο από τον χρόνο αντήχησης, τότε η περιβάλλουσα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αυτού του τμήματος θα εξασθενήσει σίγουρα πιο αργά στο χρόνο από το μήκος συσχέτισης της κρουστικής αποκρίσης. Με άλλα λόγια, ένας μουσικός τόνος σε ένα δωμάτιο εξασθενεί σίγουρα πιο αργά από την κρουστική απόκριση του δωματιού αυτού.

Αυτή η διαπίστωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί μια μέθοδος μέτρησης: Για ένα μουσικό κομμάτι το οποίο έχει κάποιο χρόνο αντήχησης, η εξασθένιση του ισούται με τον χρόνο αντήχησης αν υποθέσουμε ότι η περιβάλλουσα της αυτοσυσχέτισης εξασθενεί μέχρι τα -60 dB.

Στην πράξη, αυτός ο χρόνος θα υπολογιστεί από την κλίση της περιβάλλουσας και φυσικά θα υπολογίσουμε για κάθε ζώνη συχνοτήτων τον αντίστοιχο χρόνο. Η ελάχιστη τιμή για κάθε συχνότητα θα μας δίνει χρόνο ίσο ή μεγαλύτερο από τον αναμενόμενο χρόνο αντήχησης.

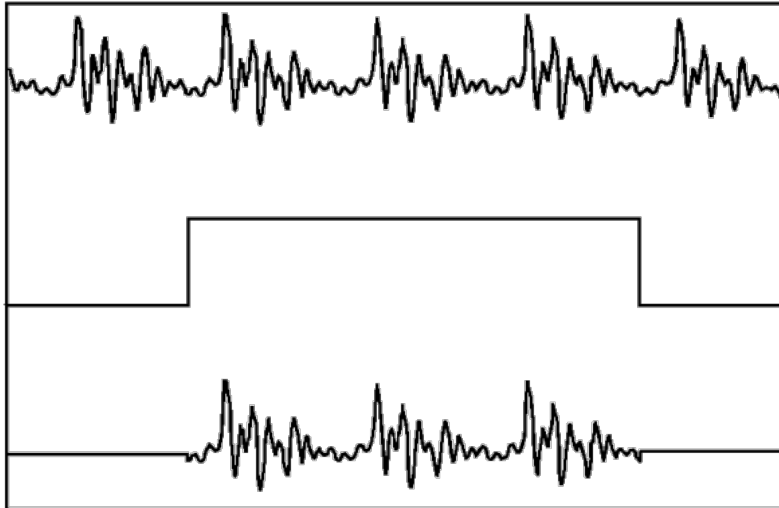
3.4 Παραθύρωση του σήματος

Προκειμένου να εξάγουμε ηχητικά χαρακτηριστικά από τα αντίστοιχα σήματα, πρέπει να υιοθετήσουμε την βραχυπρόθεσμη επεξεργασία (short-term processing). Αυτό συμβαίνει διότι, τα ηχητικά σήματα είναι είναι μη στάσιμα (non-stationary), το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι οι στατιστικές τους ιδιότητες δεν παραμένουν σταθερές στον χρόνο. Έτσι, η short-term επεξεργασία έγκειται στην διαίρεση η παραθύρωση (windowing), δηλαδή την τμηματική εφαρμογή παραθύρων τα οποία κάθε φορά μετακινούνται στον χρόνο και έτσι "απομονώνουν" ένα ξεχωριστό "πλαίσιο" (frame) του σήματος.

Το μέγεθος του παραθύρου πρέπει να είναι αφενός αρκετά μεγάλο, ώστε να μπορούν να υπολογισθούν τα φασματικά χαρακτηριστικά του, και αφετέρου όχι πολύ μεγάλο, ώστε να μην χαθεί η ιδιότητα της στασιμότητας.

Στις κρουστικές αποκρίσεις και στα μουσικά σήματα η περιοδικότητα δεν υπάρχει όταν χρησιμοποιούμε FFT (Fast Fourier Transformation). Επίσης μπορούμε να οδηγηθούμε σε λάθος συμπεράσματα αν η αρχή του παραθύρου δεν συμβαδίζει με την αρχή της απόκρισης. Για τα μουσικά σήματα αυτό μπορεί να είναι ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα. Ένα μουσικό σήμα μπορεί να θεωρηθεί σαν τονικές εξάρσεις στο χρόνο. Μια αυτοποιημένη διαδικασία παραθύρωσης όμως είναι πολύ πιθανό να χωρίσει το σήμα σε λάθος στιγμή και να μας δώσει λάθος συμπεράσματα για την εκτίμηση του χρόνου αντήχησης.

Λόγω της φύσης ενός μουσικού σήματος, όπως και μίας κρουστικής συνάρτησης, το είδος του παραθύρου που διαλέξαμε είναι ορθογώνιο και με το διπλάσιο μήκος απο το μήκος του αναμενόμενου χρόνου αντήχησης. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα παραθύρωσης με ορθογώνιο παράθυρο.

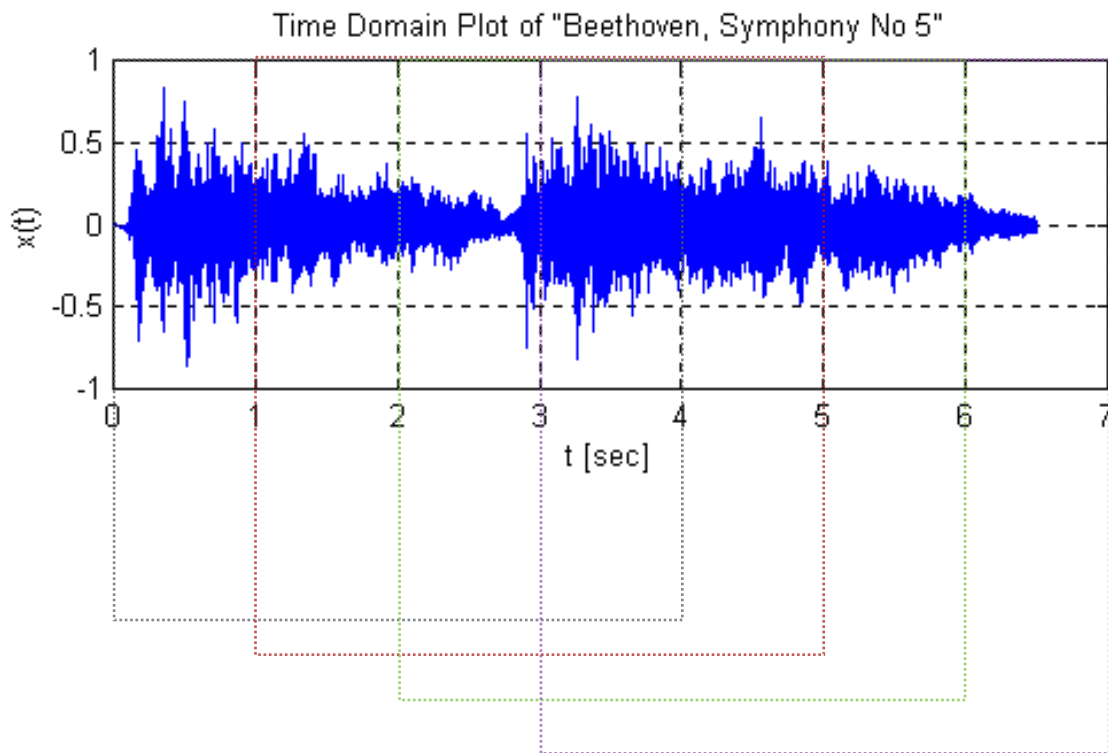


Σχήμα 12. Παράδειγμα παραθύρωσης: η πρώτη κυματομορφή είναι το αρχικό σήμα μας, η δεύτερη κυματομορφή είναι το ορθογώνιο παράθυρο και η τρίτη κυματομορφή παρουσιάζει το αποτέλεσμα της παραθύρωσης με ένα ορθογώνιο παράθυρο.

Προσοχή πρέπει να δοθεί με τα μουσικά σήματα, αν παρατηρηθεί μια έξαρση ενός ισχυρού τόνου λίγο πριν το τέλος του παραθύρου, τότε η εκτίμηση του χρόνου αντήχησης θα είναι λανθασμένη και θα απέχει από το πραγματικό.

Ανάλογα το μουσικό κομμάτι που διαλέγουμε κάθε φορά, θα έχουμε και τα ανάλογα πλαίσια.

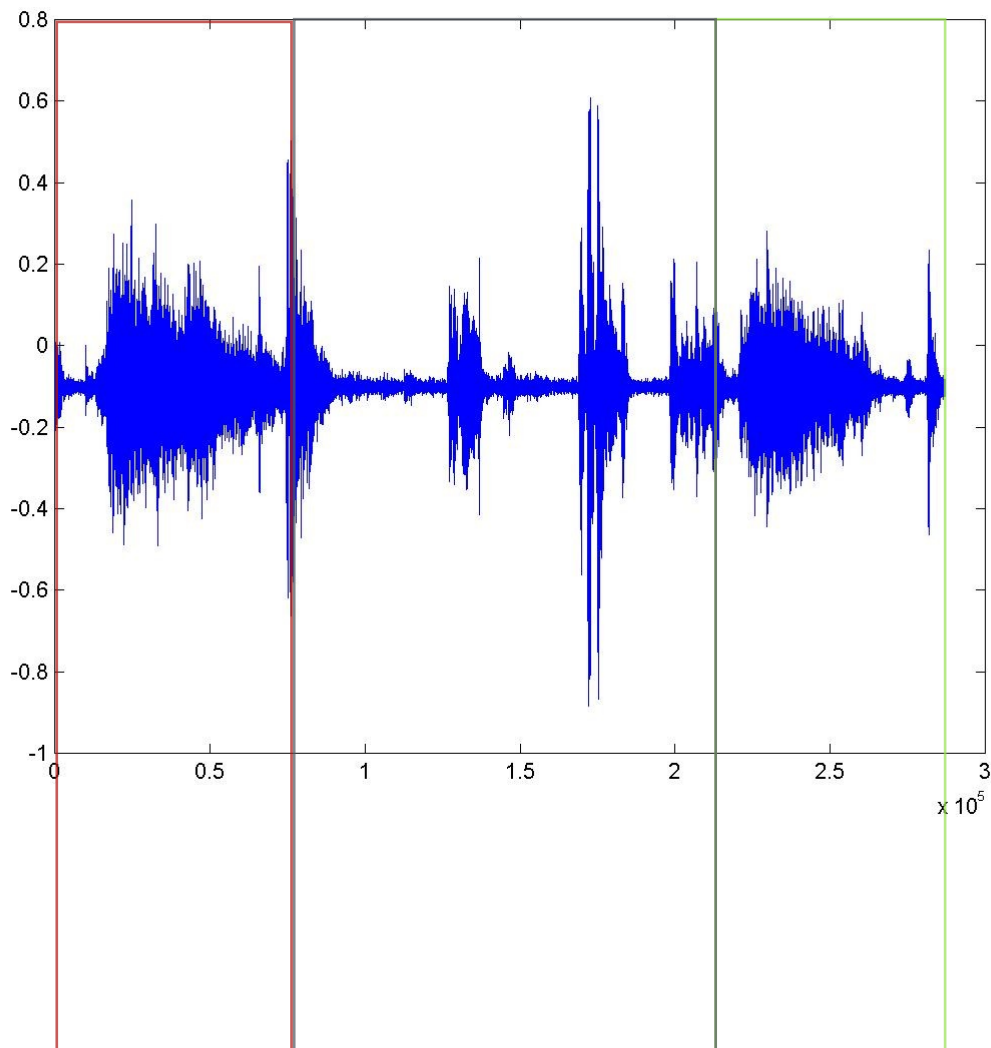
Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα για το πως γίνεται η επικάλυψη των 3/4.



Τα παράθυρα μας απεικονίζονται με τις πολύχρωμες διακεκομμένες γραμμές. Βλέπουμε ότι έχουν μήκος 4 sec σε αυτό το παραδειγμα, οπότε μια επικάλυψη των 3/4 θα είναι όπως στο παραπάνω σχήμα.

3.5 Εύρεση ιδανικών μουσικών τμημάτων

Όπως έχουμε αναφέρει και πιο πριν, ύστερα απο την παραθύρωση πρέπει να εφαρμόσουμε έναν κανόνα για κάθε πλαίσιο του μουσικού τμήματος για να συμπεράνουμε αν το εξεταζόμενο πλαίσιο είναι ιδανικό για περαιτέρω ανάλυση. Ο κανόνας αυτός είναι ο υπολογισμός της RMS τιμής του πρώτου και τελευταίου 25% του πλαισίου όπως και το 50% που μενει στη μέση. Αν το 25% του πρώτου μέρους ή του τελευταίου μέρους διαιρεμένο με το 50% της μέσης είναι μεγαλύτερο απο τα 6 dB για το πρώτο και 7 dB για το τελευταίο τότε το εξεταζόμενο πλαίσιο δεν παίρνει μέρος στην ανάλυση.



Σχήμα 13. Παράδειγμα του RMS κανόνα.

Το παραπάνω σχήμα υποθέτουμε ότι είναι ένα πλαίσιο του μουσικού μας σήματος. Το παραλληλόγραμμο με την κόκκινη διαγράμμιση είναι το πρώτο 25%, το παραλληλόγραμμο με την πράσινη διαγράμμιση είναι το τελευταίο 25% και το μαύρο είναι το ενδιάμεσο 50%. Για κάθε πλαίσιο που θα εξετάσουμε θα ακολουθήσουμε τον παρακάτω κανόνα

αν $\frac{RMS(25\%first)}{RMS(50\%middle)} > 6dB$ τότε το εξεταζόμενο πλαίσιο απορρίπτεται

αν $\frac{RMS(25\%last)}{RMS(50\%middle)} > 7dB$ τότε το εξεταζόμενο πλαίσιο απορρίπτεται.

Για κάθε πλαίσιο που ικανοποιεί τον κανόνα το αποθηκεύουμε για περαιτέρω επεξεργασία.

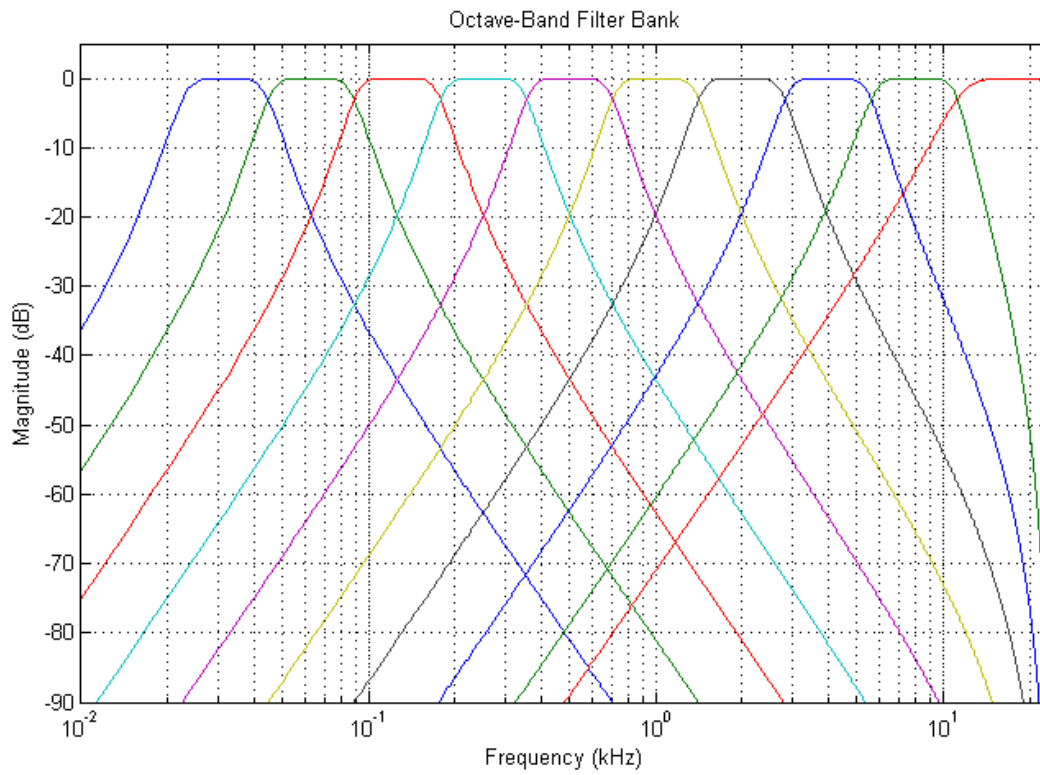
3.6 Οκταβικά και 1/3 οκταβικά φίλτρα.

