

Τμήμα  
Μηχανικών  
Πληροφορικής τ.ε.  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα  
Δυτικής Ελλάδας

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΥΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

---

Στάμου Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής: Μιχαήλ Παρασκευάς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή  
Αντίρριο, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
2. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
3. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή

## Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
1.1 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ .....	6
1.2 ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	9
1.2.1. Η ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΑΚΟΗΣ.....	11
1.2.2. Ο ΚΛΑΔΟΣ ΤΗΣ ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ .....	13
1.3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ .....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΧΗΤΙΚΟ ΣΗΜΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>18</b>
2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ .....	18
2.2 ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΜΟΥΣΙΚΗ.....	21
2.3 ΈΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΑΣΗ ΕΝΟΣ ΗΧΟΥ .....	23
2.4 Ύψος.....	26
2.5 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΟΙ ΝΟΤΕΣ.....	27
2.6 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER ΚΑΙ ΤΑΧΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER (FFT) .....	29
2.7 ΤΟΝΙΚΟΤΗΤΑ ( TONALITY ).....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ .....</b>	<b>37</b>
3.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ FFT .....	38
3.2 ΤΟΝΙΚΟΤΗΤΑ (TONALITY).....	39
3.3 ΘΟΡΥΒΟ (SIGNAL TO NOISE RATIO).....	39
3.4 ΑΚΟΥΣΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΤΡΑΓΟΥΔΙΟΥ (THRESHOLD OF AUDIBILITY) .....	40
3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΜΜΑΤΙ 1 (ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΜΟΥΣΙΚΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ) .....	41
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΜΜΑΤΙ 2 (ΜΕΣΗ ΤΟΥ ΜΟΥΣΙΚΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ).....	43
3.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΜΜΑΤΙ 3 (ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΜΟΥΣΙΚΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ).....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>48</b>
4.1 ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ.....	48
4.2 ΜΟΥΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ .....	49
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>55</b>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....56

## Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη και υλοποίηση κριτηρίων αξιολόγησης των στατιστικών ηχητικών σημάτων πλήρους φάσματος. Ένα σύνολο στατιστικών ηχητικών σημάτων πλήρους φάσματος μπορεί να είναι ένα μουσικό κομμάτι. Ένα τραγούδι που σε βάθος χρόνου έχει ακουστεί, μελετηθεί, έχει γίνει αρεστό και έχει χαρακτηρίσει μια ολόκληρη γενιά. Η υλοποίηση θα γίνει μέσω κώδικα Matlab και η μελέτη των αποτελεσμάτων αξιολογούνται μέσα από την γνώση της μουσικής θεωρίας που θα αναλυθεί στην συνέχεια της πτυχιακής.

Αρχικά παρατίθεται μια εισαγωγή σχετικά με την μετάδοση του ήχου, πως ο άνθρωπος μπορεί να αντιληφθεί τον μεταδιδόμενο ήχο και στην συνέχεια πως μπορούμε να μεταφέρουμε τον ήχο αυτό σε ψηφιακό επίπεδο και να τον αναλύσουμε μέσω του Η/Υ. Τέλος με την βοήθεια του προγράμματος Matlab θα μπορέσουμε να δούμε το εσωτερικό ενός μουσικού κομματιού, δηλαδή τις συχνότητες των νοτών του κάθε μουσικού οργάνου και με βάση τα κριτήρια που θα έχουμε επιλέξει, να μπορέσουμε να μελετήσουμε το κομμάτι.

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

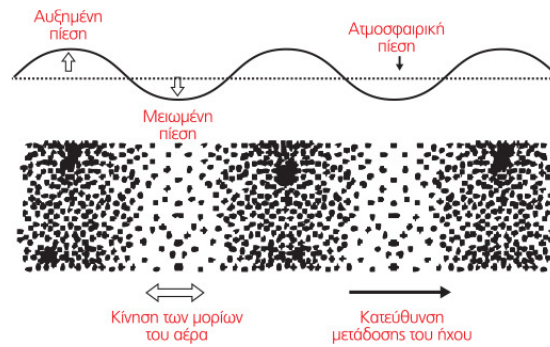
Το κεφάλαιο 1 ασχολείται με την θεωρία του ήχου, την ανθρώπινη ακοή πως το ακουστικό σύστημα του ανθρώπου αναγνωρίζει μια ηχητική πηγή, λίγα λόγια για την ψυχοακουστική και πώς έχει βελτιώσει τον ψηφιακό ήχο μέχρι και σήμερα και σε ποιους τομείς. Τελειώνοντας αναλύονται τα τρία στάδια για την μετατροπή του αναλογικού ηχητικού σήματος σε ψηφιακό.

### 1.1 Βασική θεωρία του ήχου

Ο ήχος από φυσική άποψη παράγεται από μεταβολές της πίεσης που μεταδίδονται σε ένα μέσο που μπορεί να συμπιεστεί. Παρόλο που ο ακριβής μηχανισμός διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση οι βασικές αρχές της μετάδοσης και παραγωγής ήχων παραμένουν οι ίδιες. Πιο συγκεκριμένα, τα μόρια όλων των φυσικών σωμάτων κρατούν σταθερές αποστάσεις από όλα τα γειτονικά τους μόρια. Κατά συνέπεια όταν για οποιονδήποτε λόγο τα μόρια σε μία περιοχή συμπιεστούν και επομένως οι αποστάσεις μεταξύ τους μικρύνουν, τα μόρια της περιοχής επιδιώκουν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση συμπιέζοντας με τη σειρά τους τα μόρια των γειτονικών τους περιοχών κ.ο.κ.

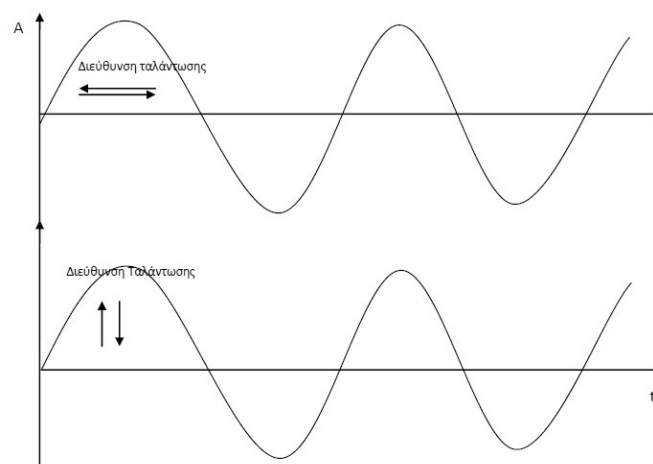
Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται σε ένα μέσο μεταβολές πίεσης που μεταδίδονται με μία ορισμένη ταχύτητα. Οι συγκεκριμένες μεταβολές αποτελούν ένα ηχητικό κύμα. Για την διάδοση ενός ηχητικού κύματος είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου μεταξύ πομπού και δέκτη. Το μέσο μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε κατάσταση ύλης - στερεό, υγρό, αέριο - καθώς ο ήχος δεν διαδίδεται στο απόλυτο κενό. Ένα παράδειγμα όπου μεταδίδεται ο ήχος είναι το πάτημα μίας νότας πιάνου, τότε η χορδή θα ξεκινήσει να ταλαντώνεται μεταβάλλοντας την πίεση

του αέρα διεγείροντας τον μηχανισμό του αυτιού με αποτέλεσμα το αίσθημα της ακοής.



Σχήμα 1: Μετάδοση το ήχο στον αέρα.

Ανάλογα με την διατάραξη του μέσου τα ηχητικά κύματα που δημιουργούνται μπορεί να είναι είτε διαμήκη είτε εγκάρσια. Όταν η κίνηση του σωματιδίου ή του ταλαντωτή γίνεται στην ίδια διεύθυνση με τη διάδοση του κύματος λέγονται διαμήκη κύματα. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται σαν ηχητικά κύματα σε όλες τις φάσεις της ύλης- στερεό, υγρό, αέριο, σε πλάσματα -. Τώρα όταν η κίνηση του σωματιδίου γίνεται κάθετα προς τον άξονα θα προκαλέσει πλάγια διαστολή του μέσου, έτσι παρατηρούνται διαδοχικές κορυφές και κοιλώματα. Τα κύματα που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό ονομάζονται εγκάρσια.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα εγκάρσιων και διαμήκη κυμάτων

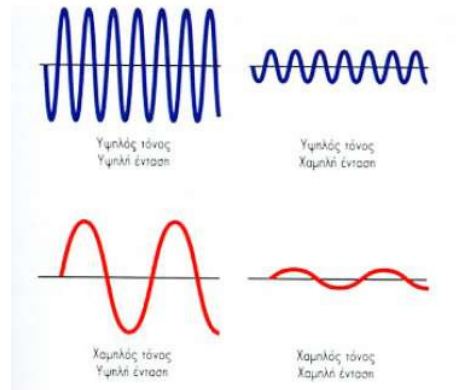
Στην κυματική κίνηση υπάρχουν τρεις ταχύτητες που είναι εντελώς διαφορετικές μολονότι συνδέονται μαθηματικά μεταξύ τους. Αυτές είναι : (α) Η σωματιδιακή ταχύτητα, που είναι η απλή αρμονική ταχύτητα του ταλαντωτή γύρω από τη θέση ισορροπίας του. (β) Η κυματική φασική ταχύτητα, η ταχύτητα με την οποία επίπεδα με την ίδια φάση, κορυφές ή κοιλάδες διαδίδονται στο μέσον. (γ) Η ομαδική ταχύτητα. Κύματα με διαφορετικές συχνότητες, μήκη κύματος και ταχύτητες είναι δυνατό να υπερτεθούν και να σχηματίσουν ένα κυματοπακέτο. Τα κύματα σπάνια εμφανίζονται σαν απλές μονοχρωματικές συνιστώσες, ένας παλμός λευκού φωτός αποτελείται από ένα φάσμα με άπειρες συχνότητες και η κίνηση ενός τέτοιου παλμού θα περιγραφόταν από την ομαδική ταχύτητα. Η συχνότητα μας δείχνει ένα πλήρεις κύκλο που κάνει ένας ήχος μέσα σε ένα δευτερόλεπτο, με τον κύκλο να είναι από ένα σημείο Α έως ένα σημείο Β, με την ταλάντωση να ολοκληρώνεται.

$$\text{Συχνότητα} = \frac{\text{Κύκλοι}}{\text{Δευτερόλεπτο}}$$

Η μονάδα μέτρηση της συχνότητας είναι το Hertz και μας βοηθά να διακρίνουμε αν ο ήχος είναι υψηλός ή χαμηλός. Η ονομασία Hertz είναι προς τιμήν του Γερμανού Φυσικού Heinrich Rudolf Hertz ο οποίος ασχολήθηκε με την μελέτη πάνω στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και ανέπτυξε εφαρμογές πάνω σε αυτά.

Στην συνέχεια έχουμε την ταχύτητα και το μήκος κύματος που συνδέονται μεταξύ τους. Η ταχύτητα με την οποία ο ήχος φτάνει στο ακουστικό σύστημα εξαρτάται από πολλές μεταβλητές και παράγοντες που υπάρχουν στον αέρα, όπως είναι η θερμοκρασία, ο ήλιος, η υγρασία και ο άνεμος. Είναι όμως ανεξάρτητη από την ένταση και την συχνότητα του ήχου. Η ένταση θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 2. Η διάδοση του ήχου στον αέρα χωρίς εξωτερικούς παράγοντες είναι 330 m/sec. Αν όμως υπάρχει ένας παράγοντας πιθανών η ταχύτητα να αυξηθεί ελαφρά. Όλα αυτά ανάλογα με τις τιμές και τις εναλλαγές που θα υπάρξουν στους παράγοντες.





Σχήμα 1.1.1 : Μεταβολές του ήχου στον τόνο(συχνότητα) και στην ένταση

## 1.2 Ανθρώπινο ακουστικό σύστημα

Η ανθρώπινη ακοή είναι ένα από τα μεγαλύτερα όπλα του ανθρώπου στον αγώνα της επιβίωσης. Η ικανότητα να αναγνωρίζει και να αντιλαμβάνεται τον ήχο οφείλεται στο ακουστικό σύστημα που έχει αναπτύξει σε βάθος χρόνου. Ο άνθρωπος μπορεί να αναγνωρίσει πολλά γεγονότα καθώς και αντικείμενα μέσω του ήχου. Το σύστημα αυτό αποτελείται από: (α) τους αισθητήρες που ανιχνεύουν και αναγνωρίζουν τον ήχο όπου μετατρέπει το ηχητικό κύμα σε ηλεκτροχημικό σήμα και (β) το νευρικό στο οποίο γίνεται η κύρια επεξεργασία του ηλεκτροχημικού σήματος και δημιουργείται το αίσθημα της ακοής.

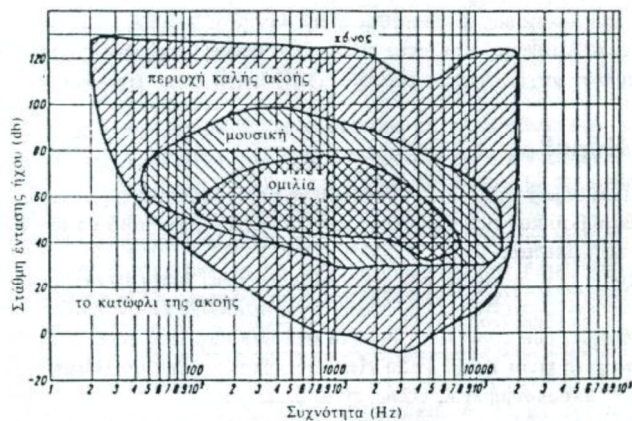
Αναλυτικά έχουμε τα εξής: Το εξωτερικό αυτί όπου το περύγιο συλλέγει τα ηχητικά κύματα και τα πάει στον ακουστικό πόρο με το τύμπανο να συλλέγει τα κύματα και να πάλλεται. Στην συνέχεια έχουμε το εσωτερικό αυτί όπου περιλαμβάνει τα τρία οστάρια τα οποία εφάπτονται πάνω στον ακουστικό πόρο. Αυτά είναι η σφύρα, ο άκμονας και ο αναβολέας, όπου ανιχνεύουν τις δονήσεις του παλλόμενου τυμπάνου και τις μεταφέρουν στο εσωτερικό αυτί. Παρατηρώντας το σχήμα 1.2 το εσωτερικό του αυτιού θα φαίνεται ότι είναι σαν λαβύρινθος και περιλαμβάνει τον

κοχλία και του ημικυκλικούς σωλήνες. Η τελευταίοι έχουν στο εσωτερικό τους υγρό όπου με την κίνηση μεταφέρει πληροφορίες για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ήχου. Ο κοχλίας από την άλλη είναι ένας σωλήνας που μοιάζει με σαλιγκάρι που περιέχει υγρό μέσα σε μια μεμβράνη το οποίο βοηθάει στη μεταβίβαση των δονήσεων. Τελειώνοντας έχουμε το όργανο του Corti όπου είναι το πιο σημαντικό όργανο της ακοής καθώς περιλαμβάνει τα αισθητήρια τριχοφόρα κύτταρα. Με το υγρό να πάλλεται οι δονήσεις που δημιουργούνται μεταβιβάζονται στην μεμβράνη και την κάνουν να δονείται και αυτή. Η μεταβολή της πίεσης στην άλλη μεριά της μεμβράνης ανιχνεύεται από τα αισθητήρια τριχωτά κύτταρα τα οποία στην συνέχεια στέλνουν το σήμα στον εγκέφαλο. Η συχνότητα του ήχου διεγείρει κάθε φορά και άλλα τριχωτά κύτταρα έτσι ο άνθρωπος μπορεί να αντιληφθεί περίπλοκους ήχους όπως είναι η μουσική.



Σχήμα 1.2: Ανατομία ανθρώπινου ακουστικού συστήματος

Οι ήχοι που γίνονται αντιληπτοί από τα αισθητήρια ακοής του ανθρώπου αφού γίνει η κατάλληλη μετατροπή σε ηλεκτροχημικό σήμα είναι τα ηχητικά κύματα συχνότητας  $f$  μεταξύ 20 Hz και 20.000 Hz. Πρέπει να τονίσουμε ότι η συχνότητα με την ένταση είναι ένα τελείως διαφορετικό μέγεθος αφού το εύρος των εντάσεων των ήχων που μπορεί ο άνθρωπος να ακούσει ξεπερνάει το  $10^{12}$  dB ενώ οι συχνότητες που μπορεί να ακούσει το ανθρώπινο αυτί διαφέρουν κατά ένα παράγοντα ίσο με 1000 (20 Hz έως 20.000 Hz). Βέβαια σε κάποιες περιπτώσεις το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα αντιλαμβάνεται και συχνότητες της τάξης των 1-6 Hz.