Όταν θέλουμε να αναλύσουμε ένα μουσικό σήμα και θέλουμε να εξετάσουμε αναλυτικά κάθε ζώνη συχνοτήτων, τότε εφαρμόζουμε στο σήμα μας ένα φίλτρο για να απομονώσουμε την ζώνη που μας ενδιαφέρει περισσότερο. Αυτά τα φίλτρα ανάλογα με το εύρος τους ονομάζονται οκταβικά αν το εύρος τους είναι μια οκτάβα και 1/3 οκταβικά αν το εύρος είναι το 1/3 μιας οκτάβας.

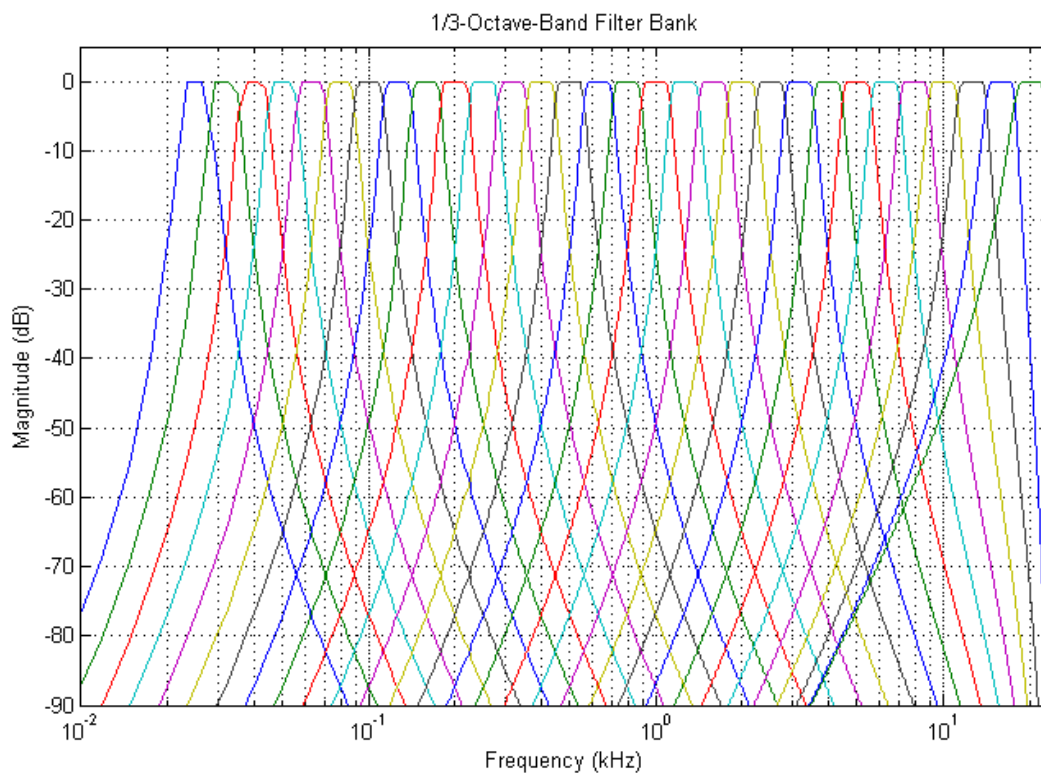
Μια οκτάβα είναι μια ζώνη συχνοτήτων όπου η υψηλότερη συχνότητα είναι ίση με το διπλάσιο της πιο χαμηλής. Ένα οκταβικό φίλτρο με κεντρική συχνότητα τα 1 kHz, θα έχει χαμηλή συχνότητα ίση με 707 Hz και υψηλή ίση με 1.414 kHz. Συχνότητες που είναι μεγαλύτερες απο απο την υψηλή και χαμηλότερες απο την χαμηλή απορρίπτονται.

Στον αλγόριθμο που χρησιμοποιήσαμε, μετά την παραθύρωση και τον κανόνα για το αν το εξεταζόμενο πλαίσιο είναι ικανό για ανάλυση, σειρά έχει η οκταβική ανάλυση για να εξετάσουμε ξεχωριστά για κάθε ζώνη συχνοτήτων τον χρόνο αντήχησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα οκταβικών και 1/3 οκταβικών φίλτρων.



Σχήμα 14. Παράδειγμα οκταβικού φίλτρου.



Σχήμα 15. Παράδειγμα 1/3-οκταβικού φίλτρου.

3.7 Μετασχηματισμός Fourier

Ο όρος Μετασχηματισμός Φουριέ αναφέρεται σε μία αυστηρώς ορισμένη μαθηματική διεργασία η οποία αποσυνθέτει μία συνάρτηση σε άθροισμα απείρων περιοδικών ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών συναρτήσεων. Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι μία νέα συνάρτηση με διαφορετικό πεδίο ορισμού, επίσης γνωστή ως Μετασχηματισμός Φουριέ ή ως φάσμα, η οποία περιγράφει το κατά πόσο συμμετέχει κάθε στοιχειώδες ημίτονο στον σχηματισμό της αρχικής συνάρτησης (έστω f).

Όταν επεξεργαζόμαστε σήματα, όπως ήχο, ραδιοκύματα, κύματα φωτός, σεισμικά κύματα, ακόμα και εικόνες, η ανάλυση Φουριέ μπορεί να απομονώσει μεμονωμένους συντελεστές από μια σύνθετη κυματομορφή, συγκεντρώνοντάς τους για ευκολότερη ανίχνευση ή/και αφαίρεση. Μία μεγάλη οικογένεια τεχνικών επεξεργασίας σήματος αποτελείται από μετασχηματισμό Φουριέ ενός σήματος, χειρισμό μετασχηματισμένων με Φουριέ δεδομένων με απλό τρόπο και αντιστροφή του μετασχηματισμού.

Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιούμε τον Μ/Σ Fourier για να την δημιουργία του ηχητικού φασματογραφήματος για την ανάλυση του μουσικού σήματος.

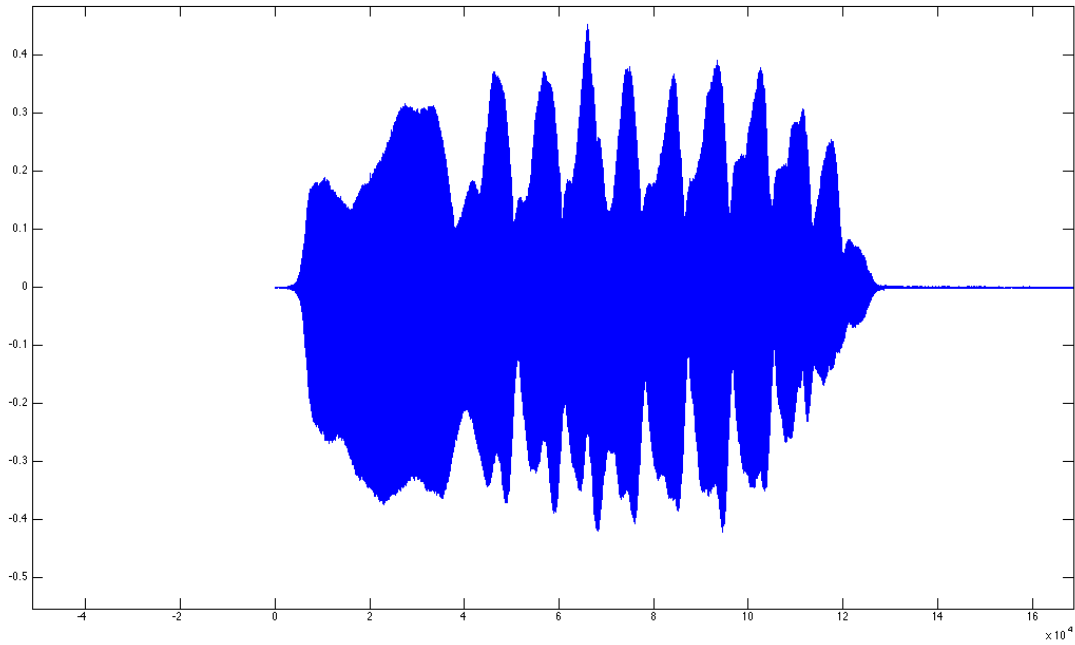
Υπάρχουν πολλές κοινές συμβάσεις για τον καθορισμό του μετασχηματισμού Fourier f μιας ολοκληρώσιμης συνάρτησης $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, σ' αυτή την εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω ορισμό:

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi i x \xi} dx, \quad \text{για κάθε πραγματικό αριθμό } \xi.$$

Όταν η ανεξάρτητη μεταβλητή x αντιπροσωπεύει το χρόνο, ο μετασχηματισμός της μεταβλητής ξ αντιπροσωπεύει την συχνότητα (σε Hertz). Υπο κατάλληλες συνθήκες, η f προσδιορίζεται από την $f(x)$ μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού :

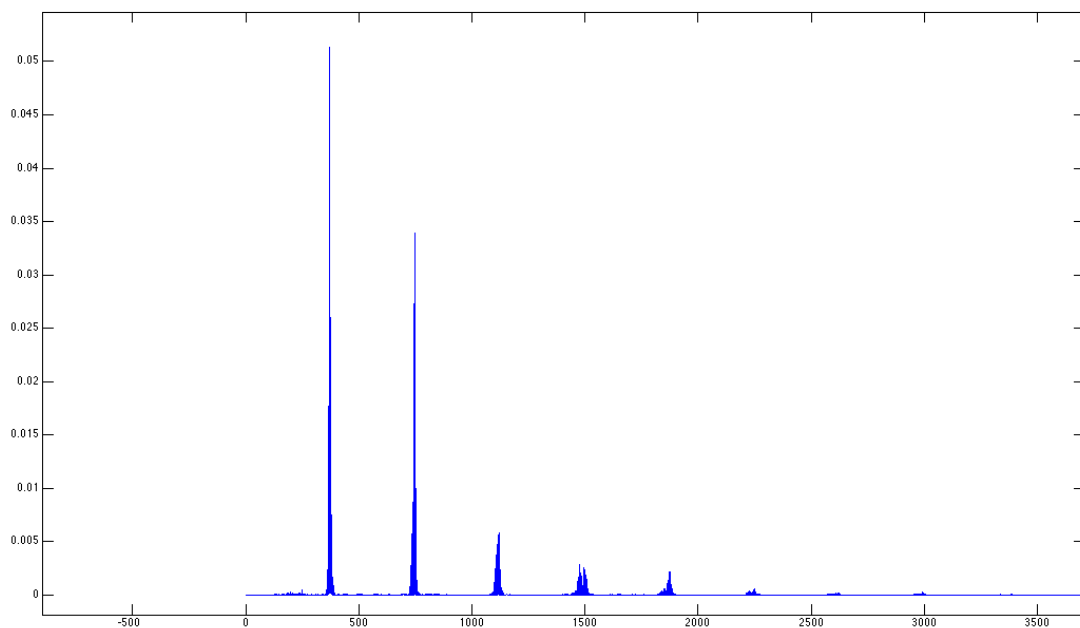
$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\xi)e^{2\pi i \xi x} d\xi, \quad \text{για κάθε πραγματικό αριθμό } x.$$

Παρακάτω παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα μετασχηματισμού ενός μουσικού σήματος. Το σήμα μας είναι ένα μουσικό σήμα απο φλάουτο. Πέρασαμε το σήμα μας στην πλατφόρμα Matlab και χρησιμοποιήσαμε την ήδη υπάρχουσα συνάρτηση `fft` (Fast Fourier Transform), όπου `x` θα είναι η είσοδος μας, δηλαδή το σήμα μας. Η νότα που ακούγεται στο κομμάτι είναι η F#. Θα εξετάσουμε αν μπορούμε να βρούμε την συχνότητα της συγκεκριμένης νότας. Το σήμα μας στο πεδίο του χρόνου θα είναι,

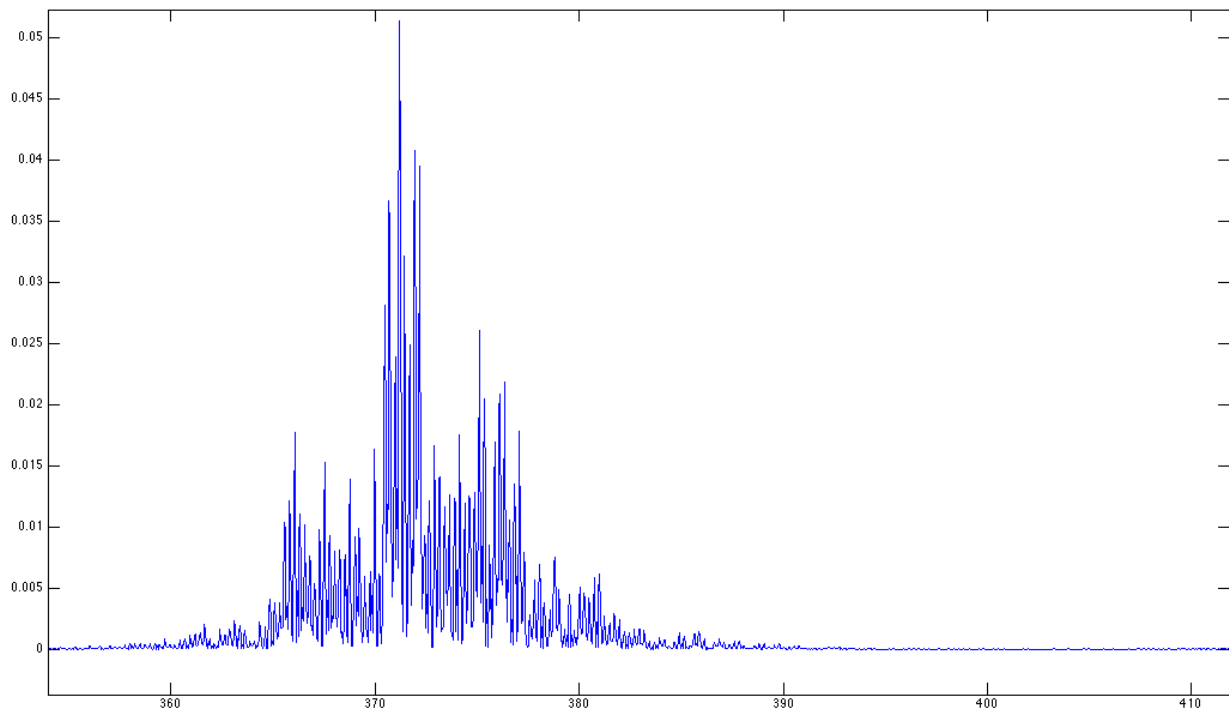


Σχήμα 16. Μουσικό τμήμα απο φλάουτο.