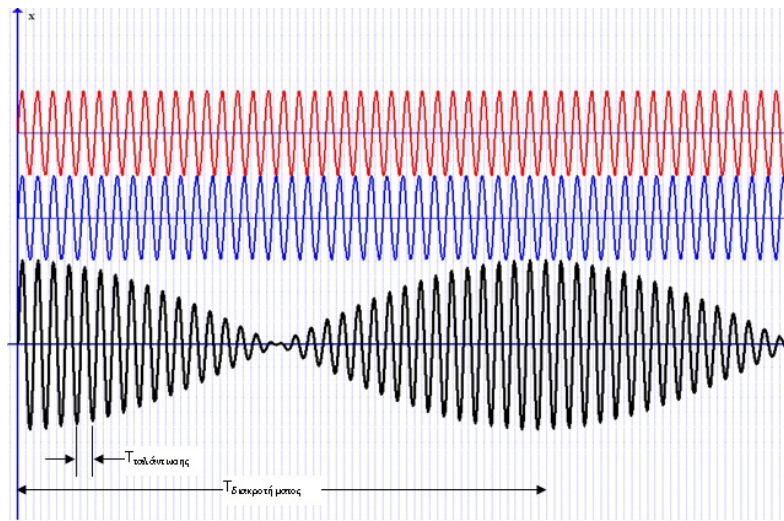


Σχήμα 1.2(α): Διάγραμμα ορίων ανθρώπινης ακοής

### 1.2.1. Η ικανότητα της ανθρώπινης ακοής

Η ικανότητα του ανθρώπου να αντιλαμβάνεται τις μεταβολές της πίεσης όπου προαναφέρθηκε και να αποκωδικοποιεί το περιεχόμενό τους, στηρίζεται σε τρία στάδια: (α) η κατεύθυνση των κυμάτων του ήχου στο ακουστικό μέρος του αυτιού, (β) ο εντοπισμός της διακύμανσης του και (γ) η μετάφραση της διακύμανσης σε ηλεκτρικά σήματα όπου και γίνονται κατανοητά από τον εγκέφαλο. Παράλληλα, ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει την ικανότητα να συγκρίνει την χρονική διαφορά με την οποία ένας ήχος φτάνει στο αυτί, οπότε και συμπεράνει την απόσταση από την οποία προέρχεται. Βέβαια η ανθρώπινη ακοή δεν μπορεί να αντιληφθεί με ακρίβεια τη συχνότητα ενός ήχου. Όταν ειδικά πρόκειται για 2 ήχους ταυτόχρονα όπου η ανάλυση του ενός φτάνει στα 2 Hz θα πρέπει να έχουμε διαφορά τουλάχιστον 2 Hz. Έτσι με την βοήθεια του φαινομένου του διακροτήματος μπορούμε να αντιληφθούμε την μικρή διαφορά των συχνοτήτων των δύο ήχων. Το διακρότημα είναι ακουστικό φαινόμενο που γίνεται όταν δύο ήχοι είναι σχεδόν στην ίδια ή κοντινή συχνότητα.

Αθροίζοντας τις κυματομορφές αυτές ο ήχος που θα παραχθεί θα είναι σαν το *σχήμα 1.2.1*.

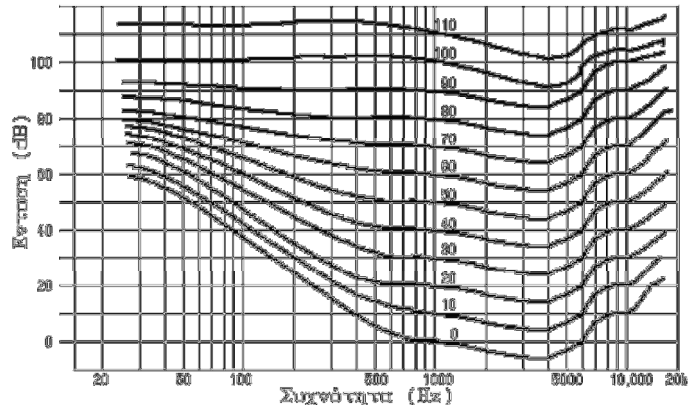


Σχήμα 1.2.1: Φαινόμενο Διακροτήματος

Στην συνέχεια έχουμε την ακουστότητα όπου η ένταση συνδέεται άμεσα με το πλάτος που έχει ένα ηχητικό κύμα και έπειτα με την ενέργεια του, δηλαδή όσο μεγαλύτερη ενέργεια έχουμε τόσο ένταση θα έχει ο ήχος που θα ακουστεί. Η ένταση όμως είναι ένα μέγεθος αντικειμενικό όπως θα αναλυθεί αργότερα. Η ικανότητα του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος είναι ικανό να αντιληφθεί ήχους διαφορετικής έντασης, από χαμηλούς όπως ένα απαλό φύσημα του αέρα μέχρι και δυνατούς σε μία συναυλία. Πειράματα έχουν δείξει ότι ήχοι που βρίσκονται σε συχνότητες (2700 έως 3200 Hz) ο άνθρωπος τους αντιλαμβάνεται πιο εύκολα. Αν έχουμε δύο ήχους να παίζονται την ίδια χρονική στιγμή θα ακουστεί ο ήχος με την μεγαλύτερη ένταση.

Για να δούμε πόσο δυνατός είναι ένας ήχος ξεκινώντας να γίνεται ενοχλητικός θα βρεθούμε στον δρόμο δύο επιστημών Fletcher και Munson οι οποίοι μέσα από καμπύλες προσπάθησαν να απεικονίσουν το αίσθημα της ενοχλήσης. Οι καμπύλες που περιγράφουν την ακουστότητα μετριέται σε **phones**. Έτσι βλέπουμε έναν ήχο 500 Hz και έντασης 60 dB να είναι περίπου ίσο με 60 phones. Αν η ένταση τώρα του ήχου παραμείνει ίδια στα 60 dB αλλά η συχνότητα μειωθεί στα 50 Hz τότε

ο ήχος είναι 0 phones. Το αποτέλεσμα ήταν ότι στις συχνοτικές περιοχές μεταξύ 1 – 6 Hz το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα αντιλαμβάνεται με ευκολία του ήχους που παράγονται ενώ δεν ισχύει το ίδιο στις χαμηλές συχνότητες.

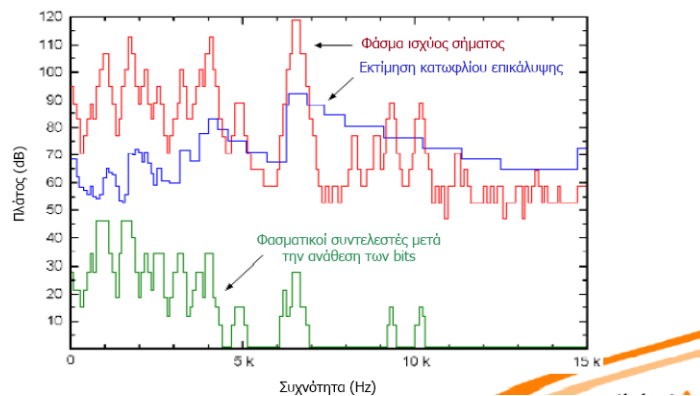


Σχήμα 1.2.1(α): Καμπύλες Fletcher και Munson

### 1.2.2. Ο κλάδος της ψυχοακουστικής και που εφαρμόζεται

Το ανθρώπινο σύστημα ακοής αντιλαμβάνεται του διάφορους ήχους συμπεριλαμβανόμενης και ενός πλήρους φάσματος συχνοτήτων (μουσική). Ο κλάδος της ακουστικής, ο οποίος μελετά τον υποκειμενικό τρόπο του συστήματος αυτού ονομάζεται ψυχοακουστική. Η ψυχοακουστική έχει βρει βάση σε πολλά πεδία της ανάπτυξης λογισμικού μουσικής και ανάλυσης συχνοτήτων, δηλαδή υπάρχουν μαθηματικά μοντέλα που έχουν αποδειχθεί στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος, όπου πολλά προγράμματα συμπίεσης ήχου όπως το mp3 ή το wav, που βασίζονται στην συμπίεση αρχείων μέσω αλγορίθμων σχεδιασμένο να μειώνει τους ήχους που ακούγονται αλλά δεν αντιλαμβάνονται από το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. Υπάρχουν δηλαδή πολλές πληροφορίες και δεδομένα περιττά για τον άνθρωπο μολονότι ακούει τον ήχο σαν πιστή αναπαραγωγή του αρχικού ασυμπίεστου αρχείου.

Με βάση τα ψυχοακουστικά μοντέλα απορρίπτονται τμήματα ή περιοχές του ηχητικού φάσματος που δεν ακούει ο άνθρωπος και καταγράφουν την υπόλοιπη πληροφορία με αποτελεσματικό τρόπο (Σχ. 1.2.2). Επίσης, μια ακόμη εφαρμογή είναι κατά τον σχεδιασμό υψηλών ποιότητας συστημάτων ήχου για την αναπαραγωγή μουσικής σε σινεμά, θέατρα καθώς και σε ιατρικά πειράματα αντιμετώπισης σοβαρών ασθενειών. Καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται όλο και περισσότερο στις μέρες μας η ψυχοακουστική βρίσκει εφαρμογές και στις σύγχρονες μουσικές μελωδίες συγκαλύπτοντας τις συχνότητες των ανεπιθύμητων μέσων καθώς και στα μηχανήματα που αναπαράγουν την μουσική (ηχεία) με αποτέλεσμα την βέλτιστη εμπειρία του ακροατή.



Σχήμα 1.2.2: Διάγραμμα Ψυχοακουστικό μοντέλου ακοής.

Ψυχοακουστικά πειράματα έχουν διεξαχθεί και αναπτυχθεί έτσι ώστε να κατανοήσουν πώς αντιλαμβάνεται τον ήχο το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. Τέτοια πειράματα έχουν μελετήσει τις διαφορετικές ιδιότητες της αντίληψης κάποιων ηχητικών φαινομένων. Πολλοί μουσικοί έχουν μελετήσει τα ηχητικά φαινόμενα αυτά και έχουν αναπτύξει την μουσική τους ανάλογα με τις μεταβολές αυτές. Έχουν καταφέρει να δημιουργήσουν ένα ακουστικό αποτέλεσμα όπου όχι μόνο ακούγεται ευχάριστα αλλά δημιουργεί το αίσθημα να το ακούσει ξανά. Αυτό βέβαια δεν αποκλίνει από την στοιχειώδη θεωρία της μουσικής όπου έχει θέσει τους δικούς τις κανόνες στην δημιουργία ενός μουσικού κομματιού για την επίτευξη ενός αρμονικού αποτελέσματος. Αρκετά πειράματα αναφέρονται στο φαινόμενο Doppler, το κατώφλι

της ακουστότητας, το διακρότημα όπως αναφέρθηκε καθώς και το φαινόμενο της προπορείας (Precedence effect).

### **1.3. Μετατροπή ηχητικού σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό**

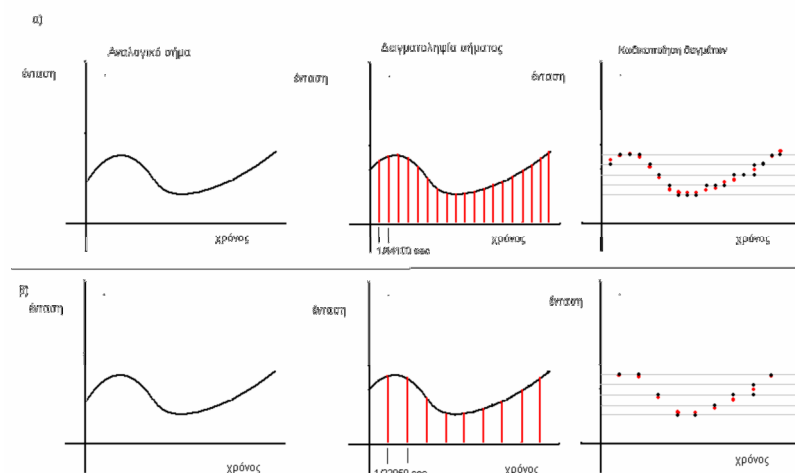
Στην σύγχρονη κοινωνία η τεχνολογία έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας. Έτσι και η τεχνολογία στον ήχο και στην μουσική έχει συμβάλει στην επίτευξη για ένα πιο δημιουργικό και ακριβές ακουστικό ψηφιακό αποτέλεσμα. Ο ήχος όπως αναφέρθηκε είναι από την φύση του μια αναλογική ποσότητα και για να μπορέσει να γίνει επεξεργασία θα πρέπει να ψηφιοποιηθεί.

Το χαρακτηριστικό κάθε ήχου οφείλεται σε ένα σύνολο από μεγέθη. Τα ηχητικά μεγέθη που μπορούν να γίνουν αντιληπτά από τον ακροατή αποκαλούνται υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου, ενώ τα ηχητικά μεγέθη που δεν γίνονται αντιληπτά αποκαλούνται αντικειμενικά. Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά είναι η συχνότητα, η ένταση και τα υποκειμενικά είναι η ακουστικότητα, το ύψος και η χροιά. Έτσι έχουμε το μικρόφωνο, ένα όργανο που μετατρέπει ένα ηχητικό σήμα και τα χαρακτηριστικά του σε διακύμανση ηλεκτρονικής τάσης. Αυτή η ηλεκτρονική τάση είναι το αναλογικό ηλεκτρονικό σήμα. Έχουμε δηλαδή έναν ηλεκτροακουστικό μετατροπέα, όπου είναι σχεδιασμένο να παράγει ηλεκτρικό σήμα που αντανακλά την ακουστική πίεση που υπάρχει στον αέρα στο στόμιο του μικροφώνου. Γενικά υπάρχουν πολλών ειδών μικροφώνου ανάλογα με τις ανάγκες τις κάθε περίπτωσης της ηλεκτροακουστικής εφαρμογής, όπως είναι η ευαισθησία σε εξωτερικούς παράγοντες, το κόστος, η ηλεκτροακουστική απόδοση καθώς και τα χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με την εξωτερική αντίσταση του μικροφώνου και καθορίζει την ενίσχυση.

Για να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε το σήμα όμως από τον Η/Υ είναι απαραίτητο να μετατραπεί από αναλογικό σήμα σε ψηφιακό σήμα. Για την δουλειά αυτή υπάρχουν οι μετατροπείς (converters) ADC (Analog to Digital Converters) και ο

DAC (Digital to Analog Converters) όπου βασίζονται σε τρεις λειτουργίες για την μετατροπή αυτή. Οι τρεις λειτουργίες είναι η **δειγματοληψία** παίρνοντας δείγματα του πλάτους του αρχικού αναλογικού σήματος στην συνέχεια τον **κβαντισμό** των τιμών αυτών σε χρόνο  $t$  και τελειώνοντας με την **κωδικοποίηση**. Στην δειγματοληψία παίρνονται δείγματα από το αναλογικό σήμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα και από τον ρυθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται ανά δευτερόλεπτο εξαρτάται η ποιότητα του σήματος (βλ. σχήμα 1.3).

Η συχνότητα σε μία δειγματοληψία είναι ο ρυθμός το δευτερόλεπτο που παίρνει τιμές ο μετατροπέας ADC από το αναλογικό σήμα και συνάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη συχνότητα έχουμε τόσο καλύτερη θα είναι η μετατροπή του ήχου. Μία κάρτα ήχου τελευταίας τεχνολογίας προσφέρει συχνότητα δειγματοληψίας από 11.000 Hz και 44,100 KHz. Το τελικό στάδιο που είναι η κωδικοποίηση η ένταση του κάθε δείγματος αντιστοιχίζεται σε έναν δυαδικό αριθμό. Ο αριθμός αυτός που πρόκειται να αποθηκευτεί για το κάθε δείγμα είναι σταθερός και καλείται εύρος δείγματος. Το εύρος αυτό δείχνει τις πιθανές τιμές που μπορεί να πάρει το κάθε δείγμα. Για την ψηφιοποίηση του ήχου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι συνδυασμοί ρυθμού δειγματοληψίας και εύρος δείγματος.



Σχήμα 1.3: Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (α) συχνότητας 44,100 KHz (β) συχνότητας 22,05 KHz



Χάρης στις μετατροπές αυτές θα μπορέσουμε να επεξεργαστούμε στην συνέχεια μουσικά κομμάτια ή αλλιώς ένα ηχητικό σήμα πλήρους φάσματος και να αναπτύξουμε κριτήρια αξιολόγησης του. Στον άνθρωπο ένας ήχος ή ένα σύνολο ήχων μπορούν να ακουστούν είτε αρμονικά είτε θορυβώδες. Αυτό εξαρτάται από τον τρόπο που είναι στοιβαγμένες οι νότες αλλιώς οι συχνότητες των νοτών που προκύπτουν από τον πομπό. Σε έναν Η/Υ μπορούμε να δούμε τις συχνότητες αυτές να τις καταγράψουμε όπως θα γίνει στα επόμενα στάδια της πτυχιακής αυτής και στην συνέχεια να τα επεξεργαστούμε και στο τέλος να δούμε αν αυτό που ακούγεται είναι αρεστό ή όχι.