Κάνοντας ανάλυση Fourier στο παραπάνω σήμα θα έχουμε το εξής αποτέλεσμα,



Η θεμελιώδης συχνότητα είναι αυτή που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος, δηλαδή η πρώτη κορυφή που φαίνεται στο διάγραμμα. Μεγενθύνοντας την θεμελιώδη συχνότητα βλέπουμε ότι αντιστοιχεί στην συχνότητα των 371 Hz, η οποία προσδιορίζει την νότα $F_4^{\#} / G_4^b$.



Σχήμα 17. Μουσικό τμήμα απο φλάουτο, ύστερα απο ανάλυση Fourier.

Η απόκλιση οφείλεται στον φυσικό θόρυβο που υπάρχει κατα την διάρκεια της ηχογράφησης. Αν χρησιμοποιούσαμε αλγόριθμο για την αφαίρεση του θα παίρναμε πλησιέστερα αποτελέσματα.

Οι υπόλοιπες κορυφές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα FFT οφείλονται στις αρμονικές της νότας.

Στον αλγόριθμο αυτοσυσχέτισης θα χρησιμοποιήσουμε τον μετασχηματισμό Fourier για να βρούμε σε ποιές συχνότητες υπάρχει η μεγαλύτερη ενέργεια και ύστερα να βρούμε τον χρόνο αντίχησης για τις συχνότητες αυτές.

3.8 Ολοκλήρωση κατά Schroeder

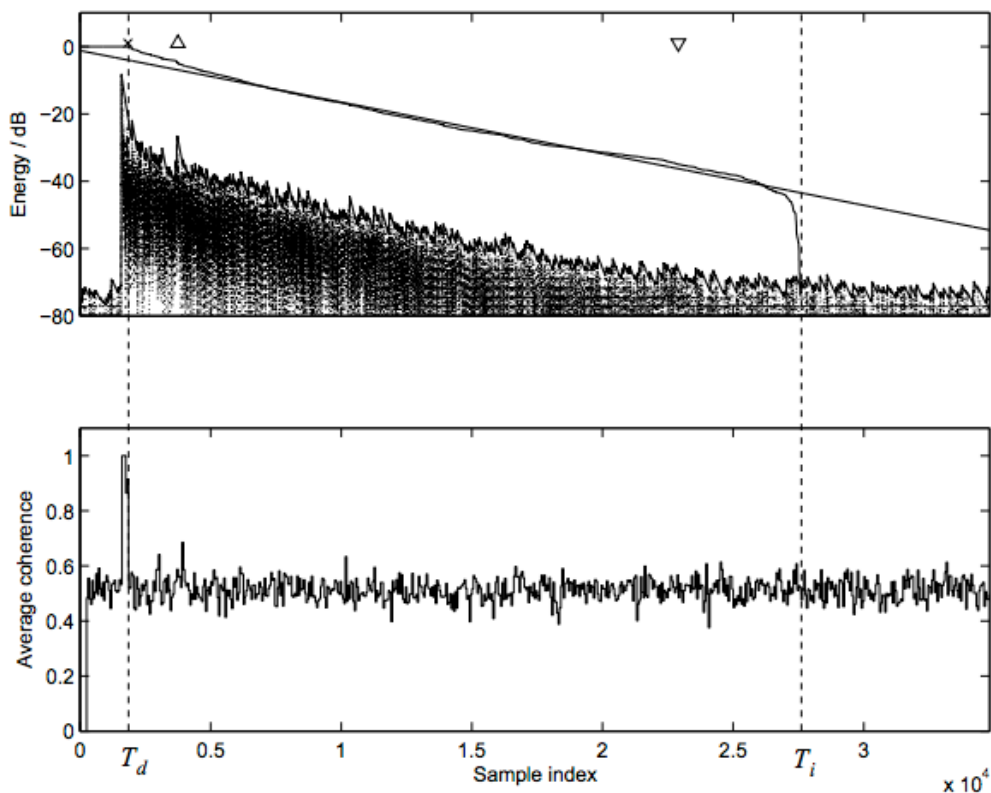
Το 1964 ο Manfred R. Schroeder έκανε μια δημοσίευση με το όνομα “A new method of Measuring Reverberation Time”. Στη δημοσίευση αυτή πρότεινε για την εύρεση του χρόνου αντήχησης, να μετρηθεί όχι η δύναμη του σήματος αλλά η ενέργεια με ολοκλήρωση. Με αυτό τον τρόπο κατέστησε δυνατή την παρατήρηση της διακύμανσης του ρυθμού εξασθένισης.

Ένας πρακτικός τύπος για την εφαρμογή της μεθόδου του Schroeder είναι,

$$D(t) = N \int_{T_d}^{T_i} h^2(\tau) d\tau$$

Τα όρια που θα διαλέξουμε παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην σωστή εκτίμηση του χρόνου αντήχησης. Το T_i ιδανικά πρέπει να είναι στο σημείο όπου η καμπύλη μας αρχίζει να είναι μόνο θόρυβος παρασκηνίου. Το T_d πρέπει να βρίσκεται στο σημείο λίγο πιο μετά όπου η καμπύλη αρχίζει την κάθοδο. Μια εναλλακτική είναι να βρίσκεται στο -5 dB.

Δίνεται παράδειγμα ολοκλήρωσης κατα Schroeder τυχαίας κρουστικής συνάρτησης,



Σχήμα 18. Παράδειγμα ολοκλήρωσης Schroeder.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Περιγραφή των μετρήσεων

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην εργασία πραγματοποιήθηκαν στο γραφείο 2.2.12 στα καινούργια κτήρια των Ηλεκτρολόγων, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

4.1 Εξοπλισμός ηχογράφησης

Πιο συγκεκριμένα:

Χρησιμοποιήθηκε ένα ηχόμετρο, της εταιρίας Brüel&Kjær, τύπου 2270. Το μικρόφωνο ήταν τύπου 4189. Το calibration του μικροφώνου έγινε με το calibrator τύπου 4231. Πριν κάθε σειρά μετρήσεων εξετάζονταν το κατά πόσον το calibration ήταν πρόσφατο ώστε να ελαχιστοποιηθούν τυχόν σφάλματα που οφείλονται σε κακή βαθμονόμηση.

Παρατίθενται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των οργάνων:

SOUND LEVEL METER

Brüel & Kjær, Hand-held Analyzer . Type 2250, with Sound Level Meter Software BZ-7222, Frequency Analysis Software BZ-7223, Logging Software BZ-7224, Enhanced Logging Software BZ-7225 and Sound Recording Option BZ-7226

SUPPLIED MICROPHONE

Type 4189: Pre-polarized Free-field ½" Microphone

Nominal Open-circuit Sensitivity: 50 mV/Pa (corresponding to -26 dB re 1 V/Pa) ± 1.5 dB

Capacitance: 14 pF (at 250 Hz)

MICROPHONE PREAMPLIFIER ZC-0032

Nominal Preamplifier Attenuation: 0.25 dB

Connector: 10-pin LEMO

Calibrator: Sound Calibrator Type 4231

Το sound level meter τύπου 2270 προσέφερε τη δυνατότητα να γίνει και απευθείας φασματική ανάλυση. Φασματική ανάλυση έγινε και με χρήση του λογισμικού Matlab μέσω των ηχογραφημένων αρχείων.

Για την μέτρηση του χρόνου αντήχησης, χωρίς την μέθοδο αυτοσυσχέτισης, χρησιμοποιήθηκε πιστόλι αντίστοιχο με αυτό που χρησιμοποιούν στον στίβο.

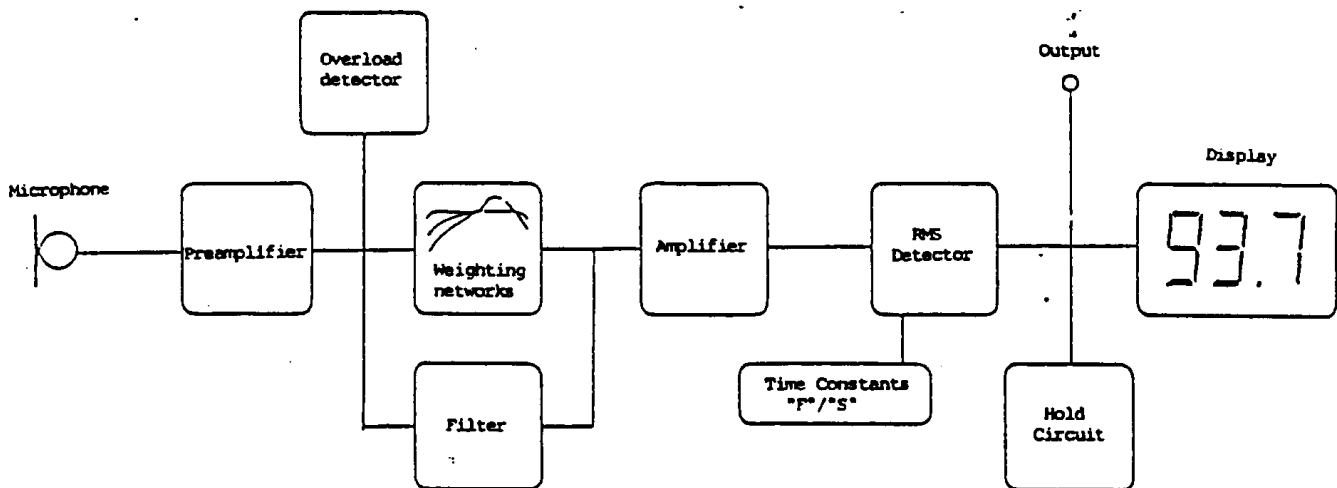
Το οποίο αναλύθηκε με το ηχώμετρο.

Πιο συγκεκριμένα: Πιστόλι: Olympic .380 Blank Firing Revolver - 9mm

Χαρακτηριστικά: Μήκος: 7.25", Βάρος: 1.5 lbs, Barrel: 2.5"

Όσον αφορά τις μετρήσεις για τη μελέτη της αντήχησης, τα ηχώμετρα που χρησιμοποιήθηκαν υπακούουν στα αντίστοιχα ISO πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων των ISO140, ISO3382, and ISO354.

Τα ηχώμετρα λειτουργούν βασισμένα στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 19. Διάγραμμα λειτουργίας ηχώμετρου.

Ο ήχος που φτάνει στο μικρόφωνο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα αυτό όμως είναι μικρό και για να αξιοποιηθεί προενισχύεται. Έπειτα, περνά από ένα δίκτυο φίλτρων Α ή C (A/C weighting) τα οποία του δίνει συγκεκριμένη ευαισθησία σε κάθε συχνότητα. Στο στάδιο 3β το σήμα φιλτράρεται ώστε να παραμείνουν μόνο οι ακουστές συχνότητες (20Hz – 20kHz). Σε περίπτωση που επιθυμούμε να γίνει φασματική ανάλυση, το σήμα διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων, σε οκταβική ή 1/3οκταβική ανάλυση. Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται. Υπολογίζεται η ενεργός (rms) τιμή του σήματος. Στο στάδιο αυτό, προσδιορίζεται και ο επιθυμητός χρόνος αντίδρασης του ηχομέτρου. Για πολύ ταχείες αλλαγές του αναλογικού σήματος επιλέγεται η γρήγορη αντίδραση (Fast ("F")), με χρόνο αντίδρασης 25ms, ενώ για πιο ομαλή η αργή (Slow ("S")), με χρόνο αντίδρασης 1sec. Υπάρχει και η επιλογή «I» (Impulse), με χρόνο αντίδρασης 35ms, για περιπτώσεις που ο μετρούμενος ήχος αποτελείται από μεμονωμένους χτύπους, η οποία όμως δε χρησιμοποιείται πολύ. Στο τελευταίο στάδιο έχουμε την απεικόνιση του μετρούμενου μεγέθους σε dB. Η απεικόνιση αυτή γίνεται απευθείας μετά τον υπολογισμό της ενεργούς τιμής του σήματος.

Σε περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε τις μέγιστες τιμές που έγιναν κατά την καταγραφή μας έχουμε δύο επιλογές, την max ή την peak, μέσω του Hold Circuit. Η peak είναι η μέγιστη απόλυτη τιμή που καταγράφηκε σε μία μεμονωμένη χρονική στιγμή. Η max είναι η μέγιστη ενεργός τιμή που υπολογίστηκε σε κάποιο μεμονωμένο χρονικό διάστημα.

Για την καταγραφή ηχητικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν:

Φορητός Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (Laptop)

USB επαγγελματική κάρτα ήχου: εταιρεία Digigram, μοντέλο **UAX 220-Mic**

PA/Speaker : εταιρία **JVS**

Πυκνωτικό Μικρόφωνο: εταιρεία **Behringer**, μοντέλο **ECM 8000**

Χαρακτηριστικά: γραμμική απόκριση συχνοτήτων, μη κατευθυντική πολική συμπεριφορά

Το λογισμικό ηχογράφησης ήταν της εταιρίας **COCKOS INCORPORATED**, το μοντέλο **Reaper 4.62**.

Τα χαρακτηριστικά ηχογράφησης ήταν:

Sample Rate: 44100Hz

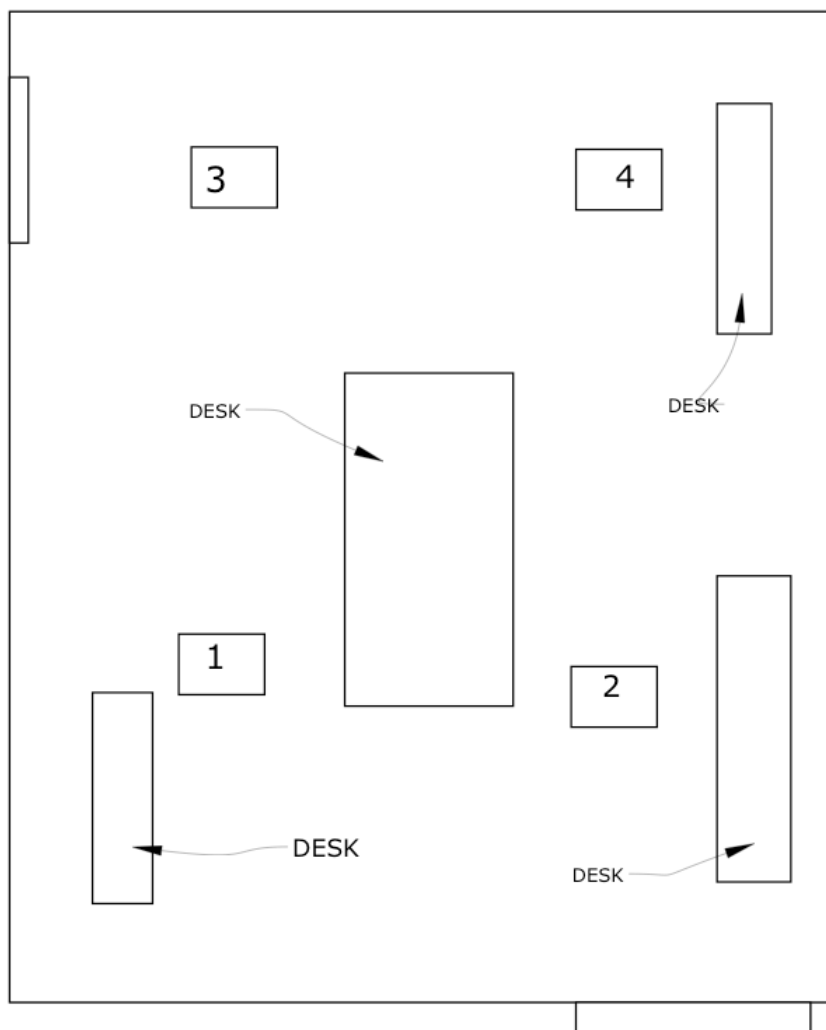
Channels: Mono

Resolution: 16-bit

Τα αρχεία αποθηκεύτηκαν υπό τη μορφή .wav ώστε να είναι δυνατόν να αναλυθούν από το λογισμικό Matlab με χρήση της εντολής wavread.

4.2 Ηχογράφιση των κρουστικών συναρτήσεων

Επιπρόσθετα των ηχογραφήσεων των μουσικών κομματιών, έγιναν και ηχογραφήσεις κρουστικών σημάτων και έπειτα έγινε ανάλυση τους απο το ηχόμετρο για να εξακριβώσουμε τον χρόνο αντήχησης για κάθε ζώνη συχνότητας, έτσι ώστε να έχουμε κάποιο μέτρο σύγκρισης για τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μας. Οι κρουστικές δημιουργήθηκαν απο το προαναφερθέν πιστόλι στίβου. Ηχογραφήσαμε τέσσερις κρουστικές, απο τέσσερα διαφορετικά σημεία, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 20. Κάτοψη του χώρου και τοποθέτηση του ηχόμετρου.

Τα τέσσερα τετράγωνα με τους αριθμούς ένα έως τέσσερα απεικονίζουν τις τέσσερις πηγές των κρουστικών. Το ηχόμετρο ήταν στην σταθερή θέση πάνω στο μεγάλο γραφείο. Για μέτρο σύγκρισης θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές απο την θέση 1, αφού εκεί έγιναν και οι υπόλοιπες ηχογραφήσεις των κομματιών.

4.3 Μουσικά σήματα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα μουσικά σήματα που χρησιμοποιήσαμε ήταν ανηχοϊκά σήματα, σήματα απαλλαγμένα από κάθε χρόνο αντήχησης. Τα σήματα αυτά τα πήραμε από το Πανεπιστήμιο της Αϊόβα, τα οποία έχουν ηχογραφηθεί από μουσικούς σε ανηχοϊκό θάλαμο.

Από μια μεγάλη συλλογή δειγμάτων, διαλέξαμε δύο είδη μουσικών κατηγοριών. Τα πνευστά και έγχορδα, τα κρουστά τείνουν να έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τα κρουστικά σήματα, όποτε παραλήψαμε περαιτέρω ανάλυση.

Πνευστά

- Flute.nonvib.ff.B3B4
- Trumpet.novib.ff.C4B4

Έγχορδα

- Guitar.pp.sul_E.E4B4.mono

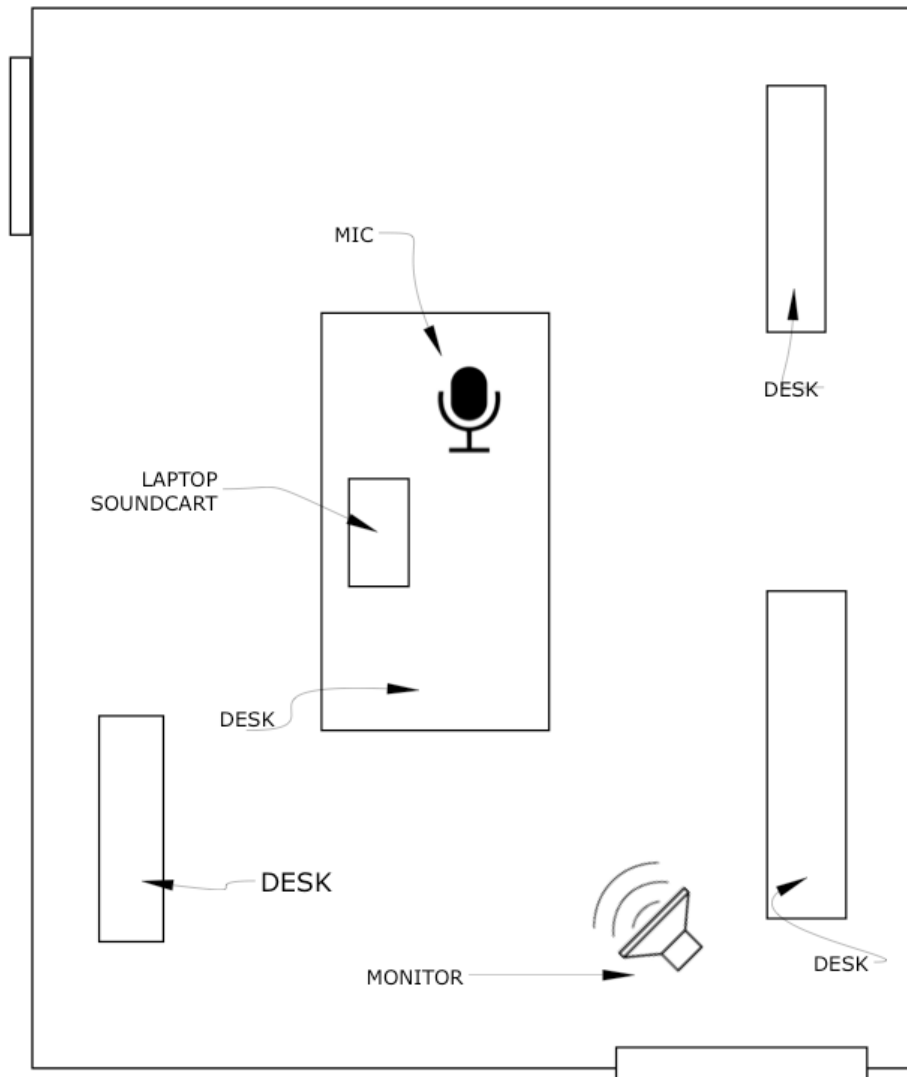
Χρησιμοποιήσαμε επίσης εξολοκλήρου μουσικό κομμάτι, όπου το κάθε όργανο ηχογραφήθηκε ξεχωριστά σε ανηχοϊκό θάλαμο από Πανεπιστήμιο της Φιλανδίας και ύστερα έγινε η σύνθεση όλων των κομματιών σε ένα mono κανάλι από το πρόγραμμα **Audacity**.

W. A. Mozart (1756-1791): An aria of Donna Elvira from the opera Don Giovanni. Parts: Flute, Clarinet, Bassoon, French horns 1-2, Violin I, Violin II, Viola, Cello, Contrabass, Soprano (soloist)

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία ηχογράφησης αυτών των μουσικών δειγμάτων στον χώρο που διεξήχθη η μελέτη της εργασίας.

4.4 Ηχογράφηση μουσικής

Όλα τα μουσικά δείγματα μεταφέρθηκαν σε φορητή συσκευή αναπαραγωγής μουσικής και ύστερα συνδέσαμε την συσκευή στο ηχείο. Τοποθετήσαμε τον φορητό υπολογιστή, την κάρτα ήχου και το μικρόφωνο σε σταθερό σημείο κάθε φορά(θέση 1), έτσι ώστε το κάθε δείγμα να έχει την ίδια μεταχείριση. Παρακάτω παρουσιάζεται κάτοψη του χώρου μαζί με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήσαμε.



Σχήμα 21. κάτοψη του χώρου και τοποθέτηση του εξοπλισμού

Σε κάθε ηχογράφηση έγινε προσπάθεια ο θόρυβος βάθους να μείνει σε χαμηλό επίπεδο. Αφού έγινε η ηχογράφηση όλων των μουσικών δειγμάτων ακολούθησε η ανάλυση τους με την Matlab και τον αλγόριθμό μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Περιγραφή του κώδικα που αναπτύξαμε

Όλη η διαδικασία αναπτυξης του αλγορίθμου έγινε στην πλατφόρμα Matlab. Θα παρουσιάσουμε τον κώδικα αναλυτικά όπως και κάθε συνάρτηση που χρησιμοποιήσαμε.

Παρακάτω παραθέτουμε την main συνάρτηση, που έχει βασιστεί ο κώδικας.

```
function [RT,rt_f,F0,before_cumsum] = revtime_han(path2,x_time)

%The above program calculates the Reverberation Time for a reverberated
%signal for each frequency band.
%The input should be the path of the music file, in a .wav format.

%An example of the input looks like:

%path2 = '/Users/vagelismakris/Desktop/diplomatiki/
trumpet_notdry_cut.wav';

[x,fs,nbits]=wavread(path2);
N=length(x);
frame_duration = x_time; % frame duration = x seconds; (half the expected
reverb time)

frame_len = frame_duration*fs;

num_frames = 3*floor(N/frame_len); % 4* because of the overlap of 3/4;

new_sig = zeros((num_frames*frame_len),1);

w=rectwin(frame_len);

%PART1.....
%SEPERATE THE SIGNAL INTO SEGMENTS AND FIND IF THE CURRENT SEGMENT IS
%SUITABLE FOR ANALYSING

pos = 1; % initial position of window
flag = 0;
count =0;
fd=0;
nfd=0;

while (pos+frame_len <= N)
```

```

    y = x(pos:pos+frame_len-1);

    y1 = y(1:floor(0.25*length(y)));
    [Y1,dbAy1] = estimateLevel(y1,fs,0);

    y2 = y(floor(0.25*length(y)):floor(0.75*length(y)));
    [Y2,dbAy2] = estimateLevel(y2,fs,0);

    y3 = y(floor(0.75*length(y)):length(y));
    [Y3,dbAy3] = estimateLevel(y3,fs,0);

    if (dbAy1)/(dbAy2) < 6 && (dbAy3)/(dbAy2) < 7

        flag = 1; % we found a segment that passes the ad hoc
critirion
        fd = fd+1; % counter of how many segments we have found
    else
        flag = 0; % we haven't found a segmet tha passes the ad hoc
critirion
        nfd= nfd+1; % counter of how many sgments were rejected
    end
        if flag == 1
            count = count+1;

            new_sig((count-1)*frame_len+1:count*frame_len) = y; %
store the suitable segment into a a new array

        else

        end

        pos = pos+(frame_len/4);
    end

    numb_suit = count;

    %PART2.....
    % WINDOWING, ZERO PADDING, FOURIER FROM THE NEW_SIG WE FOUND ON PART1

    mikos = frame_len;
    mikos2 = 2*(mikos);
    mikos3 = 2^nextpow2(mikos2);
    mikos4 = mikos3/2;
    mikos5 = (mikos4*2);
    mikos6= mikos5/2;

    results = zeros(30,mikos6);
    before_cumsum = zeros(30,mikos5);

    RT = zeros(1,numb_suit*30); % initialize the RT array, 30 is the number
o center frequncies

    indx = 1; %initial position of window again

```

```

pos = 1;
count = 0;

while (pos*frame_len <= length(new_sig))
    y = new_sig((pos-1)*frame_len+1:pos*frame_len);
    [F0,f_bank,fft_bank] = oct3_filterbank(y,fs,0);
    num_freqz = numel(F0);

    for i = 1:1:num_freqz

        y = f_bank(i,:).*rectwin(length(f_bank(i,:)))';
        y(length(y):2*length(y))=0;
        le_y = length(y);
        NFFT = 2^nextpow2(le_y);
        FY = fft(y,NFFT);
        FY = FY(1:length(FY)/2);

%ZERO PADDING & IFFT .-----
zer = zeros(1,length(FY)); % zero padding to the negative frequencies
FY = [zer FY];
new_sh = ifft(FY.*FY,length(FY.*FY));

%CALCULATE THE ABSOLUTE SQAURE ,CUT TO HALF & INTEGRATE BACKWARDS

nw = abs(new_sh.*new_sh);
before_cumsum(i,:)=nw;
nw =nw(1:length(nw)/2);

[EDT,T20,T30,T40] = reverber(nw,fs,0);

        RT(count+i) = T30/2;

        if i == num_freqz %conditional to change line in the RT array
            count = count+30;
        else
            count = count;
        end
    end
end
pos = pos+1;
end
rt_f = zeros(1,num_freqz);
for i = 1:1:numel(F0)
    frs = RT(i:30:length(RT));
    rt_f(i) = mean(frs)/2;
end
plot(F0,rt_f)

end

```

Ύστερα δίνεται το script για την εφαρμογή της εύρεσης του χρόνου αντήχησης απο τον την κλίση της περιβάλλουσας, απο τον Γεώργιο Καμπουράκη.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% reverber.m
%%
%% This function evaluates the decay time of a room, given its
%% impulse response.
%%
%% [EDT,T20,T30,T40] = reverber(IR^2,Fs,flag)
%%
%% The input is the squared impulse response and its sampling frequency.
%% The delay of this impulse response should not be present! The flag
%% variable specifies if the function will (1) or not (0) plot the
%% evaluated decay curves.
%% The output are the decay times T20, T30 e T40 and EDT.
%% Author Dr G. Cambourakis 24/2/95

function [EDT,T20,T30,T40] = reverber(varargin)

ir = varargin{1};
Fs = varargin{2};
E(length(ir):-1:1) = (cumsum(ir(length(ir):-1:1))/sum(ir));

if find(E < 0)
    E(min(find(E < 0)):end) = [];
    E=10*log10(E);
else
    E=10*log10(E);
end

if nargin == 3
    flag = varargin{3};
else
    flag = 0;
end

x = (0:length(E)-1)/44100;

%Calculates Early Decay Time (EDT). The silence part before impulse
%has to be removed.
t10 = min(find(E < -15));
[A10,B10] = revline(x(1:t10),E(1:t10));
EDT = (-60)/(B10);

% Calculates (T20 e T30)

if flag == 1
    %graph of reverb times
    figure, plot(x,E,'LineWidth',1.5);
end

begin = min(find(E < -5));
t25 = min(find(E < -25));
t35 = min(find(E < -35));
t45 = min(find(E < -45));

%Use 20dB

```

```

if ~isempty(t25)
    [A20,B20] = revline(x(begin:t25),E(begin:t25));
    T20 = (-60)/(B20);
else
    T20=NaN;           %%Case that calculation fails
end

%Use 30dB
if ~isempty(t35)
    [A30,B30] = revline(x(begin:t35),E(begin:t35));
    T30 = (-60)/(B30);
else
    T30=NaN;           %%Case that calculation fails
end

if nargin == 4
    %Use 40dB
    if ~isempty(t45)
        [A40,B40] = revline(x(begin:t45),E(begin:t45));
        T40 = (-60)/(B40);
    else
        T40=NaN;
    end
else
    T40=NaN;           %%Case that calculation fails
end

if flag == 1
    %title('Approximation of decay times');
    ylim=[-70 0];
    ylimit = ylim;
    xlabel('time (s)'), ylabel('dB')
    xlim([0 max([T20 T30 T40])*1.1]);
    xlimit=xlim;

    line([0,(-60-A10)/(B10)], [A10,-60], 'Color','m', 'LineWidth',.5);
    line([0,(-60-A20)/(B20)], [A20,-60], 'Color','r', 'LineWidth',.5);
    line([0,(-60-A30)/(B30)], [A30,-60], 'Color','g', 'LineWidth',.5);
    if nargin == 4 && ~isempty(t45)
        line([0,(-60-A40)/(B40)], [A40,-60], 'Color','y', 'LineWidth',.5);
    end
    line([xlimit(1),xlimit(2)], [-60,-60], 'Color', [.4,.4,.4], 'LineWidth',.5);

    legend('Schroeder Curve', ['EDT (ms) = ', num2str(EDT*1000)], ['T_2_0 (ms) = ', num2str(T20*1000)], ...
        ['T_3_0 (ms) = ', num2str(T30*1000)], ['T_4_0 (ms) = ', num2str(T40*1000)])
end

```

Παραθέτουμε και την συνάρτηση revline η οποία απατείται για την εφαρμογή της revrber.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% revline.m
%
%[A,B] = intlinear(x,y)
%
% Does linear regression (least mean squares) for given (x,y).
% Returns A and B, with meaning y = A + B*x.
%Author Dr G. Cambourakis 14/06/95

function [A,B] = revline(x,y)

mx = mean(x);      my = mean(y);
mx2 = mean(x.^2);  my2 = mean(y.^2);
mxy = mean(x.*y);
A = (mx2*my-mx*mxy)/(mx2-mx^2);
B = (mxy - (mx*my))/(mx2-mx^2);