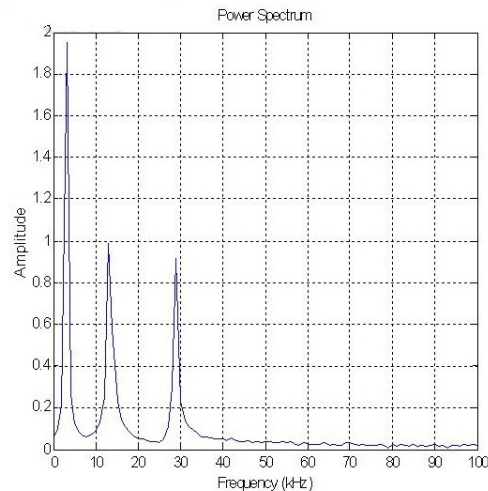
Υπάρχουν όμως δύο παράμετροι με τον ψηφιακό ήχο όπου ένα είναι η ποιότητα του ήχου και δεύτερον το μέγεθος του αρχείου ήχου. Η ποιότητα κατά κύριων λόγο απασχολεί αυτούς που ασχολούνται με τις συχνότητες των FM ή των βραχέων. Για το μέγεθος του αρχείου είναι πρόβλημα όταν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί στο διαδίκτυο ή σε κάποια ιστοσελίδα. Τα αρχεία μουσικής που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αρχεία wav (Microsoft Wave Sound Format). Αυτό γιατί είναι τα αρχεία wav είναι ακατέργαστα, δηλαδή χωρίς να χρειάζονται άλλη προεπεξεργασία πέρα από το φορμάρισμα των δεδομένων. Για το λόγο αυτό, επειδή αποθηκεύουν ακατέργαστο ήχο το μέγεθος μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο. Το wav αρχείο κρατάει την ποιότητα του αρχικού ήχου χωρίς να την αλλοιώνει. Δηλαδή αυτό σημαίνει ότι όσο καλύτερη ποιότητα αρχικού ήχου έχουμε τόση ψηφιακή ποιότητα ήχου ( wav ) θα πάρουμε.

## Κεφάλαιο 2 Ηχητικό σήμα πλήρους φάσματος

Το κεφάλαιο 2 ασχολείται με την θεωρία τι είναι ένα ηχητικό σήμα πλήρους φάσματος. Πολλά από τα χαρακτηριστικά ενός ήχου όπως η ένταση, η χροιά και το ύψος. Επίσης θα αναλυθούν οι συχνότητες που βρίσκονται οι μουσικές νότες και δημιουργούν ένα σήμα με πλήρες φάσμα. Επίσης θα αναφερθεί ο θόρυβος που υπάρχει σε κάθε σήμα καθώς και τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση ενός μουσικού κομματιού.

### 2.1 Ανάλυση ηχητικού σήματος πλήρους φάσματος

Ξεκινώντας αν θέλαμε να περιγράψουμε έναν ήχο που παράγουν δύο έγχορδα όργανα όπως το μπάσο και η κιθάρα θα δούμε ότι παρόλο που είναι δύο παρόμοια όργανα, το μπάσο παράγει πιο χαμηλούς ήχους από ότι η κιθάρα. Το ύψος του ήχου, χαμηλό ή υψηλό, είναι ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό που σχετίζεται με ένα αντικειμενικό χαρακτηριστικό όπου είναι η συχνότητα. Η συχνότητα όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ενός συνημιτονικού ηχητικού σήματος είναι ο αριθμός των κύκλων που εκτελεί η συνάρτηση ανά δευτερόλεπτο και μετριέται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ( Hz). Ο ορισμός της συχνότητας αυτής στηρίζεται ότι το συνημίτονο είναι μία περιοδική συνάρτηση. Οι ήχοι στην φύση που είναι περιοδικοί είναι λίγοι επομένως ο ορισμός της συχνότητας που δώσαμε δε θα μπορούσε να εφαρμοστεί για την πλειονότητα των ηχητικών σημάτων αν δεν ισχύει ότι κάθε ήχος μπορεί να αναλυθεί σε ένα άθροισμα κατάλληλων συνημιτονικών σημάτων. Αφού υπάρχει μια τέτοια ανάλυση μας επιτρέπει να αναφερόμαστε στο **φάσμα συχνοτήτων** ενός ηχητικού σήματος που αποτελεί ένα διάγραμμα πλάτους που έχει κάθε συχνότητα που περιέχεται στο σήμα.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα φάσματος συχνοτήτων ενός ηχητικού σήματος

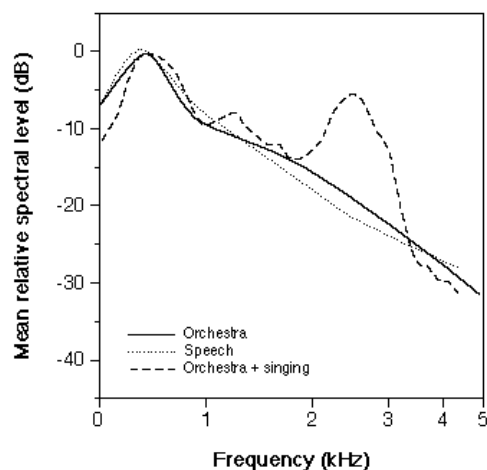
Για κάθε περιοδικό ήχο μπορεί να αναλυθεί σε ένα άθροισμα συνημιτονικών συναρτήσεων με διάφορα πλάτη και φάσεις καθώς και με συχνότητες οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια μία άλλης θεμελιώδους συχνότητας (partials overtones) που ονομάζεται αρμονική και το σχετικό τους πλάτος είναι αυτό που οφείλεται το αίσθημα της χροιάς ενός ήχου. Υπάρχουν περιπτώσεις που η αρμονική συχνότητα με το μεγαλύτερο πλάτος μπορεί να καθορίσει και το ύψος του ήχου αλλά και πάλι είναι η θεμελιώδη συχνότητα.

Το φάσμα συχνοτήτων ενός ήχου διαφοροποιεί δύο ήχους ίδιας θεμελιώδους συχνότητας και έντασης, όπου είναι αντίστοιχα το ύψος και η ακουστότητα. Έτσι οι σύνθετοι ήχοι των μουσικών οργάνων διαφέρουν επειδή έχουν διαφορετικά φάσματα όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Το φάσμα συχνοτήτων καθορίζεται από το συνολικό αριθμό των επιμέρους συχνοτήτων, την ένταση της κάθε επιμέρους συχνότητας, την κατανομή τους στο ακουστικό φάσμα και τέλος του συσχετισμού των κάθε φάσεων τους. Το αρμονικό φάσμα ενός σύνθετου ήχου βγαίνει από το θεώρημα του μαθηματικού J. Fourier όπου λέει ότι κάθε περιοδικό κύμα μπορεί να αποσυντεθεί σε μια σειρά από επιμέρους ημιτονοειδών κυμάτων των οποίων οι συχνότητες είναι παράγωγες των βασικών συχνοτήτων και έχουν δε διαφορετικά πλάτη και διαφορετικές φάσεις από την θεμελιώδη συχνότητα που αναφέραμε.

Επίσης έχουμε τις μερικές παράγωγες συχνότητες της θεμελιώδους συχνότητας που είναι οι: (α) Αρμονικοί (harmonics) όπου είναι ακέραια πολλαπλάσια

της θεμελιώδους. (β) Μη αρμονικοί (inharmonics) όπου δεν είναι ακέραια αλλά δεκαδικά πολλαπλάσια της θεμελιώδους. (γ) Υποαρμονικοί όπου καλούνται οι συχνότητες που προηγούνται της θεμελιώδους και είναι ακέραια υποπολλαπλάσια π.χ το 1/2, 1/3, 1/4 κτλ. (δ) Τελειώνοντας το «Formants» ή όπως λένε το Formants του τραγουδιστή. Αυτό έχει να κάνει με την ικανότητα της φωνής του ανθρώπου να ακουστεί ακόμα και πάνω από μια δυνατή ορχήστρα. Αυτό καθορίζεται από την κεντρική συχνότητα ή αλλιώς την συχνότητα του αρμονικού, από το πλάτος του και το πλάτος της ζώνης (ευρύτητα περιοχής). Στην ουσία έγκειται στον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια του ήχου της φωνής κατανέμεται στις διάφορες συχνότητες.

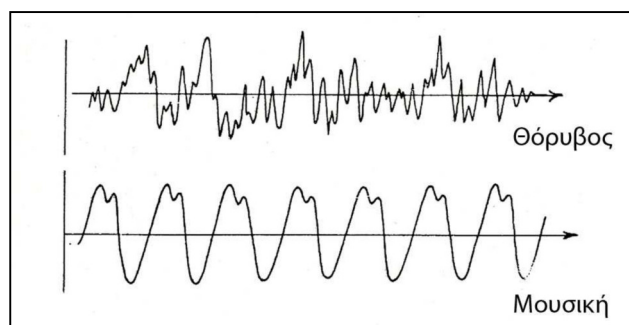
Έρευνες που έγιναν από τον επιστήμονα Johann Sundberg όπου μελέτησε τις ηχογραφήσεις ενός διάσημου τενόρου διαπίστωσε ότι το μέσο φάσμα συχνοτήτων της φωνής του έκανε μια μεγάλη καμπύλη γύρω στα 3000 Hz, ειδικά όταν η φωνή συνοδευόταν από την ορχήστρα. Στο *σχήμα 2.1.1* βλέπουμε την διακεκομμένη γραμμή που είναι το formant του τραγουδιστή. Στο ίδιο σχήμα, άμα παρατηρηθεί η ενέργεια που παράγει η ορχήστρα (orchestra) μπορεί να δει κανείς πως παράγει πολλή ενέργεια γύρω στα 500 Hz, αλλά στις υψηλότερες συχνότητες είναι σχετικά μικρή μέχρι 3000 Hz. Έτσι αν μια φωνή παράγει περισσότερη ενέργεια, μπορεί να ακουστεί δυνατώτερα από μια ορχήστρα.



Σχήμα 2.1.1: Διάγραμμα formants

## 2.2 Θόρυβος και μουσική

Ένα ηχητικό σήμα που μπορεί να έχει ένα φάσμα συχνοτήτων παρόμοιο με το *σχήμα 2.1*, μπορούμε να διακρίνουμε τις συχνότητες με το μεγαλύτερο πλάτος και να τις χρησιμοποιήσουμε για να χαρακτηρίσουμε το ηχητικό σήμα. Το ίδιο όμως δεν μπορεί να συμβεί στην περίπτωση που το φάσμα συχνοτήτων είναι ανομοιόμορφο (*σχ. 2.2*). Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει κάποια συχνότητα ή έστω ένα σύνολο συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να το χαρακτηρίσουμε. Αυτό το ηχητικό σήμα που διαθέτει ένα πλήρες σύνολο συχνοτήτων ονομάζεται θόρυβος (NOISE). Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο όρος θόρυβος είναι αρκετά διαφορετική με την κοινωνική χρήση του. Για παράδειγμα ένας δυνατός θόρυβος μιας μηχανής έχει ένα αρκετά καθορισμένο φάσμα συχνοτήτων οπότε δεν θα αποτελεί θόρυβο με την τεχνική σημασία του όρου. Αν παρατηρηθεί ένας θόρυβος στον παλμογράφο θα δείχνει ότι σε κανένα σημείο του δεν επαναλαμβάνεται, δηλαδή η κυματομορφή είναι ακανόνιστη. Το ίδιο όμως δεν ισχύει αν το δούμε αυτό σε ένα μουσικό κομμάτι όπου υπάρχουν πολλά σημεία επαναλαμβανόμενα όσο ο ήχος διαρκεί. Παρόλα αυτά και ένα μουσικό όργανο μπορεί να παράγει θόρυβο, με την κατάλληλη δεξιότητα...



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα θορύβου και μουσικής

Ο θόρυβος βέβαια βρίσκει εφαρμογές σε πολλές ακουστικές μετρήσεις όπου πολλοί χώροι βομβαρδίζονται από θορύβους συγκεκριμένης συχνότητας έτσι ώστε οι

μετρήσεις που προκύπτουν να είναι πιο σωστές σε σχέση με τις μετρήσεις που θα προέκυπταν αν χρησιμοποιούνταν ένας καθαρός ήχος ή τόνος, αφού ο χώρος δεν μπορεί να επηρεάσει τόσο εύκολα πολλές συχνότητες όσο επηρεάζει μία. Ακόμα και στην μουσική ο θόρυβος βρίσκει εφαρμογές αφού τα περισσότερα κρουστά όργανα παράγουν ήχους με φάσμα συχνοτήτων παρόμοια με το *σχήμα 2.2*.

Στην συνέχεια έχουμε τα χαρακτηριστικά μέτρα του θορύβου ενός σήματος καθώς και την μαθηματική εξίσωση. Έστω ότι ο θόρυβος ενός σήματος  $S(t)$  έχει μέση τιμή  $\bar{S}$  και εμφανίζει τιμές  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Το απόλυτο μέτρο του θορύβου του σήματος  $S(t)$  είναι η μέση τιμή των τετραγώνων θορύβου ( $N_{RMS}^2$ ) και η μαθηματική εξίσωση είναι :

$$N_{RMS}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S - S_i)^2}{n}$$

Αυτή αποτελεί τη διακύμανση του πληθυσμού των στιγμιαίων τιμών. Η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης ονομάζεται ενεργή τιμή του θορύβου και ισούται με την τυπική απόκλιση του πληθυσμού των στιγμιαίων τιμών θορύβου σήματος. Ο παραπάνω τύπος είναι μπορεί να χαρακτηριστεί και ως κανονικό θόρυβος και η μέση τιμή του είναι πάντοτε ίση με το μηδέν. Εάν το σήμα επιβαρύνεται με θορύβους διαφόρων προελεύσεων το αποτέλεσμα είναι ισοδύναμο με το να υπήρχε θόρυβος μια και μόνης προέλευσης αλλά με μέση τιμή τετραγώνων θορύβου ίση με προς το άθροισμα των μεσών τιμών τετραγώνων θορύβου και των επιμέρους θορύβων με τον τύπο:

$$(N_{RMS})_{ολ}^2 = (N_{RMS})_1^2 + (N_{RMS})_2^2 + \dots + (N_{RMS})_n^2$$

Η εξίσωση αυτή είναι αποτέλεσμα του στατιστικού χαρακτήρα του θορύβου και παρουσιάζει αναλογία με την ολική διακύμανση αθροίσματος ποσοτήτων κάθε μία των οποίων χαρακτηρίζεται από μία επιμέρους διακύμανση. Ο λόγος S/N που θα δούμε σε διαγράμματα στο κεφάλαιο 3 είναι τα απόλυτα μέτρα θορύβου και έχουν ελάχιστη σημασία σε ένα όργανο όπου ο θόρυβος μαζί με το σήμα διέρχονται από τη μονάδα στην άλλη και υφίσταται ενίσχυση, μείωση ή άλλες επεξεργασίες. Το κυρίως όμως θέμα είναι στην σχετική μεταβολή των τιμών των σημάτων αυτών. Ορίζεται ως λόγος σήματος προς θόρυβο (**Signal to Noise Ratio**) και η σχέση είναι ο λόγος :

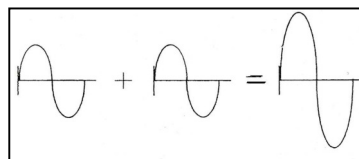
$$S/N = \bar{S} / N_{RMS}$$

Ο λόγος αυτός εκφράζεται κυρίως ως λόγος ισχύων σε μονάδες dB σύμφωνα με την εξίσωση:

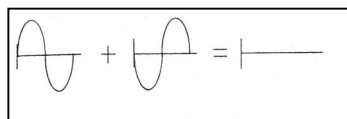
$$S/N \text{ (dB ισχύος)} = 10 \log(P_{\text{ΣΗΜΑΤΟΣ}} / P_{\text{RMS,ΘΟΡΥΒΟΥ}})$$

### 2.3 Ένταση και φάση ενός ήχου

Σε όλα σχεδόν τα μουσικά κομμάτια υπάρχει ένα συνονθύλευμα μουσικών οργάνων που αρμονικά δένουν μεταξύ τους για ένα απολαυστικό ακουστικό αποτέλεσμα. Όταν δύο ήχοι που παράγονται από διαφορετικά μουσικά όργανα ενωθούν θα προκύψει ένας νέος ήχος. Ο όρος αυτός ονομάζεται φάση και περιγράφει την ένωση αυτή. Στην περίπτωση που οι δύο ήχοι ξεκίνησαν την ίδια χρονική στιγμή με τον ίδιο τρόπο, έχοντας την ίδια συχνότητα και ένταση τότε ο νέος ήχος που θα παραχθεί θα είναι ίδιας συχνότητας με διπλάσια ένταση. Αν έχουμε ήχους ίδιας συχνότητας και αντίθετης κατεύθυνσης τότε ακυρώνει ο ένας ήχος τον άλλον με αποτέλεσμα να μην ακούμε τίποτα.