```

Παρακάτω παραθέτουμε τον κώδικα για την δημιουργία του 1/3 οκταβικού φίλτρου


```

function [F0,f_bank,fft_bank]= oct3_filterbank(path2,fs,flag)
%OCT3_FILTERBANK outputs:
%
%           F0 : the centered frequencies of the filterbank
%           f_bank : an array of (num_freq,length(path2))
the
%
%           filtered signal
%           fft_bank : the same as above just the fft
%           transforms.

% if flag = 1 , plot the frequency response of the filterbank
%           plot all the fft for every 3octave filter
%input example%

%READ THE SIGNAL

x_new = path2;
m = length(x_new);
n = pow2(nextpow2(m));      % LENGTH OF THE FFT TRANSFORM
freqs_plot = (0:n-1)*(fs/n);

%DESIGN OF THE FILTER 1/3OCTAVE FILTER%

BandsPerOctave = 1;
N = 6;           % Filter Order
F0 = 1000;       % Center Frequency (Hz)
Fs = 44100;      % Sampling Frequency (Hz)
f = fdesign.octave(BandsPerOctave,'Class 1','N,F0',N,F0,Fs);

f.BandsPerOctave = 3;           %BAND PER OCTAVE
f.FilterOrder = 8;             %FILTER ORDER
F0 = validfrequencies(f);
Nfc = length(F0);

%FILTERING AND SAVING%

f_bank = zeros(Nfc,m);           %initial the filterbank array
fft_bank = zeros(Nfc,n);        %initialize the fft_bank array

for i=1:Nfc
    f.F0 = F0(i);
    Hd3(i) = design(f,'butter');
    y = filter(Hd3(i),x_new);
    f_bank(i,:) = y;             % save the filtered signal
    fft_bank(i,:) = abs(fft(y,n));

end
%PLOTTING%

if flag == 1
hfvtool(Hd3,'FrequencyScale','log','color','white');
axis([0.01 24 -90 5])
title('1/3-Octave-Band Filter Bank')

for i = 1:Nfc

```

```

        subplot(6,6,i)
        plot(freqs_plot,fft_bank(i,:))
end
else
end
end

```

Τέλος δίνεται και ο κώδικας για την εκτίμηση της στάθμης ενός σήματος, απο τον Γεώργιο Καμπουράκη.

```

function [X,dBA] = estimateLevel(x,Fs,C)

% ESTIMATELEVEL Estimates signal level in dBA.
% ESTIMATELEVEL Implements an A-weighted signal
% level meter. The FFT is used to compute the
% frequency spectrum.
%
% Author: Dr nONE, 11/21/05

% Calculate magnitude of FFT.
X = abs(fft(x));

% Add offset to prevent taking the log of zero.
X(find(X == 0)) = 1e-17;

% Retain frequencies below Nyquist rate.
f = (Fs/length(X))*[0:(length(X)-1)];
ind = find(f<Fs/2); f = f(ind); X = X(ind);

% Apply A-weighting filter.
A = filterA(f);
X = A'.*X;

% Estimate dBA value using Parseval's relation.
totalEnergy = sum(X.^2)/length(X);
meanEnergy = totalEnergy/((1/Fs)*length(x));
dBA = 10*log10(meanEnergy)+C;

% Estimate decibel level (for visualization).
X = 20*log10(X);

```

Χωρίσαμε τον κώδικα σε τέσσερα τμήματα. Στο πρώτο τμήμα ανήκει η αρχική επεξεργασία, όπως η μεταφορά του ηχογραφημένου σήματος `.wav` στην πλατφόρμα Matlab με την εντολή **wavread**. Κατά τη οποία μεταφέρουμε σε ένα διάνυσμα το μουσικό σήμα, έτσι ώστε να μπορούμε να το επεξεργαστούμε. Εξάγουμε τον χρόνο δειγματοληψίας που θα μας χρειαστεί και καθορίζουμε την διάρκεια του παραθύρου που θα χρησιμοποιήσουμε. Τέλος κάνουμε και κάποιες αρχικοποιήσεις, όπως σε πόσα τμήματα θα χωρίσουμε το σήμα μας εφόσον έχουμε επικάλυψη των 3/4 στη παραθύρωση.

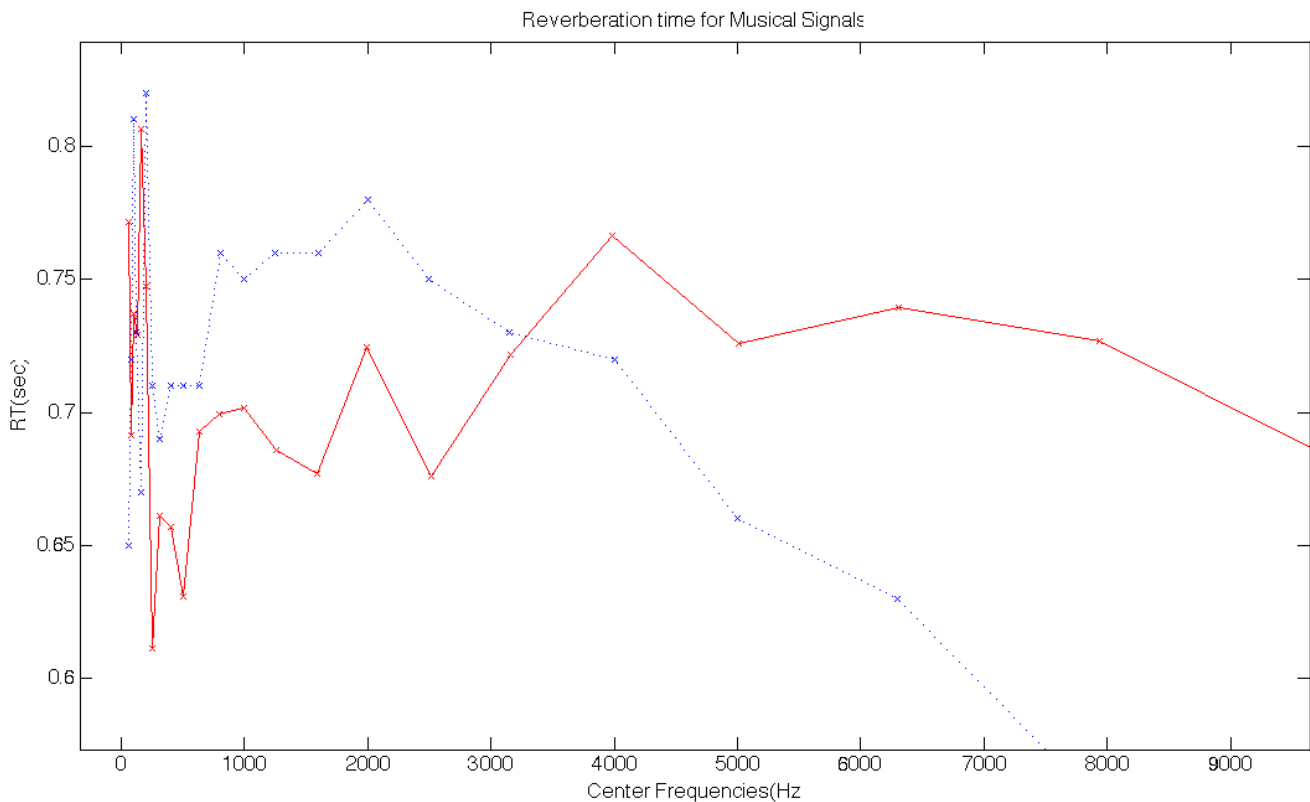
Στο δεύτερο τμήμα του κώδικα περιλαμβάνεται η διάσπαση του σήματος στα τμήματα που υπολογίσαμε στο πρώτο μέρος και εφαρμόζεται το κριτήριο αν το εξεταζόμενο τμήμα είναι ικανό για περαιτέρω επεξεργασία. Εδώ χρησιμοποιούμε την συνάρτηση **estimateLevel**. Δημιουργούμε ένα καινούργιο διάνυσμα για την αποθήκευση όλων των τμημάτων που πέρασαν με επιτυχία το κριτήριο.

Στο τρίτο τμήμα όπου και γίνεται η πιο σημαντική επεξεργασία, περιλαμβάνεται η ανάλυση του σήματος με το τριτοκταβικό φίλτρο, ο μετασχηματισμός Fourier, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και η ολοκλήρωση κατά Schroeder. Αρχικά αναλύουμε με την **oct3_filterbank** τα τμήματα τα οποία έχουν περάσει με επιτυχία το κριτήριο που αναφέραμε, έτσι ώστε να δούμε αν υπάρχει ενδιαφέρον πληροφορία για κάθε κεντρική συχνότητα. Ύστερα για κάθε κεντρική συχνότητα συνεχίζουμε την επεξεργασία, υπολογίζοντας την αυτοσυσχέτιση με τις **fft** και **ifft** και τέλος εφαρμόζουμε την συνάρτηση **reverber**. Όπου γίνεται κανονικοποίηση του σήματος στα σωστά db και υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης από την κλίση της λογαριθμικής συνάρτησης για δεδομένη δυναμική (-5:-35). Τέλος γίνεται και μια παρουσίαση των αποτελεσμάτων με την γνωστή συνάρτηση **plot** για κάθε κεντρική συχνότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αποτελέσματα μεθόδου με κρουστικές συναρτήσεις

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα του αλγορίθμου που αναπτύξαμε με είσοδο όχι ένα μουσικό σήμα αλλά μια κρουστική συνάρτηση. Η κρουστική συνάρτηση έγινε με τον πιστόλι που προαναφέραμε, ύστερα γίνεται μια σύγκριση με τα αποτελέσματα που πήραμε από τον ηχώμετρο. Η κρουστική μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα,



Σχήμα 22. Αποτέλεσμα αλγορίθμου για είσοδο κρουστική και win_size: 2sec.

Ακολουθεί πίνακας για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου και του ηχώμετρου, όπως επίσης και η απόκλιση που παρουσιάζουν.

Center Frequencies(Hz)	RT(Sound Level Meter)(sec)	RT(Autocor. Method)(sec)
63	0.45	0.77
80	0.72	0.69
100	0.79	0.74
125	0.73	0.73
160	0.67	0.81
200	0.52	0.75
250	0.71	0.61
315	0.69	0.65
400	0.60	0.65
500	0.71	0.63
630	0.61	0.69
800	0.59	0.70
1000	0.55	0.70
1250	0.60	0.69
1600	0.70	0.68
2000	0.65	0.72
2500	0.61	0.68
3150	0.72	0.72
4000	0.72	0.76
5000	0.66	0.73
6300	0.63	0.74
8000	0.55	0.73

Σχήμα 23. Πίνακας σύγκρισης ηχόμετρου και κρουστικής.

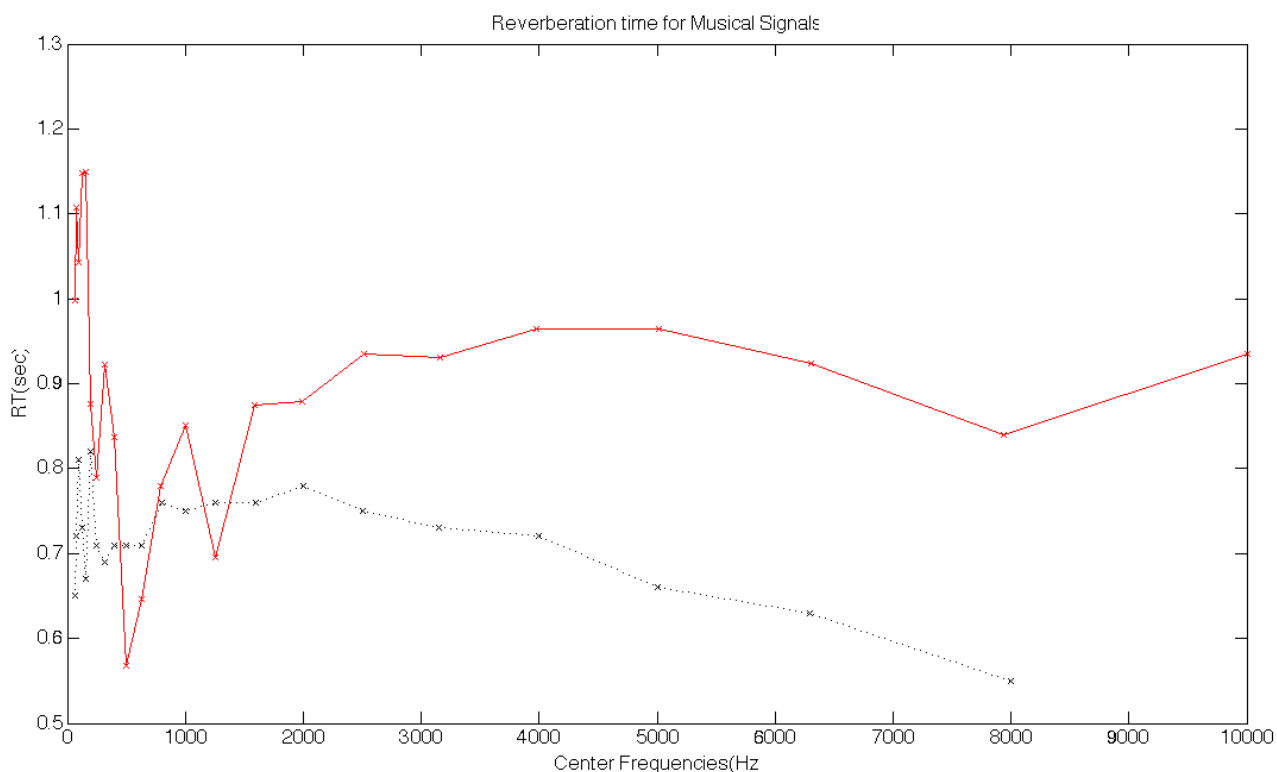
Η απόκλιση από την μέση τιμή των αποτελεσμάτων δίνεται από τον γνωστό τύπο, $\Delta\chi = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$, όπου \bar{x} είναι η μέση τιμή των αποτελεσμάτων από το ηχόμετρο.

Θα εφαρμόσουμε τον παραπάνω τύπο σε όλα τα αποτελέσματα για μια καλύτερη σύγκριση. Η μέση απόκλιση του σήματος με την πιστολία είναι 0.037 δευτερόλεπτα ή 1,33%.

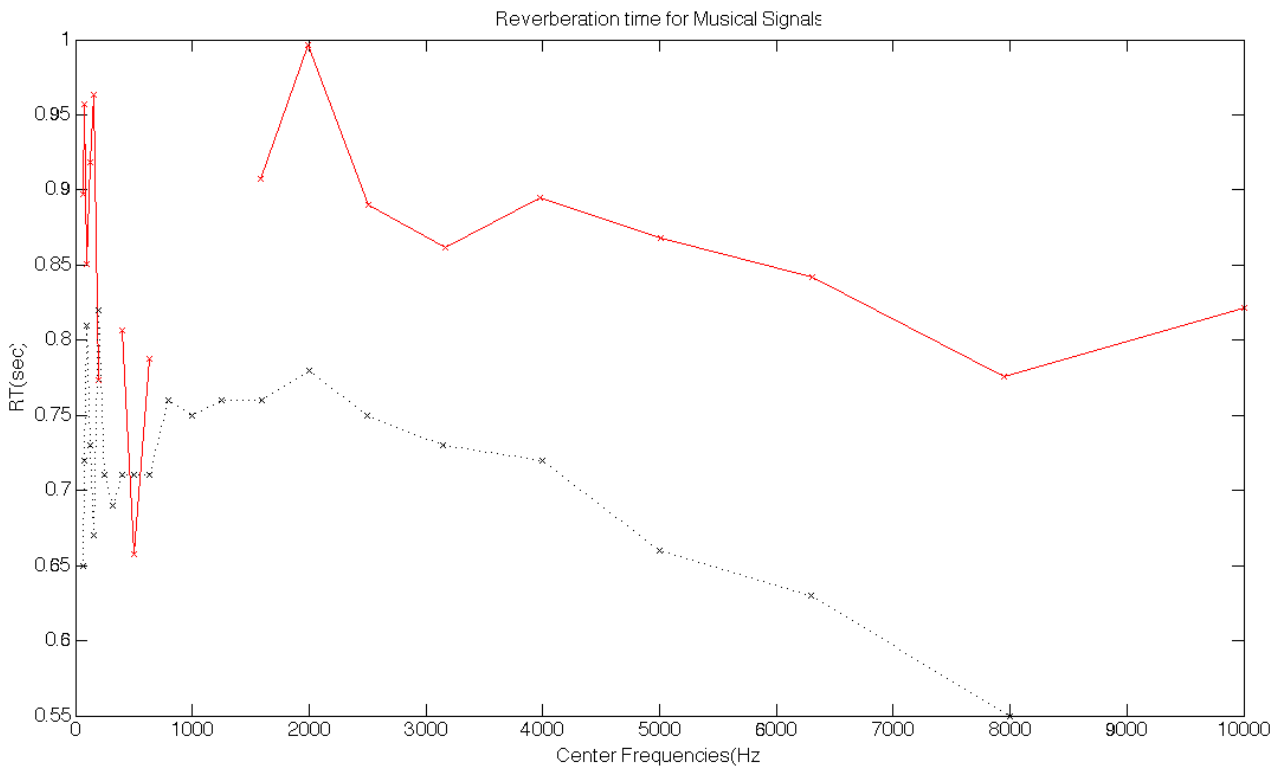
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αποτελέσματα μεθόδου με μουσικά σήματα

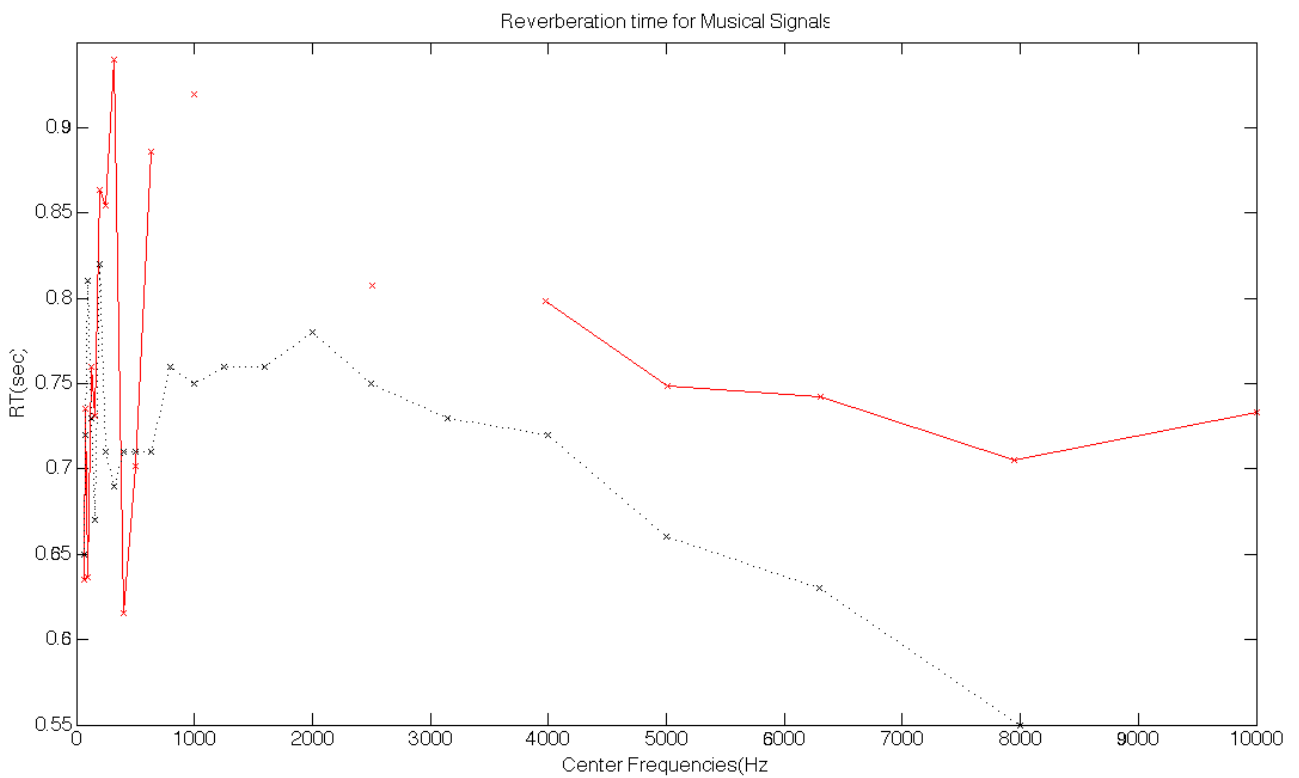
Στο κεφάλαιο 4, μιλήσαμε για τα μουσικά δείγματα που χρησιμοποιήσαμε. Η ηχογράφηση έγινε με την ίδια διαχείριση σε όλα τα μουσικά σήματα. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν φυσικά με τις ενδείξεις του ηχόμετρου απο την θέση 1, εφόσον όλες οι ηχογραφήσεις έγιναν στη θέση 1. Σαν πρώτο δείγμα χρησιμοποιήσαμε το μουσικό αρχείο που περιείχε το ηχογραφημένο φλάουτο. Τα αποτελεσμάτα που πήραμε μετά απο το τρέξιμο του κώδικα είναι, αντίστοιχα για μεγέθη παραθύρου, 1.6sec, 2sec και 2.5sec.



Σχήμα 24. Φλάουτο για win_size: 1.6 sec.



Σχήμα 25. Φλάουτο για win_size:2 sec.



Σχήμα 26. Φλάουτο για win_size:2.5 sec.

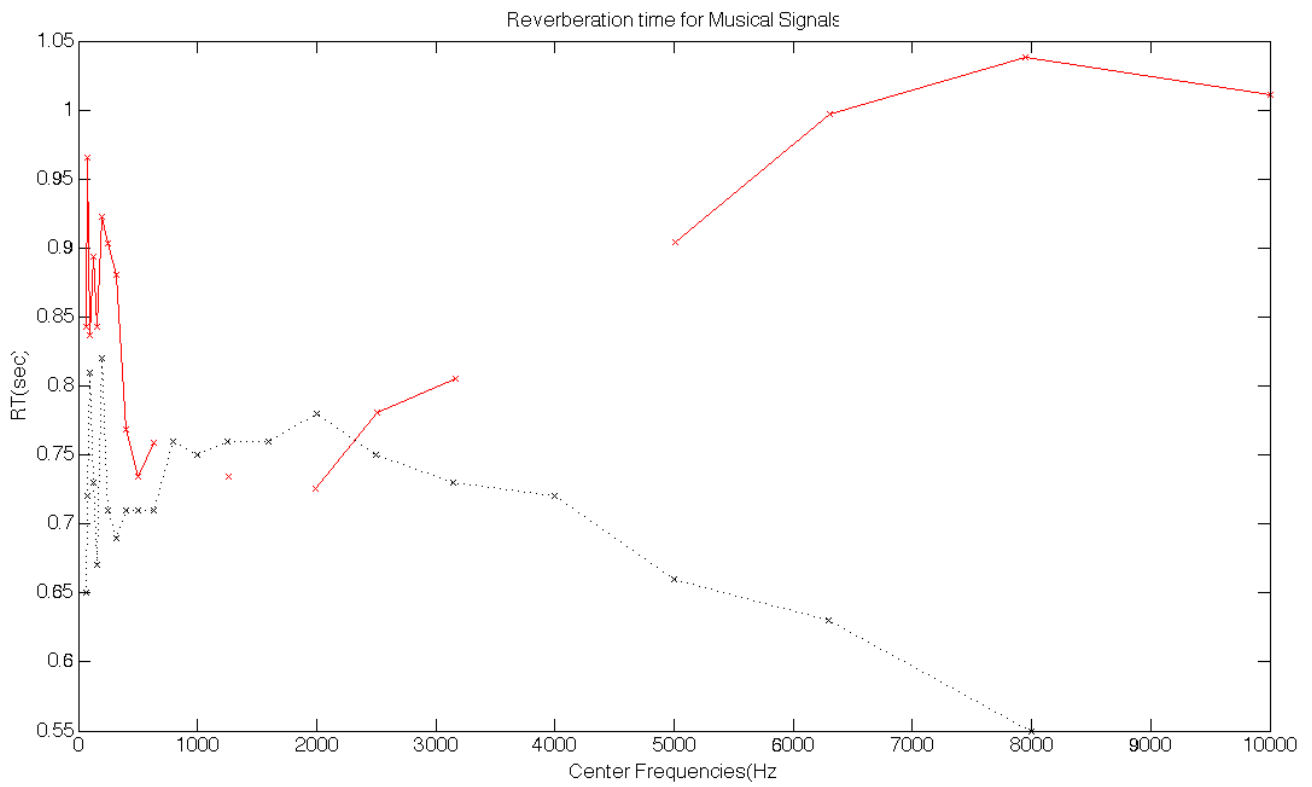
Center Frequencies(Hz)	RT(Sound Level Meter)(sec)	RT(Autocor. Method)(sec)
63	0.45	1
80	0.72	1.1
100	0.79	1.15
125	0.73	1.15
160	0.67	0.9
200	0.52	0.8
250	0.71	0.9
315	0.69	0.85
400	0.60	0.58
500	0.71	0.65
630	0.61	0.80
800	0.59	0.85
1000	0.55	0.70
1250	0.60	0.90
1600	0.70	0.90
2000	0.65	0.95
2500	0.61	0.95
3150	0.72	0.95
4000	0.72	0.95
5000	0.66	0.95
6300	0.63	0.90
8000	0.55	0.80

Σχήμα 27. Πίνακας σύγκρισης ηχώμετρου και φλάουτο.

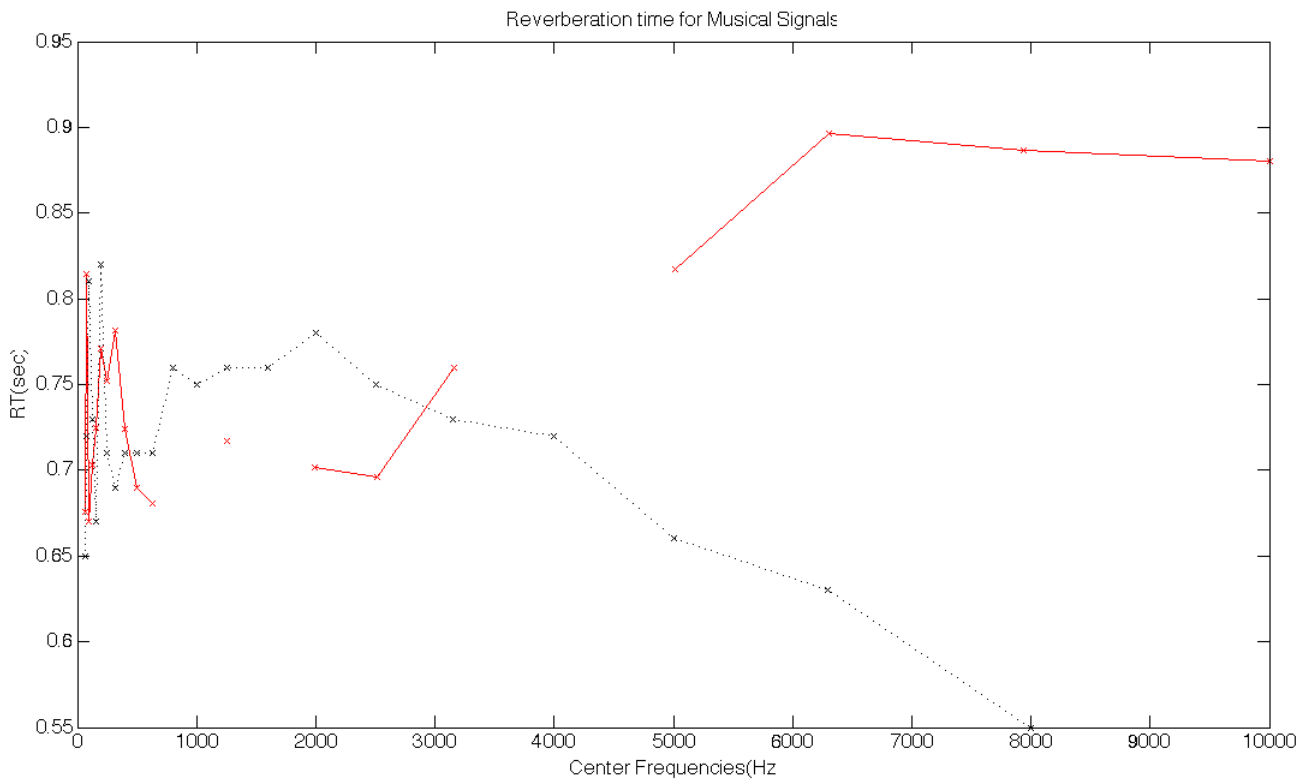
Ο αλγόριθμος αυτοσυσχέτισης καλύπτει απο 25 Hz μέχρι και τα 20 kHz, το ηχώμετρο όμως μας έδινε αποτελέσματα απο τα 63 Hz μέχρι και τα 8 kHz, οπότε συγκρίναμε τους χρόνους αντήχησης των συχνοτήτων που υπήρχαν και στα δύο αποτελέσματα.

Η μέση απόκλιση είναι 0.194 δευτερόλεπτα ή 24.7%.