Σχήμα 2.3: Ήχοι ίδιας συχνότητας και ίδια κατεύθυνσης



Σχήμα 2.3.1: Ήχοι ίδιας συχνότητας και αντίθετης κατεύθυνσης

Την ένταση, όπως αναφέρθηκε στο φάσμα συχνοτήτων στην αρχή του κεφαλαίου εξαρτάται: (α) Από τις μεταβολές που έχουν οι πιέσεις μέσα στο ηχητικό κύμα και (β) το πλάτος του. Έτσι είναι ένα αντικειμενικό μέγεθος το οποίο μπορεί να μετρηθεί και μετριέται σε decibel ή dB και είναι λογαριθμικό μέγεθος και δεν αυξάνεται γραμμικά. Σαν σημείο αναφοράς για τον ήχο είναι το 0 Db όπου ο ήχος αυτός είναι στην αρχή για να ακουστεί. Στην συνέχεια αν ανέβει η ένταση στα 10 dB θα έχουμε μια μονάδα 10 φορές περισσότερη από το σημείο αναφοράς. Το ίδιο όμως δεν ισχύει αν πάμε στα 20 dB αφού θα είναι 100 φορές μεγαλύτερος από το σημείο αναφοράς. Έπειτα στα 30 dB θα είναι 1000 φορές μεγαλύτερος κ.ο.κ. Μαθηματικά είναι :

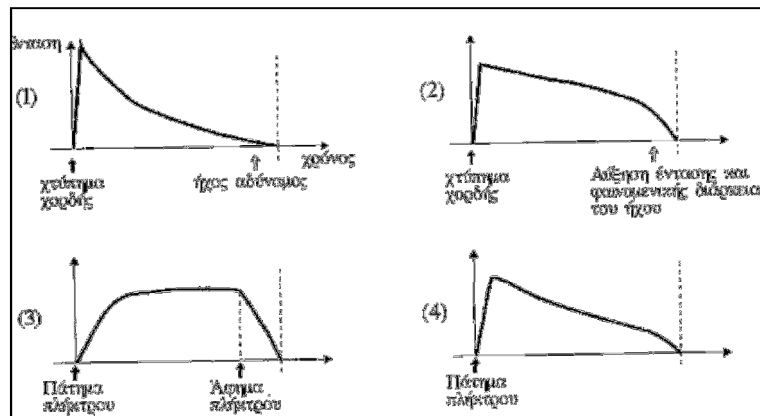
$$(\text{Διαφορά έντασης})_{\text{dB}} = 10 \times \log_{10} (\text{Ισχύς 1} / \text{Ισχύς 2}).$$

Συνήθως έπειτα από ώρα ακούγοντας έναν ήχο στην ένταση των 85 dB μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο ακουστικό σύστημα. Γενικά το όριο του πόνου στο ανθρώπινο αυτί είναι τα 120 dB αλλά πάντα εξαρτάται από τον χρόνο που θα βρίσκεται καθώς και την συχνότητα του ήχου. Για παράδειγμα μέσα σε ένα μπαρ με δυνατή μουσική μπορεί η ένταση να φτάσει τα 115 dB, μετά από 4 ώρες μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο όργανο Corti που βρίσκεται μέσα στο αυτί μας και είναι το κυριότερο όργανο λήψης του ήχου. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι όσο πιο μεγάλη ισχύ υπάρχει μέσα στο κύμα τόσο μεγαλύτερη πίεση θα ασκήσει στο ακουστικό σύστημα. Το ίδιο ισχύει και για τα ηλεκτρικά σήματα όπου έχουν και αυτά ισχύ. Θα πρέπει να τονιστεί ότι πέρα από την μέτρηση της έντασης ενός ήχου η κλίμακα σε dB χρησιμοποιείται στην μέτρηση απώλειας έντασης στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ή στους αλγόριθμους επεξεργασίας ήχου όπως το mp3 ή wav που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1. Επιπλέον η κλίμακα σε dB χρησιμοποιείται και στην μέτρηση του θορύβου και της παραμόρφωσης του σήματος.

Στην συνέχεια της πτυχιακής θα εμφανίσουμε διαγράμματα της έντασης, της τονικότητας, του θορύβου και της ακουστότητας ενός μουσικού κομματιού. Πρέπει πρώτα όμως να εξηγήσουμε τις καμπύλες που θα δούμε καθώς η ένταση που αναλύθηκε είναι για μακροσκοπικό πλάνο όπως κατά την διάρκεια μιας όπερας ή συναυλίας και όχι σαν μικρότερη κλίμακα όπως είναι ένα τραγούδι. Μέσα από τον



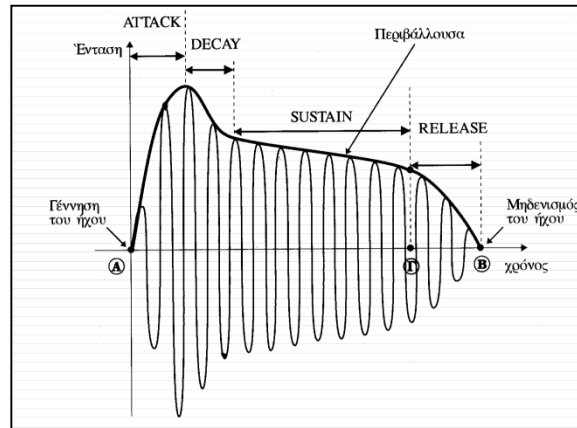
χρόνο θα εξεταστεί η δυναμική εξέλιξη του ήχου που παράγεται από κάθε όργανο καθώς και την ακουστική ταυτότητα του οργάνου. Στην ουσία είναι η παραγωγή ενός ήχου που στην αρχή δεν αναγνωρίζεται αλλά αφού περάσουν 5 sec γίνεται αντιληπτή η νότα και το μουσικό όργανο.



Σχήμα 2.3.2: Διάγραμμα περιβάλλουσας οργάνων (1) Κιθάρα (2) Ηλεκτρική κιθάρα (3) Οργάνου σωλήνα (pipe organ) (4) Πιάνου

Αν κόψουμε την αρχή και το τέλος μιας νότας της κιθάρας ο ήχος θα γίνεται αγνώριστος. Στην περίπτωση αυτή επεμβαίνουμε με διάφορα μέσα στην περιβάλλουσα ενός ήχου που μας δείχνει σε βάθος χρόνου τι δυναμική εξέλιξη θα έχει. Η **περιβάλλουσα πλάτους** είναι η καμπύλη που αναπαριστά την δυναμική ανάπτυξη της έντασης του ήχου. Αυτή είναι και ηχητική υπογραφή του οργάνου. Έτσι στην συνέχεια έχουμε τον χωρισμό του ήχου αυτού στα τμήματα: (α) Μέτωπο ή ατάκα (Attack), (β) Εξασθένηση (Decay), (γ) Διατήρηση (Sustain), (δ) Αποδέσμευση (Release). Στο Attack έχουμε την αρχική ένταση και πάει ανάλογα με το όργανο και πόσο γρήγορα ή αργή γίνεται η αύξηση της έντασης. Με το Decay είναι η αρχική μείωση της έντασης μετά το Attack. Με το sustain έχουμε την διατήρηση της έντασης και τελειώνοντας με το Release όπου μηδενίζεται ο ήχος. Στην συνέχεια της πτυχιακής με τα διαγράμματα που θα εμφανιστούν θα δούμε ότι από όργανο σε όργανο αλλάζει και προσεγγίζεται ανάλογα με τον μουσικό. Τα έγχορδα έχουν πιο γρήγορο Attack από τα πνευστά. Δηλαδή στην κιθάρα θα έχουμε έντονη και απότομη ένταση από ένα πνευστό όργανο. Αυτό όμως δεν ισχύει και στο πιάνο και ας είναι

έγχορδο αφού με το κράτημα του πλήκτρου μπορεί να κρατήσει την ένταση παραπάνω όπως γίνεται και στα πνευστά.

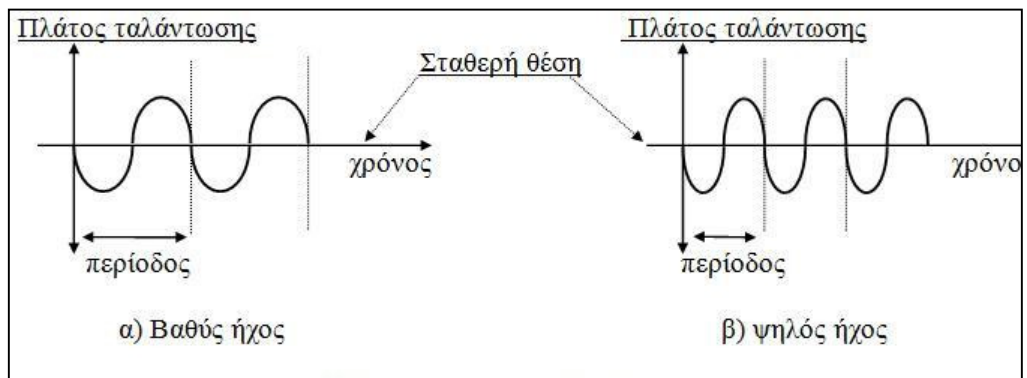


Σχήμα 2.3.3: Η περιβάλλουσα ενός ήχου

## 2.4 Ύψος

Το ύψος είναι ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό και συσχετίζεται με την συχνότητα του ήχου. Οι ήχοι με μεγάλη συχνότητα είναι οι οξείς ή υψηλός όπως ο ήχος που παράγει ένα βιολί και με χαμηλή συχνότητα είναι οι βαρύς όπως ο ήχος που παράγει ένα μπάσο. Στο σημείο αυτό το ύψος συνδέεται με την συχνότητα αλλά δεν συνδέεται γραμμικά, δηλαδή να υπάρχει αύξηση της συχνότητας αλλά το ύψος του ήχου να μην αυξάνεται. Με τον περιορισμό που έχει το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα στο ευρύ ακουστικό φάσμα έρευνες έχουν δείξει ότι μπορεί να αντιληφθεί μέχρι και 280 διαφορετικές εντάσεις και 1400 διαφορετικά ύψη, δηλαδή 392.000 διαφορετικοί συνδυασμοί ήχων που μπορεί να γίνουν αντιληπτοί από τον άνθρωπο. Το πιο σημαντικό όμως για το ύψος και το πιο ενδιαφέρον που θα χρησιμεύσει στην συνέχεια είναι το φαινόμενο της ηχητικής επικάλυψης (masking). Αναφέρθηκε το παράδειγμα δύο ήχων παραγόμενων την ίδια χρονική στιγμή με τον έναν ήχο σε χαμηλότερη ένταση από τον άλλων. Στην περίπτωση αυτή θα ακουστεί ο ήχος με την

μεγαλύτερη ένταση. Αν υποθέσουμε ότι ο πρώτος ήχος είναι συχνότητας 100 Hz και ο δεύτερος 110 Hz με τον δεύτερο σε χαμηλότερη ένταση θα γίνει αντιληπτός αυτός με την μικρότερη συχνότητα. Στην συνέχεια αν αυξηθεί η συχνότητα του δεύτερου ήχου θα επικαλύψει τον άλλον ήχο. Το φαινόμενο αυτό είναι η επικάλυψη και βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους συμπιεστές ήχου.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα βαθύ και ψηλού ήχου

## 2.5 Συχνότητες που βρίσκονται οι νότες

Υπάρχουν πολλοί ήχοι που είναι φυσικοί, δηλαδή ο αέρας ανάμεσα στα δέντρα, το χτύπημα της θάλασσας καθώς και η ανθρώπινη φωνή. Υπάρχουν όμως και οι τεχνικοί ήχοι που είναι κατασκευασμένοι από τον ίδιο τον άνθρωπο. Αυτά είναι τα μουσικά όργανα που έχουν βάση από την αρχαιότητα και εξελίσσονται μέχρι και σήμερα. Για να παραχθεί μια μουσική νότα στα έγχορδα πρέπει να ασκηθεί πίεση σε μια χορδή με αποτέλεσμα να πάλλεται και έτσι δημιουργεί το αίσθημα της νότας. Στην Ευρωπαϊκή μουσική έχουμε 7 νότες και 12 ημιτόνια και το σημαντικό είναι ότι

προκύπτουν συχνότητες για τις νότες χρησιμοποιώντας την δωδεκάτη ρίζα του 2. Οι νότες είναι ντο, ρε, μι, φα, σολ, λα, σι. Μαθηματικά θα έχουμε:

$$V_{kl} = 110 * \sqrt[12]{2^{k-9}} * 2^{l-1}$$

Οι συχνότητες V μετρώνται σε Hz, με τον δείκτη αυτόν να δείχνει σε ποια νότα και οκτάβα βρισκόμαστε. Όπου  $k=0,2,4,5,7,9,11$  για τις νότες αντίστοιχα ντο, ρε, μι, φα, σολ, λα, σι και προσθέτοντας τις ενδιάμεσες τιμές του  $k=1, 3, 6, 8, 10$  όπου προκύπτουν οι νότες με τις διέσεις. Για τις οκτάβες είναι το  $l=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ . Το σημαντικό είναι οι συχνότητες που προκύπτουν στις νότες του  $la=9$  όπου είναι σε ακέραιους αριθμούς: 110 Hz, 220Hz, **440Hz**, 880Hz, 1760 Hz, 3520 Hz, 7040 Hz, 14080 Hz. Η συχνότητα **440Hz** στην λα είναι η κύρια συχνότητα του Ευρωπαϊκού συστήματος.

<p><b>Πρώτη οκτάβα (l=1)</b>  <math>V_{01}=65,40639</math>  <math>V_{21}=73,41619</math>  <math>V_{41}=82,40689</math>  <math>V_{51}=87,30706</math>  <math>V_{71}=97,99886</math>  <math>V_{91}=110</math>  <math>V_{111}=123,4708</math></p>	<p><b>Νότες</b>                      Ντο                      Ρε                      Μι                      Φα                      Σολ                      Λα                      Σι</p>	<p><b>Δεύτερη οκτάβα (l=2)</b>  <math>V_{02}=130,8128</math>  <math>V_{22}=146,8324</math>  <math>V_{42}=164,8138</math>  <math>V_{52}=174,6141</math>  <math>V_{72}=195,9977</math>  <math>V_{92}=220</math>  <math>V_{112}=246,9417</math></p>
<p><b>Τρίτη οκτάβα (l=3)</b>  <math>V_{03}=261,6255</math>  <math>V_{23}=293,6648</math>  <math>V_{43}=329,6276</math>  <math>V_{53}=349,2282</math>  <math>V_{73}=391,9954</math>  <math>V_{93}=440</math>  <math>V_{113}=493,8833</math></p>	<p><b>Νότες</b>                      Ντο                      Ρε                      Μι                      Φα                      Σολ                      Λα                      Σι</p>	<p><b>Τέταρτη οκτάβα (l=4)</b>  <math>V_{04}=523,2511</math>  <math>V_{24}=587,3295</math>  <math>V_{44}=659,2551</math>  <math>V_{54}=698,4565</math>  <math>V_{74}=783,9908</math>  <math>V_{94}=880</math>  <math>V_{114}=987,7666</math></p>

*Σχήμα 2.5: Συχνότητες νοτών στις 4 οκτάβες.*

Ένα σημαντικό παράρτημα είναι οι μείζονες και οι ελάσσονες κλίμακες. Έχουμε δηλαδή μια ακολουθία από φθόγγους σε συνεχή διαδοχή. Η πρώτη νότα μίας κλίμακας ονομάζεται τονική και είναι το κέντρο γύρω από το οποίο στοιβάζεται ένα τονικό έργο. Οι διατονικές κλίμακες είναι δύο ειδών: οι μείζονες και οι ελάσσονες. Αλγεβρικά είναι ως διατεταγμένα υποσύνολα του  $Z_{12}$ . Θεωρούμε μια ανιούσα μείζονα κλίμακα Major Scale ως το διατεταγμένο σύνολο MS.

$$MS=(n, n+2, n+4, n+5, n+7, n+9, n+11, n)(\text{mod}12), \text{ με } n \in Z_{12}$$

Θεωρούμε μια ανιούσα αλάσσονα κλίμακα minor scale ως το διατεταγμένο σύνολο mS.

$$mS=(n, n+2, n+3, n+5, n+7, n+8, n+11, n)(\text{mod}12), \text{ με } n \in Z_{12}$$

Η τονική ελάσσονα της Ντο είναι πάντα δύο θέσεις πίσω, δηλαδή η νότα λα και βάση για τις ελάσσονες έχουμε την νότα λα.

## 2.6 Μετασχηματισμός Fourier και ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT)

Το μουσικό σήμα που παράγεται από το κάθε όργανο με τις κάθε μουσικές νότες στυβαγμένες σωστά, είναι στην ουσία ένα σύνολο ή αλλιώς άθροισμα ημιτόνων. Ο μαθηματικό τύπος, δηλαδή η εξίσωση του ημιτόνου που αναπτύχθηκε από τον μαθηματικό και φυσικό Jean Baptiste Joseph Fourier είναι:

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi)$$

Παρατήρησε ότι ένα συνεχόμενο περιοδικό σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί σαν άθροισμα από συγκεκριμένα ημιτονοειδή σήματα. Στην εξίσωση το A συμβολίζει το πλάτος του κύματος, φ η γωνία φάσης και f την συχνότητα. Έτσι είναι μια βάση για να αναλυθεί ο ήχος αφού διαδίδεται σαν κύμα.

Οι σειρές Fourier είναι το κλειδί για την ανάλυση ενός σήματος σε ημιτονοειδείς συνιστώσες. Αρκετά χαρακτηριστικά που αναφερθήκαν στα προηγούμενα κεφάλαια μπορούν να αναπαραστούν μέσω των σειρών Fourier. Οι χορδές όταν πάλλονται μεταξύ τους εντάσσονται στον κόσμο της κυματικής, με την εξίσωση τους όπως ανακαλύφθηκε από τον D. Alembert είναι:

$$u(x, t) = \frac{1}{2}(f(x + t) + f(x - t)) + \frac{1}{2} \int_{x-t}^{x+t} g(y) dy$$

Όπου είναι μια διαφορική εξίσωση που εξετάζει τη συμπεριφορά ενός σημείου της παλλόμενη χορδής βάσει αρχικών συνθηκών. Οι σειρές Fourier όπως υπέθεσε ο Bernoulli, αναπαριστούν μια λύση της κυματικής εξίσωσης. Έτσι συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι σειρές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιηθούν τα ηχητικά κύματα που παράγονται από τις παλλόμενες χορδές. Την αναπαράσταση αυτή θα την δούμε μέσω Matlab στα επόμενα κεφάλαια.

Το χρήσιμο με τις σειρές Fourier είναι ότι σπάνε τον ήχο σε κομμάτια μέσω τριγωνομετρικών συναρτήσεων με συχνότητες και πλάτη. Οι θεμελιώδεις συχνότητες και οι αρμονικές είναι αυτές οι συναρτήσεις. Το σημαντικό όμως είναι πως μετατρέπονται τα μουσικά σήματα σε πλάτη και συχνότητες. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι αυτό που θα δώσει την λύση στο πρόβλημα. Κάθε φυσική διαδικασία μπορεί να περιγραφεί είτε στην περιοχή του χρόνου είτε στην περιοχή των συχνοτήτων. Σύμφωνα με το θεώρημα του Fourier κάθε συνάρτηση του χρόνου  $t$  μπορεί να μετασχηματισθεί σε συνάρτηση συχνότητας  $f$  και αντιστρόφως. Οι μετασχηματισμοί αυτοί γίνονται με βάση τις εξισώσεις :

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)[\cos(2\pi ft) - j \sin(2\pi ft)] dt$$

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)[\cos(2\pi ft) + j \sin(2\pi ft)] df$$

Οι εξισώσεις αυτές αποδίδουν αντιστοίχως τον ορθό και τον αντίστροφο μετασχηματισμό. Επίσης υπάρχει και η εισαγωγή της φανταστικής μονάδας  $j = \sqrt{-1}$  που βοηθάει στην έκφραση της διαφοράς φάσης μεταξύ των ημιτονικών συστατικών των σημάτων. Έτσι με βάση το θεώρημα αυτό κάθε σήμα είναι δυνατόν να αποδοθεί από πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό ημιτονικών όρων. Διακρίνονται δύο κατηγορίες σημάτων με την πρώτη να περιλαμβάνει σήματα περιοδικά και άπειρου χρόνου και η δεύτερη σήματα περιοδικά πεπερασμένου χρόνου. Τελειώνοντας έχουμε την γενική εξίσωση των σειρών Fourier:

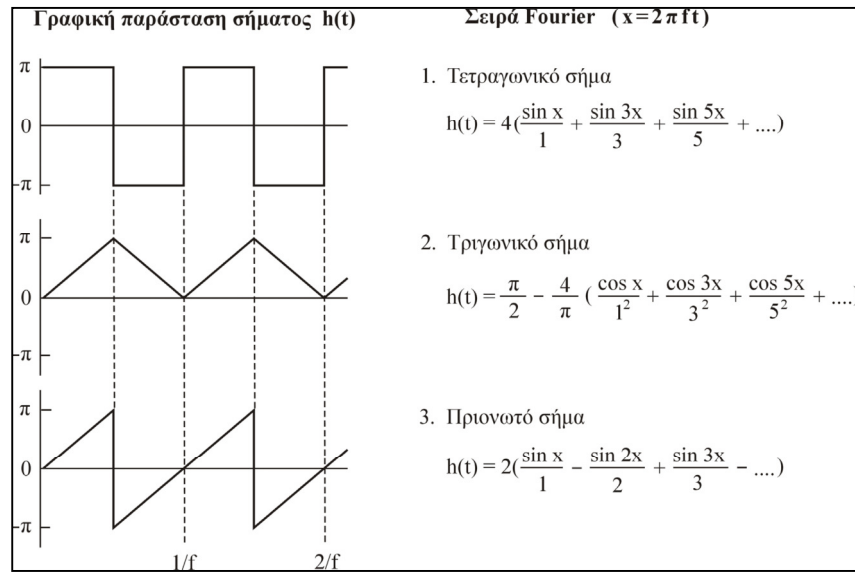
$$h(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi nft) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin(2\pi mft)$$

Το  $\frac{A_0}{2}$  είναι η συνεχή συνιστώσα του σήματος και οι συντελεστές  $A_n, A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots, B_m$  είναι τα πλάτη των ημιτονικών όρων. Η συχνότητα  $f$  ( $n=m=1$ ) είναι η θεμελιώδης, ενώ οι συχνότητες  $2f, 3f, \dots$  ( $n, m>1$ ) ονομάζονται αρμονικές.

Στην συνέχεια έχουμε τα φάσματα πλάτους και ισχύους, όπου είναι μια γραφική παράσταση που αντιπροσωπεύει την πυκνότητα πλάτους Volt/Hz ως προς την συχνότητα Hz. Τέτοια διαγράμματα θα γίνουν μέσω Matlab στην συνέχεια τις πτυχιακής και θα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Περιοδικά σήματα άπειρης διάρκειας και σε περιοδικά σήματα πεπερασμένης διάρκειας. Για τα πραγματικά σήματα δεν υπάρχουν καθορισμένη μαθηματική έκφραση οπότε πραγματοποιείται δειγματοληψία  $N$  τιμών στο σήμα και εισάγονται σε H/Y, όπου μπορούν να εκτελέσουν τον μετασχηματισμό με βάση όχι το ολοκλήρωμα Fourier, αλλά την αριθμητική του έκφραση που συνιστά τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier που δίνεται από τον τύπο:

$$H(f_k) = \sum_{i=0}^{N-1} h(t_i) [\cos(2\pi f_k t_i) + j \sin(2\pi f_k t_i)] \Delta t$$

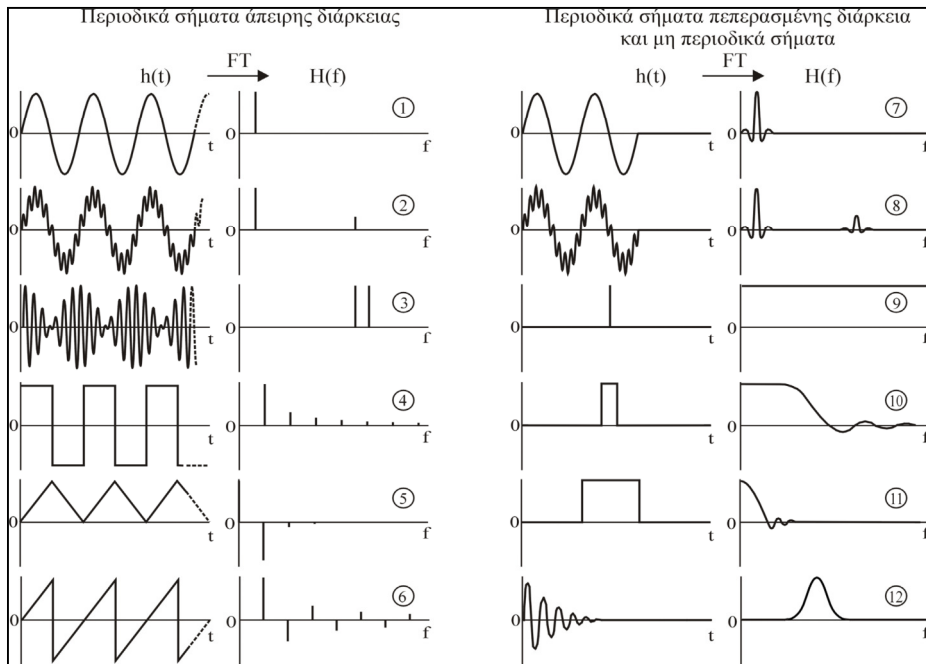
Ο υπολογισμός των διακριτών τιμών  $H(f_k)$  που αποτελούν το φάσμα συχνοτήτων του σήματος απαιτεί μεγάλο αριθμό μαθηματικών πράξεων ο οποίος αυξάνεται εκθετικά για όσο αυξάνεται ο αριθμός  $N$ . Οι υπολογιστές εκτελούν αυτές τις πράξεις με τη βοήθεια του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε από τους Cooley και Tukey που είναι ο Ταχύς μετασχηματισμός Fourier. Αυτό γιατί ελαχιστοποιεί τον αριθμό των απαιτούμενων πράξεων. Γενικά ο FFT χρησιμοποιείται στις φυσικές επιστήμες και στην τεχνολογία καθώς θα χρησιμοποιηθεί και στο κεφάλαιο 3 της πτυχιακής.



Σχήμα 2.6: Παραδείγματα περιοδικών σημάτων και οι αντίστοιχες σειρές Fourier

Το φάσμα πυκνότητας ισχύος (power density spectrum) είναι η γραφική παράσταση της πυκνότητας ισχύος σε Watt/Hz ως προς την συχνότητα και αποδίδει τη διασπορά της ενέργειας ενός σήματος σε διάφορες συχνότητες. Η ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του σήματος και τα φάσματα ισχύος δεν περιέχουν αρνητικές κορυφές όπως τα φάσματα πλάτους και στην ουσία αποτελούν τη γραφική παράσταση  $[H(f)]^2 \cdot f$ .





Σχήμα 2.6.1: Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier διαφόρων μορφών

Εάν το σήμα είναι ένας παλμός πολύ μικρής διάρκειας (βλ. σχήμα 2.6.1, εικόνα 9) τότε το αντίστοιχο φάσμα θα είναι λευκό. Έτσι θα υπάρχει ένα σήμα μιας μονάδας χωρίς καμία παραμόρφωση και η μονάδα θα έπρεπε να διαθέτει άπειρο εύρος ζώνης διέλευσης συχνοτήτων. Στο σχήμα 2.6.1 το ζεύγος στην εικόνα 9 παρουσιάζει την περίπτωση ημιτονικού σήματος που μειώνεται εκθετικά.

Ένας FFT ενός σήματος του χρονικού τομέα παίρνει τα δείγματα και μας δίνει ένα νέο σύνολο αριθμών που αναπαριστούν τις συχνότητες τα πλάτη και τις φάσεις των ημιτονοειδών κυμάτων που συνθέτουν τον ήχο. Ο τρόπος που δουλεύει είναι ότι παίρνει ένα μεγάλο κομμάτι χρόνου που ονομάζεται «πλαίσιο» και θεωρεί αυτό το κομμάτι σαν μία μοναδική περίοδο μιας επαναλαμβανόμενης κυματομορφής. Ο λόγος που δουλεύει είναι ότι οι περισσότεροι ήχοι είναι τοπικά στάσιμοι, δηλαδή σε κάθε σύντομη χρονική περίοδο ο ήχος μοιάζει σαν μια κανονική επαναλαμβανόμενη συνάρτηση.

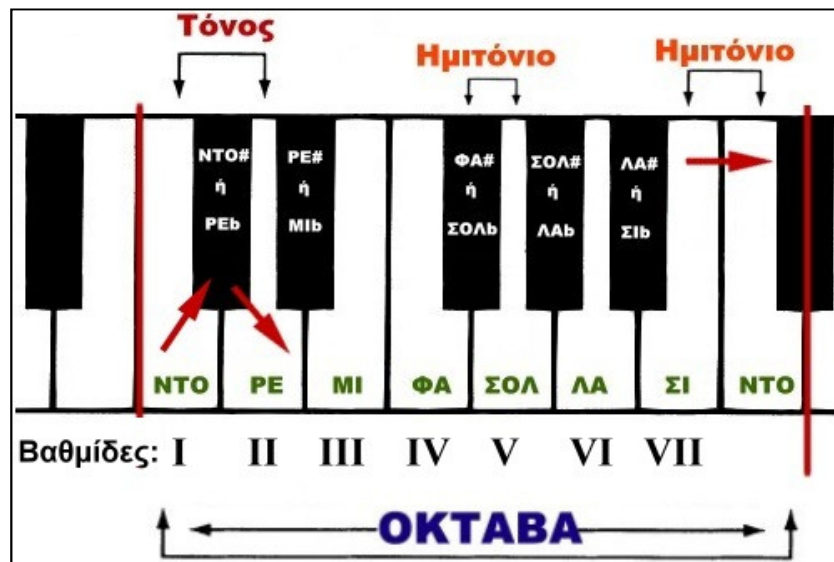
## 2.7 Τονικότητα ( Tonality )

Με τον όρο τονικότητα υποδηλώνουμε την τάση της μουσικής να ταιριάζει με αρμονία όλους τους κανόνες της μουσικής θεωρίας με βάση ένα μουσικό κομμάτι να γίνεται αρεστό. Βέβαια πάνω σε ένα μουσικό κομμάτι υπάρχει και ο παράγοντας του υποκειμενικού αφού δεν γίνεται να αρέσει σε όλους και στα γούστα των πολλών. Ο όρος τονικότητα βρήκε εφαρμογή στην κλασική μουσική το 17<sup>ο</sup> και 19<sup>ο</sup> αιώνα στην Δυτική Ευρώπη. Επίσης ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στα μέσα του 19<sup>ο</sup> αιώνα από τον Alexandre Etienn Choron και Francois Josheph Fetis. Στην αρχαιότητα ο Πυθαγόρας διατύπωσε με τα μαθηματικά ένα μεγάλο μέρος της τονικότητας, δηλαδή με τα διαστήματα που υπάρχουν στους κανόνες της θεωρίας της μουσικής και στην συνέχεια την ανάλυση τους με μαθηματικού τύπους. Στην βάση της μουσικής όλα μπορούν να εκφραστούν μέσα από τα μαθηματικά (διαστήματα, τονικές, ρυθμοί, χρόνοι κτλ...). Το κεντρικό σημείο μια κλίμακας δηλαδή η βασική νότα είναι τονικό κέντρο. Για να είναι η πορεία μιας μελωδίας κατανοητή και αποδεκτή από το κοινό, θα πρέπει αυτή να επανέρχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα και να στέκεται σε αυτό το τονικό κέντρο. Έτσι, δημιουργούνται οι μουσικές φράσεις και οι περίοδοι. Ιστορικά, ο επικρατέστερος τρόπος να εξηγηθεί η βάση της τονικότητας είναι η φυσική σειρά των αρμονικών. Ήδη από την αρχαιότητα οι άνθρωποι είχαν παρατηρήσει ότι από τη διαίρεση μιας παλλόμενης χορδής προκύπτουν φθόγγοι που ηχούν καλά όταν συνδυάζονται μεταξύ τους. Όσο πιο απλές ήταν οι αναλογίες της διαίρεσης, τόσο πιο σύμφωνοι οι φθόγγοι μεταξύ τους. Για παράδειγμα, μια χορδή που διαιρείται στα 2 και πάλλεται το 1 κομμάτι της, δίνει την οκτάβα ( 2:1). Αν διαιρεθεί στα 3 και πάλλονται τα 2/3, έχουμε την πέμπτη ( 3:2).

Στις αρχές του 16<sup>ου</sup> αιώνα καθιερώθηκε η χρήση δύο μουσικών τρόπων του μείζονα και του ελάσσονα. Στην συνέχεια της αρμονία χρησιμοποιούνται οι μείζονες και οι ελάσσονες κλίμακες σαν βάση για την δημιουργία μίας μελωδίας. Έτσι, η πορεία κάθε μελωδίας για να γίνεται αποδεκτή από τους ακροατές και να μπορούν να κατανοούν τμηματικά την εξέλιξή της, έπρεπε σε τακτά διαστήματα να επανέρχεται

και να στέκεται λίγο ή περισσότερο, σε αυτή την πρώτη νότα κάθε κλίμακας, δημιουργώντας έτσι μουσικές φράσεις και μουσικές περιόδους, κατ' αντιστοιχία του προφορικού λόγου. Όταν επαναφέρεται σε τακτά διαστήματα το τονικό κέντρο της κλίμακας ονομάζεται τέλεια Πτώση, και γενικά χρησιμοποιείται σε πολλά μουσικά κομμάτια, όπου δίνει το αίσθημα για το κλείσιμο του κομματιού.