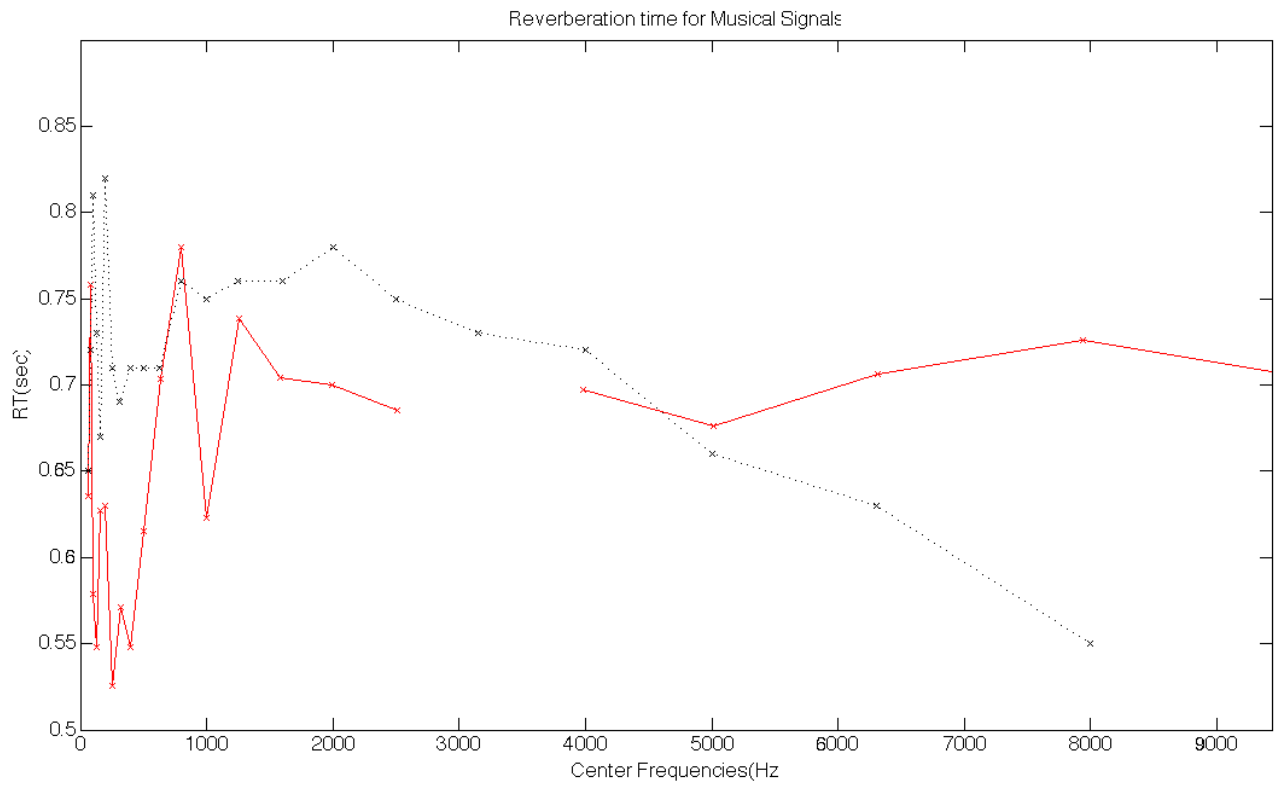
Το δεύτερο δείγμα που χρησιμοποιήσαμε ήταν το μουσικό αρχείο που περιείχε την ηχογραφημένη **τρομπέτα**.



Σχήμα 28. Τρομπέτα για win_size: 1.6 sec.



Σχήμα 29. Τρομπέτα για win_size: 2 sec.



Σχήμα 30. Τρομπέτα για win_size:2.5 sec.

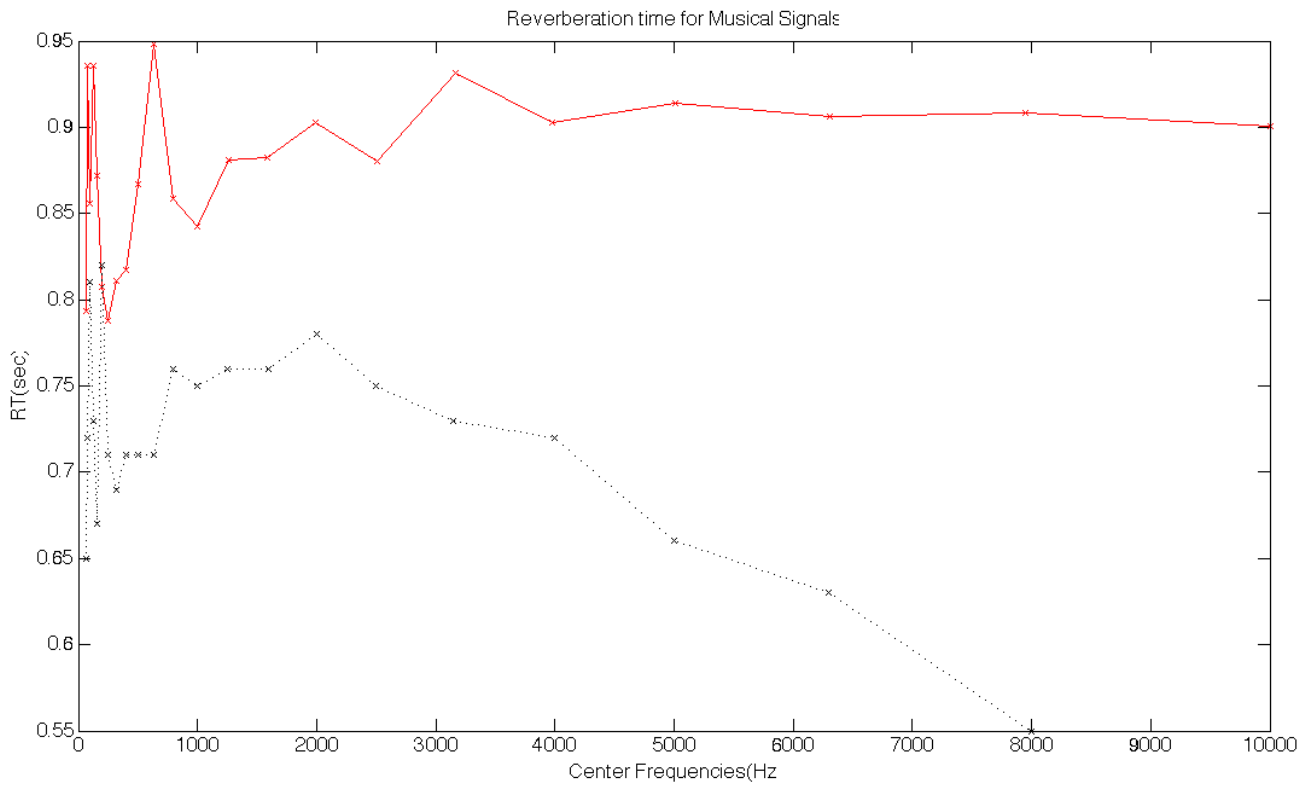
Ακολουθεί ο πίνακας για την σύγκριση με τις τιμές του ηχόμετρου.

Center Frequencies(Hz)	RT(Sound Level Meter)(sec)	RT(Autocor. Method)(sec)
63	0.45	0.67
80	0.72	0.82
100	0.79	0.67
125	0.73	0.70
160	0.67	0.72
200	0.52	0.77
250	0.71	0.75
315	0.69	0.78
400	0.60	0.72
500	0.71	0.67
630	0.61	0.66
800	0.59	0
1000	0.55	0
1250	0.60	0.72
1600	0.70	0
2000	0.65	0.70
2500	0.61	0.70
3150	0.72	0.75
4000	0.72	0
5000	0.66	0.81
6300	0.63	0.90
8000	0.55	0.90

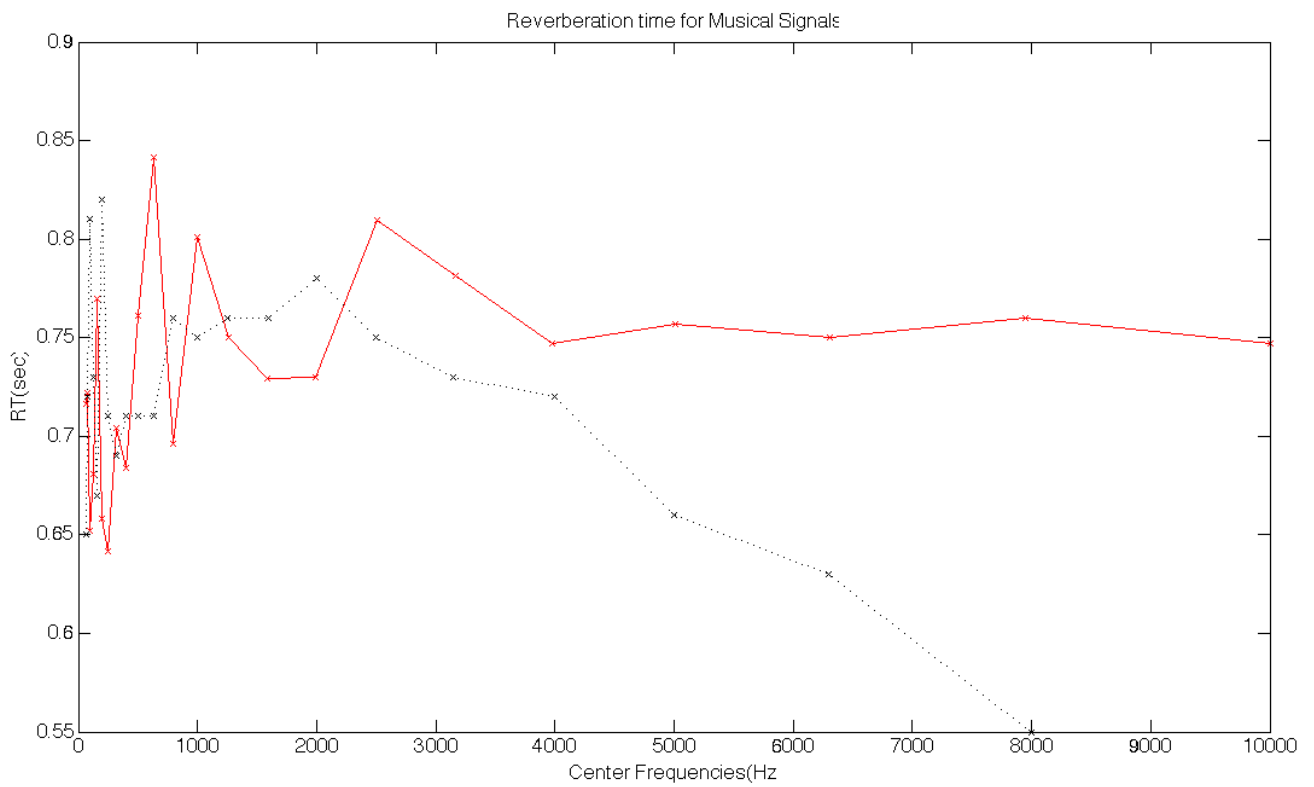
Σχήμα 31. Πίνακας σύγκρισης ηχόμετρου και τρομπέτας.

Αυτή την φορά, με το δείγμα απο την τρομπέτα, τα αποτελέσματα έχουν μέση απόκλιση 0.17 δευτερόλεπτα ή 15.01%.

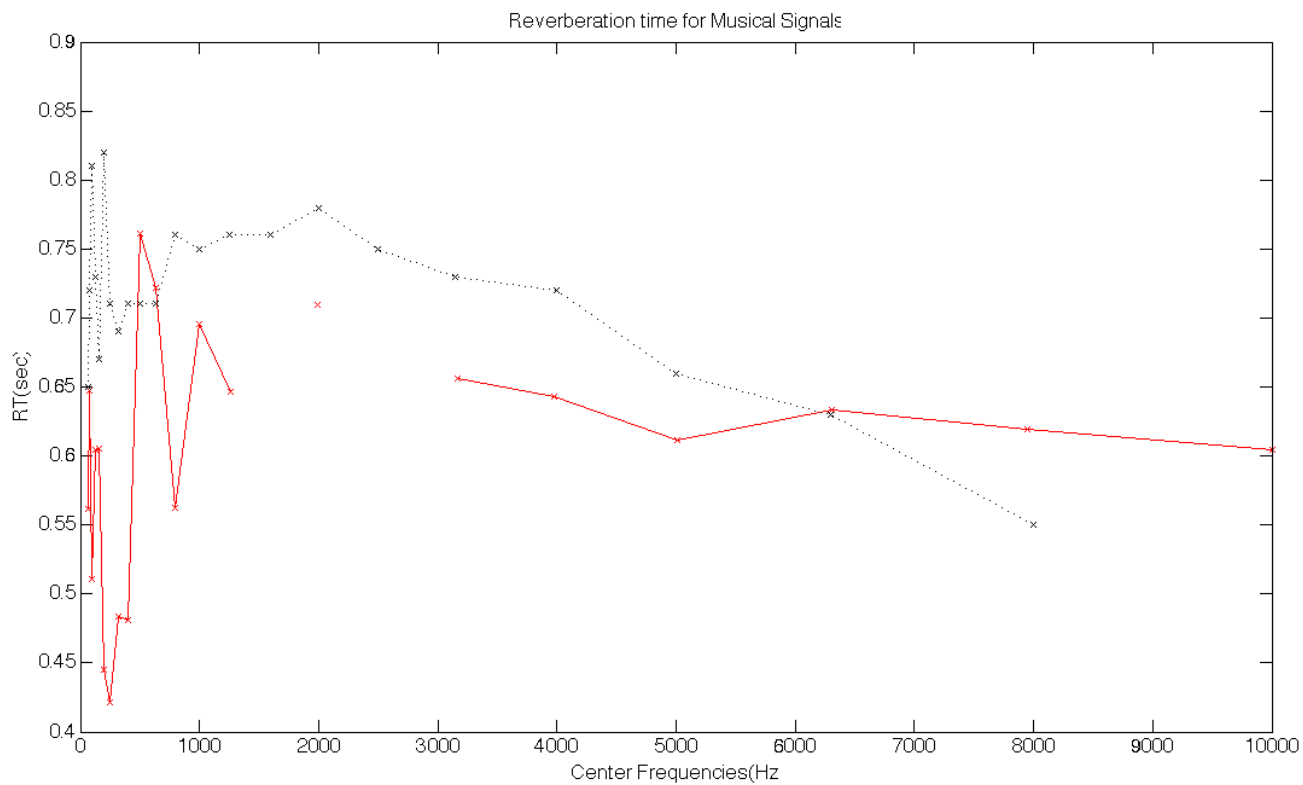
Θα εξετάσουμε και το δείγμα, της **ακουστικής κιθάρας**. Ο αλγόριθμος αυτοσυσχέτισης, μας έδωσε τα εξής αποτελέσματα, αντίστοιχα για τα ίδια μεγέθη παραθύρων.



Σχήμα 32. Ακουστική κιθάρα για win_size:1.6 sec.



Σχήμα 33. Ακουστική κιθάρα για win_size:2 sec.