Η θεωρία της μουσικής και οι κανόνες της αρμονίας που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των κλασικών μουσικών κομματιών και την εξέλιξη τους σε αμέτρητα είδη μουσικών, όπως η metal, rock, pop, house..., απαρτίζεται από αμέτρητους κανόνες και περιορισμούς. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε μερικούς από τους κανόνες που είναι απαραίτητοι και θα χρειαστούν για την ανάλυση της τονικότητας μέσα από διαγράμματα ενός μουσικού σήματος στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 2.7: Αναλυτικό σχεδιάγραμμα νοτών πάνω σε κλειδοκύμβαλο καθώς και τα χαρακτηριστικά υπάρχουν για τα διαστήματα

Τα διαστήματα είναι πολύ σημαντικά για την τήρηση των κανόνων, δηλαδή είναι η βάση από όπου απαρτίζονται και στοιβάζονται οι νότες μεταξύ τους. Τα διαστήματα στις μείζονες χωρίζονται σε μεγάλα, μικρά, καθαρά, αυξημένα και ελαττωμένα. Αυτό ισχύει γιατί αν πάρουμε για παράδειγμα την νότα ντο-μι βαθμού 1 θα έχουμε 2 τόνους βλ. σχήμα 2.7 και θα είναι ένα διάστημα δευτέρας και μεγάλο. Στην συνέχεια όλα τα διαστήματα που έχουν ένα ημιτόνιο είναι τα μικρά. Τα διαστήματα στις μείζονες σε συνδυασμό με το σχήμα 2.7 είναι:

	Μεγάλα	Μικρά	Καθαρά	Αυξημένα	Ελαττωμένα
2ας	1-2-4-5-6	3-7	--	--	--
3ης	1-4-5	2-3-6-7			
4ης	--	--	1-2-3-5-6-7	4	--
5ης			1-2-3-4-5-6	--	7
6ης	1-2-4-5	3-6-7	--	--	--
7ης	1-4	2-3-5-6-7	--	--	--
8ης	--	--	1-2-3-4-5-6-7	--	--

Ας ξεκινήσουμε όμως με τις μείζονες κλίμακες και ελάσσονες με οπλισμό # όπου χρησιμοποιείται και στο κομμάτι που θα αναλυθεί μετά. Οι μείζονες και ελάσσονες κλίμακες με οπλισμό # είναι:

Μείζονες με #	Ελάσσονες με #	Οπλισμός
1. ΣΟΛ	μι	φα#
2. ΡΕ	σι	φα#-ντο#
3. ΛΑ	φα#	φα#-ντο#-σολ#
4. ΜΙ	ντο#	φα#-ντο#-σολ#-ρε#
5. ΣΙ	σολ#	φα#-ντο#-σολ#-ρε#-λα#
6. ΦΑ#	ρε#	φα#-ντο#-σολ#-ρε#-λα#-μι#
7. ΝΤΟ#	λα#	φα#-ντο#-σολ#-ρε#-λα#-μι#-σι#

Το μουσικό κομμάτι όταν θα ξεκινήσει από την νότα σολ θα πρέπει να έχει και τον κατάλληλο οπλισμό στην φα# αλλιώς θα ακούγεται άτονο. Μέσα σε ένα μουσικό κομμάτι οι νότες πρέπει να είναι συντονισμένα έτσι ώστε να υπάρχουν τα διαστήματα στον σωστό χρόνο και στην σωστή σειρά με του σωστούς οπλισμούς και τις σωστές τονικότητες.

Τελειώνοντας το κεφάλαιο 2 υπάρχει το υπόβαθρο για την μελέτη που θα διεξαχθεί στην συνέχεια και έπειτα την ανάλυση των αποτελεσμάτων μέσα από διαγράμματα Matlab.

### Κεφάλαιο 3 Μελέτη και Υλοποίηση των κριτηρίων

Στο κεφάλαιο 3 θα πραγματοποιηθεί η υλοποίηση σε κώδικα Matlab των κριτηρίων **ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT)**, **Τονικότητα (Tonality)**, τον **Θόρυβο (Signal to Noise ratio)** και την **Ακουστότητα του τραγουδιού (Threshold of Audibility)** μέσα από πίνακες που θα εμφανίζουν σε διαγράμματα τις μεταβολές του εισαγόμενου σήματος που είναι ένα γνωστό τραγούδι των Metallica το Nothing else matters. Η πληροφορία που παίρνουμε είναι σε κομμάτια των 1024/sec. Έχουν χωριστεί σε 3 κομμάτια, αρχή κομματιού, μέση και τέλος και έχουν απορριφτεί τα επαναλαμβανόμενα μέρη του κομματιού. Μέσα από κώδικα Matlab που έχει αναπτυχθεί για να προσομοιώνει MPEG ψυχοακουστικά μοντέλα από τον Jonnathan Boley και Vishweshwara Rao το 2003 στο πανεπιστήμιο του Μαϊάμι, **χρησιμοποιούμε τους πίνακες που έχουν φτιάξει και έχουμε προσθέσει και διορθώσει τον κώδικα για την υλοποίηση των κριτηρίων που αναφέραμε.**

Το σήμα που θα αναλυθεί είναι το μουσικό κομμάτι εκτελεσμένο σε κλασσικό πιάνο σε ειδικά διαμορφωμένη αίθουσα για την συλλογή των σημάτων. Δεν υπάρχουν τα φωνητικά ή άλλο μουσικό όργανο. Έπειτα ψηφιοποιήθηκε και περάστηκε σαν αρχείο wav. Στην συνέχεια μέσα από τον κώδικα του Matlab πήραμε τα αρχεία αυτά και εφαρμόσαμε το ψυχοακουστικό μοντέλο και τα κριτήρια που θέλουμε.

### 3.1 Υλοποίηση FFT

Κώδικας Matlab που υπολογίζει την **FFT** ισχύ (magnitude) και την φάση (phase). Όλα τα στάδια πραγματοποιούνται σε 1024 δείγματα (samples).

```
function Replot(value)
% Εκ νέου μεταβλητές
global Y s r f r_hat f_hat cw e cb en cbb tbb bcb
global nbb nbw thrw THRw Fs epart npart iblen_index
load ('tables.mat');
figure(2); clf;
switch value

case 1
    subplot(2,1,1), semilogx([0:Fs/1024:(Fs/2)],r(3,1:513)); title('Magnitude of FFT');
    subplot(2,1,2), semilogx([0:Fs/1024:(Fs/2)],f(3,1:513)); title('Phase of FFT');
    xlabel('Frequency (Hz)');
end
```

Εδώ έχουμε την δημιουργία πινάκων με διαγράμματα για να δείχνει το μέγεθος και την φάση του FFT σε σχέση με την συχνότητα. Στο αποτέλεσμα θα έχουμε δύο πίνακες που θα μας δείχνει το εισερχόμενο σήμα και την ανάλυση που γίνεται στο μέγεθος και στην φάση μέσω του FFT.

```
function [r,f] = Spectrum(s, r, f)
sw = s .* (0.5 - 0.5*cos((2*pi*([1:1024]-0.5))/1024)); % Είναι το Hann Window
r(1:2,:) = r(2:3,:);
f(1:2,:) = f(2:3,:);
r(3,:) = abs(fft(sw));
f(3,:) = angle(fft(sw));
```

Στην συνέχεια έχουμε το Hann window όπου χρησιμοποιείται για την μετατροπή Fourier μέσα στο Matlab.

### 3.2 Τονικότητα (Tonality)

```
case 2
    plot(tbb); title('Tonality Index'); xlabel('Sub-Band Number');
end
```

```
function tbb = CalcTonality(cbb)
tbb = -0.299 - 0.43*log(cbb);
tbb=tbb/(max(tbb)-min(tbb));
tbb=1-(tbb-min(tbb));
```

Στην τονικότητα έχουμε πάλι την εισαγωγή του στο Gui να γράφει πάνω Tonality και έπειτα τις μεταβλητές που θα μας δείξει πότε αλλάζουν γίνονται οι συχνότητες μεγάλες και πότε μικρές, δηλαδή τον δείκτη της τονικότητας. Στην ουσία θα δούμε πότε αλλάζουν οι νότες και οι συγχορδίες. Στο αποτέλεσμα θα δούμε έναν πίνακα με το σήμα να έχει κορυφές και καμπυλώσεις που θα δείχνουν πότε αλλάζει η νότα και σε τη ύψος είναι.

### 3.3 Θόρυβο (Signal to Noise ratio)

```
case 3
    plot(SNRb); title('SNR'); xlabel('Sub-Band Number');
end
```

```
function SNRb = CalcSNR(tbb)
load ('tables.mat'); % Καλεί την μεταβλητή tables
NMTb = 5.5; % Υπολογίζει τον θόρυβο σε dB
SNRb = max(Table3D3b(:,4)', tbb .* Table3D3b(:,5)'+(1-tbb)*NMTb);
```

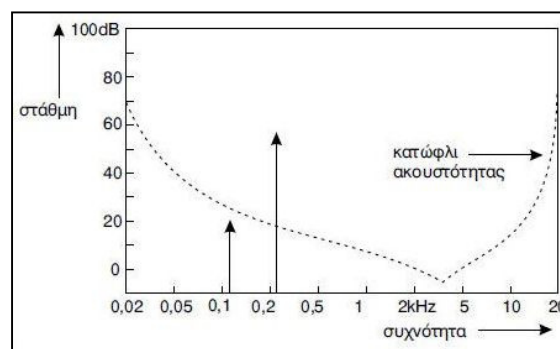
Στον θόρυβο έχουμε πάλι την εισαγωγή του στον πίνακα με το όνομα SNR καθώς και το κομμάτι που καλείται να υπολογίσει τον θόρυβο σε dB. Το αποτέλεσμα εδώ θα είναι ένας πίνακας με διάγραμμα που θα μας δείξει τον θόρυβο σε dB μέσα στο σήμα.

### 3.4 Ακουστότητα του τραγουδιού (Threshold of Audibility)

```
case 4
    semilogx([0:Fs/1024:(Fs/2)],thrw); title('Absolute Threshold');
    xlabel('Frequency (Hz)');
end
```

```
function thrw = CalcThresh(nb)
load ('tables.mat');
thrw = max(nb, abstable);
```

Στην ακουστότητα πρέπει να τονίσουμε ότι έχει γίνει από πριν υπολογισμός των nb και abstable μεταβλητών και είναι η σύμπτυξη και των δύο που εμφανίζεται. Ο υπολογισμός που γίνεται είναι στην ενέργεια του εισαγόμενου σήματος. Όλα υπολογίζονται σε dB. Το αποτέλεσμα εδώ που πρέπει να μας δείχνει είναι ένας πίνακας με το διάγραμμα να ακολουθεί το κατώφλι ακουστότητας σαν το σχήμα 3.4. Δηλαδή είναι στις σωστές συχνότητες και εντάσεις έτσι ώστε ο άνθρωπος να μπορεί να ακούσει την μουσική.





Σχήμα 3.4 : Κατώφλι ακουστότητας

### 3.5 Αποτελέσματα Κομμάτι 1 (αρχή του μουσικού κομματιού)

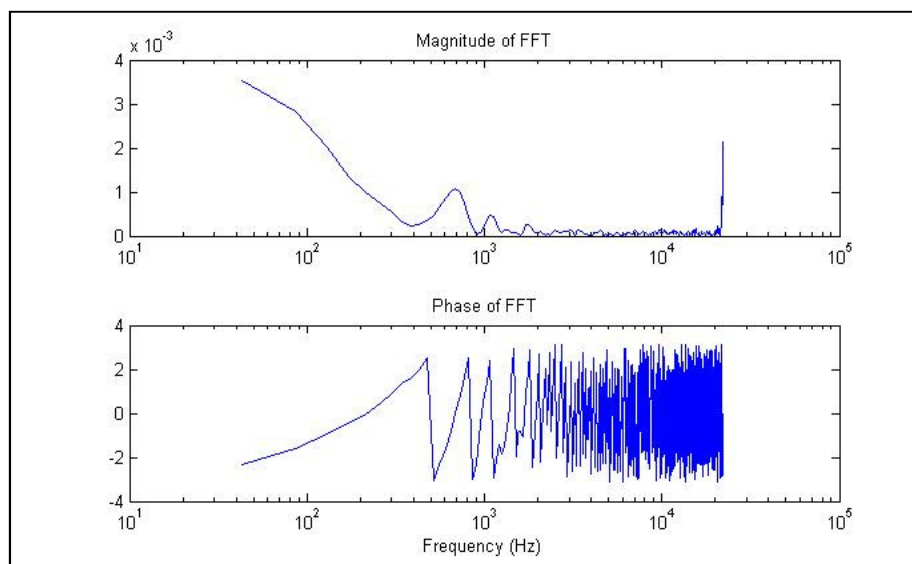
Τα αποτελέσματα της αρχής του μουσικού κομματιού είναι μέρος από ζώνες τις οποίες έχουμε πάρει τον μέσο όρο. Γενικά σε όλα τα δείγματα δεν αποκλείει η μία ζώνη από την άλλη και όλα βρίσκονται μέσα στα όρια των συχνοτήτων.

Για την εισαγωγή του κομματιού σε wav αρχείο ορίστηκε από τον κώδικα:

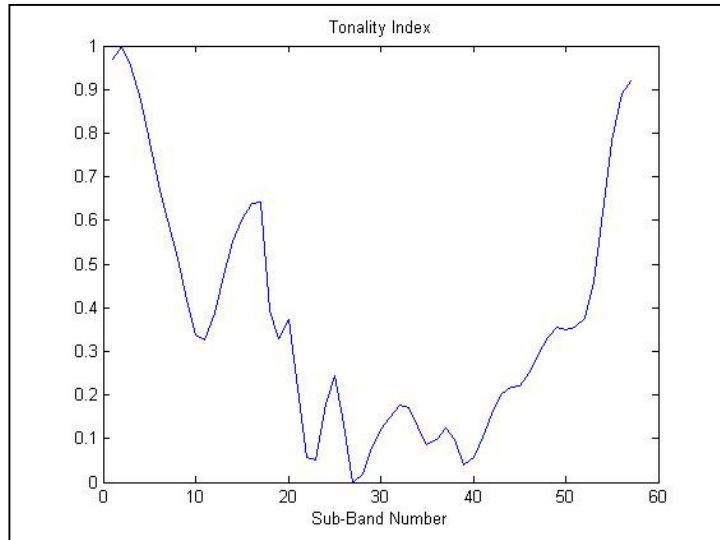
case 1

```
name = uigetfile('*.wav', 'Please choose a WAV file');  
if name ~= 0  
    X = wavread(name,[1 100000]);  
    Y=X';  
    Initialize(1);  
end
```

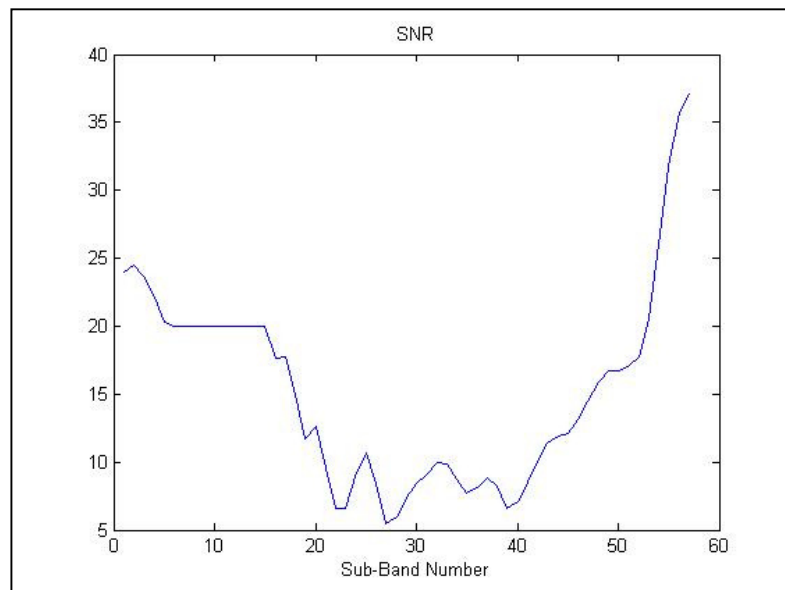
Στην συνέχεια έχουμε τα αποτελέσματα στο πρώτο μέρος του κομματιού.



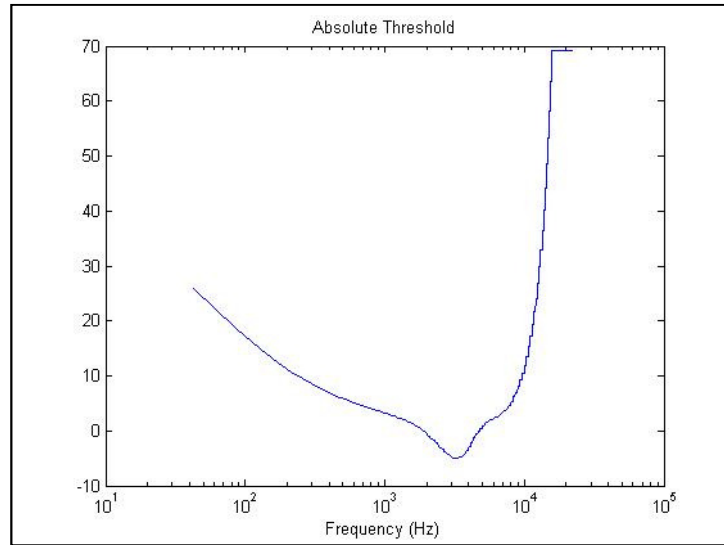
Σχήμα 3.5.1: Μετασχηματισμός FFT στο μέγεθος (πάνω διάγραμμα) και φάση (κάτω διάγραμμα)



Σχήμα 3.5.2: Τονικότητα ανά ζώνη κομματιού

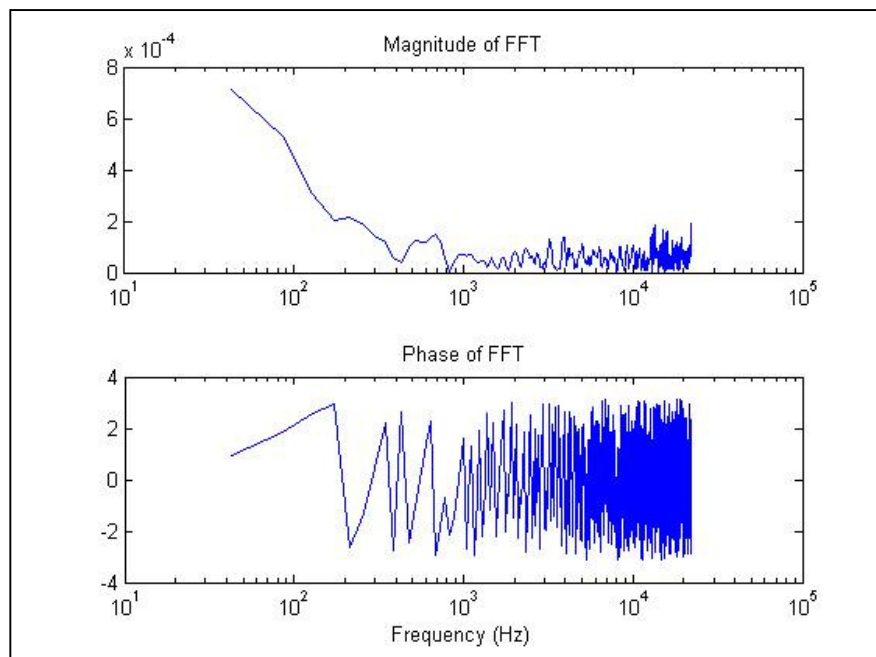


Σχήμα 3.5.3: Ο θόρυβος που υπάρχει στην ζώνη αυτή σε dB

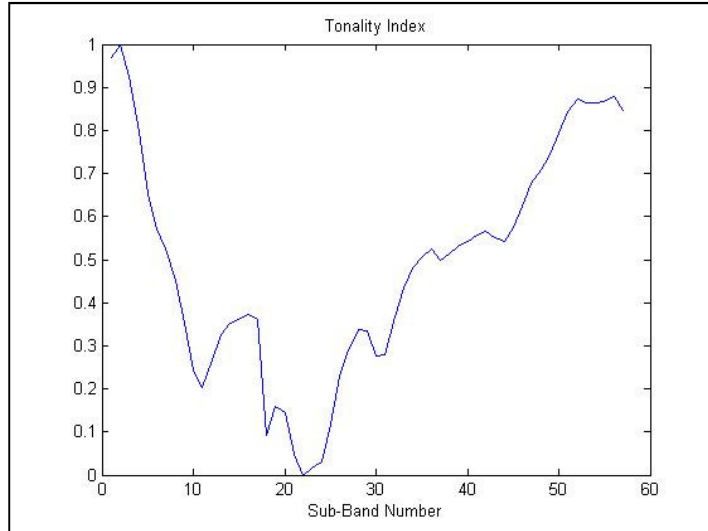


Σχήμα 3.5.4: Ακουστότητα σήματος

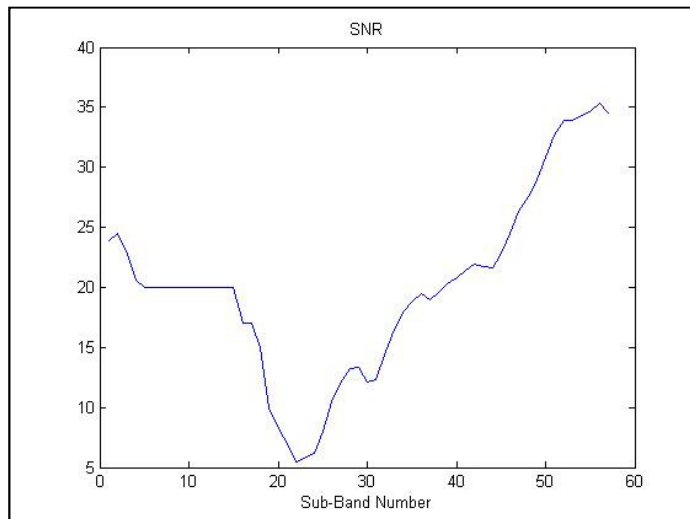
### 3.6 Αποτελέσματα Κομμάτι 2 (μέση του μουσικού κομματιού)



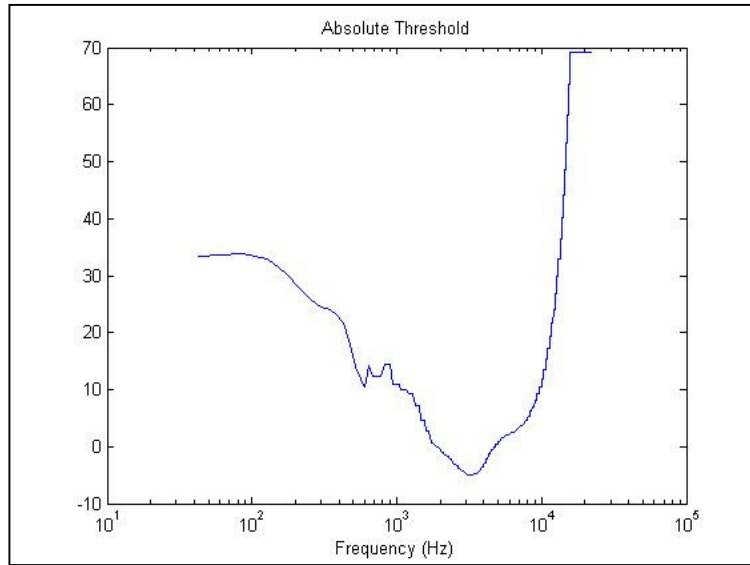
Σχήμα 3.6.1: Μετασχηματισμός FFT στο μέγεθος (πάνω διάγραμμα) και φάση (κάτω διάγραμμα)



Σχήμα 3.6.2: Τονικότητα σήματος

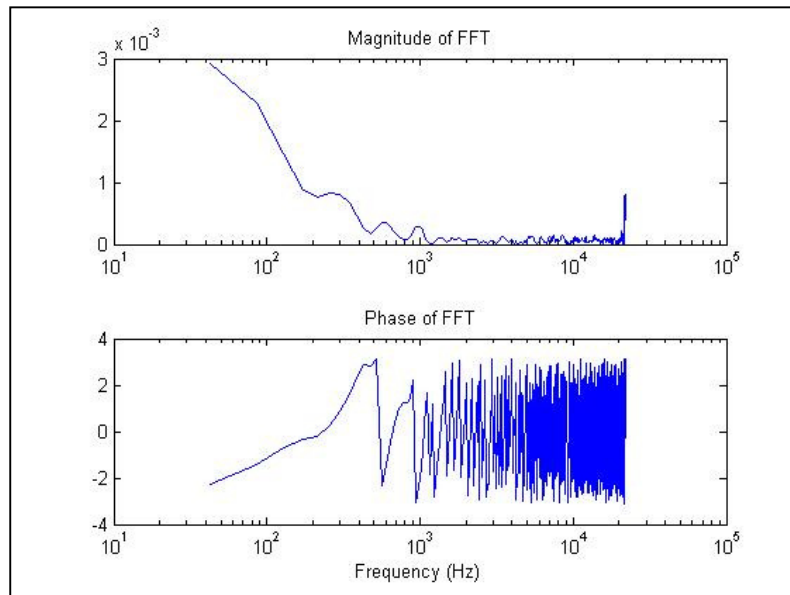


Σχήμα 3.6.3: Ο θόρυβος που υπάρχει στην ζώνη αυτή

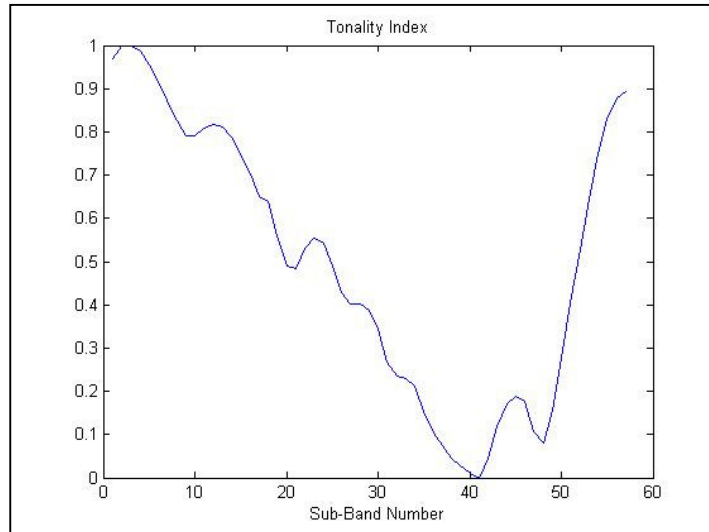


Σχήμα 3.6.4: Ακουστότητα σήματος

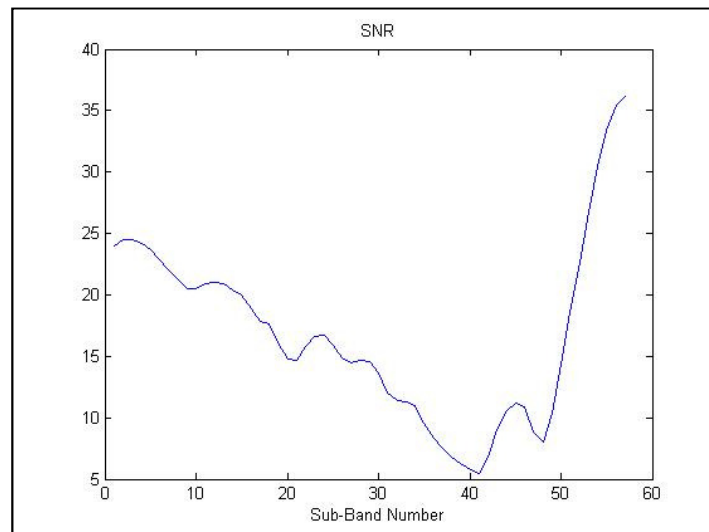
### 3.7 Αποτελέσματα Κομμάτι 3 (τέλος του μουσικού κομματιού)



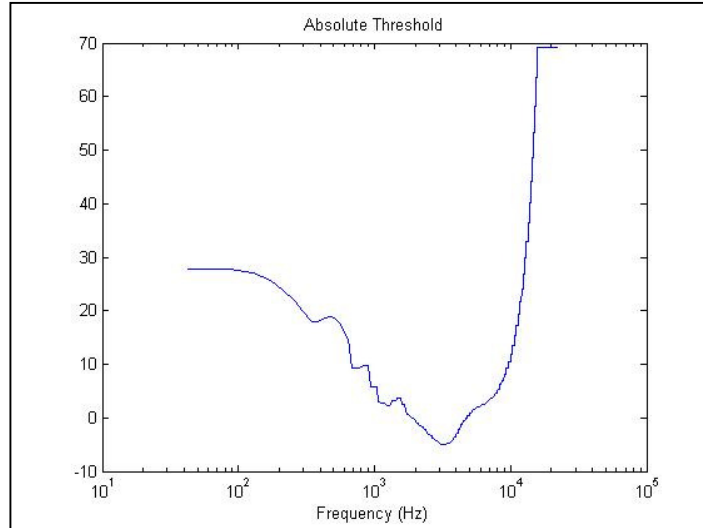
Σχήμα 3.7.1: Μετασχηματισμός FFT στο μέγεθος (πάνω διάγραμμα) και φάση (κάτω διάγραμμα)



Σχήμα 3.7.2: Τονικότητα σήματος



Σχήμα 3.7.3: Ο θόρυβος που υπάρχει στην ζώνη αυτή



Σχήμα 3.7.4: Ακουστότητα σήματος

## Κεφάλαιο 4 Συμπέρασμα των αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο 4 θα δούμε τι συμπεράσματα βγαίνουν από τα αποτελέσματα καθώς θα αναλυθεί και το κομμάτι της αρμονία, δηλαδή θα γίνει μια μικρή ανατομία στις νότες από την παρτιτούρα του κομματιού για να φανεί αν τηρούνται οι βασικοί κανόνες.

### 4.1 Γραφήματα

Τα γραφήματα που βρήκαμε είναι απλά μια μαθηματική απεικόνιση των συχνοτήτων και όλων των επιμέρους χαρακτηριστικών του ήχου και συνεπώς του μουσικού κομματιού που εισάχθηκε. Σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να συνάγουμε το συμπέρασμα ότι ένα τραγούδι πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά συχνοτήτων καθώς και εντάσεων ώστε να γίνει διάσημο, διαχρονικό ή αισθησιακά καλό. Πάντοτε υπάρχει το υποκειμενικό χαρακτηριστικό της αρεσκείας και της κλήσης του καθενός για να αποκαλέσει ένα τραγούδι μια μεγάλη επιτυχία. Στην σημερινή εποχή ένα διάσημο τραγούδι μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μίας προπαγάνδας και διαφήμισης χωρίς να προσφέρει καμία αίσθηση στον κόσμο. Απλά έγινε διάσημο για να γίνει και στην συνέχεια να μην ακουστεί καθόλου.

Στο σύνολο των γραφημάτων που είδαμε ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι αυτό της τονικότητας και της ακουστότητας. Στα γραφήματα της ακουστότητας βλέπουμε καθαρά τις συχνότητες να βρίσκονται στα όρια της ακουστότητας της ανθρώπινης ακοής χωρίς να είναι επιβλαβές για το ακουστικό σύστημα (βλ. σχήμα 3.4). Αυτό ισχύει και για τις 3 περιπτώσεις. Το επόμενο στάδιο είναι η τονικότητα στην οποία βλέπουμε τις κορυφές των γραφημάτων να αυξομειώνονται. Αυτό είναι όταν αλλάζει μια νότα στην άλλη καθώς το πλάτος της συχνότητας αλλάζει όταν μία διαφορετική νότα παίζεται. Φυσικά η μουσική δεν περιορίζεται μόνο σε διαδοχικές νότες αφού πολλές μπορούν να παιχτούν και ταυτόχρονα με τα ανάλογα διαστήματα. Επεκτάσεις μπορούν επίσης να γίνουν και προς την κατεύθυνση των διαφόρων συγχορδιών διευρύνοντας το ρεπερτόριο προς ανάλυση. Παρά τα ενθαρρυντικά



αποτελέσματα που δίνει η εφαρμογή της θεωρίας ομάδων στην μουσική ανάλυση δεν παύουν να δημιουργούνται προβλήματα στην προσέγγιση αυτή. Τα προβλήματα αυτά αφορούν κυρίως θέματα σημειολογίας και αποσαφήνισης ορισμών. Όσον αφορά εννοιολογικά ζητήματα υπάρχουν αρκετοί όροι με διπλή έννοια. Ένα παράδειγμα είναι ο τόνος ο οποίος απεικονίζεται με ποικίλους τρόπους σε βιβλία και συγγράμματα. Είναι δηλαδή το διάστημα μεταξύ δύο φθόγγων αλλά και τόνος σημαίνει την πρώτη νότα μίας κλίμακας.

Ένα μουσικό κομμάτι για έναν μπορεί να φαίνεται απλό και λιτό αλλά η σύνθεση, η αντίληψη και η εκτέλεση είναι μια δύσκολη διαδικασία που χρειάζεται χρόνο και πολύ προσπάθεια για το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό κανένα διάγραμμα δεν μπορεί να το ορίσει και να δείξει με ακρίβεια την σωστή σειρά για να πετύχει το τραγούδι. Αυτό που μπορεί όμως να οριστεί είναι η τονικότητα που δείχνει μία έννοια ακουστικά σωστή. Έχουμε ακούσει πολλές φορές μελωδίες που είναι χρονικά άτονες είτε μελωδικά ατελές. Εδώ έχουμε τους κανόνες τις θεωρίας της μουσικής που βασίζονται σε όλες τις κλίμακες, τις τονικότητες και τις ακουστικά και συχνοτικά φάσεις του ήχου με αποτέλεσμα μία μελωδία.

## 4.2 Μουσική θεωρία κομματιού

Η μουσική είναι η επιστήμη που για να γίνει κατανοητή από την ανθρώπινη διάνοια χρησιμοποιεί στο εξωτερικό επίπεδο δύο βασικά δομικά στοιχεία, τον ήχο και το χρόνο, θωρώντας το ένα σαν ύλη και το άλλο σαν ρυθμιστή της μορφής που την προσδιορίζει και ως τέχνη. Σύμφωνα με τον Πυθαγόρα οι επιστήμες ήταν τρεις. Φιλοσοφία, Αστρονομία και Μουσική, και η υστάτη των επιστημών αυτών ήταν η Μουσική, όλες οι υπόλοιπες επιστήμες θεωρούνταν «τέχνες». Σήμερα συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Η μουσική θεωρείται «τέχνη» και οι υπόλοιπες «επιστήμες». Πριν ξεκινήσουμε όμως με την παρτιτούρα πρέπει να δούμε την αρμονία από την αρχή. Η αρμονία όπως έχουμε αναφέρει είναι μία μαθηματική θεωρία όπου σαγήνευσε τον Πυθαγόρα κατά την αρχαιότητα και ασχολήθηκε τόσο πολύ με αυτήν.

Οι Πυθαγόρειοι είχαν διαπιστώσει ότι για την αρμονία δεν είχαν σημασία τα απόλυτα μήκη των χορδών (το κούρδισμα δηλαδή του οργάνου) μιας λύρας αλλά η μεταξύ τους σχέση η οποία καθορίζει και την μελωδία στη μουσική. Είναι η σχέση μεταξύ δύο χορδών (των μηκών τους) μιας λύρας η οποία αποτελεί ένα μουσικό διάστημα (δίχορδο) - όπως ακριβώς και στη θεωρία των λόγων μεταξύ αριθμών μπορεί διαφορετικοί αριθμοί (αριθμητής και παρονομαστής) να δίνουν το ίδιο κλάσμα:  $1/2 = 4/8$ . Ένα δίχορδο λοιπόν μπορούμε να το φανταστούμε ως λόγο αριθμών (κλάσμα). Οι αριθμοί αυτοί θα είναι τα μήκη των χορδών μιας λύρας. Χρησιμοποιούνταν η οχτάχορδη λύρα (Βαβυλωνιακής προέλευσης). Οι ονομασίες των χορδών της αναφέρονται από τον Νικόμαχο τον Γερασινό (2 αιώνας μ.Χ.) στο έργο του "πυθαγόρειου αρμονικού εγχειριδίου κεφάλαια", χωρίο 11,4,13-30) Τον Φιλόλαο (5-4 αιώνας π.Χ.) στο έργο του "περί φύσεως" τον ενδιαφέρουν μόνο οι χορδές με μήκη 6, 8, 9 και 12 μονάδες μήκους αντίστοιχα (ανεξάρτητα όπως τονίσαμε από την μονάδα μήκους που χρησιμοποιείται κάθε φορά, αφού αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η μεταξύ τους σχέση και όχι τα απόλυτα μεγέθη).

Οι Πυθαγόρειοι ασχολούνταν με τα μουσικά διαστήματα  $2/1$  ("αρμονία" ή οκτάβα) και  $3/2$  ("δί' οξεία" ή "δια πέντε"). Τους απασχολούσε η εύρεση κοινού μέτρου για τα διαστήματα αυτά. Η ανακάλυψη δηλαδή κάποιας σχέσης συμμετρίας (ενός διαστήματος που κάποιο πολλαπλάσιο του να παράγει τα διαστήματα αυτά).

Η ανθυφαίρεση (δηλαδή ο αλγόριθμος εύρεσης του μέγιστου κοινού διαιρέτη δύο αριθμών) ήταν μέθοδος γνωστή στους πυθαγορείους πολύ πριν τον Ευκλείδη, ο οποίος την αναφέρει στο VII βιβλίο των στοιχείων του (πεπερασμένη ανθυφαίρεση αριθμών) και στο X βιβλίο (άπειρη ανθυφαίρεση μεγεθών) και πρέπει να ήταν το ουσιαστικό βήμα της μετάβασης (αναφέρεται και από τον Αριστοτέλη ένας ανθυφαιρετικός ορισμός της αναλογίας στα "τοπικά") από την προγενέστερη (εμπειρική) θεωρία λόγων με βάση την αρμονία (πυθαγόρεια μαθηματική θεωρία της μουσικής) στην μετέπειτα εξελιγμένη μορφή τους όπως υπάρχει στον Ευκλείδη. Αυτά είναι περί μαθηματικής απόδειξης και μεριάς της μουσικής. Στην συνέχεια έχουμε κάποια θεωρητικά μέρη όπως η μελωδία και ρυθμός. Όλα αυτά συμβάλουν για να γίνει ένα κομμάτι πιο κατανοητό.

Έπειτα έχουμε την μελωδία. Στο καθημερινό μας λεξιλόγιο η λέξη μελωδία χρησιμοποιείται για να εκφράσει την έννοια του ωραίου, του ευχάριστου, να περιγράψει κάτι που μπορούμε να σιγομουρμούρουμε ή να τραγουδήσουμε, κάτι που μας αρέσει. Αυτό, όμως, αποδίδει μόνο ένα μικρό μέρος της έννοιας που έχει η λέξη μελωδία στη μουσική. Η μελωδία μπορεί να είναι σύντομη, όπως ένα μικρό «λάιτ μοτιβ» του Wagner ή να διαρκεί περισσότερο όπως σε ένα παραδοσιακό ινδιάνικο τραγούδι. Μπορεί ακόμα να είναι «χτισμένη» με πολλούς φθόγγους 3 , όπως οι μελωδίες του Mozart, ή με δυο τρεις, όπως σε ένα αφρικάνικο τραγούδι. Μπορεί να τραγουδιέται εύκολα, όπως σε ένα παιδικό παραδοσιακό τραγούδι ή πολύ δύσκολα, όπως σε μια σύνθεση του Berg. Όλα αυτά μπορεί να είναι μελωδίες. Με άλλα λόγια μελωδία είναι η διαδοχή των ήχων με διαφορετική οξύτητα, ασχέτως αν αυτή η διαδοχή μάς αρέσει, αν μπορούμε να την τραγουδήσουμε, αν περιέχει λίγες ή πολλές διαφορετικές οξύτητες, αν είναι εύκολη ή δύσκολη. Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '60 ο Persiceti (1961) - εισάγοντας και θεωρητικά κάτι που οι συνθέτες είχαν καθιερώσει πρακτικά πολλά χρόνια πριν - σημειώνει ότι κάθε ήχος μπορεί να διαδεχθεί κάποιον άλλον ή να προηγηθεί κάποιου άλλου.

Στην συνέχεια έχουμε τον ρυθμό. Η έννοια του ρυθμού είναι ίσως από τις πιο δύσκολες στη μουσική. Ο ρυθμός ενυπάρχει παντού γύρω μας, και είναι άλλοτε λιγότερο και άλλοτε περισσότερο εμφανής. Οι εποχές του έτους, οι χτύποι της καρδιάς μας, η ανατολή και η δύση του ηλίου: παντού στη φύση υπάρχει ένας ρυθμός ο οποίος όμως σχετίζεται κατά κύριο λόγο με την περιοδικότητα. Στη μουσική όμως, ρυθμός είναι η εναλλαγή της διάρκειας του ήχου. Η περιοδικότητα η οποία μπορεί να ενυπάρχει σε κάθε μουσική, τραγούδι ή οργανικό παίξιμο, εκφράζεται περισσότερο μέσα από την έννοια του μέτρου, το οποίο συχνά χρησιμοποιείται εσφαλμένα ως συνώνυμο του ρυθμού. Με άλλα λόγια, ρυθμό έχει και ένα ζειμπέκικο, του οποίου το μέτρο χτυπάμε σε παλαμάκια αλλά ρυθμό έχει και ένα μοιρολόι ή ένα τραγούδι της τάβλας. Με αυτή την έννοια, η αναφορά που κάνει ο Πλάτων «Η κίνηση σε τακτικά 15-26 χρονικά διαστήματα ας πάρει το όνομα ρυθμός» εκφράζει μάλλον την περιοδικότητα και όχι την έννοια του ρυθμού στη μουσική.

Η μελωδία, η αρμονία, ο ρυθμός, όπως τα έχουμε ορίσει, είναι στοιχεία τα οποία θα τα συναντήσουμε μόνο στη μουσική και πουθενά αλλού. Όμως, η συγκίνηση ή η ευχαρίστηση είναι στοιχεία τα οποία μπορούμε να τα συναντήσουμε

και σε άλλες μορφές τέχνης. Ένας πίνακας ζωγραφικής λόγου χάριν, ή ένα γλυπτό μπορεί να μας συγκινήσει. Ένα θεατρικό έργο επίσης μπορεί να μας κάνει να διασκεδάσουμε. Τέτοια στοιχεία τα συναντάμε και σε άλλες μορφές τέχνης, γι αυτό δεν χαρακτηρίζονται αποκλειστικά ως μουσικά. Το πώς όμως λειτουργούν, επηρεάζει τη σχέση μας με συγκεκριμένα μουσικά ιδιώματα ή με κομμάτια μουσικής. Ένα μουσικό ιδίωμα ή ακόμα και ένα συγκεκριμένο κομμάτι μας συγκινεί αν υπάρχουν αναφορές σε αυτό. Μπορεί να μας θυμίζει ένα πάρτι που είχαμε περάσει καλά. Μπορεί να μας κάνει να νιώθουμε μέλη μιας ομάδας (θρησκευτικής, πολιτικής, ποδοσφαιρικής, τοπικής κτλ). Μπορεί ακόμα να 'ταιριάζει' με τη διάθεση της στιγμής ή απλώς να είναι το αγαπημένο μας είδος. Και σίγουρα υπάρχει κάποια μορφή εξοικείωσης με αυτό. Όλα τα παραπάνω ισχύουν γιατί «η μουσική δεν είναι ένα φαινόμενο του φυσικού κόσμου αλλά μια ανθρώπινη κατασκευή» (Cook, 2000) Μια ανθρώπινη κατασκευή που μας συγκινεί, μας κινητοποιεί, μας κάνει να την απολαμβάνουμε. Όμως για να γίνουν όλα αυτά θα πρέπει, όχι απλώς να την ακούμε αλλά και να την 'διαβάζουμε'. Και λέγοντας 'διαβάζουμε' δεν εννοούμε τη σημειογραφία της μουσικής αλλά την κατανόηση της σπουδαιότητας της ως εγγενούς μέρους μιας κουλτούρας, μιας κοινωνίας, του εαυτού μας.

Η έμπνευση παίζει σημαντικό ρόλο στον κόσμο της μουσικής καθώς συμβάλει στην προβολή των συναισθημάτων την παρούσα χρονική στιγμή. Είναι δηλαδή μια μεταφορά αισθήματος του δημιουργού που την αποτυπώνει πάνω στην μελωδία. Μπορεί να είναι το αποτύπωμα του κάθε καλλιτέχνη αφού εμπνέει και χαλιναγωγεί το πνεύμα. Στην συνέχεια έχουμε το πρώτος μέρος του κομματιού σε νότες που παίχτηκε στο πιάνο και συλλέξαμε τα μουσικά σήματα.

The image shows a musical score for piano accompaniment, divided into two systems. The first system starts with a tempo marking of quarter note = 50. The first system includes chords Em, D, C, Em, D, C, Em. The second system includes chords D, C, G, B7, Em. The music is in 8/8 time and D major.

Σχήμα 4.2: Παρτιτούρα κομματιού 1 (αρχή)

Η βάση για την δημιουργία ενός μουσικού κομματιού είναι το μπάσο όπου βρίσκεται στο δεύτερο πεντάγραμμο στο κλειδί του Φα. Αφού αρχίζει με την νότα μι η συνέχεια των νοτών πρέπει να είναι στην σειρά μι-σολ-σι και στο κλειδί του Σολ πρέπει να υπάρχει μια από τις τρεις νότες. Στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι επιλογή του κάθε καλλιτέχνη τη θα χρησιμοποιήσει για να εκφραστεί. Στο σχήμα 4.2 βλέπουμε ότι ακολουθάει τους κανόνες της αρμονίας, περί διαστημάτων καθώς και νοτών. Αυτό βέβαια δεν είναι δεδομένο ότι κάποιος θα το ακολουθήσει αφού στην ιστορία υπάρχουν κομμάτια που ενώ έχουν την βάση τους, τους κανόνες επιλέγουν να αγνοήσουν κάποιους και να αλλοιώσουν άλλους. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η μουσική της Τζαζ αφού έχει αλλοιώσεις και παραμορφώσεις που ακούγονται αρμονικά αλλά δεν είναι κατά γράμμα με θεμέλιο στους κανόνες της αρμονίας. Στο δεύτερο και τρίτο μέρος του κομματιού υπάρχουν πάλι οι ίδιοι κανόνες τους οποίους δεν περικλείνει καθόλου. (βλ. σχήμα 4.2.1, 4.2.2)

So close no mat-ter how far. Could-nt be much more from the heart.

For- e- ver trust- ing who we a- re. And noth- ing else mat- ters.

Em D C G B7 Em

Σχήμα 4.2.1: Παρτιτούρα κομματιού 2 (μέση)

Em Am

C D Em D.S. al f D

Σχήμα 4.2.2: Παρτιτούρα κομματιού 3 (τέλος)

Τελειώνοντας, το κλειδί της επιτυχίας δεν βρίσκεται σε αντίφαση με την σκληρή δουλειά την μελέτη και την σωστή καθοδήγηση με ερεθίσματα από τον κόσμο γύρω σου. Κανείς δεν μπορεί να σου το μυστικό για να δημιουργήσεις μία τελειότητα που θα κρατήσει για πάντα. Αυτό που μπορείς να κάνεις είναι να πάρεις τις σωστές βάσεις να ακολουθήσεις την λογική (κανόνες) να δουλέψεις σκληρά και να αποδόσεις πιστά το συναίσθημα που σου δημιουργούν όλα τα σήματα γύρω σου. Αυτό πιστεύω ότι έχει πετύχει κάθε επιτυχημένος άνθρωπος στην ζωή του.

## Επίλογος

Η πτυχιακή αυτή εργασία ασχολήθηκε με τη θεωρία του ήχου και της μουσικής με του κανόνες που την απαρτίζουν από τον μαθηματικό, φυσικό κόσμο μέχρι την παρέμβαση του ανθρώπου για την δημιουργία δικών του έργων. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δημιουργήθηκε κώδικας Matlab για να εκφραστούν τα μουσικά σήματα σε ψηφιακή μορφή και να δούμε την δομή τους με άλλη οπτική.

Πιο συγκεκριμένα η εργασία αυτή ξεκινάει με την θεωρία του ήχου, πώς μεταφέρεται από τι αποτελείται. Έπειτα την ανατομία του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος και πώς αυτό δέχεται τον ηχητικό σήμα. Μετά με την αναγνώριση ηχητικού σήματος από τις τον Η/Υ και πως γίνεται η κωδικοποίηση. Στην συνέχεια με το κεφάλαιο 2 που αναλύουμε με μαθηματικά τα χαρακτηριστικά του ήχου μέσο μετασχηματισμού Fourier, θορύβου, τονικότητας και ακουστότητας.

Στο κεφάλαιο 3 έγινε μέσα από κώδικα Matlab η δημιουργία πινάκων και μεταβλητών που μας έδειξαν σε κυματομορφές την πορεία του μουσικού σήματος μέσα από μετασχηματισμό Fourier, τον θόρυβο που είχε η τονικότητα που υπήρχε και τέλος τα όρια της ακουστικής έτσι ώστε να αποδείξουμε και σε γραφήματα το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα το καταλαβαίνει. Στο πρακτικό μέρος είδαμε τα γραφήματα όλων των κριτηρίων, στο σήμα πλήρους φάσματος, που εισάγαμε και είχαμε αναλύσει στα προηγούμενα κεφάλαια. Τελειώνοντας στο κεφάλαιο 4 συνέβαλε στην ανάλυση της μουσικής θεωρίας στην αναζήτηση της επιτυχίας για μια διαχρονικό έργο.

## Βιβλιογραφία

- [1] BASSEVILLE, M. (1988). DISTANCE MEASURES FOR SIGNAL PROCESSING AND PATTERN. *Elsevier Science Publishers B.V.*
- [2] J., G. A. (October 1976). *Distance Measures for Speech Processing*. IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Proc., Vol. 24, No. 5.
- [3] OHNSTON, J. D. (1988). Transform Coding of Audio Signals Using Perceptual. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, σσ. VOL. 6, NO. 2,.
- [4] Mourjopoulos, M. P. (n.d.). A Statistical Study of the Variability and Features of Audio Signals: Some Preliminary Results.
- [5] P., J. N. (1984). *Digital Coding of Waveforms, Principles and Applications to Speech and Video*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [6] Philips, J. B. *Spatial Audio Processing\_\_MPEG\_Surround\_and\_Other\_Applications*.
- [7] Y., T. (October 1987.). *A Weighted Cepstral Distance Measure for Speech Recognition*. IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Proc., Vol. 35, No. 10.
- [8] Βασίλειος-Φοίβος, Μ. Α. (Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006). ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ.
- [9] Ζαρουχα, Θ. Σ. (Ιούνιος 2010). *Μοντελοποίηση και Επεξεργασία Ηχητικών Δεδομένων Για Αναπαραγωγή Σε Χώρους με Αντήχηση*.
- [10] Κελίρης, Α. Π. (Αθήνα, Ιούνιος 2012). *Χρονική και συχνοτική ανάλυση ακουστικών σημάτων ροχαλητού*.
- [11] Μουσάς, Χ. (Ιούνιος 2009). “iSEE” Διαδραστική Εγκατάσταση για την Εκτέλεση Ψυχοακουστικών Πειραμάτων.
- [12] ΤΣΙΑΤΣΟΣ, Θ. (2007). Ψηφιακός Ήχος.