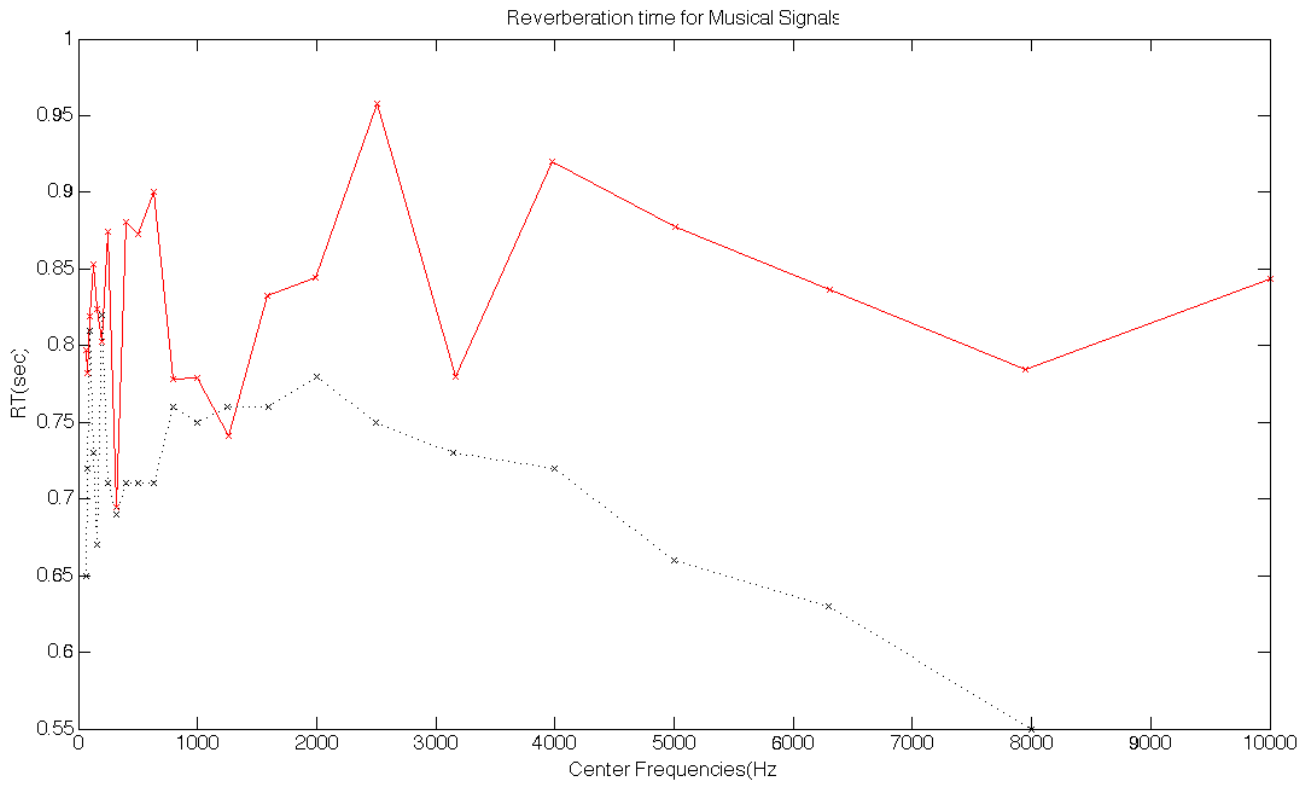
Σχήμα 34. Ακουστική κιθάρα για win_size:2.5 sec.

Center Frequencies(Hz)	RT(Sound Level Meter)(sec)	RT(Autocor. Method)(sec)
63	0.45	0.74
80	0.72	0.72
100	0.79	0.69
125	0.73	0.71
160	0.67	0.67
200	0.52	0.68
250	0.71	0.65
315	0.69	0.68
400	0.60	0.67
500	0.71	0.70
630	0.61	0.76
800	0.59	0.71
1000	0.55	0.74
1250	0.60	0.77
1600	0.70	0.73
2000	0.65	0.72
2500	0.61	0.78
3150	0.72	0.76
4000	0.72	0.74
5000	0.66	0.73
6300	0.63	0.74
8000	0.55	0.74

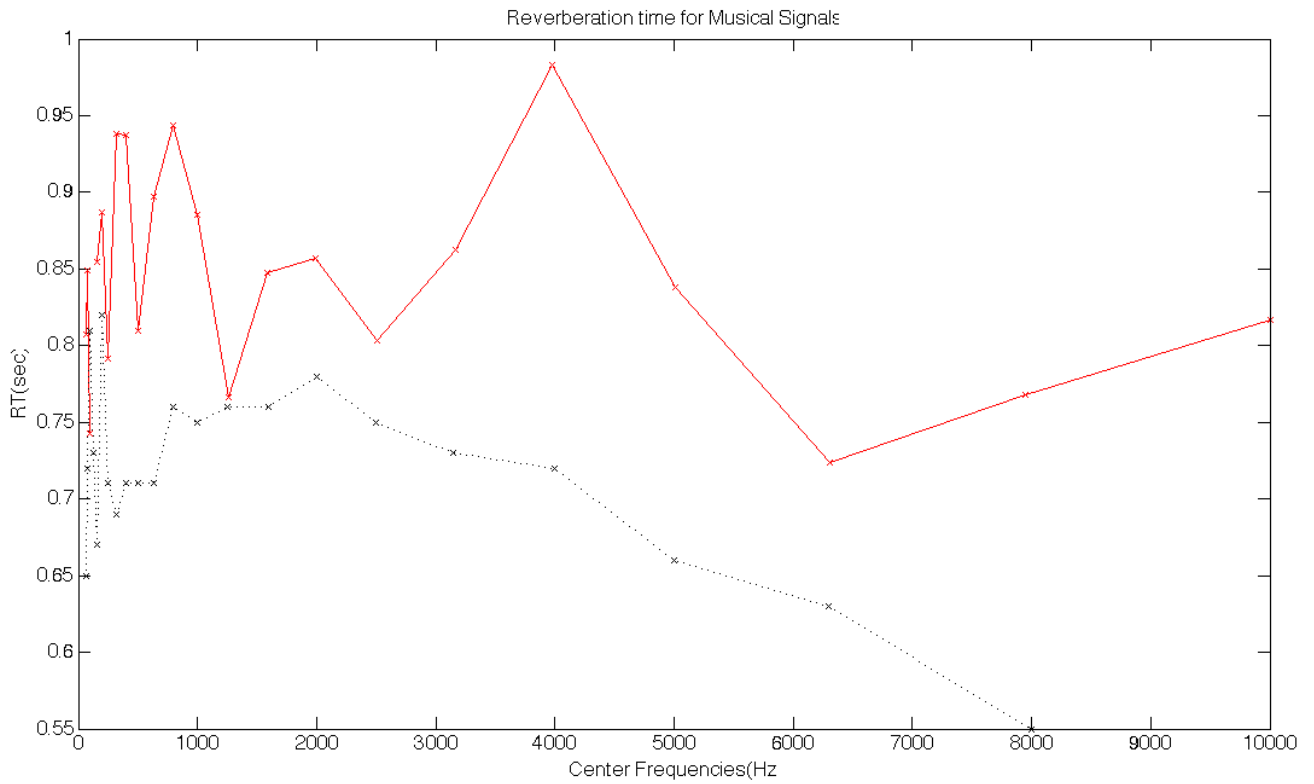
Σχήμα 35. Πίνακας σύγκρισης ηχώμετρον και ακουστικής κιθάρας.

Τα αποτελέσματα έχουν απόκλιση 0.0291 δευτερόλεπτα ή 3.1%

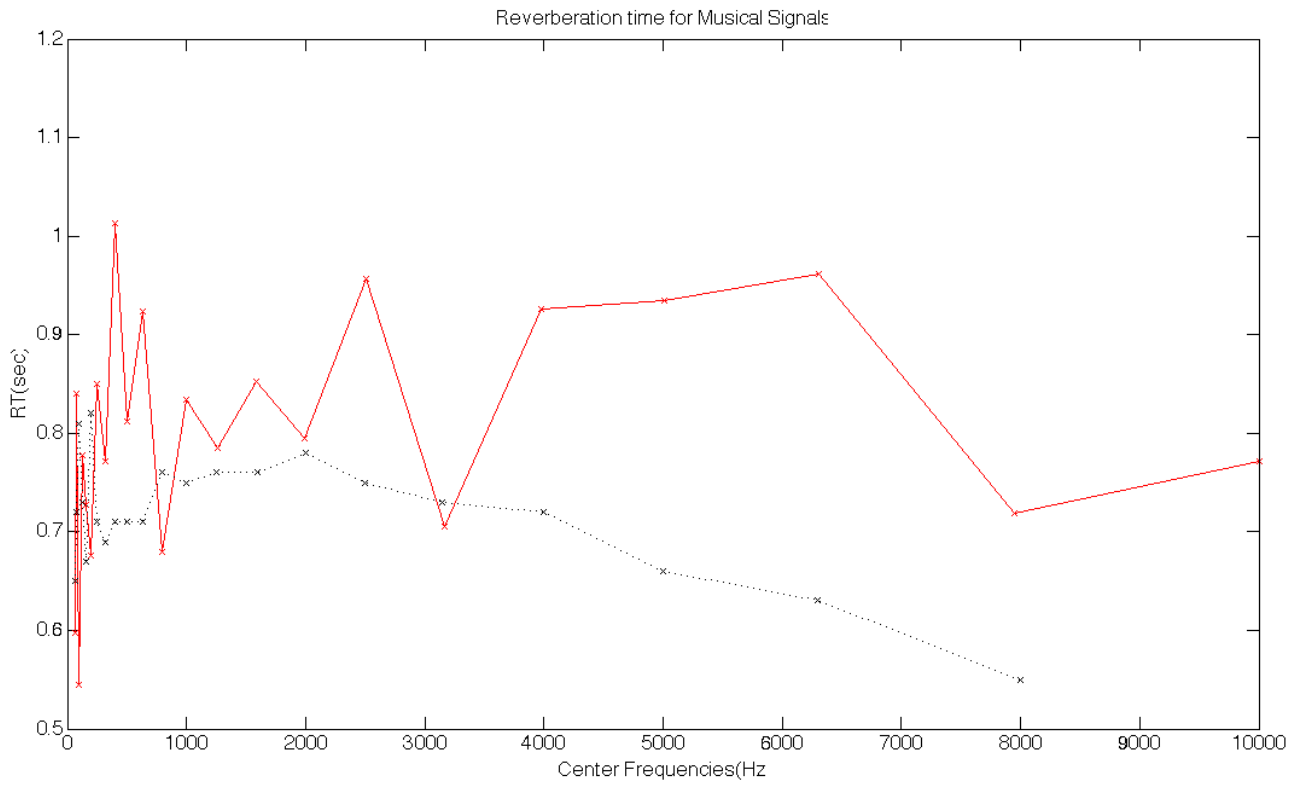
Τέλος ακολουθεί η ανάλυση στο μουσικό κομμάτι που περιλαμβάνει ολόκληρη ορχήστρα. Πάλι για τα ίδια μεγέθη παραθύρου.



Σχήμα 36. Μουσικό κομμάτι για win_size: 1.6 sec.



Σχήμα 37. Μουσικό κομμάτι για win_size: 2 sec.



Σχήμα 38. Μουσικό κομμάτι για win_size:2.5 sec.

Παραθέτουμε και τον γνωστό πίνακα για καλύτερη σύγκριση.

Center Frequencies(Hz)	RT(Sound Level Meter)(sec)	RT(Autocor. Method)(sec)
63	0.45	0.60
80	0.72	0.84
100	0.79	0.55
125	0.73	0.77
160	0.67	0.72
200	0.52	0.67
250	0.71	0.83
315	0.69	0.77
400	0.60	1
500	0.71	0.80
630	0.61	0.92
800	0.59	0.69
1000	0.55	0.80
1250	0.60	0.77
1600	0.70	0.82
2000	0.65	0.78
2500	0.61	0.90
3150	0.72	0.71
4000	0.72	0.90
5000	0.66	0.90
6300	0.63	0.90
8000	0.55	0.68

Σχήμα 39. Πίνακας σύγκρισης ηχόμετρον και μουσικού κομματιού.

Τα αποτελέσματα έχουν απόκλιση 0.0965 δευτερόλεπτα ή 8.2%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα

Απο τις μέσες αποκλίσεις μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ο κώδικας συμπεριφέρεται διαφορετικά κάθε φορά με το ποιό είσοδο του δίνουμε. Το ιδανικό θα ήταν η μέση απόκλιση των αποτελεσμάτων να είναι ίση με το μηδέν, αυτό όμως δεν γίνεται διότι υπάρχουν παράγοντες, όπως ο θόρυβος βάθους, που καθιστούν την ανάλυση πιο δύσκολη. Αλλά και το ίδιο το μουσικό δείγμα προκαλεί διαφορετική συμπεριφορά στο κώδικα. Το μουσικό δείγμα με την κιθάρα έχει την μικρότερη απόκλιση των 0.0291, το οποίο σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά αυτού του μουσικού δείγματος αποτελούν μια καλή περίπτωση για είσοδο στην μέθοδο της αυτοσυσχέτισης. Η κρουστική συνάρτηση που εξετάσαμε, η πιστολία, έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα όπως ήταν αναμενόμενο.

Ανεξάρτητα όμως από το μουσικό δείγμα ο αλγόριθμος φαίνεται να είναι σύμφωνος με τα αποτελέσματα που δίνει το ηχόμετρο, αφού η μέγιστη μέση αποκλιση των αποτελεσμάτων είναι της τάξης των 0.291 δευτερολέπτων. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και κάποιο αλγόριθμο αφαίρεσης του θόρυβου βάθους για καλύτερα αποτελέσματα. Όμως ο θόρυβος βάθους διαφέρει κάθε φορά, λόγω του ότι αλλάζει ο χώρος που γίνεται η ηχογράφηση. Αυτός όμως είναι κώδικας που θα μπορούσε να αποτελέσει από μόνος του μια καινούργια έρευνα.

Ο χρόνος αντήχησης, ξεκάθαρα έχει πολύ μεγάλη σημασία στο πώς αντιλαμβανόμαστε την μουσική. Διαφορετική εμπειρία είναι το να παρακολουθήσεις μια ορχήστρα σε ένα μεγάλο και διαφορετική εμπειρία είναι να παρακολουθήσεις μια ορχήστρα σε ένα μικρό δωμάτιο. Οι πιο γνωστές μέθοδοι για τον υπολογισμό του χρόνου ανήχησης χρησιμοποιούν σήματα με μεγάλο εύρος ζώνης, έτσι ώστε να αλληλεπιδρούν με το δωμάτιο σε όλες τις συχνότητες. Σε αυτή την εργασία παρουσιάσαμε έναν αλγόριθμο ο οποίος, εκτός από κρουστικές συναρτήσεις, μπορεί να χρησιμοποιήσει και μουσικό σήμα για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης. Χρησιμοποιώντας την περιβάλλουσα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης ενός σήματος που ηχογραφήσαμε σε ένα δωμάτιο και ύστερα από το την κλίση της εκθετικής εξασθένισης της περιβάλλουσας υπολογίσαμε τον χρόνο αντήχησης του δωματίου αυτού.

Τα αποτελέσματα αυτής της καινούργιας μεθόδου, μας βρίσκουν σύμφωνους και μας ενθαρρύνουν στο να διεξαχθούν κι άλλες μελέτες μέχρι να καθιερωθεί δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης σε συνθήκες μίας ζωντανής εμφάνισης όπως για παράδειγμα μιας ορχήστρας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά του κώδικα για εισόδους με διαφορετικά μουσικά χαρακτηριστικά. Όπως είδαμε και παραπάνω το μουσικό δείγμα με την ακουστική κιθάρα έχει την μικρότερη απόκλιση, ενδιαφέρον θα είχε να βρεθεί το μουσικό δείγμα το οποίο θα παρουσιάζει μια ακόμη μικρότερη απόκλιση.

Βιβλιογραφία

- [1] Marin Hansen, “A Method for Calculating Reverberation Time From Musical Signals”, Report from The Acoustics Laboratory Technical University of Denmark.
- [2] Schroeder, M. R., (1965) “New Method of Measuring Reverberation Time” , J. Acoust. Soc. Am. 37, 409 - 412.
- [3] Sampo Vesa, (2004) “Estimation of Reverberation Time from Binaural Signals Without Using Controlled Excitation”, HUT / Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing.
- [4] Bruel & Kjaer : Measuring Microphones Measuring Sound
- [5] Bruel & Kjaer : Measuring Sound
- [6] Bruel & Kjaer : Product Data, 2250 Reverberation time software – BZ 7227 - for hand held analyzer – Type 2250F and post processing software: Qualifier Light Type 7831, bp2152.
- [7] Mathworks, “Octave-Band and Fractional Octave-Band Filters”.
- [8] Κωσταντίνος Η. Μπακογιάννης, (2010) “Ακουστική Μελέτη Σχολικών Αιθουσών Μέσης Εκπαίδευσης”, Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής.